

Влияние сопутствующей амплитудной модуляции на формирование сигналов автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией

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

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

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

✉ noskov@oko-ek.ru, bogatyrev-sfu@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований особенностей формирования сигналов автодинных систем ближней радиолокации с комбинированной амплитудно-частотной модуляцией. Получены выражения для расчета автодинных сигналов одноконтурного генератора с произвольным законом одновременной модуляции амплитуды и частоты в общем случае произвольного соотношения времени запаздывания отраженного излучения и периода модулирующей функции. Выполнены расчеты характеристик амплитудной селекции и их сечений, а также временных и спектральных диаграмм автодинных сигналов для случая модуляции амплитуды и частоты по гармоническому закону. При этом рассмотрены случаи, когда время запаздывания отраженного излучения значительно меньше продолжительности периода модуляции, а также при их соизмеримых значениях. Экспериментальные исследования выполнены с применением генератора на диоде Ганна 8-миллиметрового диапазона длин волн. Исследованы варианты электрического управления по частоте при помощи варикапа и по цепи смещения диода Ганна. Полученные результаты исследований генераторных модулей позволили сформулировать требования к параметрам и характеристикам создаваемых гибридно-интегральных схем и модулей с частотной модуляцией и наметить пути их дальнейшего совершенствования.

Ключевые слова

автодин, автодинный сигнал, автодинный отклик, радиолокатор ближнего действия, амплитудная модуляция, частотная модуляция, генератор на диоде Ганна

Для цитирования

Носков В. Я., Богатырев Е. В., Игнатков К. А., Шайдулов К. Д. Влияние сопутствующей амплитудной модуляции на формирование сигналов автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(2):127–166. DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.001

The Influence of Concomitant AM on the Formation of FM Autodyne Radars Signals

**V. Ya. Noskov¹ ✉, E. V. Bogatyrev² ✉, K. A. Ignatkov¹,
K. D. Shaydurov¹**

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia
B. N. Yeltsin, 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

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

✉ noskov@oko-ek.ru, bogatyrev-sfu@mail.ru

Abstract

The paper presents the results of studies of the features of the formation of signals from autodyne short-range radar systems with combined amplitude-frequency modulation. Expressions are obtained for calculating the autodyne signals of a single-loop oscillator with the arbitrary law of simultaneous amplitude and frequency modulation in the general case of the arbitrary ratio of the delay time of the reflected radiation and the period of the modulating function. The calculations of the characteristics of the amplitude selection and their cross sections, as well as the time and spectral diagrams of autodyne signals for the case of modulation of the amplitude and frequency according to the harmonic law, have been performed. In this situation, the cases are considered when the delay time of the reflected radiation is much shorter than the duration of the modulation period, as well as when their values are comparable. Experimental studies were carried out using an oscillator based on a Gunn diode in the 8-mm wavelength range. Variants of electrical frequency control using a varicap and a bias circuit of the Gunn diode are investigated. The obtained results of the research of the generator modules made it possible to formulate the requirements for the parameters and characteristics of the created hybrid-integrated circuits and frequency modulation modules and outline the ways for their further improvement.

Keywords

autodyne, autodyne signal, autodyne response, short-range radar, amplitude modulation, frequency modulation, Gunn-diode oscillator

For citation

Noskov V. Ya., Bogatyrev E. V., Ignatkov K. A., Shaydurov K. D. The Influence of Concomitant AM on the Formation of FM Autodyne Radars Signals. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(2):127–166. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.001

Статья посвящена светлой памяти профессора Сергея Михайловича Смольского, внесшего основополагающий вклад в развитие теории и техники автодинных систем ближней радиолокации при непрерывном излучении радиоволн с частотной модуляцией

1. Введение

При решении задач дистанционного контроля параметров движения на транспорте в системах безопасности, робототехнике и научных исследованиях широкое применение находят системы ближней радиолокации (СБРЛ) [1–5]. Они используются также в качестве бесконтактных радиоволновых датчиков для определения параметров материалов и технологических процессов, вибраций и перемещений в промышленности, для оперативной и бесконтактной диагностики работы турбоагрегатов, а также характеристик жизнедеятельности при медицинских и физиологических исследованиях и многого другого [6–11].

По принципу построения приемопередающего устройства СБРЛ делятся на гомодинные и автодинные [2; 12]. В первом типе систем обычно используются отдельные передатчик зондирующего излучения и приемник отраженного от цели радиосигнала. В СБРЛ автодинного типа функции передатчика и приемника одновременно совмещает в себе единственный каскад – автодин (АД), который обычно выполняется на основе автогенератора. Совмещение этих функций обеспечивает конструктивную простоту, компактность и относительно низкую стоимость СБРЛ. Достоинствами этих устройств являются также высокая чувствительность преобразования первичных данных зондирования в выходной информационный сигнал. В настоящее время автодинные, в том числе генераторно-излучающие модули с различной топологией и исполнением, выпускаются в виде монолитных и гибридно-интегральных схем [13; 14].

Принцип действия АД основан на сложном нелинейном процессе в генераторах, который принято называть автодинным эффектом. Этот эффект проявляется в изменениях параметров колебаний автогенератора под воздействием отраженного от цели излучения. Он наблюдается во всех типах генераторов как непрерывного излучения, так и с различными видами модуляции и во всем диапазоне как радио, так и оптических частот [15]. Изменениям подвергаются не только высокочастотные параметры колебаний (амплитуда, частота, фаза и выходная мощность), но и постоянные токи и напряжения в схеме генератора [16]. Регистрация этих изменений в виде автодинных сигналов и их обработка обеспечивают возможность практически безы-

нерционного получения необходимой информации о кинематических, внешних и внутренних характеристиках цели, а также среды распространения электромагнитного излучения и параметрах антенных систем.

При анализе АД раздельное рассмотрение функций передатчика и приемника невозможно, поскольку собственно автодинный генератор и цель образуют единую автоколебательную систему, в которой расстояние между ними, в общем случае переменное, является одним из параметров. По указанным признакам АД относятся к классу автопараметрических систем с запаздывающей обратной связью [17; 18]. Успешное решение задач анализа этих систем лежит в плоскости методов теории нелинейных колебаний.

Для расширения функциональных возможностей и улучшения технических параметров в автодинных СБРЛ используются различные виды модуляции излучения: амплитудная, частотная, импульсная и фазовая. Среди них наибольшее распространение получила частотная модуляция (ЧМ) [19–25]. Применение ЧМ и соответствующая обработка сигналов обеспечивают повышение надежности работы СБРЛ в сложных метеоусловиях, селекцию на заданных расстояниях цели на фоне отражений от пассивных помех, подстилающей поверхности и других. Анализ особенностей формирования сигналов АД с ФМ посвящено большое число публикаций, в которых для описания из работы используются различные математические модели автодинного генератора и представления функций воздействия от-

раженного от цели излучения. При этом необходимо отметить, что основополагающий вклад в развитие теории и техники автодинных СБРЛ с ЧМ был привнесен доктором технических наук, профессором Сергеем Михайловичем Смольским [19; 22].

* * *

Сергей Михайлович Смольский поступил в Московский энергетический институт (МЭИ) на радиотехнический факультет в 1964 году и с отличием окончил его в 1970 году по специальности радиофизика. Будучи студентом, работал младшим научным сотрудником и активно участвовал в научной работе кафедры радиопередающих устройств. Одна из его работ, выполненная на 4-м курсе, была награждена золотой медалью Всесоюзного конкурса лучших студенческих работ.



Профессор Сергей Михайлович Смольский (02.01.1946 – 29.04.2020).

Professor Sergei Mikhailovich Smolskiy (02 January, 1946 – 29 April, 2020).

После окончания института Сергей Смольский сразу поступил в аспирантуру МЭИ, в которой за отличную успеваемость и активную общественную деятельность он получал ленинскую стипендию. Успешно защитив кандидатскую диссертацию в 1974 году, Сергей Михайлович остался работать в МЭИ сначала в должности научного сотрудника, начальника лаборатории, затем начальника научно-исследовательского отдела. В 1980 году был утвержден в ученом звании старшего научного сотрудника, а в 1990-м – ученом звании доцента.

На протяжении 70-х и 80-х годов Сергей Михайлович принимал активное участие в организации и проведении различных всесоюзных студенческих школ-конференций по радиотехнике и электронике, а также популярных в то время всесоюзных школ-совещаний молодых ученых по стабилизации частоты и прецизионной радиотехнике, автоколебательным и автодинным системам. Входил в редакционные коллегии издававшихся в свое время научно-технических сборников различных вузов Москвы, Омска, Воронежа, Рязани, Севастополя и других. Был внештатным рецензентом статей по многим направлениям в научных журналах «Радиотехника», «Электросвязь», «Известия вузов. Радиоэлектроника», «Известия вузов. Радиофизика», участвовал в подготовке заказных научных обзоров и биографических материалов. Надо понимать, что в указанный период Сергей Михайлович являлся исполнителем и научным руководителем многих научно-исследовательских работ, которые выполнялись по договорам с промышленностью, по постановлениям Совета Министров СССР, по плану госбюджетных работ, а также по международным соглашениям.

С 1987 года Сергей Михайлович перешел работать заместителем проректора по научной работе, а затем, с 1990-го по 2000 год, – проректором МЭИ по международным связям. Неоднократно выступал с докладами и лекциями в зарубежных университетах Голландии, Мексики, Колумбии, Аргентины, Ирана, Индии, ЮАР. В 1993 году Сергей Михайлович защитил докторскую диссертацию на тему: «Радиолокационные системы ближнего действия на основе управляемых автогенераторов». В своей диссертации он развил и обобщил на случай систем с переменными параметрами известный в теории нелинейных колебаний метод С. И. Евтянова. Им подготовлено девять аспирантов и два докторанта, успешно защитивших диссертации не только по автодинным системам, но и другим направлениям радиоэлектроники.

В 1995 году Сергей Михайлович был избран заведующим кафедрой радиоприемных устройств МЭИ. После реорганизации ряда кафедр в 2010 году перешел в качестве профессора на новую кафедру, названную «Формирования и обработки радиосигналов», а также стал заместителем директора Института радиотехники и электроники Национального исследовательского университета «МЭИ» по международным вопросам и координации образовательных международных образовательных программ МЭИ.

Сергей Михайлович опубликовал более 300 научных статей, вышедших в том числе и в зарубежных научных изданиях. Переведено и издано с его соавторством около двух десятков монографий и учебных пособий в нашей стране и за рубежом, ряд монографий посвящено СБРЛ с ЧМ. Сергей Михайлович широко известен среди специалистов в области теории нелинейных колебаний, теории автоколебательных систем, систем ближней радиолокации, устройств формирования ра-

диосигналов с прецизионными свойствами, устройств передачи и обработки информации.

За успехи в научной работе Сергей Михайлович неоднократно награждался грамотами, дипломами и премиями. По итогам многолетних научных и практических исследований по заданиям Министерства машиностроения СССР отмечен почетным знаком «Отличник Министерства машиностроения СССР». По результатам научных исследований для ракетно-космической отрасли в 2000 году был награжден почетной медалью имени С. М. Рязанского академии космонавтики. За организацию научного сотрудничества с университетами Республики Польша решением президента Польши в 2000 году Сергей Михайлович награжден орденом Рыцарского креста «За заслуги перед Польшей». В 2003 году приказом министра связи СССР отмечен значком «Почетный радист». В 2007 году распоряжением президента России присвоено почетное звание «Заслуженный работник высшей школы».

Сергей Михайлович был почетным доктором Университета Сан-Хуан (Аргентина с 1997 года) и Каджеш-Насер-Тузи Университета (Исламская Республика Иран с 1995 года). Был членом Международного института электро- и радиоинженеров (IEEE) по секциям «Образование», «Обработка сигналов», «Теория цепей», действительным членом Международной академии информатизации, Международной академии наук высшей школы, Международной электротехнической академии.

Сергей Михайлович был весьма незаурядной личностью. Ее масштаб проявлялся и в способности выполнять одновременно много различных дел, и в способности предлагать очень крупные проекты, и в готовности брать на себя ответственность за их реализацию. С ним хотелось работать вместе, потому что он сразу располагал к себе, внушал доверие к своей деятельной и одаренной натуре. Вместе с тем С. М. Смольский – человек энциклопедического ума. Общение с Сергеем Михайловичем всегда расширяло кругозор, заставляло посмотреть на проблему с разных сторон. Нельзя не отметить исключительную доброжелательность Сергея Михайловича, его готовность прийти на помощь, поддержать. Сергей Михайлович обладал отличным чувством юмора и быстрой реакцией. Он был всегда крайне деликатен в общении, никогда не позволял себе чем-либо обидеть собеседника.

* * *

Тем не менее, несмотря на наличие более чем десятка вышедших только за последние пять лет публикаций по автодинным СБРЛ с ЧМ [26–35], в известной нам литературе влияние сопутствующей амплитудной модуляции (АМ) на формирование сигналов АД с ЧМ не рассматривалось. Обычно в рамках принятых к анализу моделей предполагалось, что сопутствующая процесс ЧМ амплитудная модуляция мала и не оказывает заметного влияния на выходные характеристики СБРЛ [21–25]. Тем не менее очевидно, что знания о свойствах сигналов АД с ЧМ в условиях присутствия АМ в общем случае востребованы для создания перспективных СБРЛ и выполнение соответствующих исследований являются актуальными.

В связи с этим цель настоящей статьи – восполнить указанный пробел, выполнить исследования АД с комбинированной амплитудной и частотной модуляцией (АЧМ). При этом практический интерес представляет разработка математической модели для общего случая, когда период модуляции и время запаздывания отраженного излучения находятся в произвольном соотношении. Далее на основе полученной модели АД рассмотреть особенности формирования сигналов при гармоническом законе модуляции в зависимости от параметров модуляции генератора и расстояния до объекта локации.

2. Математическая модель автодина с АЧМ

Эквивалентная схема АД с ЧМ приведена на рис. 1 [31; 35]. Основные компоненты этой схемы приведены к сечению полной проводимости активного элемента (АЭ). Средняя за период колебаний проводимость АЭ $Y_{АЭ}$ в общем случае является комплексной и зависящей от текущих значений амплитуды A и частоты ω колебаний: $Y_{АЭ} = G_{АЭ} + jB_{АЭ}$, где $G_{АЭ} \equiv G_{АЭ}(A, \omega)$, $B_{АЭ} \equiv B_{АЭ}(A, \omega)$ – резистивная и реактивная проводимости АЭ соответственно. Резонатор АД представлен эквивалентным колебательным контуром, который содержит индуктивность $L_{рез}$, проводимость собственных потерь $G_{рез}$ и емкость $C_{рез}$. При этом емкость $C_{рез}$ и проводимость $G_{рез}$ представляют собой совокупность емкостей и проводимостей потерь собственно резонатора и варикапа, предназначенного для электронной перестройки частоты генератора.

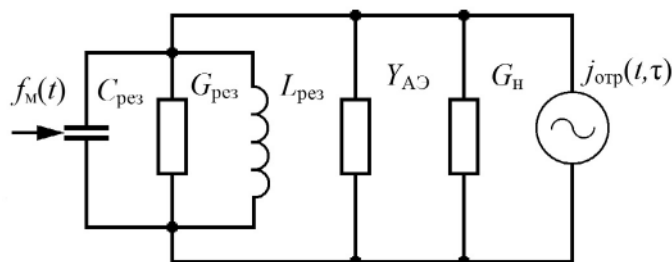


Рис. 1. Эквивалентная схема автодина с ЧМ

Fig. 1. Equivalent circuit of autodyne with FM

Параллельно колебательному контуру подключен также зависимый источник тока $j_{отр}(t, \tau)$, отображающий воздействие на генератор принятого антенной собственного отраженного от цели излучения, запаздывающего относительно текущего времени t на время $\tau = 2l/c$, где l – расстояние до цели; c – скорость распространения излучения. Проводимость $G_н$ является нагрузкой генератора.

Пользуясь законами Кирхгофа, для эквивалентной схемы рис. 1 нами были составлены дифференциальные уравнения для мгновенных значений токов и напряжений. Затем, используя методы медленно меняющихся амплитуд и усреднения в изложении Курокавы [36], были получены укороченные дифференциальные уравнения для амплитуды и фазы колебаний. Далее были найдены уравнения для стационарных значений амплитуды A_0 и частоты ω_0 колебаний автономного генератора. После этого в предположении малого уровня отраженного излучения по отработанной ранее методике [37] получена система линеаризованных дифференциальных уравнений для малых относительных изменений амплитуды $a = (A - A_0) / A_0$ и частоты $\chi = (\omega - \omega_0) / \omega_0$ колебаний:

$$(Q_n / \omega_{\text{рез}})(da / dt) + \alpha a + \varepsilon \chi = \Gamma(t, \tau) \eta \cos \delta(t, \tau), \quad (1)$$

$$\beta a + Q_n \chi = -\Gamma(t, \tau) \eta \sin \delta(t, \tau), \quad (2)$$

где Q_n , $\omega_{\text{рез}}$ – нагруженная добротность и частота резонатора; α , ε , β – безразмерные параметры, определяющие приведенную крутизну инкремента, неизодромность и неизохронность генератора соответственно [37]; $\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0[A(t, \tau) / A(t)]$, $\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau)$ – модуль и фаза мгновенного коэффициента отражения, приведенного к нагрузке АД; Γ_0 – коэффициент затухания излучения по амплитуде при его распространении до цели и обратно; $A(t, \tau)$, $\Psi(t, \tau)$ – амплитуды и фазы колебаний АД из предыстории системы ($t - \tau$); $G = G_{\text{рез}} + G_n$; $\eta = Q_n / Q_{\text{вн}}$, $Q_{\text{вн}}$ – эффективная и внешняя добротность колебательной системы; $A(t)$, $\Psi(t)$ – амплитуда и фаза колебаний АД в текущий момент времени.

Математическая модель АД в виде системы (1) и (2), в основе которой предполагается амплитудно-фазовое запаздывание отраженного от цели излучения, справедлива также и для случая АД с АЧМ. В этой модели выражение для выходных квазигармонических колебаний, модулированных одновременно по амплитуде и частоте и излучаемых посредством антенны в направлении цели, в общем виде можно записать как:

$$u_{\text{изл}}(t) = A(t) \cos \Psi(t) = A_0 [1 + m_{\text{АМ}} f_m(t)] \cos \left[\omega_0 t + \omega_0 m_{\text{ЧМ}} \int_0^t f_m(t) dt \right], \quad (3)$$

где $m_{\text{АМ}} = \Delta A_{\text{АМ}} / A_0$, $m_{\text{ЧМ}} = \Delta \omega_{\text{ЧМ}} / \omega_0$ – коэффициенты АМ и ЧМ колебаний; $\Delta A_{\text{АМ}}$, $\Delta \omega_{\text{ЧМ}}$ – максимальные отклонения амплитуды и частоты осцилляции от их стационарных значений A_0 и ω_0 вследствие модуляции; $f_m(t)$ – нормированная модулирующая функция.

Отраженные от цели и принятые антенной колебания $u_{\text{отр}}(t, \tau)$ запишем в следующем виде:

$$u_{\text{отр}}(t, \tau) = \Gamma_0 A(t, \tau) \cos \Psi(t, \tau) = \Gamma_0 A_0 [1 + m_{\text{AM}} f_m(t, \tau)] \cos \left[\omega_0(t - \tau) + \omega_0 m_{\text{ЧМ}} \int_{t-\tau}^t f_m(t, \tau) dt + \varphi_0 \right], \quad (4)$$

где $f_m(t, \tau)$ – модулирующая функция отраженных колебаний; φ_0 – постоянный фазовый сдвиг, обусловленный отражающими свойствами цели.

Решение системы (1), (2) с учетом (3), (4) для малосигнальных автодинных изменений амплитуды $A(t)$ и частоты $\omega(t)$ автоколебаний генератора, когда $\Gamma_0 \ll 1$, в квазистатическом приближении имеет вид:

$$A(t) = A_0 \{1 + m_{\text{AM}} f_m(t) + \Gamma(t, \tau) K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi]\}, \quad (5)$$

$$\omega(t) = \omega_0 \{1 + m_{\text{ЧМ}} f_m(t) - \Gamma(t, \tau) L_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta]\}, \quad (6)$$

где K_a , L_a – коэффициенты автодинного усиления и девиации частоты генерации [37]; $\psi = \arctg(\rho)$, $\theta = \arctg(\gamma)$ – углы фазового смещения автодинных изменений; $\rho = \varepsilon / Q_n$, $\gamma = \beta / \alpha$ – коэффициенты неизодромности и неизохронности генератора соответственно.

Второе слагаемое в правой части уравнения (5) повторяет закон модуляции $m_{\text{AM}} f_m(t)$ и определяет уровень сопутствующей, так называемой, «паразитной» АМ (ПАМ) при регистрации автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний. При малом уровне ПАМ влиянием этого слагаемого на формирование полезного сигнала можно пренебречь. Однако в ряде случаев, например при модуляции генератора по изменению напряжения питания, высокий уровень ПАМ может оказывать существенное и нежелательное влияние на формирование автодинного сигнала.

Выполним анализ особенностей формирования сигналов для режима непрерывного АЧМ излучения, описываемые в (5), (6) третьими членами правой части. Для выявления функций запаздывающего воздействия $f_m(t, \tau)$, $A(t, \tau)$ и $\Psi(t, \tau)$ в этих выражениях выполним их разложение в ряды Тейлора по малому параметру τ по сравнению с текущим временем t [38]. В результате получим:

$$f_m(t, \tau) = f_m(t) + \sum_{n=1}^N (-1)^n \frac{\tau^n}{n!} \frac{d^n f_m(t)}{dt^n}, \quad (7)$$

$$\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0 \frac{A(t, \tau)}{A(t)} = \Gamma_0 \left[1 - \frac{m_{\text{AM}}}{1 + a(t, \tau)} M_{\text{AM}}(t) + \frac{a_m}{1 + a(t, \tau)} M_{\text{АД}}(t, \tau) \right], \quad (8)$$

$$\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau) = \omega_0 \tau + p_{\Phi M}(\tau) F_{\Phi M}(t) - C_{OC} F_{AD}(t, \tau), \quad (9)$$

где n – здесь и далее порядковый номер членов разложений; $M_{AM}(t)$, $M_{AD}(t, \tau)$ – множители, обусловленные процессом АМ и автодинными изменениями амплитуды колебаний генератора соответственно:

$$M_{AM}(t) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \frac{\tau^n}{n!} \cdot \frac{d^n f_M(t)}{dt^n}, \quad (10)$$

$$M_{AD}(t, \tau) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} H_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta(t, \tau) - \psi - \Phi_n(\Omega_a \tau)]; \quad (11)$$

$F_{\Phi M}(t)$, $F_{AD}(t, \tau)$ – множители, обусловленные процессом ЧМ и автодинными изменениями частоты колебаний генератора соответственно:

$$F_{\Phi M}(t) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \frac{\tau^{n-1}}{n!} \cdot \frac{d^{n-1} f_M(t)}{dt^{n-1}}, \quad (12)$$

$$F_{AD}(t, \tau) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta(t, \tau) + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau)], \quad (13)$$

$a(t, \tau) = m_{AM} f_M(t) + a_m \cos[\delta(t, \tau) - \psi]$; $\Omega_a = d[\delta(t, \tau)] / dt$ – мгновенная частота автодинного сигнала; $a_m = \Gamma_0 K_a$ – относительная глубина автодинных изменений амплитуды колебаний; $p_{\Phi M}(\tau) = m_{\Phi M} \omega_0 \tau$ – индекс фазовой модуляции, обусловленный ЧМ; $C_{OC} = \Delta \omega_a \tau$ – параметр внешней обратной связи (ОС) АД; $\Delta \omega_a = \Gamma_0 L_a \omega_0$ – автодинная девиация частоты колебаний; $H_n(\Omega_a \tau)$, $S_n(\Omega_a \tau)$ – коэффициенты и $\Phi_n(\Omega_a \tau)$ – их фазы:

$$H_n(\Omega_a \tau) = \frac{(\Omega_a \tau)^{2n-1}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{\Omega_a \tau}{2n}\right)^2}, \quad S_n(\Omega_a \tau) = \frac{(\Omega_a \tau)^{2(n-1)}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{\Omega_a \tau}{2n}\right)^2}, \quad (14)$$

$$\Phi_n(\Omega_a \tau) = \arctg(\Omega_a \tau / 2n). \quad (15)$$

Из выражений (9) и (13) видно, что в отношении $\delta(t, \tau)$ transcendентное уравнение (9) является попрежнему неявным. Для выявления (9) при условии его гладкости, когда $C_{OC} < 1$, находим $\delta(t, \tau)$ методом последовательных приближений. Данное решение в виде фазовой характеристики $\delta(t, \tau)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta(t, \tau) = & \delta_{(0)} - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta_{(1)} + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau) - \\ & - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta_{(2)} + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau) - \dots \\ & \dots - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta_{(k)} + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau)] \dots]. \end{aligned} \quad (16)$$

где $\delta_{(0, 1, \dots, k)} = \omega_0 \tau + p_{\text{ФМ}}(\tau) F_{\text{ЧМ}}(t)$; индексами в круглых скобках около слагаемых δ обозначен порядок приближения.

При анализе обычных АД без модуляции в (8) и (9) нужно положить $m_{\text{ФМ}} = p_{\text{ФМ}} = 0$. Если при этом выполняется сильное неравенство $\Omega_a \tau \ll 1$, что свойственно большинству применений СБРЛ, то из (8), (9) получим $\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0$ и $\delta(t, \tau) = \omega t$ [39; 40]. Для случая анализа АД с ЧМ в этих выражениях следует приравнять нулю $m_{\text{АМ}}$ [25], а для анализа АД с АМ необходимо положить $m_{\text{ЧМ}} = 0$ [38; 41]. Таким образом, разработанная математическая модель АД является более общей, чем модели, полученные в предшествующих работах.

Ниже на основе полученной системы уравнений (5), (6) и разложений (7)–(15) с использованием программы «MatchCAD» выполнен численный анализ особенностей поведения АД с АЧМ для гармонического закона модулирующей функции. При выполнении этих вычислений приняты приближения, учитывающие реальные условия функционирования автодинных СБРЛ миллиметрового диапазона.

3. Расчет и анализ автодинных характеристик при гармонической АЧМ

Сигналы АД обычно регистрируются в цепи питания генератора (сигнал автодетектирования) или по изменению амплитуды его колебаний с помощью детекторного диода [16]. В формирование этих сигналов вносят свой вклад изменения амплитуды и фазы $\delta(t, \tau)$, обусловленные процессом модуляции и автодинными изменениями параметров генерации, а также перемещением цели. Ниже рассмотрим случай синусоидальной модуляции частоты при наличии сопутствующей ПАМ. Основными достоинствами этого вида модуляции являются простота реализации и сравнительно низкий уровень высших гармоник сигнала модуляции. В связи с этим выделение слабых сигналов на фоне основных составляющих сигнала выполняется довольно просто. Поэтому гармонический закон $f_m(t) = \sin(\Omega_m t)$ модулирующей функции, как отмечалось выше, широко используется в автодинных системах для решения многих задач ближней радиолокации.

Для нормальной работы СБРЛ с АЧМ частота Ω_m модуляции должна значительно отличаться от частоты Ω_a автодинного сигнала [2, 22]. При таких условиях спектр сигнала и спектральные составляющие, обусловленные процессом АЧМ, не перекрываются, что упрощает задачу частотной селекции полезных составляющих спектра автодинного сигнала. Случай формирования сигнала при выполнении сильного неравенства $\Omega_m \ll \Omega_a$,

когда составляющие полезного сигнала находятся в области выше частоты модуляции, рассмотрен в работе [35]. Здесь рассмотрим случай выполнения обратного неравенства $\Omega_m \gg \Omega_n$, когда основные спектральные составляющие полезного сигнала группируются не только в области низких «нулевых» частот, но и в окрестности гармоник частоты Ω_m модуляции [22; 38]. При этом выясним закономерности формирования амплитуды полезного сигнала в зависимости от расстояния до цели при вариации иных параметров СБРЛ с АЧМ.

Данную зависимость принято называть характеристикой амплитудной селекции (ХАС) цели по дальности. Основными уравнениями для анализа этой характеристики в настоящих исследованиях являются выражения (5) и (7) с учетом (8) и разложений в ряды (9)–(15). В этих выражениях реальное соотношение коэффициента АМ m_{AM} и амплитуда a_m автодинного отклика таково, что обычно $m_{AM} \gg a_m$ и влиянием автодинных изменений амплитуды колебаний на уровень отраженного излучения можно пренебречь. Поэтому выражение (7) для расчета ХАС можно значительно упростить, исключив из дальнейшего анализа третье слагаемое. Это выражение для относительного уровня автодинного сигнала $a_{отн}(t, \tau)$ после выполнения его нормировки имеет вид:

$$a_{отн}(t, \tau) = \frac{a(t, \tau)}{a_m} = \left[1 - \frac{m_{AM} M_{AM}(t)}{1 + m_{AM} \sin(\Omega_m t)} \right] \cos[\delta(t, \tau) - \psi], \quad (17)$$

где

$$M_{AM}(t) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} M_n(r_{нд}) \cos[(\Omega_m t) - \Psi_n(r_{нд})], \quad (18)$$

$M_n(r_{нд})$ – коэффициенты и $\Theta_n(r_{нд})$ – фазовые углы членов разложения (18) в ряд:

$$M_n(r_{нд}) = \frac{(2\pi r_{нд})^{2n-1}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi r_{нд}}{2n} \right)^2}, \quad \Psi_n(r_{нд}) = \arctg \frac{2\pi r_{нд}}{2n}, \quad (19)$$

$r_{нд} = \Omega_m \tau / 2\pi = l / (\Lambda_m / 2)$ – нормированное расстояние до цели; $\Lambda_m = 2\pi c / \Omega_m$ – длина модулирующей волны.

Здесь входящее в (17) выражение для фазовой характеристики $\delta(t, \tau)$ (16) перепишем с учетом нормировки расстояния до цели в виде:

$$\begin{aligned} \delta(t, \tau) = & \delta_{(0)} - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(r_{нд}) \sin[\delta_{(1)} + \theta - \Phi_n(r_{нд}) - \\ & - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(r_{нд}) \sin[\delta_{(2)} + \theta - \Phi_n(r_{нд}) - \dots \\ & - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(r_{нд}) \sin[\delta_{(k)} + \theta - \Phi_n(r_{нд})]] \dots], \end{aligned} \quad (20)$$

где $\delta_{(0, 1, 2, \dots, k)} = 2\pi\tau_{\text{нв}} + 2\pi k_{\text{ЧМ}} r_{\text{нр}} F_{\text{ЧМ}}(t)$; $\tau_{\text{нв}} = \omega_0 \tau / 2\pi$ – нормированное время; $k_{\text{ЧМ}} = \Delta\omega_{\text{ЧМ}} / \Omega_{\text{м}}$ – индекс ЧМ; $S_n(r_{\text{нр}})$ – коэффициенты и $\Phi_n(r_{\text{нр}})$ – фазовые углы членов разложения (20) в ряд:

$$S_n(r_{\text{нр}}) = \frac{(2\pi r_{\text{нр}}/z)^{2(n-1)}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi r_{\text{нр}}}{2nz}\right)^2}, \quad \Phi_n(r_{\text{нр}}) = \arctg \frac{2\pi r_{\text{нр}}}{2nz}; \quad (21)$$

$z = \Omega_{\text{м}} / \Omega_{\text{а}}$ – соотношение частот модуляции и автодинного сигнала;

$$F_{\text{ЧМ}}(t) = \sin(\Omega_{\text{м}} t) - \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} F_n(r_{\text{нр}}) \cos[(\Omega_{\text{м}} t) - \Theta_n(r_{\text{нр}})], \quad (22)$$

$F_n(r_{\text{нр}})$ – коэффициенты и $\Theta_n(r_{\text{нр}})$ – фазовые углы членов разложения (22):

$$F_n(r_{\text{нр}}) = \frac{(2\pi r_{\text{нр}})^{2n-1}}{2n!} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi r_{\text{нр}}}{2n+1}\right)^2}, \quad \Theta_n(r_{\text{нр}}) = \arctg \frac{2\pi r_{\text{нр}}}{2n+1}. \quad (23)$$

Из анализа (17) с учетом (18)–(23) следует, что ХАС является периодической функцией нормированного расстояния $r_{\text{нр}}$ до цели, определяемым периодом модулирующей функции $f_{\text{м}}(t)$. Поэтому далее ограничимся анализом только ее основной составляющей, заключенной в интервале $0 < r_{\text{нр}} < 1$. Кроме того, для облегчения анализа полагаем, что z представляет собой натуральный ряд чисел, причем $z \gg 1$.

Если условия работы СБРЛ таковы, что необходимо рассматривать ХАС только вблизи антенны (начальный участок ХАС), где выполняется неравенство $r_{\text{нр}} \ll 1$, то выражение (17) упрощается и имеет вид:

$$a_{\text{отн}}(t) = \left[1 - \frac{2\pi r_{\text{нр}} m_{\text{АМ}} \cos(\Omega_{\text{м}} t)}{1 + m_{\text{АМ}} \sin(\Omega_{\text{м}} t)} \right] \cos[2\pi k_{\text{ЧМ}} r_{\text{нр}} \sin(\Omega_{\text{м}} t)]. \quad (24)$$

Однако с увеличением расстояния до цели, где применение выражения (24) становится неприемлемым, число требуемых для расчета членов рядов в (18)–(23) быстро растет. Это значительно усложняет анализ ХАС. Например, при выполнении неравенства $r_{\text{нр}} \leq 1$, которое означает, что время запаздывания τ отраженного излучения должно составлять величину не более шестой части полупериода модулирующей функции, необходимое число первых членов разложений (18)–(23) должно быть не менее пяти. Для корректного описания ХАС на всем ее интервале $0 < r_{\text{нр}} < 1$, как показали расчеты, требуется значительно увеличить число N членов этого ряда: $N \geq 25$. В таких условиях в общем случае произвольного значения $r_{\text{нр}}$ выяснение особенностей формирования автодинных сигналов аналитическими мето-

дами представляется неприемлемым, поэтому далее для достижения поставленной цели воспользуемся численным методом.

На рис. 2 приведены результаты расчетов объемных ХАС как нормированных функций $J_m(k_{\text{ЧМ}}, r_{\text{нр}})$ двух переменных: величины индекса частотной модуляции $k_{\text{ЧМ}}$ (ось «модуляции») и нормированного на половину длины модулирующей волны расстояния до цели $r_{\text{нр}}$ (ось «расстояния»). Значения функций $J_m(k_{\text{ЧМ}}, r_{\text{нр}})$, отложенные по вертикальной оси, представляют собой разложение в гармонический ряд Фурье функции (17) с учетом (18)–(23) по периоду модуляции $f_m(t)$. На «нулевой» гармонике по этой оси отложены значения J_0 (строка 1). На первой гармонике частоты модуляции эта ось обозначена как J_1 (строка 2), на второй – J_2 (строка 3), третьей – J_3 (строка 4), четвертой – J_4 (строка 5). При этом ХАС, рассчитанные для различных значений коэффициента АМ, когда $m_{\text{АМ}} = 0$, $m_{\text{АМ}} = 0,2$ и $m_{\text{АМ}} = 0,4$, соответственно представлены в столбцах *а*, *б* и *в*.

На рис. 3 и 4 приведены семейства графиков поперечного сечения ХАС по осям расстояния $r_{\text{нр}}$ и модуляции $k_{\text{ЧМ}}$ соответственно, полученные для различных значений индекса ЧМ $k_{\text{ЧМ}}$, коэффициента АМ $m_{\text{АМ}}$ и параметра ОС $C_{\text{ОС}}$. Ввиду симметрии ХАС по оси $r_{\text{нр}}$ характеристики $J_m(r_{\text{нр}})$ на рис. 3 показаны для области значений $r_{\text{нр}} \in [0, 0,5]$.

Для случая равномерного изменения нормированного времени $\tau_{\text{нв}}$ на рис. 5 и 6 при величине параметра ОС $C_{\text{ОС}} = 0,5$ и индекса ЧМ $k_{\text{ЧМ}} = 2$ представлены результаты расчета временных $a_{\text{отн}}(\tau_{\text{нв}})$ и спектральных $a_{\text{отн}}(F_{\text{нч}})$ диаграмм автодинного сигнала, полученные для АД с ЧМ ($m_{\text{АМ}} = 0$) и АЧМ ($m_{\text{АМ}} = 0,2$) соответственно (здесь $F_{\text{нч}} = \Omega / \Omega_m$ – нормированная частота). Расчеты диаграмм выполнялись для соотношения частот $z = 10$, углах смещения фаз $\theta = 1$, $\psi = 0,1$ и при различных значениях нормированного расстояния $r_{\text{нр}}$ (см. рис. 5 и 6 под литерами *а–д*).

Из характеристик, представленных на рис. 2, видно, что наличие АМ излучения АД вызывает некоторый рост уровня сигнала на нулевой гармонике частоты модуляции в средней части ХАС (см. рис. 2, 1-б и 1-в, а также кривые 1 на рис. 4). На гармониках модуляции это явление также заметно, если сравнить кривые 2–4 на рис. 4, полученные при отсутствии АМ (рис. 4, *а* и *в*) и ее наличии (рис. 4, *б* и *г*). Этот рост объясняется явлением регенерации сигнала в петле обратной связи «генератор – цель – генератор», когда процесс АМ колебаний и воздействие амплитуды отраженного излучения находятся в фазе. Подобное явление наблюдается, например, в измерителях малых дальностей «рециркуляционного» типа [38; 42–44]. В этих измерителях полученный приемником СВРЛ сигнал от цели на частоте



Рис. 2. Характеристики амплитудной селекции (ХАС) сигнала по изменению амплитуды колебаний АД с АЧМ на нулевой J_0 (строка 1), J_1 первой (строка 2), второй J_2 (строка 3), третьей J_3 (строка 4) и четвертой J_4 (строка 5) гармониках модуляции, рассчитанные для различных значений m_{AM} : $m_{AM} = 0$ (столбец а), $m_{AM} = 0,2$ (б) и $m_{AM} = 0,4$ (в)

Fig. 2. Characteristics of the amplitude selection (CAS) signal on the change in the amplitude of the oscillations from AD the AMF to zero J_0 (line 1), J_1 first (line 2), second J_2 (line 3), third J_3 (line 4) and fourth J_4 (line 5) harmonics modulation, calculated for different values m_{AM} : $m_{AM} = 0$ (column а), $m_{AM} = 0,2$ (column б) and $m_{AM} = 0,4$ (column в)

модуляции после усиления снова подается в необходимой полярности на модулятор передатчика. Подбором параметров элементов замкнутого контура (усиления и сдвига фазы) можно добиться режима генерации на некоторой частоте, которая зависит от времени задержки отраженного излучения. По частоте генерации судят о дальности до цели.

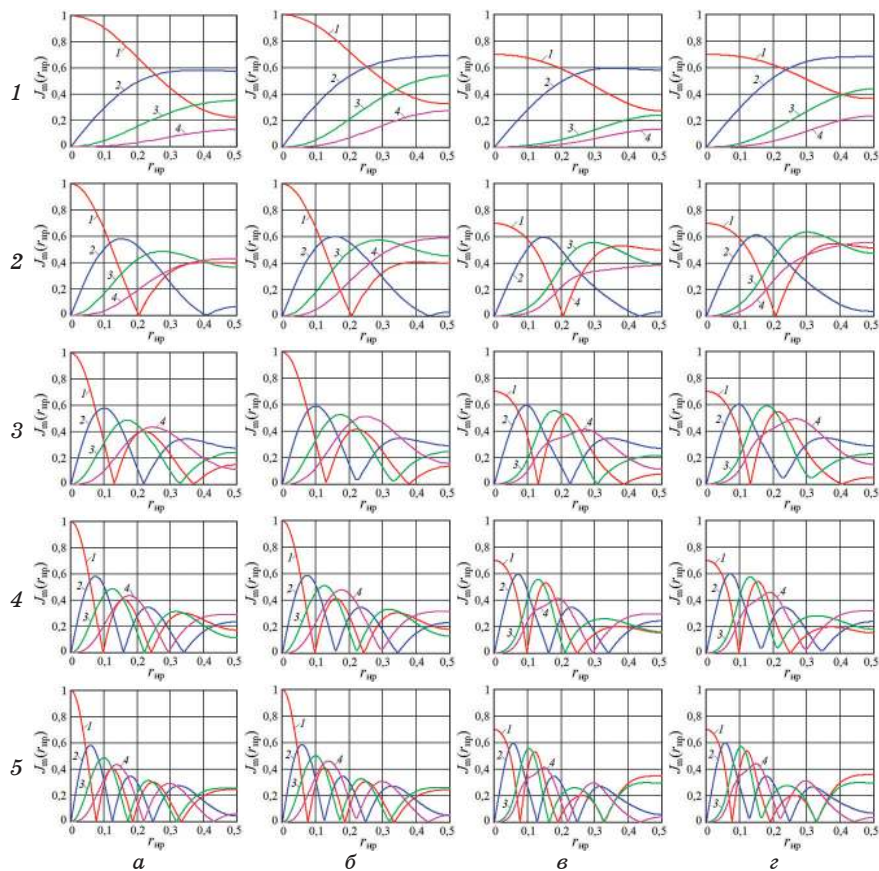


Рис. 3. Графики сечений ХАС вдоль оси $r_{\text{нр}} J_m(r_{\text{нр}})$ на нулевой J_0 (кривые 1), первой J_1 (кривые 2), второй J_2 (кривые 3) и третьей J_3 (кривые 4) гармониках модуляции, рассчитанные для случаев $k_{\text{чм}} = 1$ (строка 1), $k_{\text{чм}} = 2$ (строка 2), $k_{\text{чм}} = 3$ (строка 3), $k_{\text{чм}} = 4$ (строка 4) и $k_{\text{чм}} = 5$ (строка 5) при различных значениях $m_{\text{ам}}$ и $C_{\text{ос}}$: $m_{\text{ам}} = 0$, $C_{\text{ос}} = 0$ (столбец а); $m_{\text{ам}} = 0,4$, $C_{\text{ос}} = 0$ (столбец б); $m_{\text{ам}} = 0$, $C_{\text{ос}} = 0,4$ (столбец в); $m_{\text{ам}} = 0,4$, $C_{\text{ос}} = 0,4$ (столбец г)

Fig. 3. Graphs of CAS cross-sections along the axis $r_{\text{нр}} J_m(r_{\text{нр}})$ at zero J_0 (curves 1), first J_1 (curves 2), second J_2 (curves 3) and third J_3 (curves 4) modulation harmonics, calculated for the cases $k_{\text{чм}} = 1$ (line 1), $k_{\text{чм}} = 2$ (line 2), $k_{\text{чм}} = 3$ (line 3), $k_{\text{чм}} = 4$ (line 4) and $k_{\text{чм}} = 5$ (line 5) at different values $m_{\text{ам}}$ and $C_{\text{ос}}$: $m_{\text{ам}} = 0$, $C_{\text{ос}} = 0$ (column а); $m_{\text{ам}} = 0,4$, $C_{\text{ос}} = 0$ (column б); $m_{\text{ам}} = 0$, $C_{\text{ос}} = 0,4$ (column в); $m_{\text{ам}} = 0,4$, $C_{\text{ос}} = 0,4$ (column г)

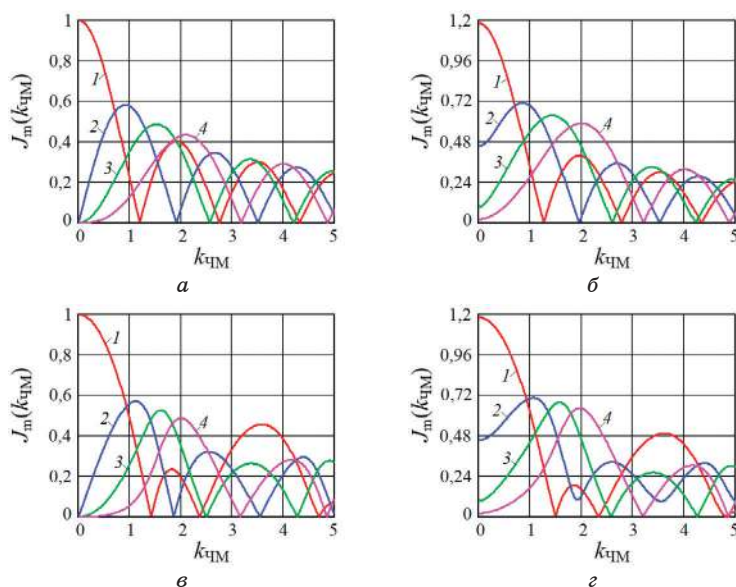


Рис. 4. Графики сечения ХАС вдоль оси индекса модуляции $k_{\text{ЧМ}}$ на нулевой J_0 (кривые 1), первой J_1 (кривые 2), второй J_2 (кривые 3) и третьей J_3 (кривые 4) гармониках модуляции, рассчитанные при $r_{\text{нр}} = 0,5$ и различных значениях $m_{\text{АМ}}$ и $C_{\text{ОС}}$: $m_{\text{АМ}} = 0$, $C_{\text{ОС}} = 0$ (а); $m_{\text{АМ}} = 0,4$, $C_{\text{ОС}} = 0$ (б); $m_{\text{АМ}} = 0$, $C_{\text{ОС}} = 0,4$ (в); $m_{\text{АМ}} = 0,4$, $C_{\text{ОС}} = 0,4$ (г)

Fig. 4. Graphs of the CAS cross-section along the modulation index axis $k_{\text{ЧМ}}$ at zero J_0 (curves 1), first J_1 (curves 2), second J_2 (curves 3) and third J_3 (curves 4) modulation harmonics, calculated for the cases $r_{\text{нр}} = 0,5$ and at different values $m_{\text{АМ}}$ and $C_{\text{ОС}}$: $m_{\text{АМ}} = 0$, $C_{\text{ОС}} = 0$ (а); $m_{\text{АМ}} = 0,4$, $C_{\text{ОС}} = 0$ (б); $m_{\text{АМ}} = 0$, $C_{\text{ОС}} = 0,4$ (в); $m_{\text{АМ}} = 0,4$, $C_{\text{ОС}} = 0,4$ (г)

Графики сечений ХАС вдоль оси $r_{\text{нр}}$, представленные на рис. 3, столбец а, назовем стандартными. Они соответствуют случаю, который можно назвать случаем «идеального» автодина, у которого гипотетически отсутствуют ПАМ ($m_{\text{АМ}} = 0$) при ЧМ и автодинные изменения частоты ($C_{\text{ОС}} = 0$) при воздействии отраженного от цели излучения. Для выяснения влияния ПАМ на вид ХАС сравним между собой графики столбцов а и б на рис. 3. Из этого сравнения видим, что наличие ПАМ вызывает изменения уровня сигнала $J_m(r_{\text{нр}})$ лишь в средней части сечения ХАС, где $0 < r_{\text{нр}} < 1$. При этом крайние значения сечения ХАС, где $r_{\text{нр}} = 0$ и $r_{\text{нр}} = 1$, остаются неизменными. Заметные изменения относительно стандартного вида сечения ХАС $J_m(r_{\text{нр}})$ наблюдаются преимущественно на нулевой $J_0(r_{\text{нр}})$ и на низших гармониках частоты модуляции. Из кривых 2–4 на графиках рис. 4 видно, что ПАМ колебаний вызывает отклик АД на гармониках $J_m(k_{\text{ЧМ}})$ модуляции даже в области значений, где $k_{\text{ЧМ}} \rightarrow 0$. Расчеты при иных значениях параметров показали, что с уве-

личением номера гармоники m и индекса модуляции $k_{\text{ЧМ}}$ влияние ПАМ на вид сечения ХАС АД с ЧМ существенно ослабевает.

Из сравнения представленных в столбцах a , b и $г$ графиков рис. 3 не трудно видеть, что на форму сечения ХАС значительно сильнее, чем ПАМ, оказывают влияние автодинные изменения частоты. Эти изменения, которые мы учитываем в расчетах соответствующим выбором значения параметра C_{OC} , вызывают значительные изменения не только внутри сечения ХАС, но и на ее краях. Этот вывод подтверждается также ходом одноименных кривых на графиках рис. 4.

Временные диаграммы $a_{\text{отн}}(\tau_{\text{нв}})$ отклика АД с ЧМ, как видно на рис. 5, содержат медленную и быструю составляющие. Медленная составляющая в чистом виде показана на рис. 5, a и e . Она совпадает с амплитудной характеристикой АД без модуляции [45]. На этих графиках видно, что как в начале ($r_{\text{нр}} = 0$), так и в конце ($r_{\text{нр}} = 1$) каждой ХАС автодинный отклик представлен только в виде доплеровского сигнала, но с присущими АД искажениями при $C_{\text{OC}} \neq 0$. Отклик на гармониках частоты модуляции Ω_m в этих случаях отсутствует. При смещении цели в среднюю область ХАС, где $0 < r_{\text{нр}} < 1$ происходит наложение на доплеровскую составляющую сигнала дополнительных «быстрых» осцилляций, обусловленных процессом взаимодействия отраженных ЧМ колебаний с излучаемыми, которые также промодулированы по частоте (см. рис. 5, b – $г$). Эти осцилляции вызывают зависимость уровня сигнала на гармониках частоты модуляции Ω_m в соответствии с функциями Бесселя (см. рис. 4, a).

Из представленных на рис. 5 спектров видно, что спектральные составляющие, полученные в АД на частотах, кратных частоте модуляции Ω_m , при движении цели распадаются на две составляющие половинной амплитуды. Данные составляющие смещены от частоты, кратной Ω_m , на величину частоты Ω_a автодинного сигнала, равной частоте Доплера. Наличие ангармонических искажений на временных диаграммах и высших гармоник частоты автодинного сигнала в его спектре (см. рис. 5) объясняется известной нелинейностью набега фазы $\delta(t, \tau)$ отраженного излучения, вызванной автодинными изменениями частоты генерации АД [15; 21; 25; 45]. Степень этих искажений сигналов определяется преимущественно величиной параметра обратной связи C_{OC} . Так, при $C_{\text{OC}} \ll 1$ автодинные изменения являются практически гармоническими, а с его увеличением – значительно отличаются от синусоиды. Степень этих искажений также зависит от внутренних параметров генератора, таких как добротность колебательной системы, знаки и величины параметров неизохронности (через угол θ) и неизодромности (через угол ψ) генератора.

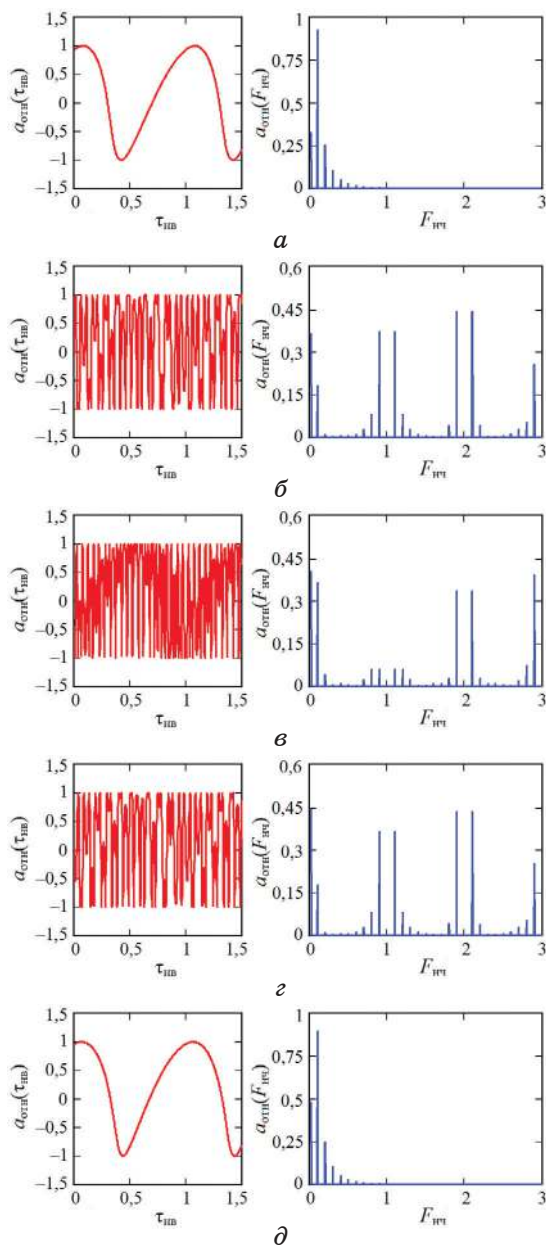


Рис. 5. Временные $a_{отн}(\tau_{нб})$ и спектральные $a_{отн}(F_{нч})$ диаграммы автодинного сигнала рассчитанные для осциллятора с ЧМ при $k_{ЧМ} = 2$, $m_{AM} = 0$, $C_{OC} = 0,5$ и различных значений $r_{нр}$: $r_{нр} = 0$ (а); $r_{нр} = 0,25$ (б); $r_{нр} = 0,5$ (в); $r_{нр} = 0,75$ (г); $r_{нр} = 1$ (д)

Fig. 5. Time $a_{отн}(\tau_{нб})$ and spectral $a_{отн}(F_{нч})$ diagrams of the autodyne signal calculated for the oscillator with FM at $k_{ЧМ} = 2$, $m_{AM} = 0$, $C_{OC} = 0,5$ and different values $r_{нр}$: $r_{нр} = 0$ (а); $r_{нр} = 0,25$ (б); $r_{нр} = 0,5$ (в); $r_{нр} = 0,75$ (г); $r_{нр} = 1$ (д)

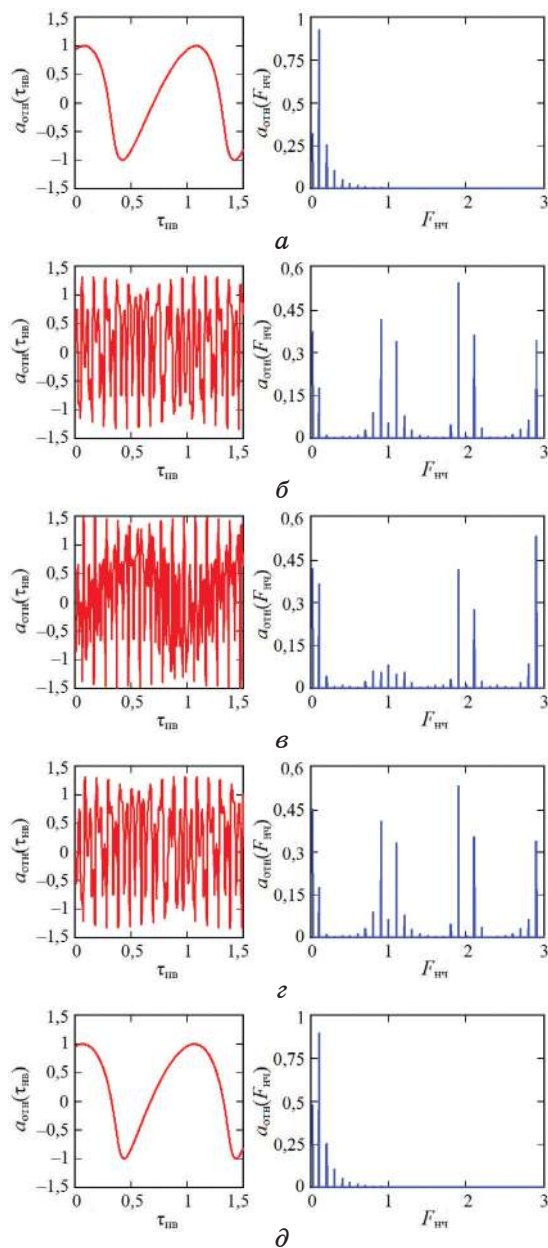


Рис. 6. Временные $a_{отн}(\tau_{нв})$ и спектральные $a_{отн}(F_{нв})$ диаграммы автодинного сигнала рассчитанные для осциллятора с АЧМ при $k_{чм} = 2$, $m_{AM} = 0$, $C_{OC} = 0,5$ и различных значений $r_{нв}$: $r_{нв} = 0$ (а); $r_{нв} = 0,25$ (б); $r_{нв} = 0,5$ (в); $r_{нв} = 0,75$ (г); $r_{нв} = 1$ (д)

Fig. 6. Time $a_{отн}(\tau_{нв})$ and spectral $a_{отн}(F_{нв})$ diagrams of the autodyne signals calculated for the oscillator with AFM at $k_{чм} = 2$, $m_{AM} = 0$, $C_{OC} = 0,5$ and different values $r_{нв}$: $r_{нв} = 0$ (а); $r_{нв} = 0,25$ (б); $r_{нв} = 0,5$ (в); $r_{нв} = 0,75$ (г); $r_{нв} = 1$ (д)

В целом, как видно на временных и спектральных диаграммах рис. 5 и 6, формирование автодинного отклика на выходе АД с АЧМ происходит аналогично, как в случае АД с ЧМ. Например, в начале ($r_{\text{нр}} = 0$) и в конце ($r_{\text{нр}} = 1$) каждой ХАС автодинный отклик представлен в виде доплеровского сигнала, а отклик на гармониках частоты Ω_m модуляции отсутствует. Основные отличия в формировании сигналов на выходе АД с АЧМ имеют место в средней части ХАС, где $0 < r_{\text{нр}} < 1$. Здесь формирование сигналов как в области доплеровских частот, так и на гармониках модуляции обусловлено не только процессом ЧМ колебаний АД, но и процессом АМ. При этом вклад АМ на временных диаграммах рис. 6, б–д выглядит в виде пиков (выбросов), выходящих за пределы амплитуды сигнала, при ЧМ. Очевидно, что за счет этих пиков происходит дополнительное перераспределение энергии спектральных составляющих сигнала и появление гармоник на частотах, кратных частоте Ω_m модуляции. Кроме того, это перераспределение вызывает заметную асимметрию спектра сигналов на гармониках частоты модуляции, а также изменения в поведении уровня сигнала на гармониках частоты модуляции Ω_m , которое становится отличным от поведения функций Бесселя (см. рис. 4, б–д).

Как видно на рис. 2 и 3, ХАС автодинного отклика на определенных расстояниях $r_{\text{нр}}$ от СБРЛ имеют «мертвые» зоны по дальности, где наблюдается подавление сигналов, отраженных от целей. Одна из таких зон находится в непосредственной близости от СБРЛ, где $r_{\text{нр}} = 0$. В этой зоне появление сравнительно мелких отражающих объектов, например насекомых, капель дождя и других, вызывает появление мощных отраженных сигналов, которые в ряде применений нарушают нормальную работу СБРЛ. В данном случае наличие мертвой зоны вблизи антенны СБРЛ с ЧМ при выделении сигналов на гармониках частоты модуляции является весьма важным и полезным свойством этих систем, обеспечивающим их повышенную помехоустойчивость.

4. Результаты экспериментальных исследований

Для экспериментальных исследований использовался генераторный модуль «Тигель-08М» 8-миллиметрового диапазона (см. рис. 7, а), изготовленный по гибридно-интегральной технологии на основе двухмезового диода Ганна [13]. На подложке этого модуля в щелевой резонатор параллельно (по СВЧ) установлены чипы планарного диода Ганна и варикапа, развязанные по цепям смещения (показаны на рис. 7, б цифрами «1» и «2» соответственно). Варикап предназначен для управления частотой генерации модуля. Выделение автодинного сигнала производилось в цепи

смещения диода Ганна с помощью специальной схемы блока регистрации, преобразующего изменения среднего значения тока в напряжение [16]. Напряжение смещения на диоде Ганна было выбрано $U_0 = 3,9$ В, ток потребления составлял 0,2 А. Частота генерации модуля 37,5 ГГц, его выходная мощность 15 мВт.

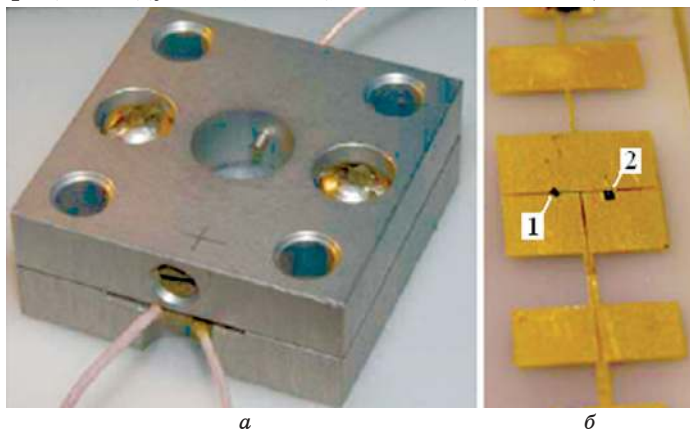
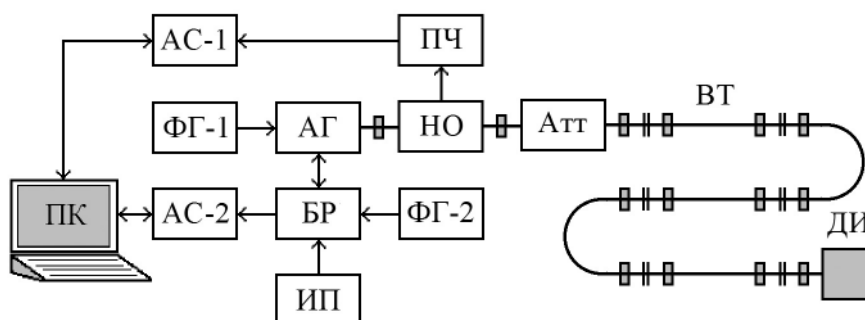


Рис. 7. Внешний вид модуля «Тигель-08М» (а) и топология диодной подложки (б)

Fig. 7. External view of the module “Tigel-08M” (a) and topology of the diode insertion (b)

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 8. Исследуемый автодинный генератор АГ связан с доплеровским имитатором ДИ [45] волноводным трактом ВТ, в котором находятся также направленный ответвитель НО и переменный аттенюатор Атт. Волноводный тракт ВТ требуемой протяженности предназначен для моделирования запаздывания отраженного излучения, а аттенюатор Атт – затухания, распространяющегося в пространстве до цели и обратно излучения. Боковое плечо направленного ответвителя НО подключено к входу переносчика частоты ПЧ, выход которого соединен с входом первого анализатора спектра АС-1.

Напряжение от источника питания ИП на исследуемый генератор АГ поступает через блок регистрации БР. Синусоидальное напряжение частотой 10 МГц по первому варианту модуляции частоты генерации автодинного генератора АГ поступает от функционального генератора ФГ-1 на варикап АГ. По второму варианту этот же функциональный генератор, указанный как ФГ-2, подключается к блоку регистрации БР для модуляции частоты автодинного генератора АГ по цепи питания. Выходной сигнал этого блока подается на вход второго анализатора спектра АС-2. Оба анализатора спектра типа USB-SA44B связаны с персональным компьютером ПК через USB-кабели.



Расшифровка аббревиатур – Abbreviations meaning

АГ	Автодинный генератор Autodyne oscillator	ПК	Персональный компьютер Personal computer
Атт	Аттенуатор Attenuator	ИП	Источник питания Power supply
НО	Направленный ответвитель Directional coupler	БР	Блок регистрации Registration unit
ДИ	Доплеровский имитатор Doppler simulator	АС-1	Анализатор спектра – 1 Spectrum analyzers – 1
ПЧ	Переносчик частоты Frequency converter	АС-2	Анализатор спектра – 2 Spectrum analyzers – 2
ФГ-1,2	Функциональный генератор Functional generator	ВТ	Волноводный тракт Waveguide path

Рис. 8. Функциональная схема экспериментальной установки

Fig. 8. Block diagram experimental setup

В экспериментах были реализованы следующие условия: длина волноводного тракта ВТ сечением $7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2$ между генератором АГ и имитатором ДИ (см. рис. 8) равнялась $l_b = 9,6 \text{ м}$, т. е. время запаздывания отраженного излучения в волноводе, рассчитанное по формуле $\tau = 2l_b / c \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{кр})^2}$, где $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны волновода, составляло $\tau = 75 \times 10^{-9} \text{ с}$. Данное расстояние примерно соответствует при выбранной частоте модуляции 10 МГц середине ХАС, где $r_{кр} = 0,5$. Переменным аттенуатором Атт в тракте в зависимости от условий эксперимента устанавливалась величина коэффициента отражения Γ_0 , при которой автодинная девиация частоты составляла $\Delta\omega_a = 2\pi \times 0,84 \times 10^6$, $\Delta\omega_a = 2\pi \times 0,42 \times 10^6$ или $\Delta\omega_a = 2\pi \times 0,05 \times 10^6$, что соответствует расчетным значениям параметра обратной связи $C_{ос} = 0,4$, $C_{ос} = 0,2$ или $C_{ос} = 0,02$. Величина девиации частоты $\Delta\omega_a$ оценивалась с помощью анализатора спектра АС-1 при работающем имитаторе ДИ по ширине спектра СВЧ-излучения генератора АГ в режиме без модуляции.

На рис. 9–11 представлены графики относительных уровней сигнала на нулевой J_0 , первой J_1 , второй J_2 и третьей J_3 гармониках модуляции в зависимости от величины индекса модуля-

ции $k_{\text{ЧМ}}$, полученные при различных условиях экспериментов. Величина этого индекса изменялась от значения $k_{\text{ЧМ}} = 0,2$ до $k_{\text{ЧМ}} = 4$ с шагом 0,2. Кривые 1 на рис. 9 получены для случая модуляции частоты генерации с помощью варикапа, при этом ПАМ излучения практически отсутствует ($m_{\text{АМ}} = 0$). Кривые 2 на этом же рисунке получены для случая модуляции по цепи питания, при этом коэффициент $m_{\text{АМ}} = 0,46$.

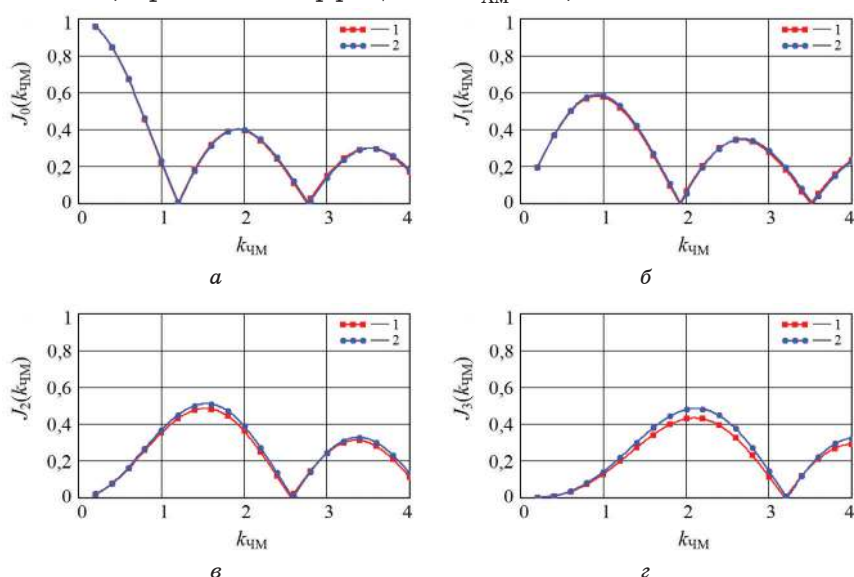


Рис. 9. Экспериментальные графики зависимостей относительной амплитуды сигнала на нулевой J_0 (а), первой J_1 (б), второй J_2 (в) и третьей J_3 (г) гармониках модуляции от величины индекса модуляции $k_{\text{ЧМ}}$, полученные при $l_{\text{в}} = 9,6$, $C_{\text{ОС}} = 0,02$ и различных значениях $m_{\text{АМ}}$: $m_{\text{АМ}} = 0$ (кривые 1), $m_{\text{АМ}} = 0,46$ (кривые 2)

Fig. 9. Experimental graphs of the dependences of the relative signal amplitude at the zero J_0 (a), first J_1 (б), second J_2 (в) and third J_3 (г) modulation harmonics on the modulation index $k_{\text{ЧМ}}$, obtained at $l_{\text{в}} = 9,6$, $C_{\text{ОС}} = 0,02$ and various values $m_{\text{АМ}}$: $m_{\text{АМ}} = 0$ (curves 1), $m_{\text{АМ}} = 0,46$ (curves 2)

На рис. 10 представлены графики относительных уровней сигнала на гармониках при модуляции частоты генерации с помощью варикапа ($m_{\text{АМ}} = 0$) для различных значений $C_{\text{ОС}}$: $C_{\text{ОС}} = 0,02$ (кривые 1), $C_{\text{ОС}} = 0,4$ (кривые 2) и $C_{\text{ОС}} = 0,2$ (кривая 3). Аналогичные графики представлены на рис. 11, но при модуляции СВЧ излучения модуля «Тигель-08М» по цепи питания, когда имеет место ПАМ ($m_{\text{АМ}} = 0,46$).

Графики зависимостей относительных амплитуд сигнала на указанных выше гармониках модуляции от длины волноводного тракта $l_{\text{в}}$ представлены на рис. 12. Длина волноводного трак-

та изменялась от 0,4 до 9,6 м с шагом 0,4 м. Графики получены при величине индекса модуляции $k_{\text{ЧМ}} = 4$ для различных значений $C_{\text{ОС}}$: $C_{\text{ОС}} = 0,02$ (кривые 1) и $C_{\text{ОС}} = 0,4$ (кривые 2).

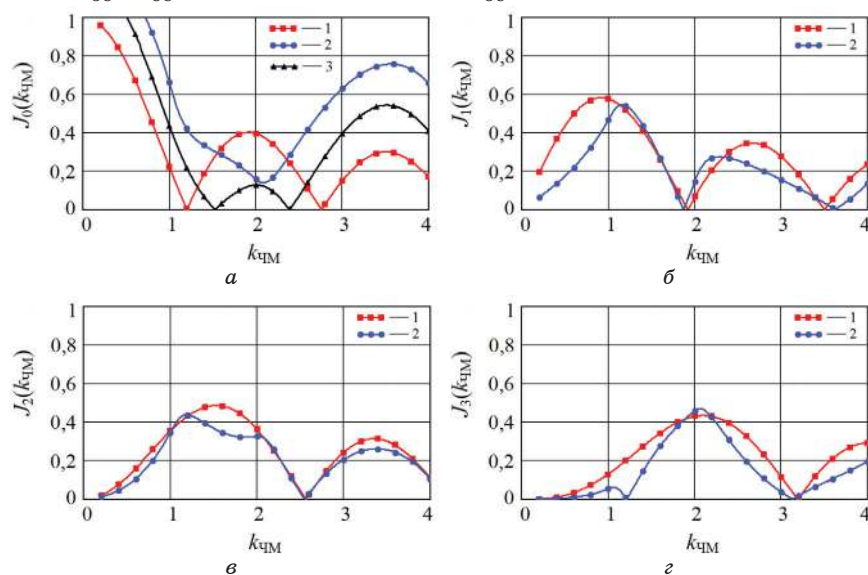


Рис. 10. Экспериментальные графики зависимостей нормированной амплитуды сигнала на нулевой J_0 (а), первой J_1 (б), второй J_2 (в) и третьей J_3 (г) гармониках модуляции от величины индекса модуляции $k_{\text{ЧМ}}$, полученные при $l_{\text{в}} = 9,6$, $m_{\text{АМ}} = 0$ и различных значениях $C_{\text{ОС}}$: $C_{\text{ОС}} = 0,02$ (кривые 1), $C_{\text{ОС}} = 0,4$ (кривые 2) и $C_{\text{ОС}} = 0,2$ (кривая 3)

Fig. 10. Experimental graphs of the dependences of the relative signal amplitude at the zero J_0 (а), first J_1 (б), second J_2 (в) and third J_3 (г) modulation harmonics on the modulation index $k_{\text{ЧМ}}$, obtained at $l_{\text{в}} = 9,6$, $m_{\text{АМ}} = 0$ and various values $C_{\text{ОС}}$: $C_{\text{ОС}} = 0,02$ (curves 1), $C_{\text{ОС}} = 0,4$ (curves 2) and $C_{\text{ОС}} = 0,2$ (curves 3)

На рис. 13, а представлен спектр СВЧ-колебаний модуля «Тигель-08М», полученный с помощью анализатора спектра АС-1 при гармонической модуляции напряжения смещения на варикапе. Величина индекса $k_{\text{ЧМ}} = 4$, частота модуляции равна 10 МГц. Спектр СВЧ-колебаний этого же модуля при модуляции напряжения питания диода Ганна при прежних значениях индекса и частоты модуляции представлен на рис. 13, б. Асимметрия спектра в последнем случае указывает на наличие сопутствующей АМ с величиной коэффициента $m_{\text{АМ}}$ около 0,46.

При указанных здесь условиях эксперимента с помощью анализатора спектра АС-2 (см. рис. 8) нами были получены спектры автодинных сигналов на выходе блока регистрации БР для

случаев модуляции модуля «Тигель-08М» по изменению напряжения смещения на варикапе и на диоде Ганна, представленные на рис. 14, а и б соответственно. При этом скорость движения отражателя имитатора ДИ поддерживалась постоянной, при которой частота автодинного сигнала составляла 10 кГц. На спектрах представлены области нулевой и первых трех гармоник частоты модуляции.

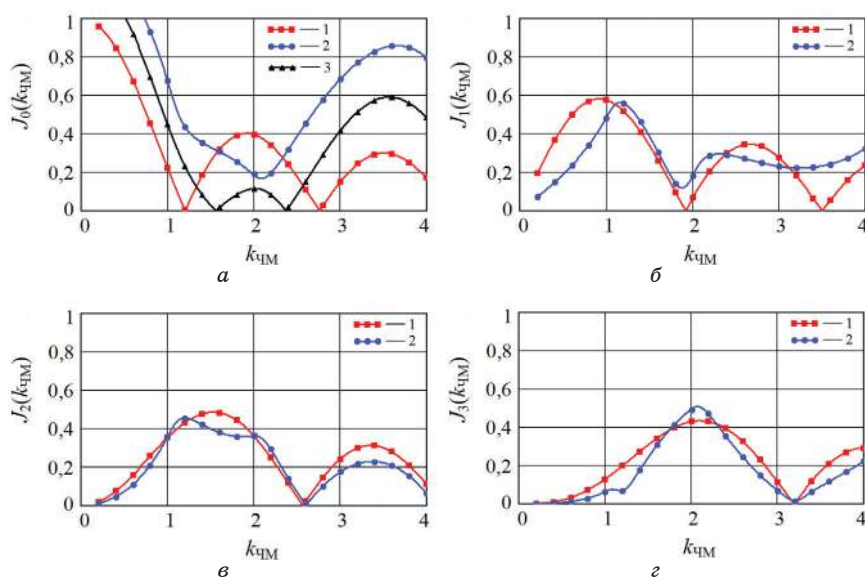


Рис. 11. Экспериментальные графики зависимостей нормированной амплитуды сигнала на нулевой J_0 (а), первой J_1 (б), второй J_2 (в) и третьей J_3 (г) гармониках модуляции от величины индекса модуляции $k_{\text{чм}}$, полученные при $l_b = 9,6$, $m_{\text{AM}} = 0,46$ и различных значениях C_{oc} : $C_{\text{oc}} = 0,02$ (кривые 1), $C_{\text{oc}} = 0,4$ (кривые 2) и $C_{\text{oc}} = 0,2$ (кривая 3)

Fig. 11. Experimental graphs of the dependences of the relative signal amplitude at the zero J_0 (a), first J_1 (б), second J_2 (в) and third J_3 (г) modulation harmonics on the modulation index $k_{\text{чм}}$, obtained at $l_b = 9,6$, $m_{\text{AM}} = 0,46$ and various values C_{oc} : $C_{\text{oc}} = 0,02$ (curves 1), $C_{\text{oc}} = 0,4$ (curves 2) and $C_{\text{oc}} = 0,2$ (curves 3)

Из спектров на рис. 14 видно, что уровень первой гармоники ПАМ значительно превышает уровень гармоник более высокого порядка. Существенные отличия вида спектра исследуемых способов модуляции генераторных модулей состоят в асимметрии спектров в окрестности гармоник частоты модуляции в случае модуляции генераторного модуля по цепи питания, у которого уровень сопутствующей АМ излучения значительно больше, чем в случае модуляции по изменению смещения на варикапе (см. рис. 14, б).

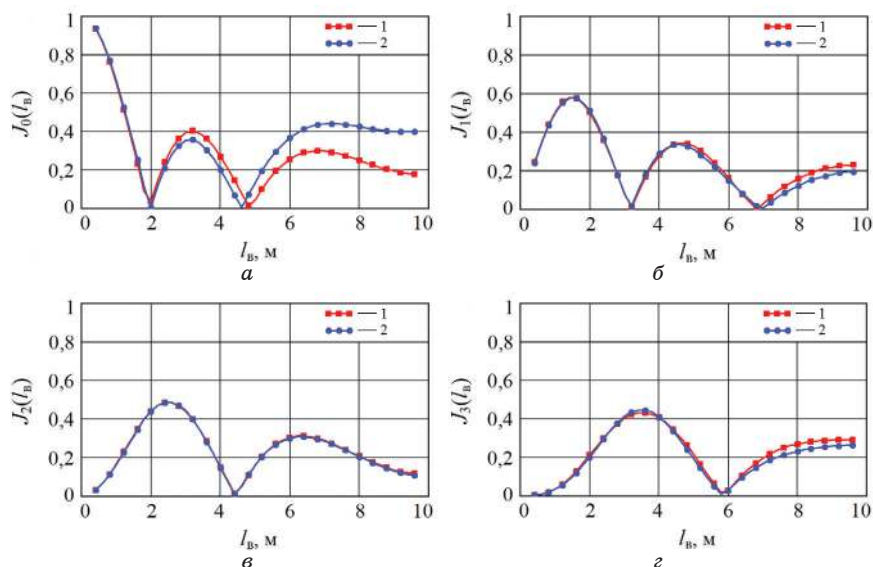


Рис. 12. Экспериментальные графики зависимостей нормированной амплитуды сигнала на нулевой J_0 (а), первой J_1 (б), второй J_2 (в) и третьей J_3 (г) гармониках модуляции от длины волноводного тракта l_n , полученные при $k_{\text{ЧМ}} = 4$ и различных значениях $C_{\text{ОС}}$: $C_{\text{ОС}} = 0,02$ (кривые 1) и $C_{\text{ОС}} = 0,4$ (кривые 2)

Fig. 12. Experimental graphs of the dependences of the relative signal amplitude at the zero J_0 (a), first J_1 (б), second J_2 (в) and third J_3 (г) modulation harmonics on the length of the waveguide path l_n , obtained at $k_{\text{ЧМ}} = 4$ and different values $C_{\text{ОС}}$: $C_{\text{ОС}} = 0,02$ (curves 1) and $C_{\text{ОС}} = 0,4$ (curves 2)

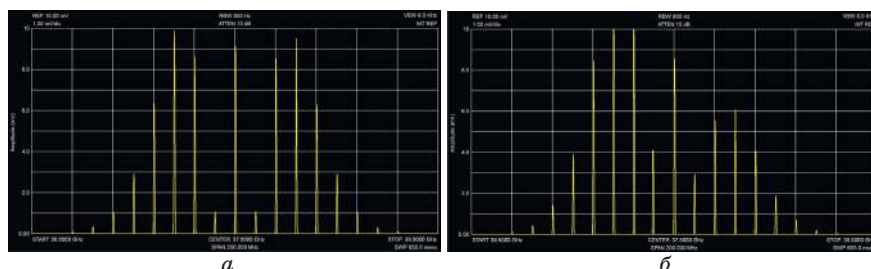


Рис. 13. Спектры колебаний на выходе СВЧ модуля «Тигель-08М», полученные при модуляции напряжения смещения на варикапе (а) и смещения на диоде Ганна (б)

Fig. 13. Oscillation spectra at the output of the “Tigel-08M” microwave module obtained by modulating the bias voltage across the varicap (a) and bias across the Gunn diode (б)

Наличие высших гармоник частоты Доплера в указанных областях спектра на рис. 14 обусловлено ангармоническими искажениями сигналов. Эти искажения, как известно [45], наблю-

даются в условиях, когда величина параметра обратной связи C_{oc} соизмерима с единицей. В случае уменьшения величины этого параметра, например увеличением затухания аттенюатора Атт на 10–20 дБ, высшие гармоники частоты Доплера практически исчезают, и автодинный сигнал при этом становится синусоидальным. Из сравнения рассчитанных выше спектральных диаграмм, представленных на рис. 5 и 6, и экспериментальных спектров, приведенных на рис. 14, видно их качественное соответствие.

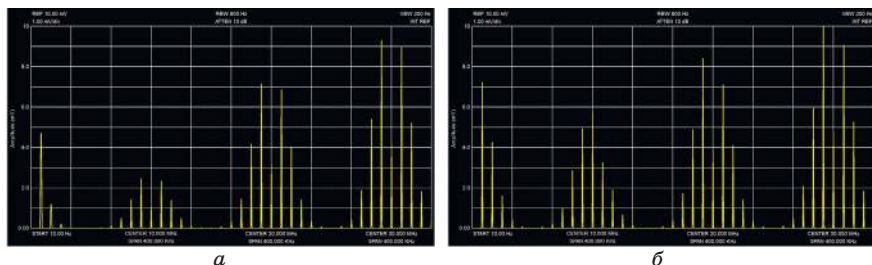


Рис. 14. Спектры автодинного сигнала на выходе блока регистрации БР, полученные для случаев модуляции модуля «Тигель-08М» по изменению напряжения смещения на варикапе (а) и смещения на диоде Ганна (б)

Fig. 14. Spectra of the autodyne signal at the output of the BR registration unit, obtained for the cases of modulation of the “Tigel-08M” module by changing the bias voltage across the varicap (a) and the bias across the Gunn diode (b)

Из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 9, а–г видно, что полученные зависимости уровня автодинного сигнала для случаев модуляции частоты генерации с помощью варикапа и по цепи питания практически не отличаются между собой. Эти графики полностью соответствуют рассчитанным выше графикам сечения ХАС вдоль оси индекса модуляции $k_{чм}$ на различных гармониках модуляции (см. рис. 4, а), полученным для гипотетического случая отсутствия ПАМ. Отличия «теоретических» кривых рис. 4, б и экспериментальных, представленных кривыми 2 на рис. 9, объясняются тем, что в реальном генераторе связь между уровнем ПАМ и амплитудой модулирующей функции прямая. Этот фактор не учитывался в исходных данных при расчетах и построениях кривых рис. 4, б. Аналогично объясняются причины отличий в поведении графиков рис. 4, г и рис. 10 и 11, полученных для случаев, когда параметр $C_{oc} \neq 0$.

Еще одно отличие результатов численного моделирования и экспериментальных данных видно из поведения графиков сечения ХАС вдоль оси нормированного расстояния $r_{нр}$ до цели, представленных на рис. 3, а–г (см. строка 4) и графиков рис. 12,

полученных при изменении длины l_b волноводного тракта. Это отличие также объясняется прямой пропорциональностью, но в данном случае зависимости величины параметра обратной связи C_{oc} от расстояния до цели, что следует из смысла расшифровок к выражениям (7)–(9). В целом экспериментальные графики качественно подтвердили результаты расчетов основных характеристик АД с АЧМ при гармоническом законе модуляции.

Таким образом, полученные в настоящей работе результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность разработанной математической модели в отношении влияния на формирование сигналов АД с ЧМ сопутствующей ПАМ.

5. Заключение

Разработана математическая модель автодинного генератора, учитывающая одновременную амплитудную и частотную модуляцию излучения и обеспечивающая возможность расчета характеристик амплитудной селекции цели на различных гармониках модуляции. Модель учитывает также форму и спектр автодинного сигнала для общего случая произвольного соотношения времени запаздывания отраженного от цели излучения и периода модулирующей функции. Согласно разработанной модели автодина выполнены расчеты его характеристик для случая гармонического закона модуляции и экспериментальные исследования генератора на диоде Ганна. При этом установлено влияние сопутствующей амплитудной модуляции, а также величины параметра внешней обратной связи на формирование сигналов автодинной СБРЛ с ЧМ. Основные результаты исследований сводятся к следующим.

На краях зоны амплитудной селекции цели автодинный отклик генератора как при ЧМ, так и при АЧМ наблюдается только на нулевой гармонике модуляции, т. е. в области доплеровских частот. В средней части зоны амплитудной селекции в генераторе с ЧМ (без ПАМ) формирование автодинного отклика при малой величине параметра C_{oc} внешней обратной связи, когда $C_{oc} \ll 1$, аналогично формированию сигнала в гомодинных СБРЛ с ЧМ. Формирование сигналов в этой части зоны селекции происходит как на нулевой гармонике, так и на гармониках более высокого порядка. При этом амплитуды огибающей сигналов при гармонической ЧМ формируются в соответствии с функциями Бесселя. Наличие ПАМ излучения генератора вызывает некоторые изменения в амплитудные значения сигналов, причем при малых значениях коэффициента АМ, когда $m_{AM} \leq 0,5$, влиянием ПАМ можно пренебречь. Однако с приближением величины коэффициента АМ к единице такое пренебре-

жение становится недопустимым, поскольку амплитуда отклика на всех гармониках частоты Ω_m модуляции, включая нулевую, резко возрастает. Влияние ПАМ на формирование ХАС в автодинной СБРЛ с ЧМ значительно уменьшается с ростом номера гармоники, на которой производится выделение сигнала.

Попутно установлено, что особенно сильное влияние на формирование характеристик амплитудной селекции цели оказывает величина параметра C_{oc} внешней обратной связи автодинной системы «генератор – цель». При выполнении сильного неравенства, когда $C_{oc} \ll 1$, формируемые сигналы имеют гармонический вид, а ХАС полностью совпадают с характеристиками гомодинных СБРЛ с ЧМ. Однако в случае приближения величины параметра C_{oc} к единице имеют место сильные изменения спектрального состава автодинного отклика. Эти изменения приводят к искажению формы ХАС на всех гармониках, включая нулевую гармонику, что может явиться причиной нарушения нормальной работы СБРЛ со спектральной обработкой сигналов. Поэтому при создании перспективных автодинных приемопередающих модулей для СБРЛ с ЧМ необходимо учитывать отмеченные обстоятельства. Прежде всего должны приниматься меры по снижению уровня ПАМ и причин искажения сигналов из-за автодинных изменений частоты. Кроме того, модули должны обеспечить требуемую линейность закона ЧМ в широкой полосе и повторяемость модуляционных характеристик в условиях серийного производства.

Таким образом, из анализа результатов выполненных исследований и перечисленных требований следует, что весьма перспективным направлением создания монолитных и гибридно-монолитных автодинов миллиметрового диапазона, намеченным в последние десятилетия и требующим своего дальнейшего развития, является использование 3-мезового полупроводникового многофункционального чипа [13; 25]. Данный чип представляет собой многоэлементную мезапланарную ганновскую структуру. В ней одна боковая меза выполняет функции варикапа, обеспечивающего снижение уровня ПАМ, а вторая боковая – функции амплитудного детектора, выделяющего полезный сигнал. При этом центральная меза при включении чипа в копланарную линию передачи является активной, реализующей функции генераторного диода Ганна.

Другое решение данной проблемы возможно путем создания автодинных модулей со стабилизацией частоты генератора, например с помощью управляемого по частоте высокочастотного резонатора [46]. В качестве колебательной системы таких автодинов представляется интересным использование интегрирован-

ных с активным элементом АД высокочастотных резонансных структур, выполненных в виде распределенных отражателей Брэгга, которые применительно к созданию СВЧ генераторно-излучающих модулей ранее были исследованы, например, в работах [47; 48]. Принцип действия этих отражателей основан на интерференции волн внутри волновода с гофрированными стенками. Двумерные отражатели этого волновода создают распределенную обратную связь внутри резонатора, тем самым обеспечивая одномодовый режим генерации и высокую пространственную когерентность излучения. Данная структура, широко используемая в настоящее время в полупроводниковых лазерах, обеспечивает, с одной стороны, стабилизацию частоты генерации благодаря ее высокой частотной селективности и с другой – возможность параметрического «электронного» управления частотой генерации. Последнее свойство отражателей Брэгга, заявленное патентом [49] применительно к СВЧ-генераторам, может использоваться в автодинных модулях для СБРЛ с ЧМ.

Кроме того, объединение АД и антенны в одном корпусе микросхемы позволяет создать еще один перспективный тип генераторно-излучающих автодинных модулей, которые, обладая пониженной стоимостью из-за отсутствия волноводных элементов конструкции, значительно расширяют область применения и возможности в реализации различных СБРЛ, в том числе в виде фазированных антенных решеток [50; 51].

Благодарности

Настоящая статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-11-2019-052 от 13 декабря 2019).

Acknowledgments

This article was prepared with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-11-2019-052 of December 13, 2019).

Литература

1. Page C. H., Astin A. V. Survey of proximity fuze development. *American Journal of Physics*. 1947;15(2):95–110. DOI: 10.1119/1.1990930.
2. Коган И. М. *Ближняя радиолокация. Теоретические основы*. М.: Советское радио; 1973.
3. Yanovsky F. J. Millimeter-Wave Radar: Principles and Applications. In: Xiao S.-Q., Zhou M.-T., Zhang Y. (eds.) *Millimeter wave technology in wireless Pan, Lan and Man*. New York: CRC; 2008. Chapter 10, pp. 305–375.
4. Charvat G. L. *Small and Short-Range Radar Systems*. CRC Press; 2014.

5. Костенко А. А., Хлопов Г. И. *Когерентные системы ближней и сверхближней радиолокации миллиметрового диапазона*. Харьков: Контраст; 2015.

6. Boric-Lubecke O., Droitcour A. D., Lubecke V. M., Park B.-K., Singh A. (eds.) *Doppler Radar Physiological Sensing*. New York: John Wiley & Sons; 2016. DOI: 10.1002/9781119078418.

7. Changzhi Li, Jenshan Lin. *Microwave noncontact motion sensing and analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken; 2014. DOI: 10.1002/9781118742556.

8. Nguyen C., Kim S. *Theory, Analysis and Design of RF Interferometric Sensors*. Springer Science+Business Media; 2012.

9. Kim S., Nguyen C. A Displacement Measurement Technique Using Millimeter-Wave Interferometry. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*. 2003;51(6):1724–1728. DOI: 10.1109/TMTT.2003.812575.

10. Атаянц Б. А., Давыдовкин В. М., Езерский В. В., Паршин В. С., Смольский С. М. *Прецизионные системы ближней частотной радиолокации промышленного применения*. М.: Радиотехника. 2012.

11. Носков В. Я., Богатырев Е. В., Игнатков К. А. Принцип построения бортового радиолокационного датчика для обнаружения быстро движущихся целей. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2019;(12):16–22. DOI: 10.18127/j20700784-201912-03.

12. Smolskiy S. M., Generalov M. K. Homodyne and autodyne configurations of short-range radar systems. *Telecommunic. Sciences*. 2010;1(1):14–23. Available at: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/29985>

13. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 1. Конструкторско-технологические достижения. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2006;(12):3–30. Режим доступа: <http://radiotec.ru/article/2218>

14. Utagawa H., Matsui T. Microwave/millimeter wave sensor apparatus. *Patent US8212718B2*, March 31, 2008.

15. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скриполь Ан. В. *Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов*. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та; 2003.

16. 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 11. Основы реализации автодинов. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2019;(2):5–33. Режим доступа: <http://www.radiotec.ru/article/22689>

17. Damgov V. N. *Nonlinear and parametric phenomena. Theory and Applications in Radiophysical and Mechanical Systems*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; 2004.

18. Landa P. S. *Nonlinear Oscillations and Waves in Dynamical Systems*. Springer-Science+ Business Media, B.V.; 1996.

19. Смольский С. М., Соловьев М. А. Малосигнальная теория транзисторного автодина с частотной модуляцией. *Радиопередающие и радиоприемные устройства. Труды МЭИ*. 1977;(317):12–14.

20. Jefford P. A., Howes M. S. Modulation schemes in low-cost microwave field sensor. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1985;31(8):613–624. DOI: 10.1109/TMTT.1983.1131559.
21. Закарлюк Н. М. Спектр автодинного отклика генератора с частотной модуляцией. В: *Применение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов*. Харьков: ИРЭ АН Украины; 1991. С. 56–65.
22. Komarov I. V., Smolskiy S. M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Norwood, MA, USA: Artech House; 2003.
23. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Анализ автодинного эффекта генераторов с линейной частотной модуляцией. *Известия вузов. Физика*. 2008;51(6):54–60. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11135288>
24. Varavin A. V., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Popov I. V. Autodyne Gunn-diode transceiver with internal signal detection for short-range linear FM radar sensor. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2010;69(5):451–458. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80.
25. 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. Режим доступа: <http://81.177.3.94/article/5917>
26. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Mathematical Model of FM Autodyne Radar. In: *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'16)*, Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016. A-25, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538000.
27. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Main Expressions for Analysis of Signals and Noise of Autodyne FM Radar. *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16)*, Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016. A-9, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538019.
28. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Peculiarities of Signal and Noise Characteristics of FMCW Autodyne Radar. *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16)*, Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016. A-10, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7537984.
29. Noskov V. Y., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. V., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparatabuduv.* 2016;(67);50–57. DOI: 10.20535/RADAP.2016.67.50-57.
30. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Signals of Autodyne Radars with Frequency Modulation According to Symmetric Saw-Tooth Law. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2016;75(17):1551–1566. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i17.40.

31. Носков В. Я., Васильев А. С., Ермак Г. П., Игнатков К. А., Чупахин А. П. Флуктуационные характеристики автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией. *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 2017;60(3):154–165. DOI: 10.20535/S0021347017030049.

32. Kryzhanovskiy V. S., Ermak G. P., Vasiliev A. S., Varavin A. V., Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Smolskiy S. M. Signals From a Moving Object of Autodyne Radars with Linear Frequency Modulation. *IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS), Kyiv, Ukraine, August 29–31, 2017*. P. 93–98. DOI: 10.1109/MRRS.2017.8075036.

33. Ermak G. P., Vasiliev A. S., Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Moving object signal peculiarities of an autodyne radar with symmetric saw-tooth FM law. *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, September 11–15, 2017*. P. 1–4. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095378.

34. Носков В. Я., Игнатков К. А., Чупахин А. П. Анализ сигналов от движущегося объекта автодинных локаторов с линейными видами модуляции частоты. *Уральский радиотехнический журнал*. 2017;1(1):25–54. DOI 10.15826/urej.2017.1.1.002.

35. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Signals of Autodyne Sensors with Sinusoidal Frequency Modulation. *Radioengineering*, 2017;26(4):1182–1190. DOI: 10.13164/re.2017.1182.

36. Kurokawa K. Injection locking of microwave solid-state oscillators. *Proceedings of the IEEE*. 1973;61(10):1386–1410. DOI: 10.1109/PROC.1973.9293.

37. Носков В. Я., Игнатков К. А. О применимости квазистатического метода анализа автодинных систем. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2014;57(3):44–56. DOI: 10.20535/S0021347014030054.

38. Носков В. Я., Смольский С. М., Игнатков К. А. Влияние сопутствующей модуляции частоты колебаний амплитудно-модулированного генератора на формирование автодинных сигналов. *Уральский радиотехнический журнал*. 2020;4(1):51–83. DOI: 10.15826/urej.2020.4.1.004.

39. Nagano S., Akaiwa Y. Behavior of Gunn diode oscillator with a moving reflector as a self-excited mixer and a load variation detector. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1971;19(12):906–910. DOI: 10.1109/TMTT.1971.6373339.

40. Takayama Y. Doppler signal detection with negative resistance diode oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1973;21(2):89–94. DOI: 10.1109/TMTT.1973.1127929.

41. Носков В. Я., Смольский С. М. Автодинный эффект в генераторах с амплитудной модуляцией. *Радиотехника*. 2011;(2):21–36. Режим доступа: <http://radiotec.ru/article/8545>

42. Woodyard J. R. Radio system for distance and velocity measurement. *Pat. US2424263*, February 23, 1943.

43. Шаров Ю. В., Кислов О. А. Об одном способе измерения малых дальностей. *Радиоприемные устройства*. 1972;(110):63–67.

44. Разгоняев Ю. В. Об определении расстояния до движущегося объекта рециркуляционным методом. *Методы и устройства формирования и обработки сигналов*. 1979;(418):21–24.

45. Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов. *Радиотехника*. 2012;(6):24–46. Режим доступа: <http://radiotec.ru/article/11174>

46. 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. Режим доступа: <http://radiotec.ru/article/14008>

47. Song B.-S., Itoh T. Distributed Bragg Reflection Dielectric Waveguide Oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1979;27(12):1019–1022. DOI: 10.1109/TMTT.1979.1129783.

48. Барташевский Е. Л., Борулько В. Ф., Иванчиков В. Е., Тимофеев С. В. Исследование генераторно-излучающих модулей на зеркальном диэлектрическом волноводе с брэгговским резонатором. *Радиотехника*. 1992;(5-6):81–85. Режим доступа: <http://radiotec.ru/article/23616>

49. Хан А. В., Воторопин С. Д., Хан В. А., Прохоровиченко Л. П. Полупроводниковый прибор с междолинным переносом электронов. *Патент RU2361324*, заявлено 15.02.2008.

50. Shiroma G. S., Miyamoto R. Y., Shiroma W. A. A 16-Element Two-Dimensional Active Self-Steering Array Using Self-Oscillating Mixers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2003;MTT-51(12):2476–2482. DOI: 10.1109/TMTT.2003.819779.

51. Chang K., York R. A., Hall P. S., Itoh T. Active Integrated Antennas. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2002;50(3):937–944. DOI: 10.1109/22.989976.

References

1. Page C. H., Astin A. V. Survey of proximity fuze development. *American Journal of Physics*. 1947;15(2):95–110. DOI: 10.1119/1.1990930.
2. Kogan I. M. *Near Radar. Theoretical Basis*. Moscow: Soviet radio; 1973. (In Russ.)
3. Yanovsky F. J. Millimeter-Wave Radar: Principles and Applications. In: Xiao S.-Q., Zhou M.-T., Zhang Y. (eds.) *Millimeter wave technology in wireless Pan, Lan and Man*. New York: CRC; 2008. Chapter 10, pp. 305–375.
4. Charvat G. L. *Small and Short-Range Radar Systems*. CRC Press; 2014.
5. Kostenko A. A., Khlopov G. I. *Coherent Systems of Short-Range and Ultra-Short-Range Radars of Millimeter Wavelength Range*. Kharkiv, Ukraine: Kontrast; 2015. (In Russ.)
6. Boric-Lubecke O., Droitcour A. D., Lubecke V. M., Park B.-K., Singh A. (eds.) *Doppler Radar Physiological Sensing*. New York: John Wiley & Sons; 2016. DOI: 10.1002/9781119078418.

7. Changzhi Li, Jenshan Lin. *Microwave noncontact motion sensing and analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken; 2014. DOI: 10.1002/9781118742556.
8. Nguyen C., Kim S. *Theory, Analysis and Design of RF Interferometric Sensors*. Springer Science+Business Media; 2012.
9. Kim S., Nguyen C. A Displacement Measurement Technique Using Millimeter-Wave Interferometry. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*. 2003;51(6):1724–1728. DOI: 10.1109/TMTT.2003.812575.
10. Atayants B. A., Davydochkin V. M., Ezersky V. V., Parshin V. S., Smolskiy S. M. *Precision Short-Range Radar Systems for Industrial Applications*. Moscow: Radiotekhnika; 2012. (In Russ.)
11. Noskov V. Ya., Bogatyrev E. V., Ignatkov K. A. The principle of constructing an airborne radar sensor for detecting fast-moving targets. *Successes of Modern Electronic Engineering*. 2019;(12):16–22. (In Russ.) DOI: 10.18127/j20700784-201912-03.
12. Smolskiy S. M., Generalov M. K. Homodyne and autodyne configurations of short-range radar systems. *Telecommunic. Sciences*. 2010;1(1):14–23. Available at: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/29985>
13. Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. Modern hybrid-integrated autodyne oscillators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 1. Technological achievements. *Successes of Modern Electronic Engineering*. 2006;(12):3–30. (In Russ.) Available at: <http://radiotec.ru/article/2218>
14. Utagawa H., Matsui T. Microwave/millimeter wave sensor apparatus. *Patent US8212718B2*, March 31, 2008.
15. Usanov D. A., Scripal A. V., Scripal A. V. *Physics of Semiconductor RF and Optical Autodynes*. Saratov: Saratov University; 2003. (In Russ.)
16. Noskov V. Ya., Smolskiy S. M., Ignatkov K. A., Mishin D. Ya., Chupahin A. P. Modern hybrid-integrated autodyne generators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 11. Fundamentals of Autodyne Implementation. *Advances in Modern Radio Electronics*. 2019;(2):5–33. (In Russ.) Available at: <http://www.radiotec.ru/article/22689>
17. Damgov V. N. *Nonlinear and parametric phenomena. Theory and Applications in Radiophysical and Mechanical Systems*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; 2004.
18. Landa P. S. *Nonlinear Oscillations and Waves in Dynamical Systems*. Springer-Science+ Business Media, B.V.; 1996.
19. Smolskiy S. M., Soloviev M. A. Small-signal theory of transistor autodyne with frequency modulation. *Radio Transmitting and Receiving Devices. MEI Proceedings*. 1977;(317):12–14. (In Russ.)
20. Jefford P. A., Howes M. S. Modulation schemes in low-cost microwave field sensor. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1985;31(8):613–624. DOI: 10.1109/TMTT.1983.1131559.
21. Zakarlyuk N. M. Autodyne response spectrum of a frequency modulated generator. *Apply Millimeter and Submillimeter Radio Waves*. Kharkiv: IRE Academy of Sciences of Ukraine. 1991:56–65. (In Russ.)

22. Komarov I. V., Smolskiy S. M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Norwood, MA, USA: Artech House; 2003.
23. Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. An Analysis of the Autodyne Effect of Oscillators with Linear Frequency Modulation. *Russian Physics Journal*. 2008;51(6):610–618. DOI: 10.1007/s11182-008-9083-5.
24. Varavin A. V., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Popov I. V. Autodyne Gunn-diode transceiver with internal signal detection for short-range linear FM radar sensor. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2010;69(5):451–458. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80.
25. Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. Modern hybrid-integral autodyne microwave and millimeter wave oscillators and their application. Part 5. Investigations of frequency modulated autodyne. *Advances in Modern Radio Electronics*. 2009;(3):3–50. (In Russ.) Available at: <http://81.177.3.94/article/5917>
26. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Mathematical Model of FM Autodyne Radar. In: *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'16), Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016*. A-25, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538000.
27. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Main Expressions for Analysis of Signals and Noise of Autodyne FM Radar. *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16), Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016*. A-9, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538019.
28. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Peculiarities of Signal and Noise Characteristics of FMCW Autodyne Radar. *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16), Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016*. A-10, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7537984.
29. Noskov V. Y., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. V., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv*. 2016;(67);50–57. DOI: 10.20535/RADAP.2016.67.50-57.
30. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Signals of Autodyne Radars with Frequency Modulation According to Symmetric Saw-Tooth Law. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2016;75(17):1551–1566. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i17.40.
31. Noskov V. Ya., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Fluctuation Features of Autodyne Radar with Frequency Modulation. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2017;60(3):123–131. DOI: 10.20535/S0021347017030049.
32. Kryzhanovskiy V. S., Ermak G. P., Vasiliev A. S., Varavin A. V., Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Smolskiy S. M. Signals From a Moving Object of Autodyne Radars with Linear Frequency

Modulation. *IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS)*, Kyiv, Ukraine, August 29–31, 2017, pp. 93–98. DOI: 10.1109/MRRS.2017.8075036.

33. Ermak G. P., Vasiliev A. S., Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Moving object signal peculiarities of an autodyne radar with symmetric saw-tooth FM law. *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, Ukraine, September 11–15, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095378.

34. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Moving Object Signal Analysis of Autodyne Radars with Linear Types of Frequency Modulation. *Ural Radio Engineering Journal*. 2017;1(1):25–54. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2017.1.1.002.

35. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Signals of Autodyne Sensors with Sinusoidal Frequency Modulation. *Radioengineering*, 2017;26(4):1182–1190. DOI: 10.13164/re.2017.1182.

36. Kurokawa K. Injection locking of microwave solid-state oscillators. *Proceedings of the IEEE*. 1973;61(10):1386–1410. DOI: 10.1109/PROC.1973.9293.

37. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. About applicability of quasi-static method of autodyne systems analysis. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2014;57(3):139–148. (In Russ.) DOI: 10.3103/S0735272714030054.

38. Noskov V. Ya., Smolskiy S. M., Ignatkov K. A. Influence of attended FM of the AM oscillator on the autodyne signal formation. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(1):51–83. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2020.4.1.004.

39. Nagano S., Akaiwa Y. Behavior of Gunn diode oscillator with a moving reflector as a self-excited mixer and a load variation detector. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1971;19(12):906–910. DOI: 10.1109/TMTT.1971.6373339.

40. Takayama Y. Doppler signal detection with negative resistance diode oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1973;21(2):89–94. DOI: 10.1109/TMTT.1973.1127929.

41. Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. Autodyne effect in oscillators with amplitude modulation. *Radiotekhnika*. 2011;(2):21–36. (In Russ.) Available at: <http://radiotec.ru/article/8545>

42. Woodyard J. R. *Radio system for distance and velocity measurement*. Pat. US2424263, February 23, 1943.

43. Sharov Yu. V., Kislov O. A. About one method of measuring short ranges. *Radio Receivers*. 1972;(110):63–67. (In Russ.)

44. Razgonyaev Yu. V. On determining the distance to a moving object by the recirculation method. *Methods and Devices for the Formation and Processing of Signals*. 1979;(418):21–24. (In Russ.)

45. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Autodyne characteristic dependence on the UHF oscillator's inherent parameters. *Radio Engineering*. 2012;(6):24–46. (In Russ.) Available at: <http://radiotec.ru/article/11174>

46. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Modern hybrid-integral autodyne microwave and millimeter wave oscillators and their application. Part 8. Autodyne with frequency stabilization by an external high-quality resonator. *Advances in Modern Radio Electronics*. 2013;(12):3–42. (In Russ.) Available at: <http://radiotec.ru/article/14008>
47. Song B.-S., Itoh T. Distributed Bragg Reflection Dielectric Waveguide Oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1979;27(12):1019–1022. DOI: 10.1109/TMTT.1979.1129783.
48. Bartashevskiy E. L., Borulko V. F., Ivanilov V. E., Timofeev S. V. Investigation of generator-emitting modules based on a mirror dielectric waveguide with a Bragg resonator. *Radio Engineering*. 1992;(5-6):81–85. (In Russ.) Available at: <http://radiotec.ru/article/23616>
49. Khan A. V., Votoropin S. D., Khan V. A., Prokhorovnichenko L. P. *Semiconductor device with intervalley electron transfer*. Patent RU2361324, February 15, 2008. (In Russ.)
50. Shiroma G. S., Miyamoto R. Y., Shiroma W. A. A 16-Element Two-Dimensional Active Self-Steering Array Using Self-Oscillating Mixers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2003;MTT-51(12):2476–2482. DOI: 10.1109/TMTT.2003.819779.
51. Chang K., York R. A., Hall P. S., Itoh T. Active Integrated Antennas. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2002;50(3):937–944. DOI: 10.1109/22.989976.

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; Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32.

Богатырев Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Сибирского федерального университета; Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

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; Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32.

Шайдуров Кирилл Дмитриевич, старший преподаватель департамента Радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина; Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32.

Information about the authors

Vladislav Ya. Noskov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute

of Radio Electronics and Information Technologies – RTF Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

Evgeniy V. Bogatyrev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Engineering, Siberian Federal University; 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia.

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 of the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

Kirill D. Shaydurov, Senior Lecturer 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; 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

Поступила / Received: 21.06.2020

Принята в печать / Accepted: 20.07.2020