

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **041531**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.11.01

(51) Int. Cl. **G01R 23/00** (2006.01)

(21) Номер заявки
201900409

(22) Дата подачи заявки
2019.06.17

(54) **СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

(43) **2020.12.30**

(56) US-A1-20140204989
US-A1-20070002962

(96) **2019/EA/0059 (BY) 2019.06.17**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
"БЕЛОРУССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ" (BY)**

(72) Изобретатель:
**Свирид Максим Сергеевич,
Гусинский Александр Владимирович,
Волковец Александр Иванович,
Кондрашов Денис Александрович,
Осипович Виталий Семёнович (BY)**

(57) Изобретение относится к области СВЧ-измерений и может быть использовано в системах формирования сигналов для радиотехнических устройств в диапазоне частот от 2 до 298 ГГц. Задача предлагаемого изобретения - расширение частотного диапазона формируемых сигналов и обеспечение возможности смешивания полезного сигнала с шумами, мешающими отражениями и помехами. Решение задачи достигается путем смещения частот основного и гетеродинного сигналов, а также использования сменных модулей переносчиков частоты и сменных антенных модулей. Техническая сущность изобретения заключается в том, что ПЛИС формирует сигналы I и Q составляющих, которые подаются на четыре цифроаналоговые преобразователя (ЦАП). Аналоговые сигналы по каждому из четырех каналов проходят трехкратное последовательное смешивание с сигналами гетеродинов и подаются на антенные преобразователи. Второй и третий смесители выполняются в виде сменных модулей, варьирование которых обеспечивает возможность излучения сигнала в пространстве в диапазоне частот от 2 до 298 ГГц. Достижимый технический результат - расширение частотного диапазона формируемых сигналов, а также обеспечение возможности наложения сигнала шума и помех.

041531
B1

041531
B1

Изобретение относится к области СВЧ-измерений и может быть использовано в системах формирования сигналов для радиотехнических устройств в диапазоне частот от 2 до 298 ГГц.

Известен способ формирования модулированных радиоимпульсов с использованием стандартного векторного генератора [1], который обеспечивает формирование сложных радиотехнических сигналов до 44 ГГц. Недостатком способа является ограничение рабочего диапазона частот формируемых сигналов.

Известен способ переноса частоты модулированных радиоимпульсов с использованием переносчика частоты [2], который обеспечивает перенос формы сложных радиотехнических сигналов на частоты до 40 ГГц. Недостатком способа является ограничение рабочего диапазона частот.

Известен способ переноса частот с использованием умножителей [3]. Недостатком способа является отсутствие возможности регулирования амплитуды при формировании сигнала.

Известен способ формирования радиотехнических сигналов [4], где используются отдельные блоки, отвечающие за конкретный вид сигнала и шума, такие как генераторы шума определенного вида, генераторы модулированного сигнала и т.д. Далее происходит суммирование сигналов в частотной области. Такой подход не позволяет получить реальную радиотехническую обстановку, формируемую отраженными от целей сигналами и мешающими отражениями.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому изобретению является способ формирования сложных радиотехнических сигналов [5], заключающийся в том, что выходной сигнал с опорного генератора подается на программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) и цифровые синтезаторы частоты (4 микросхемы прямого цифрового синтеза (DDS)), при этом ПЛИС настраивает все четыре цифровых синтезатора DDS на заданную частоту до 400 МГц, амплитуду и начальную фазу. На выходе формирователя когерентных модулированных сигналов синтезируются выходные сигналы с заданными параметрами частоты, амплитуды и фазы, при этом выходные колебания синхронизированы от ведущего цифрового синтезатора частоты. Изменив встраиваемое программное обеспечение для ПЛИС, возможно обеспечить реализацию сигналов различной формы посредством смешивания нескольких сигналов с заданными законами изменения частоты, амплитуды и фазы.

Недостатками способа являются ограничение по рабочей частоте формируемых сигналов, отсутствие возможности смешивания сигналов, соответствующих шумам и помехам, и основного сигнала.

Задача предлагаемого изобретения - расширение частотного диапазона формируемых сигналов и обеспечение возможности смешивания полезного сигнала с шумами, мешающими отражениями и помехами.

Решение задачи достигается путем смешения частот основного и гетеродинного сигналов, а также использования сменных модулей переносчиков частоты и сменных антенных модулей.

Техническая сущность изобретения заключается в том, что ПЛИС формирует сигналы I и Q составляющих, которые подаются на четыре цифроаналоговые преобразователя (ЦАП). Аналоговые сигналы по каждому из четырех каналов проходят трехкратное последовательное смешивание с сигналами гетеродинов и подаются на антенные преобразователи. Второй и третий смесители выполняются в виде сменных модулей, варьирование которых обеспечивает возможность излучения сигнала в пространстве в диапазоне частот от 2 до 298 ГГц.

Сопоставительный анализ с прототипом указывает на то, что заявляемый способ отличается новым структурным построением (к выходам ПЛИС подключены ЦАП, подающие I и Q составляющие сигнала на модуляторы); наличием новых функциональных узлов (к выходам модуляторов подключены последовательно сменные модули переносчика частоты и антенный), обеспечивающих реализацию способа; расширением частотного диапазона формируемых сигналов; обеспечением возможности смешивания полезного сигнала с шумами, мешающими отражениями и помехами.

Устройство (фиг. 1), реализующее способ формирования сложных радиотехнических сигналов в сверхвысокочастотном диапазоне, включает в себя

ПЛИС 3, формирующую сигналы I и Q составляющих;

четыре ЦАП 5-8, преобразующих сигнал в аналоговый вид на частоте 125 МГц;

первый гетеродин 4 и четыре модулятора 9-12, обеспечивающие генерацию сигнала по четырем каналам на частоте первого гетеродина 4;

второй гетеродин 13 и четыре смесителя 14-17 в виде сменного модуля переносчика частоты 31, обеспечивающие генерацию сигнала на частоте второго гетеродина 13 по четырем каналам;

переключаемый управляемыми ключами 20 и 22 третий гетеродин 21 с сумматором мощности 18 и четыре смесителя 23-26, обеспечивающие выбор частоты и генерацию сигнала на этой частоте по четырем каналам;

четыре антенны 27-30, обеспечивающие излучение сигнала в пространство.

Третий гетеродин 21, сумматор мощности 18, четыре смесителя 23-26 и четыре антенны 27-30 выполнены в виде сменного модуля 32 для обеспечения генерации сигнала в разных поддиапазонах и размещены в подвижном блоке передатчика 2. Неподвижный блок приемопередатчика 1 включает в себя ПЛИС 3, первый гетеродин 4, четыре ЦАП 5-8 и четыре модулятора 9-12.

Формирование сложных радиотехнических сигналов обеспечивается программным обеспечением для ПЛИС, где сохранены таблицы напряжений для законов модуляции во времени. Получая команду

сформировать сигналы с заданной модуляцией, амплитудой, периодом повторения, ПЛИС 3 формирует сигналы I и Q составляющих. Цифроаналоговые преобразователи 5-8 (частота выходного сигнала 125 МГц) и модуляторы 9-12 обеспечивают генерацию сигналов в аналоговом виде с частотой первого гетеродина 4 (ЧГ1), а сменные модули 31 и 32: переносчик частоты 31 и антенный модуль 32 - обеспечивают формирование сигналов в диапазоне частот 2-298 ГГц (в соответствии с табл. 1, где каждому диапазону частот соответствует своя пара сменных модулей: антенного 31 и переносчика частоты 32). Частота третьего гетеродина (ЧГ3), подаваемая на смесители 23-26, регулируется путем подачи напряжения питания на гетеродин 19 или гетеродин 21. Дополнительно в ПЛИС путем суммирования напряжений I, Q возможно смешивание основного сигнала с шумами, мешающими отражениями и помехами. Таким образом обеспечивается формирование когерентных модулированных сигналов по четырем каналам.

При осуществлении расчета частотного плана формирования выходного сигнала используют формулы

$$F_{\text{вых}} = 125 \text{ МГц} + \text{ЧГ2} - \text{ЧГ1} + \text{ЧГ3},$$

$$F_{\text{вых}} = 125 \text{ МГц} + \text{ЧГ2} + \text{ЧГ1} + \text{ЧГ3}$$

где ЧГ1 - частота первого гетеродина 4,
ЧГ2 - частота второго гетеродина 13,
ЧГ3 - частота третьего гетеродина 19 или 21.

Пример исполнения.

В Научно-образовательном инновационном центре СВЧ-технологий и их метрологического обеспечения научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники разработана и изготовлена измерительная система, в состав которой входит устройство формирования сложных радиотехнических сигналов в СВЧ-диапазоне. На фиг. 2 приведена общая структурная схема системы, в которой реализовано предлагаемое изобретение, для проведения измерений параметров материалов (объектов), исследования параметров радаров и испытания антенн в СВЧ-диапазоне. На фиг. 2 приняты следующие обозначения.

Подсистема передатчика 15:

- 1 - антенна;
- 2 - двухкоординатная платформа;
- 3 - сменный блок приемопередатчика;
- 4 - блок сменных антенн;
- 5 - блок управления платформой;
- 6 - блок промежуточной частоты передатчика.

Подсистема приемника 16:

- 7 - антенна;
- 8 - блок сменных антенн;
- 9 - сменный блок приемопередатчика;
- 10 - трехкоординатная платформа;
- 11 - блок промежуточной частоты приемника;
- 12 - блок управления платформой;
- 13 - блок управления подсистемами приемника и передатчика;
- 14 - ЭВМ рабочего места оператора.

Пример реализации измерительной системы, построенной на основе способа формирования сложных радиотехнических сигналов, представлен на фиг. 3, где

- 2 - двухкоординатная платформа;
- 3 - блок передатчика;
- 5 - блок управления платформой;
- 15 - подсистема передатчика;
- 14 - рабочее место оператора;
- 16 - подсистема приемника;
- 8 - персональный компьютер.

На фиг. 4 представлена фотография подсистемы передатчика.

Скриншот результата генерации структурной схемы программного обеспечения, разработанного для ПЛИС, представлен на фиг. 5.

В программном обеспечении для ПЛИС реализованы следующие режимы работы.

1. Непрерывный сигнал.

ПЛИС обеспечивает формирование I и Q составляющих непрерывного гармонического сигнала. Параметр генерируемого сигнала: мощность.

2. Импульсный сигнал.

ПЛИС обеспечивает формирование I и Q составляющих импульсного сигнала. Его можно использовать для тестирования приемников импульсных сигналов, например для имитации потока данных при передаче информации. Характеристики выходного сигнала следующие. Тип импульсного сигнала: модулированный импульсный сигнал; модулированный импульсный сигнал. Параметры генерируемого

импульсного сигнала: мощность (амплитуда); задержка относительно синхроимпульса (R0); период следования импульсов; длительность импульса; закон модуляции: линейно-частотная модуляция с окном, линейно-частотная модуляция без окна, кодово-фазовая манипуляция и др.

3. Сложный параметрический радиосигнал.

ПЛИС обеспечивает формирование I и Q составляющих сложных параметрических сигналов - эхосигналов, представляющих собой импульсные сигналы с шумом и мешающими отражениями. Эти сигналы предназначены для имитации радиообстановки при работе радиолокационных систем. Характеристики выходных сигналов следующие. Параметры генерируемых эхосигналов: расстояние (задержка относительно строба "Прием/Передача"); амплитуда; фаза; частота Доплера; ширина спектра шума; амплитуда флуктуации; скорость движения цели (изменяет задержку сигнала относительно строба "Прием/Передача"). Параметры случайного шума: закон распределения амплитуды Релея, равномерный, Максвелла, детерминированное значение, любой требуемый; закон распределения фазы - равномерный; среднеквадратичное отклонение шума.

4. Произвольный сигнал.

Сигнал смоделирован, сформирован и загружен в оперативную память устройства пользователем. В программном обеспечении для ПЛИС реализованы следующие способы задания изменения сигнала во времени:

- а) параметрическое задание скорости перемещения цели обеспечивается установкой параметра скорости движения цели;
- б) изменение произвольного параметра цели (при этом происходит вычитка из памяти заранее подготовленного сценария изменения параметров цели во времени);
- в) произвольное формирование сигнала (при этом происходит вычитка из памяти заранее подготовленного сценария изменения действительной и мнимой составляющей частей комплексного сигнала во времени).

Модулятор сигнала в составе ПЛИС (фиг. 5) аналогичен фильтру сжатия и представляет собой схему, которая выполняет комплексную свертку входного сигнала с законом внутриимпульсной модуляции (фиг. 6) по формуле

$$y(n) = \sum_{i=0}^{127} s(n-i)p(i),$$

где $y(n)$ - выходной комплексный модулированный сигнал,

n - номер текущего элемента дальности (cell number),

$s(n)$ - входной комплексный смодулированный сигнал,

$p(i)$ - комплексный закон внутриимпульсной модуляции сигнала.

Комплексная свертка выполняется в реальном времени. Время выполнения 128-элементной комплексной свертки равно 20 нс, т.е. равно длительности одного элемента дальности. Входной сигнал формируется имитатором целей и представляет последовательность импульсов, каждый из которых имеет длительность одного элемента дальности. При таком способе реализации модулятора количество целей и их взаимное положение может быть любым (табл. 2), что устраняет недостатки изобретения [4].

Осциллограммы I и Q составляющих сформированного сигнала приведены в табл. 2.

Результаты формирования шумовых сигналов с различными законами распределения, в том числе и в виде гистограмм, приведены в табл. 3. Каждая гистограмма является оценкой плотности распределения амплитуды (темно-серый) и квадрантной составляющей (светло-серый). При этом по оси X располагается частота появления соответствующего значения амплитуды, по оси Y - номер интервала.

Таблица 1

Частотный план формирования выходного сигнала

Диапазон частот, ГГц	Поддиапазон	F _{вых} , ГГц	ЧГ1, ГГц	ЧГ2, ГГц	ЧГ3, ГГц (ЧГ3.1/ЧГ3.2)
2-6	-	2	1,93	0	0
		6	5,93	0	0
6-18	-	6	5,8	11,8	0
		11	5,4	16,4	0
		11	5,4	5,6	0
		18	5,4	12,6	0
18-25	-	18	5,4	12,6	0
		25	5,4	19,6	0
25-37	-	25	5,4	5,6	14
		37	5,4	17,6	14

041531

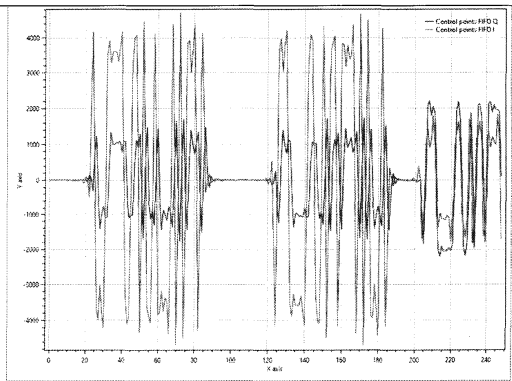
37-53	-	37	5,4	10,33	32
		43	5,4	16,4	32
		43	5,4	5,6	32
		53	5,4	15,6	32
53-78	53-64	53	5,4	5,6	42
		64	5,4	16,6	42
	64-78	64	5,4	5,6	53
		78	5,4	19,6	53
78-118	78-98	78	5,4	10,4	73
		87	5,4	19,4	73
		87	5,4	8,6	73
		98	5,4	19,4	73
	98-118	98	5,4	10,4	93
		107	5,4	19,6	93
		107	5,4	8,6	93
		118	5,4	19,6	93
118-140	118-129	118	5,4	6,8	106
		129	5,4	17,6	106
	129-140	129	5,4	6,6	117
		140	5,4	17,6	117
140-178	140-160	140	5,4	10,4	135
		148	5,4	18,28	135
		149	5,4	8,6	135
		160	5,4	19,6	135
	160-178	160	5,4	10,4	155
		168	5,4	18,4	155
		169	5,4	8,6	155
		178	5,4	17,6	155
178-218	178-198	178	5,4	10,4	173
		186	5,4	18,4	173
		187	5,4	8,6	173
		198	5,4	19,6	173
	198-218	198	5,4	10,4	193
		207	5,4	19,4	193
		208	5,4	9,6	193
		218	5,4	19,6	193
218-258	218-238	218	5,4	11,4	212
		226	5,4	19,4	212
		227	5,4	9<6	212
		238	5,4	20,6	212
	238-258	238	5,4	11,4	232
		246	5,4	19,4	232
		247	5,4	9,6	232
		258	5,4	20,6	232
258-298	258-278	258	5,4	10,4	253
		266	5,4	18,4	253
		267	5,4	8,6	253
		278	5,4	19,6	253
	278-298	278	5,4	10,4	273
		286	5,4	18,4	273
		287	5,4	8,6	273
		298	5,4	19,6	273

Таблица 2

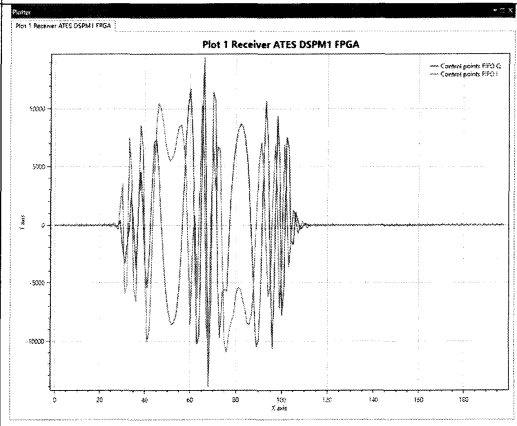
Осциллограммы I и Q составляющих сформированного сигнала

Описание	Вид
I и Q составляющие ЛЧМ сигнала с окном 1,68 мкс с различной амплитудой, фазой, дальностью	
I и Q составляющие ЛЧМ сигнала 0,56 мкс с различной амплитудой, фазой, дальностью	
I и Q составляющие ЛЧМ сигнала с различной амплитудой, фазой, дальностью с наведенным шумом	<p>Plot 1 Receiver ATE5 DSPM1 FPGA</p>
I и Q составляющие импульсного немодулированного сигнала с различной амплитудой, фазой, дальностью	<p>Plot 1 Receiver ATE5 DSPM1 FPGA</p>

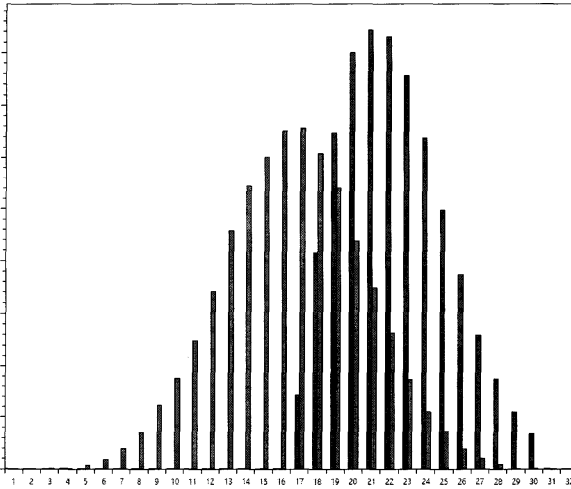
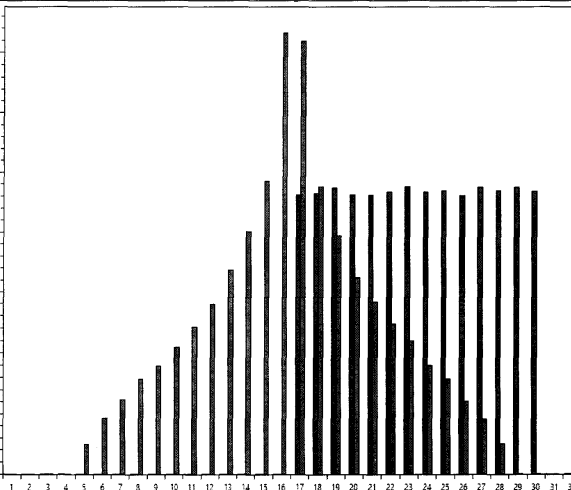
I и Q составляющие импульсного модулированного сигнала PSK Gold 1,68 мкс с различной амплитудой, фазой, дальностью

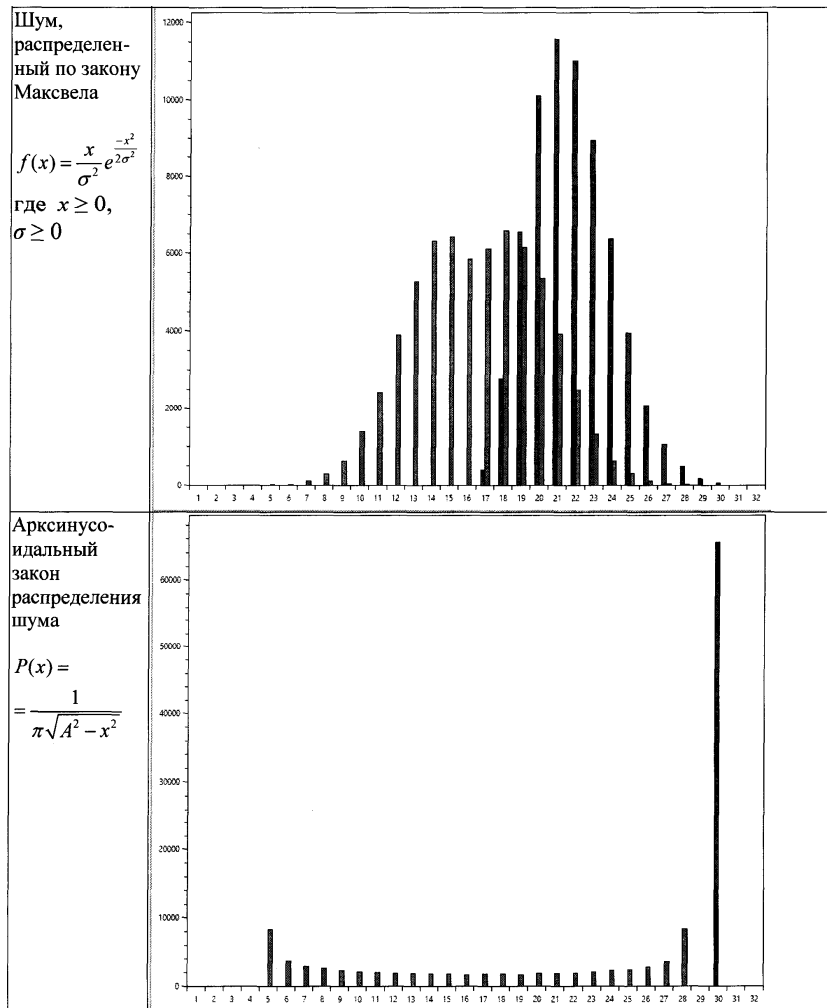


I и Q составляющие импульсного модулированного сигнала для случая наложения сигналов во времени



Результаты формирования шумовых сигналов

Описание	Вид
<p>Нормальный закон распределения шума</p> $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$	
<p>Равномерный закон распределения шума</p> $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} \\ 0 \end{cases}$ <p>при $x \in (a, b)$</p>	



Литература.

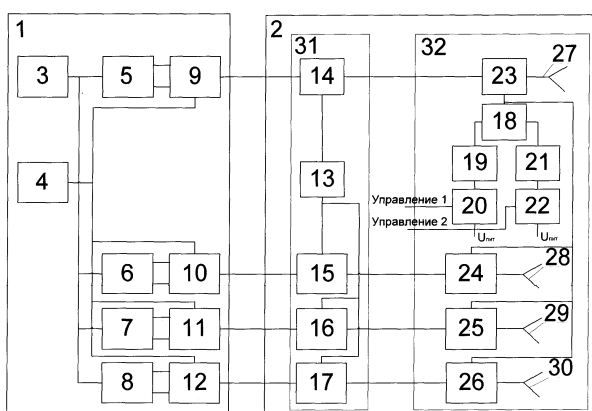
1. E8267D PSG Vector Signal Generator. Data Sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.keysight.com/main/gated.jsp?lb=1&gatedId=473817&cc=BY&lc=eng&parentContId=x202238&parentContType=pt&parentNid=-32488.1150404&fileType=VIEWABLE>.
2. SMW200A Vector Signal Generator. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rohde-schwarz.com/ru/manual/smw200a/>.
3. OML Millimeter Wave Source Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Modul https://www.omlinc.com/images/pdf/SxxMS/OML-SxxMS_Brochure.pdf
4. Measuring I/Q impairments from sampled complex signals: Pat. US20140204989, CPC H04B 17/0042 Stephen L. Dark, Christopher J. Behnke; applicant National Instruments Corporation. – №14/220,364; заявл. 20.05.2014; опубл. 24.06.2014.
5. Способ формирования когерентных модулированных сигналов и устройство для его осуществления: пат. 2485669 РФ, МПК H 03 C 5/00 Меджитов М.М., Иванченко А.А., Телевов З.Э., Суворов О.В., Мугудитов Г.Ф., Гаджиев М.Х.; заявитель ОАО «Научно-производственный комплекс «Русская радиоэлектроника». – №2012119387/08; заявл. От 11.05.2012; опубл. 20.06.2013.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

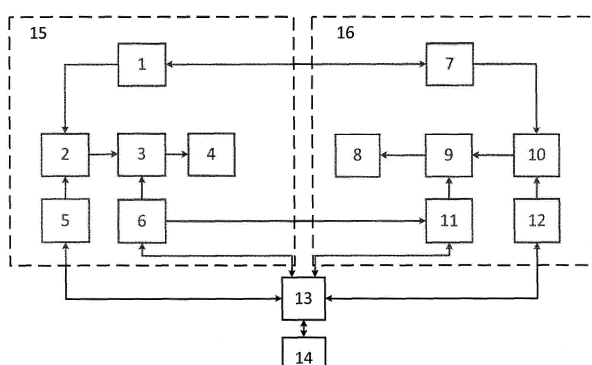
1. Способ формирования сложных отраженных радиотехнических сигналов в сверхвысокочастотном диапазоне для радиотехнических измерительных систем, заключающийся в том, что в передатчике сигнал сложной формы, сформированный цифровым образом в ПЛИС, подают на каждый из четырех каналов, где его преобразуют в аналоговый вид посредством использования четырех цифроаналоговых преобразователей, после чего передают аналоговый сигнал на аналоговые модуляторы, обеспечивающие смешение с частотой первого гетеродина, а затем обеспечивают двукратное последовательное смешивание с сигналами второго и третьего гетеродинов посредством смесителей, выполненных в виде сменных модулей, и подают на антенные преобразователи для излучения в пространство по всем четырем каналам, отличающийся тем, что для формирования радиотехнических сигналов, максимально приближенных к реальным, осуществляется генерация во временной области в блоке цифрового имитатора целей отдельных дискретных сигналов от целей и мешающих отражений с последующим наложением на них

закон модуляции путем применения блока цифрового модулятора аналогичного фильтру сжатия, выполняющего комплексную свертку дискретных сигналов с законом внутриимпульсной модуляции с получением на выходе передатчика непрерывного сигнала сложной формы.

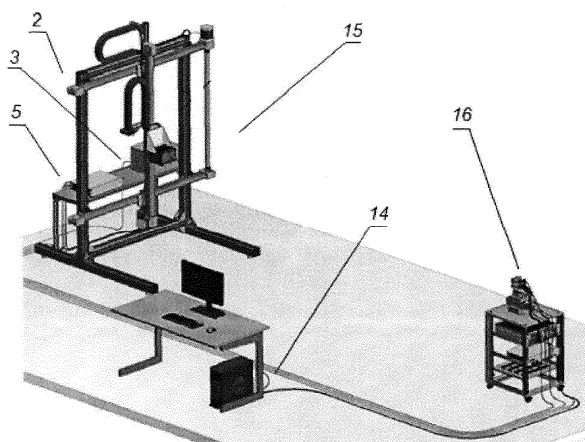
2. Устройство формирования сложных радиотехнических сигналов в сверхвысокочастотном диапазоне для радиотехнических измерительных систем по п.1, содержащее ПЛИС для формирования сигналов с заданными параметрами частоты, амплитуды и фазы, отличающееся тем, что для формирования когерентных модулированных сигналов по четырем каналам и обеспечения возможности смешивания полезного сигнала с шумами, мешающими отражениями и помехами, к выходам цифрового имитатора целей и блока цифрового модулятора в ПЛИС подключены четыре цифроаналоговых преобразователя, подающие I и Q составляющие сигнала на аналоговые модуляторы, а с целью излучения сформированных СВЧ-сигналов в пространство в диапазоне частот 2-298 ГГц к выходам модуляторов подключены сменные модули переносчика частоты и антенного преобразователя, обеспечивающие работу в поддиапазонах частот 1-6, 6-18, 25-37, 37-53, 53-78, 78-118, 118-140, 140-178, 178-258, 258-298 ГГц.



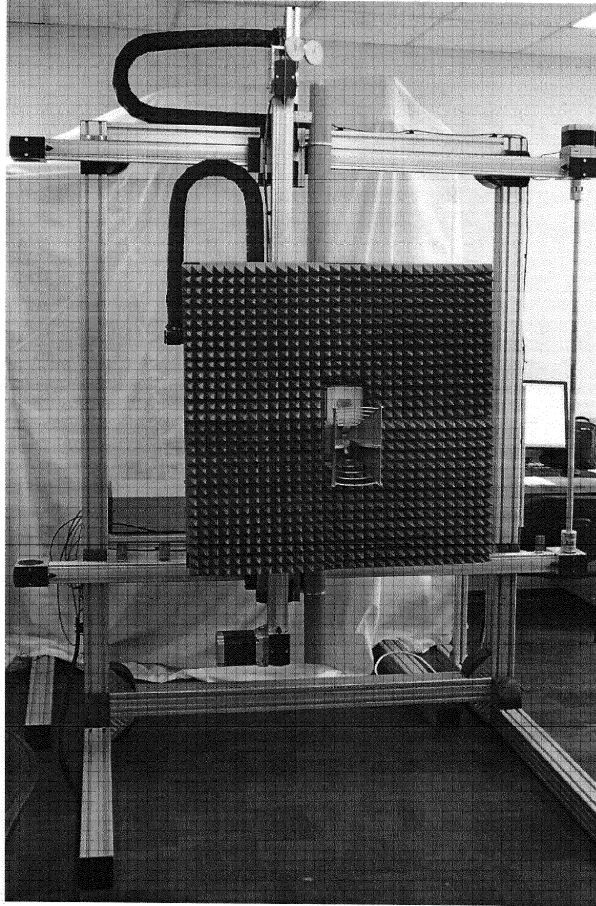
Фиг. 1



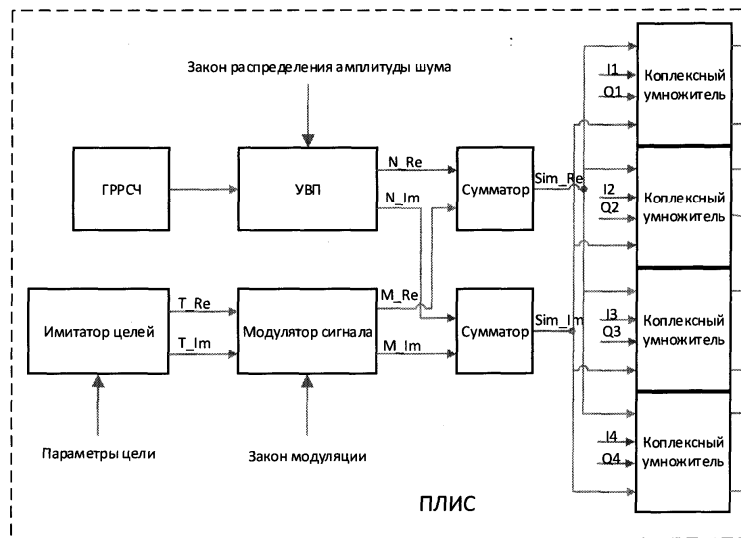
Фиг. 2



Фиг. 3

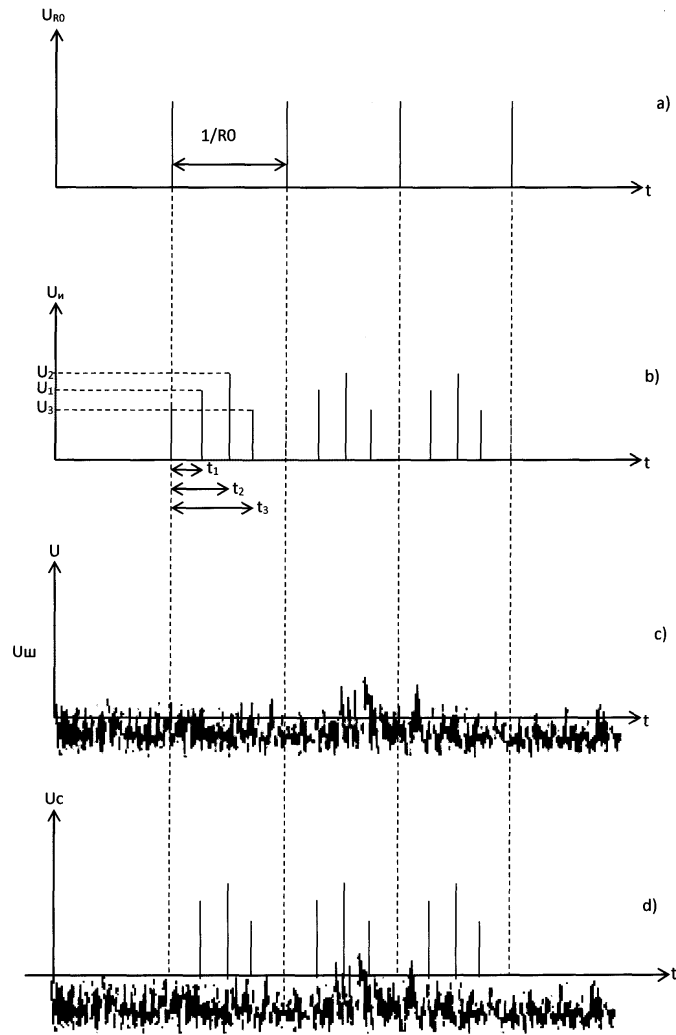


Фиг. 4



ГРРСЧ – генератор равномерно распределенных случайных чисел
 УВП – управляемый вероятностный преобразователь

Фиг. 5



Фиг. 6

