

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 690 780** ⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК

[G06F 7/58 \(2006.01\)](#)

[H03B 29/00 \(2006.01\)](#)

[G01S 7/02 \(2006.01\)](#)

(52) СПК

G06F 7/588 (2019.02)

G11C 13/0069 (2019.02)

H03B 29/00 (2019.02)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: [2018123052](#), 25.06.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
25.06.2018

Дата регистрации:
05.06.2019

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 25.06.2018

(45) Опубликовано: [05.06.2019](#) Бюл. № 16

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2207586 C2, 27.06.2003. RU
2416157 C1, 10.04.2011. SU 1432742 A,
23.10.1988. SU 1075267 A, 23.02.1984. US
2017/0372783 A1, 28.12.2017.

Адрес для переписки:
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14,
ФГБОУ ВО "ВГТУ", патентный отдел

(72) Автор(ы):

Глушков Алексей Николаевич (RU),
Калинин Максим Юрьевич (RU),
Литвиненко Владимир Петрович (RU),
Литвиненко Юлия Владимировна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

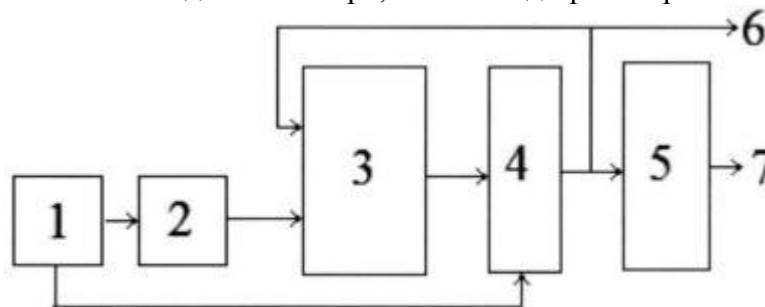
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Воронежский
государственный технический
университет" (RU)

(54) Цифровой имитатор случайных сигналов

(57) Реферат:

Изобретение относится к области радиотехники и измерительной техники. Технический результат изобретения заключается в обеспечении формирования продолжительной последовательности псевдослучайных чисел с произвольным двумерным распределением вероятностей, определяемым его марковской моделью. Цифровой имитатор случайных сигналов содержит генератор равновероятных псевдослучайных чисел, тактовый вход которого соединен с генератором опорной частоты, а цифровой выход - с младшими разрядами блока памяти, и регистр, тактовый вход которого соединен с выходом генератора опорной частоты, а вход подключен к выходу блока памяти, выход регистра соединен со старшими разрядами блока памяти и с входом цифроаналогового преобразователя, выход которого

образует аналоговый выход имитатора, а выход регистра - цифровой выход



Фиг. 1

имитатора. 6 ил.

Изобретение относится к областям радиотехники и измерительной техники и может быть использовано для имитации сигналов и помех при тестировании аппаратуры радиосвязи и систем управления.

Известен цифровой генератор хаотического сигнала [1] на базе регистра сдвига и аналогового источника шума, формирующий «истинно случайный» цифровой сигнал с равновероятными отсчетами, в котором отсутствует возможность изменения статистических характеристик сигнала.

Известны цифровые генераторы [2] псевдослучайных двоичных последовательностей (например, М-последовательностей, последовательностей Гоулда, Кассами и др.), формируемых с помощью регистров сдвига с линейными или нелинейными обратными связями. Они также формируют цифровые сигналы с равновероятными отсчетами.

Известен [3] датчик случайных чисел с равномерным распределением вероятностей, в котором используются записанные в блоке памяти случайные числа, которые «перемешиваются» с помощью двоичных счетчиков, улучшая качество совпадения формируемых чисел с теоретическим равномерным законом распределения вероятностей. Его недостатком является отсутствие возможностей формирования псевдослучайных чисел с различными законами распределения вероятностей.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому устройству является имитатор радиосигналов [4], содержащий генератор опорной частоты, блок памяти, устройство считывания данных, цифроаналоговый преобразователь. Устройство имитирует сигналы произвольного вида, представленные модельными файлами данных или цифровыми записями сигналов, которые предварительно записываются в блок памяти и считываются в процессе имитации. Его недостатком является ограниченность продолжительности воспроизводимой реализации, что особенно существенно при высокочастотном считывании данных.

Задачей предлагаемого технического решения является обеспечение формирования продолжительной последовательности псевдослучайных чисел с произвольным двумерным распределением вероятностей, определяемым его марковской моделью.

Поставленная задача решается тем, что цифровой имитатор случайных сигналов, содержащий генератор опорной частоты, блок памяти, цифроаналоговый преобразователь, дополнительно содержит генератор равновероятных псевдослучайных чисел, тактовый вход которого соединен с генератором опорной частоты, а цифровой выход - с младшими разрядами блока памяти и регистр, тактовый вход которого соединен с выходом генератора опорной частоты, а вход подключен к выходу блока памяти, выход регистра соединен со старшими разрядами блока памяти и с входом цифроаналогового преобразователя, выход которого

образует аналоговый выход имитатора, а выход регистра - цифровой выход имитатора.

Предлагаемое техническое решение поясняется чертежами.

На фиг. 1 представлена структурная схема предлагаемого устройства, на фиг. 2 - трехмерные диаграммы матриц переходных вероятностей гауссовского случайного процесса с различными коэффициентами корреляции, на фиг. 3 - их трехмерные диаграммы функций распределения вероятностей, на фиг. 4 - экспериментальные трехмерные диаграммы матрицы переходных вероятностей и функции распределения вероятностей радиосигнала с цифровой частотной манипуляцией и гауссовской огибающей (GMSK), на фиг. 5 - результаты моделирования работы имитатора нормального случайного сигнала, а на фиг. 6 - результаты моделирования для сигнала с GMSK.

Генератор опорной частоты 1 выдает тактовые импульсы (ТИ), по которым генератор псевдослучайных чисел (ГПСЧ) 2 формирует D-разрядные равновероятные двоичные коды, определяющие значения функции распределения вероятностей марковской модели F_{ij} и задающие младшие разряды ячеек блока памяти 3, в которых записаны значения j следующего m -разрядного двоичного кода отсчета имитируемого сигнала при заданном значении i кода предшествующего отсчета. Выход блока памяти 3 соединен с входом регистра 4, в который по ТИ записывается код j . Выход регистра 4 подключен к старшим m разрядам блока памяти 3, которые определяют код i . С выхода регистра 4 двоичные коды отсчетов j поступают на цифровой выход 6 имитатора и на вход цифроаналогового преобразователя (ЦАП) 5, формируя аналоговый выходной сигнал 7 имитатора.

Устройство работает следующим образом.

Формируется однородная марковская модель [5, 6] имитируемого сигнала, описываемая матрицей переходных вероятностей

$$[P_{ij}] = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1M} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2M} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{M1} & P_{M2} & \dots & P_{MM} \end{bmatrix} \quad (1)$$

перехода дискретного сигнала от значения $z_n=i$, $i = \overline{1, M}$, $M=2^m$ (m - число разрядов двоичного кода отсчета) в момент времени t_n к значению $z_{n+1}=j$, $j = \overline{1, M}$ в следующий момент времени t_{n+1} , n - номер отсчета имитируемого сигнала.

На основе матрицы переходных вероятностей $[P_{ij}]$ формируется матрица двумерной функции распределения вероятностей

$$F_{ij} = \sum_{m=1}^j P_{im}, \quad (2)$$

с помощью которой имитируется сигнал.

Для нормального случайного процесса $x(t)$ со значениями $x(t_1)=x_1$ и $x(t_2)=x_2$ двумерная плотность вероятностей имеет вид [7]

$$w(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma^2\sqrt{1-r^2}} \exp\left[-\frac{(x_1 - x_{CP})^2 + 2r(x_1 - x_{CP})(x_2 - x_{CP}) + (x_2 - x_{CP})^2}{2(1-r^2)\sigma^2}\right], \quad (3)$$

где x_{CP} - среднее значение, σ^2 - дисперсия, r - коэффициент корреляции. Если выбирать шаг квантования по уровню

$$d = \frac{(6+8)\sigma}{M} \quad (4)$$

и значения уровней квантования

$$g_m = \begin{cases} -\infty & \text{при } m = 0, \\ \left(m - \frac{M}{2}\right) \cdot d + x_{\text{CP}} & \text{при } m = 1, (M-1), \\ \infty & \text{при } m = M, \end{cases} \quad (5)$$

то для переходных вероятностей получим

$$[P_{ij}] = \frac{\int_{g_{i-1}}^{g_i} \int_{g_{j-1}}^{g_j} w(x_1, x_2) dx_2 dx_1}{\int_{g_{i-1}}^{g_i} \int_{-\infty}^{\infty} w(x_1, x_2) dx_2 dx_1}. \quad (6)$$

Матрицы $[P_{ij}]$ и $[F_{ij}]$ удобно представлять графически в трехмерных координатах. Для рассмотренного двумерного нормального распределения при $x_{\text{CP}}=0$, $\sigma^2=4$ и $M=32$ ($m=5$) диаграммы $[P_{ij}]$ показаны на фиг 2, а $[F_{ij}]$ - на фиг. 3.

Аналогичная марковская модель может быть построена по экспериментальной реализации радиосигнала достаточно большого объема. В качестве примера на фиг. 4 показаны полученные экспериментально трехмерные диаграммы матрицы переходных вероятностей $[P_{ij}]$ и функции распределения вероятностей $[F_{ij}]$ радиосигнала с цифровой частотной манипуляцией GMSK [8] при $M=64$ ($m=6$).

Для оценки P_{ij} определяются числа l_{ij} переходов соседних отсчетов сигнала от $z_n=i$ к $z_{n+1}=j$, тогда при большом объеме выборки $L \gg M^2$ получим оценки

$$P_{ij} = \frac{l_{ij}}{\sum_{k=1}^M l_{ik}}, \quad (7)$$

$$F_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^j l_{ik}}{\sum_{k=1}^M l_{ik}}. \quad (8)$$

Для устранения возможной неопределенности оценок (7) и (8) к значениям l_{ij} целесообразно добавить константу, например, 1.

Величины F_{ij} с ростом j меняются в пределах от $F_{i1}=0$ до $F_{iM}=1$. Разобьем область от 0 до 1 на $V=2^N$ интервалов и представим их нижние границы F_D двоичным N -разрядным кодом $d_{N-1}d_{N-2} \dots d_0$ (от 00...0 до 11...1)

$$F_D = \frac{1}{V} D, \quad (9)$$

D - десятичный эквивалент кода $d_{N-1}d_{N-2} \dots d_0$, $N \geq m$ и $F_V=1$.

Для каждого предшествующего значения i отсчета сигнала для всех возможных кодов $d_{N-1}d_{N-2} \dots d_0$ найдем значения j следующего отсчета в соответствии с неравенством

$$F_D \leq F_{ij} < F_{D+1}. \quad (10)$$

Полученные массивы j_{iD} записываются в блок памяти 3 в виде страниц с адресами ячеек $d_{N-1}d_{N-2} \dots d_0$ (младшие разряды адреса блока памяти 3). Страницы адресуются двоичным кодом i (задает старшие разряды адреса блока памяти 3).

Коды $d_{N-1}d_{N-2}\dots d_0$ формируются ГПСЧ 2, который может быть реализован в виде шумового генератора [1], или, например, в виде генератора М-последовательности [2] на базе R - разрядного регистра сдвига, N разрядов которого ($N < R$) образуют код $d_{N-1}d_{N-2}\dots d_0$. При $N=43$ период М-последовательности равен $2^N - 1 = 8,796 \cdot 10^{12}$, а при $N=61$ уже $2^N - 1 = 2,306 \cdot 10^{18}$, что вполне достаточно для формирования реализаций случайного сигнала большой длительности.

Первый тактовый импульс формирует первый код $d_{N-1}d_{N-2}\dots d_0$ и начальное состояние регистра 4 (может быть любым), которое определяет первый отсчет i (m - разрядный двоичный код) имитируемого сигнала. Это содержимое регистра задает страницу блока памяти 3 (старшие разряды адреса), а код $d_{N-1}d_{N-2}\dots d_0$ выбирает ячейку памяти, содержащую следующий отсчет j имитируемого сигнала, выбираемый в соответствии с функцией распределения вероятностей F_{ij} , и двоичный код j появляется на выходе блока памяти 3. Следующим тактовым импульсом код j записывается в регистр 4, становясь предшествующим отсчетом, а новый код ГПСЧ выбирает следующий отсчет сигнала. Далее процедура повторяется и отсчеты случайного сигнала выдаются на цифровой выход 7, а через ЦАП 5 - на аналоговый выход 7.

Разрядность m кода отсчетов сигнала целесообразно выбирать в интервале $m=6 \div 10$, а кода $d_{N-1}d_{N-2}\dots d_0$ ГПСЧ $N=8 \div 10$, в результате разрядность шины адреса блока памяти равна $m+N=14 \div 20$, то есть емкость блока памяти составит не более $1 \div 2$ МБайт.

Проведено моделирование работы генератора при формировании отсчетов случайного гауссовского сигнала при $x_{CP}=0$, $\sigma^2=4$, $r=0,8$ и $M=32$ (трехмерная диаграмма марковской модели показана на фиг. 2б). На фиг. 5а показана полученная в результате моделирования имитатора временная диаграмма отсчетов x_n сигнала (n - номер отсчета), на фиг. 5б - гистограмма (пунктиром представлена гистограмма теоретического нормального распределения), а на фиг. 5в - зависимость коэффициента корреляции r_k от смещения отсчетов k (пунктиром показана теоретическая зависимость r^k).

На фиг. 6 представлены результаты моделирования работы имитатора случайного радиосигнала с GMSK [8] в виде трехмерной диаграммы чисел перехода L_{ij} (его марковская модель показана на фиг. 4а и хорошо согласуется с фиг. 6).

Как видно, предлагаемый имитатор с высокой точностью формирует случайный сигнал, статистические свойства которого определяются заданной марковской моделью.

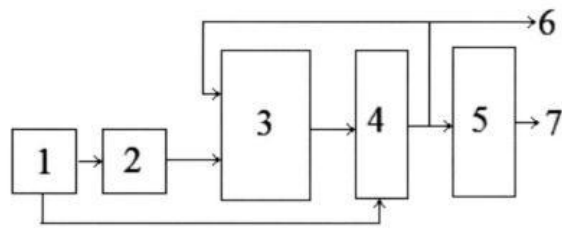
Литература

1. Патент РФ №2472286 С1, опубликован 10.01.2013.
2. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. - 384 с.
3. Патент РФ №2103725 С1, опубликован 27.01.1998.
4. Патент РФ №2207586 С2, опубликован 27.06.2003.
5. Дынкин Е.Б. Марковские процессы. М.: 1963, 860 с.
6. Казаков В.А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. М.: Сов. Радио, 1973, 232 с.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. - 576 с.
8. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. М.: Радио и связь, 2000 г. - 520 с.

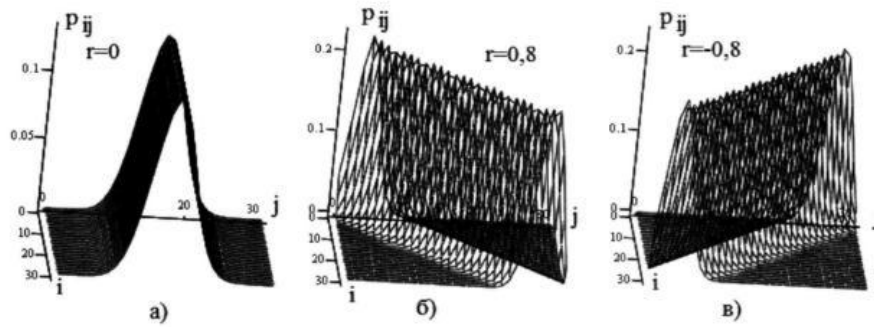
Формула изобретения

Цифровой имитатор случайных сигналов, содержащий генератор опорной частоты, блок памяти, цифроаналоговый преобразователь, дополнительно содержит генератор равновероятных псевдослучайных чисел, тактовый вход которого соединен с генератором опорной частоты, а цифровой выход - с младшими разрядами блока

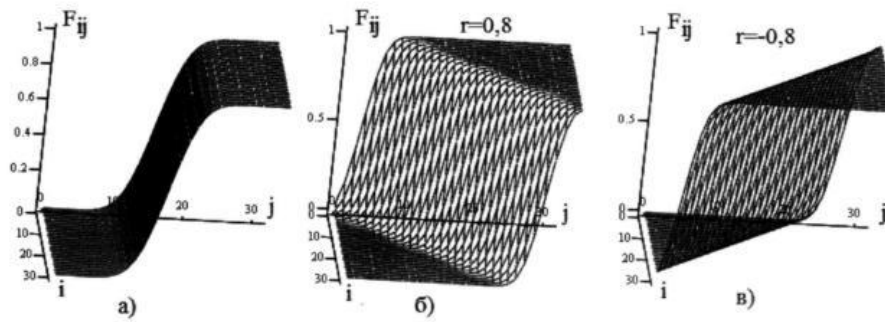
памяти, и регистр, тактовый вход которого соединен с выходом генератора опорной частоты, а вход подключен к выходу блока памяти, выход регистра соединен со старшими разрядами блока памяти и с входом цифроаналогового преобразователя, выход которого образует аналоговый выход имитатора, а выход регистра - цифровой выход имитатора.



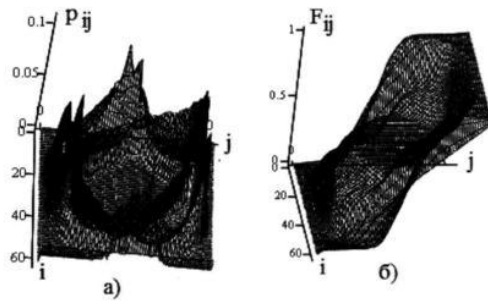
Фиг. 1



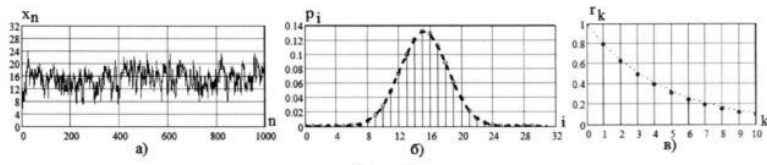
Фиг. 2



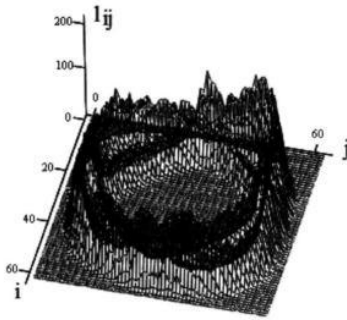
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6