

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Модификация непараметрического алгоритма моделирования и дуального управления многомерными процессами в условиях неопределенности Е.А. Чжан, Д.А. Кемпф	7
Построение генератора программного кода для решения инженерных задач О.В. Минакова, И.В. Трубников, О.В. Курипта	14
Прогнозирование поведения сети передачи данных в системе мониторинга телекоммуникационных сетей на основе модифицированного алгоритма Косарайю А.А. Рындин, Э.Р. Саргсян	20

Радиотехника и связь

Проектирование перспективных конструкций антенных решеток с диаграммообразующей схемой на основе печатной линзы Ротмана А.В. Ашихмин, А.В. Иванов, Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, Ф.С. Сафонов, С.М. Федоров, И.А. Зеленин	27
Техническая реализация критических узлов и устройств приема широкополосных радиосигналов Д.Г. Пантенков, В.П. Литвиненко	34
Проблемы обеспечения надежной радиосвязи на севере России Д.Ю. Муромцев, А.Н. Сысоев, В.М. Жуков	46
Интегрирование антенной решетки из несимметричных вибраторов с линзой Ротмана на многослойной печатной плате А.В. Ашихмин, А.В. Иванов, Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, К.С. Сафонов, С.М. Федоров, И.А. Зеленин	54
Разработка и реализация симметричного самоорганизующегося нейросетевого декодера М.В. Хорошайлова	60
Методика выбора оптимального расположения компонентов на многослойных печатных платах с учетом внешних механических воздействий З.Х.М. Аль-Араджи, О.Ю. Макаров, А.В. Муратов, А.В. Турецкий, Х.А. Суайкат	65
Разработка и исследование линейной антенной решетки из печатных логопериодических антенн, запитанных с помощью линзы Ротмана А.В. Ашихмин, А.В. Иванов, Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, Ф.С. Сафонов, С.М. Федоров, И.А. Зеленин	73
Моделирование передачи диагностирующих сигналов через загруженный ретранслятор с нелинейной передаточной характеристикой Р.И. Буров, Б.В. Илларионов, Д.С. Малиев	79
Декодирование линейных блоковых кодов с использованием нейронных сетей на основе персептронов высокого порядка Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, А.В. Муратов, М.В. Хорошайлова, Н.В. Ципина	87

Машиностроение и машиноведение

Построение пространственной модели остаточного слоя при полигональном растачивании тонкостенных деталей В.В. Куц, Т.А. Толмачева.....	95
Оптимизация режимов резания с учетом уровня вибрации на основе применения методов искусственного интеллекта А.В. Анцев, Е.С. Янов, Ч.Х. Данг.....	101
Исследование параметров контактного взаимодействия индентора с поверхностью при обработке методами поверхностного пластического деформирования В.П. Федоров, О.Н. Кириллов, М.Н. Нагоркин, Е.В. Ковалева.....	110
Исследование влияния режимов обработки на эффективность очистки листового проката для полых шариков от окалины А.В. Королев, А.В. Панфилова, О.П. Решетникова, Б.М. Изнаиров, А.Н. Васин.....	120

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Modification of a nonparametric algorithm of modeling and dual-mode control of multidimensional processes in conditions of uncertainty E.A. Chzhan, D.A. Kempf	7
Building a software code generator for solving engineering tasks O.V. Minakova, I.V. Trubnikov, O.V. Kuripta	14
The data network behavior prediction in the monitoring system of telecommunication networks based on the modified Kosaraju's algorithm A.A. Ryndin, E.R. Sargsyan	20

Radio engineering and communication

Designing perspective antenna arrays with a diagram-forming scheme based on a Rotman printed lens A.V. Ashikhmin, A.V. Ivanov, Yu.G. Pasternak, P.V. Pershin, F.S. Safonov, S.M. Fedorov, I.A. Zelenin	27
Technical implementation of critical nodes and devices for receiving broadband radio signals D.G. Pantenkov, V.P. Litvinenko	34
Problems of providing reliable radio communications in the north of Russia D.Yu. Muromtsev, A.N. Sysoev, V.M. Zhukov	46
Integration of antenna array from asymmetric vibrators with Rotman lens on a multi-layer printed board A.V. Ashikhmin, A.V. Ivanov, Yu.G. Pasternak, P.V. Pershin, K.S. Safonov, S.M. Fedorov, I.A. Zelenin	54
Development and implementation of a symmetric self-organizing neural network decoder M.V. Khoroshailova	60
Method of choosing the optimal location of components on multilayered pcbs with taking into account the external mechanical influences Z.H.M. Al-Araji, O.Yu. Makarov, A.V. Muratov, A.V. Turetskiy, H.A. Souikat	65
Development and research of a linear antenna array from printed logo-periodic antennas, powered with the Rotman lens A.V. Ashikhmin, A.V. Ivanov, Yu.G. Pasternak, P.V. Pershin, F.S. Safonov, S.M. Fedorov, I.A. Zelenin	73
Modeling the transfer of diagnostic signals through a loaded transmitter with a nonlinear transmission characteristic R.I. Burov, B.V. Illarionov, D.S. Maliev	79
Decoding linear block codes using neural networks based on high-order perseptrons N.V. Astakhov, A.V. Bashkirov, A.V. Muratov, M.V. Khoroshaylova, N.V. Tsipina	87

Mechanical engineering and science of machines

Construction of a spatial model of a residual layer during polygonal boring of thin-walled parts V.V. Kuts, T.A. Tolmacheva	95
---	----

Cutting modes optimization taking into account vibration level based on application of artificial intelligence methods A.V. Antsev, E.S. Yanov, T.H. Dang.....	101
Study of the parameters of the contact interaction of the indenter with the surface during processing by methods of surface plastic deformation V.P. Fedorov, O.N. Kirillov, M.N. Nagorkin, E.V. Kovaleva.....	110
Research of the effect of processing modes on the efficiency of cleaning sheet metal for hollow balls from scale A.V. Korolev A.V. Panfilova, O.P. Reshetnikova, B.M. Iznairov, A.N. Vasin.....	120

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.25987/VSTU.2020.16.3.001

УДК 519.711.3

МОДИФИКАЦИЯ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Е.А. Чжан, Д.А. Кемпф

**Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий,
г. Красноярск, Россия**

Аннотация: решается задача синтеза систем управления многомерными процессами с несколькими управляемыми и неуправляемыми входными переменными. Рассматривается ситуация непараметрической неопределенности, когда математическое описание объекта неизвестно. Определена схема непараметрического дуального управления для двух случаев. В первом случае обучающая выборка формируется с первых тактов работы системы, во втором – имеются исторические данные, накопленные в ходе пассивного эксперимента. В схему управления включен блок интеллектуального анализа данных. В блоке реализован алгоритм по определению значимых факторов при вычислении управляющих воздействий. Разработана модификация непараметрического алгоритма дуального управления многомерными объектами в условиях неполноты данных. Алгоритм содержит две составляющие: непараметрическую оценку, позволяющую учитывать всю накопленную информацию, и поисковый шаг для изучения объекта. Получены выражения для последовательного вычисления значений управляющих воздействий. Исследование алгоритмов в соответствии с предложенной схемой управления было проведено с помощью средств компьютерного моделирования на ряде тестовых объектов при различных вариантах задающих воздействий. Рассматривались многомерные безынерционные объекты с запаздыванием линейной и нелинейной структуры. Результаты вычислительных экспериментов показали высокую эффективность предложенного подхода

Ключевые слова: дуальное управление, система, многомерный процесс, непараметрические методы, управляющее воздействие

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых МК-763.2020.9

Введение

Актуальной на сегодняшний день является задача синтеза систем управления стохастическими многомерными процессами [1, 2]. На практике широко распространена ситуация, когда исследователь не обладает информацией о математической структуре процесса управления. Тогда целесообразно использовать непараметрические методы [3, 4] или методы, основанные на данных (data-based, data-driven approach) [5]. Обучение непараметрических алгоритмов в большинстве случаев происходит на основе исторически накопленных данных, полученных в ходе пассивного эксперимента при измерении входных и выходных переменных процесса, поэтому к данным предъявляются высокие требования. Если же априорной информации недостаточно, то применять такие методы не всегда представляется возможным. Одним из путей решения возник-

шей проблемы является использование алгоритмов дуального управления, которые впервые были предложены А.А. Фельдбаумом [6, 7]. Особенность таких алгоритмов состоит в том, что они позволяют совмещать две конкурирующие цели – изучение и управление объектом. В работах [8, 9] исследуются алгоритмы дуального управления для случая, когда параметрическая структура объекта известна. В данной статье рассматривается случай дуального управления многомерными объектами при непараметрической неопределенности.

Постановка задачи дуального управления

Теория дуального управления в представлении А.А. Фельдбаума требует большого количества априорной информации о рассматриваемом объекте, его внутренних связях и внешних стохастических воздействиях. Рассмотрим постановку задачи, когда правило, по которому преобразуется входное воздействие в

выходное, неизвестно. Тогда схема дуального управления для случая непараметрической неопределенности может иметь вид, представленный на рис. 1.

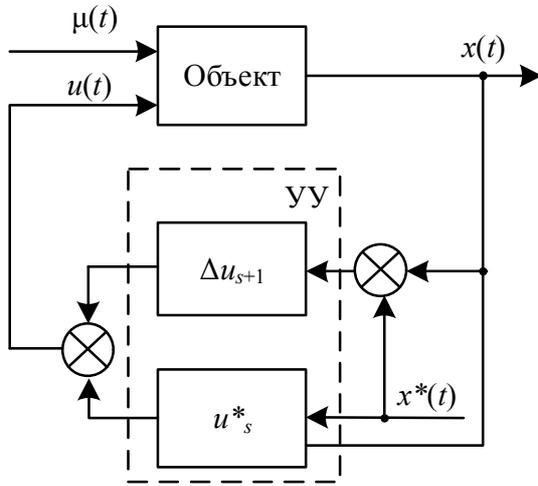


Рис. 1. Схема дуального управления

На объект управления поступают входные измеряемые, но неконтролируемые переменные $\mu(t)$. Управляющее устройство (УУ) состоит из двух блоков: непараметрической оценки управляющего воздействия u^* и поискового шага Δu . Эти значения суммируются и формируют управляющее воздействие $u(t)$. В многомерном случае измеряемые управляемые и неуправляемые входные переменные, а также выходные можно представить в виде векторов: $u = (u_1, u_2, \dots, u_m) \in R^m$,

$\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k) \in R^k$ и $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$, где m – число входных управляющих воздействий, k – число входных неуправляемых переменных, n – число выходных переменных. В каналах измерения действуют случайные помехи с нулевым математическим ожиданием и ограниченной дисперсией. На схеме они опущены из соображения простоты изложения.

Согласно вышеописанной схеме, формирование обучающей выборки происходит с момента начала работы системы управления, поэтому понадобится некоторое время для ее настройки. Это время может быть различно в зависимости от вида объекта управления.

В случае если существуют исторически накопленные данные $\{u_i, \mu_i, x_i\}, i = 1, s$, то выборка сразу вводится в систему, а затем пополняется новыми наблюдениями (рис. 2).

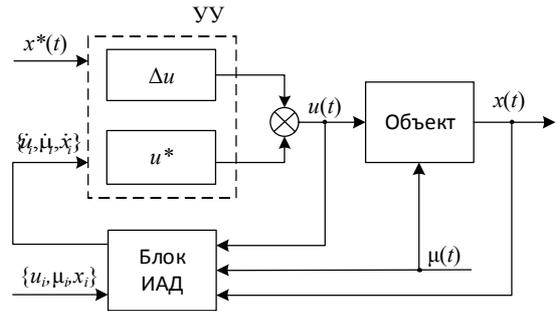


Рис. 2. Схема дуального управления при использовании исторических данных

Здесь в схему управления включен блок интеллектуального анализа данных (Блок ИАД). В этом блоке реализованы алгоритмы как для повышения качества исторических данных $\{u_i, \mu_i, x_i\}$, направленные на заполнение пропусков, устранение разреженностей [10], так и алгоритмы, позволяющие выявить значимые переменные. После преобразования исходной выборки $\{u_i, \mu_i, x_i\}$ на выходе имеем обучающую выборку $\{\hat{u}_i, \hat{\mu}_i, \hat{x}_i\}$. Эта выборка будет использоваться для настройки работы управляющего устройства.

Задача состоит в выявлении значимых факторов, которые необходимо учитывать при вычислении управляющих воздействий $u(t)$, а также в формировании таких управляющих воздействий, чтобы невязка между выходом объекта $x(t)$ и желаемым значением $x^*(t)$ была минимальна.

Выделение существенных переменных при вычислении управляющего воздействия

Для вычисления значений компонент управляющего воздействия $u_1^*, u_2^*, \dots, u_m^*$ может быть использована непараметрическая оценка, построенная на основе всех входных и выходных переменных [11]. Однако некоторые переменные могут не оказывать существенного влияния, и использование их при формировании управляющих воздействий может негативно сказаться на точности управления в целом. Для каждой выходной переменной x_1, x_2, \dots, x_n предлагается определить значимые управляющие воздействия с целью обеспечения эффективности управления в соответствии с заданным критерием согласно следующему алгоритму.

1. Для каждой компоненты вектора $x_l, l = \overline{1, n}$ вычислить непараметрическую оценку Надарая-Ватсона функции регрессии по наблюдениям [4]:

$$\hat{x}_{l,s} = \frac{\sum_{i=1}^s \dot{x}_{l,i} \prod_{v=1}^m \Phi\left(\frac{\dot{u}_{v,s} - \dot{u}_{v,i}}{c_s^{u_v}}\right) \prod_{q=1}^k \Phi\left(\frac{\dot{\mu}_{q,s} - \dot{\mu}_{q,i}}{c_s^{\mu_q}}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{v=1}^m \Phi\left(\frac{\dot{u}_{v,s} - \dot{u}_{v,i}}{c_s^{u_v}}\right) \prod_{q=1}^k \Phi\left(\frac{\dot{\mu}_{q,s} - \dot{\mu}_{q,i}}{c_s^{\mu_q}}\right)}, \quad (1)$$

где $\Phi(\cdot)$ – ядерная колоколообразная функция. Оптимальные значения коэффициентов размытости ядра $c_s^{u_v}, v = \overline{1, m}$ и $c_s^{\mu_q}, q = \overline{1, k}$ определить по обучающей выборке в режиме кросс-валидации путем минимизации квадратичного критерия:

$$I(c_s^{u_1}, \dots, c_s^{u_m}, c_s^{\mu_1}, \dots, c_s^{\mu_k}) = \frac{1}{S} \sum_{j=i}^s (\hat{x}_{l,j}(u_j, \mu_j) - x_{l,j})^2 = \min_{c_s^{u_1}, \dots, c_s^{u_m}, c_s^{\mu_1}, \dots, c_s^{\mu_k}} j \neq i, \quad (2)$$

2. Вычислить величину ошибки моделирования:

$$W = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^s (\hat{x}_{l,i} - x_{l,i})^2. \quad (3)$$

3. Среди всех найденных коэффициентов выбрать максимальное значение. Этому коэффициенту соответствует наименее значимая компонента u или μ .

4. Вычислить оценку (1), исключив множитель $\Phi(\cdot)$, для которого оптимальное значение параметра размытости максимально.

5. Вычислить величину ошибки моделирования (3). Если найденное значение меньше, чем на шаге 2, то вернуться к шагу 1. Если больше, то не исключать последнюю выбранную переменную и завершить выполнение алгоритма.

Для каждой выходной переменной $x_l, l = \overline{1, n}$ будет найден свой набор значимых факторов. Таким образом, при вычислении управляющих воздействий $u_v, v = \overline{1, m}$ необходимо учитывать только те выходные переменные $x_l, l = \overline{1, n_v}$, для которых данная управляющая переменная будет значима.

Модификация непараметрического алгоритма дуального управления

Для вычисления управляющего воздействия предлагается использовать следующее правило [11]:

$$u_{v,s+1} = u_{v,s+1}^* + \Delta u_{v,s+1}, v = \overline{1, m} \quad (4)$$

здесь $u_{v,s+1}^*$ – непараметрическая оценка управляющего воздействия, $\Delta u_{v,s+1}$ – шаг поиска.

Вычислять непараметрическую оценку u_{s+1}^* будем последовательно. Для компоненты $u_{1,s+1}^*$ формула имеет следующий вид:

$$u_{1,s+1}^* = \frac{\sum_{i=1}^s \dot{u}_{1,i} \prod_{l=1}^{n_1} \Phi\left(\frac{x_{l,s+1}^* - \dot{x}_{l,i}}{c_s^{x_l}}\right) \prod_{q=1}^k \Phi\left(\frac{\mu_{q,s+1} - \dot{\mu}_{q,i}}{c_s^{\mu_q}}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{l=1}^{n_1} \Phi\left(\frac{x_{l,s+1}^* - \dot{x}_{l,i}}{c_s^{x_l}}\right) \prod_{q=1}^k \Phi\left(\frac{\mu_{q,s+1} - \dot{\mu}_{q,i}}{c_s^{\mu_q}}\right)}, \quad (5)$$

где n_1 – число значимых переменных, найденных с помощью вышеописанного алгоритма, $\dot{u}_i, \dot{\mu}_i, \dot{x}_i$ – элементы обучающей выборки.

Значения управляющего воздействия $u_v, v = \overline{2, m}$ вычисляются в соответствии с формулой:

$$u_{v,s}^* = \left(\sum_{i=1}^s \dot{u}_{v,i} \prod_{h=1}^{v-1} \Phi\left(\frac{u_{h,s+1} - \dot{u}_{h,i}}{c_s^{u_h}}\right) \prod_{l=1}^{n_v} \Phi\left(\frac{x_{l,s+1}^* - \dot{x}_{l,i}}{c_s^{x_l}}\right) \times \prod_{q=1}^k \Phi\left(\frac{\mu_{q,s+1} - \dot{\mu}_{q,i}}{c_s^{\mu_q}}\right) \right) \times \left(\sum_{i=1}^s \prod_{h=1}^{v-1} \Phi\left(\frac{u_{h,s+1} - \dot{u}_{h,i}}{c_s^{u_h}}\right) \times \prod_{l=1}^{n_v} \Phi\left(\frac{x_{l,s+1}^* - \dot{x}_{l,i}}{c_s^{x_l}}\right) \prod_{q=1}^k \Phi\left(\frac{\mu_{q,s+1} - \dot{\mu}_{q,i}}{c_s^{\mu_q}}\right) \right)^{-1}, v = \overline{2, m}. \quad (6)$$

Ядерная функция и коэффициенты размытости удовлетворяют условиям сходимости [11]. В качестве ядерной функции может быть использована оценка В.А. Епанечникова [12], которая для выходной переменной $x_l(t)$ принимает вид:

$$\Phi(z) = \begin{cases} \frac{3}{4\sqrt{5}} - \frac{3z^2}{20\sqrt{5}}, & \text{если } |z| \leq \sqrt{5}, \\ 0 & \text{если } |z| > \sqrt{5}; \end{cases} \quad (7)$$

где $z = \frac{x_{l,s+1}^* - \dot{x}_{l,i}}{c_s^{x_l}}$.

Величина поискового шага $\Delta u_{v,s+1}$ определяется следующей формулой:

$$\Delta u_{v,s+1} = \sum_{l=1}^{n_v} \gamma_l (x_{l,s+1}^* - \dot{x}_{l,s}), \quad (8)$$

где γ_l – настраиваемые коэффициенты.

При вычислении поискового шага для каждой компоненты u_v также учитываются только значимые выходные переменные.

Таким образом, формула (4) содержит в себе два слагаемых: компонента $u_{v,s+1}^*$ представляет собой непараметрическую оценку,

которая позволяет учитывать всю накопленную информацию об объекте в виде обучающей выборки, а компонента $\Delta u_{v,s+1}$ отвечает за «изучение» объекта, приведение его к цели управления.

Вычислительные эксперименты по дуальному управлению многомерным объектом

Проведем серию вычислительных экспериментов в соответствии со схемой, предложенной на рис. 1. В работе рассматриваются многомерные дискретно-непрерывные объекты. Объекты являются динамическими, но в силу большой дискретности контроля, которая превышает время переходного процесса, мы вынуждены их рассматривать как безынерционные с запаздыванием. В этом случае математическое описание объектов может быть представлено не в виде дифференциальных уравнений, а в виде различных функций выходной переменной от входных воздействий. Зададим уравнение, описывающее процесс:

$$\begin{cases} x(t) = 2u_1(t) - 5u_2(t) + 3u_3(t) + \mu(t), \\ \mu(t) = \sin(0.018t). \end{cases} \quad (9)$$

Система (9) используется для генерации выборки и выходных воздействий объекта, при формировании управляющего воздействия считаем, что вид зависимости нам неизвестен.

Задающее воздействие или цель управления $x^*(t)$ на практике выбирается ЛПР. В зависимости от вида $x^*(t)$ в работе [13] были выделены следующие режимы: поддержка постоянной управляемой величины $x^*(t) = const$ и изменение управляемой величины по заранее заданному закону, т.е. задание представляет

собой функцию времени. В рамках эксперимента реализуем данные режимы. Пусть задающее воздействие $x^*(t)$ описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x^*(t) = 6, & \text{если } 0 < t \leq 20; \\ x^*(t) = 2, & \text{если } 20 < t \leq 40; \\ x^*(t) = 8.5 + 2.5 \cos(0.5t), & \text{если } 40 < t \leq 70; \\ x^*(t) = \sigma, & \text{если } 70 < t \leq 90; \\ x^*(t) = 11 + 1.7 \sin(0.25t), & \text{если } 90 < t \leq 120; \end{cases} \quad (10)$$

где σ – случайная величина, равномерно распределенная в интервале [6; 10].

Для работы алгоритма управления необходимо задать начальные значения входных воздействий: $u_0^1 = u_0^2 = u_0^3 = 2$. Коэффициент поискового шага (8) был определен экспериментальным путем: $\gamma = 0.2$.

В вычислительных экспериментах точность работы алгоритма управления оценивалась согласно двум следующим показателям:

1) относительная ошибка управления:

$$W_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x_i - x_i^*}{x_i^*} \right|, \quad (11)$$

где N – количество тактов управления;

2) время регулирования t_p – минимальное время с начала управления до момента, когда выходная переменная $x(t)$ отклоняется от задания $x^*(t)$ на величину, не превышающую некоторую постоянную величину $\varepsilon = 0.05x^*$. Время регулирования может быть оценено для каждого временного интервала при смене вида задания.

Результаты работы алгоритма представлены на рис. 3. На графике по оси Ox отложен такт времени t , по оси Oy : $x(t)$ – выход объекта (9), $\mu(t)$ – измеряемое неуправляемое воздействие (9), $x^*(t)$ – задающее воздействие (10).

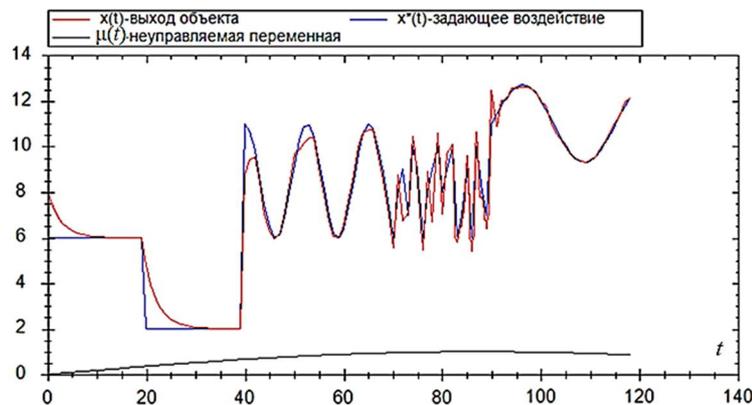


Рис. 3. Результаты работы алгоритма управления многомерным линейным объектом (9)

С течением времени объем выборки увеличивается, и точность управления повышается. Ошибка управления (11) составила $W_y = 0.041$. По мере накопления информации время регулирования значительно сокращается ($t_p = 8$ при $t \in [0; 20]$, $t_p = 3$ $t \in [0; 20]$), что говорит о повышении быстродействия системы. С теоретической точки зрения интерес представляет вариант случайного задания –

алгоритм успевает настраиваться с каждым тактом.

Результаты аналогичных экспериментов для безынерционных объектов с запаздыванием, описываемых линейными и нелинейными (алгебраическими и трансцендентными) уравнениями, представлены в табл. 1, где приняты следующие обозначения γ – коэффициент поискового шага (8), u^0 – начальные значения входных переменных объекта, W_y – ошибка управления (11).

Таблица 1

Результаты работы алгоритма управления

№	Уравнение объекта	γ	u^0	W_y
1.	$x(t) = (4u_1(t) - 3) + (2u_2(t) + 1) - (3u_3(t) - 7) + \mu(t)$	$\gamma = 0.4$	$u_0^1 = 2,$	0.078
2.	$x(t) = u_1^2(t) + \sqrt{u_2(t)} - 7u_3(t) + \mu(t)$	$\gamma = 0.2$	$u_0^2 = 2,$	0.054
3.	$x(t) = e^{u_1(t)} - \sqrt{u_2^3(t)} - \sqrt{u_3(t)} + \mu(t)$	$\gamma = 0.2$	$u_0^3 = 2$	0.072
Неуправляемая переменная: $\mu(t) = \sin(0.018t)$				

Как видно из таблицы, точность управления предложенного алгоритма весьма высока. Ошибка управления не превышает 8%.

Следующий эксперимент проведем для случая, показанного на рис. 2, когда в систему управления поступают исторически накопленные данные $\{u_{1,i}, u_{2,i}, x_{1,i}, x_{2,i}, \mu_i\}$, $i = \overline{1, s}$. Пусть многомерный объект описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x_1(t) = 0.7e^{u_1(t)} + 6u_2(t) + \mu(t), \\ x_2(t) = 2u_1(t) + \mu(t), \\ \mu(t) = 0.5\cos(0.07t), \end{cases} \quad (12)$$

а задающее воздействие имеет вид:

$$\begin{cases} x_1^*(t) = 7, \text{ если } s < t < s + 100, \\ x_2^*(t) = 3, \text{ если } s < t < s + 100, \\ x_1^*(t) = 11, \text{ если } s + 100 \leq t < s + 200, \\ x_2^*(t) = 5, \text{ если } s + 100 \leq t < s + 200. \end{cases} \quad (13)$$

На первоначальном этапе с помощью предложенного алгоритма для переменных x_1, x_2 были выделены существенные признаки: $\hat{x}_1 = \hat{f}(u_1, u_2, \mu)$, $\hat{x}_2 = \hat{f}(u_1, \mu)$, где \hat{f} – непараметрическая оценка вида (1). Объем обучающей выборки составил 200 наблюдений. В табл. 2 приведены результаты управления. Ошибка управления (11) оценивалась для выходных переменных x_1, x_2 для двух случаев: с использованием алгоритма по выделению существенных признаков – $\dot{W}_{y,1}, \dot{W}_{y,2}$ и без – $W_{y,1}, W_{y,2}$.

Таблица 2

Результаты управления объектом (12)

$W_{y,1}$	$W_{y,2}$	$\dot{W}_{y,1}$	$\dot{W}_{y,2}$
0.14	0.17	0.05	0.08

В рамках вышеописанного эксперимента использование алгоритма для выявления значимых переменных позволило повысить точность управления практически в два раза.

Следует ожидать, что с повышением размерности объекта время регулирования возрастет, т.к. потребуется больше данных для обучения системы управления.

Заключение

Рассмотрена схема дуального управления многомерным процессом в условиях непараметрической неопределенности. В данную систему включен блок по анализу данных. Предложен непараметрический алгоритм вычисления управляющих воздействий в многомерном варианте, когда объект описывается несколькими входными и выходными переменными. Алгоритм носит универсальный характер: может быть применен для различных безынерционных объектов с запаздыванием. Разработан алгоритм определения значимых переменных при вычислении управляющих воздействий.

Проведены компьютерные исследования разработанного подхода для объектов как линейной, так и нелинейной структуры. Ошибка управления в экспериментах не превысила 10%, что говорит об удовлетворительной работе разработанных алгоритмов.

Литература

1. Идентификация систем и задачи управления: на пути к современным системным методологиям / И.В. Прангишвили, В.А. Потоцкий, К.С. Гинсберг, В.В. Смолянинов // Проблемы управления. 2004. №. 4. С. 2-14.
2. Многометодный подход к управлению сложными объектами на основе комплексирования процедур численной оптимизации методами компьютерного моделирования / Б.Н. Тишуков, Я.Е. Львович, Д.В. Иванов, Э.И. Воробьев, А.В. Мандрыкин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 1. С. 33-38.
3. Горяинов В.Б., Горяинова Е.Р. Непараметрическая идентификация пространственной модели авторегрессии в условиях априорной стохастической неопределенности // Автоматика и телемеханика. 2010. №. 2. С. 31-41.
4. Медведев А.В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. ак. М.Ф. Решетнёва. 2010. №. 4. С. 4-9.
5. Solomatine D.P., Ostfeld A. Data-driven modelling: some past experiences and new approaches // Journal of Hydroinformatics. 2008. Vol. 10. No. 1. P. 3-22.
6. Фельдбаум А.А. Теория дуального управления. Ч. 1 // Автоматика и телемеханика. 1960. Т. 21. № 9. С. 1240-1249.
7. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М.: Физматгиз, 1963. 552 с.
8. Wittenmark B. Adaptive dual control methods: An overview // Adaptive Systems in Control and Signal Processing. 1995. P. 67-72.
9. Filatov N.M., Unbehauen H. Survey of adaptive dual control methods // IEE Proceedings Control Theory and Applications. 2000. Vol. 147. No. 1. P. 118-128.
10. Medvedev A.V., Chzhan E.A. On nonparametric modelling of multidimensional noninertial systems with delay // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2017. № 2. С. 124 – 136.
11. Медведев А.В. Основы теории адаптивных систем: монография. Красноярск: Изд-во Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та, 2015. 526 с.
12. Епанечников В.А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятностей и ее применения. 1969. Т. 14. №. 1. С. 156-161.
13. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. М.: Наука, 1977. 560 с.

Поступила 14.05.2020; принята к публикации 15.06.2020

Информация об авторах

Чжан Екатерина Анатольевна – канд. техн. наук, доцент базовой кафедры интеллектуальных систем управления, Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий (660074, Россия, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 26), e-mail: ekach@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1059-7272>

Кемпф Дмитрий Александрович – магистрант, Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий (660074, Россия, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 26), e-mail: kempf47@mail.ru

MODIFICATION OF A NONPARAMETRIC ALGORITHM OF MODELING AND DUAL-MODE CONTROL OF MULTIDIMENSIONAL PROCESSES IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY

E.A. Chzhan, D.A. Kempf

Siberian Federal University, School of Information and Space Technology, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: the article deals with the problem of the synthesis of control systems of multidimensional processes with several controlled and uncontrolled input variables. The situation of nonparametric uncertainty is considered when the description of the object is unknown. The scheme of nonparametric dual control is defined for two cases. In the first case, the training sample is formed from the first cycles of the system, in the second, there is historical data accumulated during the passive experiment. A data mining unit is included in the control circuit. The block implements an algorithm for determining significant factors in the calculation of control actions. A modification of the nonparametric algorithm for dual control of multidimensional objects under conditions of incomplete data is developed. Expressions are obtained for sequentially calculating the values of control actions. The study of the proposed algorithm was carried out using computer simulation tools. The results of computational experiments on the control of various multidimensional objects of linear and nonlinear structure showed the high efficiency of the proposed approach

Key words: dual control, system, multidimensional process, nonparametric methods, control action

Acknowledgments: the study was supported by the grant from the President of the Russian Federation for state support of young scientists МК-763.2020.9

References

1. Prangishvili I. V., Pototskiy V.A., Ginsberg K.S., Smolyaninov V.V. "System identification and control tasks: toward modern systemic methodologies", *Control Problems (Problemy upravleniya)*, 2004, no. 4, pp. 2-14.
2. Tishukov B.N., L'vovich Ya.E., Ivanov D.V., Vorob'ev E.I., Mandrykin A.V. "A multi-method approach to complex objects control based on the integration of numerical optimization procedures using computer modeling", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 33-38.
3. Goryainov V.B., Goryainova E.R. "Nonparametric identification of the spatial model of autoregression under a priori stochastic uncertainty", *Automation and Telemekhanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 2010, no. 2, pp. 31-41.
4. Medvedev A.V. "Theory of nonparametric systems. Modelling", *Bulletin of M.F. Reshetnev Siberian State Aerospace University (Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva)*, 2010, vol. 4, pp. 4-9.
5. Solomatine D.P., Ostfeld A. "Data-driven modelling: some past experiences and new approaches", *Journal of Hydroinformatics*, 2008, vol. 10, no. 1, pp. 3-22.
6. Fel'dbaum A.A. "Theory of dual control. Part 1", *Automation and Telemekhanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 1960, vol. 21, no. 9, pp. 1240-1249.
7. Fel'dbaum A.A. "Fundamentals of the optimal automatic systems theory" ("Osnovy teorii optimal'nykh avtomaticheskikh sistem"), Moscow, Fizmatgiz, 1963, 552 p.
8. Wittenmark B. "Adaptive dual control methods. An overview", *Adaptive Systems in Control and Signal Processing*, 1995, pp. 67-72.
9. Filatov N.M., Unbehauen H. "Survey of adaptive dual control methods", *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 2000, vol. 147, no. 1, pp. 118-128.
10. Medvedev A.V., Chzhan E.A. "On nonparametric modelling of multidimensional noninertial systems with delay", *Bulletin of South Ural State University (Vestnik YUUrGU)*, 2017, no. 2, pp. 124-136.
11. Medvedev A.V. "Fundamentals of the theory of adaptive systems" ("Osnovy teorii adaptivnykh sistem"), monograph, Siberian Aerospace State University, Krasnoyarsk 2015, 526 p.
12. Epanechnikov V.A. "Nonparametric estimation of multidimensional probability density", *Probability Theory and its Applications (Teoriya veroyatnostej i ee primeneniya)*, 1969, vol. 14, no. 1, pp. 156-161.
13. Tsytkin Ya.Z. "Fundamentals of the theory of automatic systems" (Osnovy teorii avtomaticheskikh sistem), Moscow, Nauka, 1977, 560 p.

Submitted 14.05.2020; revised 15.06.2020

Information about the authors

Ekaterina A. Chzhan, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Siberian Federal University, School of Information and Space Technology (26 Akademika Kirenskogo st., Krasnoyarsk 660074, Russia), e-mail: ekach@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1059-7272>

Dmitriy A. Kempf, MA, Siberian Federal University, School of Information and Space Technology (26 Akademika Kirenskogo st., Krasnoyarsk 660074, Russia), e-mail: kempf47@mail.ru

ПОСТРОЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПРОГРАММНОГО КОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ

О.В. Минакова, И.В. Трубников, О.В. Курипта

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлены результаты прототипирования генератора программного кода для потоковой обработки данных, предназначенного для использования инженерами различных специальностей без опыта программирования. Фреймворк осуществляет автоматическую генерацию программы по визуальной модели, составленной пользователем, что обеспечивает простоту и доступность самостоятельной разработки уникальных средств автоматизации. В качестве когнитивной модели представления инженерной задачи выбрана диаграмма потоков данных (DFD-нотация Йордана), которая широко известна, проста в понимании и хорошо согласуется с архитектурой «каналы и фильтры». Это позволило разработать веб-приложение для автоматической генерации программного кода с реализацией по шаблону Декоратор. Описание практической реализации фреймворка, генерирующего программный код на основе построенной пользователем диаграммы потоков данных, представлено в работе. Созданный прототип фреймворка сконструирован в стиле MVC, поддерживает собственный формат хранения данных, управляется из браузера и может быть использован для автоматизации обработки данных для различных инженерных задач. Результаты опытной эксплуатации кроссплатформенного программного обеспечения Generator Source Data Flow Diagram Framework детально проанализированы на примере расчета надежности вычислительной системы. Проведенные исследования подтвердили гибкость разработанного фреймворка для автоматизации сложноструктурированных задач при достаточной проработке исходной модели

Ключевые слова: автогенерация программного кода, разработка программ, модель потоков данных, архитектура «каналы и фильтры»

Введение

В инженерно-строительной практике часто возникают трудоемкие практические задачи, которые легко можно автоматизировать при наличии опыта программирования. И если элементарные навыки программирования получают все инженерные специальности, то написать полноценное программное приложение не программисту невозможно.

В IT задача автоматизации создания кода рассматривается постоянно, и примером тому огромное разнообразие CASE-средств, скриптовых языков, фреймворков и пр. Но эти средства ориентированы на IT-специалистов, пусть даже начинающих. Для рядовых пользователей активно разрабатываются когнитивные пользовательские интерфейсы, например, управления голосом, жестами и т.п.

Примером подхода, объединяющего решение профессиональных задач и простоту управления, можно увидеть в системах проведения научных исследований [1]. Их миссия – дать ученым визуально управляемый инструмент для разработки индивидуальных систем обработки данных [2]. Но для использования в повседневной практике инженера-строителя или техноло-

га они не применимы, ввиду сложности и громоздкости самой аналитической платформы.

Другой альтернативой решения часто встречающихся в инженерной практике задач являются CAD-системы, которые нацелены на чисто профессиональные задачи, и как следствие, дороги, ориентированы на определенный класс задач, требуют наличия опыта работы [3].

Современный уровень развития информационных технологий позволяет не программисту решить задачу автоматизации путем создания собственных программ средней сложности, которые могут быть получены в ходе автоматической генерации программного кода по метамодели [4].

Если трудоемкость программной разработки делится между созданием интерфейса и построением зависимостей, то среды быстрой разработки приложений значительно облегчают процесс построения интерфейса. Также в прикладных решениях, не рассчитанных на массовое использование, в насыщенном пользовательском интерфейсе нет необходимости. Поэтому на сегодняшний день наибольшую сложность составляет управление потоками данных приложения, что решается использованием разнообразных фреймворков [5].

Фреймворк – это программное обеспечение, предназначенное для создания пользова-

тельских программ в определенном стиле или заданной архитектуры. Если библиотека может быть использована в программном продукте просто как набор подсистем близкой функциональности, не влияя на архитектуру основного программного продукта и не накладывая на неё никаких ограничений, то фреймворк задает правила построения архитектуры приложения и определяет модель взаимодействия компонентов. Использование такого генератора позволяет получить программу с определенным поведением и управлением, функциональность которой может быть расширена пользователем. Это позволит специалистам инженерно-строительного профиля сосредоточиться на построении моделей обработки данных прикладной задачи, т.е. формализовать задачу до последовательности простых и известных решений, которые могут быть автоматизированы программным путем.

Цель работы – разработка фреймворка для генерации программного кода по визуальной формализованной модели.

Задачи исследования:

- выбор метода формализации прикладной задачи для построения когнитивного пользовательского интерфейса инженера;
- реализация автогенерации программного кода;
- анализ полученного решения на прикладных задачах.

Постановка задачи

Поскольку генерируемый код предназначен для решения инженерных, т.е. вычислительных задач, то естественен выбор потоковой модели или пакетной обработки.

Методологии представления потоков данных (DFD) используются для моделирования информационных систем с 80-х годов прошлого века, общеизвестны и хорошо себя зарекомендовали. При моделировании функционирования ИС в виде потока данных вся программная система рассматривается как серия преобразований набора входных данных, где данные и операции не зависят друг от друга. То есть данные поступают в систему и передаются от одного модуля преобразования к другому, пока они не достигнут выхода либо хранилища данных.

Общая модель потоков данных представлена на рис. 1. В ней присутствуют:

T_i – функции преобразования, в терминах программиста (П) – модули или компоненты, в терминах инженера (И) – задачи;

S_{ij} – соединения (П: потоки ввода/вывода, И: последовательность задач).

Вычислительную процедуру можно представить в виде потока данных, последовательно проходящего через различные преобразования данных.

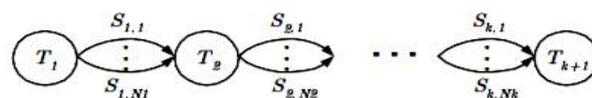


Рис. 1. Модель потоков данных

Известны два варианта нотации DFD — Гейна-Сарсона и Йордана. Их сравнение [6] показало, что основное различие в визуальном представлении. Ввиду субъективно лучшей наглядности, а именно выраженного различия в форме представления «Process» и «External Entity» (круг против прямоугольника), для моделирования процесса обработки данных при разработке фреймворка была выбрана нотация Йордана.

Выбор модели потоковой обработки однозначно определяет и архитектуру приложения – «каналы и фильтры» [7]. Под фильтром подразумевают программный компонент, реализующий независимый этап преобразования данных. Каждый фильтр получает входное сообщение, обрабатывает его и публикует результат в канале. Соединение фильтров осуществляют каналы [8]. Простейший вариант механизма взаимодействия компонентов-фильтров – фиксированные каналы, т.е. реализация соединения «точка – точка». Так все компоненты имеют одинаковые внешние интерфейсы, их можно комбинировать путем подключения к разным каналам, можно добавлять, переупорядочивать и удалять фильтры.

Следует отметить, что между нотацией DFD и архитектурой «каналы и фильтры» можно провести аналогию. Если сопоставить элементы с нотацией DFD, то получится, что фильтр – это процесс, канал – это поток данных, источник и приемник данных – это внешние сущности. Для временных хранилищ не предусмотрены отдельные элементы, но этот момент может проектироваться дополнительно.

Таким образом, зависимости для построения программного кода определены архитектурой «каналы и фильтры», легко сопрягаемой с нотацией DFD, однозначно определяющей гра-

фический интерфейс будущего фреймворка. Следовательно, задача сводится к генерации программного кода по диаграмме потоков данных, построенной пользователем.

Проектирование фреймворка и выбор технологий его реализации

Проектирование осуществлялось в соответствии с концепцией MVC (Model-View-Controller). Моделью в нашем случае выступал процесс автогенерации программного кода, представлением – графический интерфейс пользователя.

С точки зрения пользователя, работа Фреймворка состоит в том, что пользователь рисует диаграмму потоков данных, по которой генерируется код. В полученную конфигурацию пользователь может вносить изменения в любой среде разработки. Сценарий взаимодействия пользователя с системой на рис. 2.



Рис. 2. Сценарий генерации кода с использованием фреймворка

Чтобы сделать фреймворк кроссплатформенным, что сделает его еще более доступным и позволит пользователю генерировать код в окне браузера, представление должно генерировать две веб-страницы. Главная – использу-

ется для взаимодействия с пользователем при построении диаграмм потока обработки данных в окне браузера.

Для хранения построенных диаграмм был разработан специальный формат файла, который содержит в себе собственную разметку на основе XML. Файл содержит информацию о входной и выходной сущности, процессах и временных хранилищах, надписи на блоках и связях и вид связи. В функциональных требованиях к фреймворку предусмотрены проверки при открытии или импортировании файла в сцену, а также на корректность содержимого.

Второстепенная страница – формируется в качестве ответа на действие «генерация кода».

Контроллер управляет запросами пользователя, получаемые в виде запросов HTTP GET или POST, когда пользователь нажимает на элементы интерфейса для выполнения различных действий. Его основная функция — вызывать и координировать взаимодействие необходимых ресурсов и объектов, нужных для выполнения пользовательских команд.

Диаграмма развертывания всех компонентов нашего фреймворка представлена на рис. 3.

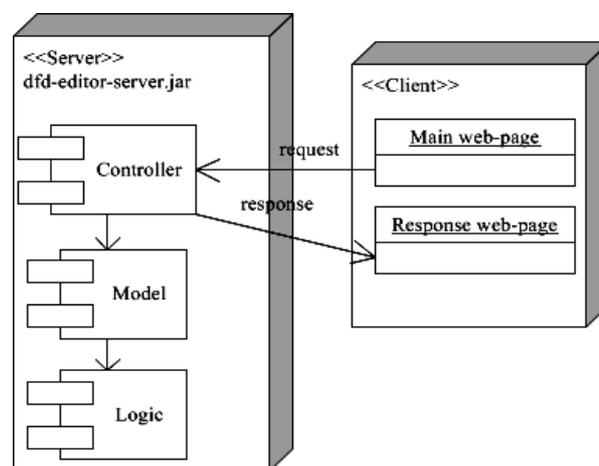


Рис. 3. Диаграмма развертывания приложения

Следует отметить, что предметом разработки является серверная часть – dfd-editor-server, который и является кроссплатформенным фреймворком Generator Source Data Flow Diagram Framework (GSDFD) [9].

Реализация GSDFD осуществлялась на популярном универсальном фреймворке Spring Boot для создания приложений на языке Java. Он предоставляет полноценную платформу для создания веб-приложений.

Для построения диаграмм в окне браузера использована библиотека jGraph (mxGraph), распространяемая под лицензией Apache 2.0.

Результирующая страница со ссылкой на скачивание архива проекта написана с помощью языка разметки документов HTML, с применением CSS. Для взаимодействия веб-страниц с пользователем был использован Java Script. GUI всего фреймворка использует библиотеку jQuery с расширением jQuery UI, распространяемой под лицензией MIT и GPLv2.

Результаты

На данном этапе происходит адаптация разработанного фреймворка для решения различных задач инженерной практики. Первоначально проведенные эксперименты показали, что простые задачи, например, расчет строительных материалов для заданных помещений, легко реализуемы с помощью нашего фреймворка и не требуют больших дополнительных усилий для создания полноценного приложения [10]. Поэтому в текущем исследовании была выбрана задача с гибкой структурой – выполнение структурного расчета надеж-

ности [11] вычислительной системы (ВС). Исходными данными для расчета являются показатели безотказности и ремонтпригодности отдельных компонентов ВС и структурная схема надежности, которая должна быть составлена для анализируемой ВС.

Любая модель имеет ограничения, поэтому при построении структурной схемы надежности ВС было принято разделение на шесть модулей – процессорная подсистема, оперативная память, системный интерфейс, внешние запоминающие устройства, подсистема ввода и вывода информации. Так как отказ одной подсистем нарушит функционирование всей ВС, то соединение последовательное. Элементы, составляющие каждый модуль, могут быть гетерогенны и соединяться как последовательно, так и параллельно, и одинаковые – в таком случае могут быть описаны как система m из n . Учитывая эту формализацию выполнения расчета, в программной среде GSDFD была построена визуальная модель потока данных (рис. 4).

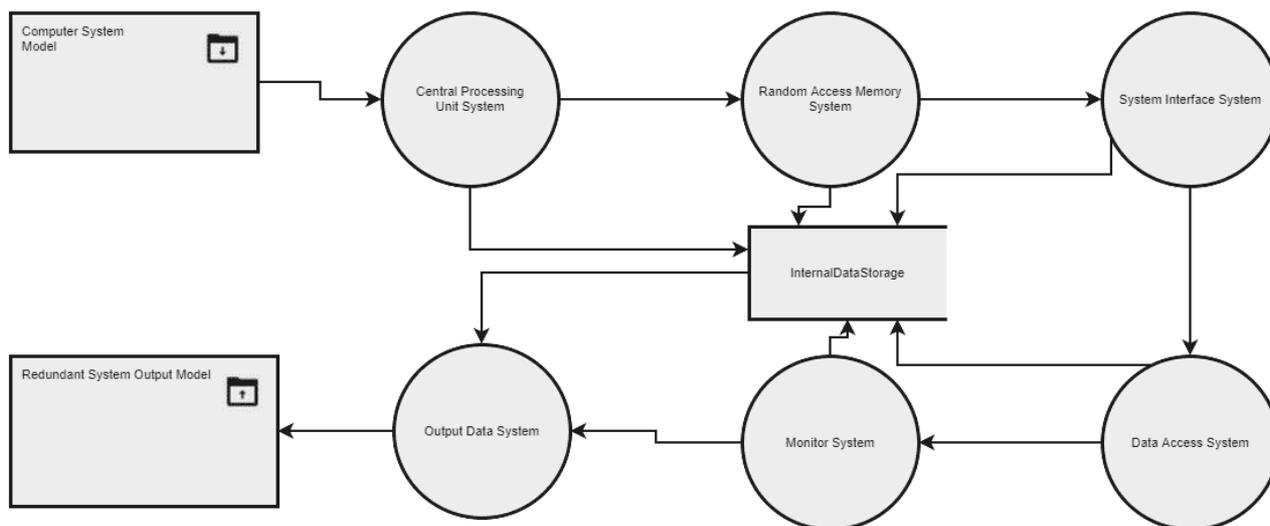


Рис. 4. Диаграмма потоков данных расчета надежности ВС, построенная для работы GSDFD

Для случая ввода данных для каждого элемента пользователем приложения необходимости в использовании внешнего хранилища – нет, следовательно, диаграмма готова к генерации кода. В результате запуска фреймворка было сгенерировано программное приложение, включающее:

- ComponentImpl – интерфейс процесса обработки;
- CentralProcessingUnitSystem – конкретная реализация процесса (стартовый процесс), который в соответствии с шаблоном Декоратор

будет добавляться новый функционал или другие процессы;

- DecoratorComponent – абстрактный класс декоратора, который и будет являться базовым для конкретной реализации расчетов каждой подсистемы ВС;
- CentralProcessingUnitSystem, DataAccessSystem, MonitorSystem, OutputDataSystem, RandomAccessMemorySystem, SystemInterfaceSystem – это различные реализации расчетов подсистем;

- EntityImpl – интерфейс моделей для архитектуры обработки данных;
- ComputerSystemModel – реализация модели входных данных;
- RedundantSystemOutputModel – реализация модели выходных данных;
- WorkProcess – точка входа в модель расчета, с которой осуществляется соединение объектов для работы программы.

Для завершения разработки приложения достаточно добавить интерфейс пользователя и формулы расчета для последовательного, параллельного соединения и модели m из n . Поэтому необходима загрузка кода приложения (пакет models) в среду разработки. Для реализации приложения в стиле MVC потребовалось разделить сгенерированных классов Модели (models) и реализации рабочего окна приложения для ввода параметров расчета и вывода результатов по разным пакетам.

Поскольку для каждой подсистемы показатели надежности элементов могут быть заданы однообразно, то создание пользовательского интерфейса тоже можно автоматизировать путем генерации произвольного количества текстовых полей для ввода данных с поясняющими метками. Возможность такого решения и включение его в сам фреймворк будут исследованы в дальнейшем.

В результате, из 22 классов законченного приложения – 12 (54,7%) сформированы нашим фреймворком, 3 (13,6%) сгенерированы менеджером проектов приложений JavaFx среды разработки, 3 (13,6%) класса потребовались для поддержки реализации интерфейса пользователя на шаблоне Абстрактная фабрика и только 4 (18,1%) класса для непосредственного выполнения расчетов. Следует отметить, что эти классы появились вследствие рефакторинга, ввиду повторного использования одних и тех же методов расчетов в различных подсистемах. Несомненным достоинством сгенерированного кода является построение зависимостей, не требующее изменения области видимости объектов, дополнительных интерфейсов, увеличения свойств и методов абстрактных классов и изменения контракта для уже сгенерированных конкретных классов.

Выводы

1. Выбранная визуальная модель – диаграмма потоков данных проста в понимании,

хорошо связывается с архитектурой каналов и фильтры, которая имеет устойчивую реализацию на паттерне Декоратор.

2. Предложенная концепция автогенерации программного кода по визуальной модели значительно облегчает разработку программ для автоматизации инженерных задач.

3. Несмотря на отсутствие в постановке задачи генерации пользовательского интерфейса для создаваемого программного проекта, в ходе использования фреймворка в решении прикладных задач была предложена модель построения интерфейса в виде формы с произвольным количеством текстовых полей, которые могут быть использованы для ввода данных.

Литература

1. Zhao Y., Raicu I., & Foster I. Scientific workflow systems for 21st century, new bottle or new wine? In 2008 IEEE Congress on Services-Part I, 2008, July, pp. 467-471.
2. Talia D. Workflow systems for science: Concepts and tools. ISRN Software Engineering, 2013.
3. Тиханов М.В. Анализ результатов инженерного расчета системы САЕ //Фундаментальные основы механики. 2017. №. 2. С. 126-128.
4. Sgirka R., Eessaar E. A Quality Model of Metamodeling Systems // Emerging Trends in Computing, Informatics, Systems Sciences, and Engineering: International Conference on Systems, Computing Sciences and Software Engineering (SCSS 10). Springer, 2013. P. 543 - 555.
5. Riehle D., Gross T. Role model based framework design and integration// ACM SIGPLAN Notices. 1998. Vol. 33. No. 10.
6. Dennis A., Wixom B.H., Roth R.M. Systems analysis and design. John wiley & sons, 2018. p.188.
7. Eden, Amnon H., and Rick Kazman. Architecture, design, implementation" proceedings of the 25th International Conference on Software Engineering. IEEE Computer Society, 2003.
8. Garlan D., Shaw M. An Introduction to Software Architecture." In V. Ambriola, G. Tortora, eds. Advances in Software Engineering and Knowledge Engineering, Vol. 2, pp. 1— 39. New Jersey: World Scientific Publishing Company, 1993.
9. Generator Source Data Flow Diagram Framework/Трубников И.В., Минакова О.В. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019664536, 07.06.2018
10. Trubnikov I.V., Minakova O.V., Kuripta O.V. Framework for Building Data Flow Diagramm Based Applications //2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2019.
11. ГОСТ Р 51901.14-2007 (МЭК 61078:2006) Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы.

Информация об авторах

Минакова Ольга Владимировна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: olgmina@gmail.com

Трубников Иван Владимирович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: trubnicov_ivan1996@mail.ru

Курипта Оксана Валериевна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kuripta-okcana@mail.ru

BUILDING A SOFTWARE CODE GENERATOR FOR SOLVING ENGINEERING TASKS

O.V. Minakova, I.V. Trubnikov, O.V. Kuripta

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article presents the results of prototyping a program code generator for streaming data processing, intended for use by engineers of various specialties without programming experience. The framework automatically generates a program according to a visual model compiled by the user, which ensures simplicity and accessibility of independent development of unique automation tools. As a cognitive model for representing the engineering problem, we chose a data flow diagram (Jordan DFD notation), which is widely known, easy to understand, and is in good agreement with the “channels and filters” architecture. This allowed us to develop a web application for the automatic generation of program code with implementation according to the Decorator template. The paper presents a description of the practical implementation of a framework that generates program code based on a user-constructed data flow diagram. The prototype framework created is designed in the style of MVC, supports its own data storage format, is controlled from a browser and can be used to automate data processing for various engineering tasks. The results of the trial operation of the cross-platform software Generator Source Data Flow Diagram Framework are analyzed in detail on the example of calculating the reliability of a computer system. Studies confirmed the flexibility of the developed framework for automating complex structured tasks with a sufficient study of the original model

Key words: program code auto-generation, program development, data flow model, architecture channels and filters

References

1. Zhao Y., Raicu I., Foster I. “Scientific workflow systems for 21st century, new bottle or new wine?”, *2008 IEEE Congress on Services-Part I*, 2008, July, pp. 467-471.
2. Talia D. “Workflow systems for science: Concepts and tools”, ISRN Software Engineering, 2013.
3. Tikhanov M.V. “Analysis of the results of engineering calculation of the CAE system”, *Fundamentals of Mechanics (Fundamental'nye Osnovy Mekhaniki)*, 2017, vol. 2, pp. 126-128.
4. Sgirka R.A., Eessaar E. “Quality model of metamodeling systems”, *Emerging Trends in Computing, Informatics, Systems Sciences, and Engineering: International Conference on Systems, Computing Sciences and Software Engineering (SCSS 10)*, Springer, 2013, pp. 543-555.
5. Riehle D., Gross T. “Role model based framework design and integration”, *ACM SIGPLAN Notices*, 1998, vol. 33, no. 10.
6. Dennis A., Wixom B.H., Roth R.M. “Systems analysis and design”, John Wiley & Sons, 2018, 188 p.
7. Eden A.H., Kazman R. “Architecture, design, implementation”, *proc. of the 25th International Conference on Software Engineering, IEEE Computer Society*, 2003.
8. Garlan D., Shaw M. “An introduction to software architecture”, eds. V. Ambriola, G. Tortora, *Advances in Software Engineering and Knowledge Engineering*, New Jersey, World Scientific Publishing Company, 1993, vol. 2, pp. 1-39.
9. Trubnikov I.V., Minakova O.V. “Generator Source Data Flow Diagram Framework”, Software Registration Certificate RU 2019664536, 07.06.2018
10. Trubnikov I.V., Minakova O.V., Kuripta O.V. “Framework for building data flow diagram based applications”, *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, IEEE, 2019
11. GOST R 51901.14-2007 (IEC 61078: 2006) “Risk management. Reliability block diagram and Boolean methods”.

Submitted 23.03.2020; revised 15.06.2020

Information about the authors

Olga V. Minakova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394006, Russia), e-mail: olgmina@gmail.com

Ivan V. Trubnikov, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394006, Russia), e-mail: trubnicov_ivan1996@mail.ru

Oksana V. Kuripta, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394006, Russia), e-mail: kuripta-okcana@mail.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА КОСАРАЙЮ

А.А. Рындин, Э.Р. Саргсян

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены вопросы прогнозирования поведения сети передачи данных в системе мониторинга телекоммуникационных сетей. Проведён анализ актуальности предметной области и рассмотрен набор существующего программного обеспечения, которое решает поставленную задачу. Определён необходимый набор функциональности, поддерживаемый разрабатываемым решением, и список задач, которые будут им покрыты, а также рассмотрены примеры модели телекоммуникационной сети и представлены задачи, которые необходимо решить во время обхода сети. Описана модель хранения данных в телекоммуникационной сети передачи данных. Определены параметры, которые будут рассчитываться для каждого элемента сети, и зависимости между узлами сети. Описана проблема наличия большого количества областей сильной связности, в связи с которой было рассмотрено множество способов решения и найден алгоритм Косарайю для решения поставленной задачи. Определены задачи, которые не были покрыты алгоритмом Косарайю, и рассмотрены варианты модификации данного алгоритма. Построена математическая модель, которая учитывает время входа и выхода в каждый элемент сети (графа), расписаны принципы зависимости между этими параметрами, а также рассмотрен способ подсчёта веса каждой области сильной связности для определения необходимого маршрута обхода. Пошагово расписан способ применения модифицированного алгоритма Косарайю. Подведены итоги исследования и описана актуальность модифицированного алгоритма Косарайю для других сфер

Ключевые слова: телекоммуникационная сеть, прогнозирование, алгоритм Косарайю, граф, компонента сильной связности

Введение

Основной задачей, решаемой в современных системах мониторинга телекоммуникационных сетей, являются контроль текущих параметров состояния сети, в общем, и каждого её элемента в частности и вывод основных показателей работоспособности сети [1,2]. На данный момент существует множество бесплатных и платных систем мониторинга, позволяющих осуществлять контроль над работой телекоммуникационной сети [3]:

- PRTG Network Monitor – разработчик Paessler AG;
- Telcomanager – разработчик Telco Manager;
- NetCrunch – разработчик AdRem Software;
- ManageEngine OpManager – разработчик Manage Engine;
- SolarWinds Network Performance Monitor – разработчик solarwinds;
- Pandora FMS – разработчик Sancho Lerena.

Все вышеупомянутые системы имеют базовый функционал для мониторинга телеком-

муникационных сетей и, помимо этого, также, множество специфичного функционала. Так, например, стандартный функционал, позволяющий контролировать пропускную способность, предельную нагрузку, мощность сигналов, присутствует у каждой системы. Однако некоторые системы поддерживают также возможность настройки безопасности с помощью firewall, что является необходимой функцией для любой большой системы. Также присутствуют функции динамической генерации отчётов работы сети в Web модуль либо в любой из множества доступных форматов хранения данных. Одним из примеров такого ПО является PRTG Network Monitor, имеющий большой функционал для работы с телекоммуникационными сетями.

Проанализировав функционал вышеупомянутых систем, формируем задачу прогнозирования поведения сети передачи данных в системе мониторинга телекоммуникационных сетей, с возможностью запуска имитационной модели работы сети и предлагаемыми вариантами её оптимизации.

Материалы и методы

Одной из актуальных проблем всех доступных программных средств является отсутствующая или плохо реализованная система прогнозирования состояния сети и симуляции её работы. Помимо простого мониторинга, современному ПО необходимо иметь возможность прогнозировать неполадки, перегрузки или аварийные ситуации в сети. Также необходима возможность запуска симуляции работы сети, основываясь на собранных данных, для того, чтобы проверять работу системы при изменении каких-либо её параметров.

Данный функционал необходим для понимания, как выход из строя какого-либо элемента повлияет на сеть в целом и какие её элементы будут затронуты впоследствии.

Это позволяет системам, использующим подобный функционал прогнозирования, своевременно определять проблемные ситуации, иметь возможность оповестить о них заранее или даже предотвратить подобную ситуацию.

Также подобный функционал может использоваться для определения списка элементов сети, которые будут выведены из строя при техническом обслуживании, и пользователи будут иметь возможность заранее получать оповещения о планируемых технических работах в сети.

Следовательно, всё вышеописанное должно иметь высокую производительность и максимальное приближение к реальной ситуации. Для этого необходимо учитывать, что телекоммуникационная сеть является структурой, хранящей данные в виде дерева, и каждый элемент сети представлен в виде узла дерева. Данный формат хранения данных накладывает некоторые ограничения, например, простой поиск элементов может занять довольно много ресурсов из-за большого уровня вложенности дерева и его цикличности. Необходимо применять максимально оптимизированные методы обхода, учитывая все особенности телекоммуникационных сетей.

При выходе из строя или неполадках на определённом элементе необходимо определить, какие узлы будут впоследствии затронуты этой проблемой, в каком состоянии будут эти элементы и что потребуется для их восстановления.

Из этого следует, что одной из основных задач является способ обхода дерева, которое представляет собой телекоммуникационную сеть.

Существует множество алгоритмов, которые позволяют решать поставленную задачу [4,5]:

- поиск в глубину;
- поиск в ширину;
- топологическая сортировка;
- алгоритм Дейкстры;
- алгоритм Флойда-Уоршелла;
- алгоритм Тарьяна.

Подобная сеть представляется в виде ориентированного графа, каждый элемент которого будет представлять собой отдельно взятое устройство в телекоммуникационной сети. Все узлы сети будут рассчитывать свои параметры на основе ближайших к ним элементов.

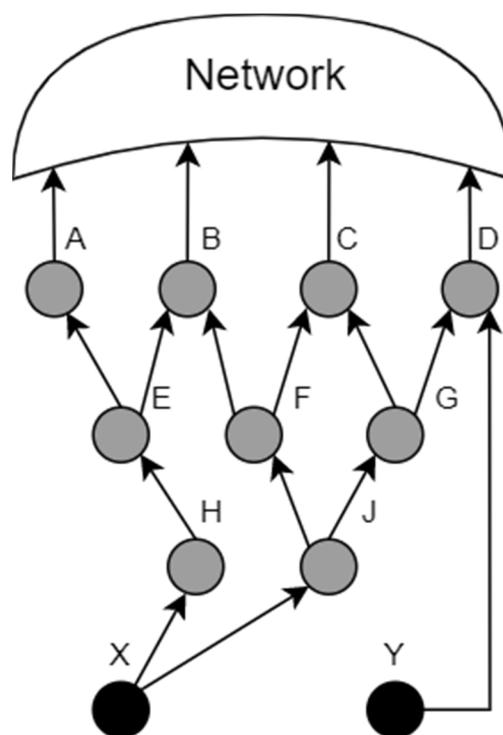


Рис. 1. Граф телекоммуникационной сети

На рис. 1 изображен граф с элементами сети, в котором чёрным цветом помечены элементы сети, имеющие неполадки в работе, и необходимо провести расчёт, как данная проблема влияет на другие элементы. Как было упомянуто ранее, каждый элемент рассчитывает значение своих параметров работы на основе ближайших элементов, и выполняется данный процесс итерационно. Начинается с проблемных элементов и поднимается по уровню выше, пока не пройдёт все затронутые узлы сети.

Например, элемент «D» при расчете будет учитывать значения параметров на элементе

«G» и «Y», так как они ближайšie к нему и имеют ребро, соединяющее их с ним. Следовательно, для этого нужно чтобы значения параметров элементов «G» и «Y» уже были посчитаны. В свою очередь, элемент «G» зависит от элемента «J», который зависит от элемента «X».

Основываясь на зависимости расчета параметров элемента друг от друга, можно сделать вывод, что граф имеет разделение по уровням. Например, элемент «D» имеет уровень 3, что изображено на рис. 2.

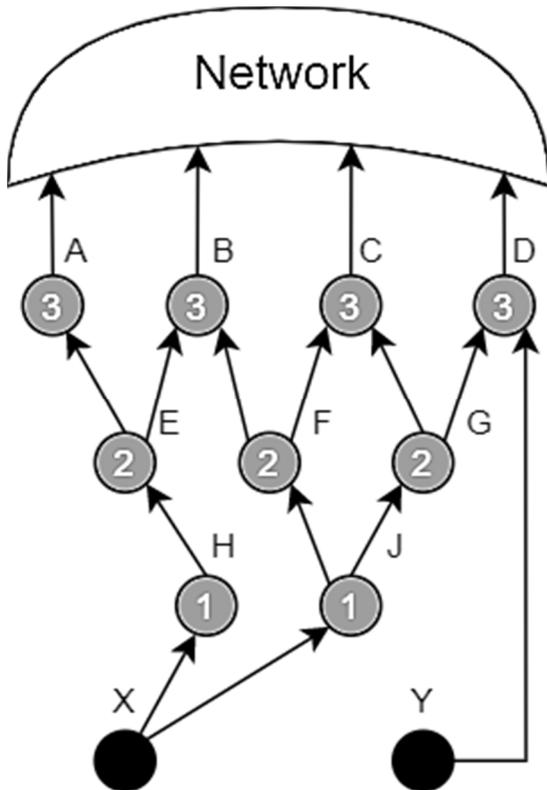


Рис. 2. Отображение уровней элементов в графе

На основе требования расчёта параметров с использованием параметров ближайших элементов сети вводится понятие определения максимального пути от исходного проблемного элемента до каждого узла сети, который он затрагивает. Соответственно, расчет параметров не будет производиться, пока алгоритм не дойдёт до необходимого уровня в графе, так как до этого момента не будут посчитаны значения на всех необходимых ближайших элементах сети.

Для телекоммуникационных сетей, которые имеют циклические связи между элементами, алгоритм, описанный выше, будет занимать слишком большое время, так как расчёт

пути может заиклиться. В этих случаях было решено разбить задачу на две подзадачи:

1. Поиск всех циклов в графе и группировка каждого из них в один узел с указанием максимальной длины пути внутри цикла.

2. Подсчёт максимальной длины пути от исходного проблемного элемента до каждого узла в сети.

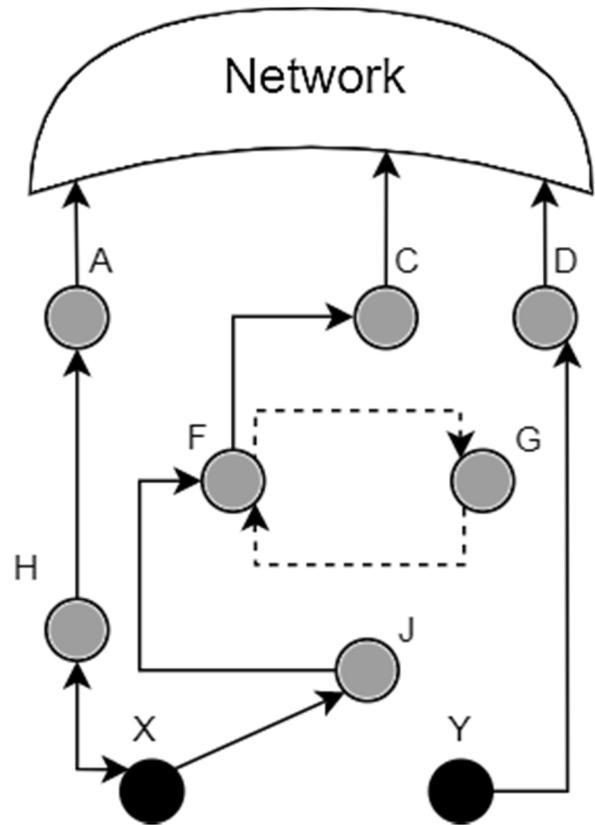


Рис. 3. Определение максимального пути в графе с циклом

На рис. 3 изображен пример графа с элементами, обладающими циклическими зависимостями (область выделена пунктирной линией), подобные элементы в совокупности называются компонентами (областями) сильной связности (КСС) [6]. Если проложить следующий маршрут $X \rightarrow J \rightarrow F$, то далее алгоритм попадает в цикл. В данном случае необходимо пройти по всем элементам цикла, сгруппировать их и продолжить маршрут из исходной точки цикла. То есть путь будет выглядеть следующим образом $X \rightarrow J \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow F \rightarrow C$.

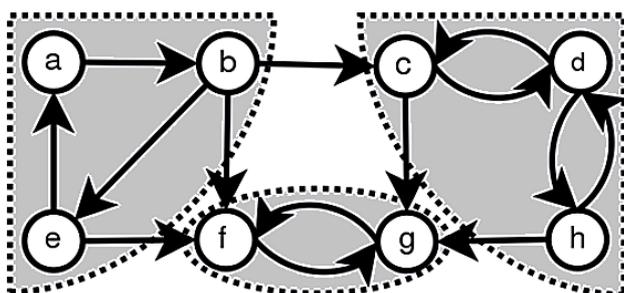


Рис. 4. Граф с областями сильной связности

Для решения подзадачи поиска максимального пути в графе с областями сильной связности предлагается использовать алгоритм американского учёного индийского происхождения Sambasiva Rao Kosaraju, который называется алгоритм Kosaraju (Косарайю или Косараджу) [7]. Данный алгоритм необходимо адаптировать под поставленную задачу, для того чтобы рассчитывать максимальный путь от исходного элемента до каждого узла сети. Рассмотрим предлагаемую модификацию алгоритма.

Для поиска каждой КСС выполняется множество обходов в глубину графа G . Для каждой вершины графа вызывается функция обхода в глубину и данный процесс продолжается итерационно, пока алгоритм не пройдёт все вершины графа. Во время работы алгоритма для каждой вершины v запоминается время входа $Tin[v]$ и выхода $Tout[v]$. Время выхода из вершины является одним из важнейших параметров для данного алгоритма, так как помогает определить размер сильно связной компоненты в графе [8].

Также при обходе каждой вершины её помечают цветом. При первом посещении вершины она помечается серым цветом и после обработки всех её смежных вершин она помечается черным цветом. Из этого следует, что:

- $Tin[v]$ – время, за которое вершина была обнаружена и покрашена в серый цвет;
- $Tout[v]$ – время, за которое вершина была обработана и покрашена в черный цвет.

Каждая вершина v соответствует неравенству: $Tin[v] < Tout[v]$.

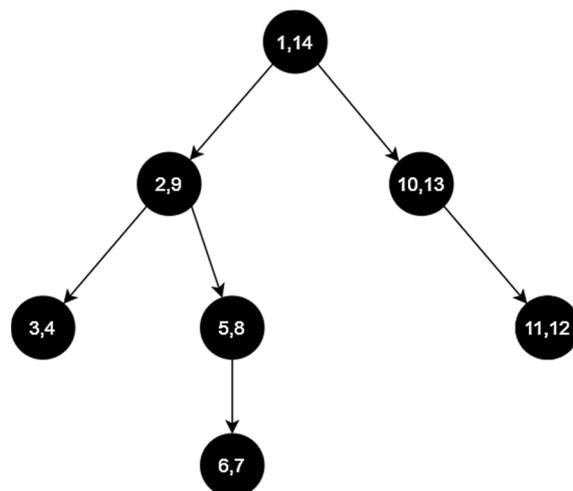


Рис. 5. Граф с расставленными метками обнаружения и обработки вершин

Ребро (u, v) является:

а) прямым ребром при условии, что выполняется неравенство

$$Tin[u] < Tin[v] < Tout[v] < Tout[u]. \quad (1)$$

б) обратным ребром при условии, что выполняется неравенство

$$Tin[v] < Tin[u] < Tout[u] < Tout[v]. \quad (2)$$

в) поперечным ребром при условии, что выполняется неравенство

$$Tin[v] < Tout[v] < Tin[u] < Tout[u]. \quad (3)$$

Пусть существует две различные КСС – C и C' . Если в графе между ними есть ребро (C, C') тогда справедливо следующее утверждение:

$$Tout[C] > Tout[C']. \quad (4)$$

Из этого следует, что есть зависимость от того, из какой КСС алгоритм для обхода в глубину запущится раньше. То есть зависимость от отношения $Tin[C]$ и $Tin[C']$.

1. В случае, когда алгоритм для обхода в глубину первым попадает в C . Это обозначает, что в определённый момент времени $Tin[v]$ обход в глубину зайдет в вершину v компоненты C , при этом другие вершины, принадлежащие C и C' , еще не найдены. Из вершины v существует путь до всех вершин компоненты C и также до всех вершин компоненты C' ,

так как в графе есть ребро (C, C') . Из этого следует, что при выполнении обхода в глубину из вершины v алгоритм найдёт все вершины компонент C и C' и, следовательно, эти вершины станут потомками вершины v . На основе этого можно утверждать, что для любой вершины $u \in C \cup C', u \neq v$ будет выполнено $Tout[v] > Tout[u]$.

2. В случае, когда алгоритм для обхода в глубину первым попадает в C' . Это обозначает, что в определённый момент времени алгоритм для поиска в глубину находит некоторую вершину $v \in C'$, при этом другие вершины C и C' не найдены. Известно, что существует ребро (C, C') и из этого следует, что путь $C' \rightarrow C$ не существует и алгоритм поиска в глубину, запущенный из вершины v , не найдёт вершины из компоненты C . Следовательно, вершины, принадлежащие области сильной связности C , будут найдены позже, отсюда и следует:

$$Tout[C] > Tout[C'] \quad (5)$$

Из вышесказанного следует, что любое ребро (C, C') в графе идёт из компоненты с большей величиной $Tout$ в компоненту с меньшей величиной.

Чтобы найти вершину u , которая находится в «корневой» КСС, в которую не входит ни одно другое ребро в графе, необходимо отсортировать все вершины v , принадлежащие графу в порядке убывания времени выхода $Tout[v]$. В результате данной сортировки в начале будет находиться вершина u .

Далее, из вершины u необходимо запустить алгоритм обхода графа для поиска всех элементов текущей КСС и не учитывать элементы из других КСС. Данный процесс итерационный, и при обнаружении очередной КСС все её вершины необходимо исключить из списка вершин для последующего запуска алгоритма и из оставшихся найти вершину с наибольшим $Tout$ для продолжения работы алгоритма.

Далее необходимо транспонировать граф G в G^T , то есть заменить направления всех рёбер исходного графа на противоположные. В таком графе будут такие же КСС, которые были найдены в исходном графе.

Транспонированный граф позволит обойти всю «корневую» КСС, которая содержит вершину v . Для этого достаточно запустить алгоритм для обхода в глубину из вершины v в графе G^T . Будет выполнен обход всех вершин

данной КСС. Далее требуется все найденные вершины исключить из алгоритма и среди оставшихся найти вершину с наибольшим $Tout[v]$. Это позволит запустить алгоритм из данной вершины и продолжить обход на транспонированном графе.

При выходе из очередной КСС необходимо проставить метку $SCCw[v]$ на группу элементов, которые составляют данную область, чтобы обозначить вес этой области.

$SCCw[v]$ (Strongly connected component weight) – обозначает вес КСС.

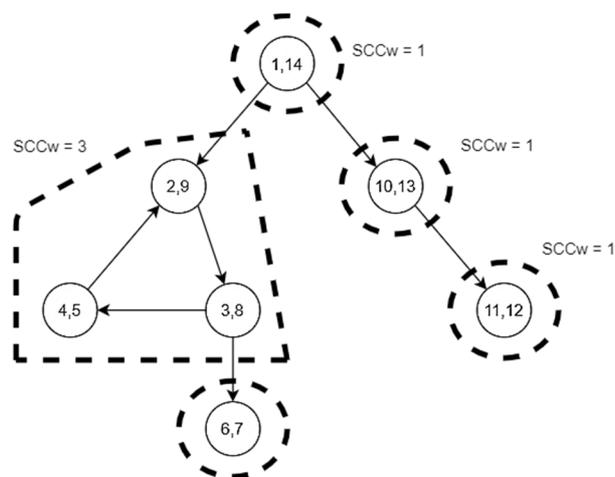


Рис. 6. Граф с проставленным весом КСС

Следовательно, весь алгоритм сводится к следующим шагам:

1. Запуск обхода в глубину графа G и сохранение времени обработки каждой компоненты $Tout$.
 2. Транспонирование исходного графа в G^T .
 3. Запуск обхода в глубину графа G^T в порядке убывания значения $Tout$ каждой его вершины.
 - 3.1. Обход всех вершин текущей КСС;
 - 3.2. Указание веса для текущей КСС;
 - 3.3. Переход к нерассмотренной вершине и повтор подпункта 3.1, при условии наличия необработанных вершин.
- В результате выполнения очередного обхода алгоритма выделяются множества вершин, которые будут являться КСС.

Обсуждение результатов и выводов

Предложенная модификация алгоритма позволяет:

- организовывать поиск всех затронутых в результате аварии или нештатного режима

работы оборудования элементов телекоммуникационной сети;

– проводить имитацию работы узлов сети в условиях различных нагрузок, внешних факторов и неполадок;

– получать данные о процессе маршрутизации сети на основе результатов методов обхода графа.

При этом алгоритм учитывает, что подобная сеть может иметь множество областей сильной связности и указывает каждой области свой «вес», учитывая который дальнейший алгоритм будет выбирать путь обхода графа в зависимости от входящих параметров.

Благодаря этому можно воспроизводить обход сети по короткому или длинному маршруту, получить замеры работы оборудования и результатов операции. Вся эта информация может быть далее использована инженерами для проведения анализа и оптимизации структуры сети и её параметров.

Также данный алгоритм позволит администратору сети определить, какие её элементы будут затронуты в результате аварии или технических работ на определённом участке сети и в каком состоянии будут затронутые элементы:

– неработоспособные: элемент был полностью выведен из строя;

– с нарушенной работоспособностью: элемент функционирует, однако его производительность уменьшена;

– работающий на резерве: в случае, если нарушена целостность основного канала передачи данных и задействован резервный канал.

Представленный выше алгоритм имеет множество применений для различных ситуаций, которые могут пройти в телекоммуникационной сети. Однако при этом он не основан

на каких-либо особенностях телекоммуникационных сетей и может использоваться в других сферах деятельности, где необходима модель хранения данных в виде графа, который обладает высокой плотностью КСС. Одним из ярких примеров может быть использование данного алгоритма в геоинформационных системах, которые используют графы для хранения данных и имеют огромные объёмы данных для хранения. В подобных условиях иметь возможность поиска кратчайшего пути за минимально возможное время играет одну из важнейших ролей в работе подобной системы. Такие же возможности данный алгоритм раскрывает для систем логистики, социальных сетей, магазинов и многих других сфер [9].

Литература

1. Капустин Д.А., Дементьев В.Е. Информационно-вычислительные сети: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2011. 141 с.
2. Крук Б.И., Попантопуло В.Н., Шувалов В.П. Телекоммуникационные системы и сети: учеб. пособие. В 3 т. Т. 1: Современные технологии. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 620с.
3. Эд Уилсон. Мониторинг и анализ сетей. Методы выявления неисправностей. М.: Лори, 2012. 386 с.
4. Евстигнеев В.А., Касьянов В.Н. Теория графов. Алгоритмы обработки деревьев. М.: Наука, 1994. 360 с.
5. Скиена С.С. Алгоритмы. Руководство по разработке. М.: БХВ-Петербург, 2018. 720 с.
6. Sharir M. A Strong-connectivity Algorithm and its Applications in Data Flow Analysis. Palala Press, 2015. 42 p.
7. Роберт Седжвик. Алгоритмы на графах = Graph algorithms. 3-е изд. СПб.: «ДиаСофтЮП», 2002. 496 с.
8. On Identifying Strongly Connected Components in Parallel/ Fleischer, K. Lisa, Bruce Hendrickson and Ali Pinar. Springer, 2000. pp. 505.
9. Оре Ойстин. Графы и их применение – Едиториал УРСС, Ленанд. 2015. 208 с.

Поступила 14.04.2020; принята к публикации 15.06.2020

Информация об авторах

Рындин Александр Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: alexandr.a.ryndin@me.com

Саргсян Эрик Ромович – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: xanderx2012@gmail.com

THE DATA NETWORK BEHAVIOR PREDICTION IN THE MONITORING SYSTEM OF TELECOMMUNICATION NETWORKS BASED ON THE MODIFIED KOSARAJU'S ALGORITHM

A.A. Ryndin, E.R. Sargsyan

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers issues of forecasting the behavior of the data transmission network in the monitoring system of telecommunication networks. We analyzed the relevance of the subject area and a set of existing software that solves the problem. We identified the necessary set of functionality, supported by the developed solution, and a list of tasks that will be covered by it, as well as examples of a model of a telecommunication network and tasks that need to be solved during a network tour. We describe a model for storing data in a telecommunications data network. We determined the parameters that will be calculated for each network element, and the dependencies between network nodes. We describe the problem of the presence of a large number of areas of strong connectivity, in connection with which we considered a lot of solution methods and the Kosaraju's algorithm was found to solve the problem. We determined the tasks that were not covered by the Kosaraju's algorithm, and considered options for modifying this algorithm. We constructed a mathematical model that takes into account the time of entry and exit to each element of the network (graph), we described the principles of the relationship between these parameters, and a method for calculating the weight of each area of strong connectivity to determine the necessary bypass route. We described the method for applying the modified Kosaraju's algorithm step by step, summarized the results of the study and described the relevance of the modified Kosaraju's algorithm for other areas

Key words: telecommunications network, prediction, Kosaraju's algorithm, graph, strongly connected component

References

1. Kapustin D. A., Dement'ev V. E. "Information network: manual" ("Informatsionno-vychislitel'nye seti: ucheb. posobie"), Ul'yanovsk, USTU, 2011, 141 p.
2. Kruk B.I., Popantonopulo V.N., Shuvalov V.P. "Telecommunications systems and network: manual" ("Telekommunikatsionnye sistemy i seti: ucheb.posobie"), Moscow, Goryachaya liniya - Telekom, 2012, vol. 1, 620 p.
3. Willson E. "Network monitoring and analysis. Troubleshooting methods", Moscow, Lori, 2012, 386 p.
4. Evstigneev V.A., Kas'yanov V.N. "Graph theory. Tree processing algorithms" ("Teoriya grafov. Algoritmy obrabotki derev'ev"), Moscow, Nauka, 1994, 360 p.
5. Skiena S.S. "Algorithms. Development guide" ("Algoritmy. Rukovodstvo po razrabotke"), Moscow, BHV-Peterburg, 2018, 720 p.
6. Sharir M. "A strong-connectivity algorithm and its applications in data flow analysis", Palala Press, 2015, 42 p.
7. Sedgewick R. "Graph algorithms", St. Petersburg, «DiaSoftYUP», 2002, 496 p.
8. Fleischer L.K., Hendrickson B., Pinar A. "On identifying strongly connected components in parallel", Springer, 2000, 505 p.
9. Ore Ojstin "Graphs and their application", Lenand, 2015, 208 p.

Submitted 14.04.2020; revised 15.06.2020

Information about the authors

Aleksandr A. Ryndin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: alexandr.a.ryndin@me.com

Erik R. Sargsyan, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sapis@vorstu.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ДИАГРАММООБРАЗУЮЩЕЙ СХЕМОЙ НА ОСНОВЕ ПЕЧАТНОЙ ЛИНЗЫ РОТМАНА

А.В. Ашихмин¹, А.В. Иванов², Ю.Г. Пастернак^{1,2,3}, П.В. Першин¹, Ф.С. Сафонов³,
С.М. Федоров³, И.А. Зеленин³

¹ Научно-производственная компания АО «ИРКОС», г. Москва, Россия

² Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж, Россия

³ Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: радиопеленгация источников радиоизлучений (ИРИ) является одной из приоритетных областей применения систем радиоконтроля. Рассмотрены варианты построения радиопеленгаторных антенных решеток с однокоординатным управлением диаграммы направленности с диаграммообразующей схемой на основе печатной линзы Ротмана, приведены результаты их электродинамического моделирования. Предложены варианты построения радиопеленгаторных антенных решеток с однокоординатным управлением диаграммы направленности с диаграммообразующими схемами (ДОС) на основе печатной линзы Ротмана, приведены результаты их электродинамического моделирования. Показана возможность интегрального исполнения сверхширокополосной антенной решетки с коммутационным сканированием в плоскости вектора напряженности электрического поля с ДОС на основе печатной линзы Ротмана. Наиболее удобными для реализации видами излучателей являются печатные логопериодические антенны и антенны Вивальди. При использовании в качестве элементов решетки плоских вибраторов с общим рефлектором и директорами удастся повысить коэффициент полезного действия элементов в составе решетки за счет взаимного влияния излучателей по внешнему полю. Рассмотренные варианты линейных антенных решеток, управляемые с помощью линзы Ротмана, могут использоваться для построения антенных решеток с двухкоординатным сканированием

Ключевые слова: радиопеленгация, линза Ротмана, антенна Вивальди

Введение

Радиопеленгация источников радиоизлучений (ИРИ) является одной из приоритетных областей применения систем радиоконтроля. Среди важных направлений улучшения аппаратуры радиопеленгации можно выделить следующие: повышение энергетического потенциала комплексов в сверхширокой полосе частот, повышение надежности их функционирования, уменьшение габаритных размеров аппаратуры, обеспечение хорошей повторяемости ее характеристик в серийном производстве, снижение стоимости [1, 2].

Применение технологии производства печатных плат для реализации элементов и диаграммообразующих схем (ДОС) фазированных антенных решеток (ФАР) позволяет достичь всех обозначенных выше целей. При этом существенного повышения энергетического потенциала аппаратуры позволяет добиться применение линз Лунеберга (при полноазимутальной зоне

действия комплекса) или линз Ротмана (при секторном обзоре пространства) в печатном исполнении с размещенными на них малозумящими усилителями высокой частоты [3-5].

В настоящей работе предложены варианты построения радиопеленгаторных антенных решеток с однокоординатным управлением диаграммы направленности с ДОС на основе печатной линзы Ротмана, приведены результаты их электродинамического моделирования методом Вейланда [6].

Вертикальные линейные антенные решетки, запитанные с помощью линзы Ротмана

Для повышения разрешающей способности радиопеленгаторов СВЧ и КВЧ диапазонов волн в угло-местной плоскости перспективным является использование вертикальных линейных антенных решеток, запитанных с помощью линзы Ротмана.

Весьма привлекательной идеей является изготовление антенной решетки и линзы Ротмана в виде единой печатной платы, представленной на рис. 1 и 2.

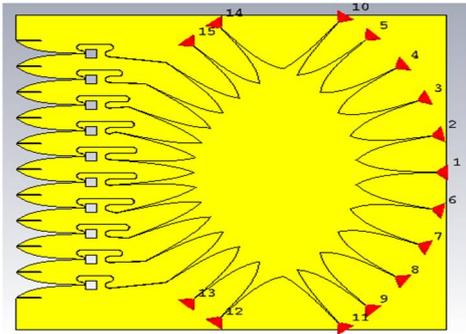
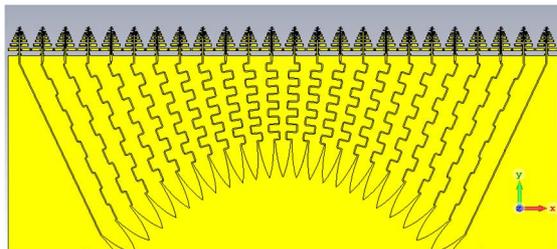
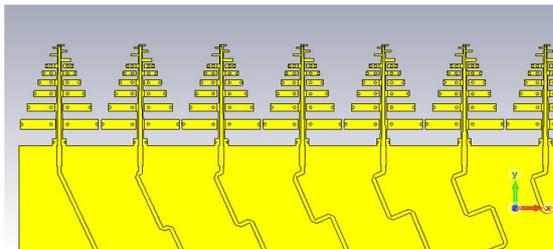


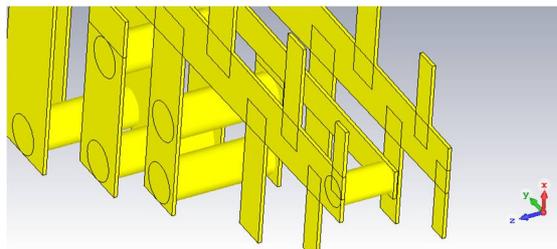
Рис. 1. Интегрирование линейной антенной решетки из элементов Вивальди с линзой Ротмана



а)



б)



в)

Рис. 2. Антенная решетка из вибраторных логопериодических антенн, интегрированная с линзой Ротмана

Линза Ротмана может быть реализована в виде несимметричной или симметричной полосковой линии. Несимметричная полосковая линия конструктивно проще, однако симметричный вариант исполнения имеет ряд преимуществ: практически не имеет потерь на излучение, более компактен. Кроме того, реализация линзы Ротмана с помощью симметричной полосковой линии (две земли и между ними тело линзы с трансформаторами и участком принудительного преломления) дает возможность свернуть в рулон достаточно малого диаметра. В теле линзы

Ротмана, на участке принудительного преломления, а также в экспоненциальных трансформаторах преобладает ТЕМ-волна, направления распространения которой и фазовая скорость не претерпевают существенных изменений при сворачивании ДОС в рулон. В этом случае свернутая в рулон ДОС будет выполнять дополнительную роль стойки жесткости, на которой расположена вертикально ориентированная антенная решетка, как это показано на рис. 3.

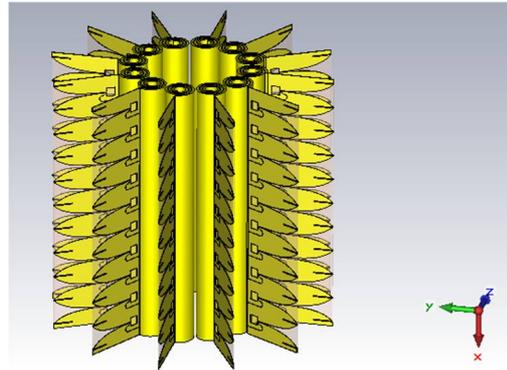


Рис. 3. Кольцевая антенная решетка из линейных вертикальных антенных подрешеток, питаемых с помощью линз Ротмана, свернутых в спирали небольшого диаметра

Для реализации данного подхода диэлектрик должен быть достаточно гибким и тонким, однако следует помнить о том, что при уменьшении толщины диэлектрической подложки неизбежен рост потерь в металле. Поэтому следует выбирать ламинат со слоем металла, выполненным по технологии проката (при гальваническом осаждении металла омические потери будут существенно большими).

Антенная система, модель которой показана на рис. 3, дает возможность реализовать двухкоординатное управление диаграммой направленности: по азимуту в диапазоне от 0° до 360° , а также по углу места в секторе $\pm 45^\circ$ (максимально достижимый сектор сканирования антенной решетки с ДОС в виде линзы Ротмана достигает $\pm 60^\circ$).

Линейная антенная решетка на основе сверхширокополосных плоских вибраторов, запитанных с помощью линзы Ротмана

Весьма перспективными элементами для построения антенных решеток, диаграмма направленности которых управляется с помощью линзы Ротмана, являются сверхширокополосные плоские вибраторы с рефлектором и директором, показанные на рис. 4. Каждый вибратор запитан

с помощью полоскового симметрирующего и согласующего трансформатора. Полоса рабочих частот вибратора – от 1 ГГц до 3 ГГц, габаритные размеры – $58 \times 58 \times 53.5 \text{ мм}^3$.

В процессе численного анализа уединенного антенного элемента использовалась его упрощенная физическая модель: непосредственно к рефлектору примыкала бесконечно протяженная электрическая стенка. Таким образом была проведена оценка характеристик согласования элемента в наиболее неблагоприятном случае; главный лепесток диаграммы направленности элемента в данном случае характеризуется наименьшей шириной, что позволяет получить оценку минимально возможного сектора сканирования.

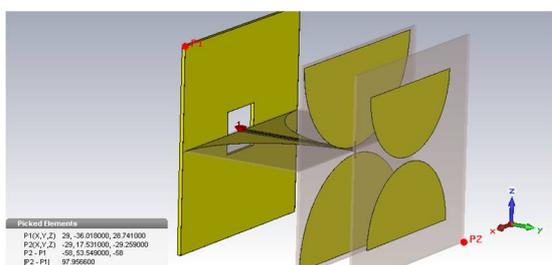


Рис. 4. Сверхширокополосный вибратор с рефлектором и директором

Входные характеристики плоского вибратора с рефлектором и директором приведены на рис. 5, 6.

- 1 (2.41, 14) Ohm
- 3 (59.1, -34.6) Ohm

Frequency / GHz

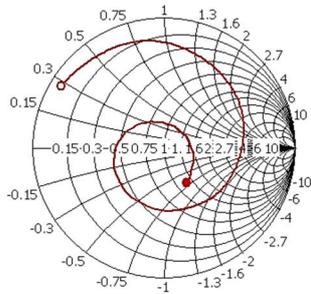


Рис. 5. Номограмма Смита уединенного плоского вибраторного антенного элемента с рефлектором и директором

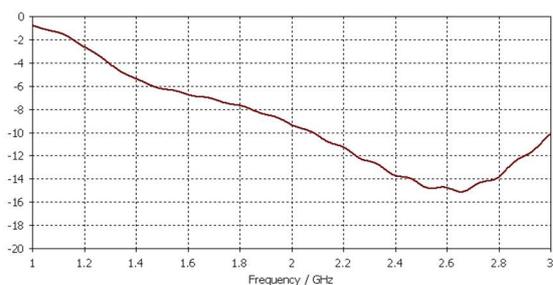


Рис. 6. Коэффициент отражения (S_{11}), дБ, на входе уединенного плоского вибраторного антенного элемента с рефлектором и директором

Частотные зависимости эффективности излучения и суммарного коэффициента полезного действия (обе зависимости в дБ) приведены на рис. 7.

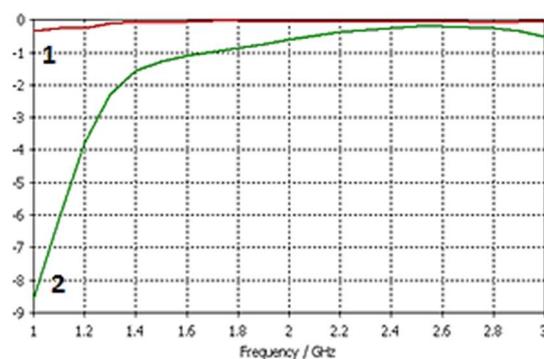
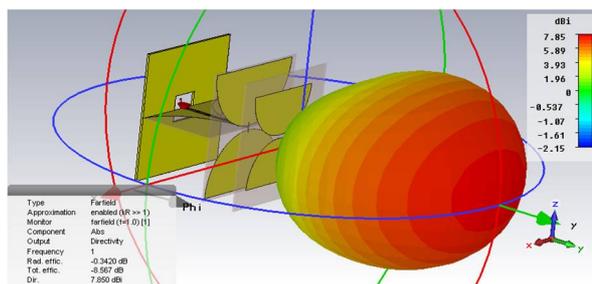
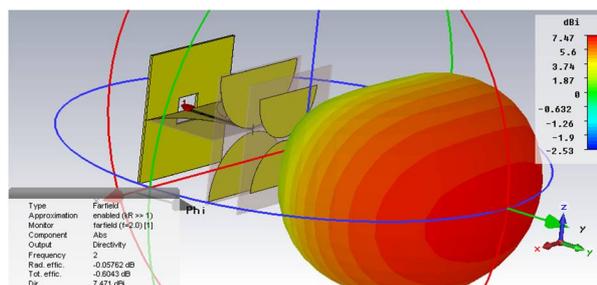


Рис. 7. Потери в диэлектрике и металле в уединенном антенном элементе (линия 1) и суммарные потери с учетом рассогласования антенного элемента (линия 2)

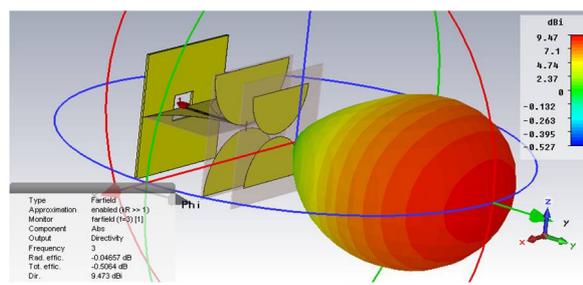
Анализ показал, что форма диаграммы направленности остается практически неизменной в полосе частот с трехкратным перекрытием, рис. 8.



а) частота 1 ГГц



б) частота 2 ГГц



в) частота 3 ГГц

Рис. 8. Объемная диаграмма направленности вибраторного антенного элемента в полосе частот 1 ГГц – 3 ГГц

Ширина главного лепестка в азимутальной плоскости xOy изменяется в полосе частот от 1 до 3 ГГц в пределах от 76° до 111° ; коэффициент направленного действия изменяется от 7.5 дБи до 9.5 дБи.

Модель линейной антенной решетки из 10 плоских вибраторных элементов с общим рефлектором и директорами показана на рис. 9.

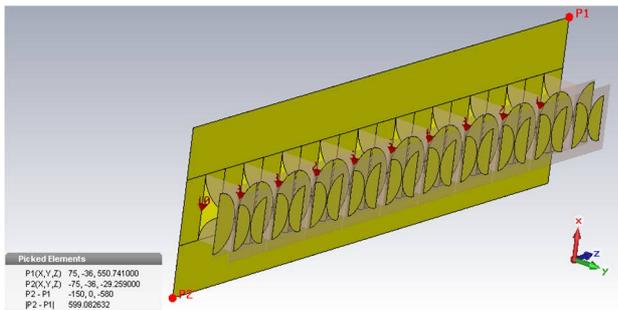


Рис. 9. Линейная антенная решетка из 10 вибраторных элементов с общим рефлектором и директорами

Отметим интересный момент: благодаря взаимной связи по внешнему полю между соседними элементами существенно улучшается согласование в низкочастотной области исследуемого диапазона частот 1 ГГц – 3 ГГц, что выражается в уменьшении суммарных потерь вплоть до 6 дБ (рис. 10). Диаграмма направленности антенной решетки на ряде дискретных частот приведена на рис. 11, 12.

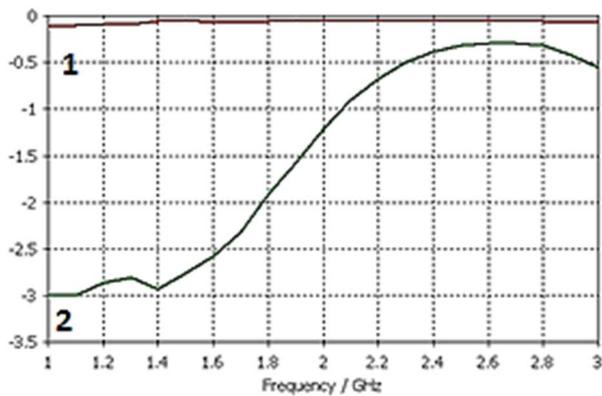
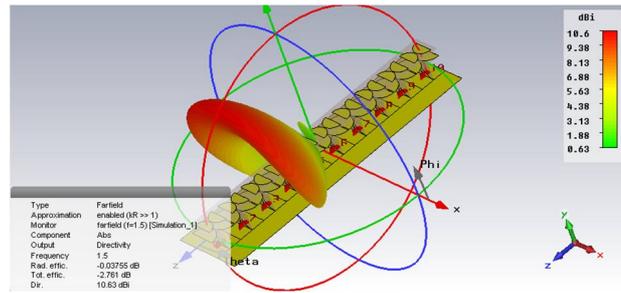
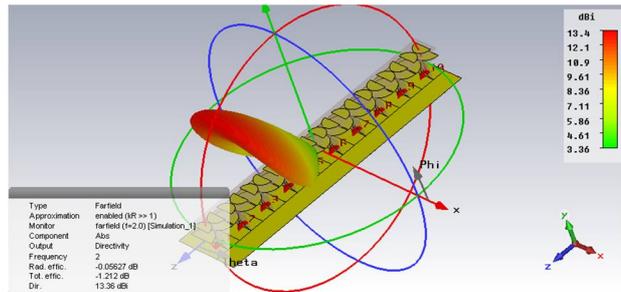


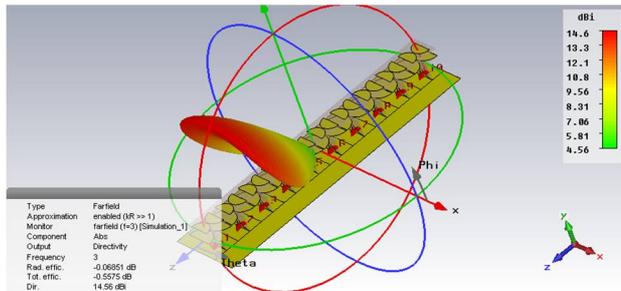
Рис. 10. Потери в диэлектрике и металле в элементе, находящемся в составе антенной решетки – линия 1; суммарные потери (с учетом рассогласования антенного элемента) – линия 2



а) частота 1,5 ГГц



б) частота 2 ГГц



в) частота 3 ГГц

Рис. 11. Диаграмма направленности антенной решетки при фазировании главного лепестка в направлении 45° от нормали (сектор сканирования в угло-местной плоскости составляет $\pm 45^\circ$ от нормали)

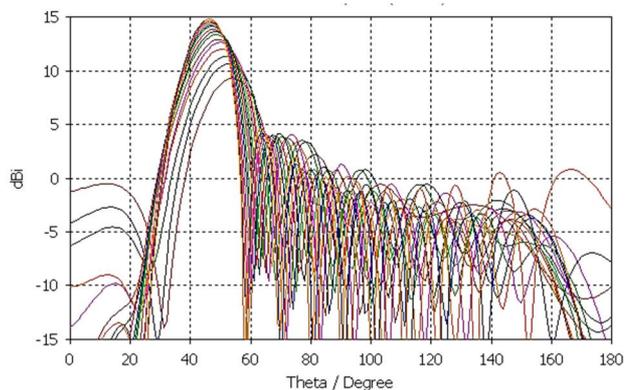


Рис. 12. Разрезы в плоскости сканирования диаграммы направленности антенной решетки при фазировании главного лепестка в направлении 45° от нормали

Для формирования диаграммы направленности антенной решетки в секторе сканирования шириной 90° используется печатная линза Ротмана. Линза выполнена в виде симметричной

полосковой линии на материале Rogers 3003, полная толщина 1 мм. Сектор сканирования составляет $\pm 45^\circ$ от нормали. Топология линзы показана на рис. 13.

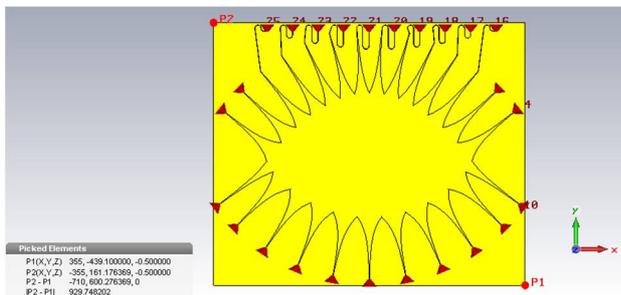


Рис. 13. Топология линзы Ротмана

На рис. 14–20 показаны основные характеристики антенной решетки с ДОС на основе печатной линзы Ротмана. На рис. 21 приведен вид типичной диаграммы направленности ФАР с линзой Ротмана.

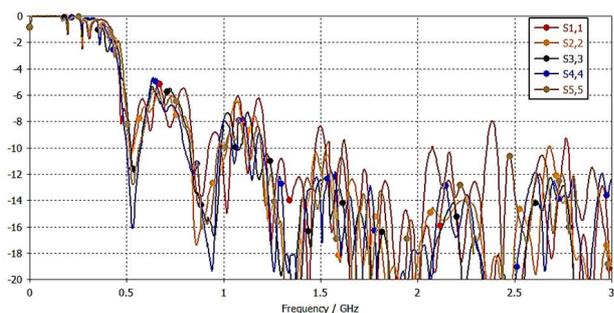


Рис. 14. Частотные зависимости коэффициентов отражения S_{11} от входов линзы, дБ

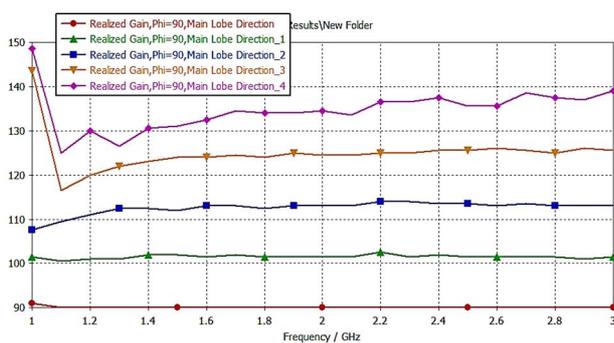


Рис. 15. Частотные зависимости углового положения максимума главного лепестка антенной решетки при запитке центрального и боковых портов линзы Ротмана

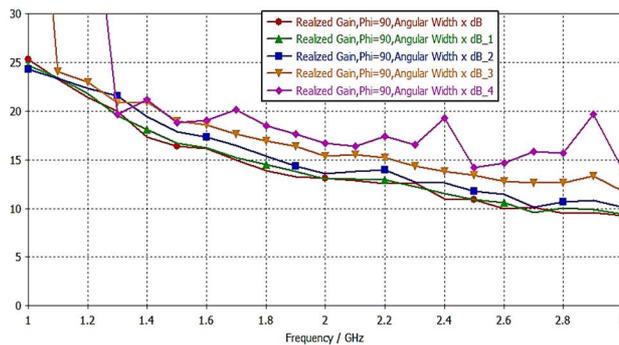


Рис. 16. Ширина главного лепестка ДН антенной решетки, град., по уровню -3 дБ в плоскости сканирования в полосе частот 1 ГГц – 3 ГГц при запитке центрального и боковых портов линзы Ротмана

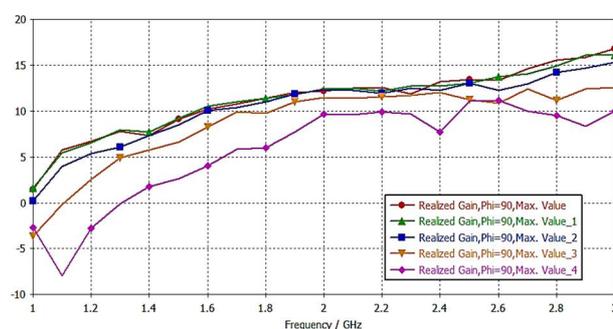


Рис. 17. Частотные зависимости коэффициента усиления (с учетом потерь и рассогласования) антенной решетки, запитанной с помощью линзы Ротмана

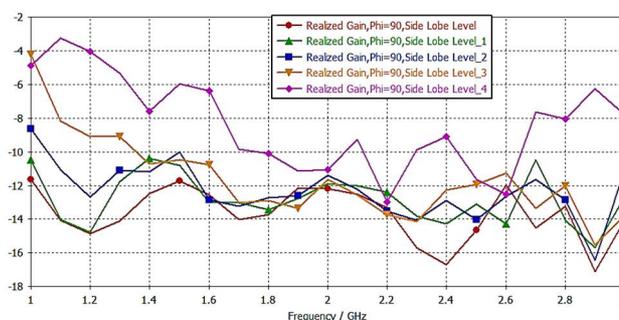


Рис. 18. Частотные зависимости уровня боковых лепестков (дБ) антенной решетки, запитанной с помощью линзы Ротмана

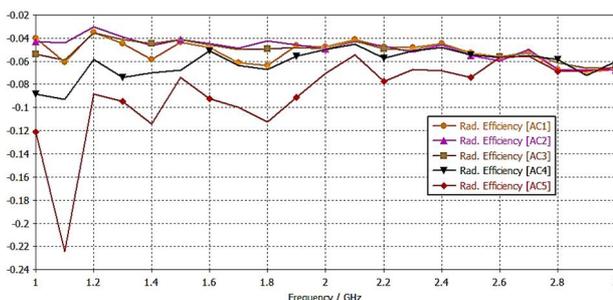


Рис. 19. Частотные зависимости потерь (дБ) в диэлектрике и металле антенной решетки, запитанной с помощью линзы Ротмана

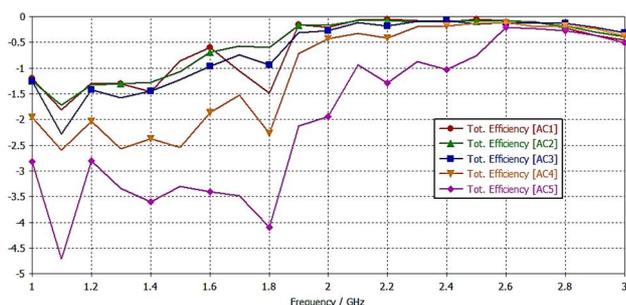


Рис. 20. Частотные зависимости полных потерь (дБ) в диэлектрике, металле, балластных резисторах линзы Ротмана и потерь на рассогласование антенной решетки, запитанной с помощью линзы Ротмана

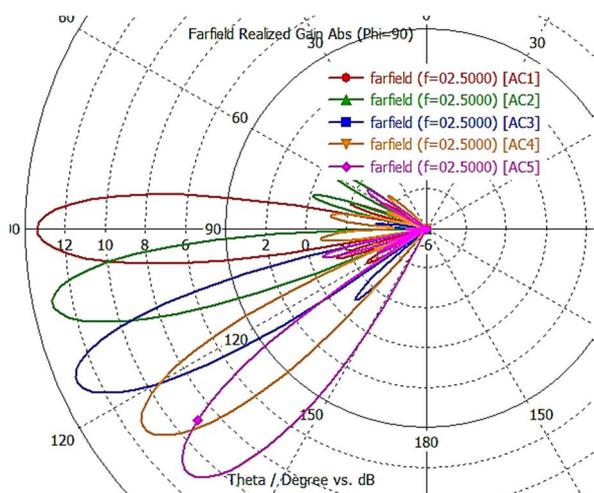


Рис. 21. Диаграмма направленности антенной решетки, запитанной с помощью линзы Ротмана, на частоте 2.5 ГГц

Заключение

Рассмотрены варианты построения радиопеленгаторных антенных решеток с однокоординатным управлением диаграммы направленности с ДОС на основе печатной линзы Ротмана. Показана возможность интегрального исполнения сверхширокополосной антенной решетки с ком-

мутационным сканированием в плоскости вектора напряженности электрического поля с ДОС на основе печатной линзы Ротмана. Наиболее удобными для реализации видами излучателей являются печатные логопериодические антенны и антенны Вивальди.

При использовании в качестве элементов решетки плоских вибраторов с общим рефлектором и директорами удастся повысить коэффициент полезного действия элементов в составе решетки за счет взаимного влияния излучателей по внешнему полю.

Рассмотренные варианты линейных антенных решеток, управляемых с помощью линзы Ротмана, могут использоваться для построения антенных решеток с двухкоординатным сканированием.

Литература

1. Бортовая малогабаритная широкодиапазонная станция радиоконтроля/ А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин, И.Б. Крыжко, П.В. Першин, А.Б. Токарев // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXIV Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2018. Т. 2. С. 375-382.
2. Radio monitoring. Problems, Methods and Equipment/ A.M. Rembovsky, A.V. Ashikhmin, V.A. Kozmin, S.M. Smol'skiy. Dordrecht: Springer, 2009. 507 p.
3. Dhouibi A., Burokur S.N., Lustrac A. Compact Metamaterial-Based Substrate-Integrated Luneburg Lens Antenna // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2012. Vol. 11. Pp. 1504-1507.
4. Su Y., Chen Z.N. A Flat Dual-Polarized Transformation-Optics Beamscanning Luneburg Lens Antenna Using PCB-Stacked Gradient Index Metamaterials // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66. No. 10. P. 9-11.
5. Manafi S., Fernandez Gonzalez J.M., Filipovic D.S. Design of a Perforated Flat Luneburg Lens Antenna Array for Wideband Millimeter-Wave Applications // 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Krakow, Poland, 2019. No. 3. P. 3-9.
6. Weiland T. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields // Electronics and Communication. 1977. Vol. 31. Pp. 116-120.

Поступила 11.03.2020; принята к публикации 16.06.2020

Информация об авторах

Ашихмин Александр Владимирович - д-р техн. наук, профессор, директор ОСП в г. Воронеже, Научно-производственная компания АО «ИРКОС» (129626, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), e-mail: pasternakug@mail.ru
Иванов Александр Владимирович - канд. техн. наук, старший преподаватель, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а), e-mail: pasternakug@mail.ru
Пастернак Юрий Геннадьевич - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14); ведущий инженер, Научно-производственная компания АО «ИРКОС» (129626, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21); старший научный сотрудник научно-исследовательского центра, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а), e-mail: pasternakug@mail.ru
Першин Павел Викторович - ведущий инженер, Научно-производственная компания АО «ИРКОС» (129626, г. Москва, Москва, Звездный бульвар, д.21), e-mail: pasternakug@mail.ru
Сафонов Федор Сергеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: Safonov_fedia93@mail.ru

Федоров Сергей Михайлович - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Зеленин Иван Алексеевич - старший преподаватель кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pasternakyg@mail.ru

DESIGNING PERSPECTIVE ANTENNA ARRAYS WITH A DIAGRAM-FORMING SCHEME BASED ON A ROTMAN PRINTED LENS

A.V. Ashikhmin¹, A.V. Ivanov², Yu.G. Pasternak^{1,2,3}, P.V. Pershin¹, F.S. Safonov³, S.M. Fedorov³, I.A. Zelenin³

¹ JSC "IRCOS", Moscow, Russia

² Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy", Voronezh, Russia

³ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: radio direction finding of radio emission sources (RES) is one of the priority areas of application of radio monitoring systems. The article considers variants of the construction of direction-finding antenna arrays with single-axis beam control with a beam-forming diagram based on a printed Rotman lens and presents the results of their electrodynamic modeling. We propose options for constructing direction-finding antenna arrays with single-axis control of the radiation pattern with chart forming circuit (CFC) based on a printed Rotman lens, and present the results of their electrodynamic modeling. We show the possibility of the integrated design of an ultra-wideband antenna array with switching scanning in the plane of the electric field vector with CFC based on a printed Rotman lens. The most convenient types of emitters for implementation are printed log-periodic antennas and Vivaldi antennas. When using flat vibrators with a common reflector and directors as lattice elements, it is possible to increase the efficiency of the elements in the lattice due to the mutual influence of the emitters in the external field. The considered options for linear antenna arrays, controlled using the Rotman lens, can be used to build antenna arrays with two-axis scanning

Key words: radio direction finding, Rotman lens, Vivaldi antenna

References

1. Ashikhmin A.V., Koz'min V.A., Kryzhko I.B., Pershin P.V., Tokarev A.B. "Board small-size wide-scale radio monitoring station", *Proc. of the XXIV International Scientific and Technical Conference: Radar, Navigation, Communications (Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': sb. tr. XXIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.)*, 2018, vol. 2, pp. 375-382.
1. Rembovsky A.M., Ashikhmin A.V., Kozmin V.A., Smolskiy S.M. "Radio monitoring. Problems, methods and equipment", Dordrecht, Springer, 2009, 507 p.
2. Dhoubi A., Burokur S. N., Lustrac A. "Compact metamaterial-based substrate-integrated Luneburg lens antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, vol. 11, pp. 1504-1507.
3. Su Y., Chen Z.N. "A flat dual-polarized transformation-optics beams scanning Luneburg lens antenna using PCB-stacked gradient index metamaterials", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 10.
4. Manafi S., Fernandez Gonzalez J.M., Filipovic D.S. "Design of a perforated flat Luneburg lens antenna array for wideband millimeter-wave applications", *13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2019.
5. Weiland T. "A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields", *Electronics and Communication*, 1977, vol. 31, pp. 116-120.

Submitted 11.03.2020; revised 16.06.2020

Information about the authors

Aleksandr V. Ashikhmin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Director of the OSP in Voronezh, JSC "IRCOS" (21 Zvezdnyy blvd., Moscow 129626, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Aleksandr V. Ivanov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Starykh Bol'shevnikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), Leading Engineer of JSC "IRCOS" (21 Zvezdnyy blvd., Moscow 129626, Russia), Senior Researcher, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Starykh Bol'shevnikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Pavel V. Pershin, Leading Engineer of JSC "IRCOS" (21 Zvezdnyy blvd., Moscow 129626, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Fedor S. Safonov, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: safonov_fedia93@mail.ru

Sergey M. Fedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Ivan A. Zelenin, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КРИТИЧЕСКИХ УЗЛОВ И УСТРОЙСТВ ПРИЕМА ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВД.Г. Пантенков¹, В.П. Литвиненко²¹АО «Кронштадт», г. Москва, Россия²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в настоящее время в каналах управления всех без исключения автоматических специальных подвижных объектов тяжелого класса (космические аппараты, роботизированные комплексы, беспилотные летательные аппараты и т.д.) используются широкополосные радиосигналы, которые обеспечивают высокую скрытность, помехоустойчивость и возможность обеспечения непрерывной работы в сложной помеховой обстановке, включая непреднамеренное и преднамеренное радиоэлектронное воздействие со стороны эвентуального противника. При этом актуальным становится вопрос качественного приема и последующей обработки широкополосных радиосигналов на приемной стороне, который включает в себя последовательное выполнение ряда операций (обнаружение, синхронизация, вхождение в режим слежения, демодуляция, декодирование и т.д.). Данная статья посвящена вопросам математического и имитационного моделирования широкополосных радиосигналов, позволяющего определить требуемые характеристики сигналов и провести последовательный анализ их приема и обработки. В качестве прикладного программного обеспечения для проведения имитационного моделирования используется MathLab (Simulink), позволяющий поблочко сформировать исследуемую схему, задать требуемые параметры каждого блока. Представлены результаты имитационного моделирования узлов в условиях воздействия шумов, которые показывают необходимость использования в командно-телеметрических каналах роботизированных комплексов и систем широкополосных радиосигналов, которые легко поддаются обработке даже при входных отношениях сигнал/шум (или сигнал/(помеха+шум)), близких к нулю, при условии обеспечения высокой скрытности и помехоустойчивости

Ключевые слова: широкополосные радиосигналы, имитационная модель, прямое расширение спектра, устройства приема и обработки сигналов, синхронизация по частоте, псевдослучайная последовательность, демодулятор, декодер

Введение

В данной научно-технической статье рассматриваются вопросы приема и обработки широкополосных радиосигналов и практической реализации узлов модема широкополосной связи. Для этого используются методы математического и имитационного моделирования, позволяющие получить требуемые характеристики и провести анализ приема и обработки радиосигналов последовательно на всех этапах обработки информации [1-14].

Техническая реализация критических узлов и устройств для приема широкополосных сигналов

В данной статье рассматриваются различные аспекты приема широкополосных сигналов с прямым расширением спектра. В силу своей структуры они обладают непрерывным спектром, наиболее близким к спектру белого шума, что максимально затрудняет их обнаружение.

Процесс приема более сложен и требует

использования многочисленных систем синхронизации. Он условно может быть разбит на следующие крупные этапы:

- обнаружение синхронизирующих фрагментов расширяющей ПСП;
- вхождение в режим слежения за расширяющей ПСП;
- демодуляция сигнала;
- декодирование сигнала.

Процесс снятия ПСП может осуществляться либо до демодуляции сигнала, либо в его процессе.

Алгоритмы обработки сигналов на каждом из этапов допускают большое количество вариантов их реализации. Ниже рассмотрены возможные технические решения критических устройств для приема ШПС. Приводятся соответствующие структурные схемы, работа которых иллюстрируется имитационными моделями, выполненными в среде MATHLAB (SIMULINK). Для сокращения времени моделирования и улучшения наглядности результатов используется двухпозиционная фазовая модуляция (BPSK) с ограничением базы ШПС. Этим же целям служит разбиение всего приемного устройства на функциональные узлы.

Синхронизация ПСП и снятие расширения сигнала

Приемники ШПС обладают определенной спецификой, которая заключается в операции сжатия спектра сигнала, что, в свою очередь, накладывает определенные требования по точности синхронизации копии ПСП с расширяющей ПСП сигнала на приеме. При практическом использовании существенной может оказаться расстройка по времени/частоте эталона относительно принятого радиосигнала. На это влияет целый ряд факторов: расстояние между передатчиком и приемником, сдвиг частоты по Доплеру, движение объектов друг относительно друга и прочее [1, 2, 11-14].

Оптимальный измеритель временного сдвига местного генератора и принятого сигнала должен формировать оценку $\hat{\tau}$ этого параметра как запаздывание, максимизирующее корреляцию $z(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \cdot s(t-\tau) dt$ опорной копии расширяющего сигнала $s(t-\tau)$ с принятой реализацией $y(t)$. Если начальная фаза сигнала случайна и не содержит информации об измеряемом значении τ , аналогичная процедура производится относительно корреляций комплексных огибающих принятого сигнала и сдвинутых во времени копий расширяющей ПСП:

$$Z(\tau) = \left| 0,5 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \dot{Y}(t) \cdot \dot{S}^*(t-\tau) dt \right|$$

Процедура оценки по времени в условиях неопределенности проводится в 2 последовательных этапа [1, 11]:

- поиск кода: грубое измерение параметра и выдача его предварительной оценки для начала второго этапа;
- автосопровождение (слежение): вырабатывает точные временные оценки, используются местным эталоном для сведения копии ПСП сжимающей опоры с ПСП принятого сигнала.

Поиск ПСП

В сигнально-кодовых конструкциях (СКК) для синхронизации ПСП предусмотрен соответствующий фрагмент сигнала «Преамбула». На приемной стороне его структура известна. Незвестными величинами являются начальная фаза несущей на временной сдвиг ПСП. Следовательно, вычисление $Z(\tau)$ может быть произ-

ведено как согласованным фильтром, так и корреляционным методом, который рассматривается ниже.

Что касается согласованного фильтра поиска ПСП, то необходимо отметить следующее. Так как начальная фаза несущей неизвестна, то согласованный фильтр должен содержать квадратурные каналы. Длина фильтров, по крайней мере, должна в два раза превышать длину ПСП с учетом определения времени совпадения принятой ПСП и ее копии с точностью $\frac{1}{2}$ длительности элементарной посылки T_C .

В случае наличия временного сдвига местной копии псевдослучайной последовательности относительно входного сигнала один коррелятор может измерить рассогласование по времени только последовательно. Подобный алгоритм называется последовательным поиском, для видеосигнала $s(t)$ реализуется в виде структурной схемы, представленной на рис. 1. На рис.1 для большей информативности представлены все составные части имитационной модели.

В имитационной модели для сокращения времени моделирования и повышения наглядности приняты следующие упрощения:

- длина ПСП преамбулы ограничена 63 битами;
- ПСП преамбулы следуют непрерывно;
- величина расстройки сигнала несущей и его копии на приемной стороне выбрана равной $4 \cdot 10^{-6}$.

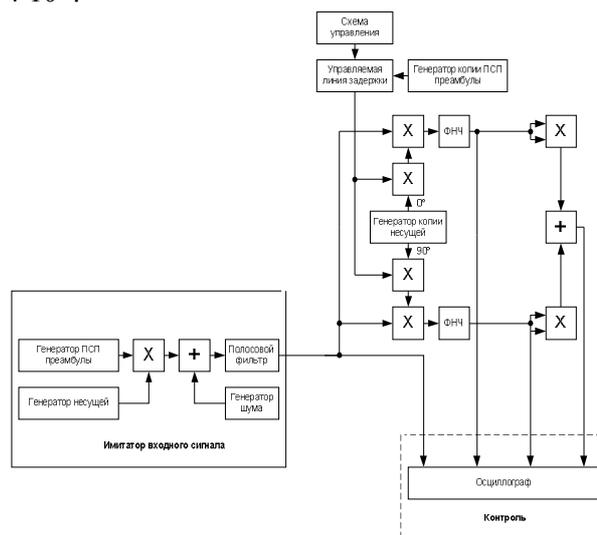


Рис. 1. Синхронизация по задержке расширяющей псевдослучайной последовательности

Имитатор входного сигнала содержит формирователь фазоманипулированного ШПС, генератор шума и соответствующие селектив-

ные цепи.

Устройство синхронизации содержит два квадратурных коррелятора, в которых сигналы копии несущей модулированы копией ПСП. Возможны и другие варианты построения корреляторов.

При моделировании контролируется входной сигнал, сигналы на выходе корреляторов и интегральный выходной отклик устройства.

Интегральный отклик представляет собой сумму квадратов выходных сигналов квадратурных корреляторов. Схема формирования интегрального отклика позволяет векторно

суммировать модули квадратов откликов корреляторов и скалярно – квадраты их шумовых составляющих.

На рис. 2 приведена полная схема модели в среде Simulink. На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования поиска момента совпадения принятой и опорной ПСП при отсутствии и наличии шумов.

Первое поле соответствует входному сигналу, второе и третье поля – индивидуальные выходы корреляторов, четвертое – интегральный отклик.

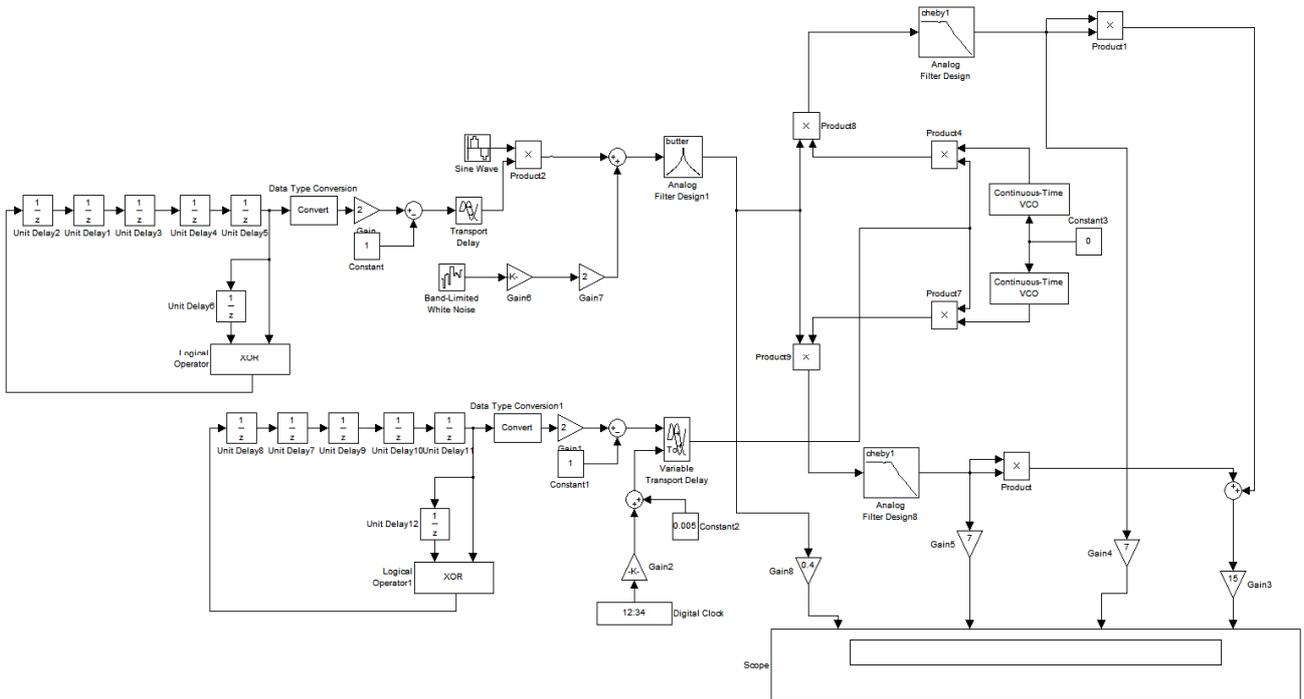


Рис. 2. Имитационная модель поиска ПСП преамбулы по задержке

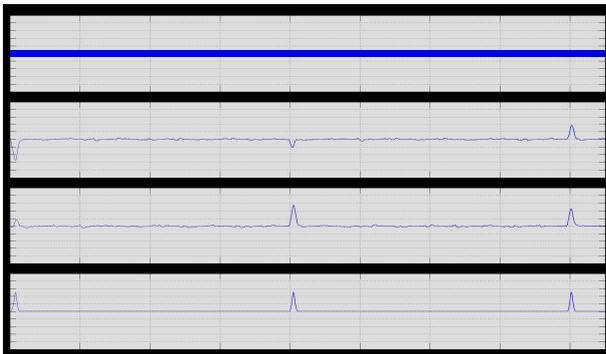


Рис. 3. Поиск момента совпадения принятой и опорной ПСП при отсутствии шумов

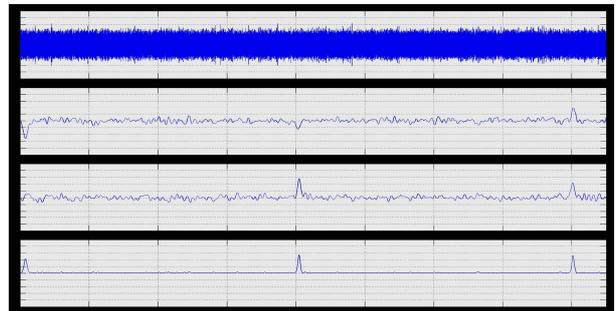


Рис. 4. Поиск момента совпадения принятой и опорной ПСП при соотношении сигнал/шум минус 6 дБ в полосе входного сигнала

В силу наличия расстройки между частотами несущей и ее копией сигналы на выходе корреляторов меняют свой знак пропорционально частоте биений. Интегральный отклик после операции возведения в квадрат своих со-

ставляющих имеет только положительное значение. Так как шумовые составляющие в квадратурных каналах ортогональны, то их квадраты суммируются скалярно. Кроме того, нелинейная процедура возведения в квадрат приводит к дополнительному увеличению соотношения между большими и малыми компонентами выходного сигнала. Эти факторы способствуют улучшению качества интегрального отклика после достижения определенного порога входного отношения сигнал/шум.

При большой базе сигнала преамбулы время поиска момента совпадения ПСП в одиночном корреляторе может стать недопустимо большим. Для его сокращения используются параллельные каналы обработки, в которых копии ПСП поступают со сдвигом по фазе.

Слежение за ПСП

По окончании процедуры поиска формируются оценки рассогласования (грубые) по времени принятой ПСП и её копии с ошибкой в пределах долей длительности элементарной посылки. Обеспечение точной синхронизации обеспечивается использованием схемы автоподстройки по задержке (АПЗ), в противном случае - петли автоподстройки по времени (АПВ). Схема автоподстройки по задержке позволяет измерить временное рассогласование опорного и принятого сигналов, подстроить местный генератор в направлении уменьшения ошибки, т.е. по сути обеспечить слежение за сигналом.

В данной статье уделено внимание типовой схеме автоподстройки по задержке (схема «ранняя-поздняя»), базирующейся на сравнении статистической взаимосвязи разделенных по времени δ ранней и поздней копий с принятым сигналом:

$$z(\tau + \delta/2) \text{ и } z(\tau - \delta/2).$$

Усреднение данных величин позволит получить отсчеты автокорреляционной функции (АКФ) сигнала расширения спектра:

$$\overline{z(\tau + \delta/2)} = R(\tau + \delta/2)$$

$$\overline{z(\tau - \delta/2)} = R(\tau - \delta/2)$$

Сигнал ошибки определим в виде

$$\varepsilon(t) = z(\tau + \delta/2) - z(\tau - \delta/2).$$

Математическое выражение сигнала ошибки (среднего значения) запишем в виде

$$\overline{\varepsilon(\bar{t})} = R(\tau + \delta/2) - R(\tau - \delta/2),$$

представляет собой разность 2-х копий АКФ, смещенных по τ на величину δ . В итоге имеем зависимость сигнала ошибки (усредненного) от рассогласования τ между принятым и опорным сигналами. Данная зависимость графически представляется дискриминационной кривой, рис. 5, для случая $\delta = 2\Delta$.

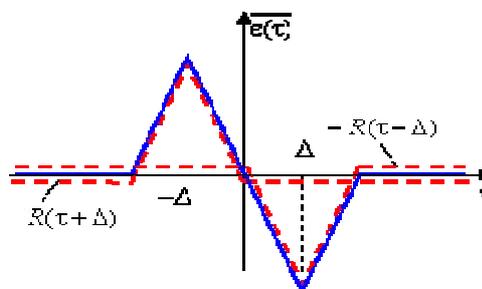


Рис. 5. Дискриминационная характеристика системы слежения за ПСП

Ранняя и поздняя копии $R(\tau)$ представлены на рис. 5 пунктирными, дискриминационная кривая – сплошной линией.

Как правило, δ выбирается близкой к длительности элементарной посылки T_c .

На рис. 6 показана структурная схема устройства слежения за ПСП преамбулы, а на рис. 7 – имитационная модель для исследования его работы.

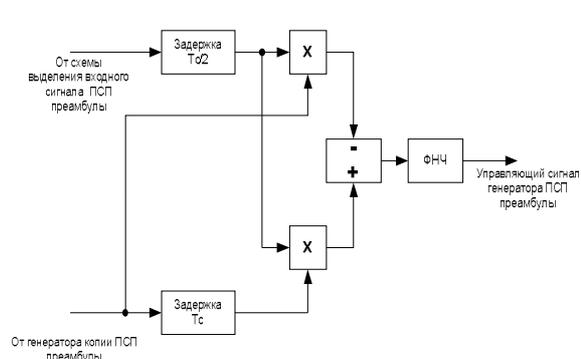


Рис. 6. Структурная схема устройства слежения за ПСП преамбулы

Модель состоит из генератора ПСП принятого сигнала, генератора шумов, генератора копии ПСП, устройств слежения и контроля.

В конкретном случае слежение обеспечивается управляемой линией задержки, хотя возможен и вариант использования управляемого генератора тактовой частоты ПСП.

На рис. 8 и 9 представлены результаты моделирования работы схемы сопровождения ПСП при начальной расстройке входного сигнала и его копии в пределах $1/2$ длительности элементарной посылки.

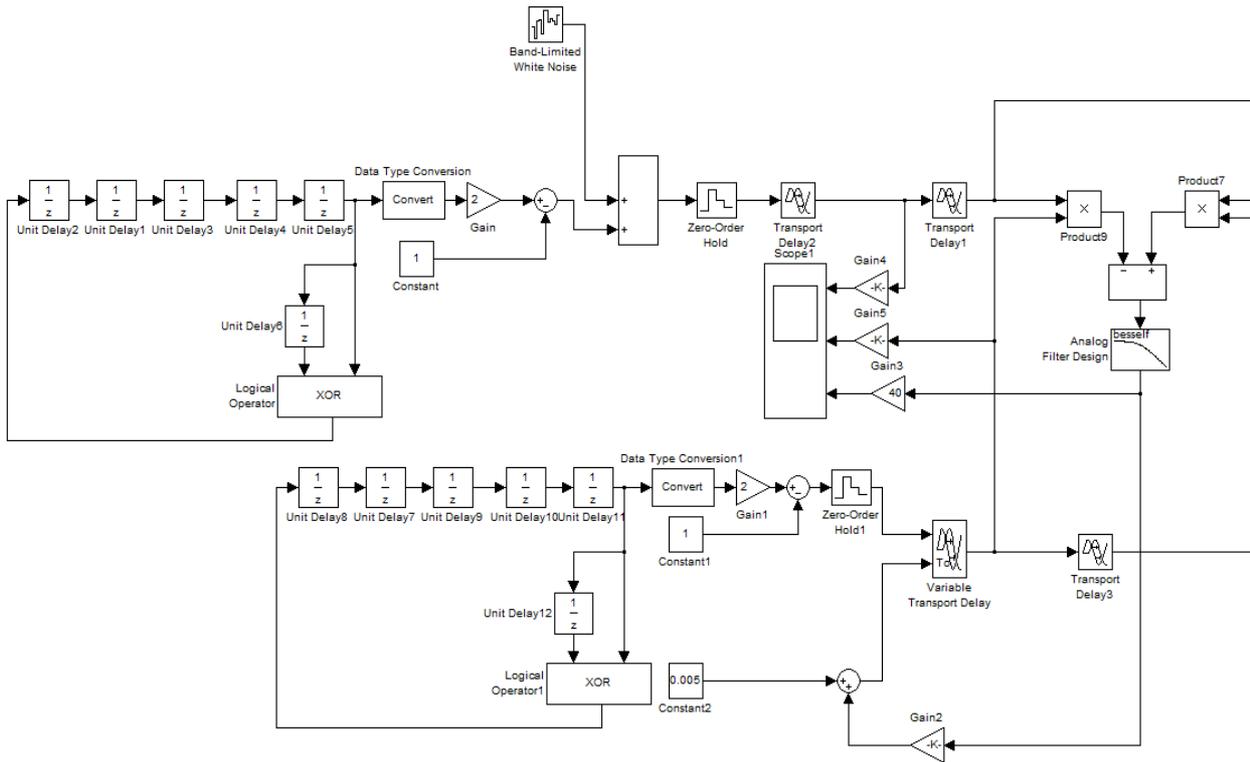


Рис. 7. Имитационная модель работы схемы сопровождения ПСП преамбулы



Рис. 8. Сопровождение ПСП преамбулы при отсутствии шумов

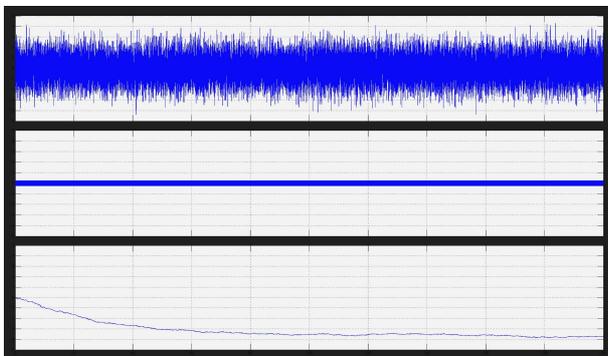


Рис. 9. Сопровождение ПСП преамбулы при наличии шумов

Верхнее первое поле соответствует принятой ПСП преамбулы, второе поле – подстраи-

ваемой копии ПСП, третье поле – управляющему сигналу фазовой подстройки.

После точного сведения ПСП последовательностей преамбулы может быть декодирован сигнал маркера, обозначающего начало кадра. Декодирование может производиться как согласованным фильтром, так и коррелятором.

Таким образом, в результате обработки создаются условия для снятия абонентской расширяющей последовательности, закон формирования которой в приемной аппаратуре известен. Снятие ПСП производится ее перемножением с входным ШПС.

Дальнейшие операции демодуляции и декодирования не отличаются от аналогичных при приеме узкополосных сигналов.

Демодуляция сигналов. Когерентный демодулятор с ФАПЧ с внутренним снятием ПСП

Демодулировать информационный сигнал можно как после внешнего снятия расширяющей последовательности, так и при ее наличии, но располагая сфазированной копией. Для демодуляции широкополосных ФМ-сигналов наибольшее распространение находят модифицированные схемы Костаса с внутренним снятием расширяющей ПСП, что снижает требо-

вания к производительности процессора. Наличие ФАПЧ позволяет осуществить когерентную демодуляцию сигнала по одному из двух квадратурных выходов [1,12]. На рис. 10 представлена структурная схема демодулятора ШПС с двухпозиционной ФМ.

Демодулятор представляет собой контур ФАПЧ с квадратурными каналами и снятием манипуляции управляющего напряжения ГУН с помощью перемножения выходов каналов.

Схема имитационной модели приведена на рис. 11. Модель содержит блоки формирования ШПС, шумового сигнала и собственно когерентный демодулятор.

Модель позволяет проследить прохождение сигналов в различных сечениях и выбрать оптимальные характеристики элементов демодулятора. С целью сокращения времени моделирования база ШПС выбрана небольшой – 10.

На рис. 12 показан процесс синхронизации по частоте и демодуляции при отсутствии шума на входе устройства. Верхнее первое поле содержит входной ШПС. Второе поле – управляющий сигнал ФАПЧ. Третье поле – выход квадратурного канала. Четвертое – выход синхронного канала демодулятора. В начале процесса синхронизации уровни выходных сигналов квадратурных каналов примерно одинаковы. Отчетливо видны биения между частотой несущей и управляемого генератора.

В процессе синхронизации частота и фаза ГУН приходит в соответствие с частотой и фазой несущей, демодулированный сигнал на выходе основного канала становится максимальным, а на выходе квадратурного – минимальным. Биения исчезают. Время вхождения в синхронизм определяется параметрами ФНЧ петли ФАПЧ, крутизны управляющей характеристики ГУН, уровнем входного сигнала и отношением сигнал/помеха.

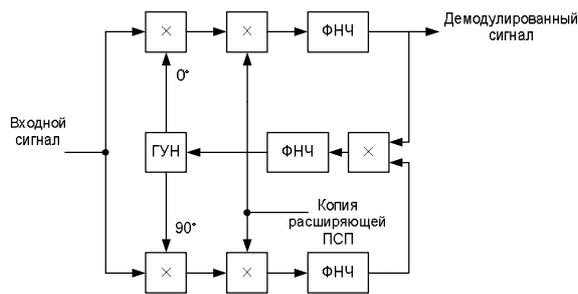


Рис. 10. Когерентный демодулятор ШПС с двухпозиционной ФМ

На рис. 13 показан процесс синхронизации и демодуляции ШПС при наличии шума на входе устройства. Очевидно, что наличие шумов увеличивает время вхождения в синхронизацию

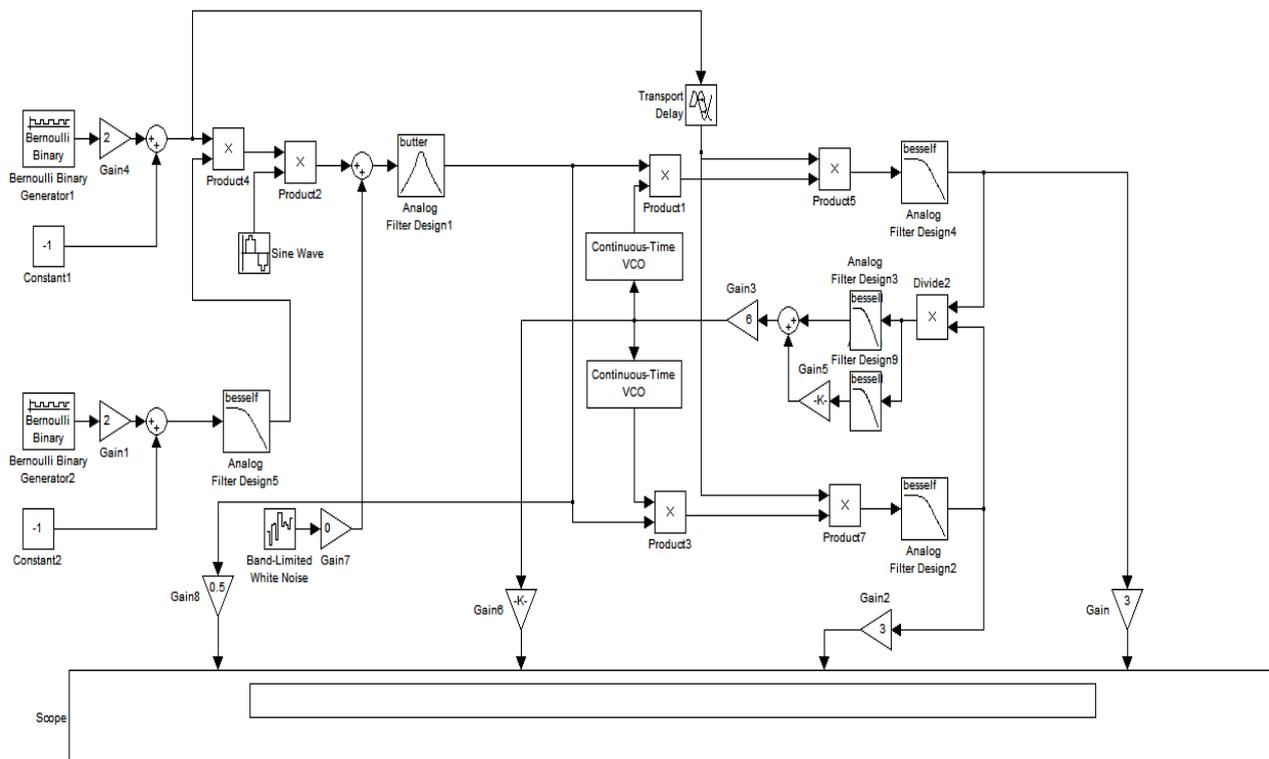


Рис. 11. Имитационная модель когерентного демодулятора

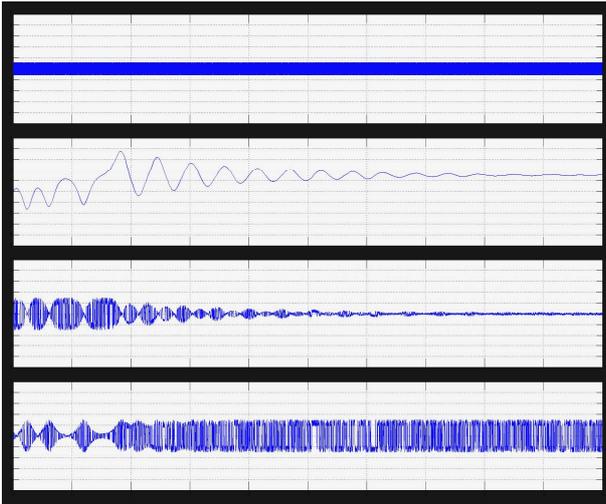


Рис. 12. Процесс синхронизации по частоте и демодуляции при отсутствии шума на входе устройства

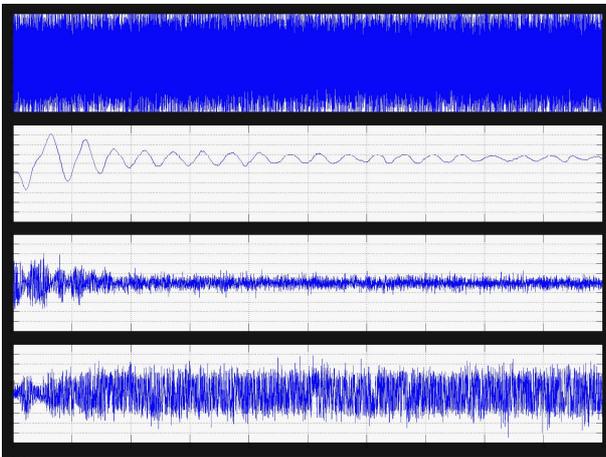


Рис. 13. Процесс синхронизации по частоте и демодуляции при наличии шума на входе устройства

Когерентный демодулятор с комбинированной ФАПЧ

В диапазоне миллиметровых волн расстройка частот несущей и синтезатора может превышать ширину полосы захвата ФАПЧ. Для реализации когерентного приема используют несколько технических решений, среди которых наиболее популярны следующие:

- использование ФНЧ с регулируемой полосой захвата и сопровождения;
- принудительное качание частоты синтезатора в ожидаемой полосе расстройки;
- использование комбинированных схем АПЧ-ФАПЧ и др.

В качестве примера рассмотрим вариант построения демодулятора с комбинированной схемой ФАПЧ, приведенной на рис. 14.

От когерентного демодулятора данная схема отличается наличием дополнительной петли

АПЧ, работающей в диапазоне от максимально возможной расстройки частот несущей и синтезатора до полосы захвата ФАПЧ. Для этого используются соответствующие полосовые фильтры биений и стандартный для квадратурных каналов контур АПЧ, состоящий из дифференцирующей цепи, перемножителя и фильтра.

На рис. 15 представлена имитационная модель демодулятора с комбинированной ФАПЧ.

Схема формирования ШПС описана выше. С целью большей наглядности процессов синхронизации и демодуляции генерация шумовой составляющей входного сигнала не предусмотрена.

На рис. 16 показан процесс синхронизации по частоте и демодуляции. Для наглядности использовано большое растяжение во времени.

На верхнем первом поле представлен исходный информационный сигнал. На втором поле – суммарный управляющий сигнал ГУН. На третьем и четвертом полях – выходы квадратурных каналов демодулятора.

Процесс частотной синхронизации виден на осциллограмме второго поля. Начальная расстройка выбирается системой АПЧ (асимптотическое нарастание управляющего напряжения). Затем происходит захват сигнала системой фазовой автоподстройки и выключение АПЧ (колебательный участок) и, наконец, захват фазы (горизонтальный участок).

Демодуляция сигнала происходит синхронно с процессами автоподстройки и отражена в третьем и четвертом полях. При этом в квадратурном канале демодулированный сигнал из-за отсутствия шумов также отсутствует, а в основном он инвертирован по отношению к исходному. Это объясняется фазовой неопределенностью в 180° контура восстановления несущей. На процесс дальнейшей обработки информации инверсия не влияет, так как устраняется при М-ичном декодировании.

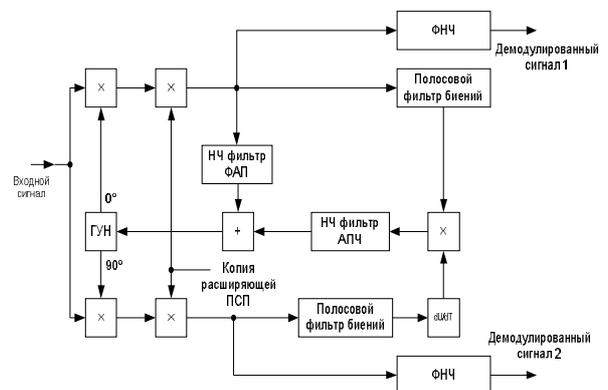


Рис. 14. Когерентный демодулятор с комбинированной ФАПЧ

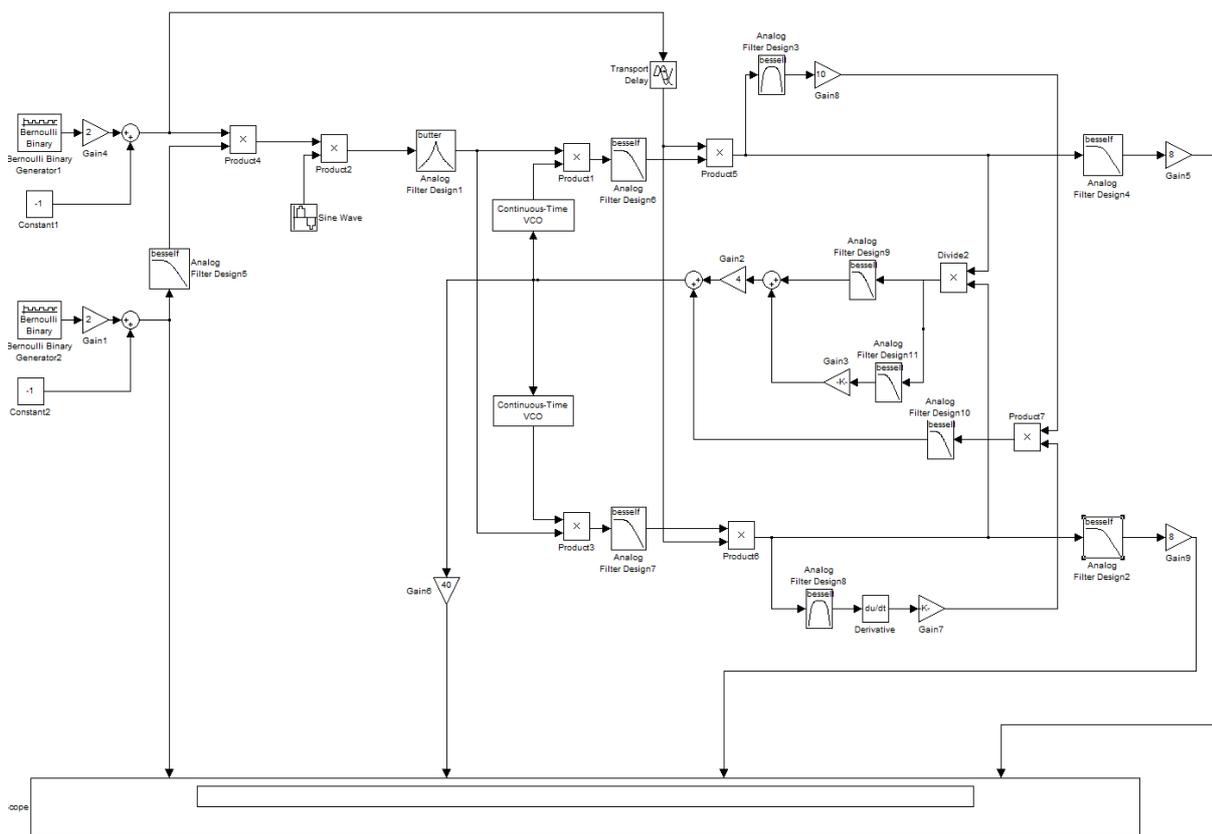


Рис. 15. Имитационная модель демодулятора с комбинированной ФАПЧ

М-ичный декодер

После операции снятия ПСП и определения границ кадров формируются информационные блоки длиной 16 бит, каждый из которых представляет собой функцию Уолша, номер которой можно представить 4 двоичными разрядами. Выходная последовательность четырехбитных символов представляет собой канальную информацию.

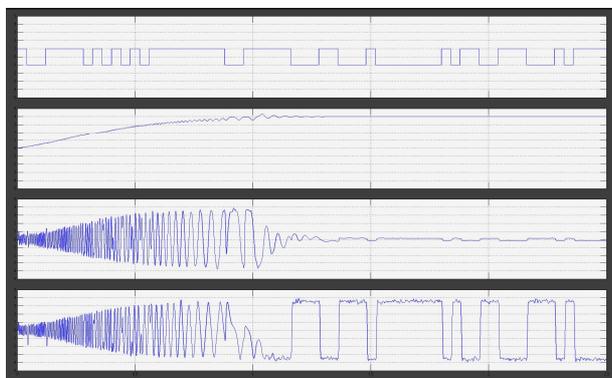


Рис. 16. Процесс синхронизации по частоте и демодуляции

Тактовая частота элементов последова-

тельности Уолша C_y равна учетверенному значению канальной скорости C_k ($C_y = 4C_k$). Начало последовательности Уолша совпадает с началом блока информации.

Таким образом, при М-ичном декодировании происходит дальнейшее снижение битовой скорости, которое сопровождается уменьшением дисперсии выходного сигнала, то есть улучшением отношения сигнал/помеха. В общем случае это отношение растет пропорционально разности размерности входных и выходных блоков с теоретической скоростью 6 дБ на бит.

Реализация одного из вариантов М-ичного декодера показана на рис. 17.

Входной блок сигналов подается на 16 корреляторов, в которых производится операция свертки с 16 ортогональными функциями Уолша. В блоке выбора максимума определяется максимальное абсолютное значение из 16 коэффициентов корреляции, номер которого и принимается за четырехбитный канальный символ выходного блока данных.

На рис. 18 показана имитационная модель М-ичного декодера, позволяющая проследить прохождение сигнала по цепям декодера в условиях наличия шумовой составляющей.

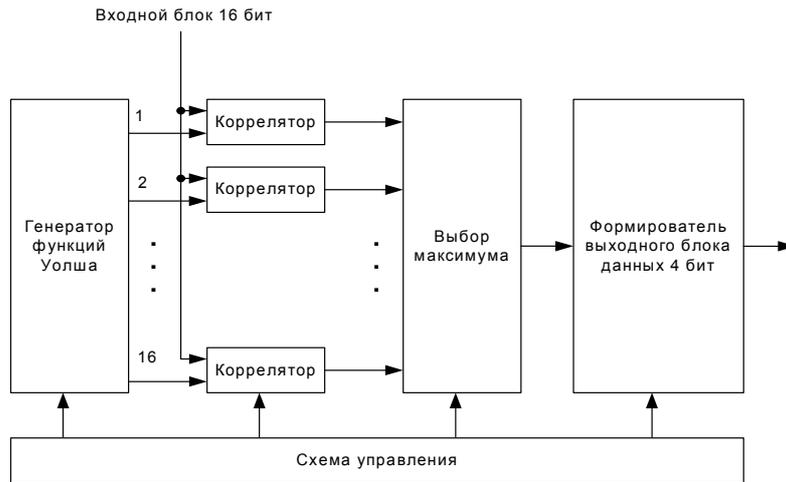


Рис. 17. Вариант реализации M-ичного декодера

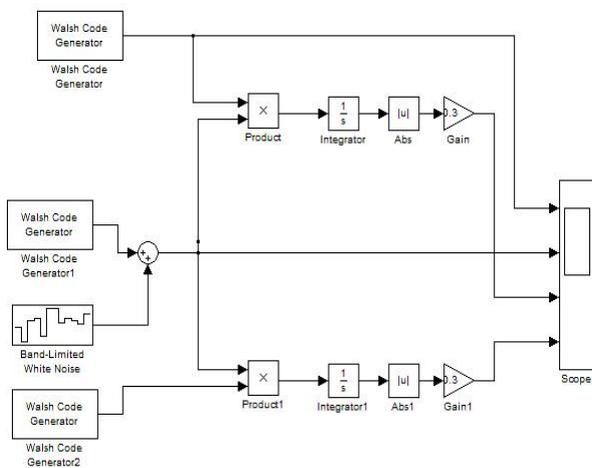


Рис. 18. Имитационная модель M-ичного декодера

Модель производит свертку входного сигнала и шума (Walsh Code Generator 1, Band-Limited White Noise) с его копией (Walsh Code Generator) и одной из других ортогональных реализаций (Walsh Code Generator 2).

На рис. 19-21 показан процесс работы декодера при свертке входного сигнала со своей копией и с одной из ортогональных реализаций при отсутствии и наличии шумов.

В верхнем первом поле изображена копия, вырабатываемая генератором Уолша. Во втором поле – сумма сигнал и шума. В третьем поле результат корреляционной свертки входного сигнала с копией. В четвертом – свертка входного сигнала с одной из ортогональных функций Уолша. Распознавание информационных блоков производится по максимальному значению коэффициента корреляции. Из графических материалов следует, что даже при входных значениях соотношения сигнал/помеха, близких к нулю, M-ичный декодер обеспечивает достоверное определение блоков данных.

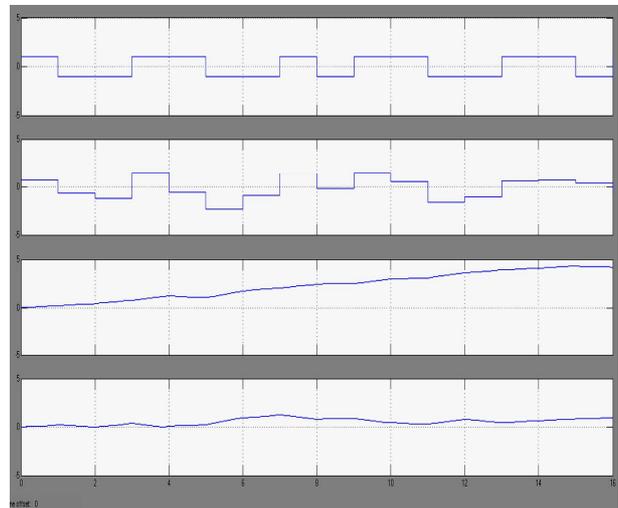


Рис. 19. Пример работы M-ичного декодера при свертке с копией входного сигнала и с одной из ортогональных реализаций при отсутствии шумов

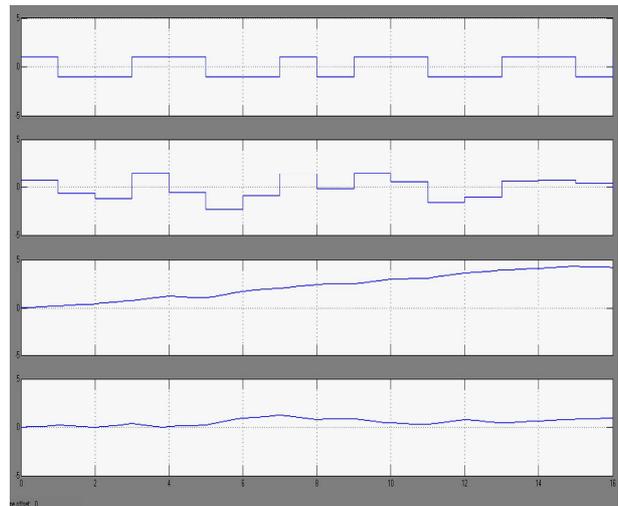


Рис. 20. Пример работы M-ичного декодера при свертке с копией входного сигнала и с одной из ортогональных реализаций при соотношении сигнал/шум 0 дБ после снятия ПСП

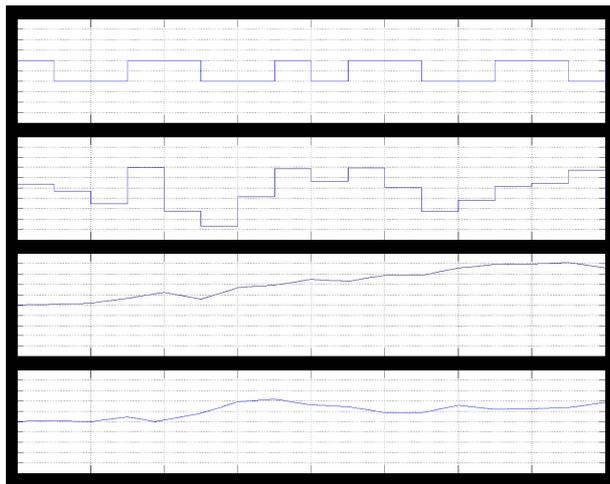


Рис. 21. Пример работы М-ичного декодера при свертке с копией входного сигнала и с одной из ортогональных реализаций при соотношении сигнал/шум минус 6 дБ после снятия ПСП

Заключение

Применение ШПС в системах связи имеет принципиально важное значение:

- обеспечивают высокую помехоустойчивость (помехозащищенность);
- позволяют в полной мере реализовать преимущества оптимальных методов обработки сигналов (корреляционная обработка и согласованная фильтрация);
- обеспечивают одновременную работу многих абонентов в общей полосе частот;
- позволяют создавать системы связи с повышенной скрытностью;
- позволяют успешно бороться с многолучевым распространением радиоволн путем разделения лучей.

Основные результаты, полученные в ходе написания научно-технической статьи:

1. Подробно рассмотрены вопросы построения различных вариантов узлов ШПС модема. Приведены структурные и имитационные схемы, обеспечивающие:

- поиск синхронизирующих последовательностей в условиях неопределенности по частоте и задержке;
- сопровождение расширяющей последовательности;
- снятие ПСП и демодуляцию сигнала;
- М-ичное декодирование.

2. Приведены результаты моделирования узлов в условиях воздействия шумов, которые показывают необходимость использования в командно-телеметрических каналах роботизированных комплексов и систем широкополосных радиосигналов, которые при высокой

скрытности и помехоустойчивости легко поддаются обработке даже при входных отношениях сигнал/шум (или сигнал/(помеха+шум)), близких к нулю.

Литература

1. Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов. М.: Сов. радио, 1975. 704 с.
2. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.
3. Паныхев С.Н., Питолин В.М., Самоцвет Н.А. Универсальный показатель для оценки эффективности маскирующих и имитационных помех // Радиотехника. 2016. № 6. С. 26–30.
4. Перунов Ю.М., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка. М.: Вузовская книга, 2016. 190 с.
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение; пер. с англ. 2-е изд. М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. 1104 с.
6. Волков Л.Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики. М.: Эко-Трендз, 2005. 392 с.
7. Трубин И.С., Медведева Е.В., Булыгина О.П. Нелинейная фильтрация видеопоследовательностей цифровых полутоновых изображений // Инфокоммуникационные технологии. 2007. Т. 5. №4. С. 29-36.
8. Пат. 191 165, Российская Федерация, МПК Н04 В 7/02 (2006.01). Бортовой терминал радиосвязи беспилотного летательного аппарата / Долженков Н.Н., Абрамов А.В., Егоров А.Т., Ломакин А.А., Пантенков Д.Г.; заявитель и патентообладатель АО «Кронштадт». 26.07.2019, Бюл. №21.
9. Егоров А.Т., Ломакин А.А., Пантенков Д.Г. Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Ч. 1 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 3. С. 19–26.
10. Ломакин А.А., Пантенков Д.Г., Соколов В.М. Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Ч. 2 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 37-48.
11. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П. Алгоритмы формирования и обработки радиосигналов командно-телеметрической радиолинии и технические предложения по их реализации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 2. С. 90-105.
12. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П. Цифровая статистическая имитационная модель процесса обработки сигналов в навигационной аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 1. С. 87-99.
13. Техническая реализация высокоскоростного информационного канала радиосвязи с беспилотного летательного аппарата на наземный пункт управления/ Д.Г. Пантенков, Н.В. Гусаков, А.Т. Егоров, А.А. Ломакин, В.П. Литвиненко, В.И. Великоиваненко, Е.Ю. Лю-Кэ-Сю // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 5. С. 52-71.

14. Пантенков Д.Г. Классификация случайных процессов на основе многомерных Марковских моделей// Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления

военного назначения: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. Ч.2. С. 340-345.

Поступила 16.03.2020; принята к публикации 18.06.2020

Информация об авторах

Пантенков Дмитрий Геннадьевич – канд. техн. наук, начальник отделения радиосвязного оборудования, АО «Кронштадт» (115432, Россия, г. Москва, проспект Андропова, 18, кор. 9), тел. 8(926)109-23-95, e-mail: pantenkov88@mail.ru
Литвиненко Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: litvinvp@gmail.com

TECHNICAL IMPLEMENTATION OF CRITICAL NODES AND DEVICES FOR RECEIVING BROADBAND RADIO SIGNALS

D.G. Pantenkov¹, V.P. Litvinenko²

¹“Kronstadt”, Moscow, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: currently the control channels of all automatic special heavy-class mobile objects (spacecraft, robotic systems, unmanned aerial vehicles, etc.) use broadband radio signals that provide high stealth, interference stability and the ability to ensure continuous operation in a complex interference environment, including unintentional and deliberate radio-electronic impact from an eventual enemy. At the same time, the issue of high-quality reception and subsequent processing of broadband radio signals on the receiving side becomes relevant, which includes the sequential execution of a number of operations (detection, synchronization, entering the tracking mode, demodulation, decoding, etc.). This article is devoted to mathematical and simulation modeling of broadband radio signals, which allows one to determine the required characteristics of signals and conduct a sequential analysis of their reception and processing. MathLab (Simulink) is used as an application software for conducting simulation, which allows us to create a block-by-block scheme and set the required parameters for each block. The paper presents the results of simulation of nodes under noise exposure, which show the need to use robotic complexes and systems of wide-band radio signals in command and telemetry channels, which are easy to process even when the input signal-to-noise ratio (or signal/(interference+noise)) is close to zero, provided that high secrecy and noise immunity are ensured

Key words: broadband radio signals, simulation model, direct extension of the spectrum, device receiving and processing signals, synchronizing in frequency, pseudorandom sequence, demodulator, decoder

References

1. Tikhonov V.I., Kulman N.K. “Nonlinear filtering and quasi-coherent signal reception” (“Nelineynaya fil'tratsiya i kvazikogerentnyy priem signalov”), Moscow, Sov. radio, 1975, 704 p.
2. Tikhonov V.I. “Optimal reception of signals” (“Optimal'nyy priem signalov”), Moscow, Radio i svyaz', 1983, 320 p.
3. Panychev S.N., Pitolin V.M., Samotsvet N.A. “Unique indicator for evaluating the effectiveness of masking and simulation interference”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2016, no. 6, pp. 26-30.
4. Perunov Yu.M., Kupriyanov A.I. “Electronic warfare: radio-technical reconnaissance” (“Radioelektronnaya bor'ba: radiotekhnicheskaya razvedka”), Moscow, Vuzovskaya kniga, 2016, 190 p.
5. Sklyar B. “Digital communication. The theoretical basis and practical application” (“Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye”), Moscow, Williams, 2003, 1104 p.
6. Volkov L.N. “Digital radio communication systems: basic methods and characteristics” (“Sistemy tsifrovoy radiosvyazi: bazovye metody i kharakteristiki”), Moscow, Eco-Trends, 2005, 392 p.
7. Trubin I.S., Medvedeva E.V., Bulygina O.P. “Nonlinear filtering of video sequences of digital halftone images”, *Infocommunication technologies (Infokommunikatsionnye tekhnologii)*, 2007, vol. 5, no. 4, pp. 29-36.
8. Dolzhenkov N.N., Abramov A.V., Egorov A.T., Lomakin A.A., Pantenkov D.G. “On-board terminal of radio communication of unmanned aerial vehicle” (“Bortovoy terminal radiosvyazi bespilotnogo letatel'nogo apparata”), Patent for useful model 191 165, Russian Federation, МПК H04 B 7/02 (2006.01), applicant and patentee JSC "Kronstadt", 26.07.2019, bull. 21.

9. Egorov A.T., Lomakin A.A., Pantenkov D.G. “Mathematical models for estimating the stealth of satellite radio channels with unmanned aerial vehicles”, *Proc. of the Educational Institutions of Connection (Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi)*, 2019, vol. 5, no. 3, pp. 19-26.

10. Lomakin A.A., Pantenkov D.G., Sokolov V.M. “Mathematical models for estimating the stealth of satellite radio communication channels with unmanned aerial vehicles”, *Proc. of the Educational Institutions of Connection (Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi)*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. 37-48.

11. Pantenkov D.G., Litvinenko V.P. “Algorithms for forming and processing radio signals of a command-telemetric radio line and technical proposals for their implementation”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstven-nogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 2, pp. 90-105.

12. Pantenkov D.G., Litvinenko V.P. “Digital statistical simulation model of signal processing in the navigation equipment of consumers of satellite radio navigation systems”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstven-nogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 87-99.

13. Pantenkov D.G., Gusakov N.V., Egorov A.T., Lomakin A.A., Litvinenko V.P., Velikoivanenko V.I., Lyu-Ke-Syu E.Yu. “Technical implementation of high-speed information channel of radio communication from an unmanned aerial vehicle to a ground control point”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstven-nogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 5, pp. 52-71.

14. Pantenkov D.G. “Classification of random processes on the basis of multidimensional Markov models”, *Proc. of the All - Russian Scientific and Technical Conference: Theoretical and Applied Problems of Development and Improvement of Automated Control Systems for Military Purposes (Teoreticheskie i prikladnye problemy razvitiya i sovershenstvovaniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya voennogo naznacheniya: sb. tr. Vseros. nauch.-tekhn. konf.)*, St. Petersburg, A.F. Mozhaysky VKA, 2013, pp. 340-345.

Submitted 16.03.2020; revised 18.06.2020

Information about the authors

Dmitriy G. Pantenkov, Cand. Sc. (Technical), “Kronstadt” (18 prospect Andropova, Moscow 115432, Russia), tel. +7(926)109-23-95, e-mail: pantenkov88@mail.ru

Vladimir P. Litvinenko, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: litvinvp@gmail.com

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ НА СЕВЕРЕ РОССИИД.Ю. Муромцев¹, А.Н. Сысоев², В.М. Жуков¹¹Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия²Акционерное общество «Тамбовский завод «Октябрь», г. Тамбов, Россия

Аннотация: проанализированы проблемы обеспечения надежной радиосвязи на Крайнем Севере России. Показано, что при отсутствии в настоящее время какого-либо одного вида радиосвязи, который бы удовлетворял северных абонентов в любое время и любую погоду, необходим комплексный подход к организации связи на севере за счет использования средних, коротких, ультракоротких волн и спутниковой связи. Достаточно подробно проанализированы особенности распространения метровых и двухметровых УКВ волн в тропосферных слоях на высоте 0,8 – 1,5 километра. Предлагается помощь в решении проблемы обеспечения связи на севере России в виде разработки подвижной КВ–УКВ радиостанции диапазона 18 – 150 МГц с фазированной антенной решеткой. Диапазон этот имеет ряд преимуществ перед другими: самую низкую стоимость километра связи, большую дальность прямой (без ретрансляций) связи и простоту ее организации, высокую мобильность подвижных радиостанций. Частоты диапазона обеспечивают прямые дальние односкачковые (до 2000 км) и двух-трехскачковые (4000 – 6000 км) ионосферные связи (18 – 24 МГц), метеорные линии связи (40 – 60 МГц), КВ-УКВ связь в пределах прямой радиовидимости, а также прямую связь до 250 – 400 км через слои тропосферы на высотах 0,8 – 1,5 км, мало зависящие от ионосферных возмущений. Приведены теоретические решения и экспериментальные результаты по характеристикам фазированной антенной решетки данного диапазона. Для расширения возможностей радиостанции рекомендуется добавить в ее состав маломощную станцию СВ-диапазона с антенной, длиной менее четверти длины волны, и спутниковую станцию

Ключевые слова: диаграмма направленности, модель, подвижная радиостанция, радиосвязь, рефракция, тропосфера, фазированная антенная решетка

Введение

Освоение севера России – насущная задача развития российской экономики.

Необходимость развития северных территорий России очевидна, так как севернее шестидесятой параллели располагается почти половина территории Российской Федерации, и там находятся огромные запасы стратегических ресурсов – воды, нефти, газа, золота, алмазов, платины, никеля, титана и пр. Кроме того, по оценкам специалистов ведущих государств в Северном ледовитом океане сосредоточена треть мировых запасов нефти и газа. Северным морским путем (СМП), как кратчайшей транспортной артерией между Западом и Востоком, интересуются все большее количество стран, грузопоток по нему ежегодно увеличивается.

Однако по-прежнему СМП, несмотря на весь грандиозный потенциал, все еще остается малоэффективной и невостребованной транспортной артерией.

Сейчас Россия прилагает усилия, чтобы повысить грузооборот Северного морского пути, в соответствии с указом президента, до 80 млн. тонн в 2024 году. На это в ближайшие годы государству придется затратить около триллиона рублей, и немалая часть его должна бу-

дет затрачена на организацию связи, как стационарной ее части, так и подвижной. В статье обосновывается комплексное применение различных видов связи для подвижных объектов.

Обоснование проблемы и постановка задачи исследования

В настоящее время инфраструктура связи, необходимая для успешного освоения севера, практически отсутствует и представлена небольшими фрагментами разрозненных линий связи. Системного подхода к построению взаимовязанной устойчивой информационно-телекоммуникационной инфраструктуры на севере России на сегодня нет. Различные виды связи более или менее предпочтительны с точки зрения использования их на российских северных территориях.

До 90-х годов прошлого века исправно служил нуждам северных территорий России комплекс из сорока шести тропосферных радиорелейных станций «Север», соединенных линиями с общей протяженностью более 13000 километров. Количество каналов достигало 84 на наиболее нагруженных направлениях. Коэффициент исправного действия достигал 99,99%. В настоящее время комплекс находится в разрушенном состоянии.

Одна спутниковая связь, даже в виде разворачиваемой в настоящее время российской низкоорбитальной меридианной системы «Сфера» со спутниками «Гонец», не может обеспечить всепогодную надежную связь в северных районах. Иногда сильные возмущения ионосферы, словно зонтиком, закрывают северные территории и блокируют спутниковую связь. Это тот случай, когда следует пользоваться радиоволнами, распространяющимися поверхностной (земной) волной. Для передачи речевых сигналов в условиях ионосферных возмущений хорошо зарекомендовал себя диапазон верхней части средних и нижней части (до 4 МГц) коротких радиоволн. Частоты этого диапазона хорошо распространяются земной волной, дифрагируя на препятствиях. На уровнях мощности в 10 Вт можно получить дальности связи до 50 – 100 км, а на мощности 100 Вт – до 200 – 300 км. Однако видеосигналы на этих частотах не передаются.

Построение оптической линии связи на севере России является насущной задачей, как для освоения российского севера, так и для построения «цифровой экономики» России в целом. Страны Запада опережают Россию в деле строительства оптических линий через Ледовитый океан (проект Arctic Fibre), хотя сотрудничество с Россией (проект ROTACS) в этом деле им, несомненно, выгодно. Это наносит России как экономический ущерб, так и является угрозой её национальной безопасности. Существует насущная необходимость в строительстве оптической линии связи вдоль приполярных районов России. Это необходимо:

- для построения «цифровой экономики» России;
- защитного резервирования магистральной (опорной) взаимоувязанной телекоммуникационной сети Российской Федерации, обеспечивающего национальную безопасность России;
- снижения зависимости экономики России от природных ресурсов, роста инновационных технологий, превращения России в Интернет-хаб мирового уровня;
- создания новых возможностей для международного бизнеса в области высоких технологий, а не полезных ископаемых.

Организация всех видов связи на севере затруднительна из-за суровых климатических условий. Высокоскоростные волоконно-оптические линии связи требуют больших материальных затрат на огромных северных территориях, но тем не менее, Россия приступила

к созданию системы обмена цифровой информацией – мультисервисной транспортной сети связи (МТСС) на волоконно-оптических линиях от Североморска до Дальнего Востока, разделенных на зональные магистральные каналы. Первый этап работ проведен в 2019 году, а в 2021 система должна быть сдана в эксплуатацию. Планируется, что данный проект позволит передавать практически любой объем информации по всей стране при использовании технологии Big Data с высокой скоростью. Для оперативной и быстрой передачи данных будет создана единая система управления.

Данная система является стационарной сетью связи, а для связи с подвижными объектами (кораблями и сухопутными подвижными пунктами управления) все равно потребуются среднескоростная цифровая радиосвязь. Полярные сияния, магнитные и ионосферные бури, зависящие от солнечной активности, значительно затрудняют радиосвязь, в том числе и спутниковую, и иногда прерывают ее на длительное время. В ионосфере возникают «плазмойды» – ионизированные образования с высокоэнергетическим состоянием атомов. Это явление получило название «не прохождения радиоволн». Восстановить радиосвязь в таких случаях помогает организация обходных трасс – направлений с хорошим прохождением радиоволн.

Предлагаемое решение

Решить проблему подвижной надежной радиосвязи в данном случае поможет разработка подвижной цифровой радиостанции КВ – УКВ диапазона 18 – 150 МГц. Этот диапазон имеет ряд преимуществ перед другими: самую низкую стоимость километра связи, большую дальность прямой (без ретрансляций) связи и простоту ее организации, высокую мобильность подвижных радиостанций. Из всех видов связи на огромных пространствах Арктики и Антарктики этот диапазон радиосвязи наиболее применим. Дело в том, что он включает в себя частоты для дальних односкачковой (до 2000 км) и двух-, трехскачковой (4000 – 6000 км) ионосферных связей (18 – 24 МГц), частоты для метеорной связи (40 – 60 МГц), УКВ частоты для связи в пределах прямой радиовидимости, а также обеспечивает прямую без радиотрансляции связь до 250 – 400 км через слои тропосферы на высотах 0,8 – 1,5 км. Связь на каналах тропосферной связи, использующих эти высоты для рассеивания и рефракции сиг-

налов, менее критична к возмущениям ионосферы.

Прием радиочастот УКВ диапазона за горизонтом возможен вследствие положительной рефракции (искривления радиолуча в сторону Земли). Но для этого значения эффективно излучаемой мощности (ERP) каналов тропосферной связи, обеспечивающих достоверную передачу информации на 300 – 400 км, обычно должны находиться в пределах 30 – 60 дБ, причем погодные условия значительно влияют на затухание радиоволн. В ночное время затухание уменьшается. Изменения поляризации волны незначительны.

При значительных величинах коэффициента рефракции наблюдается многократное отражение радиоволны от Земли и от тропосферных слоев (тропосферный волновод). Тогда для радиостанций с ERP = 10 возможна связь на расстоянии до 400 км.

Существующие КВ-УКВ радиостанции при организации обходных трасс требуют механического перемещения громоздких антенных систем для изменения их диаграммы направленности, что неприемлемо в полярных условиях.

Выход из данной ситуации заключается в разработке КВ – УКВ радиостанции с электронным управлением диаграммой направленности антенн на основе фазированных антенных решеток [1]. АО Тамбовский завод «Октябрь» и Тамбовский государственный технический университет провели совместные научно-исследовательские работы «Разработка методов построения подвижных КВ-УКВ радиостанций с электронным управлением диаграммой направленности антенн» (шифр «Ромб»), «Проведение исследований по повышению помехозащищенности радиостанции Р-166 с использованием фазированных антенных решеток» (шифр «Эффект-166»), по результатам работ опубликовано более 30-ти печатных работ в журналах с индексами Scopus, РИНЦ, ВАК, запатентованы способ и устройство, увеличивающие коэффициент усиления фазированной антенной решетки в нижней части КВ диапазона.

Кольцевые фазированные антенные решетки (КФАР) более компактны, просты в построении и управлении. Составляющие КФАР излучающие элементы должны иметь круговую диаграмму направленности в азимутальной плоскости.

Математическая модель КФАР описывается двумя уравнениями.

Уравнение диаграммы направленности [2]:

$$F(\Delta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \dot{A}_n \times \exp \left\{ j 2\pi \frac{R}{\lambda} \cos \Delta \cos(\varphi - \varphi_n) \right\}. \quad (1)$$

Выражение для определения коэффициента направленного действия – D_0 в заданном направлении [3]:

$$D_0 = \frac{4\pi |F(\Delta_0, \varphi_0)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F^2(\Delta, \varphi) \cos(\Delta) d\Delta d\varphi}. \quad (2)$$

Принятые обозначения:

Δ, φ – угол места и угол азимута, отсчитываемые от осей X и Y соответственно;

\dot{A}_n – комплексное значение амплитуды входного тока n -го элемента;

λ – длина радиоволны;

$\varphi_n = \frac{2\pi(n-1)}{N}$ – азимутальный угол местонахождения n -го излучателя.

Дополним математическую модель КФАР графическим изображением коэффициента направленного действия при различных значениях количества излучателей N , выразив радиус кольца R относительным числом:

$$a = \frac{R}{\lambda}. \quad (3)$$

Результаты моделирования представлены на рис. 1.

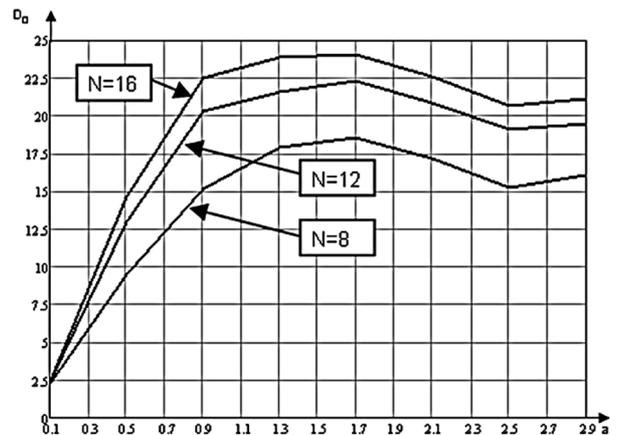


Рис. 1. Графическая часть математической модели КФАР

Из рис. 1 видно, что диапазон рабочих частот решетки следует выбирать таким, чтобы значение числа a желательно находилось в пределах 0,9 – 2,1.

Для проверки соответствия результатов проведенных теоретических исследований экспериментальным данным был изготовлен излучатель ФАР.

Исследования проводились в диапазоне 18-150 МГц с использованием модели излучателя и рекомендаций программы MMANA [4].



Рис. 2. Расчетные значения комплексных сопротивлений излучателя

Исследовались модель излучателя и макет девятиэлементной КФАР с радиусом 2600 мм.

Расчетные значения комплексных сопротивлений излучателя приведены на рис. 2.

Характеристики макета КФАР и ее модели сравнивались по форме ДН в азимутальной плоскости, уровню боковых лепестков, коэффициенту усиления, входным комплексным сопротивлениям.

Внешний вид излучателя и экспериментальные значения его комплексных сопротивлений показаны на рис. 3 и 4.



Рис. 3. Внешний вид излучателя КФАР диапазона 18 – 150 МГц

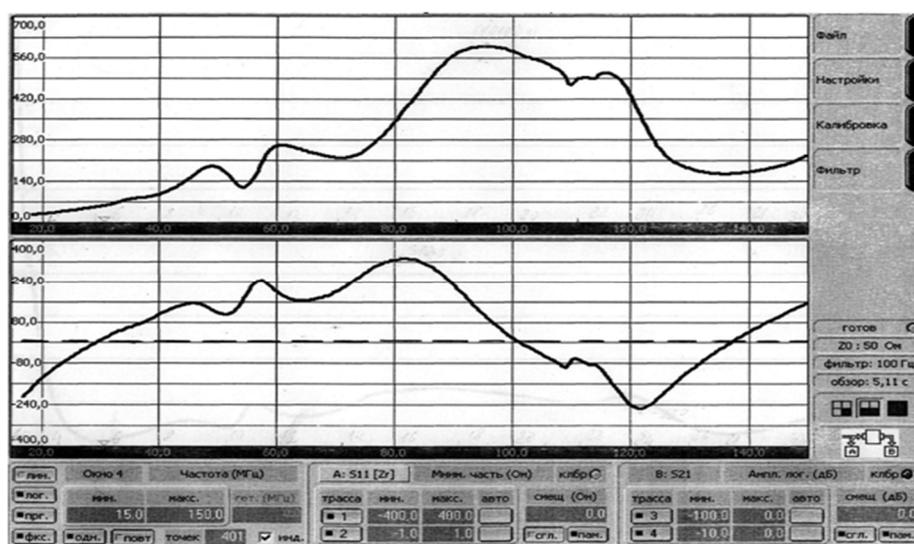


Рис. 4. Экспериментальные значения комплексных сопротивлений излучателя

На рис. 5 приведена модель девятиэлементной КФАР.

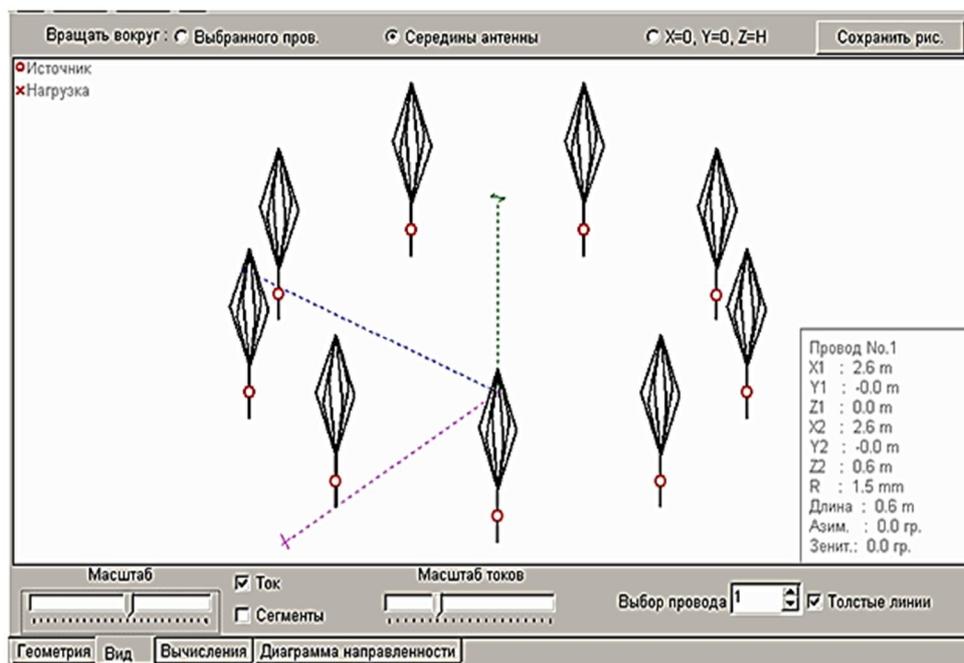


Рис. 5. Модель девятиэлементной КФАР

Значения входных сопротивлений элементов решетки, рассчитанные в программе MMANA на частоте 100 МГц, приведены в табл. 1. В табл. 1 также приведены длины фазовращателей.

Расчетное значение комплексного сопротивления на входе фидерного тракта для частоты 100 МГц равно $43.54 + i6.81$ Ом.

Внешний вид девятиэлементной КФАР показан на рис. 6.

Таблица 1

№ п/п	Z_A , Ом	$L_{ФВ}$, м
1	$229.24 + i312.5$	1.607
2	$391.57 + i9.44$	1.36
3	$410.19 + i31.96$	0.371
4	$364.68 + i250.91$	1.113
5	$467.7 + i281.74$	0.371
6	$467.66 + i281.62$	0.371
7	$364.61 + i250.95$	1.113
8	$410.28 + i31.97$	0.371
9	$391.45 + i9.39$	1.36



Рис. 6. Внешний вид девятиэлементной КФАР КФАР диапазона 18 – 150 МГц

Экспериментальные значения входных сопротивлений и КСВ питающего фидера КФАР приведены на рис. 7 и 8.

Экспериментальное значение комплексного сопротивления на входе фидерного тракта для частоты 100 МГц равно $44.45 - i24.59 \text{ Ом}$, что очень близко к его расчетному значению.

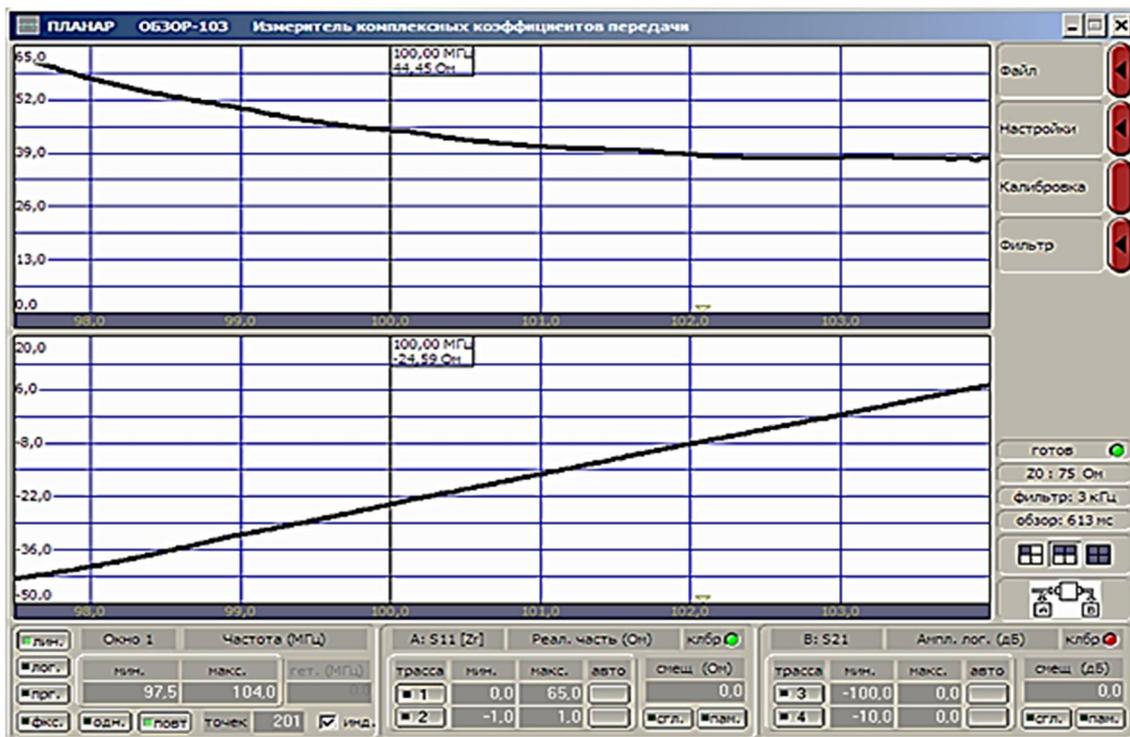


Рис. 7. Экспериментальные значения входных сопротивлений питающего фидера КФ

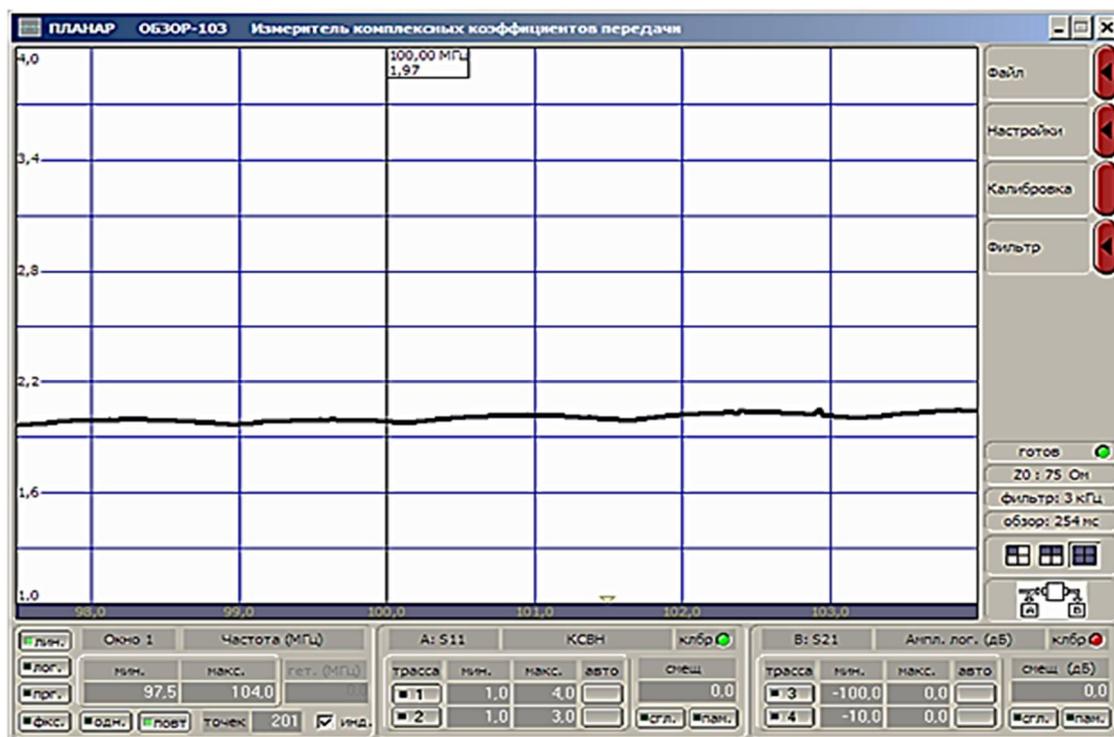


Рис. 8. Экспериментальные значения КСВ на входе питающего кабеля КФАР

На рис. 9 приведены расчетная и экспериментальная диаграммы направленности КФАР.

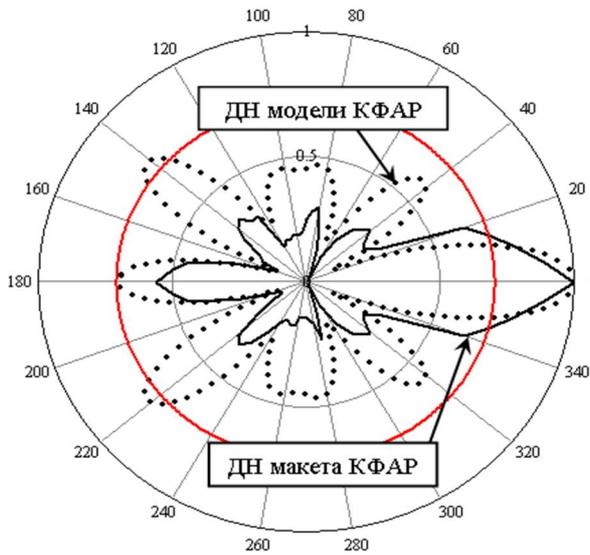


Рис. 9. Расчетная и экспериментальная диаграммы направленности КФАР

Из анализа рис. 9 видно, что ДН макета и ДН модели совпадают по направлениям излучений. Расчетные и измеренные значения максимальных уровней излучения по основному и боковым лепесткам приведены в табл. 2.

Таблица 2

Направление (град.)	Уровни лепестков модели (дБ)	Уровни лепестков макета (дБ)
0	10.5	10.92
40	2.4	0.42
80	0.5	-0.082
140	6.1	-0.082
180	8.5	4.918

Анализ табличных данных показывает разницу в уровнях лепестков в пользу макета.

Заключение

1. Сравнение экспериментальных и расчетных данных подтверждает корректность проведенных исследований, основанных на применении программы MMANA.

2. Важным результатом испытаний макета антенной решетки является то, что при постоянном направлении связи в полосе до 8 МГц значение КСВ на входе питающего кабеля КФАР остается практически неизменным, что позволяет передавать широкополосные сигналы, в том числе и видеосигналы.

3. Решить проблему организации надежной радиосвязи в северных районах России поможет подвижная радиостанция мощностью один киловатт в диапазоне 18 – 150 МГц с фазированной антенной решеткой.

4. С целью расширения возможностей данной радиостанции в её состав необходимо включить средневолновую радиостанцию малой мощности и станцию спутниковой связи.

Литература

1. Жуков В.М., Муромцев Д.Ю. Подвижная станция КВ–УКВ радиосвязи с пространственным разделением каналов // Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией: науч.-техн. конф. Воронеж: ВУНЦ ВВС "ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина", 2014. С. 101 – 103
2. Коротковолновые антенны/ Г.З. Айзенберг, С.П. Белоусов и др. М.: «Радио и связь», 1985. 535 с.
3. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2003. 632 с.
4. Гончаренко И.В. Антенны УКВ. Компьютерное моделирование. MMANA// Радио. 2004. 128с.

Поступила 24.04.2020; принята к публикации 15.06.2020

Информация об авторах

Муромцев Дмитрий Юрьевич – д-р техн. наук, проректор по научно-инновационной деятельности, Тамбовский государственный технический университет (392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106), e-mail: mdjur@mail.ru, тел. 89108555704, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3462-7050>

Сысоев Александр Николаевич - канд. техн. наук, главный конструктор, Акционерное общество «Тамбовский завод «Октябрь» (392029, г. Тамбов, ул. Бастионная, д.1), e-mail: Sanya_bogoslovka@mail.ru, тел. 89202397143

Жуков Валентин Михайлович - канд. техн. наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», Тамбовский государственный технический университет (392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106), e-mail: crems@crems.jesby.tstu.ru, тел. 89158696152

PROBLEMS OF PROVIDING RELIABLE RADIO COMMUNICATIONS IN THE NORTH OF RUSSIA

D.Yu. Muromtsev¹, A.N. Sysoev², V.M. Zhukov¹

¹Tambov State Technical University, Tambov, Russia

²Joint-Stock Company «Tambov plant» Oktyabr'», Tambov, Russia

Abstract: the paper discusses the problems of ensuring reliable radio communications in the Far North of Russia. In the absence of a single type of radio communication that would satisfy northern subscribers at any time and any weather, an integrated approach to organizing communications in the North through the use of medium, short, ultra-short waves and satellite communications is required. We analyzed in sufficient detail the features of the propagation of meter and two-meter VHF waves in the tropospheric layers at an altitude of 0.8-1.5 kilometers. We proposed to solve the problem of communication in the North of Russia in the form of developing a mobile SW-VHFW radio station in the range of 18-150 MHz with a phased array antenna. This range has a number of advantages over others, such as the lowest cost of one kilometer of communication lines, the long range of direct (without relaying) communication and the simplicity of its organization, the high mobility of the radio stations. The frequencies of the range provide direct long-distance single-hop (up to 2000 km) and two-three hop (4000-6000 km) ionospheric communications (18-24 MHz), meteor communication lines (40-60 MHz), SW-VHFW communication within direct radio visibility, as well as direct communication up to 250-400 km through the troposphere at altitudes of 0.8-1.5 km, little dependent on ionospheric disturbances. We present theoretical solutions and experimental results on the characteristics of a phased array antenna of this range. To expand the capabilities of the radio station, we recommend to add to its composition a low-power midrange station with an antenna of the wavelength less than a quarter, and a satellite station

Key words: directional diagram, model, mobile radio station, radio communication, refraction, troposphere, phased array antenna

References

1. Zhukov V.M. "Mobile station of SW – VHFW radio communications with spatial separation of channels", *Scientific-Technical. Conf.: Current Status and Prospects for the Development of Communication Systems and Radio-Technical Support in Aviation Control (Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya sistem svyazi i radio-tekhnicheskogo obespecheniya v upravlenii aviatsiy»)*, Voronezh, 2014, pp. 101–103
2. Ayzenberg G.Z., Belousov S.P. et al. "Short-wave antennas" ("Korotkovolnovye anteny"), Moscow, Radio i svyaz', 1985, 535 p.
3. Ed. Voskresenskiy D.I. "Microwave devices and antennas. Design of phased antenna arrays" ("Ustroystva SVCH i anteny. Proektirovaniye fazirovannykh antennykh reshetok"), Moscow, Radiotekhnika, 2003, 632 p.
4. Goncharenko I.V. "VHF antennas. Computer modelling. MMANA" ("Antenny UKV. Komp'yuternoe modelirovanie. MMANA"), Moscow, Radio, 2004, 128 p.

Submitted 24.04.2020; revised 15.06.2020

Information about the authors

Dmitriy Yu. Muromtsev, Dr. Sc. (Technical), Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russia), e-mail: mdjur@mail.ru, tel. +79108555704, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3462-7050>

Aleksandr N. Sysoev, Cand. Sc. (Technical), Chief designer, JSC "Tambov plant" Oktyabr'", (1 Bastionnaya str., Tambov 392029, Russia), e-mail: Sanya_bogoslovka@mail.ru, tel. +79202397143

Valentin M. Zhukov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russia), e-mail: crems@crems.jesby.tstu.ru, tel. +79158696152

ИНТЕГРИРОВАНИЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ИЗ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ВИБРАТОРОВ С ЛИНЗОЙ РОТМАНА НА МНОГОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

А.В. Ашихмин¹, А.В. Иванов², Ю.Г. Пастернак^{1,2,3}, П.В. Першин¹, К.С. Сафонов³,
С.М. Федоров³, И.А. Зеленин³

¹АО «ИРКОС», г. Москва, Россия

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

³Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: радиопеленгация и локализация источников радиоизлучений (ИРИ) с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве транспортной базы являются одним из приоритетных направлений развития современных систем радиоконтроля. Показана возможность реализации линейной антенной решетки с плоской линзой Ротмана в виде единой многослойной печатной платы. В качестве элементов решетки использованы несимметричные вибраторы с рефлекторами и директорами, а также – с метаматериальными линзами, реализованными с помощью металлизированных переходных отверстий. Для подавления поверхностных волн, возбуждающихся в антенных решетках при значительном отклонении главного лепестка от нормали, предложено использовать метаматериальную линзу, состоящую из электрически малых рассеивателей, расположенную в раскрыве фазированной антенной решетки (ФАР). Ёмкостный импеданс, вносимый линзой в излучающую апертуру ФАР, препятствует распространению поверхностных волн и позволяет улучшить не только направленные характеристики антенной решетки, но и ее входные характеристики при широкоугольном сверхширокополосном сканировании. Рассмотренный вариант реализации ФАР может использоваться в качестве подрешетки для построения антенной системы с двухкоординатным коммутационным сканированием в полосе частот с коэффициентом перекрытия более 2

Ключевые слова: линза Ротмана, антенна Вивальди, метаматериалы, печатная плата

Введение

Радиопеленгация и локализация источников радиоизлучений (ИРИ) с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве транспортной базы являются одним из приоритетных направлений развития современных систем радиоконтроля. При этом к аппаратуре радиоконтроля, размещаемой на БПЛА, предъявляются повышенные требования к надежности её функционирования, массогабаритным параметрам и времени автономной работы [1]. Также сохраняются характеристики в полосе рабочих частот. Сохраняется высокая повторяемость характеристик в серийном производстве при низкой стоимости.

Применение технологии производства печатных плат [2] для реализации элементов и диаграммообразующих схем (ДОС) фазированных антенных решеток (ФАР) позволяет достичь всех обозначенных выше целей.

При этом применение линз Ротмана и Люниберга в печатном исполнении с совмещенными в единой конструкции антенными элементами ФАР заслуживает особого внимания [3-6].

В настоящей работе рассмотрена возможность размещения линейной вибраторной антенной решетки, предназначенной для функционирования в диапазоне частот от 8 ГГц до 18 ГГц, и плоской линзы Ротмана на единой многослойной печатной плате. Приведены результаты электродинамического моделирования предложенной конструкции методом Вейланда [7].

Конструкция одиночного антенного элемента

Модель одиночного антенного элемента, выполненного по технологии производства печатных плат, показана на рис. 1. Размеры указаны в миллиметрах. Для лучшего понимания конструкции слои диэлектрика отображены полупрозрачно.

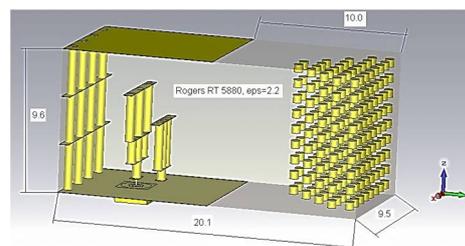


Рис. 1. Элемент антенной решетки в виде многослойной печатной платы

Слои печатной платы в модели выполнены на основе высокочастотного материала RT/duroid 5880 фирмы Rogers [8] с номинальным значением диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = 2,2$ в диапазоне частот от 8 ГГц до 40 ГГц и тангенсом угла потерь $\tan \delta = 0,0009$ на частоте 10 ГГц. Данный выбор обусловлен значением диэлектрической проницаемости, близким к минимально возможному (с учетом номенклатуры выпускаемых высокочастотных материалов для производства печатных плат) с целью минимизации коэффициента отражения от границы раздела сред «диэлектрик - воздух». Кроме того, экстремально низкие потери выбранного материала позволяют получить предельный для данной конструкции КПД.

Металлизированные переходные отверстия образуют активный несимметричный вибратор, рефлектор и директор (левая часть на рис. 1), а также – метаматериальную линзу (регулярная структура из незамкнутых переходных отверстий в правой части рис. 1). Использование линзы позволяет уменьшить неравномерности диаграммы направленности (ДН) в горизонтальной плоскости xOy и вносит емкостной импеданс с целью предотвращения ослепления фазированной антенной решетки при широкоугольном сканировании в полосе частот с коэффициентом перекрытия более 2.

Модель линейной фазированной антенной решетки, состоящей из восьми одиночных элементов, запитываемой с помощью линзы Ротмана, выполненной на единой многослойной печатной плате, показана на рис. 2.

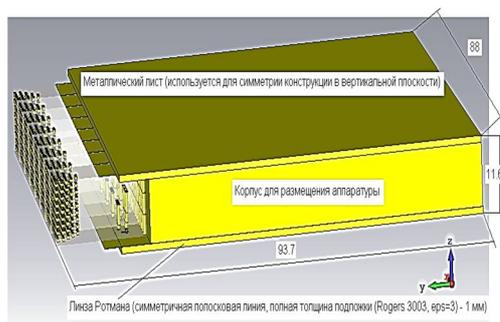


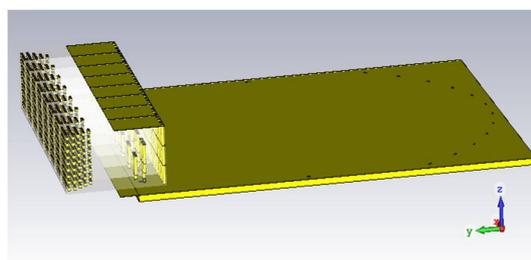
Рис. 2. Модель линейной ФАР из 8 элементов, запитываемой с помощью линзы Ротмана, выполненной на одной многослойной печатной плате

Отметим возможность реализации сканирования не только в азимутальной, но и в угломестной плоскости, с использованием структуры, показанной на рис. 2, в качестве подрешетки. Для сканирования по второй координате (углу места) можно располагать аналогичные пе-

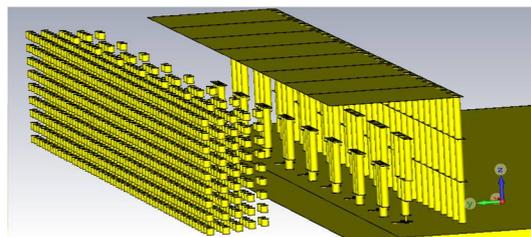
чатные платы одна на другой, используя еще одну линзу Ротмана, для управления диаграммой направленности в ортогональной плоскости.

Элементы конструкции ФАР, запитываемой от линзы Ротмана, выполненной на единой многослойной печатной плате, показаны на рис. 3.

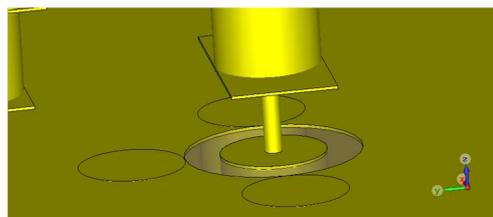
Порты 2 и 11 на рис. 3, г соответствуют отклонению главного лепестка ДН от нормали на $\pm 41,4^\circ$ (ширина главного лепестка по половинной мощности на частоте 18 ГГц примерно равна $11,2^\circ$). Ширина рабочей зоны радиопеленгатора на частоте 18 ГГц в азимутальной плоскости – не менее 94° ($2 \cdot 41,4^\circ + 11,2^\circ$).



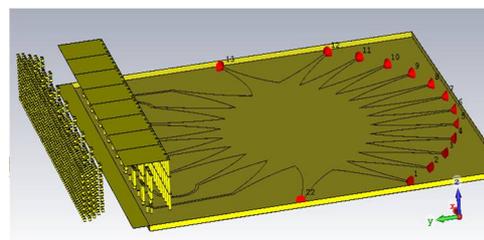
а) фрагмент ФАР: удален верхний металлический лист и корпус для размещения аппаратуры



б) фрагмент ФАР: удален многослойный диэлектрик Rogers RT/duroid 5880 печатной платы антенной решетки

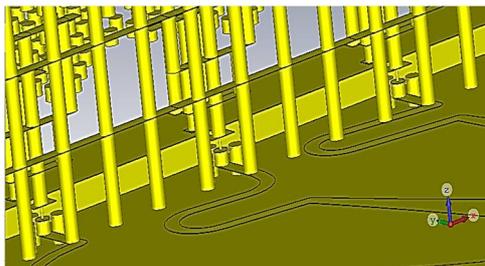


в) запитка активного вибратора от линзы Ротмана

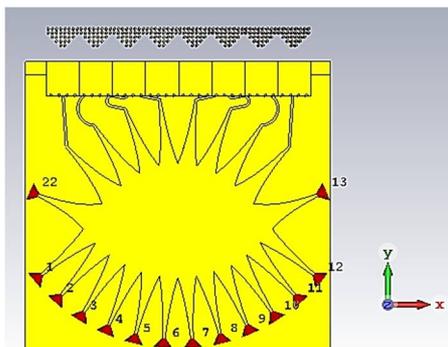


г) структура ФАР: удален верхний земляной слой линзы Ротмана (порты 1, 12, 13 и 22 – балластные резисторы номиналом 50 Ом; порты 2-11 подключаются к ВЧ коммутатору)

Рис. 3. Послойная структура ФАР с линзой Ротмана на единой многослойной печатной плате



д) структура ФАР: вид со стороны линзы Ротмана (удалена подложка линзы Ротмана)



е) структура ФАР: вид сверху (удалена верхняя земля платы линзы Ротмана и все слои диэлектрика); порты 2-6 и 7-11 ведут к высокочастотному коммутатору; добавлены 1 и 12 «холостые» порты для исправления искажений ДН при максимальном отклонении луча от нормали на высоких частотах

Рис. 3. Послойная структура ФАР с линзой Ротмана на единой многослойной печатной плате (продолжение)

Результаты электродинамического моделирования

На рис. 4, 5 приведены номограмма Смита и КСВН антенного элемента в составе ФАР в диапазоне рабочих частот от 8 ГГц до 18 ГГц соответственно.

На качество согласования антенных элементов оказывает влияние наличие границы «диэлектрик-воздух», обусловленное технологией их изготовления на единой печатной плате в слое диэлектрика.

Суммарные потери в антенном элементе, находящемся в составе антенной решетки, показаны на рис. 6, и не превышают 1.8 дБ.

На рис. 5 показана диаграмма направленности антенного элемента в составе антенной решетки. Она характеризуется тенденцией сужения главного лепестка с ростом частоты: в рабочем диапазоне частот от 8 ГГц до 18 ГГц ширина главного лепестка в азимутальной плоскости изменяется от 149.3° до 87.7° (антенная решетка предназначена для сканирования в азимутальном секторе $\pm 45^\circ$).

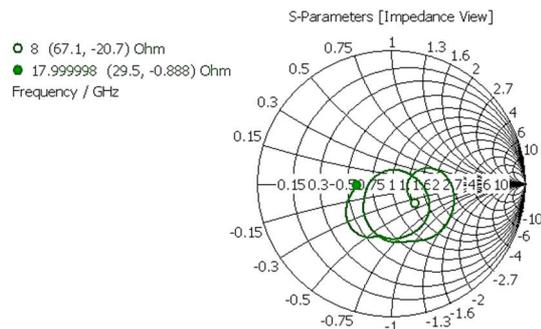


Рис. 4. Номограмма Смита на коаксиальном входе элемента, находящегося в составе решетки (50 Ом)

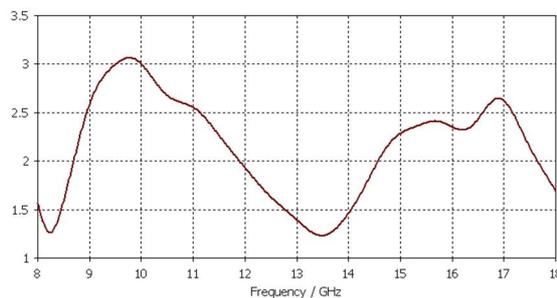


Рис. 5. КСВН на коаксиальном входе элемента, находящегося в составе решетки (волновое сопротивление фидерной линии - 50 Ом)

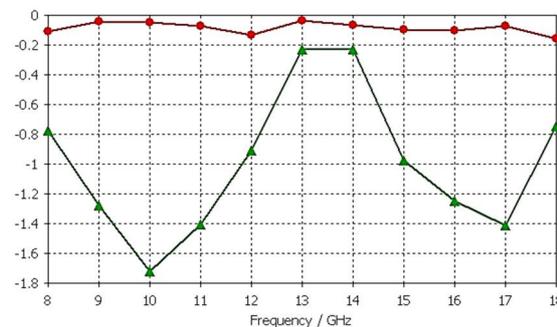


Рис. 6. КПД (дБ) элемента, находящегося в составе решетки: линия с кружками – потери в материалах; линия с треугольниками – суммарные потери, с учетом рассогласования и взаимной связи элементов ФАР

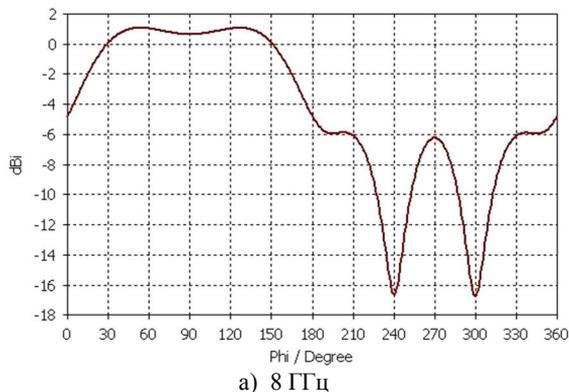
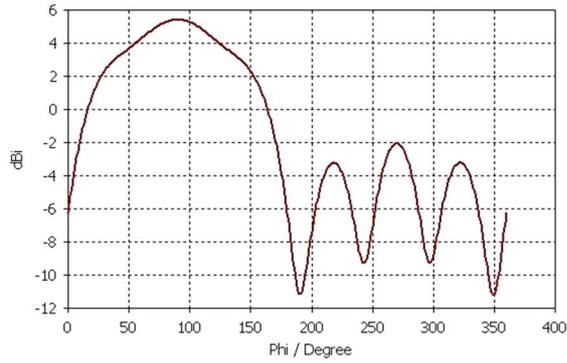
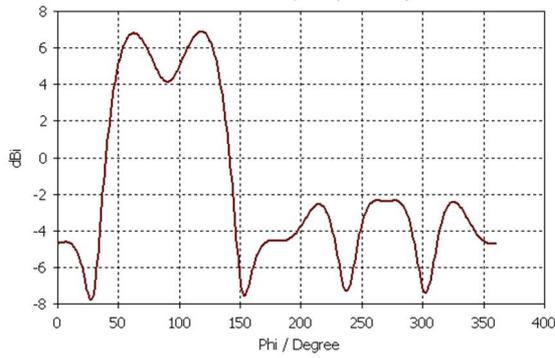


Рис. 7. ДН антенного элемента в составе ФАР в азимутальной плоскости xOy



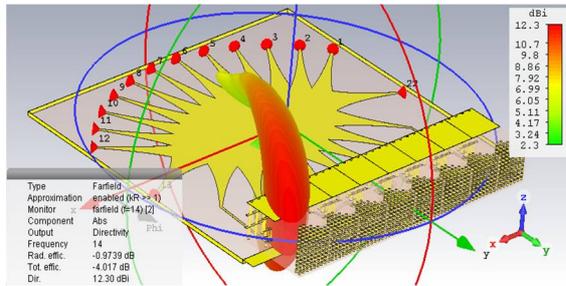
б) 12 ГГц



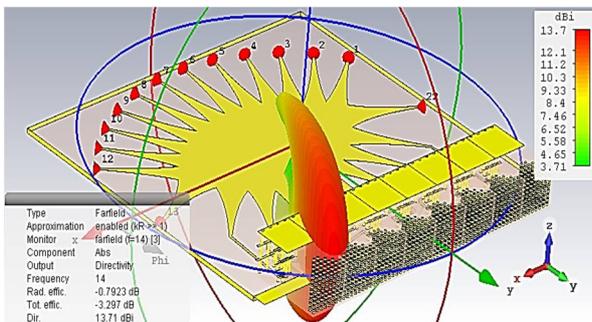
в) 18 ГГц

Рис. 7. ДН антенного элемента в составе ФАР в азимутальной плоскости xOy (продолжение)

Пример переключения главного лепестка диаграммы направленности антенной решетки приведен на рис. 8, 9.

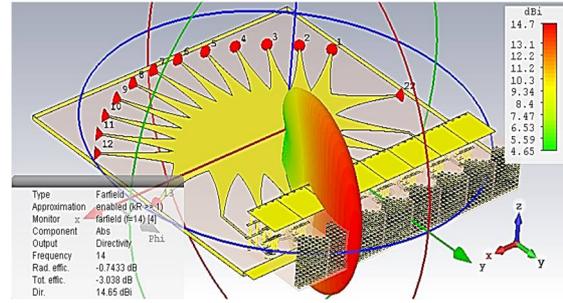


а) $\varphi = 41,4^\circ$

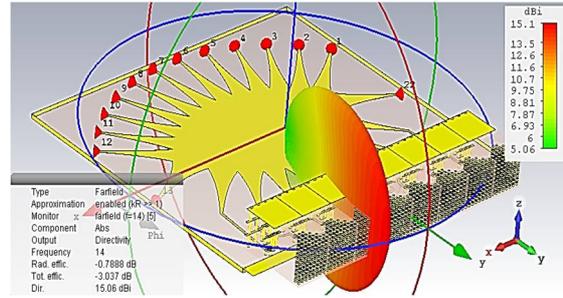


б) $\varphi = 32,2^\circ$

Рис. 8. Переключение главного лепестка ФАР при запитке портов 2 – 5 на частоте 14 ГГц



в) $\varphi = 23^\circ$



г) $\varphi = 13,8^\circ$

Рис. 8. Переключение главного лепестка ФАР при запитке портов 2 – 5 на частоте 14 ГГц (продолжение)

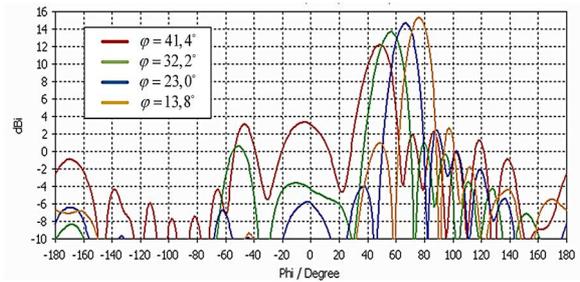


Рис. 9. Диаграммы направленности ФАР в азимутальной плоскости при запитке портов 2 – 5 на частоте 14 ГГц для углов сканирования $41,4^\circ, 32,2^\circ, 23^\circ, 13,8^\circ$

Суммарные потери на частоте 14 ГГц составляют 3–4 дБ при сканировании в азимутальной плоскости. Основные потери имеют место в материалах ФАР и линзы Ротмана – металле и диэлектрике, а также – рассеянии мощности в балластных портах. Потери на излучение в линзе Ротмана практически отсутствуют благодаря тому, что тело линзы размещено между двумя металлическими экранами, т.к. линза Ротмана реализована по технологии изготовления симметричной полосковой линии.

Отметим, что уровень боковых лепестков (рис. 9) повышается при отклонении лепестка от нормали. Это в значительной степени связано с интерференцией пространственной и поверхностной волн при максимальном отклонении лепестка от нормали, что приводит также к увеличению значений модуля коэффициента отражения. Частотные зависимости КСВН для входов 2 – 5 линзы Ротмана для углов сканирования $41,4^\circ, 32,2^\circ, 23^\circ, 13,8^\circ$ показаны на рис. 10.

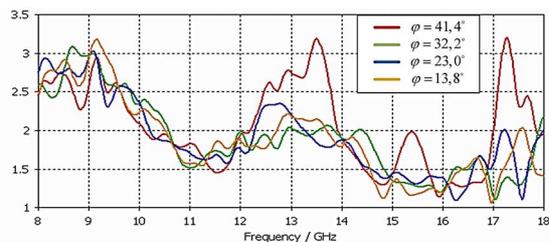


Рис. 10. Частотные зависимости коэффициентов стоячей волны для входов 2 – 5 линзы Ротмана (вход 2 соответствует максимальному отклонению лепестка от нормали на угол $\varphi = 41,4^\circ$)

Тем не менее, в существенной мере явление ослепления ФАР удастся ослабить благодаря использованию направленных элементов решетки и использованию линзы из электрически малых рассеивателей, вносящих емкостный импеданс в линейную антенную решетку, рассматриваемую как линию передачи поверхностных волн (внесение же емкостного импеданса позволяет создать условия, неблагоприятные для распространения поверхностных волн).

Заключение

В настоящей работе показана возможность реализации линейной антенной решетки, возбуждаемой с помощью плоской линзы Ротмана, размещенной на единой многослойной печатной плате. В качестве средства, используемого для минимизации негативного явления ослепления ФАР предложено использовать линзу из искусственного диэлектрика, реализованную на той же многослойной печатной плате.

Для подавления поверхностных волн, возбуждающихся в антенных решетках при значительном отклонении главного лепестка от нормали, предложено использовать метаматериальную линзу, состоящую из электрически малых рассеивателей, расположенную в раскрыве

ФАР. Ёмкостный импеданс, вносимый линзой в излучающую апертуру ФАР, препятствует распространению поверхностных волн и позволяет улучшить не только направленные характеристики антенной решетки, но и ее входные характеристики при широкоугольном сверхширокополосном сканировании.

Рассмотренный вариант реализации ФАР может использоваться в качестве подрешетки для построения антенной системы с двухкоординатным коммутационным сканированием в полосе частот с коэффициентом перекрытия более 2.

Литература

1. Бортовая малогабаритная широкодиапазонная станция радиоконтроля/ А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин, И.Б. Крыжко, П.В. Першин, А.Б. Токарев // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXIV Междунар. науч.-техн. конф., 2018. Т. 2. С. 375-382.
2. Технологические возможности изготовления печатных плат. URL: <http://www.pselectro.ru/tech>. 22.01.2020.
3. Zongxin W., Bo X., Fei Y. A Multibeam Antenna Array Based on Printed Rotman Lens // International Journal of Antennas and Propagation. Vol. 2013, Article ID 179327. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/179327>. 22.01.2020.
4. Dhouibi A., Burokur S.N., Lustrac A. Compact Metamaterial-Based Substrate-Integrated Luneburg Lens Antenna // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2012. Vol. 11. Pp. 1504-1507.
5. Su Y. and Chen Z.N. A Flat Dual-Polarized Transformation-Optics Beamscanning Luneburg Lens Antenna Using PCB-Stacked Gradient Index Metamaterials // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66. No. 10.
6. Manafi S., Fernandez Gonzalez J.M., Filipovic D.S. Design of a Perforated Flat Luneburg Lens Antenna Array for Wideband Millimeter-Wave Applications // 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2019.
7. Weiland T. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields // Electronics and Communication. 1977. Vol. 31. Pp. 116-120.
8. URL: RT/duroid 5870/5880 data sheet. <https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/rt-duroid-5870-5880-data-sheet.pdf>. 22.01.2020.

Поступила 22.02.2020; принята к публикации 15.06.2020

Информация об авторах

Ашихмин Александр Владимирович - д-р техн. наук, профессор, директор ОСП в г. Воронеже, АО «ИРКОС» (129626, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Иванов Александр Владимирович - канд. техн. наук, старший преподаватель, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14); ведущий инженер, АО «ИРКОС» (129626, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21); старший научный сотрудник научно-исследовательского центра, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Першин Павел Викторович - ведущий инженер, АО «ИРКОС» (129626, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Сафонов Кирилл Сергеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: safonov-kirik@mail.ru

Федоров Сергей Михайлович - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Зеленин Иван Алексеевич - старший преподаватель кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pasternakyg@mail.ru

INTEGRATION OF ANTENNA ARRAY FROM ASYMMETRIC VIBRATORS WITH ROTMAN LENS ON A MULTI-LAYER PRINTED BOARD

**A.V. Ashikhmin¹, A.V. Ivanov², Yu.G. Pasternak^{1,2,3}, P.V. Pershin¹, K.S. Safonov³,
S.M. Fedorov³, I.A. Zelenin³**

¹ JSC "IRCOS", Moscow, Russia

² Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy", Voronezh, Russia

³ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: radio direction finding and localization of radio emission sources (RES) using unmanned aerial vehicles (UAVs) as a transport base are one of the priority areas for the development of modern radio monitoring systems. The article shows the possibility of implementing a linear antenna array with a flat Rotman lens in the form of a single multilayer printed circuit board. As elements of the array, we used asymmetric vibrators with reflectors and directors, as well as with metamaterial lenses implemented using metallized vias. To suppress surface waves excited in antenna arrays with a significant deviation of the main lobe from the normal, we proposed to use a metamaterial lens consisting of electrically small scatterers located in the aperture of a phased antenna array (PAA). The capacitive impedance introduced by the lens into the radiating aperture of the PAA prevents the propagation of surface waves and improves not only the directional characteristics of the antenna array, but also its input characteristics during wide-angle ultra-wideband scanning. The considered embodiment of the phased array can be used as a sublattice for constructing an antenna system with two-coordinate switching scanning in a frequency band with an overlap factor of more than 2

Key words: Rotman lens, Vivaldi antenna, metamaterials, printed board

References

1. Ashikhmin A.V., Koz'min V.A., Kryzhko I.B., Pershin P.V., Tokarev A.B. "Board small-size wide-scale radio monitoring station", *Proc. of the XXIV International Scientific and Technical Conference: Radar, Navigation, Communications (Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': sb. tr. XXIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.)*, 2018, vol. 2, pp. 375-382.
2. "Technological capabilities for the manufacture of printed circuit boards", available at: <http://www.pselectro.ru/tech>, access date: 22.01.2020.
3. Zongxin W., Bo X., Fei Y. "A multibeam antenna array based on printed Rotman lens", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2013, article ID 179327, available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/179327>, access date: 22.01.2020.
4. Dhouibi A., Burokur S. N., Lustrac A. "Compact metamaterial-based substrate-integrated Luneburg lens antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, vol. 11, pp. 1504-1507.
5. Su Y., Chen Z.N. "A flat dual-polarized transformation-optics beamscanning Luneburg lens antenna using PCB-stacked gradient index metamaterials", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 10.
6. Manafi S., Fernandez Gonzalez J.M., Filipovic D.S. "Design of a perforated flat Luneburg lens antenna array for wideband millimeter-wave applications", *13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2019.
7. Weiland T. "A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields", *Electronics and Communication*, 1977, vol. 31, pp. 116-120.
8. RT/duroid 5870/5880 data sheet, available at: <https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/rt-duroid-5870---5880-data-sheet.pdf>, access date: 22.01.2020.

Submitted 22.02.2020; revised 15.06.2020

Information about the authors

Aleksandr V. Ashikhmin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Director of the OSP in Voronezh, JSC "IRCOS" (21 Zvezdnyy blvd., Moscow 129626, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Aleksandr V. Ivanov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Sarykh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), Leading Engineer of JSC "IRCOS" (21 Zvezdnyy blvd., Moscow 129626, Russia), Senior Researcher, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Sarykh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Pavel V. Pershin, Leading Engineer of JSC "IRCOS" (21 Zvezdnyy blvd., Moscow 129626, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Kirill S. Safonov, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: safonov-kirik@mail.ru

Sergey M. Fedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Ivan A. Zelenin, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ СИММЕТРИЧНОГО САМООРГАНИЗУЮЩЕГОСЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО ДЕКОДЕРА

М.В. Хорошайлова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлен новый декодер на основе нейронной сети в форме симметричной самоорганизующейся карты (от англ. symmetrical self-organizing map, SSOM), который может декодировать любые коды, исправляющие ошибки. Декодер SSOM проверяется путем декодирования кода низкой плотности проверки на четность (LDPC). Сравнение производительности SSOM-декодера и традиционного декодера выполняется путем моделирования. Вместо того, чтобы заранее обучать нейронную сеть при помощи примеров наборов кодовых слов, декодер с использованием самоорганизующихся карт может быть использован непосредственно в системе связи. Изучение примеров наборов кодовых слов является основной особенностью декодера, где характеристика выборочных наборов кодовых слов извлекается и сохраняется в SSOM распределенным способом. Полученные результаты показывают, что SSOM-декодер может осуществлять обучение и декодирование одновременно, независимо от каких-либо правил кодирования. А более высокая вероятность появления кодового слова означает большую вероятность правильного исправления ошибок. По сравнению с производительностью исправления ошибок обычным декодером, нейросетевой декодер легче реализовать, он более гибкий и обучаемый для различных наборов кодовых слов, что имеет определенные перспективы для будущих разработок в системе кодирования канала связи

Ключевые слова: нейросетевой декодер, симметричная самоорганизующаяся карта (SSOM), код низкой плотности проверки на четность (LDPC), архитектура, реализация

Введение

В настоящее время технология кодирования с исправлением ошибок стала хорошим методом для получения надежной и своевременной связи. Поэтому исправляющий ошибки декодер изучается многими разработчиками постоянно. Нейронная сеть, которая является интеллектуальной технологией, принята как новый метод, используемый в области декодирования. Вообще говоря, исследование нейросетевого декодера можно разделить на три типа:

- принятие нейронной сети в качестве основной архитектуры декодера, где нейронная сеть связана с правилами кодирования [1];
- принятие нейронной сети в качестве основной архитектуры декодера, где нейронная сеть не имеет отношения к правилам кодирования;
- использование нейронной сети, выполняющей дополнительную роль в декодере.

Комбинируя генетический алгоритм и нейронную сеть, генетический декодер нейронной сети предложен в [2], приближенный к традиционному мягкому решению в выполнении коррекции ошибок. Тем не менее, декодер принимает генетический алгоритм в качестве основной архитектуры, где нейронная

сеть играет только вспомогательную роль. В [2] предложен искусственный нейронный декодер, который подходит для нейронных сетей меньшей сложности. И декодер должен быть предварительно обучен по образцу данных.

В других работах был описан нейросетевой декодер с использованием турбокодов, производительность которого немного уступает максимальному апостериорному (MAP) декодеру. Кроме того, декодер должен быть обучен с помощью наборов выборок, сгенерированных заранее кодером, где обучение и декодирование не могут быть достигнуты одновременно [3].

На основе проверочной матрицы кодирования нейронный декодер на основе многоуровневого персептрона (MLP) представлен для декодирования кодов LDPC методом мягкого решения в [4]. Однако этот нейросетевой декодер построен в соответствии с проверочной матрицей кодирования, которая не является обычным интеллектуальным декодером. Тем не менее, нейронная сеть MLP принята в качестве метода предварительной обработки для прогнозирования ошибочных данных в канале связи, а не в основной архитектуре декодера.

Представление декодера на основе симметричной самоорганизующейся карты (SSOM)

Декодер SSOM состоит из симметричной самоорганизующейся карты (SSOM), контроллера нейронной сети и контроллера принятия решений (рис. 1). SSOM - это новая нейронная сеть, состоящая из двух самоорганизующихся карт, где наборы весов симметричны. Она состоит из входного слоя, нейронного слоя и выходного слоя. Входной слой принимает кодовое слово из канала связи. Нейронный слой - это карта кодового слова, хранящаяся в SSOM. Выходной слой экспортирует конечный результат декодера. Модификация наборов веса осуществляется контроллером нейронной сети, который используется для активации нейронов SSOM. Окончательное решение SSOM-декодера принимается контроллером выходного решения.

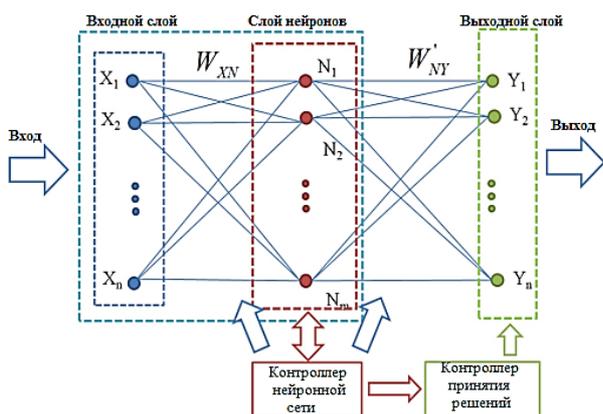


Рис. 1. Архитектура SSOM-декодера

Этапы алгоритма разработки SSOM-декодера.

Есть несколько основных шагов в реализации SSOM-декодера.

1. Инициализация. Выбираются случайные значения в качестве начальных весовых векторов для W_{XN} и W'_{NY} . Карты самоорганизующегося декодера являются симметричными, то есть:

$$W'_{NY} [j][i] = W_{XN} [i][j], \quad (1)$$

$$i=1,2,3 \dots n; j=1,2,3 \dots m.$$

2. Рассчитывается порог dT в соответствии с уравнением (2) и скорость активации в соответствии с уравнением (3)

$$dT = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W [i][j] \quad (2)$$

$$\xi = dT / 2 \quad (3)$$

3. Принимается входное кодовое слово в декодер SSOM.

4. Сходство совпадения. Найти наиболее подходящий (выигрышный) узел нейрона в соответствии с уравнением (4). Уравнение выглядит следующим образом:

$$Neu = \arg \min_j \sum_{i=1}^n |X[i] - W[i][j]| \quad j=1,2,3m, \quad (4)$$

где m – это номер нейронного узла, n – это размерность входного кодового слова. И только один нейронный узел активируется для ответа на входной вектор (входное кодовое слово) за один раз.

5. Модификация и вывод.

Модификация: регулирование весовых векторов для усиления активированного нейронного узла (уравнение (5)).

$$\Delta W [i][j] = \xi * (X[i] - W[i][j]), \text{ если } j=Neu \quad (5)$$

В уравнении (5) активирующая скорость рассчитывается по уравнению (3). Neu - номер текущего активирующего нейрона. В декодере на входное кодовое слово отвечает только один нейрон. Уравнение (5) используется для уменьшения расстояния между вектором весов активирующего нейрона и текущего кодового вектора входного слова. Поскольку декодер принимает симметричную структуру, модификация весовых векторов также является симметричной. Следовательно, весовые векторы между нейронным слоем и выходным слоем должны быть изменены в соответствии с уравнением (1) одновременно.

Выход: получить окончательный результат текущего входного кодового слова через контроллер принятия решения.

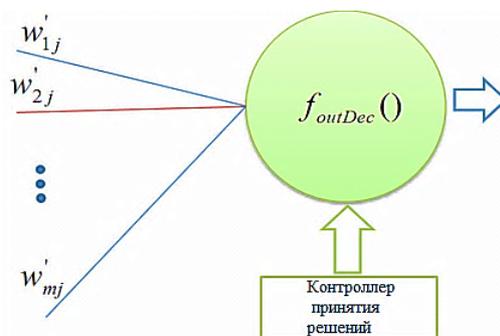


Рис. 2. Структура выходного узла

Выходные узлы (рис. 2) принимают номер активирующего узла из контроллера вывода решений и выбирают соответствующие веса

(красный $w_{2,j}$ например) и через функцию

$$f_{outDec}(W'[i][j]) = \begin{cases} 1 & \text{если } W'[i][j] \geq dT \\ 0 & \text{если } W'[i][j] < dT \end{cases} \quad (6)$$

В уравнении (6) dT является порогом принятия решения декодером. Конкретное значение dT зависит от начальных наборов веса (уравнение (2)).

6. Получить состояние декодера

Если изменение веса мало для всех нейронов, SSOM в это время находится в устойчивой фазе. Как правило, уравнение (7) является критерием для оценки состояния SSOM. Если все модификации веса соответствуют уравнению (7), декодер находится в устойчивом состоянии, и скорость активации должна быть уменьшена в соответствии с уравнением (8).

$$\sum_{i=1}^n |\Delta W[i][j]| < dT/n \quad j=1,2,3...m \quad (7)$$

$$\xi = \xi / n \quad (8)$$

7. Продолжение. Перейти к шагу (3), чтобы принять следующее кодовое слово.

Анализ эффективности SSOM-декодера на примере LDPC-кода

Анализ сложности

Низкоплотностные коды (LDPC) относятся к линейным блочным кодам и широко используются в системе связи [6]. Ниже приведено сравнение низкоплотностного декодера с нейросетевым декодером с использованием симметричной самоорганизующейся карты.

Вычислительная сложность декодеров приведена в таблице.

Основная вычислительная сложность LDPC-декодера и SSOM-декодера

Арифметический тип	XOR	Сложение
LDPC-декодер (Алгоритм Sum-Product)	kmn	
SSOM-декодер		nx

k - итерация LDPC-декодера, m - номер строки проверочной матрицы, n - размерность кодового слова, x - номер допустимого кодового слова.

Что касается традиционного декодера, то m и n обычно определяются заранее. k определяется результатом вычисления между текущим кодовым словом и проверочной матрицей, которое в основном зависит от BER (частоты ошибок по битам) текущего входного кодового слова. Следовательно, BER входного кодового слова является важным фактором, влияющим на сложность низкоплотностного декодера.

С другой стороны, сложность SSOM-декодера зависит от количества допустимых кодовых слов и размера кодового слова. Вообще говоря, размерность кодового слова фиксируется заранее. Таким образом, количество допустимых кодовых слов является основным фактором, определяющим сложность SSOM-декодера.

Из приведенного выше анализа сложность SSOM-декодера не имеет ничего общего с BER входного кодового слова. Естественно, результаты обучения и декодирования могут быть достигнуты очень быстро. Однако количество допустимых кодовых слов напрямую влияет на сложность вычислений.

Анализ результатов моделирования

Моделирование проводилось с использованием (10, 4) LDPC-кода. В целях сравнения BER низкоплотностного декодера и SSOM декодера моделирование проводилось в разных SNR (отношение сигнал / шум). Результаты моделирования приведены на рис. 3.

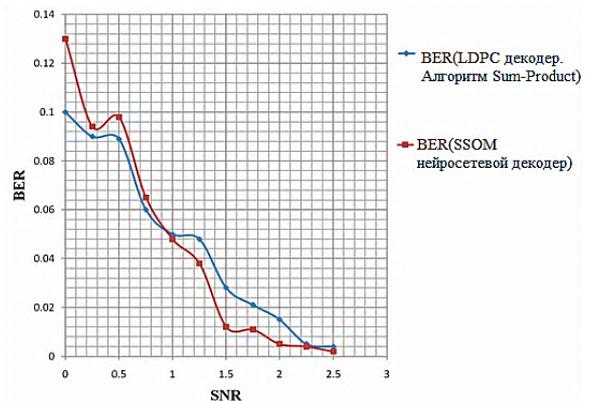


Рис. 3. Сравнение между LDPC-декодером и SSOM декодером

Из рис. 3 видно, что LDPC-декодер имеет хорошую производительность, когда SNR низкое. Однако SSOM-декодер имеет лучшую производительность в сравнении с LDPC-декодером, когда SNR > 1 дБ.

Низкое SNR означает больше ошибок в наборах кодовых слов. SSOM-декодер относится к нейросетевым декодерам, и обучение на выборочных наборах является основной их характеристикой. Начальные наборы веса не могут быть идеально сопоставлены с кодовым словом на начальном этапе, поэтому в условиях низкого SNR возникает больше ошибок. Тем не менее, производительность SSOM-декодера будет улучшаться в устойчивой фазе.

С другой стороны, обучение на наборах кодовых слов - это интеллектуальный процесс, который похож на обучение человека. Следовательно, более высокая вероятность появления кодового слова означает большую вероятность правильного исправления ошибок.

Заключение

Ниже перечислены основные достижения:

- Построена работоспособная архитектура декодера нейронной сети на основе симметричной самоорганизующейся карты (SSOM), которая обеспечивает интеллектуальную функцию декодирования.

- Обучение и декодирование осуществляются одновременно в SSOM-декодере, который обладает определенным интеллектом по сравнению с обычным LDPC-декодером.

- Вместо того чтобы обучать нейронную сеть с помощью заранее установленных наборов кодовых слов, SSOM-декодер может быть использован непосредственно в системе связи. Изучение примеров наборов кодовых слов является основной особенностью декодера, где характеристика выборочных наборов кодовых слов извлекается и сохраняется в SSOM определенным способом.

- SSOM-декодер нейронной сети может быть использован для декодирования любых блочных кодов с исправлением ошибок без соответствующих правил кодирования.

- По сравнению с обычным декодером с исправлением ошибок, он прост в реализации, обучаем для различных наборов кодовых слов.

Начальные наборы весов являются случайными в декодере SSOM, которые не могут

точно соответствовать кодовому слову. Естественно, неправильное решение обычно происходит на начальной стадии. И ошибка будет постепенно уменьшаться с процессом обучения декодера. Поэтому важно изучить алгоритм при инициализации наборов весов SSOM-декодера.

Кроме того, когда количество допустимых кодовых слов увеличивается, сложность вычислений будет постепенно увеличиваться. Естественно, SSOM-декодер подходит для меньшего числа допустимых кодовых слов.

Прежде всего, когда допустимое кодовое слово выбирается случайным образом независимо от какого-либо правила кодирования, только на основе изучения кодового слова можно решить проблему декодирования таких наборов кодовых слов. Таким образом, SSOM-декодер имеет определенные перспективы в частных системах связи, которые требуют более высокой надежности и безопасности.

Литература

1. Adaptive complex interpolator for channel estimation in pilotaided OFDM system / L. Guanghui, Z. Liaoyuan, L. Hongliang, X. Linfeng, W. Zhengning // J. Commun. and networks. 2013. Vol. 15. No. 5. pp. 496 – 503.
2. Adaptive interpolation for pilot-aided channel estimator in OFDM system/ L. Guanghui, Z. Liaoyuan, L. Hongliang, X. Linfeng, W. Zhengning // IEEE Transactions on Broadcasting. 2014. Vol. 60. No. 3. pp. 486 – 498.
3. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99-105.
4. A novel hard decision decoding scheme based on genetic algorithm and neural network/ J. Yuan, C. He, W. Gao, J. Lin, Y. Pang// Optik - International Journal for Light and Electron Optics. 2014. Vol. 125. No. 14. pp. 3457-3461
5. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Белецкая С.Ю. Использование стохастического вычисления для реализации недвоичного LDPC-декодера на ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 5. С. 70-73.
6. Khoroshaylova M.V. LDPC code and decoding algorithms// Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности: материалы II-ой междунар. науч.-практ. конф. В 2-х ч. /под ред. Э.П. Комаровой. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2015. С. 227-228.

Поступила 24.01.2020; принята к публикации 15.06.2020

Информация об авторах

Хорошайлова Марина Владимировна - канд. техн. наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A SYMMETRIC SELF-ORGANIZING NEURAL NETWORK DECODER

M.V. Khoroshailova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article presents a new decoder based on a neural network in the form of a symmetrical self-organizing map (SSOM), which can decode any error correction codes. A SSOM decoder is verified by decoding a Low Density Parity Check (LDPC) code. The performance comparison of a SSOM decoder and traditional decoder is performed by simulation. Instead of pre-training the neural network using examples of sets of code words, a decoder using self-organizing cards can be used directly in the communication system. The study of examples of code word sets is the main feature of the decoder, where the characteristic of selective codeword sets is extracted and stored in SSOM in a distributed way. The obtained results show that a SSOM decoder can carry out training and decoding simultaneously, regardless of any encoding rules. A higher probability of the appearance of a code word means a greater probability of correct error correction. Compared to the error correction performance of a conventional decoder, a neural network decoder is easier to implement, it is more flexible and trained for various sets of code words, which has certain prospects for future developments in the communication channel coding system

Key words: neural network decoder, symmetric self-organizing map (SSOM), low density parity check code (LDPC), architecture, implementation

References

1. Guanghui L., Liaoyuan Z., Hongliang L., Linfeng X., Zhengning W. "Adaptive complex interpolator for channel estimation in pilotaided OFDM system", *J. Commun. and Networks*, 2013, vol. 15, no. 5, pp. 496–503.
2. Guanghui L., Liaoyuan Z., Hongliang L., Linfeng X., Zhengning W. 'Adaptive interpolation for pilot-aided channel estimator in OFDM system', *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2014, vol. 60, no. 3, pp. 486–498.
3. Khoroshaylova M.V. "FPGA-based channel coding architecture for a 5G wireless network using high-level synthesis", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105.
4. Yuan J., He C., Gao W., Lin J., Pang Y. "A novel hard decision decoding scheme based on genetic algorithm and neural network", *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, vol. 125, no. 14, pp. 3457-3461
5. Bashkirov A.V., Khoroshaylova M.V. Beletskaya S.Yu. 'Using stochastic computing to implement a non-binary LDPC decoder on FPGA', *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 5, pp. 70-73.
6. Khoroshaylova M.V. "LDPC code and decoding algorithms", *Anthropocentric Sciences: an Innovative View of the Education and development of Personality: Proc. of the Second International Scientific-Practical Conf. (Antropotsentricheskie nauki: innovatsionnyy vzglyad na obrazovaniye i razvitie lichnosti: materialy II-oy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, ed. E.P. Komarova, Voronezh, Nauchnaya kniga, 2015, pp. 227-228.

Submitted 24.01.2020; revised 15.06.2020

Information about the authors

Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ НА МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ С УЧЕТОМ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

З.Х.М. Аль-Араджи¹, О.Ю. Макаров¹, А.В. Муратов¹, А.В. Турецкий¹, Х.А. Суайкат²

¹ Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

² Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: многослойная печатная плата (МПП) является достаточно сложной конструкцией, так как состоит из стеклотканых композитов и большого количества проводящих слоев. Плата обеспечивает как электрическое соединение электронных компонентов, так и их механическое закрепление. При использовании плат в конструкциях, подвергаемых механическим нагрузкам, надежность МПП определяет надежность всей конструкции в целом. Для повышения эффективности процесса проектирования требуется сократить временные и материальные затраты путем применения процесса моделирования и инженерного анализа. Предложена методика, которая отличается от традиционных более коротким временем доработки конструкции, путем применения моделирования. Этот метод проектирования печатных плат включает два этапа. Сначала проводится анализ вибрации многослойной печатной платы с установленными компонентами. Чтобы проверить точность моделирования, сравниваются результаты моделирования метода конечных элементов (FEM) с результатами экспериментальных испытаний для печатной платы. Сравнение экспериментальных и имитационных результатов показывает, что они хорошо совпадают. Анализ вибрации печатной платы выполняется методом FEM с использованием элемента «сосредоточенный вес», который заменяет фактическую геометрию компонента. Второй этап заключается в выборе оптимального типа закрепления для печатной платы, который обеспечивает минимальный эффект вибрации. Для достижения этой цели на стадии проектирования исследовались четыре типа закрепления сторон платы. Были проанализированы платы для демонстрации механических воздействий с использованием FEM и инженерного анализа (моделирования) средствами Sesto Elements / Pro 5.0. Также проводился аналитический расчет поведения плат с теми же способами закрепления. Результаты сравнения моделирования и аналитического расчета показали хорошее совпадение, разница не превышает 12%. Собственная частота МПП является наиболее критическим параметром, показывающим возможность появления механического резонанса во время эксплуатации, и чем выше ее значение, тем выше надежность конструкции. Необходимо, чтобы конструкция платы имела как минимум двукратный резерв по частоте, который должен быть выше, чем максимальная эксплуатационная частота. Граничные условия печатной платы оказывают существенное влияние на вибрационные характеристики печатной платы. Самая высокая собственная частота наблюдается при фиксации четырех сторон платы, когда обеспечивается максимальная жесткость конструкции. Это один из лучших способов закрепления, но он не всегда может быть использован, поэтому необходимо было исследовать другие способы закрепления. Приведена классификация способов закрепления в зависимости от полученных результатов определения собственной частоты

Ключевые слова: многослойная печатная плата (МПП), вибрация, радиоэлектроника, конструкция, моделирование, CREO

Введение

Многослойная печатная плата стала неотъемлемым, одним из важнейших элементов современного электронного оборудования. Она выполняет сразу две важнейшие функции: электрическое соединение электронных компонентов и их механическое закрепление. Анализ надежности электронного оборудования, работающего в жестких эксплуатационных условиях, показывает, что многие неисправности возникают в электрических соединениях, расположенных на плате, из-за воздействия высокой

частоты и вибрации. Исследования [1, 12] показали, что большинство отказов электронных схем в электронном оборудовании имеют механический характер, и многие из этих механических отказов происходят во внутренних слоях и в паяных соединениях [2].

За последние годы большое количество испытаний оборудования показало, что определенные типы вибраций и ударов вызывают около 20 % отказов [3,4]. Когда внешняя рабочая частота печатной платы близка или равна ее собственной частоте, возникает резонанс, который приводит к следующим последствиям [5,6]:

1. Электрические провода, паяные соединения и контакты разъема на печатной плате могут быть повреждены.

2. Компоненты, расположенные близко, мешают друг другу и вызывают короткое замыкание.

3. Происходит ослабление резьбового соединения печатной платы с корпусом.

Известно, что вибрационные характеристики многослойной ПП оказывают существенное влияние на надежность работы электронных компонентов на поверхности. В этой статье анализируются вибрационные характеристики многослойной ПП, а также влияние сосредоточенной массы на изменение резонансных частот и распределение смещений компонентов платы.

Эти данные являются основой для анализа вибрационных характеристик печатных плат с электронными компонентами.

Модальный анализ печатных плат - это метод, используемый для определения собственных частот колебаний компоновки платы. Модальные параметры обеспечивают основу для анализа вибрации колебательной системы, диагностики и прогнозирования резонансных явлений, а также определения оптимальной компоновки с приемлемыми динамическими характеристиками. Основными этапами модального анализа конечных элементов являются наложение граничных условий на конструкцию, моделирование и получение результатов с последующей обработкой [7].

Оценка собственной частоты

При моделировании необходимо создать геометрическую модель платы, ввести соответствующие параметры материала (модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность) и выбрать подходящий размер конечного элемента для генерации сетки. Меньшая сетка может применяться к некоторым поверхностям, что повышает точность расчета, хотя и удлиняет процесс решения.

После установки геометрической модели определяются граничные условия для платы (закрепление и нагрузка). После всех этапов выбирается наиболее подходящий метод расчетов. Поскольку затухание колебаний мало влияет на результаты модального анализа печатной платы, затухание материала игнорируется. В следующих подразделах приведены подробности анализа.

А. Динамические характеристики ПП.

В соответствии с изотропной моделью анализа эпоксидного стекловолокна, рассмотре-

на типичная структура печатной платы и ее характеристики приведены в табл.1.

Таблица 1

Характеристики МПП

Параметр	Значение
Размеры МПП.	(200×150×1.5) мм
Вес МПП	672 г
Модуль Юнга для МПП	21 ГПа
Коэффициент Пуассона	0.15

В. Аналитическое решение

Формы колебаний МПП требуют анализа, для того чтобы определить влияние вибрации на всю конструкцию. Режимы вибрации - это особые модели колебательного движения. Существует в основном четыре типа закрепления печатной платы, как показано ниже.

1. Две короткие стороны зафиксированы, как показано на рис. 1, может быть рассчитана первая собственная частота ПП f_n из уравнения, полученного Дейвом С. Штейнбергом [1, 12].

$$f_n = \frac{3,55}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho}}, \quad (1)$$

где a - длина РСВ (мм),

D - коэффициент жесткости РСВ (Н·мм),

P - масса на единицу площади (кг/мм²).

Коэффициент жесткости плиты D найдем

из:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad (2)$$

Где E - модуль упругости (Н/мм²),

h - толщина РСВ (мм),

μ - коэффициент Пуассона,

b - ширина РСВ (мм).

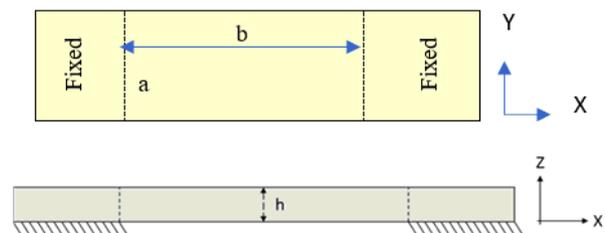


Рис. 1. Зафиксированы две стороны МПП

Собственная частота МПП оценивается теоретическими расчетами путем подставления уравнения (2) в уравнение (1) и составляет 133

Гц, что дает представление о динамике МПП на основе соответствующего анализа подсистемы.

2. Три стороны зафиксированы, самая короткая сторона остается свободной: первая собственная частота f_n МПП может быть рассчитана аналитически из уравнения Дейва С. Штейнберга [1, 12].

$$f_n = \frac{\pi}{3} \left[\frac{D}{\rho} \left(\frac{0,75}{a^4} + \frac{2}{a^2 b^2} + \frac{12}{b^4} \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

Собственная частота колебаний РСВ оценивается теоретическими расчетами с использованием уравнений (2) и (3) и составляет 252 Гц.

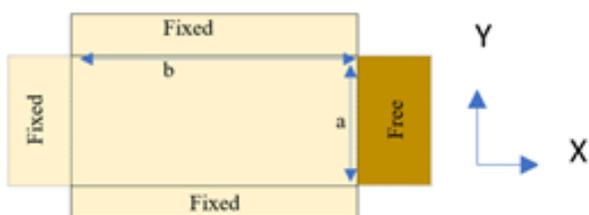


Рис. 2. Три стороны МПП зафиксированы

3. Все 4 стороны зафиксированы: первая собственная частота f_n ПП может быть рассчитана аналитически из уравнения Дейва С. Штейнберга [1, 12]:

$$f_n = \frac{\pi}{1,5} \left[\frac{D}{\rho} \left(\frac{3}{a^4} + \frac{2}{a^2 b^2} + \frac{3}{b^4} \right) \right]^{1/2} \quad (4)$$

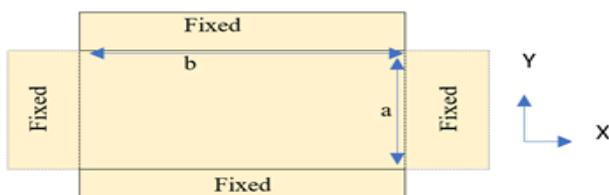


Рис. 3. Все четыре стороны платы зафиксированы

Собственная частота колебаний ПП оценивается теоретическими расчетами с использованием уравнений (2) и (4) и составляет 305 Гц.

4. Две стороны (короткая и длинная) зафиксированы, две другие (короткая и длинная) поддерживаются: первая собственная частота f_n МПП может быть рассчитана аналитически из уравнения Дейва С. Штейнберга [1, 12]:

$$f_n = \frac{\pi}{2} \left[\frac{D}{\rho} \left(\frac{2,45}{a^4} + \frac{2,68}{a^2 b^2} + \frac{2,45}{b^4} \right) \right]^{1/2} \quad (5)$$

Собственная частота колебаний МПП оценивается теоретическими расчетами с использованием уравнений (2) и (5) и составляет 213 Гц.

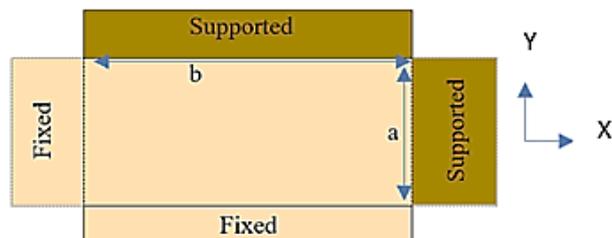


Рис. 4. Две стороны (короткая и длинная) зафиксированы, две другие (короткая и длинная) поддерживаются

С. Метод анализа конечных элементов

Предложенная аналитическая модель подтверждена сравнением результатов численного анализа с результатами модального анализа методом конечных элементов (МКЭ). Модальный анализ МКЭ выполняется программным обеспечением *Stro Elements / Pro 5.0. Environment*. Необходимыми шагами конечно-элементного модального анализа являются: моделирование, задание ограничений и решение, получение результатов и постобработка [6].

Метод расчета собственной частоты однородной пластины из однородного материала известен достаточно давно.

Литтл, Уорбертон, Лора и Саффель [8, 9, 10] проделали много работы по определению уравнений собственной частоты колебаний прямоугольных пластин с различными граничными условиями, использующих треугольные и полиномиальные ряды.

При моделировании необходимо установить геометрическую модель ПП, параметры которой указаны в табл. 1. Для построения сетки необходимо выбрать подходящий конечный элемент. Затем, после создания геометрической модели, надо задать граничные условия конструкции и, наконец, выбрать наиболее подходящий метод расчетов.

Демпфирование материала игнорируется, поскольку оно мало влияет на результаты модального анализа. Затем для расчета конечных элементов используется программное обеспечение *Stro*, с помощью которого проводится модальный анализ для получения первых трех собственных частот колебаний. Результаты мо-

делирования показаны в табл. 2, частоты колебаний первых трех порядков показаны на рис. 5.

Таблица 2

Первые три собственные частоты колебания МПП с двумя зафиксированными короткими сторонами

F_1 (Гц)	F_2 (Гц)	F_3 (Гц)
130 Гц	182 Гц	368 Гц

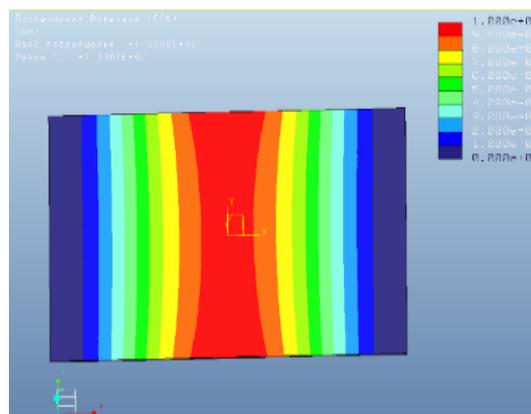
Влияние граничных условий на вибрационные характеристики печатных плат

Первую собственную частоту пластины рассчитывают путем подстановки данных в формулы (1,2,3,4) собственных частот ПП при различных граничных условиях, рассчитанных с помощью численного анализа и модального анализа CREO, полученных, как показано в табл. 3.

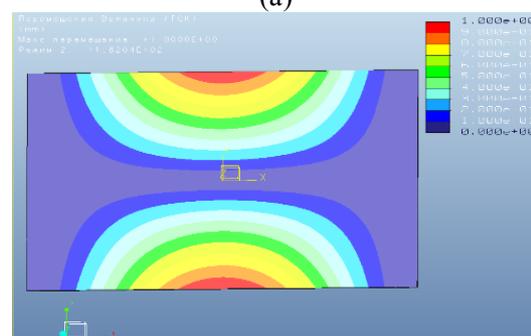
Таблица 3

Собственные частоты ПП в различных граничных условиях.

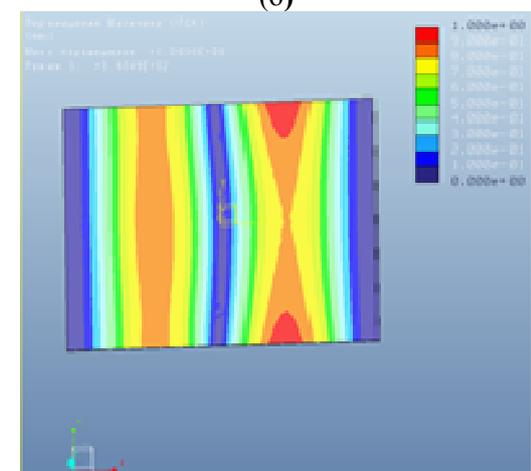
Тип фиксации	Численный метод. Первая собственная частота, Гц	Результат моделирования, Гц	% Совпадения
Две короткие стороны зафиксированы.	133	130	2
Три стороны зафиксированы, одна короткая сторона свободная	252	237	6
Четыре стороны зафиксированы	313	304	3
Две стороны (короткая и длинная) зафиксированы, две другие поддерживаются.	226	260	13



(а)



(б)



(в)

Рис. 5. Результаты модульного анализа в CREO. Расчетные значения собственных частот колебаний стеклопластиковой ПП с 4 зафиксированными краями: (а) первая собственная частота, (б) вторая собственная частота, (в) третья собственная частота.

Таким образом, из табл. 3, рис. 3 и 4 можно наблюдать погрешность, возникающую между собственной частотой первого порядка, полученной с помощью модального анализа CREO и рассчитанной численным методом в различных случаях граничных условий.

В четвертом случае задания граничных условий наблюдается наибольший коэффициент ошибок. Таким образом, жесткая фиксация стороны печатной платы является более луч-

шим способом, чем просто поддерживаемая, так как могут наблюдаться вынужденные смещения в разных системах координат.

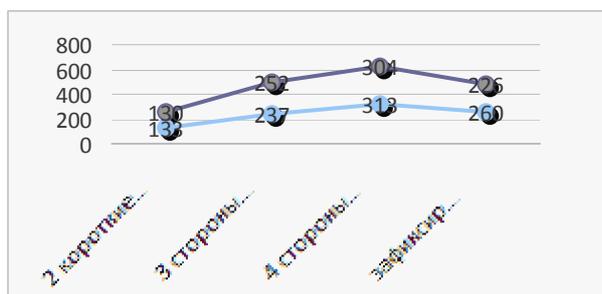


Рис. 6. Первая собственная частота колебаний МПП, измеренная экспериментальным путем при различных граничных условиях

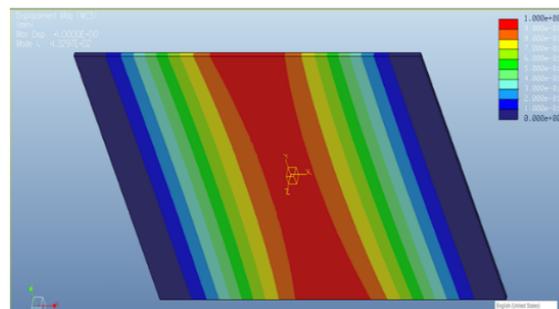
Результаты сравнения согласуются между собой, что позволяет сделать вывод о том, что результаты, полученные с помощью CREO, заслуживают доверия. Можно заявить, что в данном случае установлена высокая достоверность, и данный метод можно с уверенностью использовать для дальнейшего анализа [12].

Результат и обсуждение

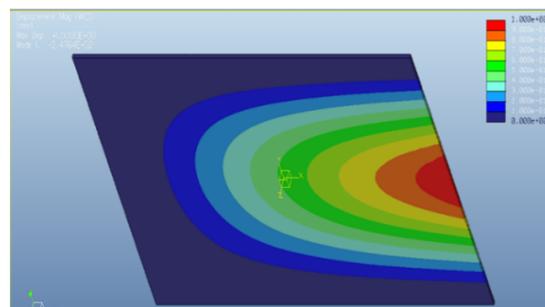
На аналитическом этапе работы авторы перемещали массу характеристик электронных компонентов печатной платы по многим позициям. Эта масса была локализована в определенных местах, как показано в табл. 4-7.

В этой таблице приведены собственные частоты колебаний печатных плат массой 25 грамм в разных положениях. Одновременно плата жестко фиксируется по более коротким сторонам.

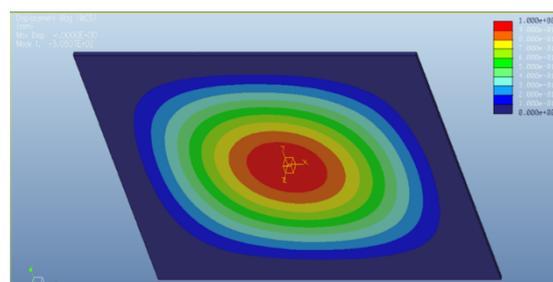
Процесс анализа показал, что собственные частоты МПП с концентрированной массой были меньше, чем собственные частоты МПП без концентрированной массы, и это зависит от положения концентрированной массы, как показано на рис. 3. Различные положения концентрированной массы МПП приводят к различию вибрационных характеристик плат. С другой стороны, локализация массы оказала существенное влияние на режимы колебаний печатной платы. Данный признак отличался в зависимости от расположения центра концентрированной массы на плате. Исходя из этого, можно сделать вывод, что необходимо уделять внимание расположению и весу электрических компонентов на ПП еще на этапе проектирования [11].



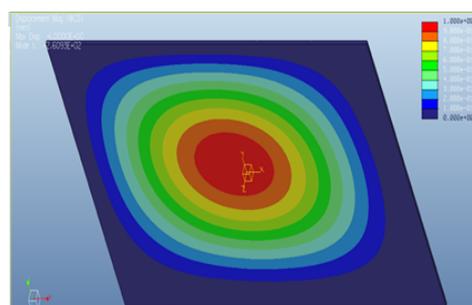
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 7. Результаты модального анализа в CREO: первая собственная частота колебаний стекловолоконной ПП при различных граничных условиях:

- (а) 2 короткие стороны зафиксированы,
- (б) 3 стороны зафиксированы, 1 короткая сторона свободна,
- (в) 4 стороны зафиксированы,
- (г) 2 стороны (короткая и длинная) зафиксированы, другие 2 (короткая и длинная) поддерживаются

Таблица 4

Собственные частоты колебаний МПП с сосредоточенной массой, расположенной в различных местах платы при условии: «2 короткие стороны зафиксированы»

Расположение центра масс (центр платы в коорд. мм)	Первая частота собственных колебаний, ГЦ	Вторая частота собственных колебаний, ГЦ	Третья частота собственных колебаний, ГЦ
0	133	182	362
50	116	182	276
75	102	182	276
100	97	182	286
150	100	182	318
175	117	182	318
200	133	182	318

Таблица 5

Собственные частоты колебаний МПП с сосредоточенной массой, расположенной в различных местах платы при условии: «3 стороны фиксированы, 1 короткая сторона свободна»

Расположение центра масс (центр платы в х коорд. мм)	Первая частота собственных колебаний, ГЦ	Вторая частота собственных колебаний, ГЦ	Третья частота собственных колебаний, ГЦ
0	103	289	456
50	152	341	465
75	159	316	461
100	165	285	598
150	103	289	483
175	245	309	435
200	247	341	554

Таблица 6

Собственные частоты колебаний МПП с сосредоточенной массой, расположенной в различных местах платы при условии «все 4 стороны зафиксированы»

Расположение центра масс (центр платы в коорд. мм)	Первая частота собственных колебаний, ГЦ	Вторая частота собственных колебаний, ГЦ	Третья частота собственных колебаний, ГЦ
0	305	514	725
50	204	385	728
75	178	514	673
100	172	514	673
150	208	384	725
175	285	395	632
200	305	515	726

Таблица 7

Собственная частота колебаний ПП с сосредоточенной массой, расположенных в различных местах платы при условии: «2 стороны (короткая и длинная) зафиксированы, другие 2 стороны (короткая и длинная) поддерживаются»

Расположение центра масс (центр платы в х коорд. мм)	Первая частота собственных колебаний, ГЦ	Вторая частота собственных колебаний, ГЦ	Третья частота собственных колебаний, ГЦ
0	304	514	514
50	207	385	721
75	178	443	720
100	172	515	869
150	206	385	723
175	275	386	644
200	304	513	723

Заключение

Место расположения любого электрического компонента на многослойных печатных платах имеет важное значение при проектировании электрических и электронных приборов. Итак, в этой статье авторы использовали большое количество способов найти оптимальное положение электрических компонентов для уменьшения вибрационных эффектов. После анализа с использованием программ методом конечных элементов (CREO), они нашли наилучшее положение – это случай, когда плата закреплена с четырех сторон. Эта позиция насколько возможно снизила вибрацию на ПП. Наличие тяжелых электронных компонентов на печатной плате обычно снижает частоту ее собственных колебаний, поэтому в процессе модального анализа это необходимо учитывать, добавляя к модели сосредоточенную массу. Также, на этапе установки или сборки, необходимо заранее разработать метод крепления печатной платы. Ввиду того, что МПП сделана из композиционного материала, необходимо учитывать, что свойства этого материала были как анизотропными, так и изотропными; следовательно, модель конечных элементов печатной платы должна строиться по этим свойствам. Граничные условия МПП оказали значительное влияние на ее вибрационные характеристики. Таким образом, необходимо определить граничное условие на этапе моделирования с помощью программы конечных элементов.

Литература

1. Моделирование механических характеристик многослойных печатных плат средствами CAE анализа/ З.Х.М. Аль-Араджи, А.В. Муратов, А.В. Турецкий, Ю.В. Худяков// Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума. Пенза, 2018. Т. 1. С. 224-227.
2. Турецкий А.В., Лозовой И.А. Разрушение паяных соединений и анализ причин возникновения разрушений// Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума. Пенза, 2011. Т.1. С. 184-186.
3. Aytekin, Banu. Vibration Analysis of PCBs and electronic components. Middle East Technical University (2008): 135.
4. Steinberg D.S. Preventing Thermal Cycling and Vibration Failures in Electronic Equipment, John Wiley & Sons, Inc.2001.
5. Моделирование механических характеристик радиоэлектронных модулей третьего уровня/ П.В. Иевлев, А.И. Климов, А.В. Муратов, Ю.В. Сидоров, А.В. Турецкий //Радиотехника. 2014. № 11. С. 37-40.
6. Этапы моделирования механических характеристик радиоэлектронных модулей третьего уровня / П.В. Иевлев, А.И. Климов, А.В. Муратов, Ю.В. Сидоров, А.В. Турецкий //Радиотехника. 2014. № 11. С. 41-43.
7. Zhang C., Kan C. The Reverse Reconstruction and Finite Element Analysis of the UAV Impeller// Int. J. Sci. Res. 2016. Vol. 5. No. 3. pp. 595–597
8. Little R.W. Master's Thesis, Bending of a cantilever plate. University of Wisconsin, 1959.
9. Leissa A.W. The vibration of rectangular plates [J]// Journal of Sound & Vibration. 1980. 31(3):257-293.
10. Laura P.A., Jr B F S. Study of Small-Amplitude Vibrations of Clamped Rectangular Plates Using Polynomial Approximations [J]// Journal of the Acoustical Society of America. 1967. 41(4A):836-839.
11. Modeling and Experimental Research of Vibration Properties of A Multi-Layer Printed Circuit Board/ Z.H. Al-Araji, N.A. Swaikat, A. Muratov and A.V. Turetsky // 4th Scientific International Conference Najaf (SICN), Al-Najef, Iraq. 2019. pp. 43-47.
12. Dave S. Steinberg. Vibration Analysis of Electronic Equipments. New York: John Wiley and Sons. Inc, 1973.

Поступила 26.03.2020; принята к публикации 18.06.2020

Информация об авторах

Аль-Араджи Зайнаб Хуссам Моса – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: alaraje@bk.ru

Макаров Олег Юрьевич - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: mou@hotmail.ru

Муратов Александр Васильевич - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kivr@vorstu.ru

Турецкий Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tav7@mail.ru

Хасан Али Суайкат – магистрант, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: souikat@mail.ru

METHOD OF CHOOSING THE OPTIMAL LOCATION OF COMPONENTS ON MULTILAYERED PCBS WITH TAKING INTO ACCOUNT THE EXTERNAL MECHANICAL INFLUENCES

Z.H.M. Al-Araji¹, O.Yu. Makarov¹, A.V. Muratov¹, A.V. Turetskiy¹, H.A. Souikat²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Voronezh State University, Voronezh, Russia

Abstract: a multilayer printed circuit board (MPCB) is a rather complex design, as it consists of fiberglass composites and a large number of conductive layers. The board provides both the electrical connection of electronic components and their mechanical fastening. When using boards in structures subjected to mechanical loads, the reliability of the MPCB determines the reliability of the entire structure as a whole. To increase the efficiency of the design process, it is required to reduce time and material costs by applying the modeling process and engineering analysis. The article proposes a methodology that differs from the traditional one in a shorter time for finalizing the design by applying modeling. This method of designing printed circuit boards involves two steps. First, vibration analysis of a multilayer printed circuit board with installed components is performed. To check the accuracy of the simulation, the FEM simulation results are compared with the experimental results for the printed circuit board. Comparison of experimental and simulation results shows that they coincide well. The PCB vibration analysis is performed by the FEM method using the lumped weight element, which replaces the actual geometry of the component. The second step is to choose the optimal type of fixing for the printed circuit board, which provides the minimum vibration effect. To achieve this, four types of fixing the sides of the board were studied at the design stage. The boards were analyzed to show mechanical effects using the finite element method (FEM) and engineering analysis (simulation) using Cero Elements / Pro 5.0. An analytical calculation of the behavior of the boards with the same fixing methods was also carried out. The results of modeling comparison and analytical calculation showed good agreement, the difference does not exceed 12%. The natural frequency of the MPCB is the most critical parameter, showing the possibility of mechanical resonance during opera-

tion, and the higher its value, the higher the reliability of the design. The design of the board should have at least a twofold reserve in frequency

Key words: multilayer printed circuit board (MPCB), vibration, radio electronics, design, modeling, CREO

References

1. Al-Araji Z.Kh.M., Muratov A.V., Turetskiy A.V., Khudyakov Yu.V. "Modeling the mechanical characteristics of multilayer printed circuit boards by means of CAE analysis", *Reliability and Quality: proc. of the Int. Symposium (Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoziuma)*, Penza, 2018, vol. 1, pp. 224-227.
2. Turkish A.V., Lozova I.A. "The destruction of soldered joints and analysis of the causes of destruction", *Reliability and Quality: proc. of the Int. Symposium (Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoziuma)*, Penza, 2011, vol.1, pp. 184-186.
3. Aytakin B. "Vibration analysis of PCBs and electronic components", Middle East Technical University, 2008, 135 p.
4. Steinberg D.S. "Preventing thermal cycling and vibration failures in electronic equipment", John Wiley & Sons, Inc., 2001.
5. Ievlev P.V., Klimov A.I., Muratov A.V., Sidorov Yu.V., Turetskiy A.V. "Modeling the mechanical characteristics of radio-electronic modules of the third level", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2014, no. 11, pp. 37-40.
6. Ievlev P.V., Klimov A.I., Muratov A.V., Sidorov Yu.V., Turetskiy A.V. "Stages of modeling the mechanical characteristics of third-level electronic modules", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2014, no. 11, pp. 41-43.
7. Zhang C., Kan C. "The reverse reconstruction and finite element analysis of the UAV impeller", *Int. J. Sci. Res.*, 2016, vol. 5, no. 3, pp. 595-597
8. Little R.W. "Bending of a cantilever plate", Master's Thesis, University of Wisconsin, 1959.
9. Leissa A.W. "The vibration of rectangular plates[J]", *Journal of Sound & Vibration*, 1980, vol. 31(3), pp. 257-293.
10. Laura P.A., Jr B F S. "Study of small-amplitude vibrations of clamped rectangular plates using polynomial approximations[J]", *Journal of the Acoustical Society of America*, 1967, vol. 41(4A), pp. 836-839.
11. Al-Araji Z.H., Swaikat N.A., Muratov A., Turetsky A.V. "Modeling and experimental research of vibration n properties of a multi-layer printed circuit board", *2019 4th Scientific International Conference Najaf (SICN)*, Al-Najef, Iraq, 2019, pp. 43-47.
12. Steinberg D. S. "Vibration Analysis of Electronic Equipments", New York, John Wiley and Sons.Inc, 1973.

Submitted 26.03.2020; revised 18.06.2020

Information about the authors

Zainab Hussam Mosa Al-Araji, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: alaraje@bk.ru

Oleg Yu. Makarov, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: mou@hotmail.ru

Aleksandr V. Muratov, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: tav7@mail.ru.

Andrey V. Turetskiy, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: tav7@mail.ru.

Hassan Souikat, MA, Voronezh State University (1 Universitetskaya square, Voronezh 394018, Russia), e-mail: souikat@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ИЗ ПЕЧАТНЫХ ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКИХ АНТЕНН, ЗАПИТАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ЛИНЗЫ РОТМАНА

А.В. Ашихмин¹, А.В. Иванов², Ю.Г. Пастернак^{1,2,3}, П.В. Першин¹, Ф.С. Сафонов³, С.М. Федоров³, И.А. Зеленин³

¹АО «ИРКОС», г. Москва, Россия

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

³Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: важными направлениями совершенствования радиопеленгаторных фазированных антенных решеток (ФАР) являются одновременное расширение полосы рабочих частот и диапазон рабочих углов сканирования при сохранении её энергетического потенциала, надежности, габаритных размеров, массы и стоимости. Среди распространенных вариантов реализации антенных элементов для ФАР можно отметить одиночные дипольные антенны, спиральные антенны, антенны Вивальди и патч-антенны. Существенно реже в качестве элементов ФАР встречаются логопериодические дипольные антенны (ЛПДА). При этом ЛПДА обладают несомненным преимуществом перед другими типами антенн: при правильном подборе параметров структуры антенны легко может быть достигнут рабочий диапазон частот 10:1 и более с сохранением почти неизменной характеристики направленности при КСВН (коэффициент стоячей волны по напряжению) на входе, не превышающем 1,5 – 1,7. Предложена ЛПДА с диапазоном рабочих частот от 1 ГГц до 12 ГГц с КСВН менее 2. Показана возможность реализации линейной антенной решетки с возбуждающей плоской линзой Раппапорта в сверхширокой полосе частот и углом сканирования 90 градусов в азимутальной плоскости. Рассмотренный вариант реализации ФАР может использоваться в качестве подрешетки для построения антенной системы с двухкоординатным коммутационным сканированием в полосе частот с коэффициентом перекрытия равным трём

Ключевые слова: линза Раппапорта, логопериодическая антенна, антенная решетка

Введение

Важными направлениями совершенствования радиопеленгаторных фазированных антенных решеток (ФАР) являются одновременное расширение полосы рабочих частот и диапазон рабочих углов сканирования при сохранении её энергетического потенциала, надежности, габаритных размеров, массы и стоимости.

Среди распространенных вариантов реализации антенных элементов для ФАР можно отметить одиночные дипольные антенны, спиральные антенны, антенны вивальди и патч-антенны. Существенно реже в качестве элементов ФАР встречаются логопериодические дипольные антенны (ЛПДА). При этом ЛПДА обладают несомненным преимуществом перед другими типами антенн: при правильном подборе параметров структуры антенны легко может быть достигнут рабочий диапазон частот 10:1 и более с сохранением почти неизменной характеристики направленности при КСВН на входе, не превышающем 1,5 – 1,7 [1]. Так, в ра-

боте [2] предложена ЛПДА с диапазоном рабочих частот от 1 ГГц до 12 ГГц с КСВН менее 2.

В работе [3] рассмотрен вариант реализации широкополосной малогабаритной ЛПДА с диапазоном рабочих частот от 200 МГц до 803 МГц с КСВН менее 2.

При этом размер антенны составил всего 420 мм × 576,6 мм × 29,6 мм, что в частях длины волны на нижней рабочей частоте антенны составляет всего 0,28 × 0,384 × 0,02.

В работе [4] предложен вариант реализации малогабаритной ЛПДА с применением треугольной меандровой структуры. Предложенная конструкция антенны имеет уменьшенный по одной из осей геометрический размер более чем в 2 раза по сравнению с базовым вариантом ЛПДА для аналогичного рабочего диапазона частот с перекрытием 4:1 и КСВН менее 2.

В настоящей работе рассмотрена возможность построения широкополосной линейной антенной решетки для радиопеленгаторной ФАР с широкоугольным сканированием из печатных ЛПДА с запиткой печатной линзой Раппапорта, являющейся разновидностью линзы Ротмана. Приведены результаты электродинамического моделирования предложенной конструкции методом Вейланда [5].

Конструкция антенной решетки и ее элементов

Модель антенной решетки показана на рис. 1. ФАР состоит из 16 печатных ЛПДА, каждая из которых выполнена с применением технологии производства печатных плат из высокочастотного материала TMM 4 фирмы Rogers толщиной 1,5 мм с параметрами $\epsilon_r = 4,5$, $tg\delta_s = 0,002$ [6]. Размеры печатной платы составляют 257 мм × 148 мм.

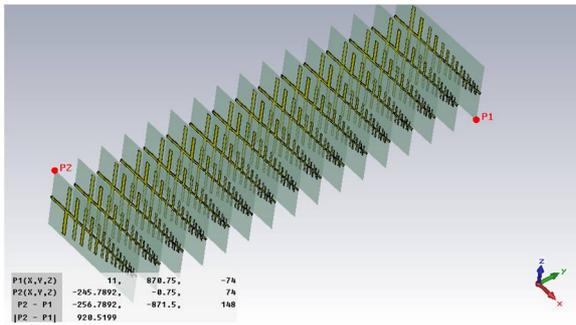


Рис. 1. Антенная решетка из 16 элементов

Период ФАР d был выбран равным 58 мм исходя из условия $d < \lambda_{\min} / (1 + \cos(\varphi_{\max}))$ для обеспечения отклонения главного лепестка от нормали к плоскости решетки в пределах $\varphi_{\max} = 90^\circ / 2 = 45^\circ$ в диапазоне частот от 1 до 3 ГГц. Высота ФАР составляет 148 мм, ширина – 871,5 мм, глубина – 256,8 мм.

Модель одиночной ЛПДА показана на рис. 2. Запитка ЛПДА в составе ФАР осуществляется с помощью печатной линзы Раппапорта [7, 8], являющейся разновидностью линзы Ротмана, в которой минимизированы фазовые искажения сигналов, подающихся на входы элементов ФАР (рис. 3).

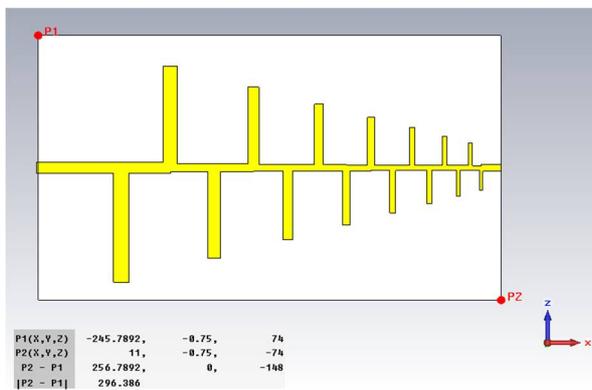


Рис. 2. Топология (одна сторона) печатной логопериодической антенны

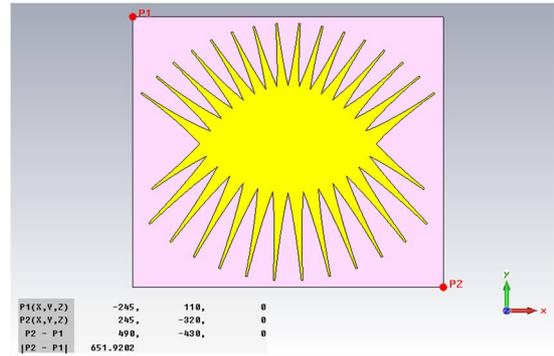


Рис. 3. Линза Раппапорта

Аналогично ЛПДА, линза выполнена с применением технологии производства печатных плат из высокочастотного материала AD 1000 фирмы Rogers толщиной 3.226 мм с параметрами $\epsilon_r = 10,2$, $tg\delta_s = 0,0023$ [9]. Размеры печатной платы составляют 490 мм × 430 мм.

16 верхних выходов линзы Раппапорта (рис. 3) подключаются к элементам антенной решетки. 12 нижних входов в центре (низ рис. 2) подключаются к высокочастотному коммутатору. Два крайних порта снизу подключаются к балластным резисторам номиналом 50 Ом каждый. Входы и выходы линзы – несимметричные полосковые линии с волновым сопротивлением 50 Ом.

Результаты электродинамического моделирования

Частотные зависимости коэффициентов стоячей волны на входах линзы Раппапорта, подключаемых к высокочастотному коммутатору, представлены на рис. 4. Развязка соседних портов не менее 10 дБ в полосе частот от 1 ГГц до 1,7 ГГц и не менее 15 дБ в полосе частот от 1,7 ГГц до 3 ГГц (рис. 5).

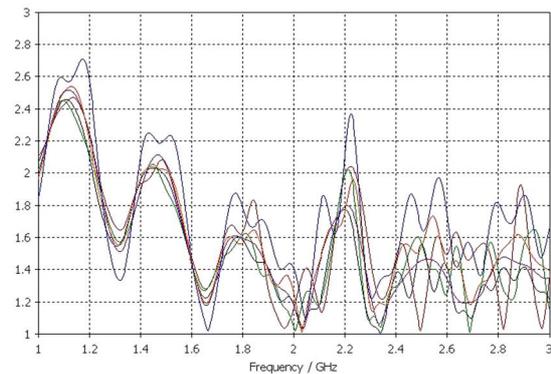


Рис. 4. КСВН на входах линзы Раппапорта в полосе частот от 1 ГГц до 3 ГГц

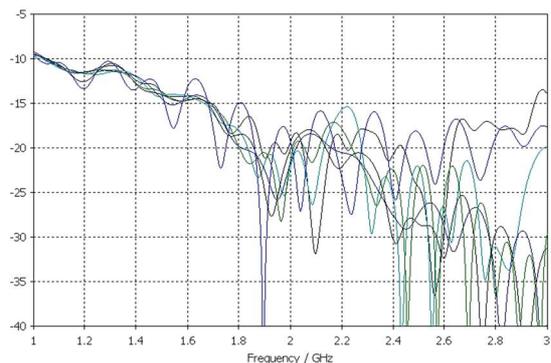


Рис. 5. Развязка (дБ) между входами линзы Раппапорта в полосе частот от 1 ГГц до 3 ГГц

При отклонении главного лепестка диаграммы направленности в азимутальной плоскости на угол $\pm 45^\circ$ от направления нормали к апертуре ФАР значения коэффициентов отражения на входах антенных элементов не превышают -10 дБ в исследуемой полосе частот от 1 ГГц до 3 ГГц (рис. 6). При этом суммарные потери мощности в антенной системе не превышают 0,65 дБ (рис. 7).

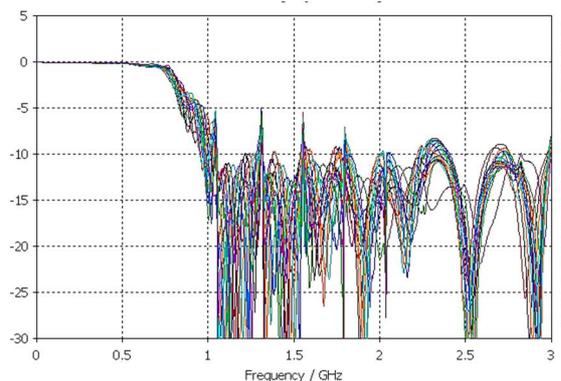


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициентов отражения антенной решетки в полосе частот от 1 ГГц до 3 ГГц при отклонении главного лепестка на угол 45 градусов от нормали

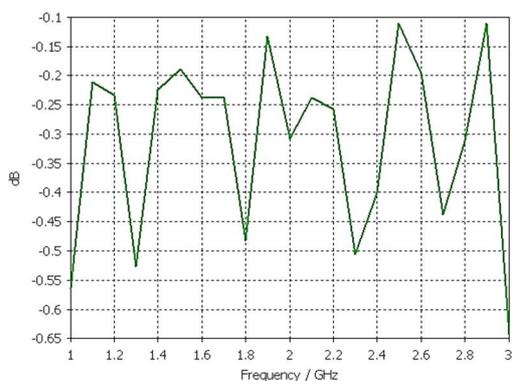
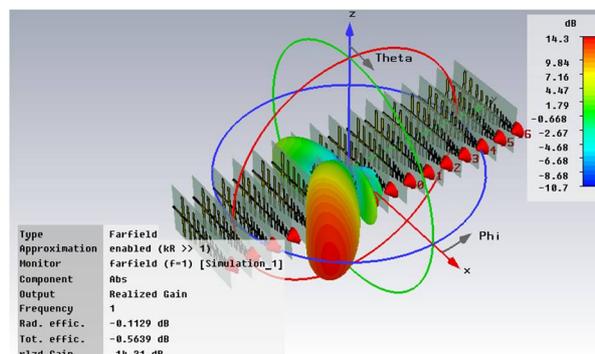
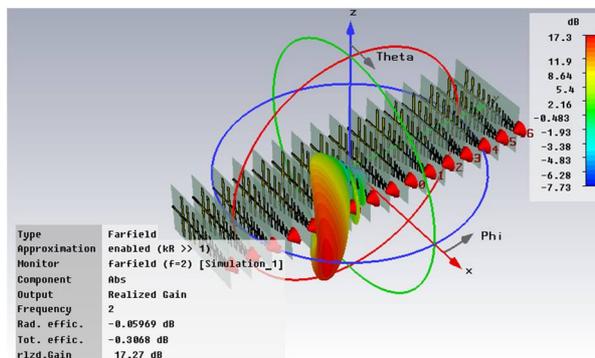


Рис. 7. Частотная зависимость КПД (в дБ) антенной решетки при отклонении главного лепестка на угол 45 градусов от нормали в полосе частот от 1 ГГц до 3 ГГц

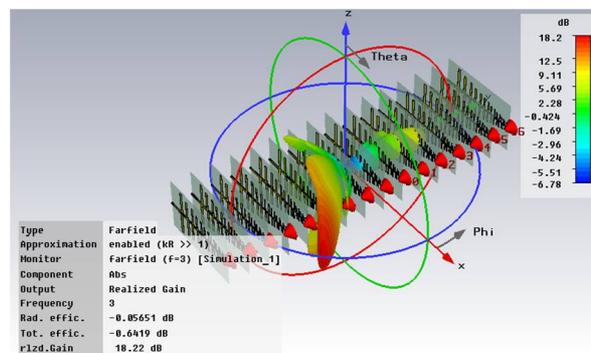
Диаграммы направленности (ДН) в азимутальной плоскости ФАР из 16 печатных ЛПДА, запитанной с помощью линзы Раппапорта, приведены на рис. 8, 9.



а) частота 1 ГГц



б) частота 2 ГГц



в) частота 3 ГГц

Рис. 8. ДН ФАР при отклонении главного лепестка на угол 45 градусов от нормали

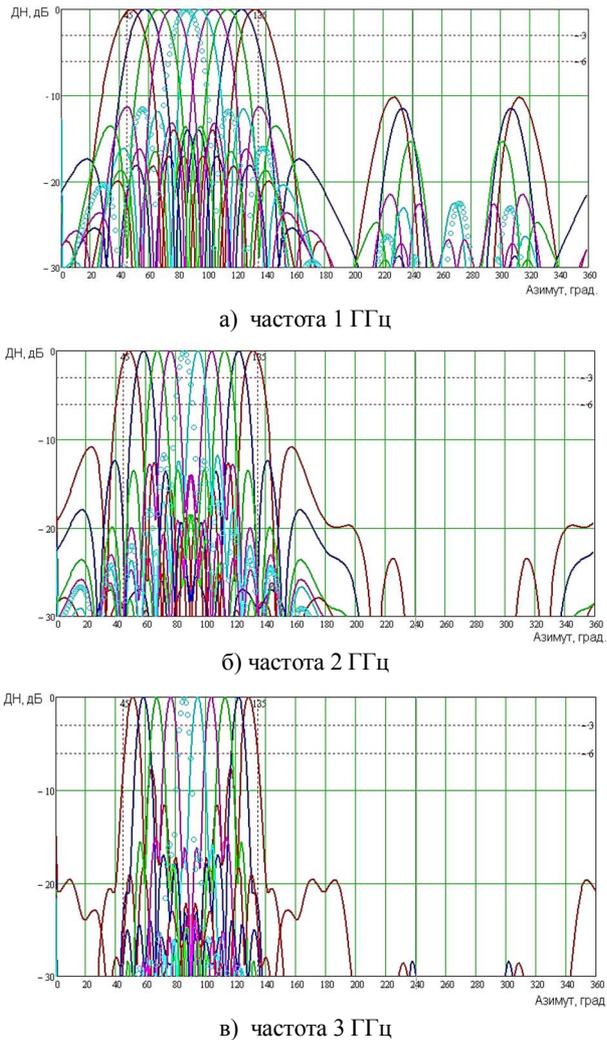
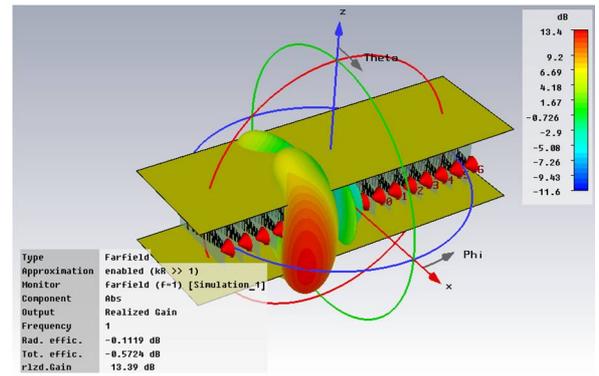


Рис. 9. Нормированные на максимальное значение ДН ФАР в азимутальной плоскости

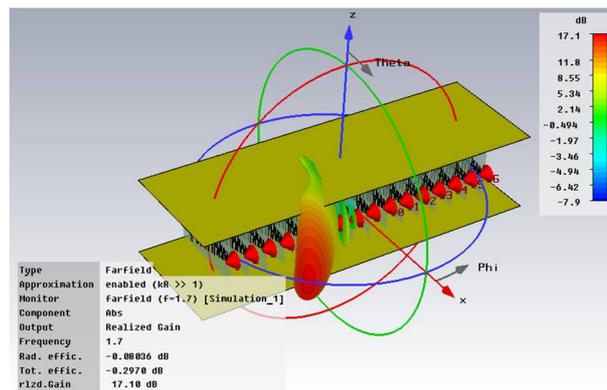
При моделировании использовалось всего 10 диаграммообразующих портов линзы Раппапорта. По два порта слева и справа нагружены на балластные резисторы номиналом 50 Ом. Таким образом, фактический диапазон сканирования рассматриваемой ФАР шире, чем 90 градусов, на ширину двух лучей, которые в данном случае не используются.

При отклонении главного лепестка на угол 45° от нормали к апертуре ФАР величина коэффициента усиления антенной решетки равна 14,3 дБ на частоте 1 ГГц и увеличивается до 18,2 дБ на частоте 3 ГГц.

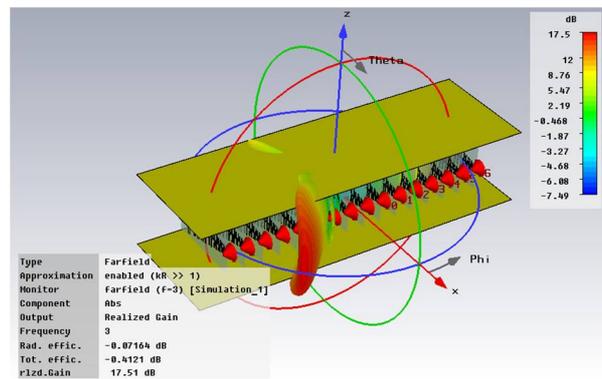
С целью обеспечения технологичности ЛПДА были размещены между двумя металлическими экранами. В результате моделирования этой конструкции было выяснено, что параметры ФАР не ухудшаются. ДН изменой ФАР показаны на рис. 10.



а) частота 1 ГГц



б) частота 1,7 ГГц



в) частота 3 ГГц

Рис. 10. ДН 16-ти элементной ФАР, размещенной между двумя металлическими экранами, при отклонении главного лепестка на угол 45 градусов от нормали

Антенную систему можно также использовать в режиме многолучевого диаграммообразования (формировать сразу 10-12 лепестков в секторе 90-110 градусов). В этом случае требуется многоканальный приемник.

Заключение

В настоящей работе показана возможность реализации широкополосной линейной антенной решетки для радиопеленгаторной ФАР с широкоугольным сканированием из печатных ЛПДА с запиткой печатной линзой Раппапорта.

Предложенная ФАР функционирует в широком диапазоне частот от 1 ГГц до 3 ГГц со значением КСВН не более 2,8 при угле сканирования в азимутальной плоскости не менее 90° ($\pm 45^\circ$ от направления нормали к апертуре ФАР).

Возможно функционирование в режиме одновременного формирования 10-12 лепестков в секторе 90-110 градусов.

Рассмотренный вариант реализации ФАР может использоваться в качестве подрешетки для построения антенной системы с двухкоординатным коммутационным сканированием в полосе частот с коэффициентом перекрытия равным трём.

Литература

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: учебник для радиотехн. спец. Вузов. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.
2. Ultrawideband log-periodic dipole antenna arrays for the frequency range 0,7-12 GHz/ F.F. Dubrovka, M.M. Lytvyn, S.M. Lytvyn, S.Y. Martynyuk, Yu.V. Ryabkin, O.O. Vtorov // 5th International Conference on Antenna Theory and Techniques. 2005. Pp. 110-115.
3. A Compact Dielectric-Loaded Log-Periodic Dipole Array (LPDA) Antenna/ L. Chang, H. Shuai, J. Zhang, D. Li // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2017. Vol. 16. Pp. 2759-2762.
4. Miniaturization of log-periodic dipole array antenna using triangular meander structure/ J.M. Lee, H.J. Ham, H.K. Ryu, J.M. Woo, B.J. Park, K.S. Lee // 2012 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS). 2012.
5. Weiland T. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields // Electronics and Communication. 1977. Vol. 31. Pp. 116-120.
6. URL: <https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/tmm-thermoset-laminate-data-sheet-tmm3-tmm4-tmm6-tmm10-tmm10i-tmm13i.pdf>. 22.01.2020.
7. Rappaport C., Zaghoul A. Optimized three-dimensional lenses for wide-angle scanning // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1985. Vol. 33. No. 11. Pp. 1227-1236.
8. Rappaport C., Zaghoul A. Multifocal Bootlace Lens Design Concepts: a Review // 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2005. Pp. 39-42.
9. URL: <https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/ad1000-data-sheet.pdf>. 22.01.2020.

Поступила 26.03.2020; принята к публикации 15.06.2020

Информация об авторах

Ашихмин Александр Владимирович - д-р техн. наук, профессор, директор ОСП в г. Воронеже, АО «ИРКОС» (129626, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Иванов Александр Владимирович - канд. техн. наук, старший преподаватель, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), ведущий инженер, АО «ИРКОС» (129626, г. Москва, Звездный бульвар, д.21), старший научный сотрудник научно-исследовательского центра, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Першин Павел Викторович - ведущий инженер, АО «ИРКОС» (129626, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Сафонов Федор Сергеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: safonov_fedia93@mail.ru

Федоров Сергей Михайлович - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Зеленин Иван Алексеевич - старший преподаватель кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pasternakyg@mail.ru

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A LINEAR ANTENNA ARRAY FROM PRINTED LOGO-PERIODIC ANTENNAS, POWERED WITH THE ROTMAN LENS

A.V. Ashikhmin¹, A.V. Ivanov², Yu.G. Pasternak^{1,2,3}, P.V. Pershin¹, F.S. Safonov³, S.M. Fedorov³, I.A. Zelenin³

¹ JSC “IRCOS”, Moscow, Russia

² Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy”, Voronezh, Russia

³ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the important area for the improvement of direction finding phased antenna arrays (PAA) are simultaneous expansion of the band of operating frequencies and operating range of scan angles while maintaining its energy capacity, reliability, dimensions, weight and cost. Among the common options of implementation of antenna elements for PAA, we can note a single dipole antenna, helical antenna, Vivaldi antenna and a patch antenna. Log-periodic dipole antennas (LPDA) are found much less frequently as elements of the PAA. However, LPDA have a definite advantage over other types of antennas: with the correct selection of the parameters of the antenna structure, the operating frequency range of 10:1 or more can easily be achieved while maintaining an almost unchanged directivity characteristic for SWVC (standing wave voltage coefficient) at the input not exceeding 1.5-1.7. We propose LPDA with a range of operating frequencies from 1 GHz to 12 GHz with SWVC less than 2. We show the possibility of realization of a linear antenna array with exciting flat Rappaport lens in ultra-wide bandwidth and scan angle of 90 degrees in the azimuth plane. This variant of realization of the PAA can be used as a sublattice for the construction of the antenna system with the switching two-coordinate scanning in the frequency band with the overlap factor equals to three

Key words: Rappaport lens, log periodic antenna, antenna array

References

1. Sazonov D.M. "Antennas and microwave devices: Textbook for radio engineering specialities of Universities" ("Antenny i ustroystva SVCH: uchebnik dlya radiotekhn. spets. Vuzov"), Moscow, Vysshaya shkola, 1988, 432 p.
2. Dubrovka F.F., Lytvyn M.M., Lytvyn S.M., Martynuk S.Y., Ryabkin Yu.V., Vtorov O.O. "Ultrawideband log-periodic dipole antenna arrays for the frequency range 0,7-12 GHz", *2005 5th International Conference on Antenna Theory and Techniques*, 2005, pp. 110-115.
3. Chang L., Shuai H., Zhang J., Li D. "A compact dielectric-loaded log-periodic dipole array (LPDA) antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol. 16, pp. 2759-2762.
4. Lee J.M., Ham H.J., Ryu H.K., Woo J.M., Park B.J., Lee K.S. "Miniaturization of log-periodic dipole array antenna using triangular meander structure", *2012 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS)*, 2012.
5. Weiland T. "A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields", *Electronics and Communication*, 1977, vol. 31, pp. 116-120.
6. <https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/tmm-thermoset-laminate-data-sheet-tmm3-tmm4-tmm6-tmm10-tmm10i-tmm13i.pdf>. 22.01.2020, access date: 22.01.2020.
7. Rappaport C., Zaghloul A. "Optimized three-dimensional lenses for wide-angle scanning", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1985, vol. 33, no. 11, pp. 1227-1236.
8. Rappaport C., Zaghloul A. "Multifocal bootlace lens design concepts: a review", *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2005, pp. 39-42.
9. <https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/ad1000-data-sheet.pdf>, access date: 22.01.2020.

Submitted 26.03.2020; revised 15.06.2020

Information about the authors

Aleksandr V. Ashikhmin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Director of the OSP in Voronezh, JSC "IRCOS" (21 Zvezdnyy blvd., Moscow 129626, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Aleksandr V. Ivanov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Sarykh Bol'shevnikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), Leading Engineer of JSC "IRCOS" (21 Zvezdnyy blvd., Moscow 129626, Russia), Senior Researcher, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Sarykh Bol'shevnikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Pavel V. Pershin, Leading Engineer of JSC "IRCOS" (21 Zvezdnyy blvd., Moscow 129626, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Fedor S. Safonov, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: safonov_fedia93@mail.ru

Sergey M. Fedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Ivan A. Zelenin, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ДИАГНОСТИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ ЗАГРУЖЕННЫЙ РЕТРАНСЛЯТОР С НЕЛИНЕЙНОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Р.И. Буров, Б.В. Илларионов, Д.С. Малиев

**Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия**

Аннотация: при проектировании линий спутниковой связи и расчете их зон покрытия учитываются любые, даже самые неблагоприятные, сочетания условий распространения сигналов, что при эксплуатации ретранслятора приводит к существенному преуменьшению рассчитанного уровня сигнала по сравнению с фактически обеспечиваемым. В целях обеспечения электромагнитной совместимости в этих условиях контроль соответствия заявленных характеристик реальному уровню плотности потока мощности, создаваемому спутником-ретранслятором у земной поверхности, является наиболее приоритетной задачей радиоконтроля. Целью работы в интересах проведения радиоконтроля линий спутниковой связи методом активной диагностики является компьютерное моделирование передачи диагностирующих (тестовых) фазо-кодо-манипулированных сигналов через функционирующий в односигнальном режиме без обработки сигналов на борту спутник-ретранслятор с нелинейной передаточной характеристикой. Элементами новизны представленной модели является то, что моделирование диагностирующего сигнала было проведено применительно к использованию фазо-кодо-манипулированных сигналов на основе псевдослучайной последовательности максимальной длины (М-последовательности) с возможностью выбора степени и вида образующего полинома. Показано, что после совместной ретрансляции тестового фазо-кодо-манипулированного сигнала и сигнала линии спутниковой связи при определенных соотношениях их частот будет иметь место интерференция интермодуляционных составляющих и ретранслированного ФКМ-сигнала, приводящая практически к полному подавлению диагностирующего сигнала независимо от величины его базы. Разработанная модель позволяет обосновать рациональные требования к энергетическим параметрам диагностирующих сигналов с учетом нелинейной передаточной характеристики ретранслятора и избежать при этом снижения пропускной способности контролируемой линии спутниковой связи при проведении радиоконтроля методом активной диагностики

Ключевые слова: спутник-ретранслятор, радиоконтроль, спутниковая связь, диагностирующие сигналы, тракт ретрансляции

Актуальность

По мере роста числа и категорий пользователей спутниковой связи (СпС) возрастает ¹загруженность орбит и частотных диапазонов, выделенных для ее организации, в которых также функционирует и множество других радиоэлектронных средств: радиорелейных станций, сотовых сетей, сетей беспроводного доступа и т.д. Вместе с этим, наличие недокументированных возможностей по изменению конфигураций линий СпС значительно усложняет процедуру радиоконтроля и получения достоверной информации об их реальных параметрах в интересах различных потребителей.

Проведение радиоконтроля линий СпС предполагает решение ряда задач с целью получения сведений о соответствии реального состояния использования заданного частотного ресурса выданным разрешениям на эксплуатацию радиоэлектронных средств (РЭС), а также поиск, выявление и определение принадлежно-

сти наблюдаемых линий СпС заданному для контроля ретранслятору. При этом использование лишь метода наблюдения излучаемых ИСЗ-ретранслятором сигналов не обеспечивает в общем случае достижения поставленной цели. Это обусловлено, во-первых – отличием частотных, структурных, поляризационных и энергетических параметров линий СпС на входе и выходе ИСЗ-ретранслятора [1,2], во-вторых – отсутствием или сознательным искажением априорных данных о характеристиках контролируемой линии СпС, в-третьих – возможным изменением конфигурации линии СпС [3-5], а при конфликтном взаимодействии – использованием мер помехозащиты. Выходом в данной ситуации может стать использование методов активной диагностики состояния трактов ретрансляции. Сущность данных методов заключается в излучении в направлении спутника специально сформированных испытательных (диагностирующих) сигналов, последующем их приеме после ретрансляции спутником, обработке и определении (на основе контроля

изменения параметров сигналов) необходимых характеристик трактов ретрансляции.

Анализируя различные методы формирования диагностирующих сигналов, можно сделать вывод о том, что наилучшими корреляционными свойствами, возможностью независимого воспроизведения сигналов на приемной стороне, высокой помехоустойчивостью и энергетической скрытностью обладают фазокодо-манипулированные (ФКМ) сигналы на основе псевдослучайной последовательности (ПСП) максимальной длины – М-последовательности [6]. М-последовательность – это псевдослучайная линейная рекуррентная последовательность, обладающая рядом уникальных свойств. В частности, периодическая автокорреляционная функция (АКФ) $R(\tau)$ таких последовательностей имеет явный пик при $\tau=0$ ($R(0)=N$, где $N=2^l-1$ – период М-последовательности), а уровень боковых пиков ($\tau \neq 0$) составляет величину $R(\tau \neq 0) = -1/N$. Это позволяет с большой точностью измерять параметры сигналов (в частности, в радиолокации и радионавигации при определении дальности до цели и местоположения объекта по времени задержки сигнала) и проводить кодовое разделение каналов и доступа в многоканальных и многостанционных системах. Применительно к использованию именно таких диагностирующих сигналов и приводятся в дальнейшем результаты расчетов, проведенных в среде моделирования MathCAD [7,8].

Цель работы - с использованием среды моделирования MathCAD разработать компьютерную модель передачи диагностирующих сигналов по загруженному спутнику-ретранслятору с нелинейной передаточной характеристикой в режиме без обработки сигналов на борту.

Разработанная модель является комплексной и состоит из ряда взаимосвязанных моделей, использование которых позволяет решить ряд частных задач проводимого исследования. Структурная схема модели передачи диагностирующих сигналов по загруженному спутнику-ретранслятору и логическая взаимосвязь ее составных частей (сплошные линии) с решаемыми задачами (штриховые линии) представлена на рис. 1.

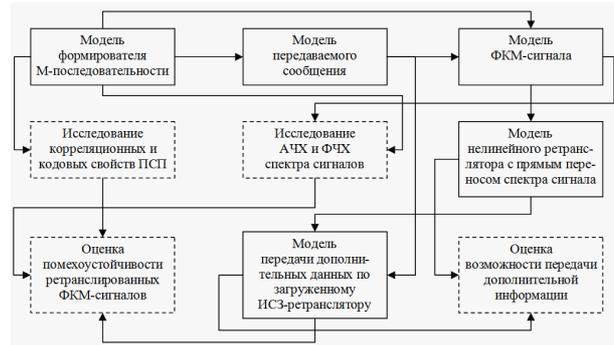


Рис. 1. Структурная схема модели передачи диагностирующих сигналов

Исходя из представленной схемы, методика разработки рассматриваемой модели будет включать в себя модели формирователя М-последовательности, передаваемого сообщения, ФКМ-сигнала и нелинейного ретранслятора с прямым переносом спектра сигнала. При этом на каждом этапе моделирования была проведена оценка адекватности модели реальным физическим явлениям, протекающим в тракте ретранслятора [9].

Модель формирователя М-последовательности

Для формирования М-последовательности необходимо задать неприводимый характеристический образующий полином, который может быть представлен в математическом или двоичном виде. Например, образующий полином, задающий М-последовательность с периодом $N = 2^6 - 1 = 63$ бита, в математическом представлении имеет вид

$$g(x) = x^6 + x^5 + 1, \quad (1)$$

а в двоичном – 1100001, где значения каждого бита (т.е. «1» или «0») являются коэффициентами полинома, записанного в общем виде:

$$g(x) = x^l + g_1x^{l-1} + g_2x^{l-2} + \dots + g_nx^0 \quad (2)$$

Для задания неприводимых характеристических полиномов согласно выражению (2) в модели были использованы операторы считывания данных `READPRN("file")` из подготовленных структурированных файлов, содержащих коэффициенты записанных в двоичном виде образующих полиномов (рис. 2).

```

Plnm3 := READPRN("Polinom3.txt")   Plnm6 := READPRN("Polinom6.txt")   Plnm9 := READPRN("Polinom9.txt")
Plnm4 := READPRN("Polinom4.txt")   Plnm7 := READPRN("Polinom7.txt")   Plnm10 := READPRN("Polinom10.txt")
Plnm5 := READPRN("Polinom5.txt")   Plnm8 := READPRN("Polinom8.txt")   Plnm11 := READPRN("Polinom11.txt")
    
```

Рис. 2. Блок операторов считывания коэффициентов образующих полиномов

В модели реализован расчет М-последовательностей по образующим полиномам до 12-й степени и предусмотрена возможность добавления полиномов старших степеней. Для этого необходимо сформировать структурированные файлы для соответствующей степени полинома и добавить аналогичный оператор в блок считывания коэффициентов.

После выполнения операторов данного блока в общий трехмерный массив $Plnm$ будут занесены коэффициенты образующих полиномов для всех степеней. При этом каждый элемент массива $Plnm_l$ будет представлять собой матрицу, количество столбцов в которой равно $l+1$, а число строк определяется количеством неприводимых характеристических образующих полиномов для l -й степени (рис. 3).

$$Plnm^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & [2,4] & [2,5] & [6,6] & [6,7] & [18,8] & [16,9] & [47,10] & [59,11] & [173,12] \end{bmatrix}$$

Рис. 3. Листинг трехмерного массива коэффициентов полиномов

Например, для $l=6$ матрица $Plnm_6$ будет содержать 6 строк и 7 столбцов (рис. 4), а для $l=11$ матрица $Plnm_{11}$ будет содержать 173 строки и 12 столбцов (неприводимых характеристических образующих полиномов 0,1 и 2-й степени не существует).

$$Plnm_6 = \begin{bmatrix} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 5 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Рис. 4. Результат считывания коэффициентов образующих полиномов

Формирователь, т.е. устройство, генерирующее М-последовательность, обычно строится на основе регистра сдвига (РС) и сумматоров по $mod2$. Считанные блоком (рис. 2) коэффициенты образующих полиномов используются для определения номеров ячеек регистра сдвига, участвующих в обратной связи по $mod2$. Для выделения матрицы-столбца $StrPlnm(l, nPlnm)$, содержащей только коэффициенты заданного полинома ($nPlnm$ – его номер в матрице $Plnm_l$), в модели использована встроенная функция $submatrix(A, ir, jr, ic, jc)$ [8], возвра-

щающая часть матрицы A , находящуюся между строками ir, jr и столбцами ic, jc включительно. На рис. 5 представлен листинг указанной процедуры с примером результата ее работы для 3-й строки матрицы $Plnm_6$.

$$StrPlnm(1, nPlnm) := submatrix(Plnm_l, nPlnm, nPlnm, 1, 1)^T$$

$$StrPlnm(6, 2) = \begin{bmatrix} & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 2 & 0 \\ 3 & 0 \\ 4 & 0 \\ 5 & 1 \end{bmatrix} +$$

Рис. 5. Листинг процедуры формирования матрицы-столбца

Отметим, что по умолчанию нумерация элементов массивов в среде моделирования MathCAD начинается с нуля, и в рассматриваемой модели установленный порядок нумерации не изменялся. Структурная схема формирователя М-последовательности (без тактового генератора), заданной выражением (1) для $l=6$ и $nPlnm=2$, представлена на рис. 6.

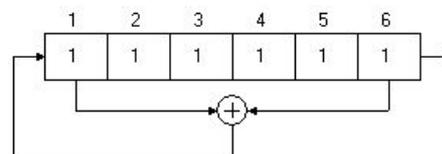


Рис. 6. Структурная схема формирователя М-последовательности

На каждом такте функционирования формирователя М-последовательности на вход регистра сдвига поступает результат сложения по $mod2$ состояния тех ячеек, которые участвуют в обратной связи (для указанного примера это ячейки №1 и №6). Моделирование данной операции может быть осуществлено на основе операции умножения матрицы-строки, характеризующей состояние ячеек РС на данном такте, и матрицы-столбца, элементы которого являются коэффициентами образующего полинома, представленного в двоичном виде. Проведя в дальнейшем целочисленное деление результата перемножения матриц на 2, в остатке получим искомое значение, которое на следующем такте будет записано в 1-ю ячейку РС. Листинг подпрограммы, реализующей изложенный способ и рассчитывающий таблицу М-последовательности, представлен на рис. 7.

```

TabMposl(1,nPlnm,nKomb) :=
  for j ∈ 0..1
  | z0,j ← IchKomb(1,nPlnm,nKomb)0,j
  | for i ∈ 1..2l-1
  | | for j ∈ 1..1
  | | | zi,j ← zi-1,j-1
  | | | zi,0 ← mod[(submatrix(z,i,i,1,1) · SttPlnm(1,nPlnm))0,2]
  | z
  
```

Рис. 7. Листинг подпрограммы расчета М-последовательности

В данном блоке приняты следующие обозначения: l – старшая степень образующего полинома (количество ячеек РС), $nPlnm$ – номер полинома в таблице образующих полиномов для l -й степени, $nKomb$ – исходное состояние ячеек РС может быть любым, за исключением нулевого.

В первой строке блока происходит запись исходного состояния в ячейки РС, а затем объявляется цикл по i -строкам (тактам) и j -столбцам (ячейкам), внутри которого на каждом такте производится перенос состояния ячеек на предыдущем такте в текущий со сдвигом на 1 и, согласно рассмотренному способу,

```

AKF(1,nPlnm,nKomb,nJch,flPeriod) :=
  k ← TabMposl(1,nPlnm,nKomb)
  for i ∈ 0..N
  | z1 ← 0
  | for j ∈ 0..N-1
  | | z1 ← z1 + 1 if mod(kj,nJch + kmod(i+j,N+flPeriod),nJch}^2) = 0
  | | z1 ← z1 - 1 otherwise
  | z
  
```

Рис. 9. Листинг подпрограммы расчета значений АКФ

В первой строке кода заполняется матрица k элементами рассчитанной ПСП. Это необходимо для того, чтобы каждый раз при обращении к таблице не происходил ее перерасчет заново. Во второй строке объявляется цикл по i (т.е. по времени задержки τ), затем обнуляется значение АКФ для данного сдвига и объявляется вложенный цикл по j , в котором с помощью метода последовательного перебора происходит подсчет значений $R(\tau)$. Если импульсы последовательности и ее копии, циклически сдвинутой во времени на i тактов, совпадают, то значение АКФ увеличивается на единицу, в противном случае – уменьшается. Параметр $flPeriod$ задает «флаг» периодичности, если он равен нулю, то мы получаем периодическую АКФ, если нет – то аperiodическую.

На рис. 10 представлены графики периодической и непериодической АКФ, а также

определяется значение, поступающее на вход РС. Временное представление М-последовательностей, полученных с выхода последних трех ячеек регистра сдвига, приведено на рис. 8.

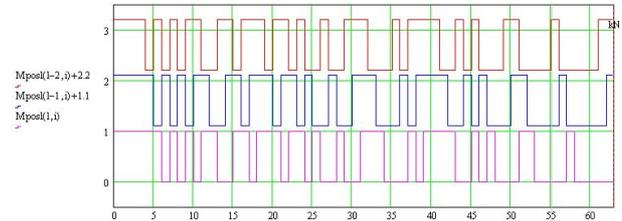


Рис. 8. Графики М-последовательности с выхода 4,5 и 6 ячеек

Расчет значений периодической и аperiodической автокорреляционной функции осуществляется в разработанной модели с помощью подпрограммы AKF , реализующей подсчет совпадений и несовпадений импульсов М-последовательности и ее копии, циклически смещенной на 0-N тактов (рис. 9).

пунктиром показаны маркеры: период последовательности N и уровень \sqrt{N} для оценки боковых пиков. В рассматриваемой модели предусмотрена возможность анимации этого графика, для чего введена зависимость исходного состояния ячеек РС $kKomb$ от переменной $FRAME$ по циклическому изменению $kKomb$ в пределах от N до 1. Получаемые таким образом анимационные ролики позволяют визуализировать изменения автокорреляционной функции для различных исходных кодовых комбинаций.

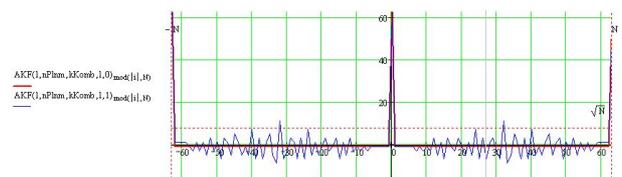


Рис. 10. Периодическая и аperiodическая АКФ М-последовательности

Использование функции $\text{mod}(y,x)$ [9] при обращении к элементам массива гарантирует защиту от неправильной адресации и, как следствие, от получения сообщений об ошибках. В интересах повышения наглядности представления полученных результатов имеется возможность построения трехмерных графиков зависимости значений апериодической АКФ от исходной комбинации и тактового сдвига, как показано на рис. 11.

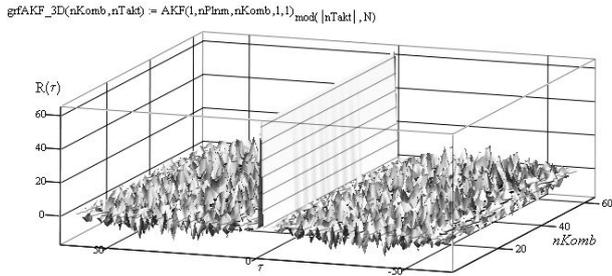


Рис. 11. Трехмерный график апериодической АКФ

Представленные зависимости наглядно иллюстрируют возможность существенного (потенциально в $N-1$ раз) расширения адресного пространства ФКМ-сигналов, что в настоящее время успешно применяется для увеличения количества одновременно работающих пар абонентов в общей полосе частот. При этом для их адресации (разделения) используются отличия в форме сигнала, обусловленные не только разными образующими полиномами, но и разными исходными комбинациями, сдвинутыми относительно друг друга на 2 такта.

Модели передаваемого сообщения и ФКМ-сигнала

Для формирования передаваемого сообщения (данных), используя встроенную функцию $\text{norm}(m,\mu,\sigma)$, возвращающую вектор m случайных чисел, имеющих нормальное распределение с математическим ожиданием μ и дисперсией σ , был сформирован массив чисел X , имитирующих передачу текстового (коды букв) или речевого (дискретные отсчеты) сообщения. Далее определена временная функция – сигнал $x(t)$, соответствующий передаваемому сообщению (рис. 12).

```
MaxValue := 2^kRazrd - 1
X := round(norm(kSimb, 0.5 * MaxValue, 0.1 * MaxValue), 0)
x(t) := if(IntToByrn(kRazrd, X mod (trunc(t * kSimb), kSimb)) mod (trunc(t * V_T), kRazrd), 1, -1)*
```

Рис. 12. Листинг модели сообщения

В этом блоке $kRazrd = 8$ – разрядность кода, $kSimb = 1000$ – количество передаваемых символов сообщения, $V_T = kRazrd \cdot kSimb$ – скорость передачи данных, $MaxValue = 255$ – максимальное число, которое можно закодировать $kRazrd$ -разрядным кодом.

Аналогичным образом сформированы аналитические модели М-последовательности $S_m(t)$, модулированной передаваемым сообщением, и ФКМ-сигнала $S_m(t)$ (рис. 13).

$$S_m(t) := x(t) \cdot \text{if} \left[\left(\text{TabMposk}(1, nP1nm, nKomb)^{\text{trunc}(t, N)} \right) \text{mod} \left(\text{trunc} \left(\frac{t}{t_u}, N \right), 1, -1 \right) \right] * \\ S_{fkm}(t) := \cos \left(\omega_0 \cdot t + \frac{\pi}{2} \cdot S_m(t) \right) *$$

Рис. 13. Листинг модели М-последовательности и ФКМ-сигнала

Построение спектра ФКМ-сигнала проведено с помощью встроенной процедуры $\text{fft}(A)$ быстрого преобразования Фурье согласно теореме Котельникова (рис. 14).

Переменные, необходимые для создания анимации

```
nX := trunc(FRAME / kRazrd * N)
kTx := (nX + 1) * Tx
kTm := Tm * (trunc(FRAME / N) + 1)
Интервал дискретизации
dt := 2 / (k1 * Fmax)
Интервал наблюдений
Tnab := Tx
Массив дискретных отсчетов времени и частоты
k_nab := Tnab / dt
i := 0 .. k_nab
t_i := i * dt
f_i := i / Tnab
Дискретизация по времени
x_i := x(t_i * FRAME + t_i) *
S_fm_i := S_fm(t_i * FRAME + t_i) *
S_fkm_i := S_fkm(t_i * FRAME + t_i) *
БП Фурье
CF_fm_i := fft(S_fm_i)
АЧХ спектра и ее нормировка
AF_fm_i := |CF_fm_i|
K_fm := max(AF_fm)
AF_fm_i := AF_fm_i / K_fm
```

Рис. 14. Блок операторов построения спектра ФКМ-сигнала

На рис. 15 представлен амплитудно-частотный спектр ФКМ-сигнала, построенный по изложенной методике для указанных значений параметров при передаче первого символа $X_1 = 116$ сформированного ранее сообщения.

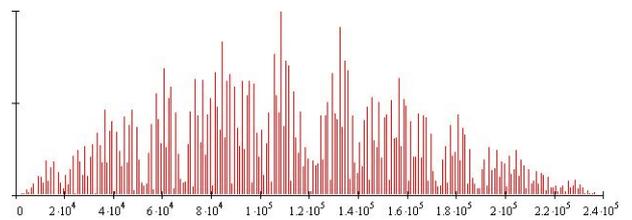


Рис. 15. Амплитудно-частотный спектр ФКМ-сигнала

В настоящее время большинство ИСЗ-ретрансляторов без обработки сигналов на борту в интересах максимального отбора мощности работают в нелинейном режиме [3,4]. При

этом передаточная характеристика ретранслятора с нелинейной амплитудной характеристикой в наиболее общем (универсальном) виде может быть представлена соотношением [10]:

$$r(x) = \begin{cases} ax^\mu, & x \geq 0 \\ -a(-x)^\mu, & x < 0, \end{cases} \quad (3)$$

что обеспечивает описание степени «жесткости» передаточной характеристики от случая идеального порогового ограничителя (при $\mu = 0$) до линейной характеристики (при $\mu = 1$). Максимальное энергетическое подавление ФКМ-сигнала сильным информационным сигналом линии СпС при $q = U_{\text{лс}} / U_{\text{лм}} = 10$ может составлять величину до 6 дБ [6] для идеального ограничителя и односигнального режима работы ретранслятора (например, при многостанционном доступе с временным разделением).

Однако прохождение смеси ФКМ-сигнала и сигнала линии СпС через нелинейный ретранслятор, помимо перераспределения его мощности, будет сопровождаться интерференционными эффектами [10], отказ от учета которых будет приводить к завышенным оценкам помехоустойчивости диагностирующих сигналов. На рис. 16 для типовых значений $a = 1$, $\mu = 0.3$ в выражении (3) при передаче $\Omega = 12 / T_x$ одного символа сообщения представлены фазо-частотные спектры передаваемого ФКМ-сигнала (х-метки) и ретранслированной смеси $y(t)$ (без меток). Для наглядности спектральные составляющие передаваемого ФКМ-сигнала несколько смещены по оси частот.

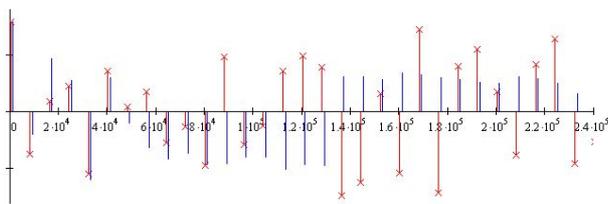


Рис. 16. Фазо-частотный спектр ретранслированной смеси

Анализируя приведенные графики, можно заметить, что при таком соотношении частот более половины спектральных составляющих $y(t)$ находятся в противофазе опорному ФКМ-сигналу, что при их оптимальной обработке на приемной стороне приведет к разрушению отклика коррелятора и искажению передаваемой информации.

Используя методы теории оптимального приема сигналов, была реализована модель приема передаваемой информации по алгорит-

му оптимального различения двоичных сигналов. На рис. 17 представлена зависимость уровня отклика коррелятора от разностной частоты Ω на ретранслированную смесь, состоящую из ФКМ-сигнала и интермодуляционных составляющих, повторяющих и неповторяющих его форму (верхняя кривая). Для сравнения на рис. 17 показано значение отклика коррелятора при строго линейной передаточной характеристике ИСЗ-ретранслятора (верхняя пунктирная линия Z_E), значение отклика коррелятора в отсутствии в смеси ФКМ-сигнала (нижняя кривая), а также уровень шумов (пунктирная линия Z_n).

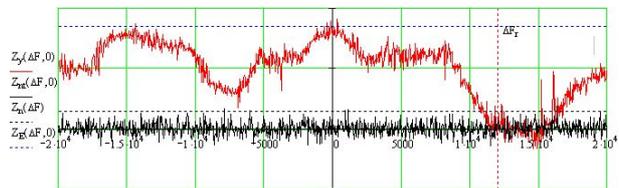


Рис. 17. Зависимость отклика коррелятора от разностной частоты

Анализируя представленные зависимости, можно сделать вывод о том, что после совместной ретрансляции тестового ФКМ-сигнала и сигнала линии СпС при определенных соотношениях их частот будет иметь место интерференция интермодуляционных составляющих и ретранслированного ФКМ-сигнала и, как следствие, разрушение отклика коррелятора на приемной стороне средств радиоконтроля. Это обуславливает необходимость перестройки рабочей частоты тестового сигнала в пределах полосы частот ретранслятора при проведении радиоконтроля линий СпС и оценки возможности передачи диагностирующих сигналов по загруженным трактам ретрансляции.

Выводы

Практическое применение разработанной компьютерной модели передачи диагностирующих сигналов через загруженный ретранслятор с нелинейной передаточной характеристикой имеет несколько направлений. В качестве первого из них можно выделить использование результатов моделирования при проведении лабораторных работ, практических занятий и семинаров по радиотехническим дисциплинам в качестве дополнительного материала, наглядно иллюстрирующего принципы формирования М-последовательности и ФКМ-сигнала. При

этом для иллюстрации изменения осциллограмм и спектров данных сигналов в процессе передачи сообщения в представленной модели предусмотрена возможность анимации этих графиков и демонстрации сформированных роликов, показывающих динамику этих изменений.

Вторым направлением практического применения разработанной модели является возможность обосновать рациональные требования к энергетическим параметрам диагностирующих сигналов и избежать при этом снижения пропускной способности контролируемой линии СпС при проведении радиоконтроля. Учитывая тот факт, что интермодуляционные составляющие, повторяющие форму сигнала, при корреляционной обработке сворачиваются практически без ослабления, рассматриваемый эффект будет приводить практически к полному подавлению диагностирующего сигнала независимо от величины его базы. Однако проявление данного эффекта будет иметь место лишь в том случае, когда несущая частота интермодуляционной помехи с точностью до полосы пропускания фильтра-интегратора будет совпадать с несущей частотой ФКМ-сигнала. Следовательно, эффект подавления диагностирующего сигнала будет проявляться по-разному в зависимости от соотношения частот диагностирующего и информационного сигналов и в определенной степени будет определяться правильным выбором частотно-временных параметров диагностирующих сигналов.

В качестве третьего из возможных направлений практического применения рассматриваемой модели может служить ее использование как одного из основных элементов при разработке подобных моделей ретранслятора с нели-

нейной передаточной характеристикой, работающего, в том числе, и в многосигнальном режиме. Предположительно, с увеличением числа информационных сигналов в полосе частот ствола ретранслятора (например, при переходе на многостанционный доступ с частотным разделением каналов) уровень интерферирующих интермодуляционных составляющих может падать и, следовательно, будет уменьшаться значение коэффициента интермодуляционной активности. Однако с его уменьшением будет снижаться и отношение сигнал/шум на входе приемных устройств средств радиоконтроля вследствие энергетического подавления слабого диагностирующего сигнала сильным информационным. Поэтому влияние интермодуляционных помех и в этом случае может оказаться существенным.

Литература

1. Кантор Л.Я. Справочник по спутниковой связи и вещанию. М.: Радио и связь, 1983. 287 с.
2. Бородич С.В. ЭМС наземных и космических радиослужб. М.: Радио и связь, 1990. 272 с.
3. Калашников Н.И. Системы связи через ИСЗ. М.: Связь, 1989. 211 с.
4. Фортуненко А.Д. Основы технического проектирования систем связи через ИСЗ. М.: Связь, 1990. 261 с.
5. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. М.: Связь, 1979. 197 с.
6. Тузов Г.И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
7. Очков В.Ф. MathCad 14 для студентов и инженеров. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512с.
8. Гурский Д.А. Вычисления в MathCad. СПб.: Питер, 2006. 544с.
9. Петров Ю.М. Обеспечение достоверности и надежности компьютерных расчетов. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 160с.
10. Грибов Э.Б. Нелинейные явления в приемопередающем тракте аппаратуры связи. М.: Связь, 1971. 246 с.

Поступила 08.04.2020; принята к публикации 16.06.2020

Информация об авторах

Буров Роман Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), тел.: +7 908 130 67 09, e-mail: bri555@mail.ru

Илларионов Борис Владимирович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры радиотехники, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), тел.: +7 910 344 49 69, e-mail: sashfish@bk.ru

Малиев Дмитрий Сергеевич – канд. техн. наук, преподаватель кафедры радиотехники, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), тел.: +7 914 205 89 91, e-mail: lskusau@rambler.ru

MODELING THE TRANSFER OF DIAGNOSTIC SIGNALS THROUGH A LOADED TRANSMITTER WITH A NONLINEAR TRANSMISSION CHARACTERISTIC

R.I. Burov, B.V. Illarionov, D.S. Maliev

Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, Voronezh, Russia

Abstract: when designing satellite communication lines and calculating their coverage areas, any, even the most unfavorable, combinations of signal propagation conditions should be taken into account, which, when using a repeater, significantly reduces the calculated signal level compared to what is actually provided. In order to ensure electromagnetic compatibility under these conditions, monitoring the compliance of the declared characteristics with the real level of power flux density created by a relay satellite at the earth's surface is the most priority task. The aim of the work in the interests of conducting radio monitoring of satellite communication lines by the active diagnostic method is computer simulation of the transmission of diagnostic (test) phase-code-manipulated signals through a single-signal satellite-relay repeater with a non-linear transfer characteristic that operates in a single-signal mode. The novelty of the presented model is that the diagnostic signal was simulated in relation to the use of phase-code-manipulated signals based on a pseudo-random sequence of maximum length (M-sequence) with the possibility of choosing the degree and type of the generating polynomial. It is shown that after the joint relaying of the test phase-code-manipulated signal and the signal of the satellite communication line at certain ratios of their frequencies, interference of the intermodulation components and the relayed PCM signal will occur, leading to almost complete suppression of the diagnostic signal regardless of its base value. The developed model makes it possible to justify rational requirements for the energy parameters of the diagnostic signals, taking into account the non-linear transfer characteristics of the repeater and to avoid reducing the throughput of the monitored satellite communication line during radio monitoring by active diagnostics

Key words: satellite retransmitter, radio control, satellite communication, diagnosing signals, retransmission path

References

1. Kantor L.Ya. “Handbook of satellite communications and broadcasting” (“Spravochnik po sputnikovoy svyazi i veshchaniyu”), Moscow, Radio i svyaz’, 1983, 287 p.
2. Borodich S.V. “EMS of land and space radio services” (“EMS nazemnykh i kosmicheskikh radiosluzhb”), Moscow, Svyaz’, 1990, 272 p.
3. Kalashnikov N.I. “Communication system through an artificial satellite” (“Sistemy svyazi cherez ISZ”), Moscow, Svyaz’, 1989, 211 p.
4. Fortushenko A.D. “Bases of technical designing of communication systems through an artificial satellite” (“Osnovy tekhnicheskogo proyektirovaniya sistem svyazi cherez ISZ”), Moscow, Svyaz’, 1990, 261 p.
5. Spilker D.A. “Digital satellite communication” (“Tsifrovaya sputnikovaya svyaz”), Moscow, Svyaz’, 1979, 197 p.
6. Tuzov G.I. “Noise immunity of radio systems with complex signals” (“Pomekhozashchishchennost' radiosistem so slozhnyimi signalami”), Moscow, Radio i Svyaz’, 1985, 264 p.
7. Ochkov V.F. “MathCad 14 for students and engineers” (“MathCad 14 dlya studentov i inzhenerov”), St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2009, 512 p.
8. Gurskiy D.A. “Calculation in MathCad” (“Vychisleniya v MathCad”), St. Petersburg, Piter, 2006, 544 p.
9. Petrov Yu.M. “Maintenance of reliability of computer calculations” (“Obespechenie dostovernosti i nadezhnosti komp'yuternykh raschetov”), St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2010, 160 p.
10. Gribov E.B. “Nonlinear phenomena in the transceiver path of communication equipment” (“Nelineynye yavleniya v priyemo-peredayushchem trakte apparatury svyazi”), Moscow, Svyaz’, 1971, 246 p.

Submitted 08.04.2020; revised 16.06.2020

Information about the authors

Roman I. Burov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy” (54 "A" Starikh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel. +79081306709, e-mail: bri555@mail.ru

Boris V. Illarionov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy” (54 "A" Starikh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel. +79103444969, e-mail: sashfish@bk.ru

Dmitriy S. Maliev, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy” (54 "A" Starikh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel. +79142058991, e-mail: lskusau@rambler.ru

ДЕКОДИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ БЛОКОВЫХ КОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ПЕРСЕПТРОНОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, А.В. Муратов, М.В. Хорошайлова, Н.В. Ципина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлен класс нейронных сетей, пригодных для применения декодирования кодов, исправляющих ошибки. Нейронная модель в основном представляет собой персептрон с полиномом высокого порядка в качестве дискриминантной функции. Показано, что один слой персептронов высокого порядка способен декодировать двоичный линейный блочный код с максимальным весом 2^m в каждом персептроне, где m - длина четности. Для некоторых подклассов кодов необходимое количество весов может быть намного меньше. Код Хэмминга (2^m-1 , 2^m-1-m) может быть декодирован с использованием только весов $m + 1$ в каждом персептроне. С помощью генетических алгоритмов получены эффективные нейронные декодеры $2t + 1$ разрядности для каждого бита для некоторых циклических кодов и БЧХ кодов (Боуза-Чоудхури-Хоквингема), которые можно исправить. С помощью алгоритма поиска генетического типа показано, что для данной задачи можно найти подходящий набор элементов нейронной сети высокого порядка (в данном случае корректирующий декодер). Нейронные декодеры представлены как набор сетей четности на первом уровне, за которыми следует линейный персептрон на втором уровне, и, таким образом, имеют простые реализации в аналогичной технологии СБИС

Ключевые слова: коды исправления ошибок, генетический алгоритм, персептроны высокого порядка, дискриминантные полиномы

Введение

Коды с исправлением ошибок (от англ. Error-correcting codes, ECC) широко используются в системе связи при передаче данных, хранении и отказоустойчивых вычислениях, предназначены для защиты информации от случайных ошибок [1,2]. Основным классом ECC является класс линейных блочных кодов (ЛБК). В ЛБК к строке информационных символов добавляются некоторые дополнительные символы, называемые четностями для формирования кодового слова, чтобы отделить каждый информационный вектор дальше друг от друга в пространстве кодовых слов. Поэтому, когда на кодовое слово влияет некоторый шум во время передачи или обработки, декодер может исправить ошибку, связав зашумленную строку с ближайшим допустимым кодовым словом.

Способность ЛБК к исправлению ошибок определяется его «минимальным расстоянием», которое является минимальным расстоянием Хэмминга [1] между любыми двумя словами в коде.

ЛБК может быть описан матричными операциями. Кодирование ЛБК завершается умножением информационного вектора на порождающую матрицу. Тем не менее, декодирование ЛБК, как правило, сложнее, чем его

кодирование, потому что используется операция инверсии матрицы.

Нейронные сети (NN) являются мощными вычислительными моделями, которые привлекают большое внимание для использования их во многих приложениях [4]. Однако проблема декодирования создает определенный уровень сложности для большинства NN-классификаторов, поскольку существует большое количество категорий, которые должны быть классифицированы. Ниже показано, что правила декодирования ряда ЛБК имеют тесную связь с классом нейронных сетей высокого порядка.

В новом предложенном подходе к проблеме декодирования используются персептроны высокого порядка, которые имеют много членов в качестве своих дискриминантных функций. Хорошо изученная проблема четности (исключающая или) представляет определенный уровень сложности для обучения, поскольку аналогичные входные данные должны быть классифицированы по различным категориям. Однако можно показать, что функция четности изоморфна произведенному члену биполярных переменных. Здесь используются нейронные сети высокого порядка с добавлением генетического алгоритма для декодирования ECC в надежде на то, что, если они смогут эффективно решить проблему четности, они также смогут решить проблему декодирования без особых затруднений. Это связано с тем, что декодирование ECC можно рассмат-

ривать как задачу определения набора функций для контроля четности.

Основная проблема использования полиномиальных дискриминантов высокого порядка состоит в том, чтобы решить, какой порядок использовать и какие есть условия для выбора.

Нейронные сети высокого порядка

Выходная функция общего персептрона определяется как

$$z = \text{sgn}(g(x)) \quad (1)$$

В приведенном выше уравнении $x = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in \{1, -1\}^n$ - структура ввода, «sgn» – знак функции: $\text{sgn}(a)=1$, если $a > 0$, -1 если $a < 0$ и g , так называемая дискриминантная функция, является полиномом r -го порядка:

$$g(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + \dots + w_N f_N(x) + w_0, \quad (2)$$

где W_i – называется весами, и каждый член функции $f_i(x)$ определяется как:

$$x_{k_1}^{n_1} x_{k_2}^{n_2} \dots x_{k_r}^{n_r}, \quad k_1, k_2, \dots, k_r \in \{1, \dots, n\} \quad \text{и} \\ n_1, n_2, \dots, n_r \in \{0, 1\}.$$

Линейный персептрон имеет дискриминантную функцию порядка $r = 1$. Персептрон с $r > 1$ называется персептроном высокого порядка. В настоящее время большинство методов реализации для NN охватывают только линейные персептроны. Чтобы сделать персептроны высокого порядка осуществимыми, возможная реализация путем их превращения в многослойные персептроны показана ниже.

Произведение элементов $x_1 x_2 \dots x_n$ из n биполярных переменных равно -1, если переменных нечетное число, а в противном случае +1, что изоморфно функции четности n двоичных элементов. Определим сеть так, чтобы ее вывод был биполярным, веса равны +1 или -1, пороговые значения являются целыми числами, а сложность соединения - линейной. В частности, для n биполярных элементов x_i определяется

$$S = n - \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

Пусть P обозначает функцию четности

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1 - \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor} [\text{sgn}(4k-1-S) + \text{sgn}(S-(4k-3))] \quad (4)$$

Значение в вышеуказанной квадратной скобке равно 2, если $S = 2(2k-1)$, и 0 в противном случае. Таким образом, P выводит -1, если есть нечетное число -1, и +1 в противном случае. Эта сеть, чей выходной блок не нуждается в жесткой ограничивающей функции и, следовательно, может быть немедленно направлена на вход следующего слоя.

Для произведения действительных чисел можем написать

$$x_1^{r_1} x_2^{r_2} \dots x_n^{r_n} = \text{sgn}(x_1^{r_1}) \text{sgn}(x_2^{r_2}) \dots \text{sgn}(x_n^{r_n}) |x_1^{r_1}| |x_2^{r_2}| \dots |x_n^{r_n}|$$

Часть знака может быть вычислена паритетной сетью, а часть величины может быть преобразована в

$$|x_1^{r_1}| \dots |x_n^{r_n}| = \exp\left(\sum_{i=1}^n \log(|x_i^{r_i}|)\right) \quad (5)$$

Операции получения логарифмических, экспоненциальных и абсолютных значений имеют простую реализацию в аналоговой технологии СБИС [14]. Таким образом, персептроны высокого порядка, с двоичными или действительными числами, могут быть реализованы с использованием существующих методов.

Проблема использования персептронов высокого порядка заключается в комбинаторном увеличении числа элементов с увеличением порядка сети. Однако генерирование всех комбинаций из n входов становится непрактичным по мере роста входного измерения. Таким образом, большие усилия по использованию NN высокого порядка для более широких применений сосредоточены на определении правильной структуры сети для решения данной проблемы.

Как только члены выбраны, поверхность ошибки обозначается как выпуклая по отношению к весовым переменным. Псевдообратный метод находит оптимальное решение в контексте наименьших квадратов ошибок между желаемым и фактическим выходами, однако это требует интенсивных вычислений. Альтернативный подход основан на использовании алгоритма обучения, такого как процедура исправления ошибок. Ее можно легко применить к персептронам высокого порядка, рассматривая полиномиальную функцию как фиксированное расширение исходного пространства шаблонов, как показано ниже:

$W^+ = W + Y$, если $g(X) \leq 0$ и X отображается на 1

$W^- = W - Y$, если $g(X) \geq 0$ и X отображается на -1,

где $W = [w_1, w_2, \dots, w_N, w_0] \in R^{N+1}$ вектор веса, W^+ - новое значение W , и

$Y = [f_1(X), f_1(X), \dots, f_N(X), 1] \in \{1, -1\}^{N+1}$ - расширенный входной вектор. Это правило обучения эквивалентно правилу дельты $W' = W + c(d-y)Y$ при $c = 1/2$, где d - желаемый выход, y - выход сети, а c - размер шага. Кроме того, его поведение сходимо аналогично правилу дельты: оно постепенно, хотя и не монотонно, уменьшает энергию ошибки между фактическим и желаемым выходами. Тем не менее, процедуры исправления ошибок более выгодны, чем дельта-правило, потому что они не включают в себя настройку размера шага и приводят к целочисленным весам для двоичных входов, что является преимуществом.

Генетический алгоритм и алгоритм имитации отжига

Генетический алгоритм (GA) и имитация отжига (SA) - это два вида полезных стохастических методов, которые можно использовать для эффективного решения задач оптимизации. SA основана на термодинамике и может рассматриваться как алгоритм, который генерирует последовательность цепей Маркова для задач, приближенных к оптимальным решениям. Эта последовательность цепей Маркова контролируется постепенно снижающейся температурой системы. Теоретически, распределение вероятностей конфигураций системы, генерируемых SA, приблизится к распределению Больцмана, когда система достигнет равновесия при определенной фиксированной температуре. Когда температура системы постепенно снижается до нуля, распределение вероятностей генерируемых конфигураций системы будет стремиться приблизиться к набору оптимальных. Исходя из этого, SA может теоретически найти глобальный минимум задачи оптимизации. Тем не менее, наиболее важный параметр SA, называемый температурой системы, очень трудно контролировать. Поэтому эффективный график отжига сложно разработать.

GA - это методы оптимизации общего назначения, которые заимствуют элементы

$$a_j = v_j \oplus \left\{ \prod_{i=1}^m \neg s_i \oplus h_{ij} + \sum_{p=1}^{t-1} \left[\sum_{k_1=1}^n \sum_{k_2=1}^n \dots \sum_{k_p=1}^n \left(\prod_{i=1}^m \neg s_i \oplus h_{ij} + h_{ik_1} + h_{ik_2} + \dots + h_{ik_p} \text{ mod } 2 \right) \right] \right\}$$

для $j = 1, 2, \dots, k$, где \neg , Π , Σ и \oplus - это «НЕ», «И», «ИЛИ», и «Исключающее ИЛИ», операции, соответственно.

Декодирование некоторых циклических кодов. Нейронные декодеры

Обычные правила декодирования для

естественного отбора из теории эволюции. Основываясь на естественном отборе, ГА пытается наследовать элементы с хорошей приспособленностью от цикла к циклу. Типичный ГА часто состоит из фазы воспроизводства и фазы манипуляции. Фаза воспроизводства отвечает за использование особенностей нынешних кандидатов и за их сохранение. Фаза манипуляции отвечает за исследование пространства решений и создание новых возможных кандидатов.

Декодирование линейных блочных кодов

Общая идея декодирования ЛБС может быть описана следующим образом. Систематический (n, k) код, в котором имеется k информационных битов и $m = n - k$ битов четности для каждого кодового слова, может быть представлен матрицей проверки на четность $H = [h_{ij}]_{m \times n}$, $h_{ij} \in \{0, 1\}$. Пусть $A = [a_1, a_2, \dots, a_k]$ - информационное слово. После добавления A с некоторыми четностями и последующей передачи принимающая сторона получает слово $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$, вероятно, с некоторыми ошибками в его битах. Полученное слово V затем умножается (по модулю 2) на матрицу проверки на четность H , чтобы получить вектор синдрома $S = VH^T = [s_1, s_2, \dots, s_m]$, где

$$s_i = \sum_{k=1}^n v_k h_{ik} \text{ mod } 2$$

Синдром S предоставляет информацию для декодирования кодовых слов V : если S является нулевым вектором, ошибок не будет; биты четности v_i , $i = k+1, k+2, \dots, n$, отбрасываются и информационные биты доступны напрямую, то есть $a_i = v_i$ для $i = 1, 2, \dots, k$. Если в бите v_j возникает одна ошибка, то S соответствует j -му столбцу H , а j -й бит v_j должен быть дополнен. Для кодов с исправлением t -ошибок, если S соответствует сумме (по модулю 2) P ($P \leq t$) столбцов H , тогда P битов, соответствующих этим составляющим p столбцам H , имеют ошибку. Это правило декодирования может быть выражено в булевой формуле как

циклических кодов и кодов БЧХ не имеют прямых преобразований, приводящих к структурам декодирования, представляемым персептронами высокого порядка. Чтобы уменьшить количество требуемых элементов, выбираем метод генетической эволюции. Использовались следующие критерии для выбора данного метода. Во-первых, пространство поиска

возможных сетевых структур велико, 2^{2^n} возможных сетевых структур для n двоичных входов. Использование метода перечисления было бы неэффективным. Во-вторых, поверхность производительности недифференцируема в отношении изменения используемых терминов. Таким образом, поиск на основе градиента, который зависит от существования производных, становится невозможным. Еще одна более благоприятная причина использования GA заключается в том, что термины с высокой степенью соответствия с меньшей вероятностью будут уничтожены под генетическими операторами и, следовательно, часто приводят к более быстрой конвергенции, особенно при сравнении с методом SA.

Результаты симуляции

Различие таблицы между LUT, соответствующими $D_{nn,Q}$ и $D_{proto,Q}$ в l -й итерации, определяется как:

$$\Phi_{diff}^{(l)} = \Phi_{opt,Q}^{(l)} - \Phi_Q$$

где $\Phi_Q = Q(\Phi(\cdot))$. $\Phi_{diff}^{(l)}$ кода Таннера степени 3 в разных итерациях имеют размер $7 \times 7 \times 7$ и показаны на рис. 1, где x, y оси представляют два входящих сообщения от соседних проверочных узлов, а ось Z указывает значение канала. На первых двух итерациях $D_{nn,Q}$ сильно отличается от $D_{proto,Q}$ из-за $\{\hat{w}^{(l)}\}$ и $\{\hat{b}^{(l)}\}$.

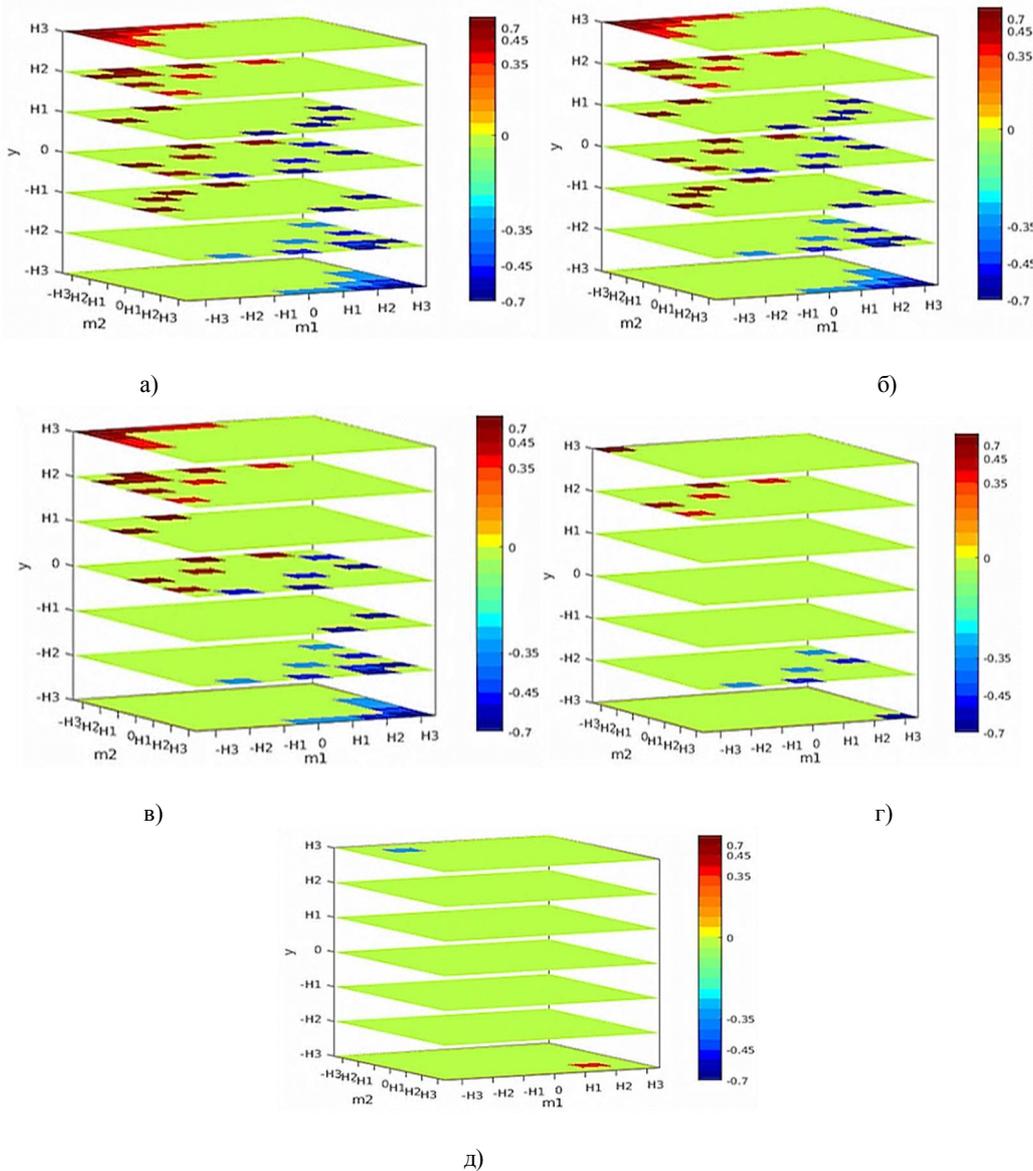


Рис. 1. $\Phi_{diff}^{(l)}$ в различных итерациях кода Таннера (155, 64)

По мере увеличения итераций разница между LUT становится меньше. На 5-й итерации $D_{nn,Q}$ и $D_{proto,Q}$ практически одинаковы. Более конкретно, $\Phi_{diff}^{(l)}$ говорит нам, как $D_{nn,Q}$ улучшает декодирование из $D_{proto,Q}$. Например, на первых двух итерациях, когда значение канала равно $-H_3$ (соответствует нижней плоскости) и $m_1 = m_2 = H_3$, выходной сигнал $D_{nn,Q}$ меньше, чем у $D_{proto,Q}$ (который равен $H_3 + H_3 - H_3 = H_3$), это означает, что $D_{nn,Q}$ ослабляет величину сообщений правдоподобия, тем самым предотвращая их быстрый рост. Аналогичное поведение затухания может наблюдаться в случае, когда значение канала равно H_3 (соответствует верхней плоскости) и $m_1 = m_2 = -H_3$, когда выходной сигнал $D_{nn,Q}$ больше, чем у $D_{proto,Q}$ (который является $-(H_3 + H_3) + H_3 = -H_3$). Аналогичное поведение затухания может наблюдаться в случае, когда значение канала равно H_3 (соответствует верхней плоскости) и $m_1 = m_2 = -H_3$, когда выходной сигнал $D_{nn,Q}$ больше, чем у $D_{proto,Q}$ (который является $-(H_3 + H_3) + H_3 = -H_3$). Поскольку LUT $D_{nn,Q}$ и $D_{proto,Q}$ почти сливаются в конце концов, их кривые BER не расходятся далеко друг от друга.

Вес столбца 4, эксперимент с кодом средней длины

Во втором эксперименте мы считаем код QC LDPC (1296, 972) с весов столбцов и строк равными 4 и 16 соответственно. НСМП этого кода состоит из 11 скрытых слоев размером $5184 = 4 \times 1296$. Размер партии был установлен равным 300, с одним SNR = 4,5 дБ и 5000 выборков для этого SNR.

Распределение $\hat{b}^{(l)}$ на разных итерациях показано на рис. 2. Как и в случае кода Таннера, дисперсия распределения смещения становится меньше с ростом числа итераций. Поскольку обучение для этого НСМП имеет 100 эпох, дисперсия становится очень маленькой.

Кривые BER для D_{nn} , D_{proto} и нормированного MSA со скаляром 0,75 приведены на рис. 3. Результаты моделирования показывают, что D_{nn} превосходит NMSA на 0,3 дБ и D_{proto} на 0,45 дБ при BER 10^{-8} в течение 5 итераций. D_{nn} с 5 итерациями работает лучше, чем D_{proto} с 10 итерациями, то есть D_{nn} сходится быстрее, чем D_{proto} .

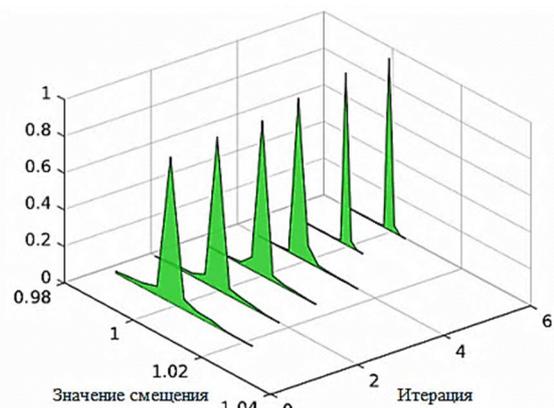


Рис. 2. Распределение смещения в разных итерациях кода QC LDPC (1296, 972)

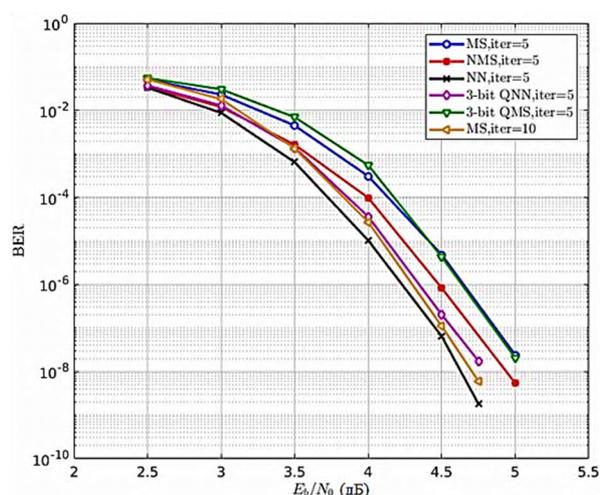


Рис. 3. BER производительности D_{nn} , $D_{nn,Q}$, D_{proto} и $D_{proto,Q}$ кода QC LDPC (1296, 972)

При квантовании D_{nn} и D_{proto} с помощью $Q(\cdot)$ мы получаем НС-декодер 3-битной точности $D_{nn,Q}$ и обычный MSA $D_{proto,Q}$ с 3-битной точностью. Их кривые BER с 5 итерациями также представлены на рис. 4. Результаты моделирования показывают, что при 5 итерациях $D_{nn,Q}$ превосходит NMSA на 0,13 дБ и традиционный MSA на 0,3 дБ при BER 10^{-8} , и он может достичь усиления кодирования 0,3 дБ по сравнению с $D_{proto,Q}$. Улучшение как D_{nn} , так и $D_{nn,Q}$ снова происходит от дополнительных $\{\hat{w}^{(l)}\}$ и $\{\hat{b}^{(l)}\}$. Аналогично, $\Phi_{opt,Q}^{(l)}$ в разных итерациях можно отобразить в пять 4-мерных LUT. На основании $\Phi_{opt,Q}^{(l)}$ мы получаем 3 разных LUT, причем последние 3 итерации имеют одинаковую LUT. Эти 3 разных LUT отличаются только несколькими записями. Для значения канала $-H_3$, $\Phi_{diff}^{(l)}$ кода QC LDPC степе-

ни-4 (1296, 972) на разных итерациях показаны на рис. 4, где оси x, y, z представляют три входящих сообщения от соседних CN. Для всех 5 итераций правила обновления $D_{nn,Q}$ отличаются от правил для $D_{proto,Q}$. Опять же, $\Phi_{diff}^{(l)}$ говорит нам, как $D_{nn,Q}$ улучшает декодирование по сравнению с $D_{proto,Q}$. Например, на последних трех итерациях, когда $m_3 = H_3$ (соответствует верхней плоскости) и $m_1 = m_2 = H_1$, выход $D_{nn,Q}$ меньше, чем у $D_{proto,Q}$ (который равен $H_1 + H_1 + H_3 - H_3 = 2H_1$), что означает, что $D_{nn,Q}$ снова ослабляет величины сообще-

ния. Функция квантования в (4) симметрична, таким образом, все $\Phi_{diff}^{(l)}, \Phi_{opt,Q}^{(l)}, \Phi_Q$ удовлетворяют условию симметрии.

Для D_{nn} с плавающей запятой, поскольку обучение может проводиться в автономном режиме, повышенная сложность вычислений при декодировании обусловлена дополнительным умножением с плавающей запятой, которое составляет всего $2n$ за итерацию. Для $D_{nn,Q}$ с конечной точностью, особенно в 3-битной точности, память и вычислительная сложность могут быть значительно уменьшены.

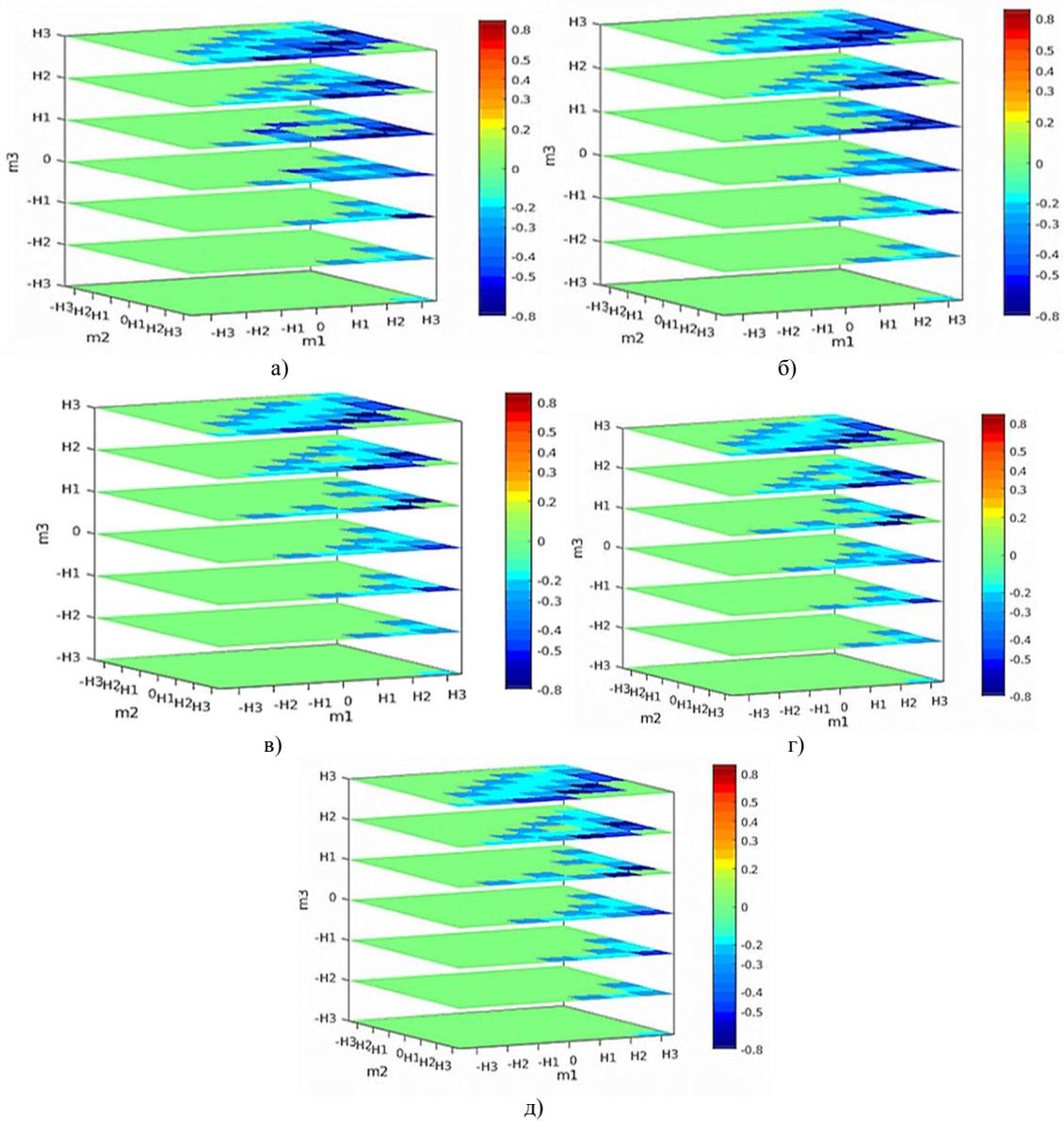


Рис. 4. $\Phi_{diff}^{(l)}$ в разных итерациях кода QC LDPC (1296,972) с канальным выходом -H3

Обсуждения и выводы

Размер популяции и максимальное число поколений предполагаемой генетической эволюции выбираются в зависимости от количества требуемых схем обучения, которое составляет порядка $2n-k$ для (n, k) циклического кода в целом. Эффективные структуры декодирования длинномерных кодов, которые могут быть найдены предлагаемым подходом, все еще ограничены доступным объемом памяти и доступным временем вычисления. Существует два способа расширить практическую ценность предлагаемого подхода для поиска кодов большей длины.

Во-первых, более длинные коды могут быть построены с помощью методов перемежения. Чтобы получить (bn, bk) -код из (n, k) -кода, нужно взять любые b кодовых слов из исходного кода и объединить кодовые слова, чередуя символы. Если исходный код может исправить любую пакетную ошибку длины t , очевидно, что перемеженный код может исправить любую пакетную ошибку длины bt .

Вместо самой теории кодирования второй способ расширить возможности предлагаемого декодера основан на использовании более мощных алгоритмов эволюционных вычислений. Например, можно объединить GA и SA вместе, чтобы построить так называемые отжига-генетические алгоритмы (AGA), которые были успешно применены для решения задач оптимизации больших размеров. Конечно, полное использование возможностей AGA при поиске эффективных структур декодирования в значительной степени зависит от того, можно ли интегрировать правильное знание предметной области ЕСС с моделью и выбором графика отжига и параметров генетической эволюции или нет. Перед тем, как сообщить о любой эффективной структуре декодирования больших кодов, необходимо проделать большую работу.

В этой статье мы показали возможную реализацию нейронных сетей высокого порядка, превратив их в многослойные перцептроны. С практической точки зрения это показывает, что нейронная сеть высокого порядка может быть реализована так же легко, как (или так же сложно, как) многослойный перцептрон. Пред-

ложенные здесь нейронные сети высокого порядка могут даже иметь более простую реализацию, поскольку они используют простой алгоритм обучения, процедуру с исправлением ошибок, вместо более сложного, например, алгоритма обратного распространения, используемого многослойными перцептронами. Синдром декодера или одностадийный мажоритарный декодер может быть преобразован непосредственно в нейронную систему высокого порядка. Это ожидаемый результат, поскольку было показано, что нейронные сети высокого порядка чрезвычайно эффективны для решения проблемы четности (исключая или).

С помощью алгоритма поиска генетического типа показано, что для данной задачи можно найти подходящий набор элементов нейронной сети высокого порядка (в данном случае корректирующий декодер). Другими словами, этот алгоритм также может служить алгоритмом поиска для большинства декодируемых кодов и большинства кодирующих уравнений для них.

Литература

1. Adaptive complex interpolator for channel estimation in pilotaided OFDM system / L. Guanghui, Z. Liaoyuan, L. Hongliang, X. Linfeng, W. Zhengning // J. Commun. and networks. 2013. Vol. 15. No. 5. pp. 496 – 503.
2. Adaptive interpolation for pilot-aided channel estimator in OFDM system/ L. Guanghui, Z. Liaoyuan, L. Hongliang, X. Linfeng, W. Zhengning // IEEE Transactions on Broadcasting. 2014. Vol. 60. No. 3. pp. 486 – 498.
3. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99-105.
4. A novel hard decision decoding scheme based on genetic algorithm and neural network/ J. Yuan, C. He, W. Gao, J. Lin, Y. Pang// Optik - International Journal for Light and Electron Optics. 2014. Vol. 125. No. 14. pp. 3457-3461
5. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Белецкая С.Ю. Использование стохастического вычисления для реализации недвоичного LDPC-декодера на ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 5. С. 70-73.
6. Khoroshaylova M.V. LDPC code and decoding algorithms // Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности: материалы II-й междунар. науч.-практ. конф. В 2-х ч. /под ред. Э.П. Комаровой. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2015. С. 227-228.

Поступила 12.03.2020; принята к публикации 17.06.2020

Информация об авторах

Астахов Николай Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kibr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-8574>

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Муратов Александр Васильевич - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5393-7425>

Хорошайлова Марина Владимировна - канд. техн. наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

Ципина Наталья Викторовна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kivr@vorstu.ru

DECODING LINEAR BLOCK CODES USING NEURAL NETWORKS BASED ON HIGH-ORDER PERSEPTRONS

N.V. Astakhov, A.V. Bashkirov, A.V. Muratov, M.V. Khoroshaylova, N.V. Tsipina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article presents a class of neural networks suitable for decoding error correction codes. The neural model is basically a perceptron with a high order polynomial as a discriminant function. One layer of high-order perceptrons is able to decode a binary linear block code with a maximum weight of 2^m in each perceptron, where m is the parity length. For some subclasses of codes, the required number of weights can be much less. The Hamming code (2^m-1 , 2^m-1-m) can be decoded using only the $m + 1$ weights in each perceptron. Using genetic algorithms, we obtained efficient $2t + 1$ -bit neural decoders for each bit for some cyclic codes and BCH codes (Boves-Chowdhury-Hockingham), which can be corrected. Using the genetic type search algorithm, we show that for this problem, one can find a suitable set of elements of a high order neural network (in this case, a correcting decoder). We present neural decoders as a set of parity networks at the first level, followed by a linear perceptron at the second level, and thus have simple implementations in a similar VLSI technology

Key words: error correction codes, genetic algorithms, high-order perceptrons, discriminant polynomials

References

1. Guanghui L., Liaoyuan Z., Hongliang L., Linfeng X., Zhengning W. "Adaptive complex interpolator for channel estimation in pilotaided OFDM system", *J. Commun. and Networks*, 2013, vol. 15, no. 5, pp. 496–503.
2. Guanghui L., Liaoyuan Z., Hongliang L., Linfeng X., Zhengning W. 'Adaptive interpolation for pilot-aided channel estimator in OFDM system', *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2014, vol. 60, no. 3, pp. 486–498.
3. Khoroshaylova M.V. "FPGA-based channel coding architecture for a 5G wireless network using high-level synthesis", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105.
4. Yuan J., He C., Gao W., Lin J., Pang Y. "A novel hard decision decoding scheme based on genetic algorithm and neural network", *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, vol. 125, no. 14, pp. 3457-3461
5. Bashkirov A.V., Khoroshaylova M.V. Beletskaya S.Yu. 'Using stochastic computing to implement a non-binary LDPC decoder on FPGA', *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 5, pp. 70-73.
6. Khoroshaylova M.V. "LDPC code and decoding algorithms", *Anthropocentric Sciences: an Innovative View of the Education and development of Personality: Proc. of the Second International Scientific-Practical Conf. (Antropotsentricheskie nauki: innovatsionnyy vzglyad na obrazovaniye i razvitie lichnosti: materialy II-oy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, ed. E.P. Komarova, Voronezh, Nauchnaya kniga, 2015, pp. 227-228.

Submitted 12.03.2020; revised 17.06.2020

Information about the authors

Nikolay V. Astakhov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-8574>

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sc. (Technical), Head of the Department of Design and Production of Radio Equipment, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Aleksandr V. Muratov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5393-7425>

Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

Natal'ya V. Tsipina, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

ПОСТРОЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДЕЛИ ОСТАТОЧНОГО СЛОЯ ПРИ ПОЛИГОНАЛЬНОМ РАСТАЧИВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ**В.В. Куц, Т.А. Толмачева****Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия**

Аннотация: рассматривается процесс полигонального растачивания тонкостенных гильз вращающимся резцовым блоком, представлена схема формообразования внутреннего отверстия. Получена формула для поверхности резания в системе координат заготовки, описываемой режущими кромками сменных многогранных пластин (СМП) с учетом всех движений формообразования, в процессе полигонального растачивания. На основе результатов геометрического моделирования поверхности резания и анализа пространственной интерференции поверхностей резания, образованных режущими кромками СМП резцового блока, установлен механизм образования локального участка остаточного гребешка на обработанной поверхности отверстия при различных режимах обработки. Показаны уравнения линий пересечения поверхностей резания, образующих локальный участок остаточного гребешка, установлены границы параметров этих поверхностей. Описана пространственная модель участка остаточного слоя в виде составной поверхности. Приведена формула, позволяющая вычислить максимальную высоту остаточного гребешка на основе разработанной его пространственной модели. Показаны результаты моделирования участка остаточного слоя при заданных режимах обработки, приведены граничные значения параметров для различных участков остаточного гребешка. С помощью созданной пространственной модели остаточного гребешка становится возможным исследовать влияние режимов обработки и геометрических параметров резцового блока на качество получаемой поверхности

Ключевые слова: длинномерная тонкостенная деталь, полигональное растачивание, формообразование, резцовый блок, пространственная модель остаточного слоя, высота остаточного гребешка

Введение

Качество обрабатываемой поверхности играет немаловажную роль в современной металлообработке. Одним из энергоемких процессов является формообразование сквозных отверстий длинномерных тонкостенных деталей [1,2]. Процесс растачивания деталей данного типа достаточно сложен, поэтому для получения поверхности надлежащего качества необходимо детально изучить механизм формирования итоговой поверхности.

Применение инструментов и инструментальных систем для обработки полигональным растачиванием позволит повысить точность формы и размеров обрабатываемой тонкостенной детали, обеспечить величину шероховатости поверхности, улучшить физико-механические свойства поверхностного слоя детали, вследствие чего будут улучшены эксплуатационные показатели детали и узла механизма в целом, достигнута высокая производительность процесса обработки [1, 3].

Моделирование участка остаточного слоя

Схема формообразования внутреннего отверстия длинномерной тонкостенной детали методом полигонального растачивания с применением вращающегося резцового блока представлена на рис. 1 [1].

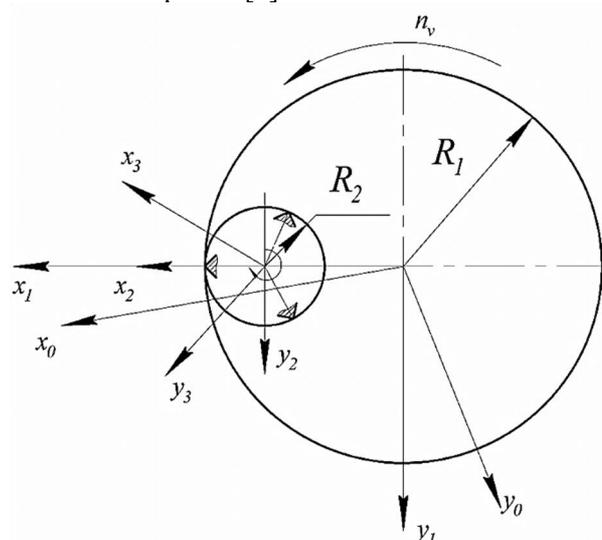


Рис. 1. Схема формообразования внутреннего отверстия [1]

Поверхности резания, образованные СМП резцового блока, располагаются дискретно. Вследствие этого на поверхности детали остаются неровности в виде гребешков, которые получаются в результате интерференции двух поверхностей резания, образованных режущими кромками резцового блока [4].

Пространственная интерференция поверхностей резания, образованных режущими кромками СМП резцового блока, описывается зависимостью [1]:

$$\bar{Q}_k(s_k, t) = A_{0,1}^{[6]}(-\psi_1(t)) \cdot A_{1,2}^{[1]}(R_1 - R_2) \times \quad (1)$$

$$\times A_{2,3}^{[3]}(z(t)) \cdot A_{3,4}^{[6]}(\psi_2(t)) \cdot A_{4k} \cdot \bar{r}_k(s_k).$$

На рис. 2 представлен результат моделирования поверхности резания, образованной кромками СМП при следующих данных: минутная подача $S_{\text{мин}} = 200$ мм/мин, число оборотов резцового блока $n_g = 500$ об/мин, число оборотов заготовки $n_s = 100$ об/мин, количество СМП в блоке $N=4$.

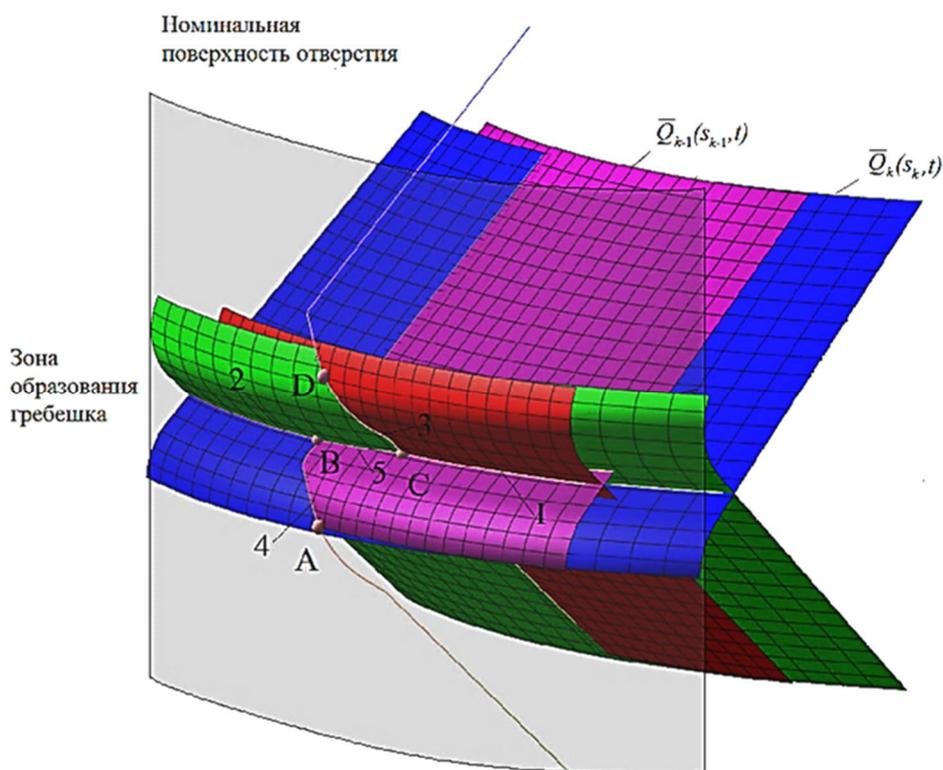


Рис. 2. Пространственная интерференция поверхностей резания, образованных режущими кромками СМП

Исследуемый локальный участок остаточного гребешка – это область, которая образована следующими поверхностями резания: 1-й СМП резцового блока на первом и втором оборотах заготовки, 1-й и 2-й СМП резцового блока на первом обороте заготовки, 2-й и 1-й СМП резцового блока на первом и втором оборотах заготовки, пересечение поверхности резания 1-й и 2-й СМП резцового блока на втором обороте заготовки, пересечение поверхности резания 2-й СМП резцового блока на первом и втором оборотах заготовки.

Вершины поверхности гребешка описываются линиями, которые являются результатом пересечения поверхностей резания:

- 1 – линия пересечения поверхностей резания 1-й СМП резцового блока на первом и втором оборотах заготовки;
- 2 – линия пересечения поверхностей резания 2-й СМП резцового блока на первом и втором оборотах заготовки;
- 3 – линия пересечения поверхностей резания 1-й и 2-й СМП резцового блока на первом обороте заготовки;
- 4 – линия пересечения поверхностей резания 1-й и 2-й СМП резцового блока на втором обороте заготовки;
- 5 – линия пересечения поверхностей резания 2-й СМП резцового блока за 1-й оборот заготовки и 1-й СМП за 2-й оборот заготовки.

Далее построим уравнения линий (1-5), описывающих вершины остаточного гребешка, для чего введем следующие обозначения.

1. Уравнение 1-й линии - $\bar{L}_1(t)$ получим путем решения векторного уравнения:

$$\bar{Q}_{1,1}(s_{1,1}, t_{1,1}) = \bar{Q}_{1,2}(s_{1,2}, t_{1,2}), \quad (2)$$

где $\bar{Q}_{1,1}(s_{1,1}, t_{1,1})$ - уравнение поверхности резания, описываемое 1-й СМП резцового блока на первом обороте заготовки;

$\bar{Q}_{1,2}(s_{1,2}, t_{1,2})$ - уравнение поверхности резания, описываемое 1-й СМП резцового блока на втором обороте заготовки, относительно параметров $s_{1,1}, s_{1,2}, t_{1,2}$. Представив их в виде функций $s_{1,1} = s_{1,1}(t_{1,1}), s_{1,2} = s_{1,2}(t_{1,1}), t_{1,2} = t_{1,2}(t_{1,1})$, которые зависят от параметра $t_{1,1}$, получаем:

$$\bar{L}_1(t_{1,1}) = \bar{Q}_{1,2}(s_{1,2}(t_{1,1}), t_{1,2}(t_{1,1})). \quad (3)$$

2. Уравнение 2-й линии - $\bar{L}_2(t)$ получим путем решения векторного уравнения:

$$\bar{Q}_{2,1}(s_{2,1}, t_{2,1}) = \bar{Q}_{2,2}(s_{2,2}, t_{2,2}), \quad (4)$$

где $\bar{Q}_{2,1}(s_{2,1}, t_{2,1})$ - уравнение поверхности резания, описываемое 2-й СМП резцового блока на первом обороте заготовки;

$\bar{Q}_{2,2}(s_{2,2}, t_{2,2})$ - уравнение поверхности резания, описываемое 2-й СМП резцового блока на втором обороте заготовки, относительно параметров $s_{2,1}, s_{2,2}, t_{2,2}$. Представив их в виде функций $s_{2,1} = s_{2,1}(t_{2,1}), s_{2,2} = s_{2,2}(t_{2,1}), t_{2,2} = t_{2,2}(t_{2,1})$, которые зависят от параметра $t_{2,1}$, получаем:

$$\bar{L}_2(t_{2,1}) = \bar{Q}_{2,2}(s_{2,2}(t_{2,1}), t_{2,2}(t_{2,1})). \quad (5)$$

3. Уравнение 3-й линии - $\bar{L}_3(t)$ получим путем решения векторного уравнения:

$$\bar{Q}_{1,1}(s_{1,1}, t_{1,1}) = \bar{Q}_{2,1}(s_{2,1}, t_{2,1}), \quad (6)$$

где $\bar{Q}_{1,1}(s_{1,1}, t_{1,1})$ - уравнение поверхности резания, описываемое 1-й СМП резцового блока на первом обороте заготовки;

$\bar{Q}_{2,1}(s_{2,1}, t_{2,1})$ - уравнение поверхности резания, описываемое 2-й СМП резцового блока на первом обороте заготовки, относительно параметров $s_{1,1}, t_{1,1}, s_{2,1}$. Представив их в виде функций $s_{1,1} = s_{1,1}(t_{2,1}), t_{1,1} = t_{1,1}(t_{2,1}), s_{2,1} = s_{2,1}(t_{2,1})$, которые зависят от параметра $t_{2,1}$, получаем:

$$\bar{L}_3(t_{2,1}) = \bar{Q}_{1,1}(s_{1,1}(t_{2,1}), t_{1,1}(t_{2,1})) \quad (7)$$

или

$$\bar{L}_3^*(t_{1,1}) = \bar{Q}_{1,1}(s_{1,1}^*(t_{1,1}), t_{1,1}), \quad (8)$$

где параметры $s_{1,1}, t_{2,1}, s_{2,1}$ представлены в виде функций $s_{1,1} = s_{1,1}^*(t_{1,1}), t_{2,1} = t_{2,1}^*(t_{1,1}), s_{2,1} = s_{2,1}^*(t_{1,1})$, которые зависят от параметра $t_{1,1}$.

4. Уравнение 4-й линии - $\bar{L}_4(t)$ получим путем решения векторного уравнения:

$$\bar{Q}_{1,2}(s_{1,2}, t_{1,2}) = \bar{Q}_{2,2}(s_{2,2}, t_{2,2}), \quad (9)$$

где $\bar{Q}_{1,2}(s_{1,2}, t_{1,2})$ - уравнение поверхности резания, описываемое 1-й СМП резцового блока на втором обороте заготовки;

$\bar{Q}_{2,2}(s_{2,2}, t_{2,2})$ - уравнение поверхности резания, описываемое 2-й СМП резцового блока на втором обороте заготовки, относительно параметров $s_{1,2}, s_{2,2}, t_{1,2}$. Представив их в виде функций $s_{1,2} = s_{1,2}(t_{2,2}), s_{2,2} = s_{2,2}(t_{2,2}), t_{1,2} = t_{1,2}(t_{2,2})$, которые зависят от параметра $t_{2,2}$, получаем:

$$\bar{L}_4(t_{2,2}) = \bar{Q}_{2,2}(s_{2,2}(t_{2,2}), t_{2,2}) \quad (10)$$

или

$$\bar{L}_4^*(t_{1,2}) = \bar{Q}_{1,2}(s_{1,2}^*(t_{1,2}), t_{1,2}), \quad (11)$$

где параметры $s_{1,2}, s_{2,2}, t_{2,2}$ представлены в виде функций $s_{1,2} = s_{1,2}^*(t_{1,2}), s_{2,2} = s_{2,2}^*(t_{1,2}), t_{2,2} = t_{2,2}^*(t_{1,2})$, которые зависят от параметра $t_{1,2}$.

5. Уравнение 5-й линии - $\bar{L}_5(t)$ получим путем решения векторного уравнения:

$$\bar{Q}_{2,1}(s_{2,1}, t_{2,1}) = \bar{Q}_{1,2}(s_{1,2}, t_{1,2}), \quad (12)$$

где $\bar{Q}_{2,1}(s_{2,1}, t_{2,1})$ - уравнение поверхности резания, описываемое 2-й СМП резцового блока на первом обороте заготовки;

$\bar{Q}_{1,2}(s_{1,2}, t_{1,2})$ - уравнение поверхности резания, описываемое 1-й СМП резцового блока на втором обороте заготовки, относительно параметров $s_{2,1}, s_{1,2}, t_{1,2}$. Представив их в виде функций $s_{2,1} = s_{2,1}(t_{2,1}), s_{1,2} = s_{1,2}(t_{2,1}), t_{1,2} = t_{1,2}(t_{2,1})$, которые зависят от параметра $t_{2,1}$, получаем:

$$\bar{L}_5(t_{2,1}) = \bar{Q}_{2,1}(s_{2,1}(t_{2,1}), t_{2,1}), \quad (13)$$

или

$$\bar{L}_5^*(t_{1,2}) = \bar{Q}_{1,2}(s_{1,2}^*(t_{1,2}), t_{1,2}), \quad (14)$$

где параметры $s_{2,1}, s_{1,2}, t_{2,2}$ представлены в виде функций $s_{2,1} = s_{2,1}^*(t_{1,2}), s_{1,2} = s_{1,2}^*(t_{1,2}), t_{2,2} = t_{2,2}^*(t_{1,2})$, которые зависят от параметра $t_{1,2}$.

На основе полученных уравнений линий пересечения определим координаты характерных точек остаточного гребешка (A, B, C, D)

(см. рис. 2). Для точки В, образованной пересечением 4-й и 5-й линий, координаты определяются путем решения векторного уравнения

$$\bar{L}_4(t_{4B}) = \bar{L}_5(t_{5B}), \quad (15)$$

относительно параметров t_{4B} и t_{5B} , в результате чего получаем:

$$\bar{r}_B = [x_B, y_B, z_B, 1]^T = \bar{L}_4(t_{4B}) \quad (16)$$

или

$$\bar{r}_B = [x_B, y_B, z_B, 1]^T = \bar{L}_5(t_{5B}). \quad (17)$$

Для точки А, находящейся на 4-й линии, параметры $t_{1,2A}$, $t_{2,2A}$ определяются решением системы уравнений:

$$\begin{cases} S_t = s_{1,2}(t_{1,2A}); \\ S_t = s_{2,2}(t_{2,2A}), \end{cases} \quad (18)$$

где S_t – длина дуги, соответствующая точке контакта профиля СМП с образующей детали (точка вершины профиля СМП).

Для точки С, образованной пересечением 3-й и 5-й линий, координаты определяются путем решения векторного уравнения

$$\bar{L}_3(t_{3C}) = \bar{L}_5(t_{5C}) \quad (19)$$

или

$$\bar{L}_3(t_{3C}) = \bar{L}_{5C}^*(t_{5C}), \quad (20)$$

относительно параметров t_{3C} и t_{5C} , в результате чего получаем:

$$\bar{r}_C = [x_C, y_C, z_C, 1]^T = \bar{L}_3(t_{3C}) \quad (21)$$

или

$$\bar{r}_C = [x_C, y_C, z_C, 1]^T = \bar{L}_5(t_{5C}) \quad (22)$$

или

$$\bar{r}_C = [x_C, y_C, z_C, 1]^T = \bar{L}_{5C}^*(t_{5C}). \quad (23)$$

Для точки D, находящейся на 3-й линии, параметры $t_{1,1D}$, $t_{2,1D}$ определяются решением уравнений:

$$\begin{cases} S_t = s_{1,1}(t_{1,1D}); \\ S_t = s_{2,1}(t_{2,1D}), \end{cases} \quad (24)$$

где S_t – длина дуги, соответствующая точке контакта профиля СМП с образующей детали (точка вершины профиля СМП).

Зависимости для моделирования пространственной модели участка остаточного гребешка приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимости для моделирования пространственной модели участка остаточного гребешка

№ зоны	№ СМП	№ оборота заготовки	t_{\min}	t_{\max}	s_{\min}	s_{\max}
1	1	0	0	t_{3C}	S_t	$s_{1,1}$
2	1	0	t_{3C}	$t_{1,1D}$	S_t	$s_{1,1}(t_{1,1})$, п.п. 3
3	2	0	t_{3C}	$t_{2,1D}$	$s_{2,1}(t_{2,1})$, п.п. 3	$s_{2,1}(t_{2,1})$, п.п. 5
4	2	0	$t_{2,1D}$	t_{5B}	S_t	$s_{2,1}(t_{2,1})$, п.п. 5
5	2	0	t_{5B}	$T_{обр.з}$	S_t	$s_{2,1}$
6	1	1	$T_{обр.з}$	t_{5C}^*	$s_{2,1}$	S_t
7	1	1	t_{5C}^*	$t_{1,2A}$	$s_{1,2}(t_{1,2})$, п.п. 5	S_t
8	1	1	$t_{1,2A}$	t_{5B}	$s_{1,2}(t_{1,2})$, п.п. 5	$s_{1,2}(t_{1,2})$, п.п. 4
9	2	1	$t_{2,2A}$	t_{4B}	$s_{2,2}(t_{2,2})$, п.п. 4	S_t
10	2	1	t_{4B}	$T_{обр.з}$	$s_{2,2}$	S_t

В результате проведенных исследований можно вычислить максимальную высоту остаточного гребешка. Данную функцию можно представить в виде:

$$R_{Z_{\max}} = \max \left(R_1 - \left| \bar{R}_{xy}(s, t) \right| \right), \quad (25)$$

где R_1 – радиус обработанного отверстия детали;

$\left| \bar{R}_{xy}(s, t) \right|$ – модуль проекции радиус-вектора образующей остаточного гребешка на координатную плоскость $X_0O_0Y_0$;

s, t – параметры поверхности остаточного слоя, значения которых находятся в пределах $s_{\min} \leq s \leq s_{\max}$ и $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$ (см. табл. 1).

На основе полученных зависимостей было выполнено пространственное моделирование участка остаточного гребешка. Результаты приведены на рис. 3 и табл. 2.

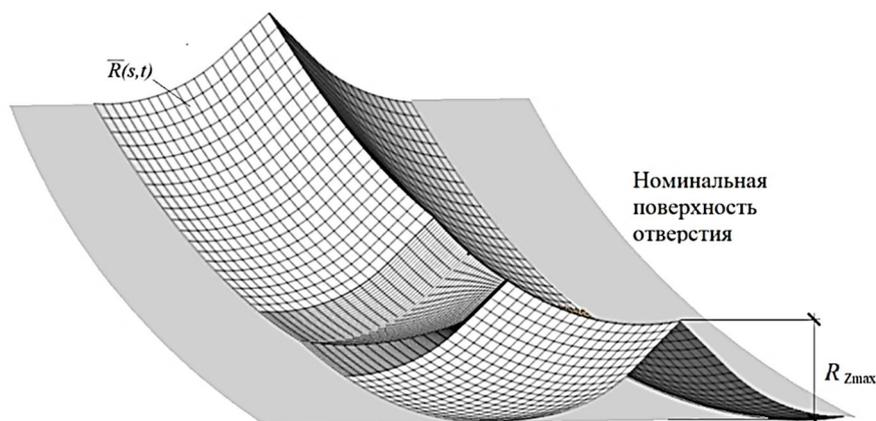


Рис. 3. Пространственная модель участка остаточного гребешка

Таблица 2

Числовые параметры моделирования пространственной модели участка остаточного гребешка

№ зоны	№ СМП	№ оборота заготовки	t_{\min}	t_{\max}	s_{\min}	s_{\max}
$n_e = 500$ об/мин, $n_s = 100$ об/мин, $S_{\min} = 200$ мм/мин						
1	1	0	0	0.00239	4.24264	5.24264
2	1	0	0.00239	0.00302	4.24264	$4.24264 \leq s_{1,1}(t_{1,1}) \leq 5.24264$
3	2	0	0.02638	0.02702	$4.16263 \leq s_{2,1}(t_{2,1}) \leq 5.16872$	$5.16267 \leq s_{2,1}(t_{2,1}) \leq 5.20469$
4	2	0	0.02702	0.02760	4.16263	$5.20469 \leq s_{2,1}(t_{2,1}) \leq 5.24264$
5	2	0	0.02760	0.03000	4.16263	5.24264
6	1	1	0.59999	0.60239	3.24264	4.24264
7	1	1	0.60239	0.60239	$3.24264 \leq s_{1,2}(t_{1,2}) \leq 3.28379$	4.24264
8	1	1	0.60302	0.60361	$3.283791025 \leq s_{1,2}(t_{1,2}) \leq 3.322606048$	$4.24264 \leq s_{1,2}(t_{1,2}) \leq 3.322621$
9	2	1	0.60302	0.60361	$3.24265 \leq s_{2,2}(t_{2,2}) \leq 4.16263$	4.16263
10	2	1	0.62760	0.63000	3.24265	4.16263

Выводы

Таким образом, созданная пространственная модель локального участка остаточного гребешка позволяет детально изучить механизм формообразования обработанной поверхности при полигональном растачивании тонкостенной детали и исследовать на основе результатов моделирования влияние режимов обработки и геометрических параметров резцового блока на качество получаемой поверхности.

Литература

1. Исследование процесса формообразования внутренних цилиндрических поверхностей длинных

тонкостенных деталей методом планетарного растачивания/ И.В. Ванин, В.А. Гречишников, В.В. Куц, М.С. Разумов, А.Н. Гречухин // Вестник МГТУ Станкин. 2018. № 3 (46). С. 30-34.

2. Гречишников В.А., Куц В.В., Разумов М.С. Определение погрешности формы детали при формообразовании планетарным механизмом методами геометрической теории резания // СТИН. 2017. №4. С. 24-26

3. Куц В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: автор. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Куц Вадим Васильевич. Курск, 2012. 32 с.

4. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: монография. Курск: Курский гос. техн. ун-т, 1997. 391с.

Поступила 27.04.2020; принята к публикации 17.06.2020

Информация об авторах

Куц Вадим Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru
Толмачева Татьяна Александровна – аспирант кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: tolmatcheva-ta@mail.ru

CONSTRUCTION OF A SPATIAL MODEL OF A RESIDUAL LAYER DURING POLYGONAL BORING OF THIN-WALLED PARTS

V.V. Kuts, T.A. Tolmacheva

Southwest State University, Kursk, Russia

Abstract: the article considers the process of polygonal boring of thin-walled sleeves by a rotating cutter block, and presents a diagram of the formation of the inner hole. We obtained a formula for the cutting surface in the coordinate system of the workpiece outlined by the cutting edges of changeable polyhedral plates (CPP), taking into account all the movements of shaping, in the process of polygonal boring. Based on the results of geometric modeling of the cutting surface and the analysis of the spatial interference of the cutting surfaces formed by the cutting edges of the CPP of the cutting unit, we established a mechanism for the formation of a local area of the residual scallop on the machined hole surface under various processing conditions. We represent the equations of the intersection lines of cutting surfaces forming a local section of the residual scallop, and establish the boundaries of the parameters of these surfaces. We describe a spatial model of the residual layer area in the form of a composite surface. We give a formula that allows us to calculate the maximum height of the residual scallop based on the developed spatial model. We show the simulation results of the residual layer section for the given processing modes, and also the boundary values of the parameters for various sections of the residual scallop. Using the created spatial model of the residual scallop, it becomes possible to investigate the influence of processing modes and geometric parameters of the cutting unit on the quality of the resulting surface

Key words: long thin-walled part, polygon boring, shaping, cutter block, spatial model of the residual layer, residual scallop height

References

1. Vanin I.V., Grechishnikov V.A., Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N. “The study of the process of forming the inner cylindrical surfaces of long thin-walled parts by planetary boring”, *Bulletin of MSTU Stankin (Vestnik MGTU Stankin)*, 2018, no. 3 (46), pp. 30-34.
2. Grechishnikov V.A., Kuts V.V., Razumov M.S. “Determination of the shape error of a part during shaping by a planetary mechanism by the methods of the geometric theory of cutting”, *STIN*, 2017, no. 4, pp. 24-26
3. Kuts V.V. “The methodology of pre-design studies of specialized metal-cutting systems” (“Metodologiya predproektnykh issledovaniy spetsializirovannykh metallovezhushchikh sistem”), Dr. of Technical Sci. diss. 05.02.07, Kursk, 2012, 32 p.
4. Lashnev S.I., Borisov A.N., Emel'yanov S.G. “Geometric theory of surface formation with cutting tools” (“Geometricheskaya teoriya formirovaniya poverkhnostey rezhushchimi instrumentami”), monograph, Kursk State Technical University, 1997, 391 p.

Submitted 27.04.2020; revised 17.06.2020

Information about the authors

Vadim V. Kuts, Dr. Sc. (Technical), Professor, Southwest State University (94, 50 let Oktyabrya st., Kursk 305040, Russia), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Tat'yana A. Tolmacheva, Graduate student, Southwest State University (94, 50 let Oktyabrya st., Kursk 305040, Russia), e-mail: tolmatcheva-ta@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ С УЧЕТОМ УРОВНЯ ВИБРАЦИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

А.В. Анцев, Е.С. Янов, Ч.Х. Данг

Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

Аннотация: рассматривается задача оптимизации режимов резания на примере токарной и фрезерной обработки с использованием методов искусственного интеллекта. В качестве критерия оптимальности предлагается использовать удельные затраты – переменную часть себестоимости обработки – которые могут изменяться в единицах времени, что обеспечивает оптимизацию по производительности, или денежных единицах, что обеспечивает оптимизацию по себестоимости. Рассчитанные оптимальные значения ограничивают область рациональных режимов резания. В процессе оптимизации с помощью обобщенной стохастической модели отказов учитывается вариабельность (разброс) периода стойкости режущего инструмента. Перебор режимов резания и периодичности восстановления режущего инструмента предложено осуществлять с помощью генетического алгоритма. Каждый рассматриваемый вариант режимов резания проверяется на соответствие техническим или технологическим ограничениям. При этом особое внимание уделяется вибрации в процессе резания, уровень которой меняется по мере изнашивания режущего инструмента. Оценку уровня вибрации предлагается проводить с использованием искусственной нейронной сети в виде многослойного персептрона. Рассмотренный подход оптимизации режимов резания и периодичности восстановления режущих инструментов с учетом специфики процесса резания и факторов случайности при износе и разрушении режущих инструментов позволил предложить систему адаптивного управления процессом резания с учетом вибрации машинной части технологической системы. За основу архитектуры системы адаптивного управления процессом резания взята схема с обычным контроллером, управляемым нейронной сетью в виде нейро-нечеткой сети на базе алгоритма Сугэно 0-го порядка. Применение методов искусственного интеллекта для анализа уровня вибрации машинной части технологической системы и оптимизации режимов резания и периодичности восстановления режущего инструмента позволит выявить резервы для повышения эффективности процесса резания, диагностировать состояние режущего инструмента в процессе обработки и разработать адаптивную и робастную систему управления процессом резания

Ключевые слова: режим резания, оптимизация, удельные затраты, вибрация, генетический алгоритм, многослойный персептрон, нейро-нечеткая сеть, адаптивное управление

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00849

Введение

Развитие и совершенствование технологий металлообработки неразрывно связано с использованием станков с числовым программным управлением. Их эффективное использование невозможно без обеспечения стабильного процесса резания, который оценивается комплексно по следующим критериям: точность, качество обработанной поверхности, надежность работы режущего инструмента.

Современные машиностроительные предприятия характеризуются очень широкой номенклатурой потребляемого режущего инструмента [1]. При этом режущий инструмент является наиболее уязвимым звеном в металлорежущих системах. Непредвиденный выход инструмента из строя приводит к большим издержкам производства из-за увеличения затрат на профилактику и обслуживание режущего

инструмента и увеличения затрат на исправимый и неисправимый брак из-за высокой стоимости заготовок на финишных операциях, поэтому большое количество работ в современной литературе посвящено вопросам изучения механизма износа режущего инструмента, диагностики его состояния, прогнозированию его периода стойкости и оптимизации режимов резания.

При диагностировании состояния режущего инструмента большое распространение получили методы с использованием методов машинного обучения [2-4]. Для этого используются различные косвенные параметры - процесса резания, такие как акустическая эмиссия [5, 6], вибрация [7, 8], температура [9, 10], сила резания [11], а также их комбинации [12]. Также для контроля состояния режущего инструмента применяется оптический контроль [13]. При этом наиболее перспективным косвенным методом контроля износа режущего инструмента в процессе обработки является

контроль вибрации механической части технологической системы. Данный метод позволяет обеспечивать контроль износа режущего инструмента как при чистовой обработке, так и черновой обработке, а также определять разрушение инструмента при черновой обработке и прогнозировать качество получаемой поверхности.

Надежность процесса резания, качество полученных деталей и производительность производственного процесса зависят от периода стойкости режущего инструмента. В настоящее время много работ посвящено прогнозированию периода стойкости и надежности режущего инструмента и оптимизации режимов резания, например, [14, 15], в том числе с учетом разброса периода стойкости [16-19], однако данная задача пока не нашла своего окончательного решения.

Методика назначения рациональных режимов резания

При оптимизации режимов резания обычно используют один из двух подходов:

- обеспечение максимальной производительности обработки;
- обеспечение минимальной себестоимости обработки.

Вне зависимости от выбранного подхода при назначении рациональных режимов резания подачу и глубину резания назначают максимально возможными исходя из технических (мощность привода главного движения и приводов подачи, жесткость металлорежущего станка, геометрия лезвийного инструмента, применяемая технологическая оснастка и т. д.) и технологических (точность обработки, качество обрабатываемой поверхности, величина припуска и т. д.) ограничений [20]. Что касается скорости резания, то в первом подходе определяют скорость резания максимальной производительности, а во втором – экономическую скорость резания, обеспечивающую минимум производственных затрат. При этом значение экономической скорости резания меньше значения скорости резания максимальной производительности, а вместе они ограничивают зону высокой эффективности обработки, из которой следует выбирать рациональные режимы резания [21].

В качестве критерия оптимальности предлагается использовать удельные затраты – переменную часть себестоимости обработки или часть времени технологического перехода, за-

висящую от режимов резания и порядка восстановления лезвийного инструмента. Причем, если удельные затраты измеряются единицами времени, то полученные режимы резания соответствуют наибольшей производительности, а если удельные затраты измеряются денежными единицами, то оптимальные значения режимов резания соответствуют минимуму себестоимости.

В общем виде удельные затраты можно определить как

$$\Theta = \frac{Z_0 + Z_6 + Z_B}{\bar{T}_П}, \quad (1)$$

где Z_0 – затраты на обработку, зависящие от числа обработанных деталей до момента отказа инструмента и учитывающие стоимость минуты работы металлорежущего станка и выбранные режимы резания, Z_6 – затраты на брак из-за внезапного отказа инструмента в процессе обработки, Z_B – затраты, связанные с восстановлением инструмента (затраты на инструмент), $\bar{T}_П$ – полезная наработка, т. е. средняя наработка за один период восстановления лезвийного инструмента.

При этом стойкость режущих инструментов (наработка на отказ по терминологии теории надежности) является случайной величиной, зависящей от множества факторов: режимов резания, режущих свойств инструментов, вида обработки, твердости обрабатываемых деталей, величины припусков на обработку, предварительного напряженно-деформированного состояния, вибраций, геометрических погрешностей станка и других факторов [22–24]. Разброс периода стойкости режущего инструмента существенен – от 15 до 35 % [11], что оказывает негативное влияние на эффективность процесса резания и усложняет задачу оптимизации режимов резания.

Поэтому в процессе оптимизации следует учитывать, что период стойкости режущего инструмента даже одной партии является случайной величиной с некоторым законом распределения. Для учета постепенного, из-за износа лезвия, и внезапного, из-за разрушения лезвия, видов отказа режущего инструмента, вариабельности параметров инструмента, вариабельности параметров обрабатываемых заготовок и неопределенности условий и специфики производства деталей машин, при оптимизации предлагается использовать обобщенную стохастическую модель отказов режущего инструмента, в которой закон распределения пе-

риода стойкости инструмента является композицией трех распределений распределения (логарифмически нормального, нормального и Вейбулла). В зависимости от производственной ситуации и имеющихся в наличии статистических данных, при соответствующем подборе параметров из обобщенной модели могут быть получены простые стохастические модели [25].

Общий алгоритм оптимизации режимов резания в данном случае будет состоять из следующих этапов:

1. Перебор возможных значений режимов резания и периодичности восстановления режущего инструмента.

2. Оценка параметров стойкостной зависимости и определение периода стойкости на основе стохастической модели отказов.

3. Проверка выбранного варианта режимов резания на технические и технологические ограничения.

4. Расчет удельных затрат и выбор оптимального варианта.

Рассмотрим указанные этапы подробнее.

Перебор режимов резания и периодичности восстановления инструмента

В качестве первого приближения при поиске оптимальных режимов резания и периодичности восстановления инструмента можно воспользоваться полным перебором возможных значений. Однако даже с учетом того, что подача и глубина резания назначаются максимально возможными и их оптимальное значение лежит на границе допустимых значений и, таким образом, для перебора остается лишь скорость резания, чье оптимальное значение в соответствии с выбранным критерием оптимизации лежит внутри диапазона допустимых значений и имеет оптимальное значение, алгоритм полного перебора возможных значений режимов резания и периодичности восстановления с определенным шагом не будет самым оптимальным с точки зрения производительности.

Повысить производительность алгоритма подбора режима резания и периодичности восстановления возможно за счет применения метода Монте-Карло, обеспечивающего случайный поиск рациональных режимов резания и периодичности восстановления пока не будет достигнуто целевое значение критерия оптимальности или не будет выполнено заданное максимальное количество итераций алгоритма.

Минусом такого подхода является то, что найденное решение будет квазиоптимальным.

Для повышения точности и скорости работы алгоритма случайного поиска целесообразно применение теории эволюционных вычислений, в частности, генетических алгоритмов [26].

Начальной точкой алгоритма является формирование исходных вариантов режимов резания и периодичностей восстановления инструмента путем их генерации случайным образом из области допустимых значений. В качестве критерия оптимальности используется критерий минимума удельных затрат.

Условие завершения генетического алгоритма такое же, как и алгоритма случайного поиска. Если условие завершения не достигнуто, то происходит выбор рациональных режимов резания и периодичности восстановления с минимальными удельными затратами. Лучшие варианты выбираются для генерации новых вариантов режимов резания и периодичности восстановления много раз, в то время как варианты с высокими удельными затратами исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Применение генетических операторов позволяет получить новые варианты режимов резания и периодичностей восстановления для анализа с учетом предыдущих результатов поиска оптимальных значений, что значительно повышает производительность алгоритма оптимизации. После выбора родительских вариантов режимов резания и периодичностей восстановления части режимов резания обмениваются между собой. Части режимов резания и периодичности восстановления для обмена выбираются полностью случайно. Этот процесс применяется для 50 % лучших вариантов рациональных режимов резания.

Полученные таким образом новые варианты могут претерпевать внезапное случайное изменение. Этот процесс важен, потому что он добавляет варианты режимов резания и периодичностей восстановления, которые могут отсутствовать в родительских, и таким образом обеспечивается поиск глобального оптимума решения. Это происходит в 1 % случаев, иначе генетический алгоритм вырождается в алгоритм случайного поиска.

После выполнения условия завершения генетического алгоритма из оставшихся на момент завершения алгоритма вариантов выбирается вариант режимов резания и периодичности восстановления с минимальными удельными затратами. Этот вариант и будет результатом

работы системы оптимизации режимов резания.

Оценка периода стойкости режущего инструмента

Обобщенная функция надежности режущего инструмента [27] имеет пять параметров: \hat{a} – среднегеометрическое значение средних интенсивностей изнашивания по режущим инструментам; δ_a – среднеквадратическое отклонение логарифма среднегеометрического значения средних интенсивностей изнашивания по режущим инструментам, связанное с вариабельностью режущих свойств инструментов одной партии; $\sigma_{\Delta Y}$ – среднеквадратическое отклонение приращения износа на единицу наработки, связанное с вариабельностью твердости заготовок, вариабельностью величины припуска на обработку, стохастическим характером самого процесса износа; r – параметр обобщенной функции надежности режущего инструмента, связанный с наработкой режущего инструмента до разрушения; β – параметр обобщенной функции надежности режущего инструмента, связанный с вариабельностью наработки режущего инструмента до разрушения. Указанные параметры должны быть оценены по результатам эксплуатации инструмента на основе собранных статистических данных.

Параметры \hat{a} и r зависят от режима резания, при этом для учета нелинейного характера зависимости указанных параметров от параметров режимов резания и учета корреляции между параметрами режима резания v и S , S и h используются соответствующие полиномы, например,

$$\hat{a}(v, S, h, HB) = \exp[c_0 + c_1 \ln v + c_2 \ln^2 v + c_3 \ln^3 v + c_4 \ln S + c_5 \ln h + c_6 \ln v \cdot \ln S + c_7 \ln S \cdot \ln h + c_8 \ln(HB/200)];$$

$$r(v, S, h) = \exp[b_0 + b_1 \cdot \ln v + b_2 \cdot \ln^2 v + b_3 \cdot \ln^3 v + b_4 \cdot \ln S + b_5 \cdot \ln^2 S + b_6 \cdot \ln h + b_7 \cdot \ln v \ln S],$$

где c_0, \dots, c_8 и b_0, \dots, b_7 – коэффициенты, оцениваемые по статистическим данным; v – скорость резания, м/мин; S – подача, мм/об; h – глубина резания, мм; HB – твердость заготовки по Бринеллю.

Параметры δ_a , $\sigma_{\Delta Y}$ и β от режимов резания не зависят и описывают вариабельность (разброс) характеристик режущего инструмента

и обрабатываемых заготовок и специфику конкретного производства.

Расчет периода стойкости с использованием обобщенной стохастической модели отказов позволяет определить не только средний период стойкости, но и его вариабельность. С учетом вариабельности периода стойкости рассчитывается вероятность брака из-за внезапного отказа инструмента во время обработки.

Проверка технических и технологических ограничений

В ходе перебора режимов резания для каждого варианта происходит проверка на выполнение технических или технологических ограничений. Например, для токарной обработки при оптимизации режимов резания ограничения приведены в работе [14], а для случая фрезерной обработки – в работе [15].

Отдельно стоит выделить требования по качеству обрабатываемой поверхности, которое зависит от вибрации машинной части технологической системы. При этом уровень вибрации меняется по мере изнашивания режущего инструмента. Во время приработки режущего инструмента первоначальный уровень вибрации снижается до минимального значения в момент начала стадии нормального изнашивания режущего инструмента. По мере нормального изнашивания уровень вибрации увеличивается с небольшой скоростью. При переходе в стадию катастрофического изнашивания уровень вибрации начинает резко возрастать. Таким образом, уровень вибрации является не только ограничением для обеспечения качества обработанной поверхности, но и от него зависит момент восстановления режущего инструмента, что подробнее рассматривается на следующем этапе алгоритма оптимизации.

Оценку уровня вибрации машинной части технологической системы предлагается проводить с помощью имеющихся опытных данных по результатам предыдущей обработки различных деталей с использованием искусственной нейронной сети (ИНС). Типовая структура ИНС для прогнозирования вибрации машинной части технологической системы в виде многослойного персептрона представлена на рис. 1. Для увеличения скорости обучения ИНС используется модифицированный алгоритм обучения [27].

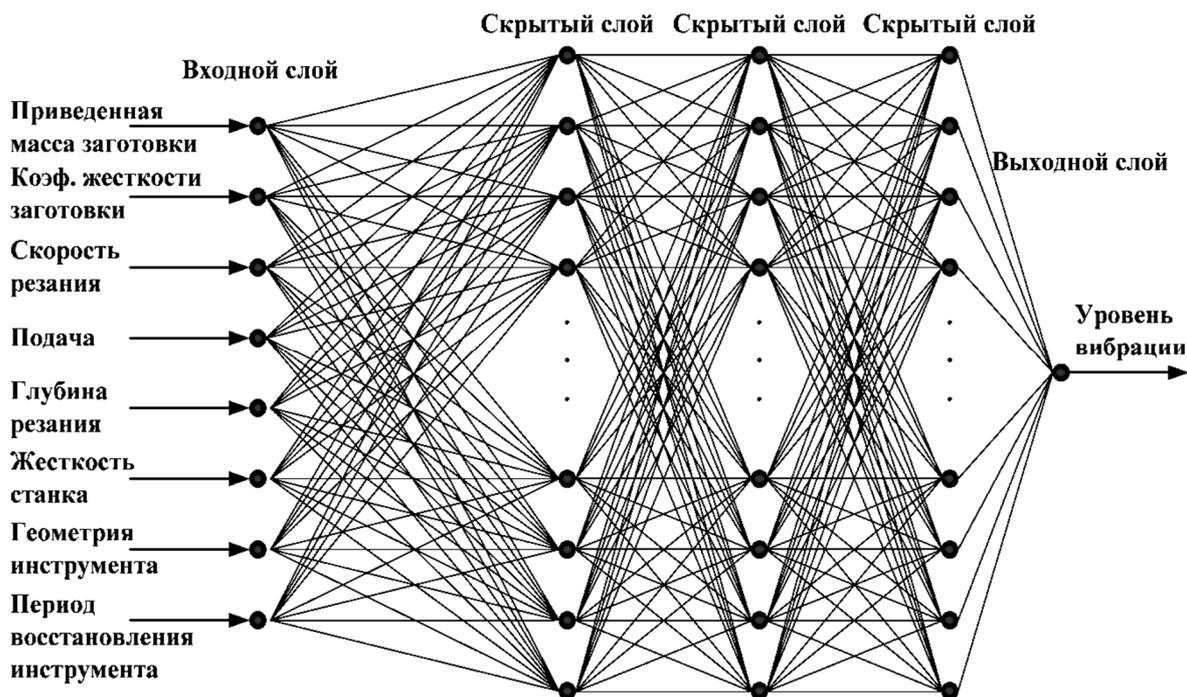


Рис. 1. Структура ИНС для оценки уровня вибрации машинной части технологической системы

На вход ИНС подается следующая техническая и технологическая информация:

- свойства обрабатываемой заготовки (приведенная масса заготовки, коэффициент жесткости);
- геометрия лезвийного инструмента (для токарной обработки это радиус при вершине, вылет резца; для фрезерной обработки это диаметр и длина фрезы, число зубьев);
- параметры используемого металлорежущего станка (жесткость станка);
- режимы резания, определенные технологическим процессом (подача, глубина резания, скорость резания, для фрезерной обработки дополнительно ширина резания);
- период восстановления инструмента.

Данная техническая и технологическая информация может быть получена из проектных решений и технологических документов, отражающих результаты технологической подготовки производства и детально описывающих технологический аспект производственного процесса.

Результатом работы ИНС будет уровень вибрации в момент периодического восстановления режущего инструмента.

Для каждого варианта режимов резания и периодичности восстановления инструмента, прошедшего проверку на технические и технологические ограничения, рассчитываются удельные затраты по формуле (1). Тот вариант

режимов резания и периодичности восстановления, который будет иметь минимальные удельные затраты, и будет выбран в конце работы генетического алгоритма в качестве оптимального.

Система адаптивного управления процессом резания с учетом вибрации машинной части технологической системы

Рассмотренный подход оптимизации режимов резания и периодичности восстановления режущих инструментов с учетом специфики процесса резания и факторов случайности при износе и разрушении режущих инструментов позволяет предложить систему адаптивного управления процессом резания с учетом вибрации машинной части технологической системы. Решение этой задачи становится возможным в связи с развитием систем управления и оснащением станков все более мощными системами числового программного управления (СЧПУ) класса PCNC-2 и выше. Применение в системе адаптивного управления методов искусственного интеллекта позволяет обеспечить предлагаемую систему способностью к обучению и адаптации, робастностью и способностью к развитию путем включения новых компонентов в состав системы управления.

За основу архитектуры системы адаптивного управления процессом резания взята схе-

ма с обычным контроллером, управляемым нейронной сетью [28]. В качестве обычного регулятора используется СЧПУ металлорежущего станка. Архитектура предложенной системы представлена на рис. 2.

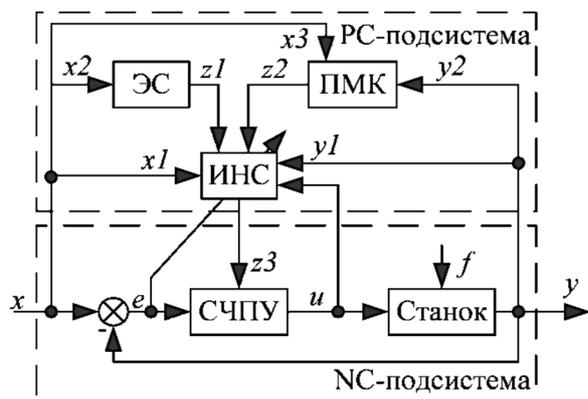


Рис. 2. Архитектура адаптивной системы управления процессами резания

Для построения системы адаптивного управления режимами резания СЧПУ станка должна удовлетворять следующим двум требованиям, приведенным в [29]:

1) иметь устройство дискретного ввода-вывода информации для связи с внешним оборудованием, через которое можно управлять станком, т. е. изменять во время его работы такие параметры, как подача и скорость резания;

2) обладать программой логики станка. Это означает, что пользователь имеет право самостоятельно разрабатывать и подключать в работу СЧПУ программу логики металлорежущего станка, обеспечивающую внешнее управление подачей и скоростью резания от персональной электронно-вычислительной машины (ПЭВМ).

На вход программно-методического комплекса (ПМК), обеспечивающего оптимизацию режимов резания и периодичности восстановления режущего инструмента, подается следующая техническая и технологическая информация:

- свойства обрабатываемого материала;
- свойства инструментального материала;
- размеры детали;
- параметры металлорежущего станка;
- требования к точности изготовления и шероховатости поверхности детали;
- геометрия режущего инструмента.

ПМК оптимизирует режимы резания, проверяя их на соответствие техническим и техно-

логическим ограничениям с использованием экспертной системы (ЭС).

Оптимальные режимы резания и периодичность восстановления режущего инструмента используются СЧПУ для управления металлорежущим станком. СЧПУ в соответствии со своей внутренней логикой формирует управляющие воздействия на приводы главного движения и подачи металлорежущего станка. Данные управляющие воздействия, а также косвенные результаты работы оборудования подаются на вход ИНС. В качестве косвенных результатов работы оборудования используется уровень вибрации в зоне резания.

В зависимости от вибрации машинной части технологической системы с учетом износа режущего инструмента ИНС ищет отклонения в работе металлорежущего станка от эталонной модели. Если будут обнаружены отклонения в работе станка от оптимального варианта, то ИНС через СЧПУ станка будет их компенсировать путем изменения режимов резания.

Для данной ИНС предложено использовать архитектуру нейро-нечеткой сети на базе алгоритма Сугэно 0-го порядка [28], в которой слои выполняют функции элементов системы нечеткого вывода, что позволило построить адаптивную нейро-нечеткую систему вывода.

Помимо этого, информация о наработке и износе лезвийного инструмента, оцененного по уровню вибрации, поступает в ПМК, в котором происходит самообучение на основе новых статистических данных.

Заключение

Применение методов искусственного интеллекта для анализа уровня вибрации машинной части технологической системы и оптимизации режимов резания и периодичности восстановления режущего инструмента позволит выявить резервы для повышения эффективности процесса резания, диагностировать состояние режущего инструмента в процессе обработки, собирать статистические данные для уточнения стойких зависимостей используемых режущих инструментов в режиме самообучения и разработать адаптивную и робастную систему управления процессом резания.

Литература

1. Анцев В.Ю., Васин С.А., Долгов Д.В. Информационная поддержка в системе инструментального обеспечения машиностроительного предприятия // Автоматизация и современные технологии. 2002. № 2. С. 3-9.

2. Ademujimi T.T., Brundage M.P., Prabhu V.V. A review of current machine learning techniques used in manufacturing diagnosis // IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2017. Vol. 513. P. 407-415.
3. Aghazadeh F., Tahan A., Thomas M. Tool condition monitoring using spectral subtraction and convolutional neural networks in milling process // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 98(9-12). P. 3217-3227.
4. Orak S., Arapoğlu R.A., Sofuoğlu M.A. Development of an ANN-based decision-making method for determining optimum parameters in turning operation // Soft Computing. 2018. Vol. 22(18). P. 6157-6170.
5. Филоненко С.Ф. Влияние износа режущего инструмента при контролируемой глубине резания на акустическую эмиссию // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. № 6(9). С. 47-50.
6. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Селезнев А.Е. Виброакустический мониторинг лезвийной обработки заготовок из закаленной стали // Вестник МГТУ Станкин. 2018. № 1 (44). С. 23-30.
7. Experimental and analytical research on relationship between tool life and vibration in cutting process / S. Ghorbani, V.V. Kopilov, N.I. Polushin, V.A. Rogov // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018. Vol. 18(3). P. 844-862.
8. Анцев А.В., Янов Е.С., Данг Ч.Х. Зависимость вынужденных колебаний машинной части технологической системы в процессе резания от износа режущего инструмента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 6. С. 263-272.
9. Karaguzel U., Budak E. Investigating effects of milling conditions on cutting temperatures through analytical and experimental methods // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 262. P. 532-540.
10. Ință M., Muntean A. Researches regarding introducing temperature as a factor in cutting tool wear monitoring // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 178. 01013. DOI: 10.1051/mateconf/201817801013.
11. Мартинов Г.М., Григорьев А.С. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки // СТИН. 2012. № 12. С. 23-27.
12. Zhang B., Shin Y.C. A multimodal intelligent monitoring system for turning processes // Journal of Manufacturing Processes. 2018. Vol. 35. P. 547-558.
13. Tool wear monitoring using an online, automatic and low cost system based on local texture / M.T. García-Ordás, E. Alegre-Gutiérrez, R. Alaiz-Rodríguez, V. González-Castro // Mechanical Systems and Signal Processing. 2018. Vol. 112. P. 98-112.
14. Нгуен В.К., Ямников А.С. Методология оптимизации режимов резания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 1 (291). С. 56-63.
15. Аверченков А.В., Кукло Е.Ю., Терехов М.В. Математическое моделирование процедуры определения себестоимости операций при фрезеровании // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2014. Т. 20. № 3. С. 543-550.
16. Salonitis K., Kolios A. Reliability assessment of cutting tool life based on surrogate approximation methods // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 71. P. 1197-1208.
17. Patino Rodriguez C.E., Souza G.F.M. Reliability concepts applied to cutting tool change time // Reliability Engineering and System Safety. 2010. Vol. 95. P. 866-873.
18. Vagnorius Z., Rausand M., Sørby K. Determining optimal replacement time for metal cutting tools // European Journal of Operational Research. 2010. Vol. 206. P. 407-416.
19. Анцев В.Ю., Иноземцев А.Н., Пасько Н.И. Управление ресурсом режущего инструмента в зависимости от производственных ситуаций // Известия Тульского государственного университета. Серия Технологическая системотехника. 2003. Вып. 1. С 18-29.
20. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
21. Sandvik Coromant. Руководство по металлообработке. Стокгольм: AB Sandvik Coromant, 2006. 564 с.
22. Анিকেева О.В., Ивахненко А.Г., Пузанов В.Е. Построение моделей схемно-параметрической надежности металлорежущих станков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 5 (50). С. 148-155.
23. Козлов В.И. Анализ влияния относительных колебаний на износ лезвийного инструмента // СТИН. 2008. № 1. С. 9-14.
24. Влияние механизма контактного взаимодействия на износ передней поверхности инструмента / Ю.Н. Поляничков, С.М. Пахтусов, В.А. Солодков и др. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 9. С. 42-44.
25. Обобщенная стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение/ Н.И. Пасько, А.В. Анцев, Н.В. Анцева, С.В. Сальников. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 174 с.
26. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия Телеком, 2006. 452 с.
27. Пат. 2566979 Российская Федерация, МПК G06N3/08. Способ обучения искусственной нейронной сети / В.С. Сальников, В.Ч. Хоанг, А.В. Анцев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». № 2014150877; заявл. 15.12.2014; опубл. 27.10.2015, Бюл. № 30.
28. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. М: Горячая Линия-Телеком, 2004. 143 с.
29. Хоанг В.Ч. Повышение эффективности точения деталей из труднообрабатываемых материалов на основании температурно-силового мониторинга: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / Хоанг Ван Чи. Тула, 2016. 136 с.

Поступила 24.03.2020; принята к публикации 17.06.2020

Информация об авторах

Анцев Александр Витальевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения», Тульский государственный университет (300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92), e-mail: a.antsev@yandex.ru
Янов Евгений Сергеевич – канд. техн. наук, Тульский государственный университет (300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92), e-mail: dexaik@mail.ru

Данг Чонг Хыу – аспирант кафедры «Технология машиностроения», Тульский государственный университет (300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92), e-mail: danghuutrong@gmail.com

CUTTING MODES OPTIMIZATION TAKING INTO ACCOUNT VIBRATION LEVEL BASED ON APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

A.V. Antsev, E.S. Yanov, T.H. Dang

Tula State University, Tula, Russia

Abstract: the article considers the problem of cutting modes optimization on the example of turning and milling using artificial intelligence methods. As a criterion of optimality, we propose to use unit costs - a variable part of the cost of processing, which can vary in time units, which ensures optimization in terms of productivity, or in monetary units, which ensures optimization in terms of cost. The calculated optimal values limit the area of rational cutting conditions. In the optimization process using the generalized stochastic model of failures, the variability (spread) of the tool life of cutting tool is taken into account. We propose to search the cutting modes and the preventive maintenance period of the cutting tool using the genetic algorithm. Each considered option of cutting mode is checked for compliance with technical or technological restrictions. In this case, special attention is paid to vibration during the cutting process, the level of which changes as the cutting tool wears out. We propose to evaluate the level of vibration using an artificial neural network in the form of a multilayer perceptron. The considered approach to optimizing the cutting modes and preventive maintenance period of the cutting tool, taking into account the specifics of the cutting process and random factors during wear and destruction of cutting tools, allowed us to propose an adaptive control system for the cutting process taking into account the vibration of the machine part of the technological system. The architecture of the adaptive control system for the cutting process is based on a circuit with a conventional controller controlled by a neural network in the form of a neuro-fuzzy network based on the zero-order Sugeno algorithm. The use of artificial intelligence methods to analyze the vibration level of the machine part of the technological system and optimize the cutting modes and the preventive maintenance period of the cutting tool, allows us to identify reserves for increasing the efficiency of the cutting process, diagnose the condition of the cutting tool during machining and develop an adaptive and robust cutting process control system

Key words: cutting mode, optimization, unit costs, vibration, genetic algorithm, multilayer perceptron, neuro-fuzzy network, adaptive control

Acknowledgments: the study was funded by RFBR in the framework of the research project no. 18-38-00849

References

1. Antsev V.Yu., Vasin S.A., Dolgov D.V. "Information assistance in the tool assurance system on the machine-building plant", *Automation and Modern Technology (Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii)*, 2002, no. 2, pp. 3-9.
2. Ademujimi T.T., Brundage M.P., Prabhu V.V. "A review of current machine learning techniques used in manufacturing diagnosis", *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2017, vol. 513, pp. 407-415.
3. Aghazadeh F., Tahan A., Thomas M. "Tool condition monitoring using spectral subtraction and convolutional neural networks in milling process", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 98(9-12), pp. 3217-3227.
4. Orak S., Arapoğlu R.A., Sofuoğlu M.A. "Development of an ANN-based decision-making method for determining optimum parameters in turning operation", *Soft Computing*, 2018, vol. 22(18), pp. 6157-6170.
5. Filonenko S.F. "The effect of wear of a cutting tool with a controlled depth of cut on the acoustic emission", *Eastern-European Journal of Modern Technologies (Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy)*, 2015, no 6(9), pp. 47-50.
6. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Seleznev A.E. "Vibroacoustic monitoring of cutting edge machining of hardened steel", *Bulletin of MSTU Stankin (Vestnik MGTU Stankin)*, 2018, no. 1(44), pp. 23-30.
7. Ghorbani S., Kopilov V.V., Polushin N.I., Rogov V.A. "Experimental and analytical research on relationship between tool life and vibration in cutting process", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 18(3), pp. 844-862.
8. Antsev A.V., Yanov E.S., Dang T.H. "Dependence of forced vibrations of the machine part of the technological system in the process of cutting on wear of the cutting tool", *Bulletin of Tula State University. Technical Science (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki)*, 2019, no. 6, pp. 263-272.
9. Karaguzel U., Budak E. "Investigating effects of milling conditions on cutting temperatures through analytical and experimental methods", *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 262, pp. 532-540.
10. Ință M., Muntean A. "Researches regarding introducing temperature as a factor in cutting tool wear monitoring", *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 178, 01013. DOI: 10.1051/mateconf/201817801013.
11. Martinov G.M., Grigor'ev A.S. "Diagnostics of cutting tools and prediction of their life in numerically controlled systems", *STIN*, 2012, no. 12, pp. 23-27.
12. Zhang B., Shin Y.C. "A multimodal intelligent monitoring system for turning processes", *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 35, pp. 547-558.
13. García-Ordás M.T., Alegre-Gutiérrez E., Alaiiz-Rodríguez R., González-Castro V. "Tool wear monitoring using an online, automatic and low cost system based on local texture", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, vol. 112, pp. 98-112.
14. Nguyen V.C., Yamnikov A.S. "Methodology for optimization of cutting conditions", *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology (Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii)*, 2012, no. 1 (291), pp. 56-63.

15. Averchenkov A.V., Kuklo E.Yu., Terekhov M.V. "Mathematic modeling of the procedures to determine prime cost of milling operations" *Bulletin of Tambov State Technical University (Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 20, no. 3, pp. 543-550.
16. Salonitis K., Kolios A. "Reliability assessment of cutting tool life based on surrogate approximation methods", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 71, pp. 1197-1208.
17. Patino Rodriguez C.E., Souza G.F.M. "Reliability concepts applied to cutting tool change time", *Reliability Engineering and System Safety*, 2010, vol. 95, pp. 866-873.
18. Vagnorius Z., Rausand M., Sørby K. "Determining optimal replacement time for metal cutting tools", *European Journal of Operational Research*, 2010, vol. 206, pp. 407-416.
19. Antsev V.Yu., Inozemtsev A.N., Pas'ko N.I. "Resource management of a cutting tool depending on production situations" *Bulletin of Tula State University. Series Technological system equipment (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnologicheskaya sistemotekhnika)*, 2003, issue 1, pp. 18-29.
20. Bobrov V.F. "Fundamentals of the theory of metal cutting" ("Osnovy teorii rezaniya metallov"), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 344 p.
21. Sandvik Coromant "Metalworking guide", Stockholm, AB Sandvik Coromant, 2006, 564 p.
22. Anikeeva O.V., Ivakhnenko A.G., Puzanov V.E. "The construction of diagrammatical-parametric reliability models of metal cutting machine tools", *Bulletin of South-West State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2013, no. 5 (50), pp. 148-155.
23. Kozlov V.I. "Analysis of the influence of relative fluctuations on the wear of a blade tool", *STIN*, 2008, no 1. pp. 9-14.
24. Polyanchikov Yu.N., Pakhtusov S.M., Solodkov V.A. et al. "The influence of the mechanism of contact interaction on the wear of the front surface of the tool", *Bulletin of Volgograd State Technical University (Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2004, no. 9, pp. 42-44.
25. Pas'ko N.I., Antsev A.V., Antseva N.V., Sal'nikov S.V. "Generalized stochastic model of cutting tool failures and its application" ("Obobshchennaya stokhasticheskaya model' otkazov rezhushchego instrumenta i eye primeneniye"), Tula, Publishing House of TSU, 2016, 174 p.
26. Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L. "Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems" ("Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy"), trans. from polish by I.D. Rudinskiy, Moscow, Goryachaya Liniya Telecom, 2006, 452 p.
27. Sal'nikov V.S., Hoang V.Ch., Antsev A.V. "Training method of artificial neural network" ("Sposob obucheniya iskusstvennoy neyronnoy seti"), patent 2566979 Rus. Federation: IPC G06N3 / 08.; byul. 30, 2 p.
28. Uskov A.A., Kuz'min A.V. "Intelligent management technology. Artificial neural networks and unclear logic" ("Intellektual'nye tekhnologii upravleniya. Iskusstvennyye neyronnye seti i nechetkaya logika"), Moscow, Goryachaya Liniya Telecom, 2004, 143 p.
29. Hoang V.Ch. "Improving the efficiency of turning parts from difficult materials based on temperature and power monitoring" ("Povyshenie effektivnosti tocheniya detaley iz trudnoobrabatyvayemykh materialov na osnovanii temperaturno-silovogo monitoringa"), Cand. tech. sciences diss., TSU, Tula, 2016, 136 p.

Submitted 24.03.2020; revised 17.06.2020

Information about the authors

Aleksandr V. Antsev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Tula State University (92 Lenina ave., Tula 300012, Russia), e-mail: a.antsev@yandex.ru

Evgeniy S. Yanov, Cand. Sc. (Technical), Tula State University (92 Lenina ave., Tula 300012, Russia), e-mail: dexaik@mail.ru

Trong H. Dang, Graduate student, Tula State University (92 Lenina ave., Tula 300012, Russia), e-mail: danghuutrong@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНДЕНТОРА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В.П. Федоров¹, О.Н. Кириллов², М.Н. Нагоркин¹, Е.В. Ковалева¹

¹Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлены результаты исследований параметров контактного взаимодействия индентора с поверхностью при обработке поверхностного пластического деформирования (ППД). Рассматривались методы обработки ППД наружных цилиндрических поверхностей образцов из стали 45 различной твердости алмазным выглаживанием (индентор – алмаз синтетический поликристаллический) и накатыванием шариком (индентор – шарик из стали ШХ15) одноинденторными инструментами упругого действия. Исследования проводились методом физического моделирования процессов на авторской экспериментальной установке. Исследовались зависимости параметров контактного взаимодействия инденторов с поверхностью (сил сопротивления при трогании индентора с места и в установившемся режиме ППД, диапазона колебаний сил при обработке, коэффициентов сопротивления при трогании индентора с места и в установившемся режиме, а также некоторых производных коэффициентов) от условий ППД: метода предварительной обработки поверхности, шероховатости поверхности после предварительной обработки, радиуса индентора, твердости обрабатываемой поверхности, силы воздействия на неё индентора, скорости обработки и смазки. Экспериментальные исследования проводились по методике активного эксперимента. Исследовалось несколько схем обработки ППД, отличающихся методом предварительной обработки поверхностей образцов; троганием индентора с места до различных конечных скоростей; материалами индентора; наличием смазки на поверхности. В результате статистической обработки экспериментальных данных получены зависимости параметров контактного взаимодействия от факторов обработки ППД, позволяющие определить как диапазоны варьирования, так и вероятность их обеспечения в заданном интервале в зависимости от факторов обработки ППД. С помощью разработанного программного обеспечения получены адекватные физико-статистические модели для количественной оценки исследуемых параметров контактного взаимодействия от конкретных условий ППД. В заключении представлены основные выводы по результатам исследований

Ключевые слова: алмазное выглаживание, накатывание, шероховатость, индентор, контактное взаимодействие, сила сопротивления, пластическая деформация

Введение

В машиностроении распространёнными методами отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД) являются алмазное выглаживание (АВ) неподвижным индентором и накатывание сферическим индентором (например, шариком из стали ШХ15). Несмотря на, казалось бы, исчерпывающую изученность этих процессов для расчетов ряда показателей, например, сил обработки, в научной и справочной литературе сложно найти информацию о характеристиках контактного взаимодействия инденторов инструментов ППД с обрабатываемой поверхностью, в частности, коэффициенте сопротивления пластической деформации материала обрабатываемой детали и др.

Имеющиеся сведения [1 и др.] о величинах коэффициента сопротивления носят общий и

приблизённый характер. Так, отсутствуют зависимости, характеризующие влияние на этот параметр шероховатости предварительно обработанной поверхности, твёрдости материала детали, режимов обработки. В статье представлены результаты исследований, позволившие получить физико-статистические модели для количественной оценки влияния факторов обработки детали на характеристики контактного взаимодействия индентора с поверхностью детали, в частности, на коэффициент сопротивления относительного движения индентора с поверхностью.

Постановка задачи

Формирование поверхностного слоя детали при обработке ППД АВ или накатыванием зависит от большого числа факторов [1, 2, 3 и др.], основными из которых являются радиус индентора r и сила Q воздействия индентора на поверхность при обработке. Эти факторы, а также величина шероховатости предварительно

обработанной поверхности (например, $Ra_{уцх}$) определяют величину фактического давления в зоне контакта индентора с поверхностью.

При технологической подготовке производства разработка эффективных технологических процессов связана с выбором методов обработки ППД из нескольких альтернативных. Критерием, определяющим такой выбор, могут служить энергетические затраты (механическая и тепловая энергия) на формирование требуемых параметров поверхностного слоя, которые необходимо при прочих равных условиях поддерживать на максимальном уровне.

На рис. 1 представлена схема обработки поверхности цилиндрической детали инструментом ППД упругого действия [4] со сферическим индентором (алмазный индентор, шарик). В идеальном случае (без учета динамических процессов) основными силовыми факторами обработки являются силы $P_Y = -Q$ и $P_Z = -F_c$.

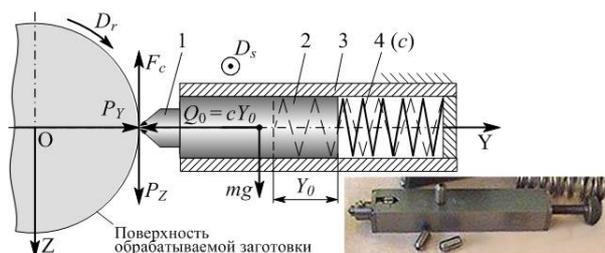


Рис. 1. Схема обработки цилиндрической заготовки методом ППД инструментом упругого действия: 1 – вставка с индентором; 2 – ползун; 3 – корпус инструмента; 4 – пружина сжатия

Для оценки затрат механической энергии при обработке предлагается учитывать удельную мощность N , кВт, необходимую для формирования параметров качества поверхностного слоя при ППД:

$$N = \frac{F_c Z}{t} = 0,16 \cdot 10^{-4} f_c Q V, \quad (1)$$

где $F_c = f_c Q$ – сила сопротивления ($F_c = -P_Z$), Н; Z – путь индентора инструмента по обрабатываемой поверхности, м; t – время обработки, с; f_c – коэффициент сопротивления относительного движения, вызванный пластической деформацией поверхностного слоя обрабатываемой детали; Q – сила ППД ($Q = -P_Y$), Н; V – скорость обработки, м/мин.

В ряде работ энергозатраты на формообразование поверхности оцениваются по потребляемой энергии электродвигателей приводов движения инструмента. Такой подход приводит к погрешностям оценки энергозатрат из-за по-

терь энергии в кинематической цепи технологического оборудования, нестабильности настроек, влияния смазки и других факторов, которые сложно учесть.

Предлагаемая оценка по зависимости (1) относится непосредственно к микрообъёму формирования поверхности при ППД и является предпочтительной. Входящие в неё силовые факторы можно определить, например, методом динамометрирования процесса обработки или по физической модели.

В процессе обработки ППД значение давления индентора на поверхность соответствует значению предела текучести материала обрабатываемой детали. В процессе относительного скольжения индентор инструмента вдавливаются в поверхность на некоторую глубину, материал поверхности детали деформируется и наблюдается его пластическое течение в обход индентора. Силовые характеристики такого взаимодействия могут определяться коэффициентом сопротивления f_c относительного перемещения индентора и поверхности. Пример рассмотрения этого коэффициента можно найти в разных источниках [5 и др.].

Очевидно, что величина f_c должна изменяться в зависимости от условий обработки, включая факторы $Ra_{уцх}$, Q , r . Значения коэффициента f_c для различных условий и режимов обработки практически отсутствуют в научной литературе, что определило необходимость проведения соответствующих экспериментальных исследований.

Теория упругости, пластичности и контактного взаимодействия позволяет с достаточной точностью определить значение коэффициента f_c при заданных условиях обработки.

В работе [5] показано, что сила сопротивления возрастает от 0 до F_{cmax} , а затем падает до значения F_c (рис. 2). F_{cmax} – это сила трогания индентора с места; t_{mp} – время трогания индентора с места; F_c – сила сопротивления при движении индентора относительно обрабатываемой поверхности, значение которой в реальных условиях колеблется в пределах ΔF_c .

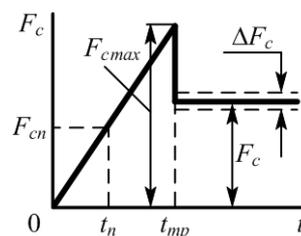


Рис. 2. Силы сопротивления, возникающие при относительном скольжении контактирующих тел [5]

Коэффициенты сопротивления обозначаются следующим образом: f'_c – коэффициент сопротивления при трогании индентора с места; f_c – коэффициент сопротивления при движении индентора с постоянной скоростью, вызванный пластической деформацией поверхностного слоя заготовки и адгезионными свойствами контакта «индентор – поверхность обрабатываемой детали».

Важными характеристиками процесса взаимодействия индентора с поверхностью являются параметры следа остаточной деформации поверхностного слоя обработанной детали [6]. Он имеет форму канавки (рис. 3), сечение которой копирует профиль индентора. Глубина Y канавки зависит от значений факторов $Ra_{исх}$, r , Q , V . Глубина Y следа остаточной деформации в общем случае является суммой величин ΔY_0 и ΔY_1 .

Величиной ΔY_0 можно технологически управлять, например, в процессе обработки ППД АВ, что позволяет восстанавливать размеры изношенных поверхностей прецизионных деталей соединений.

Для перечисленных характеристик было решено получить физико-статистические модели, позволяющие прогнозировать их значения в зависимости от технологических факторов с достаточной для практических целей точностью [3, 7 и др.].

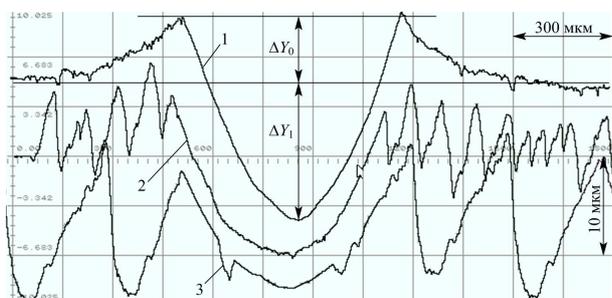


Рис. 3. Профили сечения следов индентора в очагах пластической деформации при АВ: 1 – после шлифования, $Ra_{исх} = 0,2$ мкм; 2 – после шлифования, $Ra_{исх} = 1,75$ мкм; 3 – после точения композитом 10, $Ra_{исх} = 6,9$ мкм

Метод исследования

Для получения физико-статистических моделей осуществлялось физическое моделирование процессов ППД методами АВ и накатывания шариком. Экспериментальные исследования проводились на испытательном стенде (рис. 4): 1) при трогании индентора с места до скоростей обработки 10 – 50 м/мин; 2) при трогании индентора с места до скорости скольжения, изменяющейся от 0 до 10^{-2} м/мин.

Образец 3 (кольцо) с исследуемой поверхностью П (рис. 4) устанавливается на вал 1 и крепится с помощью гайки 6. На образец 3 ставится держатель 4 индентора. Полученный узел устанавливается в кассету испытательного стенда в конических подшипниках 2, держатель 4 фиксируется штифтом 14. На алмазный выглаживатель 5 (рис. 4, А) в держателе 4 динамометра 9 через шарики 8 передается нагрузка Q через систему промежуточных элементов 10, 11, 12 и шарик 13. Величина Q регистрируется тензометрическими датчиками 7. Величина угловой скорости поддерживается постоянной или изменяется по синусоидальному закону в диапазоне от 0 до ω (н) [4]. Тензометрическая балка равного сопротивления 15 с наклеенными датчиками 16 и штифт 14 обеспечивают регистрацию силы F_0 , пропорциональной силе F_c .

При исследовании характеристик контактного взаимодействия сферического подвижного индентора 5 с поверхностью П образца (рис. 4, В) в процессе накатывания нагрузка Q передается через элементы 10, 11, 13 [4].

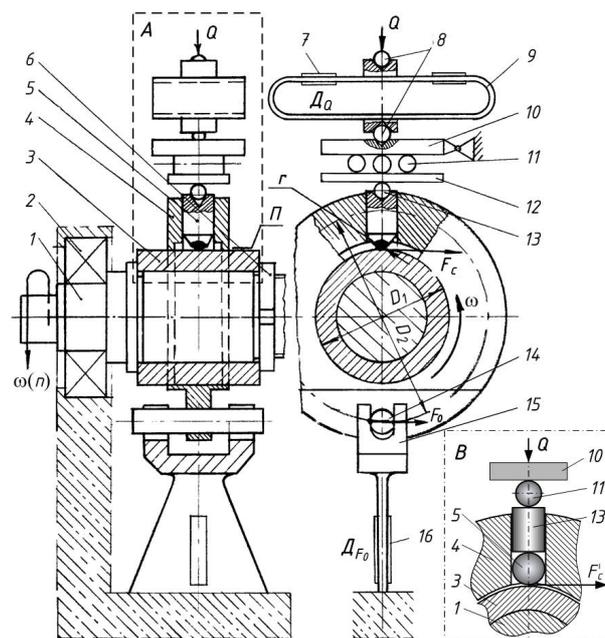


Рис. 4. Физическое моделирование взаимодействия индентора с обрабатываемой поверхностью при ППД

На рис. 5 представлен общий вид испытательного стенда для физического моделирования процессов ППД методами АВ или накатыванием шариками.

На этом же стенде (рис. 4, 5) с применением специального низкоскоростного привода вращения осуществлялось физическое моделирование процесса взаимодействия индентора с обрабатываемой поверхностью при трогании с

места до скорости скольжения 10^{-2} м/мин. На рис. 6 представлена схема установки инденторов и измерения силы F_0 .

Регистрация характеристик процесса взаимодействия инденторов с поверхностью осуществлялась методом тензометрических измерений с использованием датчиков Д, усилителя ТА-5 и блока аппаратно-программного интерфейса «Осциллограф» [4].

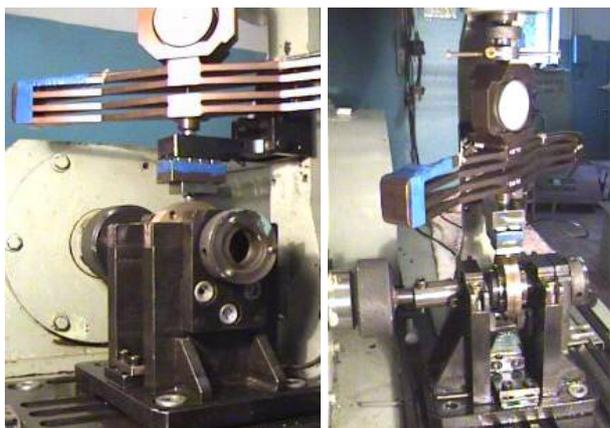


Рис. 5. Установка для физического моделирования процесса взаимодействия индентора с поверхностью при алмазном выглаживании или накатывании шариком

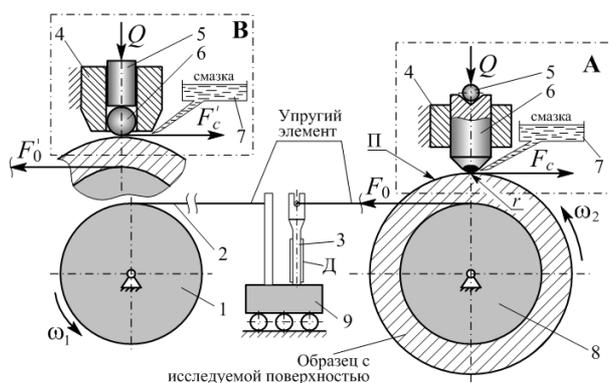


Рис. 6. Схема измерения силовых факторов контактного взаимодействия индентора 6 с поверхностью П при обработке ППД АВ (А) и накатыванием шариком (В) в момент трогания индентора: 1 – ведущий шкив низкоскоростного привода; 2 – тросик; 3 – тензобалка равного сопротивления; 4 – направляющие элементы; 5 – передаточные элементы нагрузки; 6 – инденторы; 7 – источники дозированной смазки; 8 – ведомый шкив; 9 – каретка

В ходе экспериментов исследовалось влияние следующих факторов:

– $Ra_{исх} = 0,2 - 4$ мкм – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости от средней линии поверхности после предварительной обработки;

– $r = 2 - 3,5$ мм – радиус индентора (для АВ);

– $Q = 150 - 320$ Н – сила воздействия индентора на обрабатываемую поверхность;

– $T = 1,8 - 5,4$ ГПа – твёрдость поверхности обрабатываемого образца из стали 45;

– V – скорость движения индентора относительно поверхности образца, м/мин;

– наличие смазки в зоне контакта.

Проводилось пять серий экспериментов:

1 – индентор сферический алмазный синтетический поликристаллический (АСПК), поверхность образца предварительно обработана точением композитом 10, трогание индентора с места до скорости $V = 10^{-2}$ м/мин;

2 – то же самое при трогании индентора с места до скорости $V = 10 \dots 50$ м/мин;

3 – индентор АСПК, предварительно шлифованная поверхность образца [8], трогание индентора с места до $V = 10^{-2}$ м/мин;

4 – индентор сферический подвижный из стали ШХ15, поверхность образца обработана точением композитом 10, трогание индентора с места до $V = 10^{-2}$ м/мин;

5 – то же самое при трогании индентора с места до скорости $V = 10 \dots 50$ м/мин.

В качестве смазки использовалось масло «Индустриальное И-30».

Кроме характеристик контактного взаимодействия F_{cmax} , F_c , ΔF_c , f_c , f'_c , ΔY_0 , ΔY_1 рассматривались также принятые коэффициенты:

– $k_1 = F_{cmax} / F_c$ – коэффициент, показывающий во сколько раз сила трогания F_{cmax} больше средней силы F_c сопротивления движению индентора;

– $k_2 = \Delta Y_1 / Rmax$ – коэффициент, характеризующий отношение величины вдавливания индентора относительно линии вершин исходного микропрофиля поверхности к максимальной высоте его микронеровностей $Rmax$.

Моделирование контактного взаимодействия инденторов с обрабатываемой поверхностью

Анализ интервалов варьирования параметров силового взаимодействия индентора с обрабатываемой поверхностью при трогании до скорости 10^{-2} м/мин показывает (рис. 7), что они изменяются в широких пределах. Средняя сила F_c сопротивления материала при движении индентора изменяется от 16 до 63 Н, а коэффициент сопротивления движению f_c – от 0,07 до 0,25. Колебания силы сопротивления ΔF_c в установившемся режиме незначительны.

Процесс взаимодействия индентора с поверхностью носит устойчивый характер, на что

указывает высокая вероятность нахождения характеристик F_{cm}, f_c, f'_c, k_1 в δ -% интервале от их среднего значения [4]. Например, при $\delta = 20\%$ вероятность отклонения от среднего значения исследуемых характеристик \bar{Y} составляет $P(|Y| \leq (\bar{Y} \pm 0,2\bar{Y})) = 0,82$.

В процессе пластической деформации поверхности под воздействием алмазного индентора (рис. 8) наблюдается вспучивание поверхности на величину ΔY_0 относительно линии выступов исходного микропрофиля и вдавливание поверхности на величину ΔY_1 . Значения этих величин ΔY_0 и ΔY_1 зависят от твёрдости материала обрабатываемой детали, от высотных параметров шероховатости поверхности после предварительной обработки и от силовых факторов выглаживания.

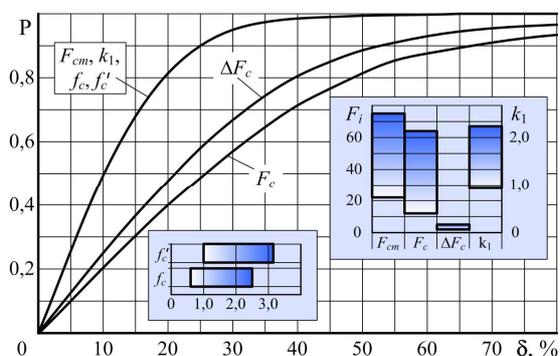


Рис. 7. Интервалы управления и вероятность P нахождения в симметричном δ -% интервале характеристик контактного взаимодействия «индентор АСПК – сталь 45» при трогании индентора с места до скорости 10^{-2} м/мин

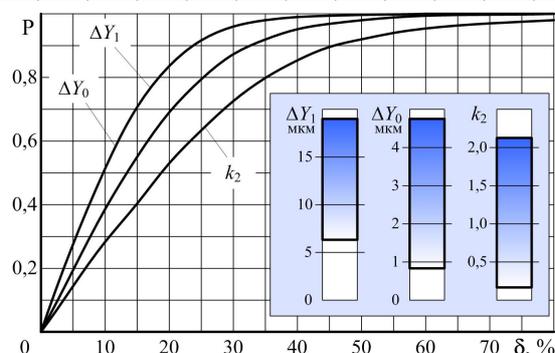
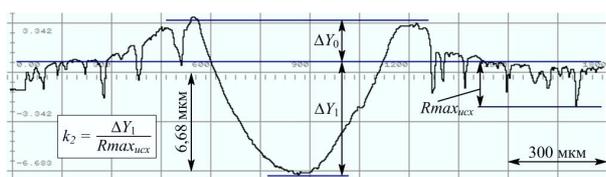


Рис. 8. Профиль сечения очага пластической деформации поверхности под воздействием алмазного индентора, интервалы и вероятность P управления её параметрами в заданном интервале ($\pm \delta Y_i$)

Для экспериментов серии 1 величина ΔY_0 колеблется в пределах от 0,8 до 4,75 мкм, а величина ΔY_1 от 6,5 до 19 мкм (рис. 8). Значение коэффициента k_2 находится в пределах от 0,2 до 2,2. Вероятность формирования значений параметра ΔY_0 ниже, чем вероятность для параметра ΔY_1 (рис. 8). Это объясняется тем, что на формирование величины ΔY_0 большее влияние оказывает исходная шероховатость поверхности, которая носит случайный характер. То же можно сказать про параметр k_2 – на его формирование влияет случайная величина $R_{max_{исх}}$.

Аналогичные результаты получены для экспериментов серии 2 при трогании индентора до скорости 10 – 50 м/мин (рис. 9).

Коэффициент сопротивления f_c при установившемся относительном движении индентора изменяется в пределах от 0,2 до 0,45.

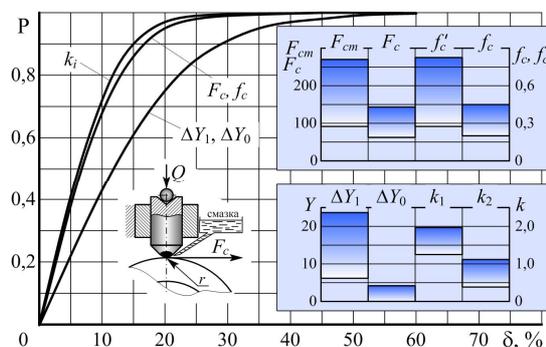


Рис. 9. Интервалы изменения характеристик процесса АВ и вероятность обеспечения их значений в регламентируемом интервале ($\pm \delta Y_i$)

Сравнение полученных данных с предыдущими показывает, что при АВ коэффициент сопротивления f_c и средняя сила F_c сопротивления пластической деформации увеличиваются с ростом скорости. Для диапазона скоростей 10 – 50 м/мин вероятность обеспечения силовых факторов выглаживания высока ($P = 0,85 - 0,9$ при $\delta = 0,15$). Величина ΔY_0 остаётся примерно на том же уровне. Коэффициент k_2 с увеличением скорости снизился и изменяется в пределах от 0,8 до 1,2.

Таким образом, при восстановлении изношенных поверхностей деталей для увеличения высоты ΔY_0 вспучивания материала поверхности детали и глубины ΔY_1 вдавливания индентора обработку АВ рекомендуется проводить с низкими скоростями обработки.

Аналогичные исследования проведены для АВ предварительно шлифованных поверхностей при трогании индентора до скорости $V = 10^{-2}$ м/мин (эксперименты серии 3). Принципиальных различий между результатами проведенных

экспериментов и проведенных ранее не установлено. Имеются различия в числовых значениях рассматриваемых характеристик и вероятности обеспечения значений сил сопротивления.

Накатывание поверхностей деталей инструментами ППД с шариковыми инденторами получило большое распространение, а данных по ряду характеристик контактирования индентора с обрабатываемой поверхностью имеется недостаточно. В связи с этим в экспериментах серий 4 и 5 исследовались параметры контактного взаимодействия подвижного сферического стального индентора с поверхностью деталей из стали 45. Индентор представлял собой шарик радиусом $r = 3$ мм из стали ШХ15.

На профилограмме поверхности (рис. 10) с исходной шероховатостью $Ra_{исх} = 2,8$ мкм видно, что след индентора представляет собой канавку с поперечным сечением в виде дуги окружности глубиной ΔY_1 .

Интервалы изменения характеристик контактного взаимодействия отличаются для случаев трогания индентора до скорости $V = 10^{-2}$ м/мин (рис. 10 б) и до скорости $V = 10 - 50$ м/мин (рис. 10 в).

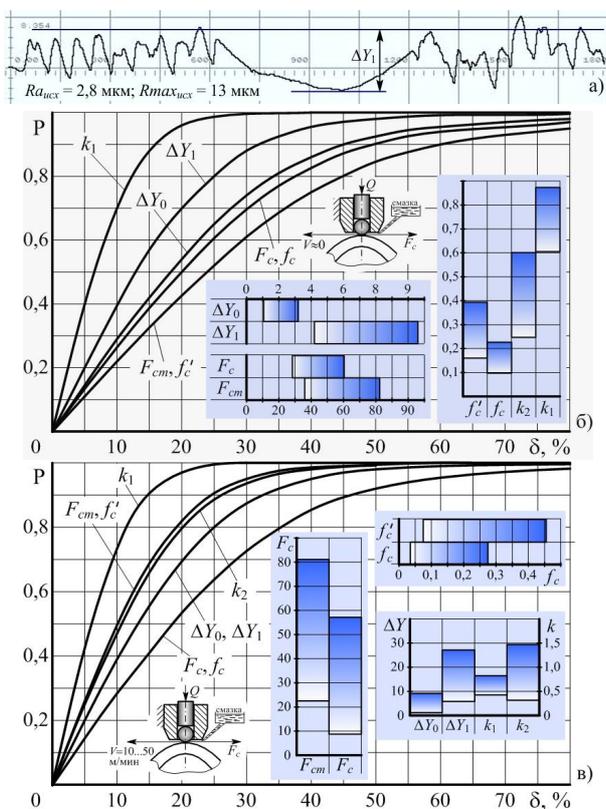


Рис. 10. Интервалы и вероятность обеспечения значений характеристик контактного взаимодействия сферического индентора (ШХ15) с поверхностью при обработке ППД: а – типовая профилограмма; б – скорость $V \approx 0$ (трогание с места); в – скорость $V = 10 - 50$ м/мин

Для случая $V = 10^{-2}$ м/мин коэффициент сопротивления f_c изменяется от 0,1 до 0,22, а во втором случае от 0,04 до 0,275. Пропорционально изменяется сила сопротивления F_c . Коэффициент сопротивления f'_c изменяется в более широких пределах – от 0,18 до 0,39 при трогании индентора до скорости $V = 10^{-2}$ м/мин и от 0,08 до 0,46 при трогании индентора до скорости $V = 10 - 50$ м/мин.

Сравнение полученных результатов с результатами АВ (рис. 7, 9) показывает, что при АВ для случая трогания индентора с места до скорости $V = 10^{-2}$ м/мин коэффициенты сопротивления ниже, по сравнению с накатыванием шариком ($f_c = 0,07 - 0,25$; $f'_c = 0,1 - 0,31$), а для скоростей $V = 10 - 50$ м/мин коэффициенты сопротивления имеют большие диапазоны изменения значений ($f_c = 0,2 - 0,45$; $f'_c = 0,29 - 0,67$). Это объясняется увеличением потока пластически деформируемого металла, действующего на индентор в единицу времени при росте скорости обработки.

Сравнение величин ΔY_0 и ΔY_1 , полученных после АВ (рис. 8, 9) и после накатывания шариком (рис. 10 б, в) показывает, что для скоростей $V = 10 - 50$ м/мин интервалы изменения этих величин примерно одинаковы, а при скорости трогания индентора до $V = 10^{-2}$ м/мин АВ обеспечивает большие интервалы изменения этих величин: $\Delta Y_0 = 0,8 - 4,8$ мкм; $\Delta Y_1 = 6,5 - 17$ мкм.

При накатывании шариком силовые характеристики f'_c , F_{cmax} , F_c контактного взаимодействия менее стабильны, чем остальные характеристики.

Коэффициент k_1 , характеризующий отношение средней и максимальной сил сопротивления, отличается наибольшей стабильностью в обоих случаях обработки.

При АВ силовые характеристики F_c и ΔF_c обладают невысокой стабильностью для скорости $V = 10^{-2}$ м/мин (рис. 7), при скорости $V = 10 - 50$ м/мин стабильность силовых факторов возрастает в 1,5 – 2,3 раза.

Учитывая эти результаты и тот факт, что стабильность силового взаимодействия индентора на поверхность влияет на надежность формирования требуемых параметров качества поверхностного слоя, метод АВ следует считать предпочтительным по сравнению с накатыванием шариком.

Отличия между процессами выглаживания алмазным индентором и накатыванием шариком кроются в динамике процессов контактирования индентора с поверхностью. В случае

накатывания шарик в процессе обработки совершает вращение, что вызывает дополнительные колебания в зоне контакта с поверхностью, ведущие к нарушению стабильности действующих силовых факторов, и, как следствие, величины и стабильности формируемых параметров качества поверхности.

Для случая накатывания шариком анализировались осциллограммы [4] сил сопротивления, которые значительно отличались друг от друга в случае изменения значений сил накатывания Q и относительной скорости V .

На осциллограмме рис. 11 а видно, что в начале процесса обработки сила сопротивления возрастает до величины F_{cmax} , а затем снижается до среднего значения F_c , при этом ее значения изменяются в диапазоне ΔF_c . Также в момент трогания индентора с места возрастает сила Q , которая затем стабилизируется по мере стабилизации силы сопротивления. Таким образом, эти две силы в данном случае ведут себя синхронно друг относительно друга.

При накатывании шариком образца из закалённой стали на той же скорости и с небольшим усилием (рис. 11 б) максимальное значение силы сопротивления значительно ниже и практически не выходит за область изменения ΔF_c . Значительно меньшим колебаниям в этом случае подвержена сила Q . Можно сделать вывод, что накатывание поверхностей образцов из незакалённой стали сопровождается большими силовыми возмущениями в зоне контакта индентора, по сравнению с накатыванием закалённых стальных образцов.

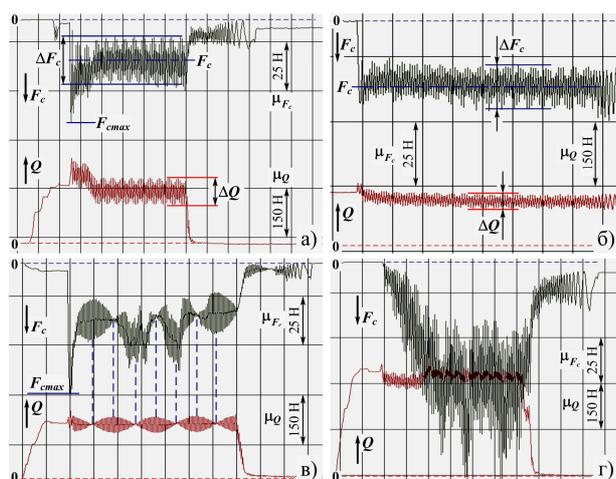


Рис. 11. Примеры осциллограмм силы сопротивления F_c при контактировании сферического подвижного стального индентора (ШХ15) с поверхностью (сталь 45):
 а – $T = 1,8$ ГПа; $Q = 150$ Н; $V = 50$ м/мин;
 б – $T = 5,4$ ГПа; $Q = 135$ Н; $V = 50$ м/мин;
 в – $T = 1,8$ ГПа; $Q = 150$ Н; $V = 90$ м/мин;
 г – $T = 1,8$ ГПа; $Q = 320$ Н; $V = 50$ м/мин

Увеличение сил и скоростей обработки при накатывании влияет на стабильность силовых характеристик в зоне контакта, приводит к росту динамических возмущений. Например, при моделировании обработки с силой $Q = 150$ Н и скоростью обработки $V = 90$ м/мин (рис. 11 в) сила трогания индентора F_{cmax} резко растёт, а изменение значений величины F_c носит в этих условиях почти стационарный характер. Такие динамические возмущения также вызывают колебания значений силы Q , имеющие примерно тот же период колебаний, но со смещением по фазе на 90° . Увеличение нагрузки Q до 230 Н еще больше снижает стабильность величины силы сопротивления F_c .

Увеличение нагрузки Q до 320 Н даже при снижении скорости до $V = 50$ м/мин (рис. 11 г) приводит к значительной нестабильности силы сопротивления F_c . Сила Q также подвержена периодическим флуктуациям.

На динамические процессы, протекающие в зоне контакта подвижного стального индентора с обрабатываемой поверхностью детали, влияет наличие большого числа подвижных элементов с точечными контактами с предварительно обработанной шероховатой поверхностью, которые в силу их дискретности и вызывают микроколебания.

Таким образом, чем меньше в инструменте ППД подвижных элементов, контактирующих с обрабатываемой поверхностью, тем выше стабильность силовых факторов в зоне обработки и, соответственно, вероятность формирования параметров качества обработки.

Модели для оценки параметров контактного взаимодействия инденторов с поверхностью

Статистические модели строились в виде моделей Кобба-Дугласа [4]:

$$Y_i = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \dots X_k^{\beta_k}, \quad (2)$$

где Y_i – i -й параметр, характеризующий процесс контактного взаимодействия индентора с поверхностью ($F_c, F_{cmax}, \Delta F_c, f_c, f'_c, \Delta Y_0, \Delta Y_1, k_1, k_2$); X_i – i -й фактор, влияющий на процесс контактного взаимодействия индентора с поверхностью, в условиях проводимых экспериментов; β_0, β_i – истинные значения коэффициентов регрессии.

Расчёты производились с использованием разработанной программы [4].

Например, для случая контактирования алмазного индентора (АСПК) с поверхностью детали из закалённой стали 45 при скорости $V =$

10 – 50 м/мин модель, характеризующая зависимость от технологических факторов процесса для коэффициента сопротивления f_c :

$$f_c = 0,206 Ra_{ucx}^{0,203} r^{0,34} V^{0,6}; \quad (3)$$

для силы F_c сопротивления при движении индентора по поверхности:

$$F_c = 65,8 Ra_{ucx}^{0,23} r^{0,34} V^{0,06} \quad (4)$$

и т. д. Для случая контактирования подвижного сферического индентора (ШХ15) с поверхностью детали из закалённой стали 45 при скорости $V = 10 \dots 50$ м/мин модель процесса для коэффициента сопротивления f_c определяется зависимостью:

$$f_c = 7,57 T^{-0,67} Ra_{ucx}^{0,57} V^{-0,33} Q^{-0,33}, \quad (5)$$

для силы F_c сопротивления при движении индентора по поверхности:

$$F_c = 7,33 T^{-0,68} Ra_{ucx}^{0,59} V^{-0,33} Q^{0,41}. \quad (6)$$

Факторы, входящие в полученные модели, включая модели (3) – (6), значимы, а сами модели по критерию Фишера являются адекватными.

Проводилось ранжирование факторов моделей по влиянию на характеристики контактного взаимодействия.

Так, для метода накатывания шариком при обработке со скоростями $V = 10 - 50$ м/мин все факторы оказывают согласованное влияние в последовательности $T - V - Q - Ra_{ucx}$. Таким образом, на силовые характеристики контактного взаимодействия в наибольшей степени влияют факторы твёрдости детали и скорости обработки. Третье место величины силы Q не свидетельствует о слабости её влияния. Она является ключевым фактором процесса ППД. В ходе исследований, вероятно, следовало бы расширить диапазон изменений её величины, хотя вряд ли это привело бы к лучшим результатам с качественной точки зрения.

Для метода АВ установлена следующая последовательность факторов по степени влияния на формирование силовых характеристик: $Q - Ra_{ucx} - T - \text{Смазка} - r$. В этой последовательности фактор r , учитывающий величину радиуса индентора, нельзя считать незначимым, так как именно он определяет фактическое давление в зоне контакта индентора с поверхностью и связан с фактором Q .

При эллиминировании силы Q для процесса АВ факторы, влияющие на формирование всех исследуемых характеристик, ранжируются в последовательности $Ra_{ucx} - r - V$. Таким образом, увеличение высотных параметров шерохо-

ватости предварительно обработанной поверхности влияет на рост значений силовых характеристик контактного взаимодействия алмазного индентора с поверхностью.

Заключение

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Результаты физического моделирования процесса ППД позволили установить влияние его факторов (Q, Ra_{np}, r, T, V) на интервалы изменения параметров контактного взаимодействия с поверхностью детали сферического подвижного (шарик) и неподвижного (АСПК) инденторов, а также определить вероятность обеспечения их значений в заданном δ -% интервале.

2. Результаты исследования значений остаточных деформаций в зоне контакта индентора с поверхностью позволяют установить возможность управляемого восстановления размеров изношенных поверхностей деталей.

3. Осциллографирование силовых параметров F_{cmax}, F_c и ΔF_c в процессе физического моделирования обработки деталей методами ППД позволило установить зависимости их величин от силы Q и скорости V обработки, а также установить границы перехода процесса ППД в технологически неустойчивое состояние.

4. Определены признаки различия и сходства в формировании параметров контактного взаимодействия при ППД алмазным выглаживанием и накатыванием шариком.

5. Анализ показал, что при обработке АВ со скоростями $V = 10 - 50$ м/мин факторы обработки оказывают согласованное влияние в последовательности $Q - Ra_{ucx} - T - \text{Смазка} - r$, а при накатывании шариком – $T - V - Q - Ra_{ucx}$.

Литература

1. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
2. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей пластическим деформированием: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
3. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.
4. Параметрическая надёжность технологических систем лезвийной и упрочняющей обработки инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов по геометрическим параметрам качества и триботехническим характеристикам поверхностей деталей/ М.Н. Нагоркин, В.П. Федоров, В.В. Нагоркина, Е.В. Ковалева // Прогрес-

сивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: монография / под ред. А.В. Киричека. М.: Издательский дом «Спектр», 2016. Т. VII. С. 506-688.

5. Справочник по триботехнике / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т. 1: Теоретические основы. М.: Машиностроение, 1989. 400 с.

6. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.

7. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Фёдоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 174 с.

8. Вайнер Л.Г. Технологическое управление абразивной обработкой на основе моделирования процессов формообразования // Известия ВолгГТУ. 2018. № 2. С. 7-10.

Поступила 13.04.2020; принята к публикации 17.06.2020

Информация об авторах

Федоров Владимир Павлович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», Брянский государственный технический университет (241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7), тел.: +7(980)315-70-09, e-mail: fedorov.tm.2017@yandex.ru

Кириллов Олег Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел.: +7(960)552-61-25, e-mail: kirillov.oli@yandex.ru

Нагоркин Максим Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и химия», Брянский государственный технический университет (241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7), тел.: +7(908)147-24-13, e-mail: nagorkin_mn@mail.ru

Ковалева Елена Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Триботехническое материаловедение и технологии материалов», Брянский государственный технический университет (241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7), тел.: +7(906)502-45-29, e-mail: lenako1965@mail.ru

STUDY OF THE PARAMETERS OF THE CONTACT INTERACTION OF THE INDENTER WITH THE SURFACE DURING PROCESSING BY METHODS OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION

V.P. Fedorov¹, O.N. Kirillov², M.N. Nagorkin¹, E.V. Kovaleva¹

¹Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: The article presents the results of studies of the parameters of the contact interaction of the indenter with the surface when processed by methods of surface plastic deformation (SPD treatment). We considered the methods of surface plastic deformation processing of the outer cylindrical surfaces of samples (steel grade 45) of different hardness by diamond burnishing (indenter – synthetic polycrystalline diamond) and ball burnishing (indenter – ball made of steel grade ShH15) by single-indenter tools of elastic action. We carried out the studies by the method of physical modeling of processes in the authoring experimental setup. We studied the dependences of the parameters of the contact interaction of indenters with the surface (resistance forces when starting the indenter and in the steady-state processing SPD treatment mode, range of fluctuations in the forces during processing, resistance coefficients when starting the indenter and in steady state, some derived coefficients) on the conditions of SPD treatment: surface pretreatment method, surface roughness after pretreatment, indenter radius, surface hardness, impact forces on the surface of the indenter, processing speed, grease. Experimental studies were conducted according to the method of active experiment. Several processing SPD treatment schemes differed in the sample surface pretreatment method, moving the indenter from a place to various final speeds, indenter materials, the presence of grease on the surface. As a result of statistical processing of the experimental data, we obtained the dependences of the contact interaction parameters on processing factors, which allows us to determine both the variation ranges and the probability of their provision in a given interval depending on the processing SPD treatment factors. Using the developed software, we obtained adequate physical-statistical models for the quantitative assessment of the investigated parameters of contact interaction from specific processing SPD treatment conditions. The main findings of the research are presented in the conclusion

Key words: diamond burnishing, roll burnishing, roughness, indenter, contact interaction, resistance force, plastic deformation

References

1. Papshev D.D. “Finishing and hardening by surface plastic deformation” (“Otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem”), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 152 p.
2. Odintsov L.G. “Hardening and finishing of parts by plastic deformation: Reference book” (“Uprochnenie i otdelka detaley plasticheskim deformirovaniem: Spravochnik”), Moscow, Mashinostroenie, 1987, 328 p.
3. Suslov A.G. “Technological support of the state parameters of the surface layer of parts” (“Tekhnologicheskoe obespechenie parametrov sostoyaniya poverkhnostnogo sloya detaley”), Moscow, Mashinostroenie, 1987, 208 p.
4. Fedorov V.P., Kirillov O.N., Nagorkin M.N., Kovaleva E.V. “Parametric reliability of blade and hardening technological

systems with tools made of synthetic superhard materials according to geometrical quality parameters and tribological characteristics of part surfaces”, *Modern Engineering Technoques, Equipment and Toolware (Progressivnye mashinostroitel'nye tekhnologii, oborudovanie i instrumenty: monografiya)*, collective monograph, ed. A.V. Kirichek, Moscow, Spektr, 2016, vol. VII, pp. 506-688.

5. Ed. Hebda M., Chichinadze A.V. “Tribotechnology reference book” (“Spravochnik po tribotekhnike”), Moscow, Mashinostroenie, 1989, vol. 1, 400 p.

6. Smelyanskiy V.M. “Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation” (“Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem”), Moscow, Mashinostroenie, 2002, 300 p.

7. Ryzhov E.V., Suslov A.G., Fedorov V.P. “Technological support of operational properties of machine parts” (“Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh svoystv detaley mashin”), Moscow, Mashinostroenie, 1979, 174 p.

8. Vainer L.G. “Technological control of abrasive processing based on modeling of forming processes”, *News of VolSTU (Izvestiya VolGTU)*, 2018, no. 2, pp. 7-10.

Submitted 13.04.2020; revised 17.06.2020

Information about the authors

Vladimir P. Fedorov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Bryansk State Technical University (7, Boul. of 50 Let Oktyabrya, Bryansk 241035, Russia), e-mail: fedorov.tm.2017@yandex.ru, tel. +7(980)315-70-09

Oleg N. Kirillov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14, Moscovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: kirillov.oll@yandex.ru, tel. +7(960)552-61-25

Maksim N. Nagorkin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Bryansk State Technical University (7, Boul. of 50 Let Oktyabrya, Bryansk 241035, Russia), e-mail: nagorkin_mn@mail.ru, tel. +7(960)552-61-25

Elena V. Kovaleva, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Bryansk State Technical University (7, Boul. of 50 Let Oktyabrya, Bryansk 241035, Russia), e-mail: lenako1965@mail.ru, tel. +7(906)502-45-29

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ДЛЯ ПОЛЫХ ШАРИКОВ ОТ ОКАЛИНЫ

А.В. Королев, А.В. Панфилова, О.П. Решетникова, Б.М. Изнаиров, А.Н. Васин

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия

Аннотация: рассматриваются возможности нового простого, но эффективного способа удаления окалины с поверхности стального листового проката, предназначенного для изготовления полых шариков, а также результаты проведения экспериментальных его исследований. Описано устройство для реализации нового способа и механизм его взаимодействия с обрабатываемой поверхностью. Показан выбор технологических факторов, таких как угол наклона окалиноломателя в направлении его вращения, окружная скорость вращения окалиноломателя, сила прижима инструмента к обрабатываемой поверхности и подача образца, оказывающих наибольшее влияние на основные параметры качества очищенной от окалины поверхности и производительность обработки. Разработан план неполного факторного эксперимента. В соответствии с разработанным планом были проведены экспериментальные исследования, в результате которых получены значения функции отклика для различных сочетаний уровней факторов. По результатам исследования построены зависимости степени очистки поверхности листа от окалины от основных влияющих факторов и получена математическая модель исследуемого процесса в виде уравнения регрессии, которая позволила определить наиболее благоприятные режимы для удаления окалины с проката. Показано, что предложенным способом обеспечивается надежное удаление окалины даже в случае, если она очень прочно закреплена на обрабатываемой поверхности листового проката

Ключевые слова: полые шарики, экспериментальные исследования, окалина, прокат, режимы обработки, уравнение регрессии, математическая модель

Благодарности: статья подготовлена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук № МК-2395.2020.8.

Введение

В настоящее время уровень параметров значительной части эксплуатируемых подшипниковых узлов уже не соответствует требованиям, предъявляемым к современной технике, ни по надежности, ни по силовым, ни по скоростным показателям. Поэтому дальнейший выпуск изделий на основе использования традиционных узлов качения не позволит им конкурировать ни на внутреннем, ни на международном рынках, т.е. нужно решать задачи по созданию узлов качения нового поколения. Таким направлением является создание подшипников с облегченными телами качения, уменьшающими нагрузку на наружные кольца подшипников при высоких скоростях вращения за счет снижения центробежной силы, а значит, и увеличивающими срок их службы и долговечность подшипниковых узлов в целом. Кроме того, облегченные тела качения требуют меньшей мощности для работы использующих их узлов, т.к. при их использовании значительно уменьшается момент страгивания, вращения и

момент инерции при торможении. В качестве облегченных тел качения целесообразно рассматривать полые шарики тонкостенной конструкции, которые, чаще всего, изготавливают из стального листового проката. На поверхности изделий, получаемых методом горячего проката, всегда образуется железная окалина, которая значительно сокращает коррозионную стойкость материала и усложняет последующую обработку, поэтому необходимо полное ее удаление.

В промышленности в настоящее время для удаления окалины применяют очень сложные в эксплуатации способы [1, 2, 3, 4], которые возможно использовать лишь крупным металлургическим предприятиям. Поэтому было принято решение разработать новое устройство для удаления окалины, которое можно использовать в условиях любого машиностроительного предприятия.

Описание способа и устройство для удаления окалины

Предлагаемый способ заключается в следующем. В качестве рабочего инструмента ис-

пользуют твердую пластину, установленную ее рабочей кромкой вдоль образующей обрабатываемой поверхности наклонно под углом 3-5 градусов к опорной конструкции в направлении, противоположном вектору скорости вращения (рис. 1) [5].

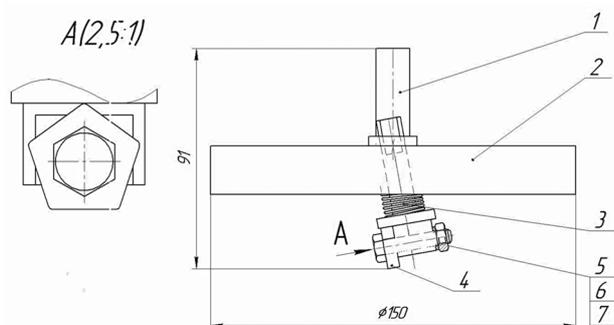


Рис. 1. Устройство с режущими пластинами для удаления окалины

Устройство (рис. 1) с режущими пластинами 4 состоит из инструмента 1, корпуса 2, оси и пружины 3 и элементов крепления пластины 5, 6, 7. В качестве инструмента используется твердосплавная режущая пластина, закрепленная на цилиндрическом стержне. Инструмент 1 расположен в направлении вращения корпуса 2 под острым углом. Это уменьшает задний угол пластины, а следовательно, потребную силу прижима пластины к обрабатываемой поверхности. При этом угол разворота должен быть таким, чтобы пластина хорошо осуществляла сдвиг окалины, но не царапала обрабатываемую поверхность. С другой стороны, площадь контакта пластины с обрабатываемой поверхностью должна быть такой, при которой пластина не будет «всплывать» над окалиной. Если при износе пластины режущая кромка будет оставаться острой, то при правильном выборе параметров пластины и угла ее наклона в направлении вращения, пластина не потребует частых переточек и будет работать до полного износа. Это существенно уменьшает трудоемкость технического обслуживания устройства.

Экспериментальные исследования осуществлялись на вертикально-фрезерном станке 6Р12 (рис. 2).

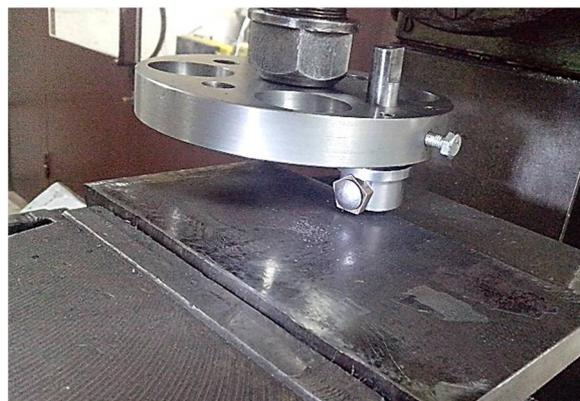


Рис. 2. Фотография устройства для удаления окалины, установленного на вертикально-фрезерном станке

Устройство закреплялось на шпинделе станка с помощью цанги. На столе станка устанавливались тиски, в которых зажимались испытываемые образцы. Вертикальным перемещением стола устанавливалась необходимая сила прижима инструмента к обрабатываемой поверхности. Предварительно с помощью динамометра осуществлялась тарировка индикатора, что позволяет по показанию индикатора определять силу прижима образца к инструменту.

План эксперимента

Определить влияние каждого фактора на ход технологического процесса практически невозможно, поэтому необходимо выделить факторы, которые оказывают наиболее значимое влияние. Априорными расчётно-теоретическими исследованиями и проведением предварительных исследований по способу было установлено, что на основные параметры качества очищенной от окалины поверхности и производительность обработки оказывают влияние такие технологические факторы, как угол α наклона инструмента в направлении его вращения, скорость вращения инструмента V , сила воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность P и подача изделия S на один оборот инструмента. Поэтому эти технологические параметры выбраны в качестве основных факторов эксперимента. Экспериментальные исследования осуществлялись одним окалиноломателем, так как при ограниченных режимах работы станка это позволяло в более широких пределах варьировать значения факторов эксперимента.

Уровни варьирования факторов приведены в таблице ниже.

Уровни варьирования факторов при удалении
окалины

Факторы	Обозначения	Кодовые обозначения	-1 нижний	0 основной	+1 верхний	Интервал варьирования
Угол наклона окалиноломателя, град.	α	X_1	1	3	5	4
Скорость вращения инструмента, м/мин	V	X_2	63	110	157	94
Сила прижима, Н	P	X_3	40	52,5	65	25
Подача заготовки, м/мин	S	X_4	1	2,5	4	3

К качественным показателям исследуемого процесса была отнесена площадь F , занимаемая окалиной после обработки в долях от площади всей поверхности образца, и момент сопротивления вращению инструмента $M, H \cdot м$.

Использовался неполный факторный эксперимент (НФЭ) 2^{4-1} . В соответствии с указанным планом были проведены опыты, в результате которых получены значения функции отклика для различных сочетаний уровней факторов. При одних и тех же условиях каждый опыт повторяли три раза [6, 7]. Порядок проведения опытов рандомизировали. Данные опытов обрабатывали по методике [6, 7].

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитывались по методике [6, 7] и программой «t.bas», модернизированной под расчёт модели для матрицы 2^{4-1} опытов. Однородность дисперсий проверялась по критерию Кохрена при уровне значимости 0,05. Во всех случаях экспериментальных исследований гипотеза об однородности дисперсий принималась.

Значимость коэффициентов регрессии оценивалась по критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05. Незначимые коэффициенты уравнения регрессии принимались равными нулю. Адекватность математической модели определялась по критерию Фишера при уровне значимости 0,05.

Результаты экспериментальных исследований

По результатам исследования построены зависимости степени очистки поверхности ли-

ста от окалины от основных влияющих факторов, в том числе от угла наклона окалиноломателя в направлении его вращения, скорости вращения, силы прижима инструмента к обрабатываемой поверхности и подачи образца. Полученная регрессионная зависимость имеет следующий вид:

$$F = -0,373 + 0,071 \cdot \alpha + 0,057 \cdot V + 0,0158 \cdot P - 0,1 \cdot S - 0,000071 \cdot V \cdot P$$

где F – доля поверхности образца, свободной от окалины; α – угол наклона окалиноломателя в направлении его вращения, град.; V – окружная скорость вращения окалиноломателя, м/мин.; P – сила прижима инструмента к обрабатываемой поверхности, Н; S – подача образца, м/мин.

Как видно из равенства, угол наклона окалиноломателя α и подача образца S оказывают на степень очистки от окалины F непосредственное влияние. Окружная скорость инструмента V и сила прижима инструмента к обрабатываемой поверхности P оказывают на степень очистки от окалины взаимное влияние. Это означает, что с возрастанием окружной скорости вращения инструмента V влияние нагрузки P на инструмент падает. Объясняется это тем, что с возрастанием окружной скорости сила удара рабочей кромки инструмента на окалину возрастает и она более легко разрушается даже при меньших значениях силы прижима инструмента. Угол наклона окалиноломателя, окружная скорость инструмента и сила его прижима к обрабатываемой поверхности оказывают положительное влияние на степень очистки образцов от окалины. Подача образца оказывает отрицательное влияние на степень очистки, т.е. с возрастанием подачи степень очистки снижается.

Полученные зависимости наглядно приведены на рис. 3-6. На графиках верхняя линия соответствует самым благоприятным значениям факторов, т.е. максимальным значениям факторов, которые оказывают положительное влияние на очистку от окалины, и минимальному значению подачи. Нижняя линия соответствует самым неблагоприятным значениям факторов, а средняя линия – их средним значениям.

Как видно из рис. 3, с возрастанием угла наклона окалиноломателя степень очистки поверхности образцов возрастает. Наилучшая очистка от окалины достигается при угле наклона более 4 градусов, но при благоприят-

ных прочих условиях обработки, а именно при максимальной окружной скорости инструмента, при максимальной силе прижима его к обрабатываемой поверхности и при минимальной подаче образцов.

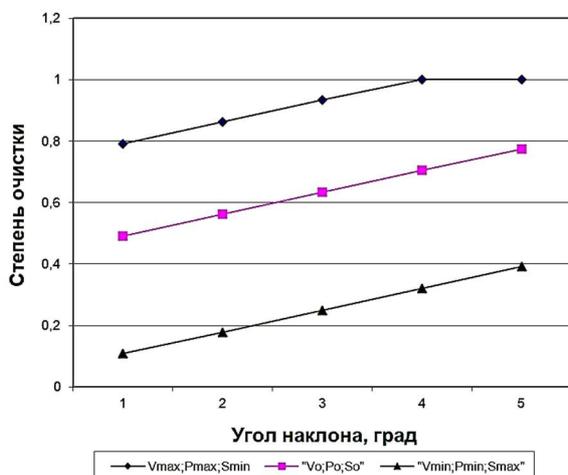


Рис. 3. Зависимость степени очистки от окислы от угла наклона окислыломателера в направлении вращения

Влияние угла наклона окислыломателера на степень очистки поверхности от окислы объясняется влиянием сил трения, действующих в месте закрепления окислыломателера в корпусе устройства.

В месте крепления окислыломателера в корпусе устройства возникает сила трения от действия тангенциальной силы его взаимодействия с окислыной, которая совместно с силой воздействия пружины препятствует перемещению окислыломателера вдоль его оси. Но когда угол наклона мал, то эти силы близки к силе, действующей на окислыломателера вдоль его оси, возникающей при взаимодействии его с окислыной. Поэтому, если края у окислыной пологие, то вертикальная сила взаимодействия окислыломателера с окислыной превышает силу давления пружины и силу трения, и окислыломателера «пролетает» над окислыной, не повреждая ее. Если окислыломателера расположен под углом к направлению вращения, то вертикальная сила взаимодействия с окислыной раскладывается на две составляющие: силу, направленную вдоль оси окислыломателера, и силу, направленную в поперечном направлении к оси окислыломателера. С увеличением угла наклона составляющая силы, направленная вдоль оси окислыломателера, уменьшается, что снижает возможность его смещения вдоль его оси. Наоборот, сила, направленная перпендикулярно к оси окислыломателера, вызывает дополнительный

момент трения окислыломателера в месте его крепления в корпусе устройства, что усиливает действие пружины и сил трения. При определенном угле наклона окислыломателера буквально заклинивает в корпусе устройства в момент встречи с окислыной. При этом его воздействие на окислыну многократно возрастает и приводит к ее разрушению.

Но при слишком большом угле наклона начинает проявляться действие переднего угла окислыломателера. С возрастанием угла наклона окислыломателера возрастает значение отрицательного переднего угла рабочей части инструмента, что способствует возрастанию выталкивающей силы, действующей на окислыломателера. Это снижает действие заклинивающего эффекта и может привести к отрицательному результату.

На рис. 4 приведены графики, иллюстрирующие влияние на степень очистки образцов от окислы окружной скорости инструмента. Как видно, с возрастанием скорости инструмента степень очистки образцов возрастает. Но при неблагоприятных значениях прочих факторов степень очистки является невысокой. И только при наиболее благоприятных значениях прочих факторов при окружной скорости вращения инструмента выше 86 м/мин степень очистки образцов от окислы достигает 100%.

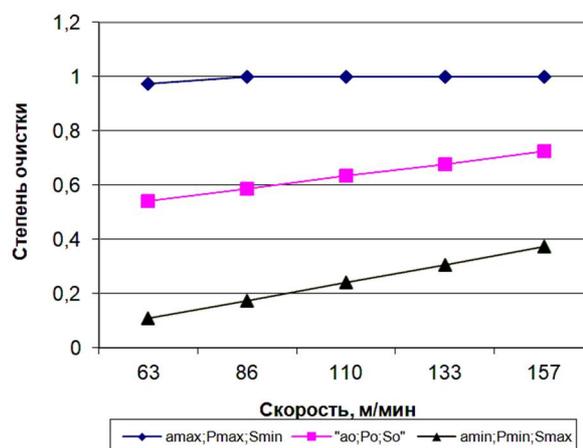


Рис. 4. Влияние на степень очистки от окислы окружной скорости вращения инструмента

Как уже было отмечено выше, влияние окружной скорости инструмента объясняется тем, что при ее возрастании увеличивается сила удара рабочей части инструмента по передней грани окислыной. Ввиду высокой хрупкости окислыной она весьма чувствительна к ударам. Под действием удара разрушается передняя грань

окалины, и внутри окалины появляются трещины, что способствует ее удалению с обрабатываемой поверхности под действием окалиноломателя.

Однако слишком высокая окружная скорость вызывает повышенный износ инструмента, а следовательно, увеличивает затраты на его замену. Кроме того, при высоких скоростях может возникнуть температура, при которой на обрабатываемой поверхности появляются недопустимые изменения поверхностного слоя и другие дефекты.

На рис. 5 приведены зависимости степени очистки от окалины от силы прижима инструмента к обрабатываемой поверхности. Как видно, с возрастанием силы прижима степень очистки образцов от окалины возрастает. Объясняется это тем, что сила прижима препятствует перемещению окалиноломателя вдоль своей оси при встрече рабочей части инструмента с пологой кромкой окалины. Чем более пологая кромка окалины, тем большая выталкивающая сила взаимодействия рабочей части инструмента с окалиной действует вдоль оси окалиноломателя. При некоторых своих значениях она начинает превышать силу прижима окалиноломателя к обрабатываемой поверхности, что приводит к смещению окалиноломателя вдоль его оси. Это уменьшает возможность разрушения окалины.

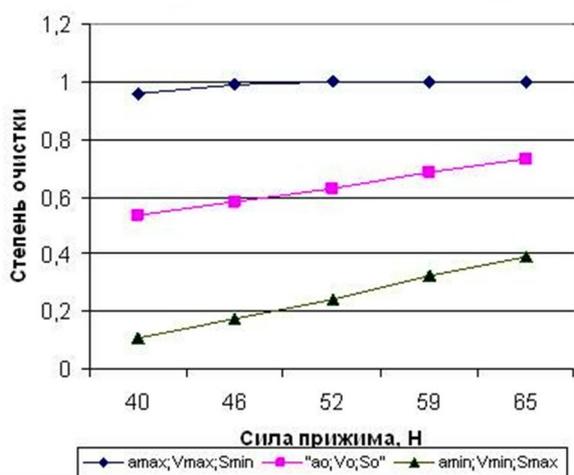


Рис. 5. Зависимость степени очистки от окалины от силы прижима инструмента к обрабатываемой поверхности

Из графика также видно, что при неблагоприятных значениях прочих факторов степень очистки от окалины является невысокой даже при значительной силе прижима окалиноломателя к обрабатываемой поверхности. И только при благоприятных значениях силы прижима,

превышающих 46 Н , окалина полностью удаляется с обрабатываемой поверхности.

Действие величины подачи образцов противоположно характеру действия рассмотренных выше факторов. Как видно из рис. 6, с возрастанием значений подачи степень очистки окалины уменьшается. Объясняется это тем, что с возрастанием подачи увеличивается сила взаимодействия рабочей части инструмента с окалиной. При этом увеличивается и составляющая этой силы, направленная вдоль оси окалиноломателя. Во многих случаях это приводит к смещению окалиноломателя вдоль своей оси и инструмент «пролетает» над окалиной без ее повреждения. При неблагоприятных значениях прочих факторов даже при низких значениях подачи степень очистки образцов от окалины невелика. При благоприятных значениях прочих факторов и при подаче менее 2 м/мин окалина удаляется практически полностью.

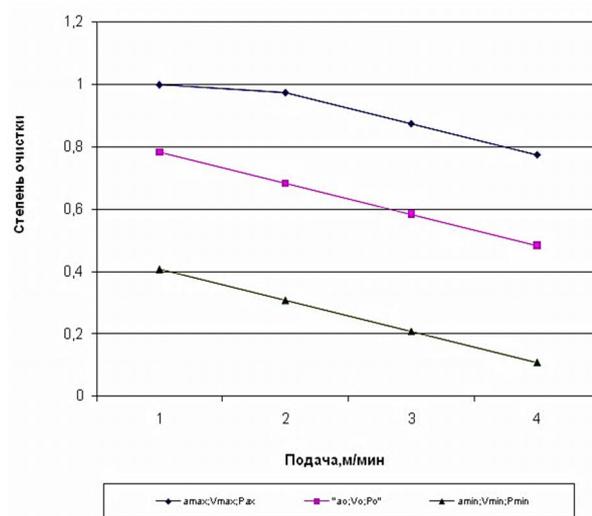


Рис. 6. Влияние на степень очистки образцов от окалины величины подачи образцов

Следует отметить, что наиболее значительное влияние на степень очистки от окалины оказывает сила прижима инструмента к обрабатываемой поверхности. Из графиков на рис. 5 видно, что увеличение силы прижима всего в 1,6 раза приводит к увеличению степени очистки от окалины в 1,5 раза. Такого же эффекта можно добиться, если угол наклона окалиноломателя увеличить в 5 раз (рис. 3), окружную скорость увеличить в 2,5 раза (рис. 4), а подачу снизить в 5 раз (рис. 6).

Заключение

1. Предложен перспективный способ удаления окалины с поверхности листового проката, который можно использовать в условиях любого, даже небольшого механообрабатывающего предприятия.

2. Проведены экспериментальные исследования, доказывающие высокую эффективность предлагаемого способа.

3. Предложенным способом обеспечивается надежное удаление окалины даже в случае, если она очень прочно закреплена на обрабатываемой поверхности.

4. Полученная регрессионная зависимость позволяет определить наиболее благоприятные режимы для удаления окалины с проката.

Литература

1. Определение основных параметров устройств для гидравлического удаления окалины / В.И. Руденко,

Г.С. Суков, Р.В. Руденко и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. № 4. С. 28-30.

2. Теоретическое исследование процесса прохождения горячекатаной полосы через изгибно-растяжной окалиноломатель непрерывно-тривильного агрегата/ Н.Н. Огарков, Д.В. Суфьянов, Е.А. Мурзаева, В.В. Курбан // *Производство проката*. 2012. № 10. С. 31-34.

3. Исследование возможности наиболее полного удаления окалины с поверхности катанки перед волочением / В.В. Парусов, А.Н. Савьюк, А.Б. Сычков и др. // *Металлург*. 2004. № 6. С. 69-72.

4. Меркулов А.А., Ефимов С.А., Королев А.В. Математическое моделирование процесса роторной очистки металлического проката от окалины // *Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-27: сб. тр. XXVII междунар. науч. конф.* Тамбов, 2014. Т. 5. С. 133-137.

5. Заявка 2014105408/02 Российская Федерация, МПК В08В 1/04 (2006.01). Способ очистки поверхности / Королев А.В., Королев А.А. (РФ); заявитель Королев А.В., Королев А.А.; заявл. 13.02.2014; опубл. 20.08.2015, Бюл. № 23.

6. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Ю.П. Адлер и др. М.: Наука, 1971. 250с.

7. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1976. 192 с.

Поступила 28.04.2020; принята к публикации 17.06.2020

Информация об авторах

Королев Альберт Викторович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: science7@bk.ru, тел.+7-905-326-98-92

Панфилова Анастасия Вячеславовна – аспирант кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: anastasiypanfilova@icloud.com

Решетникова Ольга Павловна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: olgareshetnikova1@yandex.ru, тел.+7-961-645-18-44

Изнаиров Борис Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: bageev1@mail.ru, тел.+7-962-622-81-74

Васин Алексей Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: vasin@sstu.ru, тел. +7-8452-99-87-90

RESEARCH OF THE EFFECT OF PROCESSING MODES ON THE EFFICIENCY OF CLEANING SHEET METAL FOR HOLLOW BALLS FROM SCALE

A.V. Korolev A.V. Panfilova, O.P. Reshetnikova, B.M. Iznairov, A.N. Vasin

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Abstract: the article discusses the possibilities of a new simple and effective method of removing scale from the surface of sheet steel intended for the manufacture of hollow balls, as well as the results of the experimental studies. We describe a device for implementing the new method and a mechanism for its interaction with the treated surface. We show the selection of technological factors, such as the angle of inclination of the scalebreaker in the direction of its rotation, the circumferential speed of rotation of the scalebreaker, the force of pressing the tool to the surface to be treated, and the movement of the sample, which have the greatest influence on the main quality parameters of the surface cleared of scale and processing performance. We developed an incomplete factorial experiment plan. In accordance with the developed plan, we carried out experimental studies, as a result of which we obtained the values of the response function for various combinations of factor levels. According to the results of the study, we constructed the dependences of the degree of cleaning of the sheet

surface from scale on the main influencing factors and obtained a mathematical model of the process under study in the form of a regression equation, which made it possible to determine the most favorable modes for descaling from rolled metal. The proposed method ensures reliable removal of scale even if it is very firmly fixed to the machined surface of sheet metal

Key words: hollow balls, experimental studies, scale, rolling, processing modes, regression equation, mathematical model

Acknowledgements: the study was carried out with the financial support of the grant of the President of the Russian Federation for governmental support of young Russian scientists (PhD) Grant No. MK-2395.2020.8

References

1. Rudenko V.I., Sukov G.S., Rudenko R.V. et al. "Determination of the main parameters of devices for hydraulic descaling", *Metallurgical and Mining Industry (Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost')*, 2004, no. 4, pp. 28-30.
2. Ogarkov N.N., Sufyanov D.V., Murzaeva E.A., Kurban V.V. "Theoretical study of the process of passing a hot-rolled strip through a bending-tensile scale breaker of a continuous etching unit", *Rolled Products (Proizvodstvo prokata)*, 2012, no. 10, pp. 31-34
3. Parusov V.V., Sav'yuk A.N., Sychkov A.B. et al. "Investigation of the possibility of the most complete removal of scale from the surface of a wire rod before drawing", *Metallurgist (Metallurg)*, 2004, no. 6, pp. 69-72
4. Merkulov A.A., Efimov S.A., Korolev A.V. "Mathematical modeling of the process of rotary cleaning of rolled metal from scale", *Mathematical Methods in Engineering and Technology - MMTT-27: proc. of the XXVII Int. Scientific Conf. (Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh - MMTT-27: sb. tr. XXVII mezhdunar. nauch. konf.)*, Tambov, 2014, vol. 5, pp. 133-137
5. Korolev A.V., Korolev A.A. "A method of cleaning the surface" ("Sposob ochistki poverkhnosti"), Application 2014105408/02 Russian Federation, IPC B08B 1/04 (2006.01), declared 02/13/2014; publ. 08/20/2015, bull. no. 23
6. Adler Yu.P. et al. "Planning an experiment in the search for optimal conditions" ("Planirovanie eksperimenta pri poiske opti-mal'nykh usloviy"), Moscow, Nauka, 1971, 250 p.
7. Rumshiskiy L.Z. "Mathematical processing of experimental results" ("Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta"), Moscow, Nauka, 1976, 192 p.

Submitted 28.04.2020; revised 17.06.2020

Information about the authors

Al'bert V. Korolev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Politekhnikeskaya str., Saratov 410054, Russia), e-mail: science7@bk.ru, tel.: +7-905-326-98-92

Anastasiya V. Panfilova, Graduate student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Politekhnikeskaya str., Saratov 410054, Russia), e-mail: anastasiypanfilova@icloud.com

Ol'ga P. Reshetnikova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Politekhnikeskaya str., Saratov 410054, Russia), e-mail: olgareshetnikova1@yandex.ru, tel.: +7-961-645-18-44

Boris M. Iznairov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Politekhnikeskaya str., Saratov 410054, Russia), e-mail: bageev1@mail.ru, tel.: +7-962-622-81-74

Aleksey N. Vasin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Politekhnikeskaya str., Saratov 410054, Russia), e-mail: vasin@sstu.ru, tel.: +7-8452-99-87-90