



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*G01S 13/34* (2022.05)

(21)(22) Заявка: 2021121472, 19.07.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
19.07.2021

Дата регистрации:  
14.09.2022

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 19.07.2021

(45) Опубликовано: 14.09.2022 Бюл. № 26

Адрес для переписки:

660021, г. Красноярск, ул. Декабристов, 19, АО  
"НПП "Радиосвязь"

(72) Автор(ы):

Носков Владислав Яковлевич (RU),  
Богатырев Евгений Владимирович (RU),  
Галеев Ринат Гайсеевич (RU),  
Игнатков Кирилл Александрович (RU),  
Шайдулов Кирилл Дмитриевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Акционерное общество  
"Научно-производственное предприятие  
"Радиосвязь" (АО "НПП "Радиосвязь") (RU)

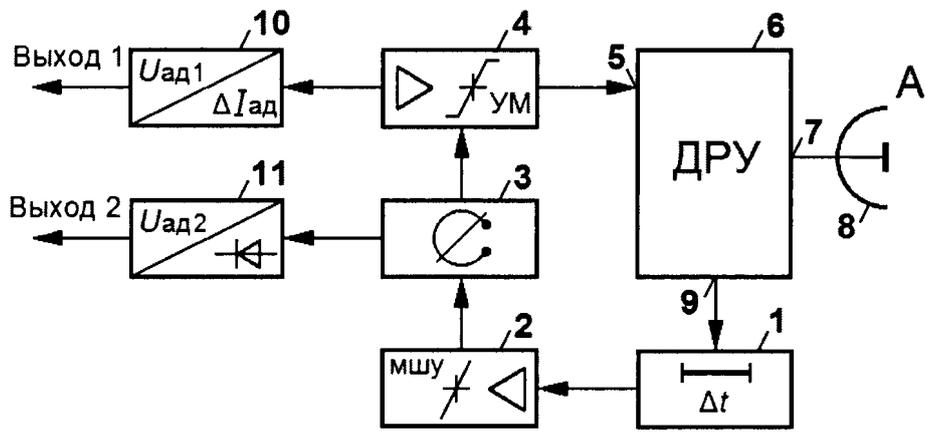
(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: US 5266957 A1, 30.11.1993. US  
5481266 A1, 02.01.1996. CN 201293840 Y,  
19.08.2009. RU 2351946 C1, 10.04.2009. SU  
1775696 A1, 15.11.1992. SU 1826073 A1,  
07.07.1993.

## (54) АВТОДИННЫЙ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИК ДЛЯ СИСТЕМ БЛИЖНЕЙ РАДИОЛОКАЦИИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к радиотехнике и может быть использовано в системах ближней радиолокации (СБРЛ), датчиках и измерителях, предназначенных для обнаружения движущихся объектов, определения параметров движения и измерения расстояния до них. Проблема, на решение которой направлено изобретение, состоит в том, чтобы исключить или значительно уменьшить автодинную девиацию частоты колебаний генератора, которая является причиной ангармонических искажений автодинных сигналов, ограничения динамического диапазона автодинного приемопередатчика и явления периодической нестационарности шумовых характеристик, а также повысить его потенциал. Технический результат изобретения достигается тем, что в предлагаемом автодинном приемопередатчике

для СБРЛ, содержащим последовательно включенный малошумящий усилитель, полосно-пропускающий резонатор с возможностью изменения его собственной частоты и усилитель мощности, в цепь питания которого подключен датчик тока в виде резистора для регистрации автодинного сигнала, для решения поставленной проблемы добавлены: делительно-развязывающее устройство и линия задержки радиочастотных сигналов, причем выход усилителя мощности соединен с первым портом делительно-развязывающего устройства, второй порт которого является радиочастотным входом-выходом автодинного приемопередатчика и связан с антенной, а третий порт связан с входом линии задержки радиочастотных сигналов, выход которой подключен к входу малошумящего усилителя. 8 з.п. ф-лы, 2 ил.



Фиг. 1

RU 2779887 C1

RU 2779887 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*G01S 13/34 (2022.05)*

(21)(22) Application: **2021121472, 19.07.2021**

(24) Effective date for property rights:  
**19.07.2021**

Registration date:  
**14.09.2022**

Priority:

(22) Date of filing: **19.07.2021**

(45) Date of publication: **14.09.2022** Bull. № 26

Mail address:

**660021, g. Krasnoyarsk, ul. Dekabristov, 19, AO  
"NPP "Radiosvyaz"**

(72) Inventor(s):

**Noskov Vladislav Yakovlevich (RU),  
Bogatyrev Evgenij Vladimirovich (RU),  
Galeev Rinat Gajseevich (RU),  
Ignatkov Kirill Aleksandrovich (RU),  
Shajdurov Kirill Dmitrievich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Aksionernoe obshchestvo  
"Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie  
"Radiosvyaz" (AO "NPP "Radiosvyaz") (RU)**

(54) **AUTODYNE TRANSCEIVER FOR SHORT-RANGE RADIO LOCATION SYSTEMS**

(57) Abstract:

FIELD: radio engineering.

SUBSTANCE: invention relates to radio engineering and can be used in short-range radio location systems (SRS), sensors, and meters intended to detect moving objects, determine the parameters of movement, and measure the distance thereto. The technical result of the invention is achieved adding in the proposed autodyne transceiver for SRS, containing a series-connected low-noise amplifier, a bandpass resonator configured for the natural frequency thereof to be changed, and a power amplifier, connected into the power circuit whereof is a current sensor in the form of a resistor for recording the autodyne signal, the following elements in order to solve the problem: a dividing and decoupling apparatus, and a radio frequency signal delay line; wherein the output of the

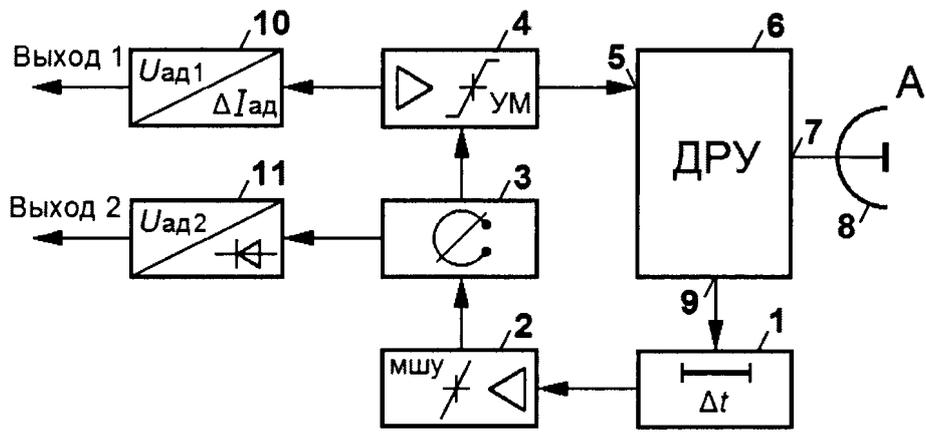
power amplifier is connected with the first port of the dividing and decoupling apparatus, the second port whereof is the radio frequency input-output of the autodyne transceiver and is linked with the antenna, and the third port is linked with the input of the radio frequency signal delay line, the output whereof is connected to the input of the low-noise amplifier.

EFFECT: significant reduction in the autodyne deviation of the oscillation frequency of the oscillator causing the anharmonic distortions in the autodyne signals, the limitation of the dynamic range of the autodyne transceiver, and the phenomenon of periodic unsteadiness of noise characteristics; as well as increase in the potential thereof.

9 cl, 2 dwg

RU 2 779 887 C1

RU 2 779 887 C1



Фиг. 1

RU 2779887 C1

RU 2779887 C1

Изобретение относится к радиотехнике и может быть использовано в системах ближней радиолокации (СБРЛ), датчиках и измерителях, предназначенных для обнаружения движущихся объектов, определения параметров движения и измерения расстояния до них.

5 Автодинные радиолокаторы, которые в дальнейшем для сокращения будем называть также автодинами, обеспечивают простейшую конструкцию приемопередатчика и его низкую стоимость благодаря совмещению функций передатчика зондирующего и приемника отраженного излучения в одном каскаде - генераторе, который обычно непосредственно подключают к антенне без каких-либо элементов развязки. Принцип  
10 действия этих устройств основан на автодинном эффекте, который возникает в генераторах при воздействии на них собственного излучения, отраженного от объекта локации. Данный эффект проявляется в изменениях амплитуды и частоты колебаний, а также смещения (тока или напряжения) на электродах активного элемента (АЭ), определяющего условия генерирования автоколебаний в резонансной системе  
15 автодинного приемопередатчика. Регистрация (выделение, детектирование) этих изменений в виде автодинного сигнала и его обработка обеспечивают получение информации об объекте локации и параметрах его движения [1]. Наличие усиления принятого сигнала за счет внутренних свойств автодинного генератора - одно из его дополнительных достоинств по отношению к гомодинным системам.

20 Первоначально автодинные приемопередатчики для СБРЛ выполнялись на основе электронных ламп, клистронов, магнетронов и других электровакуумных приборов [2]. С появлением полупроводниковых приборов в автодинных приемопередатчиках для СБРЛ стали широко использоваться туннельные диоды и диоды Ганна, лавинно-пролетные и инжекционно-пролетные диоды, а также биполярные и полевые  
25 транзисторы [3].

Известны автодинные приемопередатчики, выполненные на основе упомянутых диодов [4-15]. Условия возникновения и поддержания генерации колебаний в автодинном приемопередатчике полупроводниковые генераторные диоды обеспечивают благодаря  
30 наличию у них статической или динамической отрицательной проводимости, возникающей за счет внутренней положительной обратной связи. Частота генерации колебаний определяется параметрами резонансной системы, с которой связан полупроводниковый диод и нагрузка генератора - приемопередающая антенна.

Недостатком автодинных приемопередатчиков, выполненных на полупроводниковых диодах, является низкий коэффициент полезного действия (КПД), составляющий обычно  
35 не более единиц процентов (см. стр. 173-212 [16]). Возникающие проблемы отвода тепла и большое энергопотребление диодных генераторов сдерживают их применение в бортовых СБРЛ, где ресурс питания обычно ограничен.

Известны также автодинные приемопередатчики, в качестве АЭ в которых используется биполярный или полевой транзистор (см. например, статью [17]; патенты:  
40 [18-30]; фиг. 9 [31]; фиг. 9 [32]; фиг. 5 [33]; фиг. 2 [34]; фиг. 3а и б [35]; [36]; доклад: [37]).

Условия возникновения и поддержания генерации колебаний в автодинных приемопередатчиках на транзисторах обеспечивается благодаря введению внешней по отношению к АЭ положительной обратной связи. Составной частью этой обратной  
45 связи является резонансная система, которая определяет частоту генерации колебаний и связь с нагрузкой генератора -антенной. При этом наличие управляющего электрода в транзисторах обеспечивает удобство управления режимом работы генератора и расширение функциональных возможностей автодинных приемопередатчиков.

Недостатком автодинных приемопередатчиков предшествующего уровня техники является их низкий энергетический потенциал по сравнению с приемопередающими устройствами гомодинного типа. Основная причина этому проигрышу - в совмещении одновременно функций передатчика и приемника в одном каскаде. Такое совмещение не позволяет, например, изменением связи с нагрузкой, оптимизировать режим работы устройства отдельно по выходной мощности и по чувствительности, поскольку максимумы этих целевых функций не совпадают [38].

Другой типичный недостаток перечисленных выше устройств предшествующего уровня техники состоит в следующем. При частотной модуляции (ЧМ) автодинного приемопередатчика на его низкочастотном выходе наряду с полезной составляющей сигнала от объекта локации присутствует также нежелательная (паразитная) составляющая сигнала. Ее присутствие в автодинном сигнале обусловлено детектированием паразитной амплитудной модуляции (ПАМ), сопутствующей процессу ЧМ высокочастотных колебаний генератора [39]. Составляющая ПАМ обычно значительно превышает уровень полезной составляющей сигнала, сужает динамический диапазон приемопередатчика и создает проблемы при обработке сигналов автодинных СБРЛ с ЧМ. Она имеет наименьшее значение при работе усилителя (транзистора) лишь в режиме ограничения амплитуды выходных колебаний.

Свободными от указанных недостатков являются автодинные приемопередатчики, в которых в качестве АЭ генератора используются два транзисторных усилителя. Замыкание цепью общей положительной обратной связи соединенных последовательно двух усилителей создает конфигурацию генератора, так называемого, кольцевого типа (см. патенты: [40-42]). В этой конфигурации первый транзистор, предпочтительно маломощный, действует как линейный усилитель, а второй выполняет функцию нелинейного усилителя мощности, связанного с антенной, и преобразователя (детектора) сигналов в цепи питания. При выполнении баланса амплитуд и фаз в кольцевой системе автодинного приемопередатчика на его высокочастотном выходе возбуждаются и устанавливаются колебания сравнительно большой амплитуды и мощности с пониженным уровнем шумов. При этом сводятся к минимуму также потери преобразования автодинного генератора как приемника и, соответственно, обеспечиваются условия получения более высокого потенциала СБРЛ. Режим работы нелинейного усиления мощности с ограничением амплитуды снижает уровень ПАМ выходных колебаний автодинного приемопередатчика при его ЧМ. Поэтому кольцевая схема построения автодинного приемопередатчика позволяет устранить отмеченные выше недостатки устройств предшествующего уровня техники.

Наиболее близким аналогом (прототипом) по технической сущности, принципу действия и достигаемому положительному эффекту является автодинный приемопередатчик для СБРЛ (см. фигуры 1 и 2 патента США: US5266957, МКИ<sup>5</sup> G01S 13/26, опубл. 30.11.1993. Proximity fuze transceiver / Donald M. Bosch. [42]), содержащий неинвертирующий резонансный усилитель, состоящий из соединенных последовательно приемного маломощного усилителя, полосо-пропускающей резонатора с возможностью изменения его собственной частоты и усилителя мощности, причем выход неинвертирующего резонансного усилителя связан с его входом, а также с входом-выходом автодинного приемопередатчика, предназначенным для подключения антенны, при этом регистрация (выделение, детектирование) автодинного сигнала производится в цепи питания усилителя мощности посредством датчика тока, выполненного, например, в виде резистора.

Данный приемопередатчик по сравнению с аналогами является наиболее

совершенным устройством. В нем указанные выше противоречия и недостатки разрешены путем применения кольцевой конфигурации схемы автодинного генератора, содержащей последовательное соединение двух усилителей с различными параметрами, режимами работы и назначением.

5 Однако у прототипа и известных аналогов имеются общие существенные недостатки, связанные с особенностями формирования автодинных сигналов. Суть этих особенностей состоит в следующем.

Наличие автодинных изменений частоты колебаний генератора при воздействии на него отраженного излучения вызывает неравномерность изменения набега фазы формируемого сигнала. В свою очередь, данная неравномерность изменения набега фазы является причиной ангармонических искажений автодинных сигналов, создающих проблему при их обработке [43].

Необходимо отметить, что эти искажения сигналов, проявляющиеся в большей степени с укорочением длины волны излучения, свойственны как обычным автодинам с смодулированным излучением, так и автодинам с различными видами модуляции. Искажения сигналов существенно сужают динамический диапазон устройства [38], а также являются причиной появления периодической нестационарности шумовых характеристик [44]. Данные явления затрудняют, а в некоторых случаях нарушают нормальную работу устройств обработки сигналов и тем самым ухудшают тактико-технические характеристики автодинных СБРЛ, таких как дальность действия, точность измерения скорости объектов и других. Поэтому указанные особенности функционирования автодинных устройств, отличающие их от устройств гомодинного типа, сдерживают их применение при решении многих задач ближней радиолокации в КВЧ и ГВЧ диапазонах, где эти явления проявляются в наибольшей степени.

25 Для устранения причин искажения сигналов были предложены и опробованы различные технические решения. Основные из них: - это 1) стабилизация частоты генерации с помощью дополнительного высокодобротного резонатора, 2) использование стабилизированного бигармонического генератора в качестве авто дина, а также 3) применение автодинного генератора с взаимной или 4) внешней синхронизации колебаний [17; 45-48].

Первые два технических решения полностью не устраняют причину, а лишь уменьшают примерно на порядок величину автодинной девиации частоты. Данное ограничение обусловлено необходимостью разрешения компромисса между потерей выходной мощности на стабилизацию, которая вызывает снижение потенциала автодина, и коэффициентом стабилизации частоты. При этом стабилизация частоты дополнительным резонатором не исключает появление искажений сигналов в режиме сильного отраженного излучения [49]. Кроме того, тенденция к снижению собственной добротности стабилизирующих резонаторов с переходом в диапазоны более высоких частот является обратной решению обсуждаемой здесь проблемы автодинов.

40 Последние два технических решения (применение генератора с взаимной или внешней синхронизацией) также не решают проблему радикально, имеют ограничение сверху. Они применимы при выполнении условия, при котором уровень отраженного от объекта локации излучения не превышает уровень вводимого в автодинный генератор синхронизирующего воздействия. В противном случае форма автодинного сигнала значительно усложняется, поскольку автодинный генератор периодически выходит из режима синхронизации [50].

Ангармонические искажения сигналов и нестационарность уровня шумов, как отмечалось, проявляются также в случае применения автодинных приемопередатчиков

в СБРЛ с ЧМ [51]. Трудность исключения этих искажений или хотя бы их снижения в данном случае состоит в необходимости разрешения противоречия между требованиями обеспечения ЧМ, что сопряжено с уменьшением добротности колебательной системы генератора, и уменьшения автодинной девиации частоты, что связано с потребностью

увеличения этой добротности.

Дополнительный недостаток автодинов предшествующего уровня техники состоит в их низком энергетическом потенциале по сравнению с гомодинными приемопередатчиками, у которых передатчик и приемник функционально разделены. Развязка между ними обеспечивает снижение на входе приемника собственных шумов передатчика и, соответственно, повышение потенциала гомодинного приемопередатчика. В автодинном приемопередатчике прием отраженных от объекта локации радиосигналов производится этим же генератором на фоне собственных шумов (см. раздел 1.4 статьи: [38]). Это ограничивает потенциал радиолокатора относительным уровнем собственных шумов и, соответственно, дальность обнаружения объектов с малой эффективной площадью рассеяния (ЭПР), например, беспилотных летающих объектов, для защиты от которых применение больших РЛС малоэффективно.

Таким образом, техническая проблема, на решение которой направлено заявляемое изобретение, состоит в исключении или значительном уменьшении автодинной девиации частоты колебаний генератора, которая является причиной ангармонических искажений автодинных сигналов, ограничения динамического диапазона автодинного приемопередатчика и явления периодической нестационарности шумовых характеристик, а также повышение потенциала приемопередатчика. Решение этой проблемы позволит снять существующие ограничения на освоение автодинными устройствами КВЧ и ГВЧ диапазонов и расширить область их применения.

Технический результат изобретения достигается тем, что в предлагаемом автодинном приемопередатчике для систем ближней радиолокации, содержащим последовательно соединенные малошумящий усилитель (МШУ), полосно-пропускающий резонатор с возможностью изменения его собственной частоты и усилитель мощности, в цепь питания которого подключен датчик тока для выделения автодинного сигнала, для решения поставленной проблемы в него дополнительно введено делительно-развязывающее устройство (ДРУ) и линия задержки (ЛЗ) радиочастотных сигналов, причем выход усилителя мощности соединен с первым портом ДРУ, второй порт которого является радиочастотным входом-выходом автодинного приемопередатчика, предназначенным для подключения антенны, а третий порт подключен к входу ЛЗ радиочастотных сигналов, выход которой подключен к входу малошумящего усилителя.

Введение в схему автодинного приемопередатчика ЛЗ радиочастотных сигналов и ДРУ преобразует схему генератора прототипа в схему кольцевого генератора с запаздывающей обратной связью. Свойства и характеристики этого генератора, зависящие от параметров используемой ЛЗ, при надлежащем выборе ее параметров обеспечивают значительное увеличение эквивалентной добротности колебательной системы генератора и снижение собственных шумов генератора. Этим, а также использованием ДРУ для вывода мощности зондирующего излучения и ввода в цепь генератора сигнала отраженного от объекта локации достигается технический результат изобретения. Изменения собственной частоты полосно-пропускающего резонатора в цепи обратной связи кольцевого генератора обеспечивает условия переключения частоты генерации автодинного приемопередатчика и, соответственно, возможность реализации СБРЛ с ЧМ.

В результате поиска альтернативных решений в области применения СБРЛ среди

патентных источников найден патент РФ на полезную модель [52]. На фиг. 3 описания к этому патенту обнаружен ряд совпадающих существенных признаков. Среди них: предварительный электрический усилитель (ПЭУ) 18 (аналог МШУ), полосно-пропускающий фильтр 20, радиочастотный циркулятор (РЧЦ) 26 (аналог ДРУ), усилитель мощности (УМ) 21 и линия задержки, выполненная на основе оптоволоконной линии передачи (номера позиций ЛЗ с 14 по 17), а также основные связи между ними, образующие кольцевую схему оптоэлектронного генератора (ОЭГ), если из этой схемы исключить вариант выполнения устройства как лазерного локатора, «закоротив» между собой входы и выходы оптического циркулятора 24.

Основное отличие между противопоставляемым и предлагаемым устройствами состоит в месте подключения радиочастотного циркулятора 26. На фиг. 3 описания к патенту [52] он находится перед усилителем мощности 21, а в предлагаемом нами устройстве используется ДРУ, которое находится после усилителя мощности. Указанное отличие по нашему мнению является существенным, поскольку в конфигурации согласно описанию к патенту [52] противопоставляемое устройство как радиолокатор реализовано не оптимально. Для получения наибольшего потенциала радиолокационного датчика циркулятор 26 нужно ставить после усилителя мощности 21. Тогда высокая мощность на выходе усилителя мощности 21 и высокая чувствительность предварительного электрического усилителя 18 обеспечили бы соответствующие потенциал устройства и дальность его действия. Кроме того, предлагаемое и противопоставляемое устройства отличаются принципом действия и местом получения выходных сигналов, а также связями и содержанием элементов схемы.

Основной довод, согласно которому не следует рассматривать устройство по патенту [52] как прототип или аналог, состоит в том, что оно, судя по описанию принципа действия, не относится к классу автодинных приемопередатчиков. Вызывает вопрос также корректность объяснения работы самого устройства в предложенной конфигурации. Согласно описанию к патенту [52], «принцип измерения расстояния до объекта с помощью датчика схемы фиг. 3 заключается в следующем. До начала измерений производится калибровка устройства, для чего с помощью соответствующих переключателей закорачиваются входные и выходные плечи циркуляторов 26 и 24. Регулируя коэффициенты усиления ПЭУ и УМ, а также время задержки в ФК, добиваются выполнения условий баланса амплитуд и фаз в ОЭГ» (цитата). Следующий шаг описанного способа измерения расстояния - это измерение сдвига частоты генерации, «для чего необходимо убрать закоротку между входным и выходным плечами РЧЦ» (цитата).

Однако после того, как «убрали закоротку» в тракте кольцевой схемы генератора произойдет полный разрыв цепи обратной связи, если циркулятор считать идеальным. В реальности же произойдет уменьшение контурного коэффициента передачи на величину развязки циркулятора. Величина этой развязки обычно составляет 20...30 дБ (см. стр. 291 книги: [53]). Как в таком случае в генераторе выполняется баланс амплитуд, который уменьшается в 100 и более раз, в представленном описании к патенту [52] ничего не сказано. Скорее всего, после того, как «убрали закоротку» в тракте кольцевой схемы генератора произойдет срыв генерации, зондирующее излучение будет отсутствовать и устройство не будет работать. Ситуация с «балансом амплитуд» для обеспечения генерации в системе значительно усугубляется, если в обсуждаемом устройстве одновременно задействованы оба циркулятора, как радиочастотного 26, так и оптического 24 локаторов, поскольку они находятся в общей цепи кольцевой

схемы автогенератора.

Кроме того, вызывает вопрос корректность представленной в описании модели взаимодействия устройства с излучением, отраженным от объекта локации. В описанной методике измерения дальности не учитывается влияние уровня отраженного излучения.

5 Так, например, согласно формуле (6) «смещение частоты» генерации ОЭГ относительно его собственной частоты прямо пропорционально расстоянию до объекта локации. Поэтому из этой модели следует парадоксальный вывод, что «смещение частоты» генерации останется тем же и в случае предельно малого сигнала или даже при его отсутствии.

10 Анализ непатентных источников выявил появление в последние годы большого числа публикаций, посвященных приему и детектированию сигналов с помощью ОЭГ (см. ссылки на литературу и описание к рис. 7 в обзорной статье: [54]). Прием сигнала оптоэлектронным генератором осуществляется по входу электрооптического модулятора (см. рис. 7 статьи [54]), а детектирование его - на выходе малошумящего  
15 усилителя, стоящего после фотодетектора. При этом преобразование и усиление принятого сигнала в автоколебательной системе ОЭГ происходит за счет нелинейности процессов, которые обычно наблюдаются в любом автогенераторе в режиме биений, когда частота воздействующего сигнала находится за пределами полосы захвата. Режим биений используется в широко известных автодинных преобразователях частоты (см.  
20 стр. 284-297 книги: [55]). В зарубежной литературе такие преобразователи частоты известны как Self-Mixing Oscillators или Self-Oscillating Mixer (SOM) - самогенерирующий смеситель (см. стр. 215-240, глава 6 книги [56], а также обзорную статью [57]).

Необходимо отметить, что режим работы автодинного генератора радиолокационного применения, когда он находится под воздействием собственного  
25 отраженного излучения, значительно отличается от режима, в котором работает автодинный преобразователь частоты, когда на генератор поступает излучение от стороннего источника. Эти отличия не только в том, что функционально приемопередатчик является одновременно и приемником и передатчиком, но и в том, что у него есть свои особенности автоколебаний и свои понятия, параметры и  
30 характеристики. Данные отличия подробно обсуждаются в разделе 1.3 обзорной статьи [58]. Поэтому устройства на основе генератора, выполняющие функцию преобразователя частоты не могут быть противопоставлены автодинным приемопередатчикам радиолокационного применения, которые взаимодействуют с собственным отраженным от объекта локации излучением.

35 При поиске альтернативных решений в смежных областях техники, где могут использоваться генераторы с запаздывающей обратной связью, и, в частности, оптоэлектронные генераторы (ОЭГ) и их составные элементы, выбраны и изучены следующие источники: изобретения [59-64]; обзоры [65-72]; монографии [73-75]; справочники [76]; диссертации [77-82].

40 В результате изучения представленных в списке материалов установлено, что среди известных радиолокационных и иных устройств выполненных на основе генераторов с запаздывающей обратной связью, отсутствуют технические решения приемопередатчиков для СБРЛ, которые в своей работе используют автодинный эффект. Этот эффект проявляется, как отмечалось выше, при одновременной генерации  
45 и излучении зондирующего радиосигнала, а также приеме и воздействии на генератор собственного отраженного от объекта локации излучения. Следовательно, предлагаемое техническое решение обладает новизной, поскольку авторам не известны устройства аналогичного назначения, содержащие признаки, которые фигурируют в предлагаемом

изобретении в качестве отличительных признаков.

Анализ результатов патентного поиска показал также, что предлагаемое решение не следует явным образом из уровня техники. Из определенного выше уровня техники не выявлена известность влияния существенных признаков заявляемого технического решения на достижение указанного технического результата. Следовательно, заявляемое техническое решение соответствует условию патентоспособности «Изобретательский уровень».

Изобретение направлено на улучшение характеристик работы автодинных СБРЛ, предназначенных для получения данных об объекте локации и параметрах его движения, что необходимо для различных отраслей деятельности человека. Таким образом, заявляемое изобретение соответствует критерию «Промышленная применимость».

Сущность изобретения поясняется чертежами, где на фиг. 1 представлена структурная схема автодинного приемопередатчика для СБРЛ с подключенной к его входу-выходу антенной; на фиг. 2 раскрыты варианты выполнения делительно-развязывающего устройства (ДРУ) со схемой его подключения.

Автодинный приемопередатчик для СБРЛ содержит (см. фиг. 1) соединенные последовательно линию задержки 1 радиочастотных сигналов, малошумящий усилитель 2, полосно-пропускающий резонатор 3 с возможностью изменения собственной частоты и усилитель мощности 4, причем, выход усилителя мощности 4 соединен с первым портом 5 ДРУ 6, второй порт 7 которого является радиочастотным входом-выходом автодинного приемопередатчика и предназначен для подключения антенны 8, а третий порт 9 ДРУ 6 соединен с входом линии задержки 1 радиочастотных сигналов, причем, в цепь питания усилителя мощности 4 включен датчик 10 тока, выход которого связан с условной клеммой «Выход 1», а полосно-пропускающий резонатор 3 связан с амплитудным детектором 11, выход которого подключен к условной клемме «Выход 2».

ДРУ 6 в предлагаемом автодинном приемопередатчике для СБРЛ (см. фиг. 1) может быть выполнено, например, в виде:

1) трехплечего циркулятора 12 (см. фиг. 2, а), первое 13, второе 14 и третье 15 плечи которого соответственно подключены к первому 5, второму 7 и третьему 9 портам ДРУ 6. Принцип действия, устройство и свойства циркуляторов широко известны и описаны в учебной литературе (см. стр. 290-294 книги [53]);

2) комбинации трехплечего циркулятора 12 (см. фиг. 2, б) и неоднородности 16 выполненной, например, в виде двух- или трех-штыревого трансформатора импедансов (см. стр. 295-296 книги [53]), причем первое 13 и третье 15 плечи циркулятора 12 соответственно подключены к первому 5 и третьему 9 портам ДРУ 6, а второе плечо 14 циркулятора 12 через неоднородность 16 связано со вторым портом 7 ДРУ 6. Пример подключения такой неоднородности между автодинным генератором и антенной приведен на фиг. 1 описания к патенту устройства-аналога [5];

3) комбинации трехплечего циркулятора 12 (см. фиг. 2, в) и направленного ответвителя 17, выполненного в виде двух связанных отрезков линии передачи (см. стр. 273-281 книги [53]), вход 18 первичного отрезка которого соединен с первым портом 5 ДРУ 6, а выход 19 первичного отрезка линии передачи соединен с первым плечом 13 трехплечего циркулятора 12, второе плечо 14 которого соединено со вторым портом 7 ДРУ 6, при этом третье плечо 15 трехплечего циркулятора 12 подключено к входу 20 вторичного отрезка линии передачи направленного ответвителя 17, а выход 21 вторичного отрезка линии передачи направленного ответвителя 17 соединен с третьим портом 9 ДРУ 6;

4) комбинации направленного ответвителя 17, выполненного в виде двух связанных

отрезков линии передачи, (см. фиг. 2, г) и дополнительной антенны 22, при этом вход 18 первичного отрезка линии передачи направленного ответвителя 17 соединен с первым портом 5 ДРУ 6, а выход 19 первичного отрезка линии передачи соединен со вторым портом 7 ДРУ 6, вход 20 вторичного отрезка линии передачи направленного ответвителя 17 подключен к приемной антенне 22, а выход 21 вторичного отрезка линии передачи направленного ответвителя 17 соединен с третьим портом 9 ДРУ 6. Такой вариант выполнения развязки с применением двух антенн (передающей и приемной) и направленного ответвителя широко известен (см., например, фиг. 1 в описании к патенту [83]).

Антенны 8 и 22 (см. фиг. 1 и фиг. 2, г) могут иметь различное исполнения, зависящие от требований к диаграмме направленности и рабочего диапазона частот, например, в виде несимметричного четвертьволнового вибратора (см. фиг. 4 и 8 патента [84]), щелевого вибратора, рупорной, диэлектрической стержневой, спиральной антенны или типа «волновой канал» (см. соответственно стр. 115, 149, 218, 239, 260, книги [85]).

Линия задержки 1 радиочастотного сигнала (см. фиг. 1) может быть выполнена в виде: 1) линии передачи с распределенными параметрами, например, волноводной, коаксиальной, полосковой, щелевой и пр.; 2) в виде искусственной линии на элементах с сосредоточенными параметрами; 3) в виде линии с преобразованием электрических сигналов в сигналы другой физической природы (ультразвуковое, оптическое излучение) и обратно (см. материал из Википедии: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Линиязадержки>. Дата обращения 11.05.2021). При этом наилучшие параметры и характеристики в настоящее время имеют волоконные оптические линии задержки (ВОЛЗ). Эти линии обычно содержат последовательное соединение полупроводникового лазерного модуля, электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха-Цандера, оптического тракта на основе отрезка одномодового оптического волокна и фотодетекторного модуля. При этом входом такой линии задержки является управляющий вход электрооптического модулятора, а ее выходом - выход фотодетекторного модуля [86, 87].

Маломощный усилитель 2 (см. фиг. 1), работающий в линейном режиме усиления проходящих через него малых радиочастотных колебаний, может быть выполнен на полевых, биполярных транзисторах или интегральных микросхемах (см., например, на фиг. 2 транзистор Q2 в описании патента-прототипа [42]; каталог компании Analog Devices, раздел «Low-noise amplifiers - Маломощные усилители» [88]).

Полосно-пропускающий резонатор 3 (см. фиг. 1) с возможностью изменения собственной частоты, предназначенный для частотной селекции проходящих колебаний, может быть выполнен на основе сосредоточенных LC-элементов электрических цепей (см., например, фиг. 2, конденсатор C1 и индуктивность L2 (поз.15, 34) описания к патенту прототипа [42]) или распределенных элементов в объемном, планарном и ином исполнении, обеспечивающим формирование частотной характеристики с одним максимумом на частоте  $\omega_p$ . При этом перестройка частоты  $\omega_p$  изменением управляющего напряжения может быть реализована, например, с помощью варикапа, подключенного к резонатору (см. на фиг. 4, поз.11 и 12 описания к патенту аналога [40]).

Усилитель мощности 4 (см. фиг. 1), работающий в нелинейном режиме усиления и ограничения амплитуды проходящих через него колебаний, может быть выполнен на полевых, биполярных транзисторах или интегральных микросхемах (см., например, фиг. 2, транзистор Q1 описания к патенту прототипа [42]; каталог компании Analog Devices, раздел: «Microwave power amplifiers - Усилители мощности СВЧ» [88]).

Датчик 10 тока (см. фиг. 1), предназначенный для выделения автодинного сигнала

в цепи питания усилителя мощности 4, также имеет альтернативные технические решения. Он может быть выполнен, например, в виде резистора (см. фиг. 2, резистор R1 (поз.29) описания к патенту [42]; фиг. 3 в описании к патенту [89]) или в соответствии с одной из схем на рис. 18 и 20, представленных в статье [1].

5 В качестве амплитудного детектора 11 (см. фиг. 1), предназначенного для регистрации автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний, может использоваться обычный диодный амплитудный детектор, выполненный по последовательной или параллельной схеме (см. рис. 7.1, стр. 123, рис. 7.8, стр. 131, книги [90]).

Автодинный приемопередатчик для СБРЛ работает следующим образом.

10 Последовательное соединение линии задержки 1 (см. фиг. 1), малошумящего усилителя 2, полосно-пропускающего резонатора 3 и усилителя мощности 4 через внутреннюю связь между первым портом 5 и третьим портом 9 ДРУ 6 образует систему кольцевого автогенератора с запаздывающей обратной связью. После подаче на активные элементы этой системы напряжения от источника питания (на фиг. 1 он не показан) в ней при  
15 условию, что модуль контурного коэффициента передачи этого кольца в режиме малых колебаний больше единицы, неизбежно возникают нарастающие по амплитуде автоколебания.

Присутствующие в цепи кольцевого генератора тепловые шумы усиливаются и сдвигаются по фазе таким образом, что в полосе пропускания резонатора 3 возникают  
20 автоколебания на множестве частот, которые по оси частот располагаются эквидистантно. Интервал между соседними частотами колебаний обратно пропорционален времени запаздывания радиосигнала в линии задержки (см. описание принципа действия генераторов с запаздыванием в разделе 9.9, стр. 293-295 в книге: [91]).

25 Эти колебания при их циклическом обходе по замкнутому контуру генератора достигают по амплитуде своего стационарного значения  $A_0$ .

Дальнейший рост их ограничен амплитудной характеристикой усилителя мощности 4 в режиме большого сигнала (см. рис. 1.4 на стр. 23 учебного пособия: [92]). После  
30 достижения этого уровня соотношение между амплитудами колебаний на разных частотах изменяется в пользу колебания на частоте, близкой к центральной частоте  $\omega_p$  полосно-пропускающего резонатора.

3. В итоге колебания на прочих частотах практически полностью подавляются, и в системе остается лишь одно колебание. Для этого колебания начальные условия при  
35 запуске генератора наиболее благоприятны, чем для колебаний на иных частотах.

Благодаря наличию на выходе усилителя мощности 4 согласующих цепей (на схеме фиг. 1 они не показаны), которые обладают также свойством фильтрации колебаний, влиянием высших гармонических составляющих из-за ограничения амплитуды на  
40 работу автодинного приемопередатчика можем пренебречь. Поэтому полагаем, что в режиме установившихся колебаний выходное напряжение усилителя мощности 4 является квазигармоническим и выражение для него имеет следующий вид:

$$u_{\text{вых}}(t) = A_0 \cos \Psi(t) = A_0 \cos(\omega_0 t), \quad (1)$$

где  $A_0$ ,  $\Psi(t)$  - амплитуда и полная фаза колебания в текущий момент времени  $t$ ; начальной фазой в (1) можно пренебречь.

45 Основная мощность с выхода усилителя мощности 4 в виде колебаний (1), проходя по пути с малыми потерями: первый порт 5 - второй порт 7 ДРУ 6, излучается через антенну 8 в пространство в виде электромагнитного излучения. Остальная часть выходной мощности усилителя мощности 4, проходя по пути: первый порт 5 - третий

порт 9 ДРУ 6, поступает на вход линии задержки 1 в виде колебания «обратной связи»:

$$u_{oc}(t) = A_{oc} \cos(\omega_p t + \varphi_{дру}), \quad (2)$$

где  $A_{oc} = A_0 K_{дру}$  - амплитуда колебаний обратной связи;

5  $K_{дру}$ ,  $\varphi_{дру}$  - модуль и фаза коэффициента передачи от первого порта 5 к третьему порту 9 ДРУ 6.

В случае, когда в поле излучения антенны 8 объект локации отсутствует, автодинный  
приемопередатчик функционирует в автономном режиме, т.е. при отсутствии воздействия  
10 на него отраженного радиосигнала. Для этого режима, используя квазилинейный метод  
анализа автоколебательных систем, запишем условие стационарных колебаний  
генератора в комплексной форме (см. стр. 699- 671 и 713-716 книги [93]):

$$K_{лч}(\omega_p) K_{ум}(A) e^{j(\varphi_{лч} + \varphi_{ум})} = 1, \quad (3)$$

15 где  $K_{лч}(\omega_p) = K_{дру} K_{лз} K_{мшу} K_p(\omega_p)$  - модуль коэффициента передачи линейной части  
кольцевого генератора;

$\varphi_{лч} = \varphi_{дру} + \varphi_{лз} + \varphi_{мшу} + \varphi_p(\omega_p)$  - фаза коэффициента передачи линейной части  
кольцевого генератора;

20  $K_T$  и  $\varphi_{лз} = \omega T_{лз}$  - модуль и фаза коэффициента передачи линии задержки 1  
радиочастотного сигнала;

$T_{лз}$  - время запаздывания радиочастотного сигнала в линии задержки 1;

$K_{мшу}$ ,  $\varphi_{мшу} = -\pi$  - модуль и фаза коэффициента передачи малошумящего усилителя 2;

25  $K_p(\omega_p) = K_p \cos \varphi_p$  и  $\varphi_p = \arctg T_p(\omega - \omega_p) \approx T_p(\omega - \omega_p)$  - модуль и фаза  
коэффициента передачи полосно-пропускающего резонатора 3;

$T_p = 2Q_p / \omega_p$  и  $2p$  - постоянная времени и собственная добротность полосно-  
пропускающего резонатора 3;

30  $K_{ум}(A) = K_{ум}^{(0)} k_a(A)$  и  $\varphi_{ум} = -\pi$  - средние за период колебаний модуль и фаза  
коэффициента передачи усилителя мощности 4;

$K_{ум}^{(0)}$  - коэффициент передачи усилителя мощности 4 в режиме слабого сигнала;

35  $k_a(A) = 1 - (A / A_{max})^n$  - аппроксимирующая функция нормированного  
коэффициента передачи усилителя мощности 4 (см. формулу (3) статьи: [94]);

$A_{max}$  - амплитуда колебаний на выходе усилителя мощности 4, при которой  
коэффициент передачи  $K_{ум}(A)$  становится равным единице;

40  $n$  - показатель «мягкости» характеристики усиления, определяющий ее вид в  
зависимости от выбора режима усилителя мощности 4. Значение этого показателя  
подбирается под выбранный тип усилителя мощности 4. При этом отметим, что с  
увеличением  $n$  характеристика усиления приближается к виду более «жесткого»  
ограничителя амплитуды.

45 Уравнение (3) имеет место, если одновременно выполняются два условия, которые  
в теории автогенераторов соответственно называются балансом амплитуд и балансом  
фаз (см. стр. 211-216 [95]):

$$K_{лч}(\omega_p) K_{ум}(A_0) = 1, \quad (4)$$

$$\varphi_{\Sigma} = \varphi_{\text{дру}} + \varphi_{\text{лз}} + \varphi_{\text{мшу}} + \varphi_{\text{р}} + \varphi_{\text{ум}} = 2\pi k, \quad (5)$$

где  $k$  - целое положительное число.

В выражении (5) фазовые смещения  $\varphi_{\text{дру}}$ ,  $\varphi_{\text{мшу}}$  и  $\varphi_{\text{ум}}$  являются величинами практически постоянными и слабо зависящими от частоты и режима генерации. Их суммарный вклад в общую фазу  $\varphi_{\Sigma}$  можно учесть при наладке автодинного приемопередатчика и свести его к целому числу  $2\pi$ . Поэтому эти составляющие в дальнейшем не рассматриваем и из (4), (5) с учетом приведенных выше к (3) расшифровок получим:

$$K_{\text{лч}} K_{\text{ум}}^{(0)} [1 - (A_0 / A_{\text{max}})^n] \cos[T_{\text{р}}(\omega_0 - \omega_{\text{р}})] = 1, \quad (6)$$

$$(T_{\text{лз}} + T_{\text{р}})\omega_0 - T_{\text{р}}\omega_{\text{р}} = 2\pi k. \quad (7)$$

Частота стационарных колебаний  $\omega_0$ , как отмечалось выше, близка к собственной частоте  $\omega_{\text{р}}$  полосо-пропускающего резонатора 3 и может быть рассчитана из (7):

$$\omega_0 = \frac{2\pi k}{T_{\text{лз}}} - \frac{T_{\text{р}}\Delta\omega}{T_{\text{лз}}}, \quad (8)$$

где  $k = \omega_0 T_{\text{лз}} / 2\pi$  - значение целого числа;

$\Delta\omega = \omega_0 - \omega_{\text{р}}$  - величина расстройки собственной частоты  $\omega_{\text{р}}$  резонатора 3 и частоты  $\omega_0$  стационарных колебаний.

Вследствие близости частот  $\omega_0$  и  $\omega_{\text{р}}$  в (6) можем положить косинус равным единице. Тогда из этого выражения получим простую формулу для расчета амплитуды стационарных колебаний  $A_0$ :

$$A_0 = A_{\text{max}} \sqrt[n]{1 - (1 / K_{\text{лч}} K_{\text{ум}}^{(0)})}. \quad (9)$$

При наличии в поле излучения антенны 8 объекта локации принятый антенной 8 радиосигнал поступает на второй порт 7 ДРУ 6, затем передается с малыми потерями на третий порт 9 ДРУ 6 и поступает на вход линии задержки 1 в виде:

$$u_{\text{отр}}(t) = A_{\text{отр}} \cos \Psi_{\text{отр}}(t, \tau) = A_{\text{отр}} \cos[\omega_0 t - \delta(t, \tau)], \quad (10)$$

где  $A_{\text{отр}}$ ,  $\Psi_{\text{отр}}(t, \tau) = \omega_0 t - \delta(t, \tau)$  - амплитуда и полная фаза радиосигнала, принятого от объекта локации;

$\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau)$  - набег фазы отраженного излучения при его распространении до объекта локации и обратно;

$\tau = 2R(t)/c$  - время запаздывания отраженного излучения от объекта локации;

$R(t)$  - дальность до объекта локации, в общем случае переменная;

$c$  - скорость распространения электромагнитного излучения в свободном пространстве.

На входе линии задержки 1 колебания (2) и (10) образуют суперпозицию вида:

$u_{\Sigma}(t) = u_{\text{вх}}(t) + u_{\text{отр}}(t)$ . При этом без учета фазы  $\varphi_{\text{дру}}$  выражение для результирующего колебания  $u_{\Sigma}(t)$  имеет вид:

$$u_{\Sigma}(t) = A_{\text{ос}} \cos(\omega_0 t) + A_{\text{отр}} \cos[\omega_0 t - \delta(t, \tau)] = A_{\Sigma}(t) \cos[\omega_0 t - \Theta_{\Sigma}(t)], \quad (11)$$

где  $A_{\Sigma}(t)$  и  $\Theta_{\Sigma}(t)$  - медленно меняющиеся амплитуда и фаза результирующего

колебания на входе линии задержки 1:

$$A_{\Sigma}(t) = A_{oc} \sqrt{1 + 2\Gamma \cos \delta(t, \tau) + \Gamma^2} \approx A_{oc} [1 + \Gamma \cos \delta(t, \tau)], \quad (12)$$

$$\Theta_{\Sigma}(t) = \arctg \frac{\Gamma \sin \delta(t, \tau)}{1 + \Gamma \cos \delta(t, \tau)} \approx \Gamma \sin \delta(t, \tau), \quad (13)$$

$\Gamma = A_{отр} / A_{oc}$  - приведенный к фланцу антенны коэффициент отражения,

характеризующий затухание излучения по амплитуде при его распространении до объекта локации и обратно, обычно  $\Gamma \ll 1$ .

Воздействие отраженного радиосигнала (10) на генератор вызывает в нем автодинный эффект [96]. Этот эффект проявляется в автодинных изменениях амплитуды  $\Delta A = A - A_0$  и частоты  $\Delta \omega = \omega - \omega_0$  колебаний в окрестности стационарного режима (6)-(9). Для нахождения указанных изменений перепишем уравнения (4) и (5) с учетом прилагаемых к ним расшифровок и воздействия на генератор отраженного радиосигнала (11) - (13) в виде:

$$K(A, \omega) = K_{лч} K_{ум}^{(0)} \left[ 1 - \left( \frac{A}{A_{max}} \right)^n \right] \cos[T_p(\omega - \omega_p)] = 1 + \Gamma \frac{1}{K_{дру}} \cos \delta(t, \tau). \quad (14)$$

$$\varphi_{\Sigma}(\omega) = (T_{лз} + T_p)\omega - T_p\omega_p = 2\pi k + \Gamma \frac{1}{K_{дру}} \sin \delta(t, \tau), \quad (15)$$

множитель  $1/K_{дру}$  в правой части (14) и (15) учитывает поступление отраженного радиосигнала на вход линии задержки 1.

Аналитическое решение нелинейных уравнений (14) и (15) для случая воздействия слабого отраженного радиосигнала, когда коэффициент  $\Gamma \ll 1$ , для относительных автодинных изменений амплитуды  $a = \Delta A / A_0$  и частоты  $\chi = \Delta \omega / \omega_0$  колебаний имеет вид:

$$a = -\Gamma(1 / K_{дру}) K_a \cos[\delta(t, \tau) + \psi], \quad (16)$$

$$\chi = \Gamma(1 / K_{дру}) L_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (17)$$

где  $K_a, L_a$  - коэффициенты автодинного усиления и девиации частоты:

$$K_a = \frac{\sqrt{1 + \rho^2}}{\alpha(1 - \gamma\rho)}, \quad L_a = \frac{\sqrt{1 + \gamma^2}}{\xi(1 - \gamma\rho)}; \quad (18)$$

$\rho, \gamma$  - безразмерные коэффициенты неизодромности и неизохронности генератора соответственно, характеризующие зависимость параметров генератора от изменений частоты и амплитуды соответственно [38]:

$$\rho = \frac{\varepsilon}{\xi} = \frac{T_p \omega_0 \operatorname{tg}[T_p(\omega_0 - \omega_p)]}{T_{лз} + T_p} \approx 0, \quad \gamma = \frac{\beta}{\alpha} = 0; \quad (19)$$

$\psi, \theta$  - углы фазового смещения автодинных изменений амплитуды и частоты генератора соответственно:

$$\psi = \arctg(\rho) \approx 0, \quad \theta = \arctg(\gamma) = 0; \quad (20)$$

$\alpha, \varepsilon, \beta, \xi$  - безразмерные параметры, полученные как частные производные по амплитуде и частоте в окрестности стационарного режима генератора, определяющие

его прочность предельного цикла, неизодромность, неизохронность и фиксирующую способность частоты соответственно:

$$\alpha = \frac{\partial K(A, \omega)}{\partial A} = K_{\text{лч}} K_{\text{ум}}^{(0)} \left( \frac{A_0}{A_{\text{max}}} \right)^n; \quad (21)$$

$$\varepsilon = \frac{\partial K(A, \omega)}{\partial \omega} = T_p \omega_0 \operatorname{tg}[T_p(\omega_0 - \omega_p)]; \quad (22)$$

$$\beta = \frac{\partial \varphi_{\Sigma}(\omega)}{\partial A} = 0; \quad (23)$$

$$\xi = \frac{\partial \varphi_{\Sigma}(\omega)}{\partial \omega} = T_{\text{лз}} + T_p = \frac{2Q_{\text{экв}}}{\omega_0}; \quad (24)$$

$Q_{\text{экв}} = Q_{\text{лз}} + Q_p$  - эквивалентная добротность колебательной системы кольцевого генератора с запаздывающей обратной связью;

$Q_{\text{лз}} = (\partial \varphi_{\text{лз}} / \partial \omega)(\omega_0 / 2)$  - добротность линии задержки 1.

Анализ выражения (16) с учетом (21) - (24) и (18) - (20) показал, что из-за ограничения амплитуды колебаний усилителем мощности 4 коэффициент передачи автодинного сигнала на выходе этого усилителя весьма мал. Поэтому регистрация сигнала по изменению амплитуды колебаний более предпочтительна на выходе полосно-пропускающего резонатора 3 посредством линейного амплитудного детектора 11 (см. фиг. 1). Выражение для сигнала на выходе амплитудного детектора 11 имеет вид:

$$a_p = -\Gamma \frac{K_{\text{лч}} K_{\text{ад}}}{K_{\text{дру}} \alpha} \cos \delta(t, \tau), \quad (25)$$

где  $K_{\text{ад}}$  - коэффициент передачи амплитудного детектора.

При работе усилителей в нелинейном режиме их постоянная составляющая тока в цепи питания зависит от амплитуды усиливаемого колебания (см. стр. 283-284 книги [91]). Регистрации автодинных изменений этого тока в цепи питания  $a_{\text{ум}}$  усилителя мощности 4 посредством датчика 10 тока обеспечивает получение сигнала в виде:

$$a_{\text{ум}} = -\Gamma \frac{K_{\text{лч}} K_{\text{пр}}}{K_{\text{дру}} \alpha} \cos \delta(t, \tau), \quad (26)$$

где  $K_{\text{пр}}$  - коэффициент преобразования изменений амплитуды колебаний в изменения тока питания с последующей их трансформацией в напряжение выходного сигнала.

Выражение для частоты со колебаний генератора, полученное из (17) с учетом (21) - (24) и (18) - (20), имеет вид:

$$\omega = \omega_0 + \frac{\Gamma \omega_0}{2K_{\text{дру}} Q_{\text{экв}}} \sin \delta(t, \tau) = \omega_0 + \Delta \omega_m \sin \delta(t, \tau), \quad (27)$$

где  $\Delta \omega_m = \Gamma \omega_0 / (2K_{\text{дру}} Q_{\text{экв}})$  - величина автодинной девиации частоты генерации автодинного приемопередатчика.

Входящий в приведенные выше выражения набег фазы  $\delta(t, \tau)$  отраженного радиосигнала определяется как  $\delta(t, \tau) = \omega \tau$  [38]. Поэтому с учетом (27) получим:

$$\delta(t, \tau) = \omega \tau = \omega_0 \tau + C_{oc} \sin \delta(t, \tau), \quad (28)$$

где  $C_{oc} = \Delta\omega_m \tau$  - параметр обратной связи автодинной системы «генератор - объект локации», определяющий степень ангармонических искажений сигналов (см. статью [38]).

Из анализа выражений (24), (17), (27) и (28) следует, что в предлагаемом автодинном приемопередатчике эквивалентная добротность  $Q_{эКВ}$  колебательной системы генератора может быть реализована значительно большего значения, чем в автодинных приемопередатчиках аналогов и прототипа. Это достигается соответствующим выбором типа линии задержки с увеличенным временем запаздывания  $T_{лз}$  радиосигнала и сниженными потерями:

$$Q_{эКВ} = \frac{\omega_0 T_p}{2} \left( 1 + \frac{T_{лз}}{T_p} \right) = Q_p \left( 1 + \frac{Q_{лз}}{Q_p} \right). \quad (29)$$

Здесь добротность  $Q_{лз}$  линии задержки 1 в соответствие с общим определением добротности (см. стр. 302 книги [53]) равна отношению реактивной энергии  $W_{нак}$ , накопленной в колебательной системе, к энергии  $W_{расГ}$ , рассеянной за период колебаний  $T=1/f_0$ :

$$Q_{лз} = 2\pi \frac{W_{нак}}{W_{расГ}} = 2\pi f_0 \frac{P_{под} T_{лз}}{P_{рас}}, \quad (30)$$

где  $P_{под}$ ,  $P_{рас}$  - подводимая и рассеиваемая мощности.

Линии задержки радиосигналов 1, выполненные на основе линии передачи с распределенными параметрами или на элементах с сосредоточенными параметрами пока не обеспечивают высоких значений добротности  $Q_{лз}$  в диапазонах КВЧ и ГВЧ, поскольку в этих диапазонах они в настоящее время имеют сравнительно большие потери [97].

Линии задержки на поверхностных акустических волнах обычно вносят небольшое затухание 0,5...1,5 дБ. Длительность задержки в зависимости от конструкции составляет от единиц до сотен микросекунд. Достижимая при этом добротность колебательной системы имеет порядок  $1 \times 10^4$ . Однако из-за конструкторско-технологических ограничений верхняя рабочая частота этих линий в настоящее время не превышает 2 ГГц (см. статью [97], а также стр. 104-108 книги [98]).

Волоконно-оптические линии задержки (ВОЛЗ) радиосигналов в настоящее время обладают наименьшими потерями. Например, для ВОЛЗ из кварца потери при длине волны  $\lambda=1,3$  мкм составляют 0,35 дБ/км. Частотный диапазон для комплектующих ВОЛЗ к настоящему времени превысил 100 ГГц. Значения добротности  $Q_{лз}$  ВОЛЗ, рассчитанные согласно (30), имеют порядок  $Q_{эКВ}=(0,1...10) \times 10^9$  [99-101].

Реализуемая величина добротности при использовании в предлагаемом устройстве ВОЛЗ примерно на пять-шесть порядков выше эквивалентной добротности  $Q_{эКВ}=2000$ , полученной на частоте 37,5 ГГц для автодинного приемопередатчика, выполненного на диоде Ганна, в котором для стабилизации частоты применялся дополнительный высокодобротный резонатор с собственной добротностью около 10000 (см. стр. 27 статьи: [102]). Значительное увеличение эквивалентной добротности колебательной

системы, как видно из (29), во столько же раз уменьшает величину автодинной девиации частоты  $\Delta\omega_m$  и параметра обратной связи  $C_{oc}$ , делая их ничтожно малыми. При этом набег фазы  $\delta(t, \tau)$ , как следует из (28), становится линейной функцией времени запаздывания  $\tau$  отраженного излучения:  $\delta(t, \tau) = \omega_0 \tau$  (см. раздел 2.1 статьи [103]). При

$$\delta(t, \tau) = \omega_0 \tau(t) = \delta(t) = \Omega_d t + \delta_0, \quad (31)$$

где  $\delta_0$  - начальный фазовый сдвиг, который определяется положением объекта в момент времени  $t=0$ ;

$$\Omega_d = 2(V_p/c)\omega_0 - \text{частота Доплера};$$

$V_p$  - относительная радиальная скорость между СБРЛ и объектом локации.

Выражения (25) и (26) для мгновенных значений выходных сигналов автодинного приемопередатчика перепишем с учетом (31) в виде:

$$a_p = -\Gamma \frac{K_{лч} K_{ад}}{K_{дру} \alpha} \cos[\Omega_d t + \delta_0], \quad (32)$$

$$a_{ум} = -\Gamma \frac{K_{лч} K_{пр}}{K_{дру} \alpha} \cos[\Omega_d t + \delta_0], \quad (33)$$

Из выражений (32) и (33) видно, что сигналы предлагаемого автодинного приемопередатчика для СБРЛ являются гармоническими, как у систем гомодинного типа. Поэтому свойственные прототипу и аналогам недостатки (ангармонические искажения автодинных сигналов, ограничение динамического диапазона автодинного приемопередатчика и явление периодической нестационарности шумовых характеристик) в предлагаемом устройстве отсутствуют. Этим достигается решение основной технической проблемы автодинных приемопередатчиков.

При этом необходимо отметить, что значение эквивалентной добротности ОЭГ, в отличие от СВЧ генераторов, выполненных на основе обычных волноводных и диэлектрических резонаторов, не зависит от его рабочей частоты, что обеспечивает возможность ее повышения без ухудшения параметров устройства. С другой стороны, в ОЭГ полоса перестройки частоты не зависит от эквивалентной добротности и определяется исключительно полосами пропускания оптического модулятора, фотодетекторного модуля и радиосигнальных усилителей, верхние частоты которых в настоящее время превышают 100 ГГц [104]. Таким образом, у предлагаемого устройства отсутствует принципиальное ограничение в освоении автодинными устройствами частотных диапазонов КВЧ и ГВЧ.

Необходимо отметить также, что выполненные на основе ВОЛЗ генераторы, которые в отечественной литературе принято называть оптоэлектронными генераторами (ОЭГ), а в зарубежной - Optoelectronic Oscillator (ОЕО), обеспечивают для современных СВЧ генераторов рекордно низкие значения шумовых параметров. Например, на расстоянии 10 кГц от несущей ОЭГ с частотой генерации 10 ГГц получен уровень частотных шумов минус 140...160 дБн/Гц [105]. При этом уровень паразитных составляющих в спектре сигнала генерации не превышает минус 91 дБн [106]. На частоте 100 ГГц уровень фазовых шумов для ОЭГ при той же величине отстройки от несущей получен минус 70 дБн/Гц [107].

В отношении амплитудных шумов в литературе отмечено, что они во всем диапазоне

отстроек от несущей оказываются ниже фазового шума. Так, для отстроек от 1 кГц до 1 МГц спектральная плотность мощности амплитудного шума не превышает минус 130 дБн/Гц, а минимальный уровень спектральных составляющих в области «шумовой полки» составляет величину порядка минус 150 дБн/Гц [108].

5 Сравнение шумовых характеристик ОЭГ и генераторов КВЧ и СВЧ диапазонов на полупроводниковых приборах со стабилизацией и без стабилизации частоты показывает, что ОЭГ обеспечивают преимущество примерно на 40 дБ (см. статьи: [38,109]; стр. 58, рис. 5 [110]).

10 Поскольку предельный потенциал автодинных приемопередатчиков определяется как отношение его выходной мощности к мощности собственных шумов генератора (см. раздел 1.4 статьи [38]), то применение ОЭГ вместо известных генераторов обеспечивает выигрыш в потенциале и дополнительном расширении динамического диапазона на эту же величину, т.е. примерно 40 дБ. Эта величина соответствует увеличению предельной дальности действия автодинной СБРЛ при прочих равных  
15 условиях на порядок. Улучшение данных параметров автодинных СБРЛ позволит значительно расширить область их применения, например, в создании на их основе систем обнаружения объектов с малой ЭПР, таких как беспилотных летающих аппаратов, для защиты от которых применение обычных (больших) РЛС малоэффективно.

20 Как отмечалось выше, генератор с запаздывающей обратной связью в предложенной конфигурации автодинного приемопередатчика генерирует колебания, кратные частотному интервалу  $\Delta f = 1 / T_{лз}$ . При этом перестройка собственной частоты полосно-пропускающего резонатора 3 посредством, например, изменения напряжения смещения на варикапе, обеспечивает переключение частоты выходных колебаний  
25 приемопередатчика с шагом  $\Delta f = 1 / T_{лз}$ . Размер этого шага определяется конкретным выбором длины ВОЛС. Использование автодинного приемопередатчика с переключаемой частотой в качестве радиолокационного датчика с частотной манипуляцией непрерывного излучения радиоволн обеспечивает возможность решения  
30 таких задач, как обнаружения объектов локации, измерения расстояния до них, а также определения скорости и направления движения [111]. При этом ограничение амплитуды выходных колебаний автодинного приемопередатчика усилителем мощности 4 обеспечивает снижение уровня ПАМ при ЧМ, чем сохраняется в предлагаемом устройстве достоинство устройства-прототипа.

35 В заключение рассмотрим принцип действия и работу вариантов выполнения ДРУ 6 в составе предлагаемого устройства.

ДРУ 6 в автодинном приемопередатчике (см. фиг. 1) выполняет следующие функции. С одной стороны, оно разделяет поступающее от усилителя мощности 4 в антенну 8 зондирующее излучение и излучение, принятое антенной 8 от объекта локации.  
40 Последнее затем направляется в виде радиочастотных колебаний на вход линии задержки 1. С другой стороны, оно дозирует уровень поступления части мощности с выхода усилителя мощности 4 на вход линии задержки 1. Этот уровень дозирования снизу ограничен условием возбуждения и поддержания незатухающих колебаний в кольцевом генераторе, а сверху - условием сохранения линейности тракта ВОЛЗ.

45 Величина коэффициента  $K_{дру}$  передачи ДРУ 6 от первого порта 5 к третьему порту 9 ДРУ 6 согласно условию баланса амплитуд (4) должна быть следующей:

$$K_{дру} = 1 / K_{лз} K_{мшу} K_p(\omega_p) K_{ум}(A_0). \quad (34)$$

Так, например, при  $K_{лз}=-3$  дБ,  $K_{мшу}=20$  дБ,  $K_p(\omega_p)=-2$  дБ и  $K_{ум}(A_0)=5$  дБ величина коэффициента  $K_{дру}$  передачи ДРУ 6 согласно (34) должна быть равна  $K_{дру}=-20$  дБ. Если величина развязки циркулятора 12 соответствует этой величине, то в предлагаемом устройстве целесообразно применение ДРУ 6 согласно варианту, представленному на

фиг. 2, а. Однако параметр развязки выпускаемых циркуляторов обычно имеет производственный разброс (на величину 10 и более дБ) и зависит от условий согласования с нагрузкой в плечах циркулятора. Кроме того, он изменяется в процессе эксплуатации от изменений температуры окружающей среды и времени наработки в связи с процессом старения постоянного магнита в циркуляторе. Для исключения влияния этих факторов на работу автодинного приемопередатчика целесообразно применение ДРУ 6, выполненных согласно вариантам, представленным на фиг. 2, а-в. При этом величина параметра развязки циркулятора 12 для нормальной работы генератора должна быть более требуемого значения, определяемого по формуле (34) (в нашем примере эта величина должна быть более 20 дБ).

Тогда в случае применения варианта ДРУ 6 согласно фиг. 2, б необходимое значение мощности на порте 9 получают путем регулировки положения винтов двух- или трехштыревого трансформатора импедансов 16. Совокупность отраженной от неоднородности 16 мощности и мощности радиосигнала, принятого от объекта локации, поступает на второе плечо 15 трехплечего циркулятора 12 и направляется через его третье плечо 15 на третий порт 9 ДРУ 6.

В случае применения варианта ДРУ 6 согласно фиг. 2, в недостаток мощности обратной связи, поступающей с третьего плеча 15 циркулятора 12 на третий порт 9 ДРУ 6, в этом случае восполняется за счет ее прохождения с первого порта 5 через направленный ответвитель 17.

В случае применения варианта ДРУ 6 согласно фиг. 2, г величина коэффициента  $K_{дру}$  передачи определяется параметром прямой передачи направленного ответвителя 17. В этом случае мощность принятого второй антенной 22 отраженного от объекта локации излучения и мощность, прошедшая через направленный ответвитель 17 суммируются и поступают на третий порт 9 ДРУ 6.

В последние годы активно ведутся поиски технических и технологических решений, направленных на создание ОЭГ в гибридно-интегральном исполнении (см., например, [112-114]). Для этой цели авторами изобретения [115] предложена новая технология изготовления оптических волокон со сложной сердцевиной. Эта технология позволяет изготовить ВОЛЗ в объеме менее одного кубического сантиметра с эффективной задержкой 5...50 мкс при оптических потерях не более 2...5 дБ и общей длине линии до 10 км. Из представленного описания настоящего изобретения следует, что при соответствующей доработке интегральной схемы ЭОГ есть возможность реализации автодинного приемопередатчика с качественно новыми свойствами при малых габаритах, весе и стоимости, что способствует созданию продукции массового применения.

Использование предлагаемого изобретения позволяет исключить свойственные устройствам предшествующего уровня техники недостатки и разработать автодинные радиолокационные устройства в диапазонах КВЧ и ГВЧ с улучшенными параметрами и характеристиками. Освоение этих диапазонов обеспечивает дополнительные возможности создания автодинных СБРЛ с повышенными точностью измерения скорости и расстояния, высокой надежностью обнаружения отражающих объектов, а

также направления их относительного перемещения. Такие возможности простых и миниатюрных радиолокационных датчиков с автодинным принципом построения приемопередатчика особенно востребованы при создании эффективных систем обнаружения малоразмерных и малоконтрастных объектов и измерения параметров их движения. Например, для систем защиты важнейших объектов от беспилотных летательных аппаратов, а также для автоматизированных систем управления движением беспилотных средств автомобильного и железнодорожного транспорта и других целей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Носков В.Я., Смольский С.М., Игнатков К.А. и др. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 11. Основы реализации автодинов. Успехи современной радиоэлектроники. 2019. №2. С.5-33.
2. Носков В.Я., Смольский С.М. Сто лет автодину: исторический очерк основных этапов и направлений развития автодинных систем. Радиотехника. 2013. №8. С.91-101.
3. Коган И.М., Тамарчак Д.Я., Хотунцев Ю.Л. Автодины // Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. - М.: ВИНТИ, 1984. Т.33. С.3-175.
4. Патент США US3383682 МКИ G01S 13/88, опубл. 14.05.1968. Radar glasses for the blind / Jr Kenneth Dean Stephens.
5. Патент США US3852743 МКИ G01S 9/44, опубл. 03.12.1974. Homodyne Doppler radar with increased target sensitivity / R Gupta.
6. Патент США US4117464 МКИ<sup>2</sup> G01S 9/42, опубл. 26.09.78. Microwave motion-detection apparatus employing a Gunn oscillator in a self-detecting mode / Erno B. Lutz.
7. Патент США US4319244 МКИ<sup>3</sup> G01S 13/58, опубл. 09.02.82. Short-range Doppler radar / Yukitsugu Hirota.
8. Патент США US5043703 МКИ<sup>5</sup> G08B 13/18, опубл. 28.08.1991. Supervision of autodyne microwave motion-detection system / William S.
9. Патент США US5481266А МКИ<sup>5</sup> G01S 13/56, опубл. 02.01.1996. Autodyne motion sensor / Warren F. Davis.
10. Патент США US6577270 МКИ<sup>7</sup> G01S 13/38, опубл. 10.06.2003. Radar transceiver / Masayuki Kanechika.
11. Авт.свид. СССР SU1775696А1 МКИ<sup>5</sup> G01S 13/02, опубл. 15.11.1992, бюл. №42. Автодинный радиолокатор / В.Т. Бузыкин, С.Д. Воторопин, В.Я. Носков.
12. Авт. свид. СССР SU 1826073А1 МКИ<sup>5</sup> G01S 7/42, опубл. 07.07.1993, бюл. №25. Автодинный генератор / В.Т. Бузыкин, Н.М. Закарлюк, В.Я. Носков.
13. Авт. свид. СССР SU 1829105А1 МКИ<sup>5</sup> G01S 13/60, опубл. 23.07.1993, бюл. №27. Датчик измерителя скорости транспортного средства и автодинный преобразователь / Якухин С.Д.
14. Патент РФ RU 2559940С2 МКИ<sup>(2006)</sup> А61 В 5/02, опубл. 20.08.2015, бюл. №23. Способ дистанционного контроля параметров сердечной деятельности организма / Д.А. Усанов.
15. Lazarus M.J., Pantoja F.P., Somekh M. at all. New direction-of-motion Doppler detector. Electron. Lett. 1980. V. 16. №25. P. 953-954.
16. Б.А. Наливайко. Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды. - Томск. МГП Раско, 1992. С.173-212.
17. Shutaro Nanbu. A New MIC Doppler Module. IEEE Trans. Microwave Theory and

Techniques. 1978. V. 26. No. 3. P. 192-196.

18. Патент КНР CN 201293840Y, МКИ<sup>(2006)</sup> H05B 37/02, опубл. 19.08.2009. Microwave mobile sensor / Chinese.

5 19. Патент ФРГ DE 3209093A, МКИ<sup>3</sup> G01S 13/56, опубл. 22.09.1983. Vorrichtung zur raumueberwachung mittels doppler-radar / Ian Simpson.

20. Патент ФРГ DE 4013049A1, МКИ<sup>5</sup> G01S 13/50, опубл. 31.10.1990. Schaltungsanordnung fuer ein dopplerradarmodul / Henning Hohmann.

10 21. Патент ФРГ DE 4127892A1, МКИ<sup>5</sup> G01S 13/50, опубл. 25.02.1993. Dopplersensor fuer den mikrowellenbereich / Ulrich Dr Ing Guettich.

22. Патент ЕРО EP 2144080A1 МКИ<sup>(2006)</sup> G01S 13/04, опубл. 13.01.2010, Bull. 2010/02. Mikrowellen-/millimeterwellen-sensorvorrichtung / Hitoshi Utagawa.

15 23. Патент РФ RU 2351946C1 МКИ<sup>(2006)</sup> G01S 13/32, опубл. 10.04.2009, бюл. №10. Автодинное устройство системы ближней радиолокации / Б.М. Климатов.

24. Патент РФ RU 2662494C1 МКИ<sup>(2006)</sup> F42C 13/00, опубл. 26.07.2018, бюл. №21. Способ защиты радиовзрывателя на основе автодина от радиопомех / Н.С. Кузнецов.

20 25. Патент РФ RU2688717C1 МКИ<sup>(2006)</sup> F42C 13/04, опубл. 22.05.2019, бюл. №15. Радиовзрыватель на основе автодина / Н.С.Кузнецов.

26. Патент США US3599197 МКИ G01S 9/44, опубл. 10.08.1971. Electromagnetic moving object detection system utilizing a coaxial line resonator / George Boyko.

27. Патент США US4652864 МКИ<sup>4</sup> G08B 13/18, опубл. 24.03.1987. Microwave proximity sensor / Noel M. Calvin.

25 28. Патент США US4672379 МКИ G01S 13/50, опубл. 09.06.1987. Doppler radar transceiver / Frank W. Bishop.

29. Патент США US5280290 МКИ<sup>5</sup> G01S 13/08, опубл. 18.01.1994. Self-oscillating mixer circuits, and FMCW radar / David H. Evans.

30 30. Патент США US5563617 МКИ<sup>6</sup> G01S 13/50, опубл. 08.10.1996. Doppler microwave sensor / Stephen W. Redfern.

31. Патент США US6717544B2 МКИ<sup>7</sup> G01S 13/00, опубл. 06.04.2004. Radar sensor / Toshiyuki Nagasaku.

35 32. Патент США US6833806B2 МКИ<sup>7</sup> G01S 13/00, опубл. 21.12.2004. Radar sensor / Toshiyuki Nagasaku.

33. Патент США US6897735B2 МКИ<sup>7</sup> H03B 5/18, опубл. 24.05.2005. Oscillator, transmitter/receiver module and radar system / Toshiyuki Nagasaku.

40 34. Патент США US7224944B2, МКИ<sup>(2006)</sup> H04B 1/40, опубл. 29.05.2007. RF transceiver having a directly radiating transistor / Thomas E. McEwan.

35. Патент США US8115673B1, МКИ<sup>(2006)</sup> G01S 13/00, опубл. 14.02.2012. Self-oscillating UWB emitter-detector / Thomas E. McEwan.

45 36. Патент США US8212718B2, МКИ<sup>(2006)</sup> G01S 13/04, опубл. 03.07.2012. Microwave/millimeter wave sensor apparatus / Hitoshi Utagawa.

37. Alidoost, S.A., Sadeghzade, R., Fatemi, R. Autodyne system with a single antenna. 11th International Radar Symposium (IRS-2010). Vilnius, Lithuania. 2010. V. 2. P. 406-409.

38. Носков В.Я., Смольский С.М., Игнатков К.А. и др. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов

и их применение. Часть 10. Основы анализа и расчета параметров автодинов с учетом шумов. Успехи современной радиоэлектроники. 2018. №3. С.18-52.

39. Носков В.Я., Богатырев Е.В., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. Влияние сопутствующей амплитудной модуляции на формирование сигналов автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией. Ural Radio Engineering Journal. 2020. Т. 4. №2. С.127-166.

40. Патент США US4973967, МКИ<sup>5</sup> G01S 13/34, опубл. 27.11.1990. Radio altimeter type of detector and a proximity fuse equipped with such a detector / Jacques David.

41. Патент США US5159346, МКИ<sup>5</sup> G01S 7/35, опубл. 27.10.1992. Voltage controlled oscillator / Donald M. Bosch.

42. Патент США US5266957, МКИ<sup>5</sup> G01S 13/26, опубл. 30.11.1993. Proximity fuze transceiver / Donald M. Bosch. (Прототип).

43. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов. Радиотехника. 2012. №6. С.24-42.

44. Носков В.Я., Игнатков К.А. Особенности шумовых характеристик автодинов при сильной внешней обратной связи. Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56, №12. С.112-124.

45. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 8. Автодины со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором. Успехи современной радиоэлектроники. 2013. №12. С. 3-42.

46. Носков В.Я. Стабилизированный бигармонический авто дин. Известия вузов. Радиоэлектроника. 1991. Т. 34. №11. С.61-64.

47. Носков В.Я., Игнатков К.А., Чупахин А.П. Автодинный эффект системы двух взаимно синхронизированных генераторов при сильной связи. Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. №2. С.200-208.

48. Носков В.Я., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. Автодинный эффект СВЧ генераторов с внешней синхронизацией. Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. №6. С.612-620.

49. Носков В.Я., Смольский С.М., Игнатков К.А., Чупахин А.П. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 13. Стабилизированные внешним резонатором автодины при сильном отраженном излучении. Успехи современной радиоэлектроники. 2020. №1. С.5-21.

50. Носков В.Я., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. и др. Автодинный отклик синхронизированных СВЧ генераторов по изменению выходной мощности. Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2020. Т. 11. №5. С.8-14.

51. Носков В.Я., Васильев А.С., Ермак Г.П., Игнатков К.А., Чупахин А.П. Флуктуационные характеристики автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией. Известия вузов. Радиоэлектроника. 2017. Т. 60. №3. С.154-165.

52. Патент РФ RU099191U1, МПК<sup>(2006)</sup> G01S 13/00, опубл. 10.11.2010, бюл. №31. Многодиапазонный когерентный датчик сверхвысокочастотных и оптических сигналов (варианты) / М.Е. Белкин.

53. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Том. 1. - М.: Высшая школа, 1970.

54. Востриков Е.В., Литвинов Е.В. и др. Применение радиофотоники в волоконно-

оптических измерительных приборах. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 1. №1. С.1-23.

55. Мальский И.В., Сестрорецкий Б.В. СВЧ устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчет. М.: Сов. радио, 1969.

56. Self-Mixing Oscillators в монографии J.-F. Luy P. Russer (Eds.). Silicon-Based Millimeter-Wave Devices. Springer-Verlag, New York, 1994. 358 p.

57. Saavedra C.E., Jackson B.R., Ho S.S.K. Self-Oscillating Mixers: A Natural Fit for Active Antennas. IEEE Microwave Magazine. 2013. V. 14. No 6. P. 40-49.

58. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 2. Теоретические и экспериментальные исследования. Успехи современной радиоэлектроники. 2007. №7. С.3-33.

59. Патент РФ RU 2436141C1, МКИ<sup>(2006)</sup> G02F 1/03, опубл. 10.12.2011, бюл. 34. Оптоэлектронный генератор сигналов СВЧ-диапазона / М.Е. Белкин.

60. Патент США US 7061335B2, МКИ<sup>(2006)</sup> H03B 5/00, опубл. 13.06.2006. Processing of signals with regenerative opto-electronic circuits / Lutfollah Maleki.

61. Патент США US 8265488B, МКИ<sup>(2006)</sup> H04B 10/00, опубл. 11.09.2012. Electromagnetic transmission/reception system / Phillip Anthony Davies.

62. Патент Японии JP 2002162465A, МКИ<sup>7</sup> G01S 13/34, опубл. 07.06.2002. Radar device / Yoshiyuki Doi.

63. Патент Японии JP 4674361B2, МКИ<sup>(2006)</sup> H04B 10/04, опубл. 20.04.2011. Optoelectric oscillator / **雅之 井筒.**

64. Патент Японии JP 2011170253A, МКИ<sup>(2006)</sup> G02F 01/01, опубл. 01.09.2011. **光電気発振器** / Mitsunori Men.

65. Микитчук К.Б., Чиж А.Л. Оптоэлектронные методы генерации СВЧ-сигналов для систем радиолокации. 8-я МНК по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения: сб. науч. статей. Ч. 2. - Минск: Лаборатория интеллекта, 2019. С.54-57.

66. Белкин М.Е., Лопарев А. Оптоэлектронный генератор - первое практическое устройство СВЧ-оптоэлектроники. Электроника: Наука, Технология, Бизнес.2010. №6. С 62-70.

67. Pan S., Zhang Y. Microwave Photonic Radar (Invited Tutorial). Journal of Lightwave Technology. 2020. V. 38. No. 19. P. 5450-5484.

68. Ghelfi P., Laghezza F. et all. Photonics in Radar Systems: RF Integration for State-of-the-Art Functionality. IEEE Microwave Magazine. 2015. V. 16. No 8. P. 74-83.

69. Hasanuzzaman G. K. M., Iezekiel S., Kanno A. W-Band Optoelectronic Oscillator. IEEE Photonics Technology Letters. 2020. V. 32. No. 13, P. 771-774.

70. Yuchen Shao, Xiuyou Han, et. all. Microwave Downconversion by a Tunable Optoelectronic Oscillator Based on PS-FBG and Polarization-Multiplexed Dual Loop. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. V. 67. No. 5. P. 2095-2102.

71. Yuchen Shao, Xiuyou Han, et. all. Low-Power RF Signal Detection Using a High-Gain Tunable OEO Based on Equivalent Phase Modulation. Journal of Lightwave Technology. 2019. V. 37. No. 21. P. 5370-5379.

72. Xiuyou Han, Yuchen Shao, et. all. Low-Power RF Signal Detection with High Gain Using a Tunable Optoelectronic Oscillator. IEEE International Conference on Signal, Information and

Data Processing (ICSIDP). 2019. No. 19936296.

73. Урик Винсент Дж.-мл., МакКинни Джейсон Д., Вилльямс Кейт Дж. Основы микроволновой фотоники. М.: Техносфера, 2016. - 376 с.

74. William S.C. Chang. RF Photonic Technology in Optical Fiber Links. Cambridge University Press, 2002. 423 p.

75. Bortsov A.A., H'in Y.B., Smolskiy S.M. Laser Optoelectronic Oscillators. Springer Nature Switzerland AG, 2020. - 548 p.

76. Справочник по радиолокации. Под ред. М.И. Сколника. В 2 книгах. Книга 1. - 672 с. Книга 2. М.: Техносфера, 2014. - 680 с.

77. Белкин М.Е. Аналоговые волоконно-оптические системы с частотным разделением каналов на ВЧ и СВЧ поднесущих и сети на их основе. Диссертация на соискание ученой степени, д.т.н. М.: МИРЭА, 2007. 415 с.

78. Борцов А.А. Оптоэлектронный генератор радиочастотного диапазона с накачкой квантоворазмерным лазерным диодом. Дисс.на соискание ученой степени, д.т.н. М.: НИУ «МЭИ», 2014. 402 с.

79. Лопарев А.В. Оптоэлектронные и микроэлектронные принципы построения твердотельных генераторов сверхвысококачастотного диапазона. Диссертация на соискание ученой степени, к.т.н. М.: МИРЭА, 2011. 160 с.

80. Белкин Л.М. Микроэлектронные и оптоэлектронные принципы построения полупроводникового преобразователя частоты сверхвысококачастотного диапазона. Дисс. на соиск. ученой степени, к.т.н. М: МИРЭА, 2012. 178 с.

81. Mohammad A.W.M.. Integrated photonics for millimeter wave transmitters and receivers. PhD Thesis. London: University College London. Department of Electrical and Electronics Engineering. 2019. 152 p.

82. Vara-Maillet R. Precision Measurement Systems with Relevance to Frequency Metrology and Quantum Readout Techniques. PhD Thesis. The University of Western Australia. School of Physics. 2015. 289 p.

83. Патент США US3913106, МКИ<sup>2</sup> G01S 9/24, опубл. 14.10.1975. Radar detection apparatus for preventing vehicular collisions / Kazuo Sato.

84. Патент РФ RU2214614C2, МКИ<sup>2</sup> G01S 7/00, опубл. 20.10.2003. Приемопередающая система аэрологического радиозонда и ее конструкция / В.Э. Иванов.

85. Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающих элементов. / Под ред. Д.И. Воскресенского. - М.: Радио и связь, 1972, 320 с.

86. А.А. Белоусов, Ю.Н. Вольхин и др. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. Прикладная фотоника. 2014. №1. С.65-86.

87. Бирюков В.В., Букашова Е.С., Грачев В.А., и др. О применении методов радиофотоники при создании устройств для техники радиолокации и связи. Сб. материалов XXV Международной НТК «Информационные системы и технологии - 2019». Нижний Новгород, 2019 года. С.229-235.

88. Каталог компании Analog Devices: <https://www.analog.com/ru/parametric-search/10675#/> Дата обращения 11.05.2021.

89. Патент США US7920090B2, опубл. 05.04.2011. Radar system / Marc Jan Georges Tiebout.

90. Радиоприемные устройства / Под ред. А.П. Жуковского. М.: Высшая школа, 1989, 342 с.

91. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Радио и связь, 1986.

92. Шарапов А.В. Аналоговая схемотехника. - Томск: ТУ СУР, 2010. 193 с.
93. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. Л.: Энергия, 1972.
94. Андреев В.С. Влияние нелинейных свойств прибора с отрицательным сопротивлением на мощность генерируемых колебаний. Радиотехника. 1982. Т. 37. №8. С.43-44.
95. Кушнир В.Ф., Ферсман Б.А. Теория нелинейных электрических цепей. М.: Связь, 1974.
96. Гершензон Е.М., Туманов Б.Н. и др. Общие характеристики и особенности автодинного эффекта в автогенераторах. Радиотехника и электроника. 1982. Т.27.№1.С.104-112.
97. Кочемасов В., Белов Л., Майстренко А. Фиксированные линии задержки. СВЧ-электроника. 2017. №2. С.68-78.
98. Дворников А.А., Огурцов В.И., Уткин Г.М. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1983.
99. Белкин М.Е. Разработка модели оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона. Материалы VI Международной научно-технической конференции. М.: МИРЭА. 2008. С.289-297.
100. Fedderwitz S. et all. Ultra-broadband and low phase noise photonic millimeter-wave generation. International Topical Meeting on Microwave Photonics jointly held with the Asia-Pacific Microwave Photonics Conference. 2008. No. 10384675. P. 283-286.
101. et all. Optoelectronic oscillator: Electron-photon and photon-electron conversion device. 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP). 2018. No. 17737651. P. 1-2.
102. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский СМ. Экспериментальные исследования автодинных модулей на меза-планарных диодах Ганна КВЧ диапазона. Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2012. №2. С.17-36.
103. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский СМ. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 7. - Динамика формирования автодинных и модуляционных характеристик. Успехи современной радиоэлектроники. 2013. №6. С.3-52.
104. Белкин М.Е. Разработка модели оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона. Материалы 6 Международной НТК INTERMATIC-2008. М.: МИРЭА, 2008. С.289-297.
105. Khanna A.P.S. Microwave Oscillators: The State of the Technology. Microwave Journal. 2006. V. 49. No 4. P. 22-26.
106. Микитчук К.Б., Чиж А.Л., Малышев СА. Двухконтурный оптоэлектронный генератор СВЧ с низким уровнем дискретных составляющих в спектре генерации и сверхнизким фазовым шумом. Сборник статей VII Всероссийской конференции: «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 2018. Т. 1. С.296-301. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 728 с.
107. Fedderwitz S. et all. Ultra-broadband and low phase noise photonic millimeter-wave generation. International Topical Meeting on Microwave Photonics jointly held with the Asia-Pacific Microwave Photonics Conference. 2008. No. 10384675. P. 283-286.
108. Микитчук К.Б., Чиж А.Л. и др. Оптоэлектронный гетеродин X-диапазона со сверхнизким фазовым шумом. Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2019. Т. 1.№1.С.204-208.
109. Носков В.Я., Игнатков К.А. Шумовые характеристики автодинов со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором. Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. №9. С 905-918.

110. Белов Л., Хилькевич В. Генераторы с диэлектрическими резонаторами для стабилизации частоты. Электроника: Наука, Технологии, Бизнес.2006. №7. С.54-59.

111. Патент РФ RU2695799, 29.07.2019, МКИ G01S 13/42. Способ определения параметров движения объектов локации в радиолокационных датчиках с частотной манипуляцией непрерывного излучения радиоволн и устройство для его реализации / В.Я. Носков, К.А. Игнатков.

112. Jian Tang, Tengfei Hao, Wei Li et. all. An integrated optoelectronic oscillator. International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Beijing, China. 2017. No. 17415877. 4 p.

113. Seidel D., Savchenkov A., et. all. Minituarized Ka-band Photonic Oscillators. International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Toulouse, France. 2018. No. 18306345. 2 p.

114. Kai Wei, Afshin S. Daryoush. Self-Forced Silicon Photonic Integrated Optoelectronic Oscillators using High-Q Filtering Delay Lines. International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Matsue, Japan, 2020. No. 20287445. P.180-183.

115. Патент РФ RU2537450C1, опубл. 10.01.2015, Бюллетень №1. Способ изготовления заготовок для волоконных световодов на основе кварцевого стекла, легированного азотом / А.А. Борцов и др.

#### (57) Формула изобретения

1. Автодинный приемопередатчик для систем ближней радиолокации, содержащий последовательно соединенные малошумящий усилитель, полосно-пропускающий резонатор с возможностью изменения его собственной частоты и усилитель мощности, в цепь питания которого подключен датчик тока для выделения автодинного сигнала, отличающийся тем, что в него дополнительно введены делительно-развязывающее устройство (ДРУ) и линия задержки радиочастотных сигналов, причем выход усилителя мощности соединен с первым портом ДРУ, второй порт которого является радиочастотным входом-выходом автодинного приемопередатчика, предназначенным для подключения антенны, а третий порт подключен к входу линии задержки радиочастотных сигналов, выход которой подключен к входу малошумящего усилителя.

2. Автодинный приемопередатчик по п. 1, отличающийся тем, что ДРУ содержит трехплечий циркулятор, первое, второе и третье плечи которого соответственно подключены к первому, второму и третьему портам ДРУ.

3. Автодинный приемопередатчик по п. 1, отличающийся тем, что ДРУ содержит трехплечий циркулятор и трансформатор импедансов, причем первое и третье плечи циркулятора соответственно подключены к первому и третьему портам ДРУ, а второе плечо циркулятора связано через упомянутый трансформатор импедансов со вторым портом ДРУ.

4. Автодинный приемопередатчик по п. 1, отличающийся тем, что ДРУ содержит трехплечий циркулятор и направленный ответвитель, выполненный в виде двух связанных отрезков линии передачи, причем вход первичного отрезка линии передачи которого соединен с первым портом ДРУ, а выход первичного отрезка линии передачи направленного ответвителя соединен с первым плечом трехплечевого циркулятора, второе плечо которого соединено со вторым портом ДРУ, при этом третье плечо трехплечевого циркулятора подключено к входу вторичного отрезка линии передачи направленного ответвителя, а выход вторичного отрезка линии передачи направленного ответвителя соединен с третьим портом ДРУ.

5. Автодинный приемопередатчик по п. 1, отличающийся тем, что ДРУ содержит направленный ответвитель, выполненный в виде двух связанных отрезков линии передачи, и приемную антенну, при этом вход первичного отрезка линии передачи

направленного ответвителя соединен с первым портом ДРУ, а выход первичного отрезка линии передачи направленного ответвителя соединен со вторым портом ДРУ, вход вторичного отрезка линии передачи направленного ответвителя подключен к приемной антенне, а выход вторичного отрезка линии передачи направленного ответвителя соединен с третьим портом ДРУ.

6. Автодинный приемопередатчик по пп. 1-5, отличающийся тем, что в него дополнительно введен амплитудный детектор, который своим входом связан с полосно-пропускающим резонатором, а выходом - с сигнальным выходом устройства.

7. Автодинный приемопередатчик по пп. 1-5, отличающийся тем, что линия задержки радиочастотного сигнала выполнена в виде линии передачи с распределенными параметрами, например волноводной, коаксиальной, полосковой, щелевой.

8. Автодинный приемопередатчик по пп. 1-5, отличающийся тем, что линия задержки радиочастотного сигнала выполнена в виде линии передачи на элементах с сосредоточенными параметрами.

9. Автодинный приемопередатчик по пп. 1-5, отличающийся тем, что линия задержки радиочастотного сигнала выполнена в виде линии передачи с преобразованием электрических сигналов в сигналы оптического излучения и обратно.

20

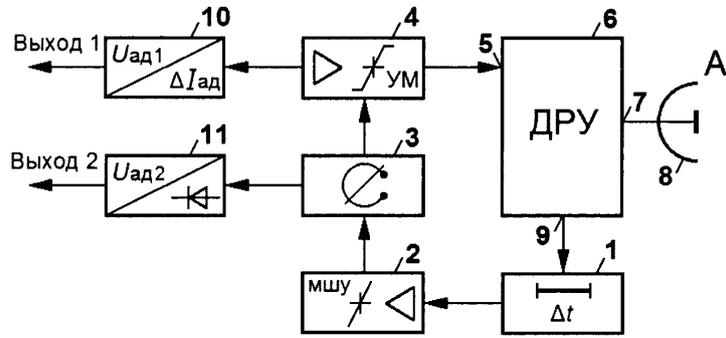
25

30

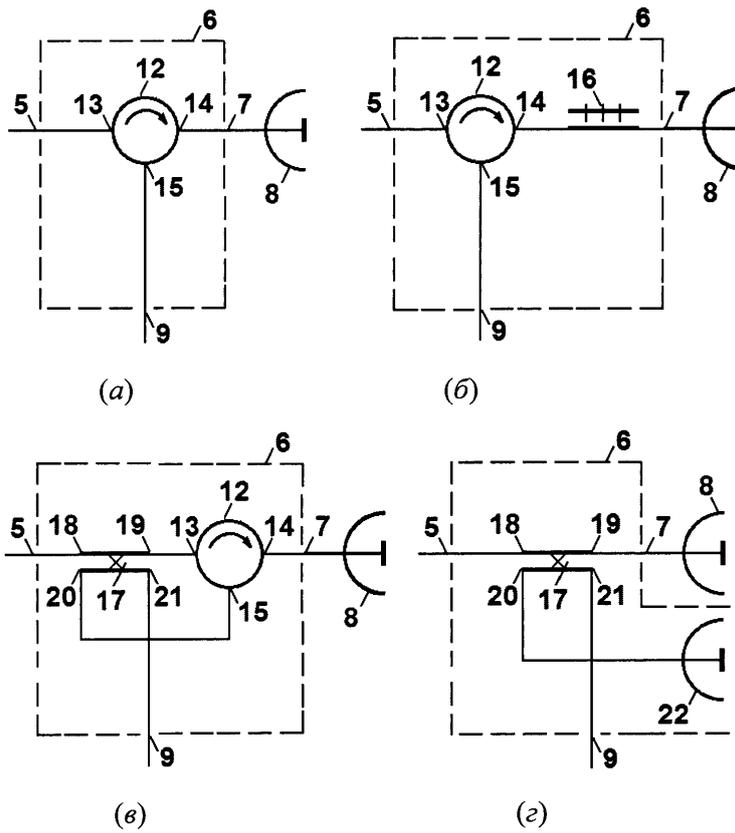
35

40

45



Фиг. 1



Фиг. 2