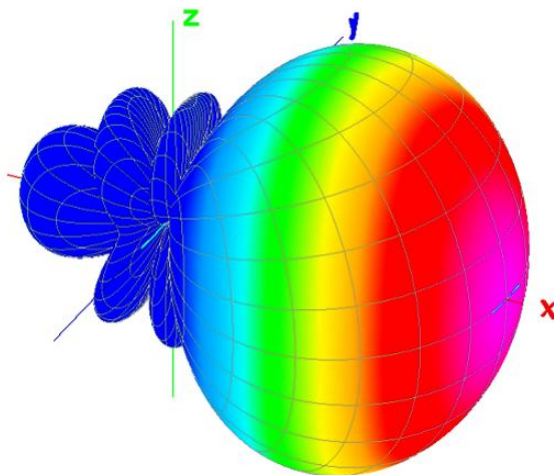


МИКРОВОЛНОВЫЕ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным работам № 6 - 8
для студентов направления 11.04.01 «Радиотехника»
(программа «Радиотехнические средства обработки и защиты
информации в каналах связи»)



Воронеж 2022

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»**

Кафедра радиотехники

**МИКРОВОЛНОВЫЕ
УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным работам № 6 - 8
для студентов направления 11.04.01 «Радиотехника»
(программа «Радиотехнические средства обработки и защиты
информации в каналах связи»)**

Воронеж 2022

УДК 621.396.67
ББК 32.845

Составитель
д-р техн. наук А. В. Останков

Микроволновые устройства обработки сигналов: Методические указания к лабораторным работам № 6 - 8 для студентов направления 11.04.01 «Радиотехника» (программа «Радиотехнические средства обработки и защиты информации в каналах связи») / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А. В. Останков. — Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. — 39 с.

Содержат описание трёх лабораторных работ, относящихся к разделам (модулям) «Характеристики и параметры микроволновых антенн» и «Основные характеристики антенных решёток» дисциплины «Микроволновые устройства обработки сигналов».

Предназначены для студентов первого курса, обучающихся по направлению 11.04.01 «Радиотехника».

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле «МУ-ЛР6-8-МкВУОС-11-04-01.pdf».

Ил. 5. Табл. 6. Библиогр.: 9 назв.

УДК 621.396.67
ББК 32.845

Рецензент – А. Б. Токарев, д-р техн. наук, проф.
кафедры радиотехники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Целью дисциплины «Микроволновые устройства обработки сигналов» является формирование у обучающихся системы понятий, идей и методов в области микроволновых устройств обработки сигналов, объединяющих физические представления с математическими моделями современных и перспективных микроволновых устройств.

Для достижения указанной цели помимо лекций предусмотрены лабораторные работы. Методические указания предназначены для методической поддержки трёх работ, относящихся к разделам «Характеристики и параметры микроволновых антенн» и «Основные характеристики антенных решёток».

Лабораторная работа № 6 «Исследование излучающей системы из нескольких симметричных вибраторов» имеет своей целью исследовать принцип создания синфазных фазированных антенных решёток на базе симметричных электрических вибраторов. В рамках работы выявляется влияние геометрических параметров антенной решётки и фазирования питания её элементов на диаграмму и показатели направленности.

Лабораторная работа № 7 «Характеристики и показатели направленности антенных решёток» нацелена на установление взаимосвязи между формой амплитудно-фазового распределения по апертуре линейной эквидистантной антенной решётки и её показателями направленности: коэффициентами направленного действия и использования поверхности, максимальным уровнем боковых лепестков. В рамках работы выявляется влияние геометрии решётки на её показатели направленности.

Лабораторная работа № 8 «Оптимизация показателей направленности эквидистантной антенной решётки» позволяет наглядно продемонстрировать возможность, целесообразность и эффективность улучшения показателей направленности линейной эквидистантной антенной решётки за счёт подбора амплитудного, фазового и амплитудно-фазового распределения по её апертуре на основе параметрической оптимизации с использованием эволюционного метода.

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ИЗ НЕСКОЛЬКИХ СИММЕТРИЧНЫХ ВИБРАТОРОВ

1.1. Цель работы

Целью работы является исследование принципа создания синфазных фазированных антенных решёток на базе симметричных электрических вибраторов, а также выявление влияния геометрических параметров решётки и фазирования питания её элементов на диаграмму и показатели направленности.

1.2. Содержание работы

1.2.1. Исследование характеристик одиночного элемента антенной решётки – линейного симметричного вибратора

Смоделировать в программе MMANA расположенную в вертикальной плоскости свободного пространства симметричную вибраторную антенну [1, 2] различной длины $2\ell = 0.25\lambda$, 0.5λ и λ , где ℓ – длина плеча (рис. 1). Частоту излучения взять равной $20 \cdot \text{№}$ МГц, где № – номер варианта. Частота занижена по сравнению с частотами микроволнового диапазона исключительно для ускорения моделирования.

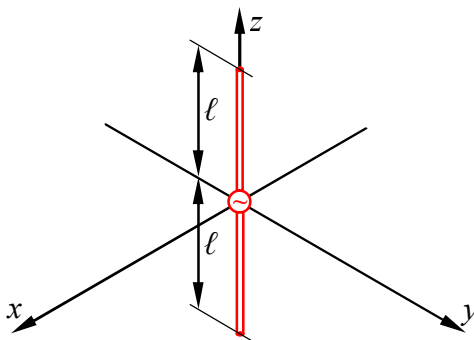


Рис. 1

Указания по выполнению моделирования в программе MMANA [3] приведены в прил. 1.

Снять для каждой длины антенны её диаграммы направленности (ДН) в H - и E -плоскостях, продольные распределения тока по длине вибратора. Измерить ширину главного лепестка ДН в обеих плоскостях. Результаты измерений на центральной частоте отразить в табл. 1.

Таблица 1

2ℓ	0.25λ	0.5λ	λ
$Z_{ВХ}$, Ом			
КСВ			
КУ, дБ			
$\Delta\Theta_{0.5}$			
$\Delta\varphi_{0.5}$			

Для каждой длины антенны проанализировать в 10-процентной полосе частот входное сопротивление $Z_{ВХ}$ (при отсутствии согласующего устройства), коэффициент стоячих волн (КСВ, при отсутствии согласующего устройства), коэффициент усиления (КУ). Построить зависимости от длины антенны ширины главного лепестка ДН в H -плоскости и коэффициента усиления. Сделать выводы.

В отчёте по первому подразделу лабораторной работы должны быть приведены:

- эскиз антенны; графики распределений тока и ДН для всех длин вибратора с указанием ширины главного лепестка.
- частотные зависимости входного сопротивления, коэффициента стоячих волн, коэффициента усиления.
- зависимости от длины антенны ширины главного лепестка ДН и коэффициента усиления;
- выводы.

1.2.2. Исследование фазированной антенной решётки из двух вибраторов

Смоделировать горизонтальную антенную решётку с рабочей частотой $20 \cdot \text{№}$ МГц, состоящую из двух вертикальных симметричных вибраторов длиной $2\ell = 0.5\lambda$, ориентированных вдоль оси Oz и сдвинутых друг относительно друга на расстояние $d = 0.25\lambda$ вдоль оси Oy (рис. 2).

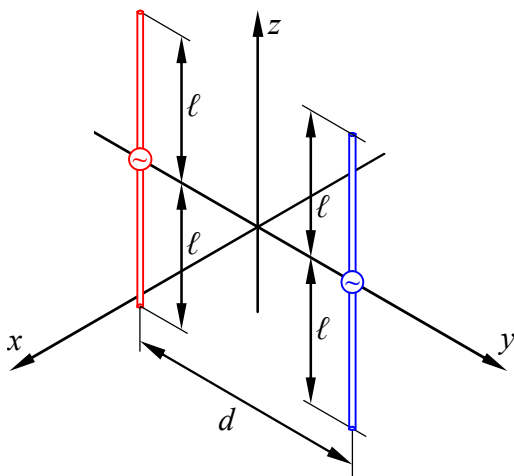


Рис. 2

Зарисовать диаграммы направленности в горизонтальной (H -) и вертикальной (E -) плоскости. Оценить ширину главного лепестка и уровень боковых лепестков диаграммы направленности. Измерить и записать в табл. 2 значения $Z_{\text{ВХ}}$, КСВ, КУ, ширину главного лепестка ДН в обеих плоскостях, максимальный уровень боковых лепестков (при наличии).

Изменяя расстояние d между элементами антенной решётки в соответствии с табл. 2, измерить и вписать в табл. 2 значения $Z_{\text{ВХ}}$, КСВ, КУ. Проследить изменение диаграммы направленности и параметров её лепестков.

Таблица 2

d	0.25λ	0.5λ	0.75λ
Z_{BX} , Ом			
КСВ			
КУ, дБ			
$\Delta\Theta_{0.5}$			
$\Delta\varphi_{0.5}$			
УБЛ, дБ			

При $d = 0.5\lambda$, изменяя начальную фазу напряжения, запитывающего один из вибраторов от 0° до 180° с шагом 45° проследить изменение диаграммы направленности и параметров её лепестков, а также КУ. Сделать выводы по результатам исследования.

В отчёте должны быть приведены:

- эскиз исследуемой антенной решётки;
- диаграммы направленности для всех значений параметра d антенной решётки и разных значениях начальной фазы напряжения, запитывающего один из вибраторов, с указанием ширины главного лепестка и уровня боковых лепестков;
- табл. 1 и 2; графики зависимости КУ и ширины главного лепестка ДН в горизонтальной плоскости $\Delta\varphi_{0.5}$ от расстояния d между элементами антенной решетки.

1.2.3. Исследование фазированной антенной решётки из четырёх вибраторов

Смоделировать горизонтальную антенную решётку с рабочей частотой 20·№ МГц, состоящую из четырёх вертикальных симметричных вибраторов длиной $2\ell = 0.5\lambda$, ориентированных вдоль оси Oz и сдвинутых друг относительно друга на расстояние $d = 0.5\lambda$ вдоль оси Oy (рис. 3). Построить такую решётку можно на основе предыдущей – из двух элементов, добавив ещё два активных вибратора слева и справа.

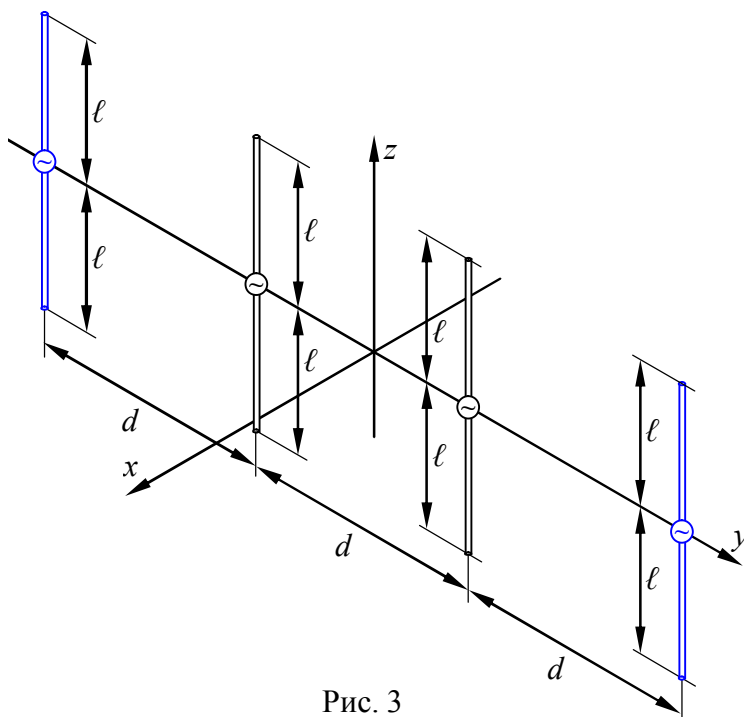


Рис. 3

Зарисовать ДН в горизонтальной (H -) и вертикальной (E -) плоскости. Оценить ширину главного лепестка и уровень боковых лепестков диаграммы направленности. Внести в отчёт значения $Z_{ВХ}$, КСВ, КУ, ширину главного лепестка ДН в обеих плоскостях, максимальный уровень боковых лепестков.

Построить зависимость КУ, ширины главного лепестка ДН в H -плоскости от числа элементов k в составе антенной решётки ($k = 1, 2$ и 4).

В отчёте должны быть приведены:

- эскиз исследуемой антенной решётки;
- диаграмма направленности с указанием ширины главного лепестка и уровня боковых лепестков;
- графики зависимости КУ и ширины главного лепестка ДН в горизонтальной плоскости $\Delta\phi_{0.5}$ от числа элементов антенной решётки.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Что такое диаграмма направленности антенны? Как обычно её представляют на плоскости? Каковы основные показатели диаграммы направленности антенны? Как, зная диаграмму направленности антенны, определить излучаемую ею мощность?

2. Чем отличается ненормированная диаграмма направленности от нормированной? Укажите достоинства и недостатки изображения диаграммы направленности антенны в полярной и декартовой системе координат, в логарифмическом масштабе.

3. Дайте определение коэффициента усиления передающей антенны. В чем состоит принципиальная разница между коэффициентами направленного действия и усиления передающей антенны?

4. Дайте определение входного сопротивления передающей антенны. Что понимается под согласованием фидера с передающей антенной?

5. Что представляет собой простейшая конструкция линейного симметричного электрического вибратора? Как зависит распределение тока по вибратору и вид диаграммы направленности от его длины?

6. Изобразите в полярной системе координат диаграмму направленности полуволнового линейного симметричного электрического вибратора в дальней зоне в H - и E -плоскости. Чему равен коэффициент направленного действия такого вибратора в направлении максимального излучения?

7. Какова причина формирования боковых лепестков диаграммы направленности линейного симметричного вибратора? Почему входное сопротивление линейного симметричного вибратора является исключительно важным его параметром?

8. Какие электрические вибраторы называются связанными? Чем определяются направленные свойства системы двух связанных линейных симметричных вибраторов в E - и H -плоскости?

9. Как зависит коэффициент усиления и ширина главного лепестка диаграммы направленности в H -плоскости горизонтальной синфазной антенной решётки вертикально размещённых вибраторов от числа элементов в её составе?

10. Применительно к линейной антенной решётке поясните смысл определений «равноамплитудная», «эквидистантная», «синфазная».

11. Как зависят направленные свойства антенной решётки из двух электрических вибраторов от разности фаз и соотношения амплитуд запитывающих их токов? От расстояния между вибраторами?

12. Как зависят направленные свойства линейной синфазной эквидистантной антенной решётки от расстояния между её элементами? Почему на практике не целесообразно обеспечивать слишком малое, и наоборот, большое расстояние между элементами решётки?

13. Чем отличаются направленные свойства системы двух связанных линейных симметричных электрических вибраторов, когда вторичный излучатель работает в режиме рефлектора или директора?

Лабораторная работа № 7

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОКАЗАТЕЛИ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК

2.1. Цель работы

Цель работы — установить взаимосвязь между формой амплитудно-фазового распределения по апертуре линейной эквидистантной антенной решетки и её показателями направленности: коэффициентами направленного действия и использования поверхности, максимальным уровнем боковых лепестков; выявить влияние геометрических параметров решётки на её показатели направленности.

2.2. Содержание работы

2.2.1. Исследование влияния амплитудного распределения на показатели направленности антенной решётки

Смоделировать в программе «Характеристики и показатели направленности антенных решеток.xmcd» расположенную в горизонтальной плоскости свободного пространства линейную эквидистантную антенную решётку [4, 5] с заданным по умолчанию периодом $d = 0.5\lambda$ (рис. 4) и числом элементов, равным $(N_0 + 9)$, где N_0 – номер варианта.

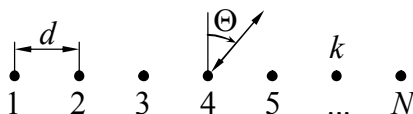


Рис. 4

Полагая, что все элементы антенной решётки являются изотропными излучателями, а фазовое распределение по апертуре — равномерным, выявить влияние формы амплитудного

распределения по апертуре решётки на её показатели направленности:

- коэффициент направленного действия (КНД) D ;
- коэффициент использования линейной решётки $K_{\text{и}}$ (определяется как отношение КНД к КНД при равномерном амплитудном и фазовом распределениях;
- ширину главного лепестка диаграммы направленности (ДН) по уровню половинной мощности ($\Delta\Theta_{0.5}$);
- максимальный уровень боковых лепестков (УБЛ).

Внести в табл. 3 для каждого вида амплитудного распределения по апертуре показатели направленности, сопроводив нормированными диаграммами направленности в логарифмическом масштабе и декартовых координатах.

Таблица 3

Тип амплитудного распределения	КНД, D	Коэффициент использования	Ширина ДН, $\Delta\Theta_{0.5}, ^\circ$	Максимальный УБЛ, дБ
равномерное		1		
треугольное квадратичное				
треугольное линейное				
косинусои- дальное				
косинус- квадратичное				

Заметим, что в силу особенностей построения в MathCAD [6] графиков в полярной системе координат направление по нормали к апертуре горизонтально размещённой решётки ($\Theta = 0^\circ$) соответствует горизонтали (а не вертикали). Поэтому диаграмму направленности, отображаемую на графике в полярной системе координат, следует мысленно повернуть на 90° против часовой стрелки. Кроме того, диаграмма направ-

ленности воспроизводится только для верхнего полупространства, в нижнем полупространстве она либо строго симметрична показанной кривой для верхнего полупространства, либо равна нулю в случае, когда элементы решётки в нижнее полупространство не излучают.

Проанализировать данные табл. 3. Сделать выводы о влиянии формы амплитудного распределения по апертуре антенной решётки на её показатели направленности.

Увеличить число элементов антенной решётки в два раза. Вновь для каждого вида амплитудного распределения по апертуре внести в таблицу, аналогичную табл. 3, показатели направленности, сопроводив нормированными диаграммами направленности.

Проанализировать результаты, сравнить с ранее полученными данными. Сделать выводы о влиянии числа элементов антенной решётки на показатели направленности.

2.2.2. Исследование влияния фазового распределения на показатели направленности антенной решётки

Смоделировать в программе «Характеристики и показатели направленности антенных решеток.xmcd» расположенную в горизонтальной плоскости свободного пространства линейную эквидистантную антенную решётку с заданным по умолчанию периодом $d = 0.5\lambda$ и числом элементов, равным $(N_2 + 9)$, где N_2 – номер варианта.

Полагая, что все элементы антенной решётки являются изотропными излучателями, а амплитудное распределение по апертуре является равномерным, выявить влияние формы фазового распределения по апертуре решётки на её показатели направленности, в том числе на угловое направление главного лепестка ДН (Θ_m). Величину параметра $\Delta\Phi$ квадратичного фазового распределения взять такой, чтобы отклонение начальной фазы тока в периферийном элементе относительно цен-

трального элемента составило сначала 30° , затем 90° и, наконец, 150° . Внести в табл. 4 для каждого вида фазового распределения по апертуре показатели направленности, сопроводив нормированными диаграммами направленности в логарифмическом масштабе и декартовых координатах.

Таблица 4

Тип фазового распределения	$\Theta_m, ^\circ$	КНД, D	Коэффициент использования	Ширина ДН, $\Delta\Theta_{0.5}, ^\circ$	Максимальный УБЛ, дБ
равномерное			1		
линейное, $\Theta_0 = 20^\circ$					
линейное, $\Theta_0 = 40^\circ$					
линейное, $\Theta_0 = 60^\circ$					
квадратичное, $\Delta\Phi = 30^\circ$					
квадратичное, $\Delta\Phi = 90^\circ$					
квадратичное, $\Delta\Phi = 150^\circ$					

Проанализировать данные табл. 4. Сделать выводы о влиянии формы фазового распределения по апертуре антенной решётки на её показатели направленности.

2.2.3. Исследование влияния направленности элемента решётки на показатели направленности антенной решётки

Смоделировать в программе «Характеристики и показатели направленности антенных решеток.xmcd» расположенную в горизонтальной плоскости свободного пространства линейную эквидистантную антенную решётку с заданным по умол-

чанию периодом $d = 0.5\lambda$ и числом элементов, равным пяти (для всех вариантов).

Полагая, что амплитудное распределение и фазовое распределение по апертуре решётки являются равномерными, выявить влияние направленности элементов на показатели направленности решётки. Внести в табл. 5 для каждого вида диаграммы направленности одиночного элемента показатели направленности решётки, сопроводив нормированными диаграммами направленности.

Увеличить число элементов решётки до $(N_0 + 9)$, где N_0 – номер варианта, и исследование повторить.

Таблица 5

Тип излучателя антенной решётки	Число элементов решётки	КНД, D	Ширина ДН, $\Delta\Theta_{0.5}, ^\circ$	Максимальный УБЛ, дБ
изотропный	$N = 5$			
	$N = \dots$			
диполь Герца	$N = 5$			
	$N = \dots$			
полуволновой вибратор	$N = 5$			
	$N = \dots$			
волновой вибратор	$N = 5$			
	$N = \dots$			

Проанализировать данные табл. 5. Сделать выводы о влиянии ДН одиночного элемента на показатели направленности антенной решётки.

2.2.4. Исследование влияния величины периода антенной решётки на её показатели направленности

Смоделировать в программе «Характеристики и показатели направленности антенных решеток.xmcd» расположенную

в горизонтальной плоскости свободного пространства линейную эквидистантную антенную решётку с заданным по умолчанию периодом $d = 0.5\lambda$ и числом элементов, равным $(N_0 + 9)$, где N_0 – номер варианта.

Полагая, что амплитудное распределение и фазовое распределение по апертуре решётки являются равномерными, излучатели – изотропными, выявить влияние величины периода антенной решётки на её показатели направленности – КНД и ширину главного лепестка ДН ($\Delta\Theta_{0.5}$), активировав два последних фрагмента программы.

Внести в отчёт графические полученные зависимости КНД и $\Delta\Theta_{0.5}$ от электрической длины периода антенной решётки d/λ . Проанализировать графики. Объяснить их поведение. Сделать выводы.

Полагая, что амплитудное распределение по апертуре решётки является неравномерным (взять по собственному усмотрению один из возможных вариантов), фазовое распределение – равномерным, излучатели – изотропными, вновь выявить влияние величины периода антенной решётки на её показатели направленности. Внести в отчёт графические зависимости КНД и $\Delta\Theta_{0.5}$ от электрической длины периода антенной решётки d/λ . Проанализировать графики, сравнить с полученными данными в предыдущем пункте. Сделать выводы.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Что представляет собой антенная решётка? В чём состоят её преимущества по сравнению с одиночным излучателем в её составе? В чём недостатки?

2. Чем отличается линейная антенная решётка от плоской и поверхностной? Эквидистантная от неэквидистантной? Какие существуют схемы питания элементов решётки?

3. Что такое амплитудно-фазовое распределение по апертуре антенной решётки? На какие показатели решётки влияет форма распределения? Как оно реализуется технически?

4. Что такое коэффициент направленного действия антенны? Как его величина зависит от количества элементов синфазной антенной решётки? От формы амплитудного распределения по апертуре антенной решётки?

5. Что такое коэффициент использования поверхности раскрыва антенной решётки? Для какой формы амплитудного распределения по апертуре он является максимальным?

6. Что происходит с показателями антенной решётки – коэффициентом направленного действия, коэффициентом использования поверхности, максимальным уровнем боковых лепестков диаграммы направленности – при переходе от равномерного амплитудного распределения по апертуре к спадающему к краям распределению?

7. Какая форма амплитудного распределения по апертуре антенной решётки более предпочтительна для минимизации уровня боковых лепестков диаграммы направленности?

8. Чем опасны боковые лепестки диаграммы направленности антенной решётки, функционирующей в режиме передачи? В режиме приёма радиоволн?

9. К чему приводит реализация линейного фазового распределения по апертуре антенной решётки? Какова должна быть разность фаз токов, запитывающих элементы линейной решётки, для изменения углового положения диаграммы направленности на один градус?

10. Каковы последствия квадратичного фазового распределения по апертуре антенной решётки?

11. Как влияет степень направленности элементов антенной решётки на показатели антенной решётки при малом количестве элементов? при большом количестве элементов?

12. Как влияет величина периода антенной решётки на её показатели направленности – коэффициент направленного действия и ширину главного лепестка диаграммы направленности? Почему коэффициент направленного действия решётки перестаёт расти при увеличении периода сверх величины 0.9λ ?

Лабораторная работа № 8

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ЭКВИДИСТАНТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ

3.1. Цель работы

Цель работы – продемонстрировать возможность, целесообразность и эффективность улучшения показателей направленности линейной эквидистантной антенной решётки за счёт подбора амплитудного, фазового и амплитудно-фазового распределения по её апертуре на основе параметрической оптимизации с использованием эволюционного метода.

3.2. Содержание работы

3.2.1. Исследование возможности улучшения показателей направленности антенной решётки за счёт оптимизации амплитудного распределения

3.2.1.1. Смоделировать в программе «Оптимизация показателей направленности эквидистантной AP.xmcd» расположенную в горизонтальной плоскости свободного пространства линейную эквидистантную антенную решётку изотропных излучателей (рис. 5) с заданным в табл. 6 периодом d и числом элементов N . Амплитудное A_k и фазовое Φ_k распределения по апертуре решётки взять равномерными.

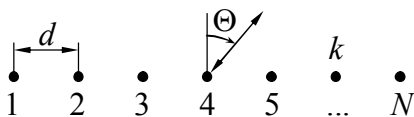


Рис. 5

Внести в отчёт нормированную диаграмму направленности (ДН) решётки в декартовой системе координат, а также по-

казатели направленности: коэффициент направленного действия (КНД) D , ширину главного лепестка ДН по уровню половинной мощности $\Delta\Theta_{0.5}$ и максимальный уровень боковых лепестков (УБЛ) $\xi_{\text{м}}$.

Таблица 6

№	Число элементов, N	Период, d/λ	№	Число элементов, N	Период, d/λ
1	8	0.5	11	12	0.6
2	10		12	10	
3	12		13	8	
4	14		14	10	0.4
5	16		15	12	
6	18		16	14	
7	20		17	16	
8	18	0.6	18	18	
9	16		19	20	
10	14		20	22	

3.2.1.2. Полагая, что фазовое распределение по апертуре антенной решётки является равномерным, с использованием генетического алгоритма [7] найти оптимальное по критерию максимума КНД амплитудное распределение по апертуре.

Для этого в первом разделе фрагмента программы, посвящённого собственно оптимизации, установить соответствующий вид целевой функции (Цель1(Y)) и активировать генетический алгоритм.

В качестве переменных, обеспечивающих минимум целевой функции (КНД со знаком «минус»), в этом фрагменте программы взяты амплитуды токов (полей) в элементах решётки A_k , $k = 1 \dots 0.5N$ (для остальных номеров $A_k = A_{N-k+1}$, так как амплитудное распределение симметрично относительно центра решётки). Один набор числовых значений таких токов представляет собой особь. Совокупность особей в текущем поко-

лении образуют популяцию. Полагая, что начальная популяция генерируется случайным образом, необходимо задать начальные приближения для значений искомых переменных. Следует иметь в виду, что диапазон начальных значений является ориентировочным, так как в процессе скрещивания и генерации потомков (нового поколения) на основе наиболее приспособленных особей предыдущего поколения, получаемые особи - потомки могут выходить за пределы начальных приближений.

Далее для каждой особи начальной популяции вычисляется амплитудная ДН решётки, а по ней – КНД. КНД со знаком «минус» и является первой заданной целевой функцией, аргументы которой – искомые параметры. Из всех особей генетический алгоритм отбирает наиболее приспособленных, то есть тех, у которых значение целевой функции является минимальным. Остальные особи отбрасываются как неконкурентоспособные. Лучшие особи подвергаются процедуре скрещивания между собой (вероятностного улучшения). Далее процесс повторяется – расчёт целевой функции, отбор лучших особей, скрещивание и т. д. Процесс поиска завершается, когда разность максимального и минимального значения целевой функции в пределах популяции становится меньше заданной малой величины (см. описание использованной версии генетического алгоритма в прил. 2).

Заметим, что в ряде случаев оптимальное решение задачи может быть так и не найдено, поскольку задача отыскания глобального экстремума многоэкстремальной функции с помощью генетического алгоритма является вероятностной. Именно поэтому в этом и последующих пунктах генетический алгоритм следует **активировать не менее трёх раз**. Каждый раз полученное решение A_k (оно выводится для всех k от 1 до N) следует скопировать и вставить в начальный фрагмент программы для оценки КНД решётки. Заметим, что наилучшая особь в каждом поколении пишется в файл «Opt_tek.txt», просмотрев который можно не только наблюдать динамику эволюционного отбора, но и узнать значение целевой функции (КНД с «мину-

сом») у наилучшей особи. Далее следует выбрать лучшее решение оптимизационной задачи, выполнить нормировку и внести в отчёт нормированное амплитудное распределение в виде таблицы и графика, соответствующую ему амплитудную ДН и показатели направленности. Сделать выводы.

3.2.1.3. Полагая, что фазовое распределение по апертуре решётки является равномерным, с использованием генетического алгоритма найти оптимальное по критерию минимума максимального УБЛ амплитудное распределение по апертуре.

Для этого в первом разделе фрагмента программы, посвящённого оптимизации, установить следующий вид целевой функции: $\text{Цель2}(Y)$; не менее трёх раз активировать генетический алгоритм.

Выбрать наилучшее из трёх решение задачи оптимизации и внести в отчёт найденное нормированное амплитудное распределение (таблицу и график), соответствующую ему амплитудную ДН и показатели направленности. По полученным результатам сделать выводы.

3.2.2. Исследование возможности улучшения показателей направленности антенной решётки за счёт оптимизации фазового распределения

3.2.2.1. Дезактивировать вызов генетического алгоритма в первом фрагменте оптимизации. Установить в начальном фрагменте программы равномерное амплитудное распределение по апертуре антенной решётки: $A_k = 1$.

С использованием генетического алгоритма найти оптимальное фазовое распределение по критерию максимума КНД и обеспечения заданного угла фазирования $\Theta = 30^\circ$. Для этого во втором разделе фрагмента оптимизации установить указанное значение угла фазирования, соответствующий вид целевой функции (Цель3), и активировать генетический алгоритм (последовательно не менее трёх раз). Число переменных (начальных фаз токов или полей), определяющих максимум КНД, те-

перь в два раза больше, так как априорно симметрия (чётность или нечётность относительно центра решётки) фазового распределения не предполагается. Заметим, что последнее вовсе не означает, что его не может быть.

Выбрать наилучшее из трёх решение задачи оптимизации. Внести в отчёт найденное фазовое распределение (таблицу и график), соответствующую ему амплитудную ДН и показатели направленности решётки. В таблице с фазовым распределением предусмотреть строку с указанием набега фазы (разности фаз токов) между соседними элементами. По полученным результатам сделать выводы.

3.2.2.2. Установить в начале программы равномерное амплитудное распределение по апертуре решётки: $A_k = 1$.

С использованием генетического алгоритма найти оптимальное фазовое распределение по критерию минимума максимального УБЛ и обеспечения заданного угла фазирования. Для этого во втором разделе фрагмента оптимизации установить вид целевой функции «Цель4» и активировать генетический алгоритм (последовательно не менее трёх раз).

Выбрать наилучшее решение задачи оптимизации и внести в отчёт найденное фазовое распределение (таблицу и график), соответствующую ему амплитудную ДН и показатели направленности. По полученным результатам сделать выводы.

3.2.2.3. Не изменяя найденное оптимальное фазовое распределение по апертуре решётки, установить амплитудное распределение, полученное в п. 3.2.1.3. Внести в отчёт графики амплитудного и фазового распределений по апертуре, амплитудную ДН решётки и её показатели направленности. Сравнить текущие показатели с полученными в пп. 3.2.1.3 и 3.2.2.2. Сделать выводы.

3.2.2.4. Не изменяя установленное неравномерное амплитудное распределение по апертуре антенной решётки, с использованием генетического алгоритма вновь найти оптимальное

фазовое распределение по критерию минимума максимального УБЛ и обеспечения заданного угла фазирования (активируя алгоритм не менее трёх раз).

Выбрать наилучшее решение задачи оптимизации и внести в отчёт исходное амплитудное и найденное фазовое распределения (таблицу и графики), соответствующую им амплитудную ДН и показатели направленности решётки. По полученным результатам сделать выводы.

3.2.3. Исследование возможности улучшения показателей направленности антенной решётки за счёт оптимизации амплитудно-фазового распределения

3.2.3.1. Дезактивировать вызов генетического алгоритма во втором фрагменте оптимизации.

С использованием генетического алгоритма найти оптимальное амплитудно-фазовое распределение по критерию минимума максимального УБЛ и обеспечения заданного угла фазирования. Для этого в третьем разделе фрагмента оптимизации установить следующий вид целевой функции: Цель5; активировать генетический алгоритм (последовательно не менее трёх раз). Число искоемых переменных (амплитуд и начальных фаз токов или полей), определяющих минимум бокового излучения, при такой оптимизации составляет $1.5N$, так как априорно предполагается симметрия (чётность относительно центра решётки) амплитудного распределения и асимметрия фазового распределения.

Выбрать наилучшее решение задачи оптимизации и внести в отчёт полученное амплитудное и фазовое распределения (таблицы и графики), соответствующую им амплитудную ДН и показатели направленности решётки. Сравнить результаты с данными, полученными в пп. 3.2.1.3, 3.2.2.2, 3.2.2.4. Сделать выводы. В случае заметного проигрыша варианта одновременной оптимизации амплитудного и фазового распределений полученный результат необходимо объяснить и вновь активиро-

вать генетический алгоритм, вдвое увеличив число особей в популяции, коэффициент отбраковки неперспективных особей и уменьшив показатель точности.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Что такое оптимальное решение задачи? Наилучшее достигнутое решение? Каким образом следует при этом математически формализовать задачу? Ответ проиллюстрируйте одной из решаемых в работе оптимизационных задач.

2. Раскройте содержание основных этапов работы генетического алгоритма при решении оптимизационной задачи.

3. Раскройте сущность терминов, используемых при реализации генетического алгоритма применительно к оптимизации показателей антенной решётки за счёт поиска наилучшего амплитудного распределения по апертуре: особь, популяция, вырожденная популяция, приспособленность особи, элиминирование особей, генерация потомков.

4. Чем отличается использованная в работе модификация генетического алгоритма от классической версии? В чём преимущества такой модификации алгоритма? На каком предположении оно основано?

5. Из каких соображений активацию генетического алгоритма при решении оптимизационных задач в рамках лабораторного исследования следовало проводить неоднократно? За счёт чего вероятно можно было бы отыскать наилучшее достигнутое решение по результатам меньшего числа активаций генетического алгоритма?

6. Сделайте вывод по результатам выполнения работы в части того, какой формы амплитудное распределение по раскрытию антенной решётки является наилучшим по критерию обеспечения максимума коэффициента направленного действия. Объясните, почему?

7. На сколько дБ удаётся уменьшить максимальный уровень боковых лепестков ДН антенной решётки за счёт реализа-

ции найденного наилучшего амплитудного распределения по апертуре по сравнению со случаем равномерного амплитудного распределения? Треугольного распределения?

8. Сделайте вывод по результатам выполнения работы в части того, какой формы фазовое распределение по раскрытию антенной решётки является наилучшим по критерию обеспечения заданного угла фазирования и максимума коэффициента направленного действия. Объясните, почему?

9. По результатам выполнения работы предложите последовательность независимого отыскания амплитудного и фазового распределений по апертуре антенной решётки по критерию обеспечения заданного угла фазирования и минимума максимального УБЛ.

10. Объясните, почему при одновременной оптимизации с помощью генетического алгоритма амплитудного и фазового распределений по апертуре антенной решётки результат оптимизации (с точки зрения максимального УБЛ) может проигрывать случаю последовательной и независимой оптимизации амплитудного и фазового распределений? Что необходимо предпринять для увеличения эффективности одновременной оптимизации распределений?

Указания по выполнению моделирования элемента и фазированной антенной решетки в программе MMANA

Для построения в программе MMANA симметричного вертикального электрического вибратора следует во вкладке «Геометрия» (рис. П.1) [3]:

- задать рабочую частоту в МГц;
- установить параметры сегментации по умолчанию;
- рассчитать координаты начала и конца вибратора в долях длины волны (в лямбдах).

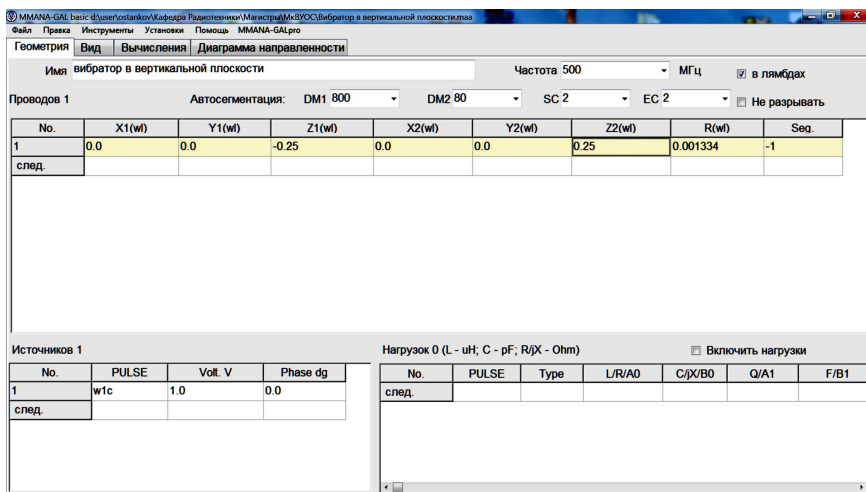


Рис. П.1

Из рис. П.2 видно, что координата начала проводника вибратора лежит на оси Oz (т.е. $x = 0, z = 0$) и сдвинута по ней на величину длины плеча ℓ в отрицательную сторону, координата конца вибратора также расположена на оси Oz и сдвинута на величину длины плеча ℓ в положительном направлении.

Затем следует:

- записать координаты начала и конца проволоочной антенны в соответствующие ячейки таблицы (рис. П.1);

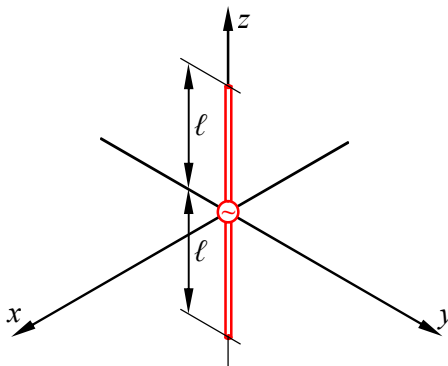


Рис. П.2

– установить источник напряжения, запитывающего антенну, в центре проводника вибратора, указав в таблице описания источников в столбце «Pulse» – w1c (рис. П.1).

Для моделирования во вкладке «Вычисления» (рис. П.3) установить тип подстилающей поверхности – свободное пространство, произвести расчёты нажатием кнопки «Пуск».

MMANA-GAL: basic d:\user\ostankov\Кафедра Радиотехники\Магистры\Мм-ВУС\Вибратор в вертикальной плоскости.lla

Файл Правка Инструменты Установки Помощь MMANA-GALpro

Геометрия Вид Вычисления **Диаграмма направленности**

вибратор в вертикальной плоскости

Частота 500 МГц

Земля:

- ☒ Свободное пространство
- ☐ Идеальная
- ☐ Реальная

Высота 7.00 м

Материал без потерь

ДЛИНА ВОЛНЫ = 0.600 (m)
ВСЕГО ТОЧЕК ДЛЯ РАСЧЕТА = 43
ЗАПОЛНЕНИЕ МАТРИЦ...
РАСЧЕТ МАТРИЦ...
ТОЧКА U (В) I (мА) Z (Ом) KCB
w1c 1.00+0.00 8.97-4.77 86.89+46.26 2.39
РАСЧЕТ ТОКОВ...
РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ...
РАСЧЕТ АНТЕННЫ УСПЕШНО ЗАВЕРШЕН
0.03 sec

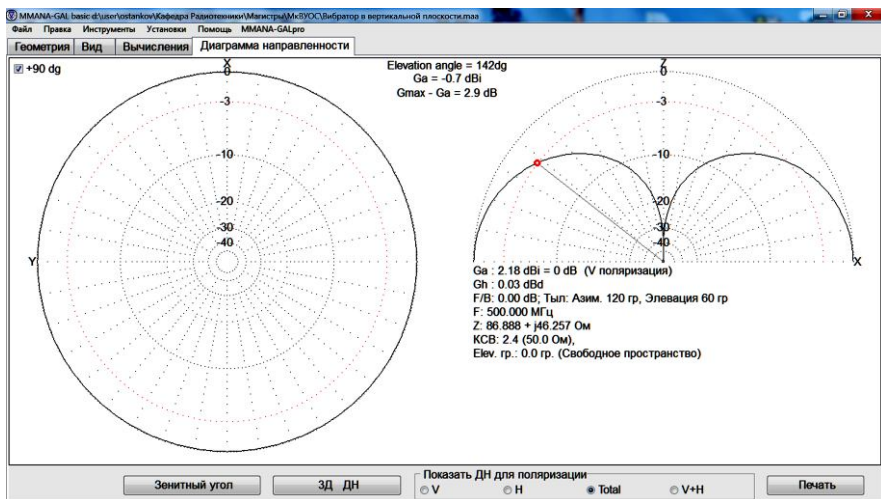
No.	F (МГц)	R (Ом)	X (Ом)	KCB 50	Gh (dBd)	Ga (dBi)	F/B (dB)	Elev(гр)	Земля	Высота	Поляр.
2	500.0	86.89	46.26	2.39	0.03	2.18	---	---	Своб.	---	верт.
1	500.0	86.89	46.28	2.39	0.03	2.18	---	---	Своб.	---	верт.

Пуск Оптимизация Шаги оптимизации Графики Правка провода Правка элемента

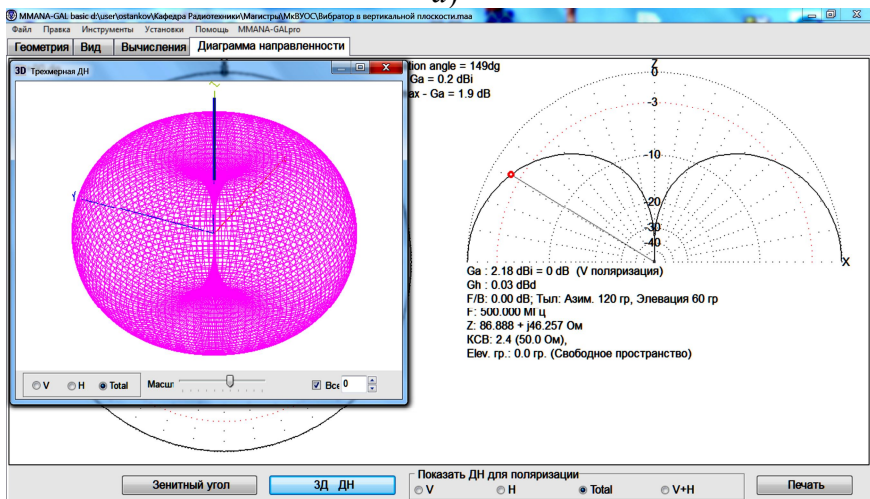
Рис. П.3

Диаграмму направленности следует анализировать во вкладке «Диаграмма направленности» (рис. П.4, а).

При клике мышкой по ДН, представленной в сечениях, появляется визир, позволяющий снять значения ДН и определить ширину главного лепестка ДН и уровень её боковых лепестков. Имеется возможность анализа трёхмерной ДН, привязанной в пространстве к конструкции антенны (рис. П.4, б).



а)



б)

Рис. П.4

Далее во вкладке «Вычисления» следует нажать кнопку «Графики» (рис. П.5).

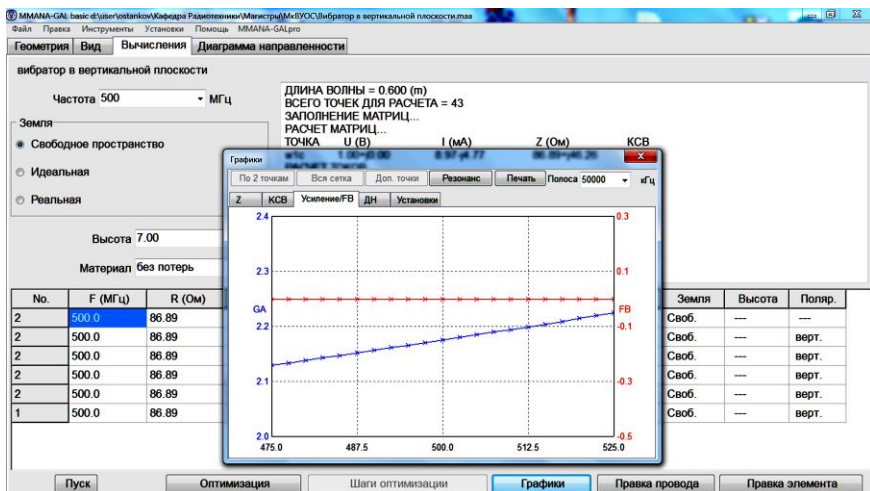


Рис. П.5

В открывшемся окне во вкладке «Настройки» установить в позиции «Доп. точки» число 4, не включая виртуальные согласующие устройства по КСВ и входному сопротивлению Z . Далее в позиции «Полоса» необходимо указать значение, соответствующее 10-процентной полосе частот, нажать кнопку «Доп. точки», перейти на вкладки « Z », «КСВ» и «Усиление».

Кривая распределения тока по проводникам антенны, а также внешний вид конструкции антенны, привязанной к осям координат, доступны во вкладке «Вид».

Для построения горизонтальной антенной решётки симметричных вибраторов следует во вкладке «Геометрия»:

- задать рабочую частоту;
- рассчитать координаты начала и конца первого (левого) вибратора; из рис. П.6 видно, что координаты вибратора лежат в плоскости yOz (т. е. $x=0$) и сдвинуты по оси Oy на величину $d/2$ в отрицательную сторону; при этом координаты начала и конца вибратора сдвинуты на ℓ вдоль оси Oz в положительную и отрицательную стороны;

- аналогичным образом рассчитать координаты начала и конца второго вибратора;
- записать координаты в соответствующие ячейки таблицы;
- установить источники в центре каждого проводника (в таблице описания источников в столбце «Pulse» необходимо задать $w1c$ и $w2c$).

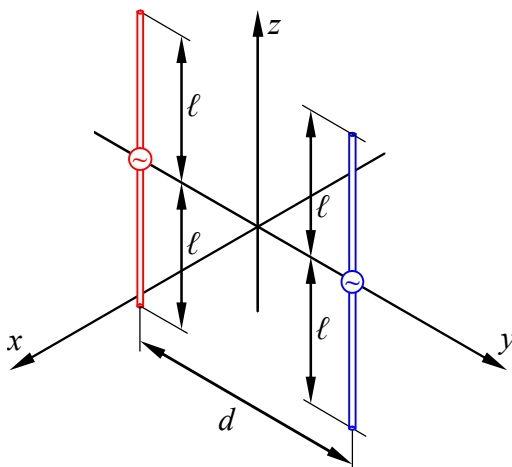


Рис. П.6

Для моделирования во вкладке «Вычисления» (рис. П.3) установить тип подстилающей поверхности в виде свободного пространства и произвести расчёты нажатием кнопки «Пуск».

Приложение 2

Назначение и описание модифицированного генетического алгоритма для параметрической оптимизации

В настоящее время наиболее предпочтительными методами многопараметрической многоэкстремальной оптимизации являются генетические алгоритмы, реализующие постулаты теории эволюции и опыта селекции растений и животных. Стратегия поиска оптимального решения в генетических алгоритмах опирается на гипотезу селекции: чем выше приспособ-

ленность особи, тем выше вероятность того, что в потомстве, полученном с её участием, признаки, определяющие приспособленность, будут выражены ещё сильнее [7].

Генетические алгоритмы представляют собой элементарную модель процесса эволюции популяций особей в природе. Если принять, что каждая особь популяции является точкой в многокоординатном пространстве оптимизационной задачи $X_i(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{Ni})$, а приспособленность особи – соответствующим значением целевой функции $f(X_i)$, то популяцию особей можно рассматривать как множество координатных точек в пространстве, а процесс эволюции – как движение этих точек в сторону оптимальных значений целевой функции.

Подобно тому, как в природе информация о наследственных признаках организмов представлена в хромосомах в виде линейной последовательности различных комбинаций четырех нуклеотидов (А – аденин, Ц – цитозин, Т – тимин, Г – гуанин), в генетическом алгоритме векторы переменных также записываются в виде цепочек символов с использованием двух-, трёх- или четырёхбуквенного алфавита. Хромосомное представление информации позволяет применять генетические операторы: кроссовер, мутацию и инверсию. Генетические операторы являются упрощённой формой передачи наследственности. В природе они обеспечивают процесс эволюции, а в генетических алгоритмах оптимизации – движение координатных точек в направлении оптимальных значений целевой функции.

Генетический алгоритм включает следующие этапы:

1. Создание в исследуемом пространстве поиска E^N начальной популяции особей размером μ ($\mu > N$), где N – размерность задачи. Исходная популяция обычно создается случайным образом сразу в символьном виде.

2. Перевод каждого вектора координат $X_i(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{Ni})$, где $i = 0 \dots \mu$, из символьного вида в десятичный и расчёт целевой функции для каждой координатной точки: $f(X_i)$, $i = 0 \dots \mu$.

3. Оценка популяции на вырожденность. Вырожденность популяции оценивается по разности максимального $f_{\max}$ и минимального $f_{\min}$ значений целевой функции. При условии, что

$$|f_{\max} - f_{\min}| \leq \varepsilon, \quad (\text{П.1})$$

где ε – достаточно малое число, популяция вырождается в точку, соответствующую решению задачи. В противном случае выполняется следующий пункт.

4. Удаление из популяции $r \cdot \mu$ наименее приспособленных по значению целевой функции особей, где r – коэффициент элиминирования или отбраковки (обычно он принимается равным 0.1). Оставшиеся $(1-r) \cdot \mu$ особей составляют родительскую группу, которая используется для генерации потомства.

5. Из родительской группы равновероятно $r \cdot \mu$ раз выбираются пары родительских особей, к которым последовательно применяются генетические операторы. В результате генетических операций генерируются $r \cdot \mu$ потомков – новых координатных точек. Полученные потомки помещаются в исходную популяцию, и для них вычисляются значения целевой функции.

6. Алгоритм переходит к п. 3 на новый этап эволюции.

Генетические алгоритмы при поиске глобального экстремума целевой функции используют вероятностный подход. В связи с этим целесообразно говорить не о глобальном экстремуме, а о наилучшем достигнутом решении в принятом диапазоне поиска. Успех работы генетического алгоритма, прежде всего, обеспечивается идеей коллективного поиска, т.е. поиска с помощью популяции поисковых точек и генетических операторов, заимствованных из природы. Генетические операторы, воздействуя с некоторой вероятностью на хромосомы родителей, обеспечивают, с одной стороны, передачу потомству информации о состоянии популяции, а с другой – поддерживают на протяжении всей эволюции достаточный уровень его изменчивости, что сохраняет поисковую способность алгоритма.

Поисковая способность генетических алгоритмов в значительной степени зависит от размера популяции. Очевидно, чем больше размер популяции, тем больше вероятность приближения к искомому глобальному экстремуму. Однако на практике размер популяции ограничен возможностями вычислительной техники и лежит обычно в пределах от 10 до 500.

Особенностью генетических алгоритмов является то, что ни один из генетических операторов (кроссовер, мутация, инверсия) в процессе генерирования потомков не опирается на знание локального рельефа поверхности целевой функции. Формирование потомков происходит случайным образом, и нет гарантии, что найденные решения будут лучше родительских. Поэтому в процессе эволюции встречаются «неудачные» потомки, которые расширяют число обращений к целевой функции, увеличивая время поиска глобального экстремума.

В задачах оптимизации показателей направленности антенных решёток в качестве целевой функций обычно выбирается интегральный критерий, рассчитываемый на основе определённой в широком угловом секторе диаграммы направленности и требующий значительного объёма вычислений. Для таких задач к алгоритму оптимизации предъявляются относительно жёсткие требования по числу обращений к целевой функции.

С учётом этого предлагается использовать модификацию генетического алгоритма для универсального использования в задачах сравнительно небольшой размерности. Модифицированный генетический алгоритм, разработанный коллективом учёных МЭИ [8], сохраняет в себе генетические качества статистической селекции популяции поисковых точек. Для исключения неудачных потомков при их генерировании в модифицированном генетическом алгоритме реализована процедура регулярного поиска локальных экстремумов с использованием операций деформируемого многогранника [9].

Ниже приведено описание работы модифицированного генетического алгоритма.

В блоке 1 алгоритма вводится размерность задачи оптимизации N , число особей в популяции μ , точность решения задачи ε , а также две матрицы начальных предельных максимальных и минимальных значений координат оптимизируемого вектора популяции.

В первом пункте блока 2 создается матрица случайных чисел для координат μ начальных векторов оптимизации X_H :

$$x_{H_{i,j}} = \text{rnd}(x_{H_{i,j}}^{\max} - x_{H_{i,j}}^{\min}) + x_{H_{i,j}}^{\min}, i \in \overline{1, N}, j \in \overline{1, \mu}. \quad (\text{П.2})$$

Во втором пункте блока 2 для матрицы координат векторов начальной популяции вычисляются значения целевой функции (численно по подпрограмме):

$$F_j = f(x_{H_j}), j \in \overline{1, \mu}. \quad (\text{П.3})$$

В третьем пункте блока 2 объединяются матрица X_H и вектор F , и создается матрица состояния популяции X :

$$X = \begin{pmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1,\mu-1} & x_{1,\mu} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N,1} & \dots & x_{N,\mu-1} & x_{N,\mu} \\ x_{N+1,1} & \dots & x_{N+1,\mu-1} & x_{N+1,\mu} \end{pmatrix}, \quad (\text{П.4})$$

где элементами $(N+1)$ -й строки являются значения вектора F .

Матрица X в процессе генетического отбора обновляется от поколения к поколению и является показателем степени приближения решения к глобальному экстремуму.

В блоке 3 производится сортировка столбцов матрицы X по возрастанию значений элементов $(N+1)$ -й строки. После сортировки последние столбцы матрицы X будут содержать неперспективные особи, которые при смене поколения должны быть элиминированы, т.е. заменены на новые, более перспективные.

В блоке 4 популяция оценивается на вырожденность матрицы состояния X . Если условия блока 4 выполняются, задача считается решённой и алгоритм выходит на окончание расчёта, и в блоке 5 выводится первый столбец матрицы X . В противном случае в блоке 5 устанавливается начальное значение счетчика поколений $r = 0$, и алгоритм переходит к блоку 7.

В первом пункте блока 7 создается вектор P из $N+1$ целых случайных неповторяющихся чисел. Случайные числа ге-

нерируются в интервале от 1 до $0.9 \cdot \mu$ (по числу оставшихся в популяции перспективных особей):

$$P_j = \text{rnd}(0.9 \cdot \mu), j \in \overline{1, N+1}. \quad (\text{П.5})$$

Во втором пункте блока 7 из матрицы состояния X выбираются столбцы родительской группы $N+1$ особей для r -го регулярного поиска потомков. Принцип формирования матрицы родительской группы A_n показан ниже:

$$A_n = \begin{pmatrix} x_{1,p_1} & \dots & x_{1,p_N} & x_{1,p_{N+1}} \\ x_{2,p_1} & \dots & x_{2,p_N} & x_{2,p_{N+1}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N,p_1} & \dots & x_{N,p_N} & x_{N,p_{N+1}} \end{pmatrix}. \quad (\text{П.6})$$

В третьем пункте блока 7 вычисляются $N+1$ элементов вектора значений целевой функции Ff для столбцов матрицы A_n , а в четвёртом создается матрица состояния родительской группы особей r -го регулярного поиска локального экстремума A . Элементами $(N+1)$ -й строки матрицы A является вектор значений функции цели Ff :

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,N} & a_{1,N+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N,1} & \dots & a_{N,N} & a_{N,N+1} \\ a_{N+1,1} & \dots & a_{N+1,N} & a_{N+1,N+1} \end{pmatrix}. \quad (\text{П.7})$$

В блоке 8 производится сортировка столбцов матрицы A по возрастанию значений $(N+1)$ -й строки, а в блоке 9 оценивается степень сжатия столбцов матрицы A . Оценка делается по элементам $(N+1)$ -й строки. Если условие блока 9 выполняется, то считается, что локальный экстремум найден, и в блоке 10 первый столбец матрицы A записывается в $(0.9 \cdot \mu + r)$ -й столбец матрицы X и устанавливается новое значение счётчика поколений: $r = r + 1$. Затем, в блоке 11 проверяется число найденных локальных экстремумов r .

Если выполняется условие:

$$r < \text{int}(0.1 \cdot \mu), \quad (\text{П.8})$$

где $\text{int}(\dots)$ – целое число от аргумента, то алгоритм возвращается к блоку 3; в противном случае – к блоку 7. Если условие (П.8) не выполняется, то алгоритм переходит ко второй части блок-схемы – к регулярному поиску локального экстремума.

В блоке 12 вычисляются координаты центра тяжести матрицы A , который определяется без $(N+1)$ -го наихудшего столбца. Там же во втором пункте выполняется операция «отражения» от наихудшего столбца, и вычисляется значение целевой функции для отражённого $(N+2)$ -го столбца.

Если значение целевой функции в отражённой точке $a_{N+1,N+3}$ меньше или равно, чем наилучшее $a_{N+1,1}$, то в блоке 14 выполняется операция «растяжения» матрицы в перспективном направлении. Для нового $a_{N+1,N+4}$ -го столбца вычисляется целевая функция и сравнивается с наилучшим значением $a_{N+1,1}$. Если $a_{N+1,N+4} < a_{N+1,1}$, то столбец матрицы A^{N+4} записывается на место наихудшего столбца A^{N+1} , и алгоритм возвращается к блоку 8 для новой сортировки столбцов матрицы A . В противном случае в столбец A^{N+1} записываются элементы столбца A^{N+3} , и алгоритм также переходит к блоку 8.

Если в блоке 13 $a_{N+1,N+3} > a_{N+1,1}$, то в блоке 18 элемент $a_{N+1,N+3}$ сравнивается с элементом $a_{N+1,N}$ второго после наихудшего столбца. Если $a_{N+1,N+3} < a_{N+1,N}$, то в столбец A^{N+1} записываются элементы столбца A^{N+3} , и алгоритм возвращается к блоку 8. В противном случае значения функции цели в $(N+3)$ -м столбце сравнивается с наихудшим $(N+1)$ -м значением.

Если $a_{N+1,N+3} < a_{N+1,N+1}$, то в столбец A^{N+1} записываются элементы столбца A^{N+3} , и алгоритм переходит к блоку 20. В противном случае алгоритм переходит к блоку 20 без передачи элементов столбца. В блоке 20 выполняется операция «сжатия» матрицы A в пространстве между центром тяжести и наихудшим столбцом и, соответственно, вычисление целевой функции в новом $(N+5)$ -м столбце. Если $a_{N+1,N+5} < a_{N+1,N+1}$, то в блоке 22 в столбец A^{N+1} записываются элементы столбца A^{N+5} , и

алгоритм возвращается к блоку 8. В противном случае в блоке 23 происходит «редукция» матрицы A . Редукция – это уменьшение вдвое расстояния всех столбцов от наилучшего столбца A^1 . Для новых значений элементов первых N строк всех столбцов матрицы A вычисляются и записываются в $(N+1)$ -ю строку значения целевой функции. Затем алгоритм возвращается к блоку 8.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неганов, В.А. Современная теория и практические применения антенн [Текст] / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой. – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.

2. Антенны: учеб. пособие [Электронный ресурс] / Ю.Т. Зырянов, П.А. Федюнин, О.А. Белоусов [и др.]. – 4-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2020. – 412 с. – Режим доступа: URL: <https://e.lanbook.com/book/133478>.

3. Описание базовой MMANA-GAL [Сайт]. – Режим доступа: URL: <http://gal-ana.de/basicmm/ru>.

4. Петрушанский, М.Г. Основы конструирования антенных решеток [Электронный ресурс]: учеб. пособие / М.Г. Петрушанский. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2017. – 115 с. – Режим доступа: URL: <https://www.iprbookshop.ru/78805.html>.

5. Обуховец, В.А. Анализ и синтез антенных систем [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.А. Обуховец. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2016. – 96 с. – Режим доступа: URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493257>.

6. Дьяконов, В.П. MathCAD 8-12 для студентов [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.П. Дьяконов. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 589 с. – Режим доступа: URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=271842>.

7. Гладков, Л.А. Генетические алгоритмы [Электронный ресурс]: учеб. / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик; под ред. В.М. Курейчик. – М.: Физматлит, 2010. – 317 с. – Ре-

жим доступа: URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68417>.

8. Сабанин, В.Р. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации в управлении / В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов, А.И. Репин // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – № 3-4. – С. 78-85.

9. Есипов, Б.А. Методы исследования операций: учеб. пособие / Б.А. Есипов. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Лань, 2021. – 304 с. – Режим доступа: URL: <https://e.lanbook.com/book/168876>.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа № 6.	
Исследование излучающей системы из нескольких симметричных вибраторов	4
Лабораторная работа № 7.	
Характеристики и показатели направленности антенных решёток	11
Лабораторная работа № 8.	
Оптимизация показателей направленности эквидистантной антенной решётки	18
Приложение 1.	
Указания по выполнению моделирования элемента и фазированной антенной решетки в программе MMANA	26
Приложение 2.	
Назначение и описание модифицированного генетического алгоритма для параметрической оптимизации	31
Библиографический список	37

МИКРОВОЛНОВЫЕ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным работам № 6 - 8
для студентов направления 11.04.01 «Радиотехника»
(программа «Радиотехнические средства обработки и защиты
информации в каналах связи»)

Составитель
Останков Александр Витальевич

В авторской редакции

Подписано к изданию 31.01.2022.
Уч.-изд. л. 2,4.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
394026 Воронеж, Московский проспект, 14