

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2022.6.3.003

УДК 621.373.121; 621.396.962.2

Принцип действия автодинного оптоэлектронного приемопередатчика для систем ближней радиолокации

В. Я. Носков¹ ✉, Е. В. Богатырев², Р. Г. Галеев³,
К. А. Игнатков¹, К. Д. Шайдуров¹

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, Мира, 19

² Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

³ Сибирский университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева, Россия, 660037, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

✉ v.y.noskov@urfu.ru

Аннотация

Представлено описание устройства и принципа действия нового типа автодинного приемопередатчика для систем ближней радиолокации (СБРЛ), выполненного на основе оптоэлектронного генератора (ОЭГ). Подключение антенны к ОЭГ осуществляется через делительно-развязывающее устройство (ДРУ), обеспечивающее, с одной стороны, условия генерации автоколебаний в системе и с другой – передачу и прием радиосигналов с минимальными потерями. Рассмотрены варианты выполнения ДРУ и методика расчета их параметров. Разработана математическая модель автодинной системы на основе ОЭГ, получены основные соотношения для определения ее параметров и характеристик. Показано, что применение ОЭГ обеспечивает значительное увеличение эквивалентной добротности колебательной системы генератора и снижение его собственных шумов. Улучшение данных параметров автодинных СБРЛ позволит значительно увеличить дальность действия, расширить диапазон рабочих частот и область их применения. Отмечены перспективы применения автодинов на основе ОЭГ в создании систем обнаружения объектов с малой эффективной площадью рассеяния, таких как беспилотных летающих аппаратов, для защиты от которых применение обычных (дальних) радаров малоэффективно.

Ключевые слова

автодин, автодинный сигнал, автодинный отклик, девиация частоты, система ближней радиолокации, оптоэлектронный генератор, оптоэлектронный приемопередатчик

Для цитирования

Носков В. Я., Богатырев Е. В., Галеев Р. Г., Игнатков К. А., Шайдуров К. Д. Принцип действия автодинного оптоэлектронного приемопередатчика для систем ближней радиолокации. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(3):269–295. DOI: 10.15826/urej.2022.6.3.003.

© Носков В. Я., Богатырев Е. В., Галеев Р. Г., Игнатков К. А., Шайдуров К. Д., 2022

The principle of operation of an autodyne optoelectronic transceiver of short-range radar systems

V. Ya. Noskov¹ ✉, E. V. Bogatyrev², R. G. Galeev³,
K. A. Ignatkov¹, K. D. Shaidurov¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia
B. N. Yeltsin, 19 Mira Srt., Ekaterinburg, 620002, Russia

² Siberian Federal University, 79, Svobodny Pr., Krasnoyarsk,
660041, Russia

³ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31,
im. gazeti «Krasnoyarskii rabochii» Pr. Krasnoyarsk, 660037, Russia

✉ v.y.noskov@urfu.ru

Abstract

The description of the device and the principle of operation of a new type of autodyne transceiver of short-range radar systems (SRRS), made on the basis of an optoelectronic oscillator (OEO), is presented. The antenna is connected to the OEO through a dividing-decoupling device (DDD), which provides, on the one hand, conditions for generating self-oscillations in the system and, on the other hand, transmitting and receiving radio signals with minimal losses. The scheme of the DDD and the method of calculating their parameters are considered. A mathematical model of the autodyne system based on the OEO has been developed, and the basic relations for determining its parameters and characteristics have been obtained. It is demonstrated that the use of OEO provides a significant increase in the equivalent Q-factor of the oscillator system and the reduction in its own noise. The improvement of these parameters of the autodyne SRRS will significantly increase the range of operation, expand the range of operating frequencies and the scope of their application. The prospects of using autodynes based on OEO in the creation of detection systems of objects with a small effective scattering area, such as unmanned aerial vehicles, for protection against which the use of conventional (distant) radars is ineffective, are noted.

Keywords

autodyne, autodyne signal, autodyne response, frequency deviation, short-range radar system, optoelectronic oscillator, optoelectronic transceiver

For citation

Noskov V. Ya., Bogatyrev E. V., Galeev R. G., Ignatkov K. A., Shaidurov K. D. The principle of operation of an autodyne optoelectronic transceiver of short-range radar systems. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(3):269–295. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2022.6.3.003.

1. Введение

Автодинные генераторы (просто, автодины) 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 элементов развязки. Указанные достоинства автодинов оказались востребованными во многих областях науки и техники, одно из них – ближняя радиолокация [1].

Принцип 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, определяющего условия генерирования автоколебаний в резонансной системе автодина. Регистрация этих изменений в виде автодинного сигнала и его обработка обеспечивают получение информации об объекте локации и параметрах его движения [2]. Наличие усиления принятого сигнала за счет внутренних свойств автодинного генератора – одно из его дополнительных достоинств по отношению к гомодинным системам.

Первоначально автодинные приемопередатчики для систем ближней радиолокации (СБРЛ) выполнялись на основе электронных ламп, клистронов, магнетронов и других электровакуумных приборов [3]. С появлением в 70-е годы прошлого столетия полупроводниковых приборов в автодинах стали широко использоваться туннельные диоды и диоды Ганна, лавинно-пролетные и инжекционно-пролетные диоды, а также биполярные и полевые транзисторы [4]. Одновременно стали активно осваиваться диапазоны крайне высоких (КВЧ) и гипервысоких (ГВЧ) частот. Однако в ходе развития этого направления уже в период 80–90-х годов были выявлены принципиальные ограничения автодинов, создавшие серьезную проблему на пути продвижения их вверх по частоте [5; 6]. Суть этой проблемы, кстати, не решенной до настоящего времени, связана с особенностями формирования автодинных сигналов и состоит в следующем.

Как показали многочисленные исследования [7], наличие автодинных изменений частоты колебаний автогенератора при воздействии на него отраженного излучения вызывает неравномерность изменения набега фазы формируемого сигнала, которая является причиной ангармонических искажений автодинных сигналов, создающих проблемы при их обработке [8]. При этом указанные искажения свойственны как обычным автоди-

нам с немодулированным излучением, так и автодинам с различными видами модуляции [9; 10]. Искажения сигналов существенно сужают динамический диапазон устройства [11], а также являются причиной появления периодической нестационарности шумовых характеристик [12]. 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 указанные явления проявляются в наибольшей степени.

Для устранения причин искажения сигналов были опробованы различные методы: стабилизация частоты генерации с помощью дополнительного высокодобротного резонатора [13], использование стабилизированного бигармонического генератора в качестве автодина [14], применение автодинного генератора с взаимной [15] или внешней синхронизацией колебаний [16].

Однако первые два метода полностью не устраняют причину, а лишь уменьшают величину автодинной девиации частоты. Лучшее достижение – уменьшение автодинной девиации почти на порядок [13]. 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 [17]. Кроме того, тенденция к снижению собственной добротности стабилизирующих резонаторов с переходом в диапазоны более высоких частот является обратной решению обсуждаемой здесь проблемы автодинов. Последние два метода также не решают проблему радикально, имеют ограничение сверху. Они применимы при условии, когда уровень отраженного от объекта локации излучения не превышает уровень вводимого в автодинный генератор синхронизирующего воздействия [18].

Таким образом, основная проблема автодинов, используемых в СБРЛ, состоит в необходимости поиска решений, которые позволят радикально уменьшить или даже полностью исключить автодинную девиацию частоты колебаний генератора при его взаимодействии с отраженным излучением. На пути решения этой проблемы, по нашему мнению, находятся исследования новых схемных решений, а также новых типов СВЧ-генераторов.

Настоящая статья посвящена описанию принципа действия предложенного нами [19] нового типа автодина, выполненного на основе сравнительно недавно появившихся оптоэлектронных генераторов (ОЭГ). Дело в том, что ОЭГ, судя по публикациям [20–22], обладают на сегодня уникальными шумовыми характеристиками и стабильностью частоты. Поэтому исследование такого типа автодинов и определение его возможностей в плане улучшения параметров и характеристик СБРЛ, а также расширения области применения автодинов в перспективных системах КВЧ- и ГВЧ-диапазонов нам представляются актуальными.

2. Реализация и принцип действия автодинов на базе оптоэлектронных генераторов

Рассмотрим приведенную на рис. 1 [19] структурную схему автодинной системы, выполненной на основе классической схемы оптоэлектронного генератора (ОЭГ) [20–22]. Как видно на рисунке, автодинная система включает в себя оптическую, электронную и радиоволновую части. В состав оптической части входит полупроводниковый лазер, интерференционный модулятор интенсивности излучения Маха – Цендера (ММЦ), волоконно-оптическая линия (ВОЛ) задержки радиосигналов и фотодиодный детектор (ФДД). В состав электронной части входят малошумящий усилитель (МШУ), узкополосный полосно-пропускающий фильтр (ППФ), усилитель мощности (УМ) и делительно-развязывающее устройство (ДРУ), а также устройства регистрации (УР) автодинного сигнала по изменению тока в цепи питания усилителя мощности и по изменению амплитуды колебаний посредством амплитудного детектора (АД), подключенного к выходу МШУ. При этом автодинный сигнал с выхода амплитудного детектора можно использовать для дальнейшей обработки подключившись к клемме «Выход 2», а сигнал в цепи питания УМ – к клемме «Выход 1». Радиоволновая часть автодинной системы представлена пространством между антенной и объектом локации, в котором посредством электромагнитного излучения происходит взаимодействие генератора и объекта локации.

Делительно-развязывающее устройство ДРУ в простейшем варианте исполнения может быть выполнено, например, на основе циркулятора, как показано на рис. 2а. Более сложные варианты исполнения ДРУ используют циркулятор совместно со штыревым (см. рис. 2б) трансформатором импедансов (ТИ) [23], с направленным ответвителем (см. рис. 2в), с комбинацией направленного ответвителя (см. рис. 2г) и двух антенн [24]. Выбор варианта исполнения ДРУ и его параметров будут рассмотрены ниже после описания принципа действия устройства.

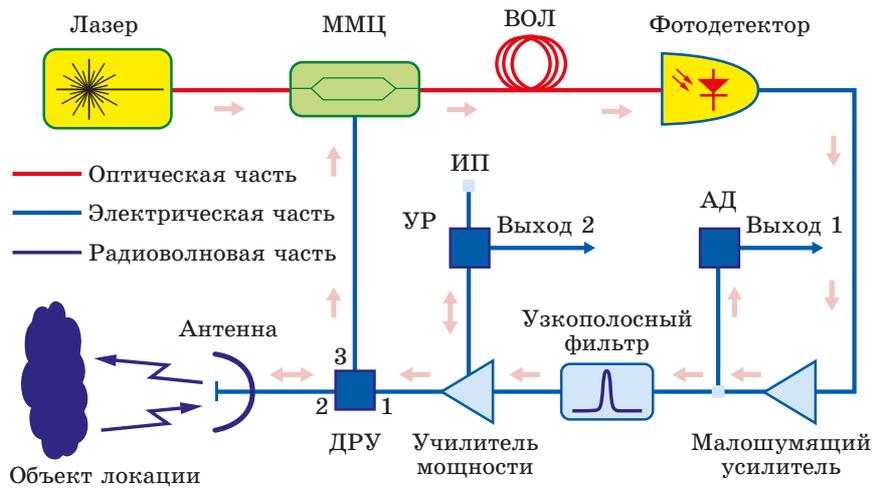


Рис. 1. Структурная схема автодинной системы, выполненной на основе оптоэлектронного генератора: ММЦ – модулятор Маха – Цендера; ВОЛ – волоконно-оптическая линия; УР – устройство регистрации; ИП – источник питания; АД – амплитудный детектор; ДРУ – делительно-развязывающее устройство

Fig. 1. Block diagram of an autodyne system based on an optoelectronic generator: MZM – Mach-Zander modulator; FOL – fiber-optic line; RD – registration device; PS – power source; AD – amplitude detector; SDD – separating-decoupling device

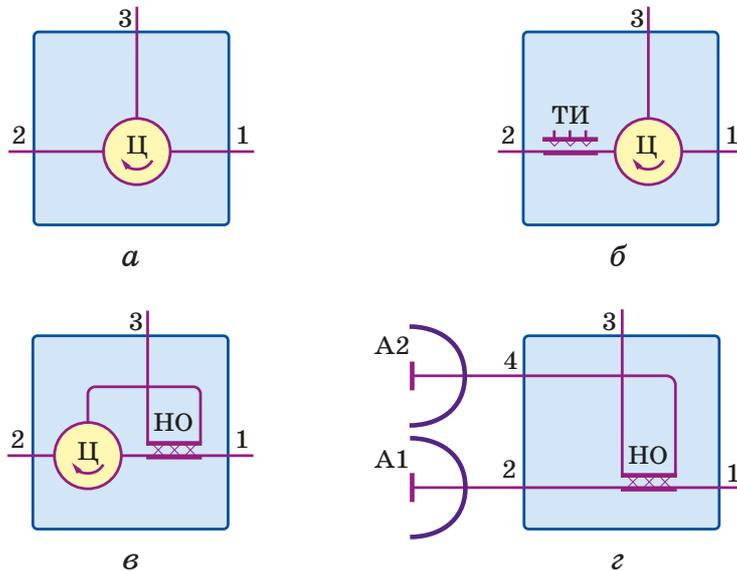


Рис. 2. Варианты выполнения делительно-развязывающего устройства: *a* – на основе циркулятора; *б* – циркулятора совместно со штыревым трансформатором импедансов; *в* – циркулятора совместно с направленным ответвителем *г* – циркулятора совместно с комбинацией направленного ответвителя и двух антенн

Fig. 2. Variants of the dividing-decoupling device: based on a circulator (*a*); a circulator together with a pin impedance transformer (*b*); a circulator together with a directional coupler (*c*); a circulator together with a combination of a directional coupler and two antennas (*d*)

V. Ya. Noskov et al. | The principle of operation of an autodyne optoelectronic transceiver of short-range radar systems

Модулятор Маха – Цендера предназначен для осуществления амплитудной модуляции поступающего от лазерного модуля излучения. Он выполнен на кристалле ниобата лития (LiNbO_3) в виде двуплечего Y-разветвителя с одинаковыми коэффициентами пропускания в плечах. Изменение набега фазы оптического излучения в одном из плеч разветвления путем подачи управляющего напряжения $u_{\text{упр}}$ смещения на кристалле вызывает изменение коэффициента $K_{\text{ММЦ}}$ передачи ММЦ по мощности [25]:

$$K_{\text{ММЦ}}(u_{\text{упр}}) = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi u_{\text{упр}}}{u_{\pi}} + \Phi_{\text{н}} \right) \right], \quad (1)$$

где $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$ – входная и выходная мощности излучения ММЦ соответственно; u_{π} – напряжение, при котором набег фазы волны, распространяющейся по второму плечу интерферометра, равен π ; $\Phi_{\text{н}}$ – начальная фаза характеристики.

Пример зависимости (1) коэффициента $K_{\text{ММЦ}}$ передачи от управляющего напряжения приведен на рис. 3. Как видно на этом рисунке, коэффициент передачи рассматриваемого ММЦ является периодической функцией управляющего напряжения. Рабочий режим модулятора в середине ската характеристики достигается путем подачи постоянного напряжения смещения $U_0 = (u_{\pi} - u_{\text{max}}) / 2$ на управляющий вход модулятора, где u_{max} – напряжение, которое соответствует максимальному значению коэффициента передачи. В окрестности этой рабочей точки для сравнительно малых амплитуд модулирующего напряжения модуляционную характеристику ММЦ далее будем считать линейной.

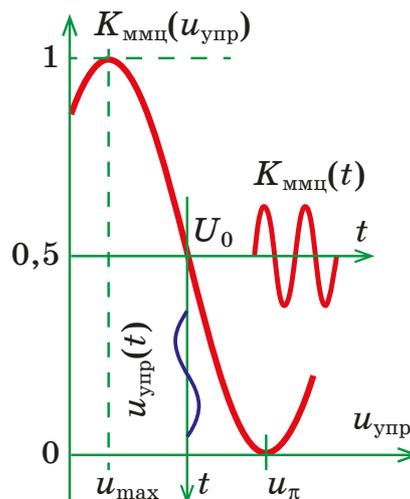


Рис. 3. Модуляционная характеристика $K_{\text{ММЦ}}(u_{\text{упр}})$ модулятора Маха – Цендера (ММЦ) и пояснения принципа его действия [25]

Fig. 3. Modulation characteristics $K_{\text{ММЦ}}(u_{\text{упр}})$ of the Mach-Zehnder modulator (MZM) and explanations of the principle of its operation [25]

Устройство регистрации УР (см. рис. 1), предназначенное для выделения автодинного сигнала в цепи питания усилителя мощности, имеет различные технические решения. Оно может быть выполнено, например, в виде датчика тока или резистора [26–28], включенных между источником питания (ИП) и выводом микросхемы УМ для подачи напряжения смещения. Это устройство может быть выполнено также в виде электронной схемы с применением транзисторов и интегральных операционных усилителей, преобразующей автодинные изменения тока в напряжение полезного сигнала [26].

По своей сути замкнутая цепь с выхода ММЦ до его входа управления, включающая в себя волоконно-оптическую линию, фотодетектор, МШУ, узкополосный фильтр, усилитель мощности и ДРУ, представляет собой кольцевую схему автогенератора с запаздывающей обратной связью, выполненной на основе оптической линии задержки радиочастотных сигналов. Этот автогенератор в совокупности со средствами регистрации (см. блоки УР и АД) автодинного отклика представляет собой автодинный приемопередатчик для СБРЛ. Условия генерации автоколебаний на требуемой частоте в этой системе определяются узкополосным полосно-пропускающим фильтром, выполненным, например, в виде высокодобротного резонатора. При условии, что модуль контурного коэффициента передачи этого кольца в режиме малых колебаний больше единицы, в рассматриваемой системе неизбежно возникают нарастающие по амплитуде автоколебания.

Процесс самовозбуждения ОЭГ вызван наличием флуктуаций в элементах его схемы, например, флуктуаций интенсивности излучения лазера, дробовый шум на выходе фотодиода, тепловые шумы в иных электронных элементах. Присутствующие в цепи кольцевого генератора тепловые шумы усиливаются и сдвигаются по фазе таким образом, что в полосе пропускания резонатора возникают автоколебания на множестве частот, которые по оси частот располагаются эквидистантно. Интервал между соседними частотами колебаний обратно пропорционален времени запаздывания радиосигнала в линии задержки [29]. 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 (УМ) в режиме большого сигнала. После достижения этого уровня соотношение между амплитудами колебаний на разных частотах изменяется в пользу колебания на частоте, близкой к центральной частоте ω_p полосно-пропускающего резонатора. В итоге колебания на прочих

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

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

$$u_{\text{вых}}(t) = A_0 \cos \Psi(t) = A_0 \cos(\omega_0 t), \quad (2)$$

где A_0 , $\Psi(t)$ – амплитуда и полная фаза колебания в текущий момент времени t ; начальной фазой в (2) пренебрегаем.

Основная мощность с выхода усилителя мощности в виде колебаний (2), проходя по пути с малыми потерями: первый порт – второй порт ДРУ, излучается через антенну в пространство в виде электромагнитного излучения. Остальная часть выходной мощности усилителя мощности, проходя по пути: первый порт – третий порт ДРУ, поступает на вход управления модулятора Маха – Цендера в виде колебания «обратной связи»:

$$u_{\text{ос}}(t) = A_{\text{ос}} \cos(\omega_p t + \varphi_{\text{дру}}), \quad (3)$$

где $A_{\text{ос}} = A_0 K_{\text{дру}}$ – амплитуда колебаний обратной связи; $K_{\text{дру}}$, $\varphi_{\text{дру}}$ – модуль и фаза коэффициента передачи от первого порта к третьему порту ДРУ.

Далее модулированное СВЧ-колебаниями оптическое излучение лазера проходит ВОЛ и поступает на вход ФДД, в котором происходит его демодуляция в виде задержанных СВЧ-колебаний. Эти СВЧ-колебания далее усиливаются с помощью МШУ. После этого высокочастотный ППФ выделяет колебания на его собственной частоте, подавляя при этом СВЧ-колебания на других частотах. Выделенные ППФ-колебания далее после усиления в УМ поступают на ДРУ. Часть прошедшей через ДРУ мощности поступает в антенну, а другая часть – на управляющий вход ММЦ, замыкая тем самым цепь положительной обратной связи.

В случае, когда в поле излучения антенны объект локации отсутствует, автодинный приемопередатчик функционирует в автономном режиме, т. е. при отсутствии воздействия на него отраженного радиосигнала. Для этого режима, используя квазилинейный метод анализа автоколебательных систем, запишем условие стационарных колебаний генератора в комплексной форме:

$$K_{\text{лч}}(\omega_p)K_{\text{ум}}(A)e^{j(\varphi_{\text{лч}} + \varphi_{\text{ум}})} = 1, \quad (4)$$

где $K_{\text{лч}}(\omega_p) = K_{\text{дру}}K_{\text{лз}}K_{\text{мшУ}}K_p(\omega_p)$ – модуль коэффициента передачи линейной части кольцевого генератора; $\varphi_{\text{лч}} = \varphi_{\text{дру}} + \varphi_{\text{лз}} + \varphi_{\text{мшУ}} + \varphi_p(\omega_p)$ – фаза коэффициента передачи линейной части кольцевого генератора; $K_{\text{лз}} = K_{\text{ммц}}K_{\text{фдд}}$ и $\varphi_{\text{лз}} = \omega T_{\text{лз}}$ – модуль и фаза коэффициента передачи линии задержки радиочастотного сигнала; $T_{\text{лз}}$ – время запаздывания радиочастотного сигнала в линии задержки; $K_{\text{мшУ}}$, $\varphi_{\text{мшУ}} = -\pi$ – модуль и фаза коэффициента передачи малошумящего усилителя; $K_{\text{фдд}}$ – коэффициент передачи фотодетектора; $K_p(\omega_p) = K_p \cos(\omega_p)$ и $\varphi_p = \arctg T_p(\omega - \omega_p) \approx T_p(\omega - \omega_p)$ – модуль и фаза коэффициента передачи полосно-пропускающего резонатора; $T_p = 2Q_p/\omega_p$ и Q_p – постоянная времени и собственная добротность полосно-пропускающего резонатора; $K_{\text{ум}}(A) = K_{\text{ум}}^{(0)}k_a(A)$ и $\varphi_{\text{ум}} = -\pi$ – средние за период колебаний модуль и фаза коэффициента передачи усилителя мощности; $K_{\text{ум}}^{(0)}$ – коэффициент передачи усилителя мощности в режиме слабого сигнала; $k_a(A) = 1 - (A/A_{\text{max}})^n$ – аппроксимирующая функция нормированного коэффициента передачи усилителя мощности [30]; A_{max} – амплитуда колебаний на выходе усилителя мощности, при которой коэффициент передачи $K_{\text{ум}}(A)$ становится равным единице; n – показатель «мягкости» характеристики усиления, определяющий ее вид в зависимости от выбора режима усилителя мощности. При этом отметим, что значение показателя n подбирается под выбранный тип усилителя мощности. С увеличением n характеристика усиления приближается к виду более «жесткого» ограничителя амплитуды.

Уравнение (4) имеет место, если одновременно выполняются два условия, которые в теории автогенераторов соответственно называются балансом амплитуд и балансом фаз:

$$K_{\text{лч}}(\omega_p)K_{\text{ум}}(A_0) = 1, \quad (5)$$

$$\varphi_{\Sigma} = \varphi_{\text{дру}} + \varphi_{\text{лз}} + \varphi_{\text{мшУ}} + \varphi_p + \varphi_{\text{ум}} = 2\pi k, \quad (6)$$

где k – целое положительное число.

В выражении (6) 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 φ_{Σ} можно учесть при наладке автодинного приемопередатчика и свести его к целому числу 2π . Поэтому эти составляющие в дальнейшем не рассматриваем и из (5), (6) с учетом приведенных выше к (4) расшифровок получим:

$$K_{\text{лч}}K_{\text{ум}}^{(0)}[1 - (A_0/A_{\text{max}})^n]\cos[T_p(\omega_0 - \omega_p)] = 1, \quad (7)$$

$$(T_{\text{лз}} + T_p)\omega_0 - T_p\omega_p = 2\pi k. \quad (8)$$

Частота стационарных колебаний ω_0 , как отмечалось выше, близка к собственной частоте ω_p полосо-пропускающего резонатора и может быть рассчитана из (8):

$$\omega_0 = \frac{2\pi k}{T_{лз}} - \frac{T_p \Delta\omega}{T_{лз}}, \quad (9)$$

где $k = \omega_0 T_{лз} / 2\pi$ – значение целого числа; $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_p$ – величина расстройки собственной частоты ω_p резонатора и частоты ω_0 стационарных колебаний.

Вследствие близости частот ω_0 и ω_p в (7) можем положить косинус равным единице. Тогда из этого выражения получим простую формулу для расчета амплитуды стационарных колебаний A_0 , которая определяется величиной показателя n «мягкости» амплитудной характеристики усилителя мощности:

$$A_0 = A_{\max} \sqrt[n]{1 - (1 / K_{лч} K_{ум}^{(0)})}. \quad (10)$$

При наличии в поле излучения антенны объекта локации принятый антенной радиосигнал поступает на второй порт ДРУ, затем передается с малыми потерями на третий порт ДРУ и поступает на управляющий вход ММЦ в виде:

$$u_{отр}(t) = A_{отр} \cos \Psi_{отр}(t, \tau) = A_{отр} \cos[\omega_0 t - \delta(t, \tau)], \quad (11)$$

где $A_{отр}$, $\Psi_{отр}(t, \tau) = \omega_0 t - \delta(t, \tau)$ – 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 колебания (3) и (11) образуют суперпозицию вида: $u_{\Sigma}(t) = u_{вх}(t) + u_{отр}(t)$. При этом без учета фазы $\varphi_{дру}$ выражение для результирующего колебания $u_{\Sigma}(t)$ имеет вид: $u_{\Sigma}(t) = A_{oc} \cos(\omega_0 t) + A_{отр} \cos[\omega_0 t - \delta(t, \tau)] = A_{\Sigma}(t) \cos[\omega_0 t - \Theta_{\Sigma}(t)]$, (12) где $A_{\Sigma}(t)$ и $\Theta_{\Sigma}(t)$ – медленно меняющиеся амплитуда и фаза результирующего колебания на входе линии задержки:

$$A_{\Sigma}(t) = A_{oc} \sqrt{1 + 2\Gamma \cos \delta(t, \tau) + \Gamma^2} \approx A_{oc} [1 + \Gamma \cos \delta(t, \tau)], \quad (13)$$

$$\Theta_{\Sigma}(t) = \arctg \frac{\Gamma \sin \delta(t, \tau)}{1 + \Gamma \cos \delta(t, \tau)} \approx \Gamma \sin \delta(t, \tau), \quad (14)$$

где $\Gamma = A_{отр} / A_{oc}$ – 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 (11) на генератор вызывает в нем автодинный эффект [5]. Этот эффект проявляется в автодинных изменениях амплитуды $\Delta A = A - A_0$ и частоты $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ колебаний в окрестности стационарного режима (7)–(10). Для нахождения указанных изменений перепишем уравнения (5) и (6) с учетом прилагаемых к ним расшифровок и воздействия на генератор отраженного радиосигнала (12)–(14) в виде:

$$K(A, \omega) = K_{\text{лч}} K_{\text{ум}}^{(0)} \left[1 - \left(\frac{A}{A_{\text{max}}} \right)^n \right] \cos[T_p(\omega - \omega_p)] = \\ = 1 + \Gamma \frac{1}{K_{\text{дру}}} \cos\delta(t, \tau). \quad (15)$$

$$\varphi_{\Sigma}(\omega) = (T_{\text{лз}} + T_p)\omega - T_p\omega_p = 2\pi k + \Gamma \frac{1}{K_{\text{дру}}} \sin\delta(t, \tau). \quad (16)$$

Множитель $1/K_{\text{дру}}$ в правой части (15) и (16) учитывает поступление отраженного радиосигнала на управляющий вход оптической линии задержки.

Аналитическое решение нелинейных уравнений (15) и (16) 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:

$$a = -\Gamma(1/K_{\text{дру}})K_a \cos[\delta(t, \tau) + \psi], \quad (17)$$

$$\chi = \Gamma(1/K_{\text{дру}})L_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (18)$$

где K_a, L_a – коэффициенты автодинного усиления и девиации частоты:

$$K_a = \frac{\sqrt{1+\rho^2}}{\alpha(1-\gamma\rho)}, \quad L_a = \frac{\sqrt{1+\gamma^2}}{\xi(1-\gamma\rho)}, \quad (19)$$

где ρ, γ – безразмерные коэффициенты неизодромотности и неизохронности генератора соответственно, характеризующие зависимость параметров генератора от изменений частоты и амплитуды соответственно [11]:

$$\rho = \frac{\varepsilon}{\xi} = \frac{T_p\omega_0 \operatorname{tg}[T_p(\omega_0 - \omega_p)]}{T_{\text{лз}} + T_p} \approx 0, \quad \gamma = \frac{\beta}{\alpha} = 0, \quad (20)$$

где ψ, θ – углы фазового смещения автодинных изменений амплитуды и частоты генератора соответственно:

$$\psi = \operatorname{arctg}(\rho) \approx 0, \quad \theta = \operatorname{arctg}(\gamma) = 0, \quad (21)$$

где α , ε , β , ξ – 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 генерации соответственно:

$$\alpha = \frac{\partial K(A, \omega)}{\partial A} = K_{\text{лч}} K_{\text{ум}}^{(0)} \left(\frac{A_0}{A_{\text{max}}} \right)^n, \quad (22)$$

$$\varepsilon = \frac{\partial K(A, \omega)}{\partial \omega} = T_p \omega_0 \operatorname{tg}[T_p (\omega_0 - \omega_p)], \quad (23)$$

$$\beta = \frac{\partial \varphi_{\Sigma}(\omega)}{\partial A} = 0, \quad (24)$$

$$\xi = \frac{\partial \varphi_{\Sigma}(\omega)}{\partial \omega} = T_{\text{лз}} + T_p = \frac{2Q_{\text{экв}}}{\omega_0}, \quad (25)$$

где $Q_{\text{экв}} = Q_{\text{лз}} + Q_p$ – 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.

Анализ выражения (17) с учетом (22)–(25) и (19)–(21) показал, что из-за ограничения амплитуды колебаний усилителем мощности коэффициент передачи автодинного сигнала на выходе этого усилителя весьма мал. Поэтому регистрация сигнала по изменению амплитуды колебаний более предпочтительна на выходе МШУ посредством линейного амплитудного детектора АД (см. на рис. 1). Выражение для сигнала $a_{\text{вых1}}(t)$ на выходе амплитудного детектора в точке «Выход 1» имеет вид:

$$a_{\text{вых1}}(t) = -\Gamma \frac{K_{\text{лч}} K_{\text{ад}}}{K_{\text{дру}} \alpha} \cos \delta(t, \tau), \quad (26)$$

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

Известно, что при работе усилителей в нелинейном режиме их постоянная составляющая тока в цепи питания зависит от амплитуды усиливаемого колебания [29]. Поэтому выделение автодинных изменений этого тока в цепи питания усилителя мощности посредством устройства регистрации УР (см. рис. 1) обеспечивает получение сигнала $a_{\text{вых2}}(t)$ для точки «Выход 2» в виде:

$$a_{\text{вых2}}(t) = -\Gamma \frac{K_{\text{лч}} K_{\text{пр}}}{K_{\text{дру}} \alpha} \cos \delta(t, \tau), \quad (27)$$

где $K_{\text{пр}}$ – коэффициент преобразования изменений амплитуды колебаний в изменения тока питания с последующей их транс-

формацией в напряжение выходного сигнала, зависящий от конкретного типа УМ.

Выражение для частоты ω колебаний генератора, полученное из (18) с учетом (22)–(25) и (19)–(21), имеет вид:

$$\omega = \omega_0 + \frac{\Gamma\omega_0}{2K_{\text{дру}}Q_{\text{экв}}} \sin\delta(t, \tau) = \omega_0 + \Delta\omega_m \sin\delta(t, \tau), \quad (28)$$

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 $\delta(t, \tau) = \omega\tau$ [11]. Поэтому с учетом (28) получим:

$$\delta(t, \tau) = \omega\tau = \omega_0\tau + C_{\text{ос}} \sin\delta(t, \tau), \quad (29)$$

где $C_{\text{ос}} = \Delta\omega_m\tau$ – параметр обратной связи автодинной системы генератор – объект локации, определяющий степень ангармонических искажений сигналов [11].

Из анализа выражений (25), (18), (28) и (29) следует, что в предложенном нами автодинном приемопередатчике эквивалентная добротность $Q_{\text{экв}}$ колебательной системы генератора может быть реализована значительно большего значения, чем в обычных автодинных приемопередатчиках. Это достигается соответствующим выбором длины волоконно-оптической линии задержки с увеличенным временем запаздывания $T_{\text{лз}}$ радиосигнала:

$$Q_{\text{экв}} = \frac{\omega_0 T_p}{2} \left(1 + \frac{T_{\text{лз}}}{T_p} \right) = Q_p \left(1 + \frac{Q_{\text{лз}}}{Q_p} \right). \quad (30)$$

При этом важным фактором, влияющим на добротность $Q_{\text{лз}}$ линии задержки, являются ее потери. Здесь в соответствие с общим определением [31] добротность $Q_{\text{лз}}$ линии задержки равна отношению реактивной энергии $W_{\text{нак}}$, накопленной в колебательной системе, к энергии $W_{\text{расТ}}$, рассеянной за период колебаний $T = 1/f_0$:

$$Q_{\text{лз}} = 2\pi \frac{W_{\text{нак}}}{W_{\text{расТ}}} = 2\pi f_0 \frac{P_{\text{под}} T_{\text{лз}}}{P_{\text{рас}}}, \quad (31)$$

где $P_{\text{под}}$, $P_{\text{рас}}$ – подводимая и рассеиваемая мощности.

Волоконно-оптические линии задержки радиосигналов в настоящее время обладают наименьшими потерями. Например, для ВОЛ из кварца потери при длине волны $\lambda = 1,3$ мкм составляют 0,35 дБ/км. Частотный диапазон для комплектующих ВОЛ к настоящему времени превысил 100 ГГц. Значения добротности $Q_{\text{лз}}$ ВОЛ, рассчитанные согласно (31), имеют порядок $Q_{\text{экв}} = (0,1...10) \times 10^9$ [32–35].

Реализуемая величина добротности при использовании в предлагаемом устройстве ВОЛ примерно на пять-шесть порядков выше эквивалентной добротности $Q_{\text{экв}} = 2000$, 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 [36]. Значительное увеличение эквивалентной добротности колебательной системы, как видно из (31), во столько же раз уменьшает величину автодинной девиации частоты $\Delta\omega_m$ и параметра обратной связи $C_{\text{ос}}$, делая их ничтожно малыми. При этом набег фазы $\delta(t, \tau)$, как следует из (29), становится линейной функцией времени запаздывания τ отраженного излучения: $\delta(t, \tau) = \omega_0 \tau$ [37]. При условии равномерного и прямолинейного движения объекта локации во времени t набег фазы

$$\delta(t, \tau) = \omega_0 \tau(t) = \delta(t) = \Omega_d t + \delta_0, \quad (32)$$

где δ_0 – начальный фазовый сдвиг, который определяется положением объекта в момент времени $t = 0$; $\Omega_d = 2(V_p/c)\omega_0$ – частота Доплера; V_p – относительная радиальная скорость между СБРЛ и объектом локации.

Выражения (26) и (27) для мгновенных значений выходных сигналов $a_{\text{вых1}}(t)$ и $a_{\text{вых2}}(t)$ автодинного приемопередатчика в точках «Выход 1» и «Выход 2» соответственно перепишем с учетом (32) в виде:

$$a_{\text{вых1}}(t) = -\Gamma \frac{K_{\text{лч}} K_{\text{ад}}}{K_{\text{дру}} \alpha} \cos(\Omega_d t + \delta_0), \quad (33)$$

$$a_{\text{вых2}}(t) = -\Gamma \frac{K_{\text{лч}} K_{\text{пр}}}{K_{\text{дру}} \alpha} \cos(\Omega_d t + \delta_0). \quad (34)$$

Из выражений (33) и (34) видно, что сигналы предлагаемого автодинного приемопередатчика для СБРЛ являются гармоническими, как у систем гомодинного типа. Поэтому свойственные обычным автодинам недостатки, такие как ангармонические искажения автодинных сигналов, ограничение динамического диапазона автодинного приемопередатчика и явление периодической нестационарности шумовых характеристик, в автодине, выполненном на основе ОЭГ, 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 обеспе-

чивает возможность ее повышения без ухудшения параметров устройства. С другой стороны, в ОЭГ полоса перестройки частоты не зависит от эквивалентной добротности и определяется исключительно полосой пропускания соединения модулятора Маха – Цендера, фотодетектора и радиосигнальных усилителей, верхние частоты которых в настоящее время превышают 100 ГГц [32]. Таким образом, у предложенного нами устройства отсутствует принципиальное ограничение в освоении автодинными устройствами частотных диапазонов КВЧ и ГВЧ.

Необходимо отметить также, что ОЭГ обеспечивают для современных СВЧ-генераторов рекордно низкие значения шумовых параметров [38]. Например, на расстоянии 10 кГц от несущей ОЭГ с частотой генерации 10 ГГц получен уровень частотных шумов минус 140...160 дБн/Гц [39]. При этом уровень паразитных составляющих в спектре сигнала генерации не превышает минус 91 дБн [40]. На частоте 100 ГГц уровень фазовых шумов для ОЭГ при той же величине отстройки от несущей получен минус 70 дБн/Гц [41]. 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 [42].

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 [11; 13; 43]. Поскольку предельный потенциал автодинных приемопередатчиков определяется как отношение его выходной мощности к мощности собственных шумов генератора [11], 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 по точечному объекту локации при прочих равных 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 (дальних) РЛС малоэффективно.

Как отмечалось выше, ОЭГ, выполненные по классической схеме, генерируют колебания, кратные частотному интервалу $\Delta f = 1 / T_{\text{лз}}$. При этом перестройка собственной частоты полосо-пропускающего резонатора посредством, например, изменения напряжения смещения на варикапе, обеспечивает переключение частоты выходных колебаний приемопередатчика с шагом $\Delta f = 1 / T_{\text{лз}}$. Размер этого шага определяется конкретным выбором длины ВОЛ. Использование автодинного приемопередатчика с переключаемой частотой в качестве радиолокационного датчика с частотной манипуляцией непрерывного излучения радиоволн обеспечивает возможность решения таких задач, как обнаружения объектов локации, измерения расстояния до них, а также определения скорости и направления движения [44]. Применение более сложных (многоконтурных) схем ОЭГ обеспечивает возможность непрерывной перестройки частоты генерации, например, путем изменения напряжения смещения на варикапе [20]. При этом ограничение амплитуды выходных колебаний автодинного приемопередатчика усилителем мощности обеспечивает снижение уровня паразитной амплитудной модуляции при ЧМ [45].

В последние годы активно ведутся поиски технических и технологических решений, направленных на создание ОЭГ в гибридно-интегральном исполнении [46–48]. Для этой цели авторами [49] предложена новая технология изготовления оптических волокон со сложной сердцевиной. Эта технология позволяет изготовить ВОЛ задержки 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 в настоящей статье описания принципа действия автодина на базе ОЭГ 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.

В заключение рассмотрим более подробно принцип действия и работу вариантов выполнения ДРУ в составе предлагаемого устройства (см. рис. 1). С одной стороны, ДРУ разделяет поступающее от усилителя мощности в антенну зондирующее излучение и излучение, принятое антенной от объекта локации. Последнее затем направляется в виде радиочастотных колебаний на управляющий вход ММЦ волоконно-оптической линии задержки. С другой – оно дозирует уровень поступления части мощности с выхода усилителя мощности на вход ММЦ. В свою очередь, уровень дозирования снизу ограничен условием возбу-

ждения и поддержания незатухающих колебаний в кольцевом генераторе, а сверху – условием сохранения линейности тракта ВОЛ задержки радиосигналов.

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

$$K_{\text{дру}} = 1 / K_{\text{лз}} K_{\text{мшц}} K_{\text{р}}(\omega_{\text{р}}) K_{\text{ум}}(A_0). \quad (35)$$

Так, например, при $K_{\text{лз}} = -3$ дБ, $K_{\text{мшц}} = 20$ дБ, $K_{\text{р}}(\omega_{\text{р}}) = -2$ дБ и $K_{\text{ум}}(A_0) = 5$ дБ величина коэффициента $K_{\text{дру}}$ передачи ДРУ согласно (35) должна быть равна $K_{\text{дру}} = -20$ дБ. Если величина развязки циркулятора соответствует этой величине, то в предлагаемом устройстве целесообразно применение ДРУ согласно варианту, представленному на рис. 2а.

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, выполненных согласно следующим вариантам, представленных на рис. 2а–в. При этом величина параметра развязки циркулятора для нормальной работы генератора должна быть более требуемого значения, определяемого по формуле (35) (в нашем примере эта величина должна быть более 20 дБ).

Тогда в случае применения варианта ДРУ согласно рис. 2б необходимое значение мощности на порте получают путем регулировки положения винтов штыревого трансформатора импедансов ТИ. Совокупность отраженной от неоднородности мощности и мощности радиосигнала, принятого от объекта локации, поступает на второе плечо циркулятора Ц и направляется через его третье плечо на третий порт ДРУ. В случае применения варианта ДРУ согласно рис. 2в недостаток мощности обратной связи, поступающей с третьего плеча циркулятора Ц на третий порт ДРУ, восполняется за счет ее прохождения с первого порта через направленный ответвитель НО. В случае применения варианта ДРУ согласно рис. 2г величина коэффициента $K_{\text{дру}}$ передачи определяется параметром прямой передачи направленного ответвителя НО. Мощность принятой второй антенной А2 отраженной от объекта локации излучения и мощность, прошедшая через направленный ответвитель НО, суммируются и поступают на третий порт ДРУ.

3. Заключение

В представленной нами статье выполнено описание принципа действия и разработана упрощенная математическая модель автодинной системы на основе ОЭГ. Получены первичные соотношения для определения параметров и характеристик оптоэлектронного автодина. Показано, что применение ОЭГ обеспечивает значительное увеличение эквивалентной добротности колебательной системы генератора и, соответственно, уменьшение автодинной девиации частоты генерации. Благодаря этому использование ОЭГ в качестве автодинного приемопередатчика для СБРЛ позволяет исключить свойственные автодинам предшествующего уровня техники недостатки и разработать автодинные СБРЛ в диапазонах КВЧ и ГВЧ с улучшенными параметрами и характеристиками. Освоение этих диапазонов обеспечивает дополнительные возможности СБРЛ в плане повышения точности измерения скорости и расстояния, а также надежности обнаружения отражающих объектов и определения направления их относительного перемещения.

Отмеченные возможности простых и миниатюрных радиолокационных датчиков с автодинным принципом построения приемопередатчика на основе ОЭГ особенно востребованы при создании эффективных систем обнаружения малоразмерных и малококонтрастных объектов и измерения параметров их движения. Поэтому они особенно перспективны 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.

В плане освоения и дальнейшего развития данного научного направления нам видится выполнение целого комплекса исследований, направленных на изучение шумовых и сигнальных параметров и характеристик, определение динамики формирования автодинного отклика в ОЭГ, поиск оптимальных режимов работы, а также новых конструкторско-технологических решений и области их практического применения.

Список литературы

1. Коган И. М. *Ближняя радиолокация. Теоретические основы*. М.: Советское радио; 1973. 272 с.
2. Носков В. Я., Варавин А. В., Васильев А. С., Ермак Г. П., Закарлюк Н. М., Игнатков К. А., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 9. Радиолокационное применение автодинов. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2016;(3):32–86.

3. Носков В.Я., Смольский С.М. Сто лет автодину: исторический очерк основных этапов и направлений развития автодинных систем. *Радиотехника*. 2013;(8):91–101.

4. Коган И.М., Тамарчак Д.Я., Хотунцев Ю.Л. Автодины. В кн.: *Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника*. М.: ВИНТИ; 1984. Т. 33. С. 3–175.

5. Гершензон Е.М., Туманов Б.Н., Бузыкин В.Т., Калыгина В.М., Левит Б.И. Общие характеристики и особенности автодинного эффекта в автогенераторах. *Радиотехника и электроника*. 1982;27(1):104–112.

6. Туманов Б.Н., Бузыкин В.Т. Особенности автоколебаний в автодинных генераторах СВЧ. *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ*. 1983;(2):3–9.

7. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов. *Радиотехника*. 2012;(6):24–42.

8. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 3. Функциональные особенности автодинов. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2007;(11):25–49.

9. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 5. Исследования автодинов с частотной модуляцией. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2009;(3):3–50.

10. Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 6. Исследования радиоимпульсных автодинов. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2009;(6):3–51.

11. Носков В.Я., Смольский С.М., Игнатков К.А., Мишин Д.Я., Чупахин А.П. 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):18–52.

12. Носков В.Я., Игнатков К.А. Особенности шумовых характеристик автодинов при сильной внешней обратной связи. *Известия вузов. Физика*. 2013;56(12):112–124.

13. 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):3–42.

14. Носков В.Я. Стабилизированный бигармонический автодин. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 1991;34(11):61–64.

15. Носков В.Я., Игнатков К.А., Чупахин А.П. Автодинный эффект системы двух взаимно синхронизированных генераторов при сильной связи. *Радиотехника и электроника*. 2018;63(2):200–208.

16. Носков В.Я., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. Автодинный эффект СВЧ генераторов с внешней синхронизацией. *Радиотехника и электроника*. 2020;65(6):612–620.

17. 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):5–21.
18. Носков В.Я., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д., Ермак Г.П., Васильев А.В. Автодинный отклик синхронизированных СВЧ генераторов по изменению выходной мощности. *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. 2020;11(5):8–14.
19. Носков В.Я., Богатырев Е.В., Галеев Р.Г., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. Автодинный приемопередатчик для систем ближней радиолокации. Патент РФ RU2779887C1 от 14.09.2022, бюл. 26.
20. Bortsov A. A., P'in Y. B., Smolskiy S. M. *Laser Optoelectronic Oscillators*. Springer Nature Switzerland AG; 2020. 548 p.
21. Белкин М.Е., Лопарев А. Оптоэлектронный генератор – первое практическое устройство СВЧ-оптоэлектроники. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2010;(6):62–70.
22. 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.
23. Gupta R. *Homodyne Doppler radar with increased target sensitivity*. Патент США US3852743 от 03.12.1974.
24. Sato K. *Radar detection apparatus for preventing vehicular collisions*. Патент США US3913106 от 14.10.1975.
25. Лопарев А.В. Моделирование процесса самовозбуждения оптоэлектронного генератора СВЧ колебаний. *Научный вестник МИРЭА*. 2010;(9):41–48.
26. 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):5–33.
27. Bosch D. M. *Proximity fuze transceiver*. Патент США US5266957 от 30.11.1993.
28. Tiebout M. J. G. *Radar system*. Патент США US7920090B2 от 05.04.2011.
29. Гоноровский И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы*. М.: Радио и связь; 1986. 512 с.
30. Андреев В.С. Влияние нелинейных свойств прибора с отрицательным сопротивлением на мощность генерируемых колебаний. *Радиотехника*. 1982;37(8):43–44.
31. Лебедев И.В. *Техника и приборы СВЧ*. Т. 1. М.: Высшая школа; 1970. 440 с.
32. Белкин М.Е. Разработка модели оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона. В кн.: *Материалы Международной НТК INTERMATIC-2008*. М.: МИРЭА; 2008. С. 289–297.
33. Fedderwitz S., Rymanov V., Weiss M., Stohr A., Jager D., Steffan A. G., Umbach A. Ultra-broadband and low phase noise photonic

millimeter-wave generation. In: *International Topical Meeting on Microwave Photonics jointly held with the Asia-Pacific Microwave Photonics Conference*. 2008. No. 10384675. P. 283–286.

34. Mukherjee A., Das N.R., Ghosh D. Optoelectronic oscillator: Electron-photon and photon-electron conversion device. In: *3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)*. 2018. No. 17737651. P. 1–2.

35. Востриков Е.В., Литвинов Е.В., Алейник А.С., Польте Г.А. Применение радиофотоники в волоконно-оптических измерительных приборах. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020;1(1):1–23.

36. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Экспериментальные исследования автодинных модулей на меза-планарных диодах Ганна КВЧ диапазона. *Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника*. 2012;(2):17–36.

37. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. 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):3–52.

38. Лопарев А.В., Белкин М.Е. Экспериментальное исследование влияния времени задержки в петле обратной связи оптоэлектронного генератора на его спектральные и шумовые характеристики. В кн.: *Материалы Международной НТК INTERMATIC-2011*. Часть 1. М.: МИРЭА, 2011. С. 134–138.

39. Khanna A.P.S. Microwave Oscillators: The State of the Technology. *Microwave Journal*. 2006;49(4):22–26.

40. Микитчук К.Б., Чиж А.Л., Малышев С.А. Двухконтурный оптоэлектронный генератор СВЧ с низким уровнем дискретных составляющих в спектре генерации и сверхнизким фазовым шумом. В кн.: *VII Всероссийской конференции: «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; 2018. Т. 1. С. 296–301.

41. Zhu Y., Jin X., Jin X., Yu X., Zheng S., Chi H., Zhang X. A novel scheme of microwave generation based on heterodyne phase locking of an ОЕО. *IEEE Phot. technol. let.* 2016;28(22):2637–2640.

42. Микитчук К.Б., Чиж А.Л., Скоторенко И.В., Григорьев Е.В., Светличный Ю.А., Сычева А.В. Оптоэлектронный гетеродин X-диапазона со сверхнизким фазовым шумом. *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2019;1(1):204–208.

43. Белов Л., Хилькевич В. Генераторы с диэлектрическими резонаторами для стабилизации частоты. *Электроника: наука, технологии, бизнес*. 2006;(7):54–59.

44. Носков В.Я., Богатырев Е.В., Игнатков К.А., Черных О.А., Шайдуров К.Д. Метод повышения помехоустойчивости радиолокационных датчиков с переключением частоты. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(3):284–304. DOI: 10.15826/urej.2021.5.3.006.

45. Комаров И.В., Смольский С.М. *Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний*. М.: Горячая линия–Телеком; 2010. 392 с.

46. Tang J., Hao T., Li W., Zhu N., Li M. An integrated optoelectronic oscillator. In: *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. Beijing, China; 2017. No. 17415877. 4 p.

47. Seidel D., Savchenkov A., Eliyahu D., Williams S., Matsko A. Minituarized Ka-band Photonic Oscillators. In: *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. Toulouse, France; 2018. No. 18306345. 2 p.

48. Wei K., Daryoush A.S. Self-Forced Silicon Photonic Integrated Optoelectronic Oscillators using High-Q Filtering Delay Lines. In: *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. Matsue, Japan; 2020. No. 20287445. P. 180–183.

49. Борцов А.А., Ильин Ю.Б., Карачев А.А., Пнев А.Б., Карасик В.Е., Барышников Н.В. Способ изготовления заготовок для волоконных световодов на основе кварцевого стекла, легированного азотом. Патент РФ RU2537450C1 от 10.01.2015, бюл. № 1.

References

1. Kogan I.M. *Short-range radar. Theoretical foundations*. Moscow: Sovetskoe radio; 1973. 272 p. (In Russ.)

2. Noskov V.Ya., Varavin A.V., Vasiliev A.C., Ermak G.P., Zakarlyuk N.M., Ignatkov K.A., Smolsky S.M. Modern hybrid-integral autodyne generators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 9. Radar application of autodynes. *The Successes of Modern Radio Electronics*. 2016;(3):32–86. (In Russ.)

3. Noskov V.Ya., Smolsky S.M. One hundred years of Avtodyne: a historical sketch of the main stages and directions of development of avtodyne systems. *Radio Engineering*. 2013;(8):91–101. (In Russ.)

4. Kogan I.M., Tamarchak D.Ya., Khotuntsev Yu.L. Avtodiny. In: *Results of science and technology. Ser. Radio engineering*. Moscow: VINITI; 1984. Vol. 33, pp. 3–175. (In Russ.)

5. Gershenson E.M., Tumanov B.N., Buzykin V.T., Kalygina V.M., Levit B.I. General characteristics and features of the autodyne effect in autogenerators. *Radio Engineering and Electronics*. 1982;27(1):104–112. (In Russ.)

6. Tumanov B.N., Buzykin V.T. Features of self-oscillations in autodyne microwave generators. *Electronic Equipment. Ser. Microwave Electronics*. 1983;(2):3–9. (In Russ.)

7. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Smolsky S.M. Dependence of autodyne characteristics on internal parameters of microwave generators. *Radio Engineering*. 2012;(6):24–42. (In Russ.)

8. Votoropin S.D., Noskov V.Ya., Smolsky S.M. Modern hybrid-integral autodyne generators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 3. Functional features of autodynes. *The Successes of Modern Radio Electronics*. 2007;(11):25–49. (In Russ.)

9. Votoropin S.D., Noskov V.Ya., Smolsky S.M. Modern hybrid-integral autodyne generators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 5. Studies of autodynes with frequency modulation. *The Successes of Modern Radio Electronics*. 2009;(3):3–50. (In Russ.)

10. Noskov V. Ya., Smolsky S. M. Modern hybrid-integral autodyne generators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 6. Studies of radio-pulse autodynes. *The Successes of Modern Radio Electronics*. 2009;(6):3–51. (In Russ.)

11. Noskov V. Ya., Smolsky S. M., Ignatkov K. A., Mishin D. Ya., Chupakhin A. P. Modern hybrid-integral autodyne generators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 10. Fundamentals of analysis and calculation of parameters of autodynes taking into account noise. *The Successes of Modern Radio Electronics*. 2018;(3):18–52. (In Russ.)

12. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Features of noise characteristics of autodynes with strong external feedback. *News of Universities. Physics*. 2013;56(12):112–124. (In Russ.)

13. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolsky S. M. Modern hybrid-integral autodyne generators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 8. Autodynes with frequency stabilization by an external high-quality resonator. *The Successes of Modern Radio Electronics*. 2013;(12):3–42. (In Russ.)

14. Noskov V. Ya. Stabilized biharmonic autodyne. *News of Universities. Radio Electronics*. 1991;34(11):61–64. (In Russ.)

15. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupakhin A. P. The autodyne effect of a system of two mutually synchronized generators with strong coupling. *Radio Engineering and Electronics*. 2018;63(2):200–208. (In Russ.)

16. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Shaidurov K. D. The autodyne effect of microwave generators with external synchronization. *Radio Engineering and Electronics*. 2020;65(6):612–620. (In Russ.)

17. Noskov V. Ya., Smolsky S. M., Ignatkov K. A., Chupakhin A. P. Modern hybrid-integral autodyne generators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 13. Autodynes stabilized by an external resonator with strong reflected radiation. *The Successes of Modern Radio Electronics*. 2020;(1):5–21. (In Russ.)

18. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Shaidurov K. D., Ermak G. P., Vasiliev A. V. Autodyne response of synchronized microwave generators to changes in output power. *Synchronization, Signal Generation and Processing Systems*. 2020;11(5):8–14. (In Russ.)

19. Noskov V. Ya., Bogatyrev E. V., Galeev R. G., Ignatkov K. A., Shaidurov K. D. *Autodyne transceiver for short-range radar systems*. Patent of the Russian Federation RU2779887C1 from 14. 09.2022, bulletin 26.

20. Bortsov A. A., Il'in Y. B., Smolskiy S. M. *Laser Optoelectronic Oscillators*. Springer Nature Switzerland AG: 2020. 548 p.

21. Belkin M. E., Loparev A. Optoelectronic generator is the first practical device of microwave optoelectronics. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2010;(6):62–70. (In Russ.)

22. Mikitchuk K. B., Chizh A. L. Optoelectronic methods of generating microwave signals for radar systems. In: *8th MNC on military-technical problems, defense and security problems, the use of dual-use technologies: sat. sci. articles. Part 2*. Minsk: Laboratory of Intelligence; 2019, pp. 54–57. (In Russ.)

23. Gupta R. *Homodyne Doppler radar with increased target sensitivity*. Patent USA US3852743 from 03.12.1974.

24. Sato K. *Radar detection apparatus for preventing vehicular collisions*. Patent USA US3913106 from 14.10.1975.
25. Loparev A.V. Modeling of the self-excitation process of an optoelectronic microwave oscillator. *Scientific Bulletin of MIREA*. 2010;(9):41–48. (In Russ.)
26. Noskov V. Ya., Smolsky S. M., Ignatkov K. A., etc. Modern hybrid-integrated autodyne generators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 11. Fundamentals of the implementation of autodynes. *The Successes of Modern Radio Electronics*. 2019;(2):5–33. (In Russ.)
27. Bosch D.M. *Proximity fuze transceiver*. Patent USA US5266957 from 30.11.1993.
28. Tiebout M.J.G. *Radar system*. Patent USA US7920090B2 from 05.04.2011.
29. Gonorovsky I.S. *Radio engineering circuits and signals*. Moscow: Radio i svyaz; 1986. 512 p.
30. Andreev V.S. Influence of nonlinear properties of a device with negative resistance on the power of generated oscillations. *Radio Engineering*. 1982;37(8):43–44. (In Russ.)
31. Lebedev I.V. *Microwave equipment and devices*. Vol. 1. Moscow: Vysshaya shkola; 1970. 440 p. (In Russ.)
32. Belkin M.E. Development of a model of an optoelectronic generator of the microwave range. In: *Materials of the International Scientific and Technical Conference INTERMATIC-2008*. Moscow: MIREA; 2008, pp. 289–297. (In Russ.)
33. Fedderwitz S., Rymanov V., Weiss M., Stohr A., Jager D., Steffan A.G., Umbach A. Ultra-broadband and low phase noise photonic millimeter-wave generation. In: *International Topical Meeting on Microwave Photonics jointly held with the Asia-Pacific Microwave Photonics Conference*. 2008, No. 10384675, pp. 283–286.
34. Mukherjee A., Das N.R., Ghosh D. Optoelectronic oscillator: Electron-photon and photon-electron conversion device. In: *3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)*. 2018, No. 17737651, pp. 1–2.
35. Vostrikov E.V., Litvinov E.V., Oleinik A.S., Polte G.A. Application of radiophotonics in fiber-optic measuring devices. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2020;1(1):1–23. (In Russ.)
36. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolsky S. M. Experimental studies of autodyne modules on mesaplanar diodes of the Gunn EHF band. *Electronic Equipment. Series 1. Microwave equipment*. 2012;(2):17–36. (In Russ.)
37. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolsky S. M. Modern hybrid-integral autodyne generators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 7. Dynamics of the formation of autodyne and modulation characteristics. *The successes of modern radio electronics*. 2013;(6):3–52. (in Russ.)
38. Loparev A.V., Belkin M.E. Experimental study of the effect of the delay time in the feedback loop of an optoelectronic generator on its

spectral and noise characteristics. Materials of the International STC INTERMATIC-2011. Part 1. Moscow: MIREA; 2011, pp. 134–138. (In Russ.)

39. Khanna A.P.S. Microwave Oscillators: The State of the Technology. *Microwave Journal*. 2006;49(4):22–26.

40. Mikitchuk K.B., Chizh A.L., Malyshev S.A. A two-circuit optoelectronic microwave generator with a low level of discrete components in the generation spectrum and ultra-low phase noise. In: *VII All-Russian Conference: “Microwave electronics and microelectronics”*. St. Petersburg: ETU “LETI”; 2018. Vol. 1, pp. 296–301. (In Russ.)

41. Zhu Y., Jin X., Jin X., Yu X., Zheng S., Chi H., Zhang X. A novel scheme of microwave generation based on heterodyne phase locking of an OEO. *IEEE Phot. technol. let.* 2016;28(22):2637–2640.

42. Mikitchuk K.B., Chizh A.L., Skotorenko I.V., Grigoriev E.V., Svetlichny Yu.A., Sycheva A.V. X-band optoelectronic heterodyne with ultra-low phase noise. *Microwave Electronics and Microelectronics*. 2019;1(1):204–208. (In Russ.)

43. Belov L., Khilkevich V. Generators with dielectric resonators for frequency stabilization. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2006;(7):54–59. (In Russ.)

44. Noskov V. Ya., Bogatyrev E.V., Ignatkov K.A., Chernyh O.A., Shaidurov K.D. Method for increasing noise resistance of radar sensors with frequency selection. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(3):284–304. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.3.006

45. Komarov I.V., Smolsky S.M. *Fundamentals of the theory of radar systems with continuous radiation of frequency-modulated oscillations*. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom; 2010. 392 p. (In Russ.)

46. Tang J., Hao T., Li W., Zhu N., Li M. An integrated optoelectronic oscillator. In: *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. Beijing, China; 2017. No. 17415877. 4 p.

47. Seidel D., Savchenkov A., Eliyahu D., Williams S., Matsko A. Miniaturized Ka-band Photonic Oscillators. In: *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. Toulouse, France; 2018. No. 18306345. 2 p.

48. Wei K., Daryoush A.S. Self-Forced Silicon Photonic Integrated Optoelectronic Oscillators using High-Q Filtering Delay Lines. In: *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. Matsue, Japan; 2020. No. 20287445, pp. 180–183.

49. Bortsov A.A., Ilyin Yu.B., Karachev A.A., Pnev A.B., Karasik V.E., Baryshnikov N.V. *Method of manufacturing blanks for fiber light guides based on quartz glass doped with nitrogen*. Patent RF RU2537450C1 from 10.01.2015, bul. No. 1. (In Russ.)

Информация об авторах

Носков Владислав Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектроники и телекоммуникаций» Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

Богатырев Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехники» Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Россия.

Галеев Ринат Гайсеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиофизики и специальной электронной аппаратуры» Сибирского университета науки и технологий им. М.Ф. Решетнева.

Игнатков Кирилл Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроники и телекоммуникаций», заместитель директора по науке Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

Шайдуров Кирилл Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент департамента «Радиоэлектроники и связи» Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

Information about the authors

Vladislav Ya. Noskov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Evgeniy V. Bogatyrev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Engineering, Siberian Federal University.

Rinat G. Galeev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radiophysics and Special Electronic Equipment, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

Kirill A. Ignatkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications, Deputy Director for Science, Institute of Radio Electronics and Information Technology – RTF, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Kirill D. Shaydurov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Electronics and Communications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Поступила / Received: 30.08.2022

Принята в печать / Accepted: 22.09.2022