

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2020.4.1.004

УДК 621.382.2

Влияние сопутствующей модуляции частоты колебаний амплитудно-модулированного генератора на формирование автодинных сигналов

В. Я. Носков¹ , С. М. Смольский², К. А. Игнатков¹¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14 noskov@oko-ek.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований автодинного генератора с комбинированной амплитудно-частотной модуляцией, находящегося под воздействием собственного отраженного излучения. Получены основные соотношения для анализа автодинного отклика одноконтурного генератора в зависимости от величины времени запаздывания отраженного излучения при произвольном законе одновременной модуляции амплитуды и частоты. Выполнены вычисления характеристик амплитудной селекции сигналов автодинных генераторов для случая применения гармонического закона амплитудно-частотной модуляции. Установлены особенности формирования сигналов при различных значениях величин сопутствующей частотной модуляции излучения и параметра обратной связи системы «генератор – объект локации». Результаты экспериментальных исследований, выполненные на примере гибридно-интегрального генератора «Тигель-0,8М» с меза-планарным диодом Ганна 8-мм диапазона, подтвердили выводы теоретического анализа.

Ключевые слова

автодин, автодинный генератор, автодинный сигнал, амплитудная модуляция, частотная модуляция, система ближней радиолокации

Для цитирования

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

Influence of attended FM of the AM oscillator on the autodyne signal formation

V. Ya. Noskov¹ , S. M. Smolskiy², K. A. Ignatkov¹

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

² National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,
14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russia

 noskov@oko-ek.ru

Abstract

Research results are presented for the autodyne oscillator with the combined amplitude-frequency modulation being exposed by the impact of the proper reflected emission. The main relations are obtained for the analysis of the autodyne response of the single-circuit oscillator depending on the delay time of reflected emission at arbitrary law of simultaneous modulation of amplitude and frequency. Computations are performed of characteristics of the amplitude selection of the autodyne oscillator signals for the case of harmonic law application of the amplitude-frequency modulation. The features of signal formation are defined at different values of attended frequency modulations of the emission and the feedback parameter of the system “generator – radar target”. Results of the experimental investigations executed on the example of the hybrid-integrated oscillator “Tigel-0,8M” with meza-planar Gunn diode of 8mm-range confirm the theoretical conclusions.

Keywords

autodyne, autodyne oscillator, autodyne signal, amplitude modulation, frequency modulation, short-range radar system

For citation

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. DOI: 10.15826/urej.2020.4.1.004

1. Введение

Зародившееся в период Второй мировой войны научное направление, связанное с созданием и применением миниатюрных, простых и дешевых радиолокационных датчиков малого радиуса действия [1], окончательно утвердилось к началу 70-х гг. прошлого столетия как «ближняя радиолокация» [2]. В последующие годы это направление, особенно в свете достижений твердотельной микроэлектроники и освоению диапазона миллиметровых волн, получило свое дальнейшее бурное развитие [3–12].

Согласно определению, данному профессором И. М. Коганом, системы ближней радиолокации (СБРЛ) – это радиолокационные системы, дальность действия которых соизмерима с геоме-

трическими размерами объекта локации. В указанных условиях обычно отраженный радиосигнал принимается от множества блестящих точек объекта локации. Характерно для этих систем также наличие посторонних предметов и самого объекта в ближней зоне антенны. Диапазоны изменения дальности до объекта локации и эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) цели имеют значительно большие пределы, чем у обычных, «дальних» РЛС.

Кроме того, во многих приложениях, например, в радиовзрывателях, радиоволновых датчиках охранной сигнализации, измерителях параметров движения, системах предупреждения столкновений на транспорте и пр., продолжительность нахождения цели в зоне контроля СБРЛ и время обработки принимаемых сигналов для выдачи команд обычно очень ограничены. Функционирование СБРЛ в указанных условиях является причиной порождения одной из проблем СБРЛ, связанной с погрешностью фиксации положения объекта локации, которая оказывается соизмеримой с расстоянием. При этом необходимо обеспечить селекцию цели на фоне высокого уровня отражений от пассивных помех. Кроме того, условия эксплуатации во многих применениях СБРЛ связаны с воздействием высокого уровня вибраций и шумов. Поэтому во многих случаях при создании СБРЛ ставится специфическая задача формирования, так называемых, «мертвых зон» и «зон селекции цели» путем выбора вида и параметров модуляции излучения, а также соответствующей обработки принятого сигнала.

Простейшую конструкцию, минимальные габариты, вес и стоимость СБРЛ обеспечивают приемо-передатчики с автодинным принципом построения. В автодинных СБРЛ (АСБРЛ) функции передатчика и приемника выполняет единственный каскад, работающий непосредственно на антенну. Этот каскад (автодин – АД), выполненный на основе автогенератора, вырабатывает зондирующие СВЧ колебания, которые излучаются антенной в направлении объекта локации. Отраженный от объекта сигнал принимается этой же антенной и поступает в колебательную систему генератора, порождая в нем сложный нелинейный процесс, который принято называть автодинным эффектом [13].

Этот эффект проявляется в изменениях практически всех параметров колебаний автогенератора и наблюдается во всех типах генераторов, как непрерывного излучения, так и с различными видами модуляции, и в диапазоне от радиочастотных до оптических частот [4–14]. Изменениям подвергаются не только высокочастотные параметры колебаний (амплитуда, частота, фаза и выходная мощность), но и низкочастотные параметры,

такие как постоянные токи и напряжения в схеме генератора. Регистрация этих изменений в виде автодинных сигналов и их обработка обеспечивают возможность получения необходимой информации о кинематических, внешних и внутренних параметрах объектов локации, а также среды распространения электромагнитного излучения, характеристиках вторичного излучения объектов и параметров антенных систем.

В настоящее время автодинные, также как и гомодинные СБРЛ, широко используются для самых разнообразных приложений. Примерами их применения являются решения различных задач военного назначения, на автомобильном и железнодорожном транспорте и в системах безопасности, в научных исследованиях, измерительной технике и электронной промышленности для контроля параметров материалов [12; 15–21]. Кроме того, они используются в бортовых измерителях параметров движения носителя относительно подстилающей поверхности, в датчиках вибраций и скорости вращения вала судовых дизельных двигателей, в аппаратуре для диагностики работы турбоагрегатов, а также в приборах для физиологических и медицинских исследований и пр. [22–32].

Из-за зависимости параметров автодинного генератора от собственного отраженного от объекта локации СВЧ излучения АД относятся к классу автопараметрических систем с запаздывающей обратной связью. При анализе этих устройств раздельное рассмотрение функций формирования и передачи зондирующего излучения, а также приема и преобразования отраженного излучения от объекта локации невозможно. Это совмещение создает проблему выбора оптимального режима колебаний, при котором обеспечиваются наилучшие характеристики АД, как радиолокатора, поскольку для каждой из указанных функций генератора оптимальные режимы могут значительно отличаться. Сложность решения этой проблемы, которое лежит в плоскости методов теории нелинейных колебаний, зачастую является препятствием для успешного применения АД в решении многих задач ближней и сверхближней радиолокации.

Кроме указанных выше общих условий функционирования СБРЛ, при разработке АСБРЛ необходимо учитывать ряд специфических свойств и особенностей работы АД. Среди них – инерционность автодинного эффекта, ограничивающая быстродействие системы. При неправильном выборе параметров автоколебательной системы инерционные свойства генератора, характеризуемые эквивалентной постоянной времени автодинного отклика, могут вызвать ограничение рабочего диапазона частот АСБРЛ. Другая особенность – наличие ангармониче-

ских искажений сигналов, усиливающиеся с укорочением длины волны излучения и создающие проблемы при их обработке. Для адекватного описания наблюдаемых экспериментально явлений в свое время потребовался пересмотр некоторых концептуальных представлений о функционировании АД.

Расширить функциональные возможности и улучшить работоспособность АСБРЛ в условиях сложной радиолокационной обстановки можно при использовании АД с дополнительной модуляцией излучения по частоте или применением импульсной модуляции [8; 11; 14; 23]. В ряде случаев для успешного решения локационных задач может оказаться полезным использование амплитудной модуляции (АМ) при непрерывном излучении радиоволн [33]. Однако при АМ, особенно по цепи питания твердотельных СВЧ генераторов, неизбежно возникает сопутствующая частотная модуляция (ЧМ), которая накладывает свои условия на формирование автодинного отклика генератора. Влияние одновременно этих двух условий на формирование автодинного отклика в литературе на сегодня в полной мере не рассматривалось [34]. Хотя задачи исследования новых режимов и поиска оригинальных технических решений с целью повышения помехоустойчивости, улучшения других качественных показателей и расширения области применения АД, безусловно, являются актуальными и требуют своего решения.

Цель работы – восполнить указанный пробел в исследовании особенностей формирования автодинного сигнала при одновременной амплитудной и частотной модуляции (АЧМ) колебаний генератора. Эти особенности необходимо учитывать при создании перспективных АСБРЛ СВЧ и КВЧ диапазонов.

2. Общие уравнения для описания автодинного эффекта в генераторах с АЧМ

Воздействие на генератор отраженного излучения вызывает в нем автодинный эффект, заключающийся в изменениях текущих значений амплитуды A и частоты ω колебаний относительно их стационарных значений A_0 и ω_0 автономного генератора. Результат такого воздействия в рамках модели АД в виде одноконтурного генератора на активном элементе с отрицательной проводимостью описывается системой линеаризованных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом для малых относительных изменений амплитуды $a = (A - A_0) / A_0$ и частоты $\chi = (\omega - \omega_0) / \omega_0$ колебаний [35; 36]:

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

$$\beta a + Q_{\text{н}} \chi = -\Gamma(t, \tau) \eta \sin \delta(t, \tau), \quad (2)$$

где $Q_{\text{н}}$, ω_c – 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 генератора; $A(t, \tau)$, $\Psi(t, \tau)$ – амплитуда и фаза колебаний АД из истории системы ($t - \tau$); $A(t)$, $\Psi(t)$ – амплитуда и фаза колебаний АД в текущий момент времени; $\Gamma_0 = (P_{\text{пр}} / P_{\text{изл}})^{1/2}$ – коэффициент затухания излучения по амплитуде при его распространении до объекта локации и обратно; $P_{\text{изл}}$, $P_{\text{пр}}$ – излучаемая и принимаемая мощности СВЧ излучений на нагрузке генератора; $\eta = Q_{\text{н}} / Q_{\text{вн}}$, $Q_{\text{вн}}$ – КПД и внешняя добротность колебательной системы; $\tau = 2l/c$ – время запаздывания отраженного излучения; l – расстояние до отражателя; c – скорость распространения радиоволн.

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

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

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

Отраженные от объекта локации колебания и принятые антенной запишем в следующем виде:

$$u_{\text{пр}}(t, \tau) = \Gamma_0 A(t, \tau) \cos \Psi(t, \tau) = \\ = \Gamma_0 A_0 [1 + m_{\text{AM}} f_{\text{m}}(t, \tau)] \cos \left[\omega_0 (t - \tau) + \omega_0 m_{\text{ЧМ}} \int_{t-\tau}^t f_{\text{m}}(t, \tau) dt + \phi_0 \right], \quad (4)$$

где $f_{\text{m}}(t, \tau)$ – модулирующая функция отраженных колебаний; ϕ_0 – постоянный фазовый сдвиг, обусловленный отражающими свойствами объекта локации.

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:

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

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

где K_a , L_a – коэффициенты автодинного усиления и девиации частоты генерации [41]; $\psi = \arctg(\rho)$, $\theta = \arctg(\gamma)$ – углы фазового смещения; $\rho = \varepsilon / Q_a$, $\gamma = \beta / \alpha$ – коэффициенты неизодромности и неизохронности генератора соответственно.

Второе слагаемое в правой части уравнения (5) повторяет закон модуляции $m_{\text{AM}} f_{\text{м}}(t)$ 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, ПАМ может оказывать существенное и нежелательное влияние на формирование автодинного отклика.

Выполним анализ особенностей формирования сигналов для режима непрерывного АЧМ излучения, описываемые в (5), (6) третьими членами правой части. Для выявления функций запаздывающего воздействия $f_{\text{м}}(t, \tau)$, $A(t, \tau)$ и $\Psi(t, \tau)$ в этих выражениях выполним их разложение в ряды Тейлора по малому параметру τ по сравнению с текущим временем t [35; 36]:

$$f_{\text{м}}(t, \tau) = f_{\text{м}}(t) - \frac{\tau^1}{1!} \frac{d^1 f_{\text{м}}(t)}{dt^1} + \frac{\tau^2}{2!} \frac{d^2 f_{\text{м}}(t)}{dt^2} - \frac{\tau^3}{3!} \frac{d^3 f_{\text{м}}(t)}{dt^3}, \quad (7)$$

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

$$\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi_{\text{пп}}(t, \tau) = \omega_0 \tau + p_{\text{ЧМ}} F_{\text{ЧМ}}(t) - C_{\text{ОС}} F_{\text{АД}}(t), \quad (9)$$

где $M_{\text{AM}}(t)$, $M_{\text{АД}}(t)$ – множители, обусловленные процессом АМ и автодинными изменениями амплитуды колебаний генератора соответственно:

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

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

где $F_{\text{ЧМ}}(t)$, $F_{\text{АД}}(t)$ – множители, обусловленные процессом ЧМ и автодинными изменениями частоты колебаний генератора соответственно:

$$F_{\text{ЧМ}}(t) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \frac{\tau^{n-1}}{n!} \cdot \frac{d^{n-1} f_{\text{м}}(t)}{dt^{n-1}}, \quad (12)$$

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

$a(t) = m_{\text{AM}} f_m(t) + a_m \cos[\delta(t, \tau) - \psi]$; $\Omega_a = d[\delta(t, \tau)]/dt$ – мгновенная частота автодинного сигнала; $a_m = \Gamma_0 K_a$ – относительная глубина автодинных изменений амплитуды колебаний; $p_{\text{ЧМ}} = m_{\text{ЧМ}} \omega_0 \tau$ – индекс фазовой модуляции, обусловленный ЧМ; $C_{\text{OC}} = \Delta \omega_a \tau$ – параметр внешней обратной связи (ОС) АД; $\Delta \omega_a = \Gamma_0 L_a \omega_0$ – автодинная девиация частоты [37]; n – порядковый номер членов разложения в (10) и (12), а $H_n(\Omega_a \tau)$, $S_n(\Omega_a \tau)$ – коэффициенты и $\Phi_n(\Omega_a \tau)$ – их фазы:

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

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

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

Из выражений (8) и (12) видно, что в отношении $\delta(t, \tau)$ трансцендентное уравнение (8) является неявным. Для выявления (8) при условии его гладкости, когда $C_{\text{OC}} < 1$, находим $\delta(t, \tau)$ методом последовательных приближений. Данное решение в виде фазовой характеристики АД (ФХА) $\delta(t, \tau)$ имеет вид:

$$\delta(t, \tau) = \delta(t, \tau)_{(0)} - C_{\text{OC}} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta(t, \tau)_{(1)} + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau) -$$

$$- C_{\text{OC}} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta(t, \tau)_{(2)} + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau) - \dots -$$

$$- C_{\text{OC}} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta(t, \tau)_{(k)} + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau)] \dots]. \quad (16)$$

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

При анализе обычных АД без модуляции в (8) и (9) нужно положить $m_{\text{AM}} = p_{\text{ЧМ}} = 0$. Если при этом выполняется сильное неравенство $\Omega_a \tau \ll 1$, что свойственно большинству применений автодинных СБРЛ, то из (7), (8) получим $\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0$ и $\delta(t, \tau) = \omega \tau$ [37]. Для случая анализа АД с ЧМ в этих выражениях следует приравнять нулю m_{AM} [38], а для анализа АД с АМ необходимо положить $m_{\text{AM}} = 0$ [33]. 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» вы-

полнен численный анализ особенностей поведения АД с АЧМ для гармонического закона модулирующей функции. При выполнении этих вычислений приняты приближения, учитывающие реальные условия функционирования автодинных СБРЛ в диапазонах СВЧ и КВЧ.

3. Расчет и анализ автодинных характеристик при гармоническом законе АЧМ

Сигналы АД обычно регистрируются в цепи питания генератора (сигнал автодетектирования) или по изменению амплитуды его колебаний с помощью детекторного диода. 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 объекта локации. Ниже рассмотрим случай синусоидальной модуляции амплитуды и частоты. Основными достоинствами этого вида модуляции являются простора 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 модулирующей функции широко используется в автодинных системах для решения многих задач ближней радиолокации [11; 14; 38].

Для нормальной работы СБРЛ с АЧМ частота Ω_m модуляции должна значительно отличаться от частоты Ω_a автодинного сигнала. При таких условиях спектр сигнала и спектральные составляющие, обусловленные процессом АЧМ, не перекрываются, что упрощает задачу частотной селекции полезных составляющих спектра автодинного сигнала [2]. Практический интерес представляет рассмотреть случай выполнения сильного неравенства $\Omega_m \gg \Omega_a$, когда составляющие полезного сигнала группируются как в области низких «нулевых» частот, так и в окрестности гармоник частоты Ω_m модуляции [33]. При этом выясним закономерности формирования амплитуды полезного сигнала в зависимости от расстояния до объекта локации. Данную зависимость принято называть характеристикой амплитудной селекции (ХАС) цели по дальности. Основными уравнениями для анализа такой характеристики являются выражения (5) и (7) с учетом (8) и разложений (9) – (15). В этих выражениях реальное соотношение m_{AM} и a_m таково, что обычно $m_{AM} \gg a_m$ и влиянием автодинных изменений амплитуды колебаний на уровень отраженного излучения можно пренебречь. Поэтому выражение (7) при расчете ХАС можно значительно упростить, исключив из даль-

нейшего анализа третье слагаемое. Это выражение для гармонического закона $f_m(t) = \sin(\Omega_m t)$ модулирующей функции после выполнения нормировки амплитуды относительно произведения $\Gamma_0 K_a$ имеет вид:

$$a(t) = \left[1 - \frac{m_{AM} M_{AM}(t)}{1 + m_{AM} \sin(\Omega_m t)} \right] \cos[\delta(t, \tau) - \psi], \quad (16)$$

где

$$M_{AM}(t) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} M_n(r_h) \cos[(\Omega_m t) - \Psi_n(r_h)], \quad (17)$$

$M_n(r_h)$ – коэффициенты и $\Theta_n(r_h)$ – фазовые углы членов разложения (17):

$$M_n(r_h) = \frac{(2\pi r_h)^{2n-1}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi r_h}{2n} \right)^2}, \quad \Psi_n(r_h) = \operatorname{arctg} \frac{2\pi r_h}{2n}, \quad (18)$$

$r_h = \Omega_m \tau / 2\pi = l / (\Lambda_m / 2)$ – нормированное расстояние до объекта локации; $\Lambda_m = 2\pi c / \Omega_m$ – длина модулирующей волны.

Здесь входящее в (16) выражение для ФХА $\delta(t, \tau)$ (15) перепишем с учетом нормировки расстояния до объекта локации в виде:

$$\begin{aligned} \delta(t, \tau) = & (2\pi \tau_h)_{(0)} + p_{QM} F_{QM}(t) - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(r_h) \sin[(2\pi \tau_h)_{(1)} + \\ & + p_{QM} F_{QM}(t) + \theta - \Phi_n(r_h) - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(r_h) \sin[(2\pi \tau_h)_{(2)} + \\ & + p_{QM} F_{QM}(t) + \theta - \Phi_n(r_h) - \dots - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(r_h) \sin[(2\pi \tau_h)_{(k)} + \\ & + p_{QM} F_{QM}(t) + \theta - \Phi_n(r_h)] \dots], \end{aligned} \quad (19)$$

где $\tau_h = \omega_0 \tau / 2\pi$ – нормированное время; $p_{QM} = 2\pi \tau_h m_{QM}$; $S_n(r_h)$ – коэффициенты и $\Phi_n(r_h)$ – фазовые углы членов разложения (19):

$$S_n(r_h) = \frac{(2\pi r_h / z)^{2(n-1)}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi r_h}{2nz} \right)^2}, \quad \Phi_n(r_h) = \operatorname{arctg} \frac{2\pi r_h}{2nz}, \quad (22)$$

$z = \Omega_m / \Omega_a$ – соотношение частот модуляции и автодинного сигнала;

$$F_{QM}(t) = \sin(\Omega_m t) - \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} F_n(r_h) \cos[(\Omega_m t) - \Theta_n(r_h)], \quad (20)$$

$F_n(r_h)$ – коэффициенты и $\Theta_n(r_h)$ – фазовые углы членов разложения (20):

$$F_n(r_h) = \frac{(2\pi r_h)^{2n-1}}{2n!} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi r_h}{2n+1} \right)^2}, \quad \Theta_n(r_h) = \operatorname{arctg} \frac{2\pi r_h}{2n+1}. \quad (21)$$

Из анализа (16) с учетом (17)–(21) следует, что ХАС является периодической функцией нормированного расстояния r_n до объекта локации, определяемым периодом модулирующей функции $f_m(t)$. Поэтому далее ограничимся анализом только ее основной составляющей, заключенной в интервале $0 < r_n < 1$. 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 СБРЛ (начальный участок ХАС), где выполняется неравенство $r_n \ll 1$, то выражение (16) упрощается и имеет вид:

$$a(t) = \left[1 - \frac{2\pi r_n m_{AM} \cos(\Omega_m t)}{1 + m_{AM} \sin(\Omega_m t)} \right] \cos[p_{AM} \sin(\Omega_m t)]. \quad (22)$$

Однако с увеличением расстояния до отражающего объекта, где применение выражения (22) становится неприемлемым, число требуемых для расчета членов рядов в (17)–(21) быстро растет. Это значительно усложняет анализ. Например, при выполнении условия $r_n \leq 1$, которое означает, что время запаздывания τ отраженного излучения должно составлять величину не более шестой части полупериода модулирующей функции, необходимое число первых членов разложений (17)–(21) должно быть не менее пяти. Для корректного описания ХАС на всем ее интервале $0 < r_n < 1$, как показали расчеты, требуется значительно увеличить число N членов этого ряда: $N \geq 25$. В таких условиях в общем случае произвольного значения r_n выяснение особенностей формирования автодинных сигналов аналитическими методами представляется неприемлемым, поэтому далее для достижения поставленной цели воспользуемся численным методом.

На рис. 1–4 приведены результаты расчетов ХАС как нормированной функции двух переменных: коэффициента амплитудной модуляции m_{AM} (ось «модуляции») и нормированного на половину длины модулирующей волны расстояния до объекта локации r_n (ось «расстояния»). По вертикали на этих ХАС отложены относительные уровни $a_n(k)$ составляющих автодинного отклика на k -й гармонике частоты Ω_m модуляции. На «нулевой» гармонике эта ось обозначена как $a_n(0)$ (см. рис. 1). На первой гармонике частоты модуляции она обозначена как $a_n(1)$ (см. рис. 2), на второй – $a_n(2)$ (см. рис. 3), третьей – $a_n(3)$ (см. рис. 4). Расчеты выполнялись для нормированного полезного сигнала $a_n = a / \Gamma_0 K_a$ при разложении функции (16) с учетом (17)–(21) в гармонический ряд Фурье по периоду модулирующей функции $f_m(t)$. Для этих же ХАС на рис. 5 и 6 приведены семейства графиков их сечений при $m_{AM} = 0.8$ (см. рис. 5) и $r_n = 0.5$ (см. рис. 6).

Для случая равномерного изменения нормированного времени τ_h на рис. 7 и 8 соответственно представлены результаты расчета временных $a_h(\tau_h)$ и спектральных $a_h(F_h)$ диаграмм автодинного сигнала, рассчитанные для генератора с АМ ($m_{AM} = 0.5$, $p_{CM} = 0$) и с АЧМ ($m_{AM} = 0.5$, $p_{CM} = 1$). Расчеты диаграмм выполнялись при соотношении частот Ω_m модуляции и Ω_a автодинного сигнала $z = 10$, углах смещения $\theta = 1$ и $\psi = 1$ для различных значений нормированного расстояния r_h (см. рис. 7 и 8 под номерами I–V).

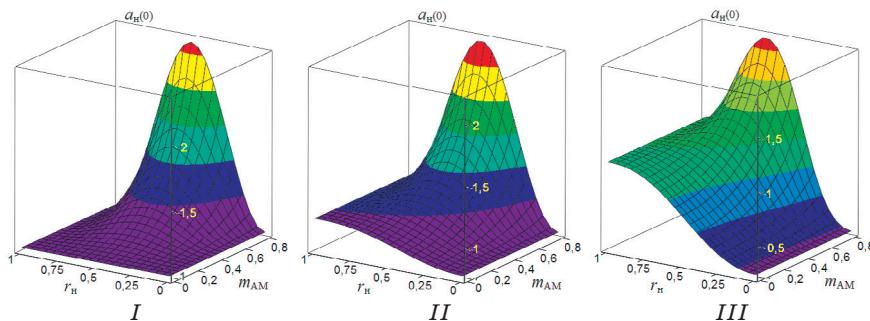


Рис. 1. ХАС $a_h(0)$ автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний генератора с АЧМ на нулевой гармонике частоты модуляции, рассчитанные для различных значений p_{CM} : $p_{CM} = 0$ (I), $p_{CM} = 2$ (II) и $p_{CM} = 5$ (III)

Fig. 1. Characteristics of the amplitude selection (CAS) $a_h(0)$ of the autodyne signal on the variation of the oscillation amplitude with AFM on the zero harmonic of the modulation frequency calculated for different of the values of p_{CM} : $p_{CM} = 0$ (I), $p_{CM} = 2$ (II) and $p_{CM} = 5$ (III)

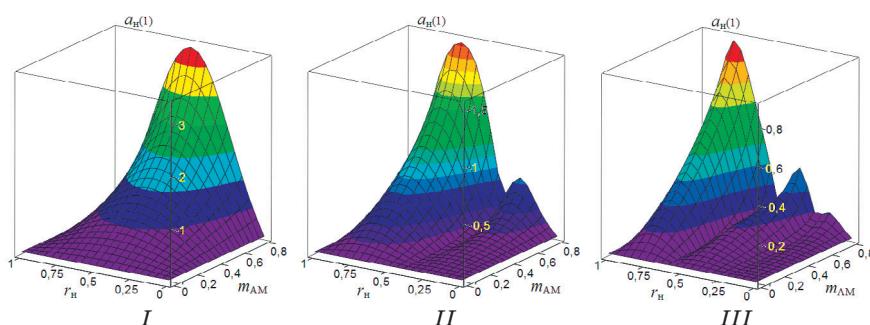


Рис. 2. ХАС $a_h(1)$ автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний генератора с АЧМ на первой гармонике частоты модуляции, рассчитанные для различных значений p_{CM} : $p_{CM} = 0$ (I), $p_{CM} = 5$ (II) и $p_{CM} = 10$ (III)

Fig. 2. CAS $a_h(1)$ of the autodyne signal on the variation of the oscillation amplitude with AFM on the first harmonic of the modulation frequency calculated for the different values of p_{CM} : $p_{CM} = 0$ (I), $p_{CM} = 5$ (II) and $p_{CM} = 10$ (III)

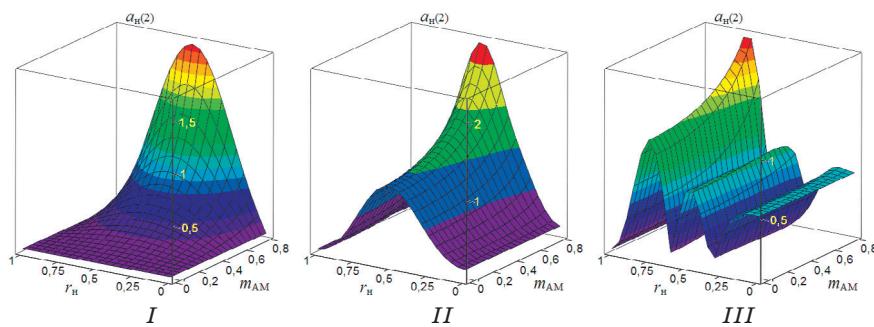


Рис. 3. XAC $a_h(2)$ автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний генератора с АЧМ на второй гармонике частоты модуляции, рассчитанные для различных значений $p_{\text{ЧМ}}$: $p_{\text{ЧМ}} = 0$ (I), $p_{\text{ЧМ}} = 5$ (II), $p_{\text{ЧМ}} = 10$ (III)

Fig. 3. CAS $a_h(2)$ of the autodyne signal on the variation of the oscillation amplitude with AFM on the second harmonic of the modulation frequency calculated for the different values of $p_{\text{ЧМ}}$: $p_{\text{ЧМ}} = 0$ (I), $p_{\text{ЧМ}} = 5$ (II) and $p_{\text{ЧМ}} = 10$ (III)

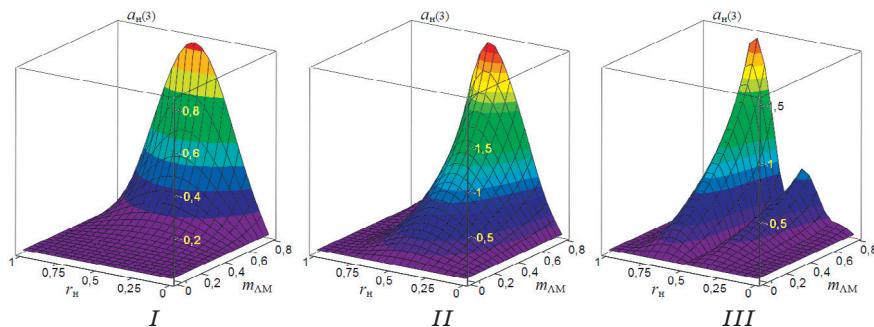


Рис. 4. XAC $a_h(3)$ автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний генератора с АЧМ на третьей гармонике частоты модуляции, рассчитанные для различных значений $p_{\text{ЧМ}}$: $p_{\text{ЧМ}} = 0$ (I), $p_{\text{ЧМ}} = 5$ (II) и $p_{\text{ЧМ}} = 10$ (III)

Fig. 4. CAS $a_h(3)$ of the autodyne signal on the variation of the oscillation amplitude with AFM on the third harmonic of the modulation frequency calculated for the different values of $p_{\text{ЧМ}}$: $p_{\text{ЧМ}} = 0$ (I), $p_{\text{ЧМ}} = 5$ (II) and $p_{\text{ЧМ}} = 10$ (III)

Из характеристик и графиков рис. 1–4 с римскими цифрами I и II, а также кривых 1 и 2 рис. 5 видно, что максимум автодинного отклика при отсутствии и сравнительно «малом» уровне ЧМ соответствует середине зоны амплитудной селекции, когда $r_h = 0.5$. Такой характер поведения автодинного отклика в середине XAC при преобладании процесса АМ над ЧМ объясняется явлением регенерации сигнала в петле обратной связи «генератор – объект локации – генератор», когда процесс АМ колебаний и воздействие амплитуды отраженного излучения находятся в фазе.

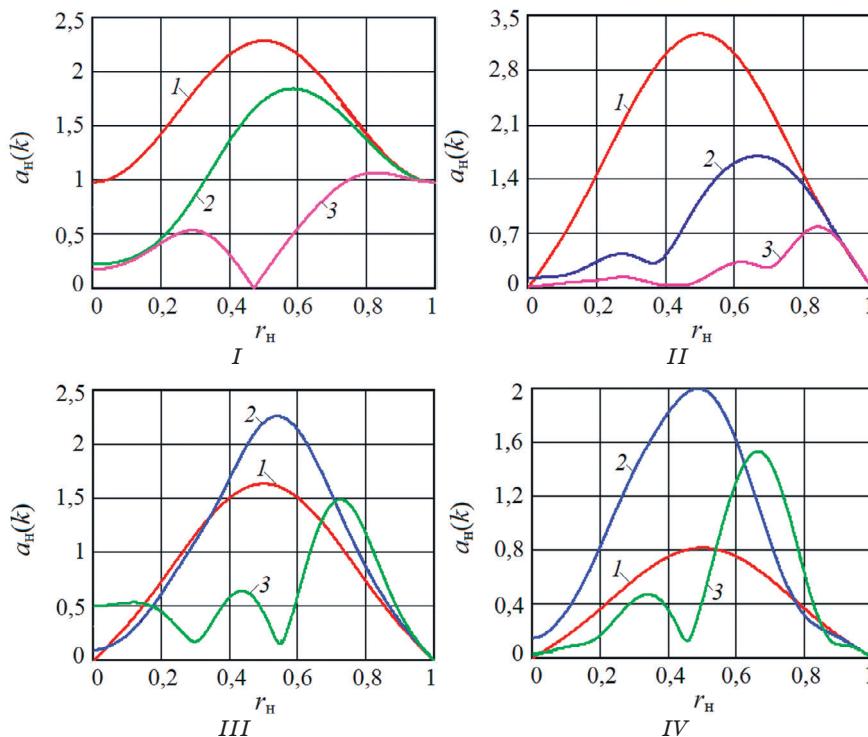


Рис. 5. Графики сечения ХАС по оси r_h на нулевой $a_h(0)$ (I), первой $a_h(1)$ (II), второй $a_h(2)$ (III), третьей $a_h(3)$ (IV) гармониках частоты модуляции, рассчитанные при $m_{AM} = 0.8$ для различных значений p_{CM} : $p_{CM} = 0$ (кривая 1), $p_{CM} = 2$ (кривая 2), $p_{CM} = 5$ (кривая 3) (I); $p_{CM} = 0$ (кривая 1), $p_{CM} = 5$ (кривая 2), $p_{CM} = 10$ (кривая 3) (II); $p_{CM} = 0$ (кривая 1), $p_{CM} = 5$ (кривая 2), $p_{CM} = 10$ (кривая 3) (III), (IV)

Fig. 5. Plots of CAS section along the axis r_h on the zero $a_h(0)$ (I), first $a_h(1)$ (II), second $a_h(2)$ (III), third $a_h(3)$ (IV) harmonics of the modulation frequency calculated at $m_{AM} = 0.8$ for different values of p_{CM} : $p_{CM} = 0$ (curve 1), $p_{CM} = 2$ (curve 2), $p_{CM} = 5$ (curve 3) (I); $p_{CM} = 0$ (curve 1), $p_{CM} = 5$ (curve 2), $p_{CM} = 10$ (curve 3) (II); $p_{CM} = 0$ (curve 1), $p_{CM} = 5$ (curve 2), $p_{CM} = 10$ (curve 3) (III), (IV)

Подобного рода явления наблюдаются, например, в измерителях малых дальностей «рециркуляционного» типа [39–41]. В этих измерителях выделенное приемным устройством СБРЛ напряжение модуляции отраженного сигнала после усиления снова подается в необходимой полярности на модулятор передатчика. Подбором параметров элементов замкнутого контура (усиления и сдвига фазы), в который входят объект локации и среда распространения, можно добиться режима генерации на некоторой частоте, которая зависит от времени задержки отраженного излучения. Из результатов вычислений ХАС видно, что при гармонической АМ и малом уровне ЧМ наиболее выгодно использо-

вание больших значений коэффициента АМ, величина которого приближается к единице. При этом появляется возможность выделения сигналов на высших гармониках частоты модуляции.

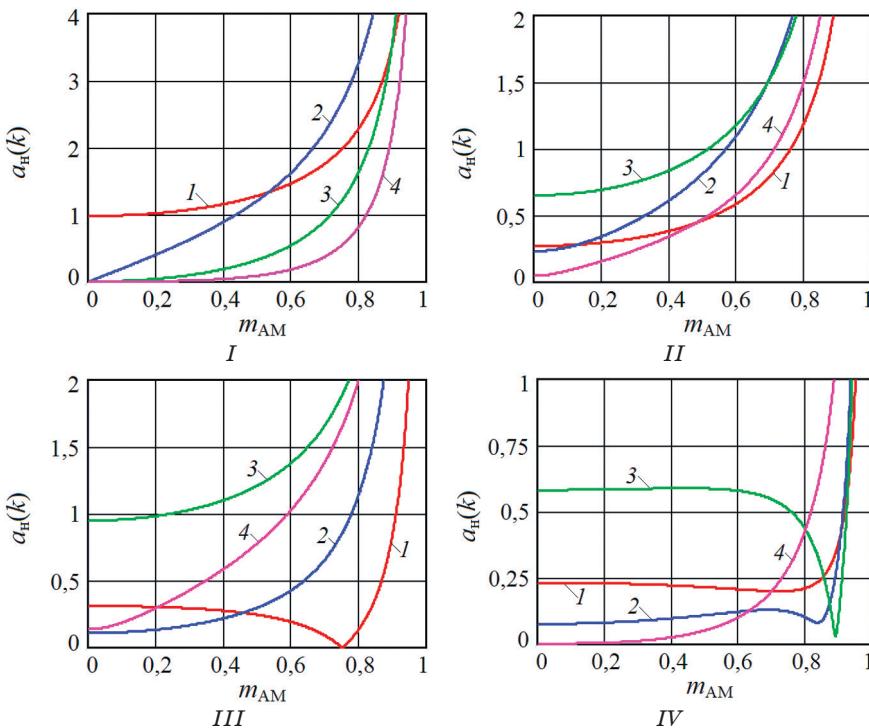


Рис. 6. Графики сечения ХАС по оси m_{AM} на нулевой $a_{\text{h}}(0)$ (кривые 1), первой $a_{\text{h}}(1)$ (кривые 2), второй $a_{\text{h}}(2)$ (кривые 3) и третьей $a_{\text{h}}(3)$ (кривые 4) гармониках частоты модуляции, рассчитанные при $r_{\text{h}} = 0.5$ для различных значений $p_{\text{ЧМ}}$:

$$p_{\text{ЧМ}} = 0 \text{ (I); } p_{\text{ЧМ}} = 3 \text{ (II); } p_{\text{ЧМ}} = 5 \text{ (III); } p_{\text{ЧМ}} = 10 \text{ (IV)}$$

Fig. 6. Plots of CAS sections along axis m_{AM} on the zero $a_{\text{h}}(0)$ (curves 1), first $a_{\text{h}}(1)$ (curves 2), second $a_{\text{h}}(2)$ (curves 3) and third $a_{\text{h}}(3)$ (curves 4) harmonics of the modulation frequency calculated at $r_{\text{h}} = 0.5$ for different values $p_{\text{ЧМ}}$: $p_{\text{ЧМ}} = 0$ (I); $p_{\text{ЧМ}} = 3$ (II); $p_{\text{ЧМ}} = 5$ (III); $p_{\text{ЧМ}} = 10$ (IV)

В случае «высокого» уровня ЧМ происходит смещение области главного максимума в сторону, где $r_{\text{h}} > 0.5$, и появление многогорбой ХАС (см. рис. 1–4 под номером III, кривые 3 рис. 5). При этом амплитуда отклика на всех гармониках $\Omega_{\text{м}}$ частоты модуляции, включая «нулевую», во всех случаях наличия или отсутствия сопутствующей ЧМ значительно возрастает с приближением коэффициента m_{AM} к единице (см. рис. 6, I–IV). Интересно отметить также, что при отсутствие АМ, когда $m_{\text{AM}} = 0$, но наличие ЧМ на нулевой и четных гармониках $\Omega_{\text{м}}$ наблюдается формирование многогорбых ХАС (см. рис. 1 и 3 под номерами II и III).

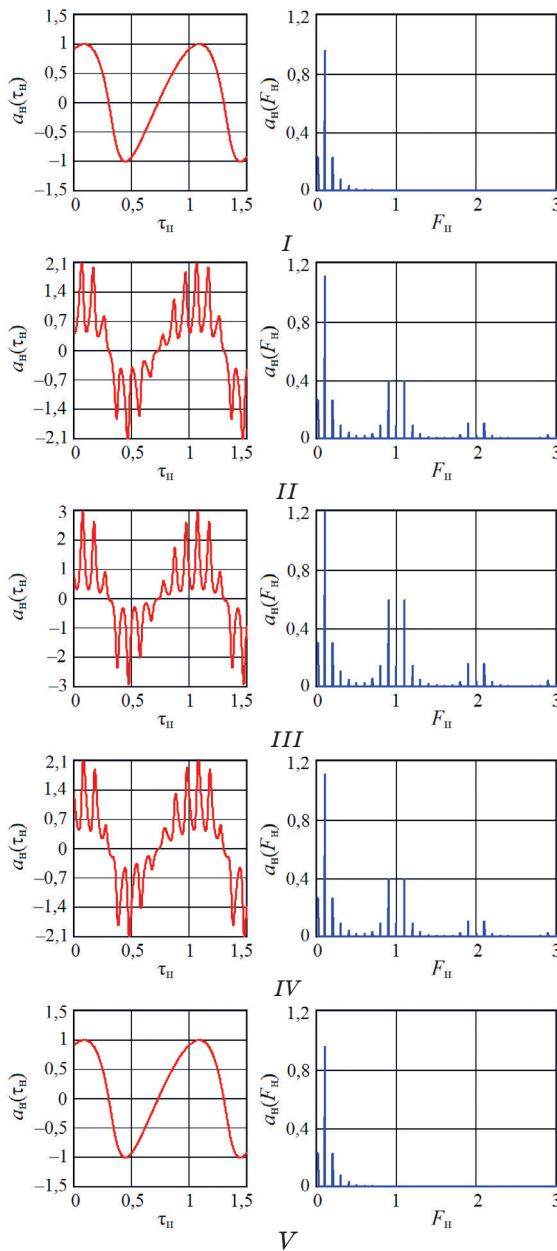


Рис. 7. Временные $a_h(\tau_h)$ и спектральные $a_h(F_h)$ диаграммы автодинного сигнала, рассчитанные для генератора с АМ при отсутствии ЧМ ($p_{\text{ЧМ}} = 0$) и различных значениях r_h : $r_h = 0$ (I); $r_h = 0.25$ (II); $r_h = 0.5$ (III); $r_h = 0.75$ (IV); $r_h = 1$ (V)

Fig. 7. Time $a_h(\tau_h)$ and spectral $a_h(F_h)$ diagrams of the autodyne signal calculated for the oscillator with AM at absence of ЧМ ($p_{\text{ЧМ}} = 0$) and different values r_h : $r_h = 0$ (I); $r_h = 0.25$ (II); $r_h = 0.5$ (III); $r_h = 0.75$ (IV); $r_h = 1$ (V)

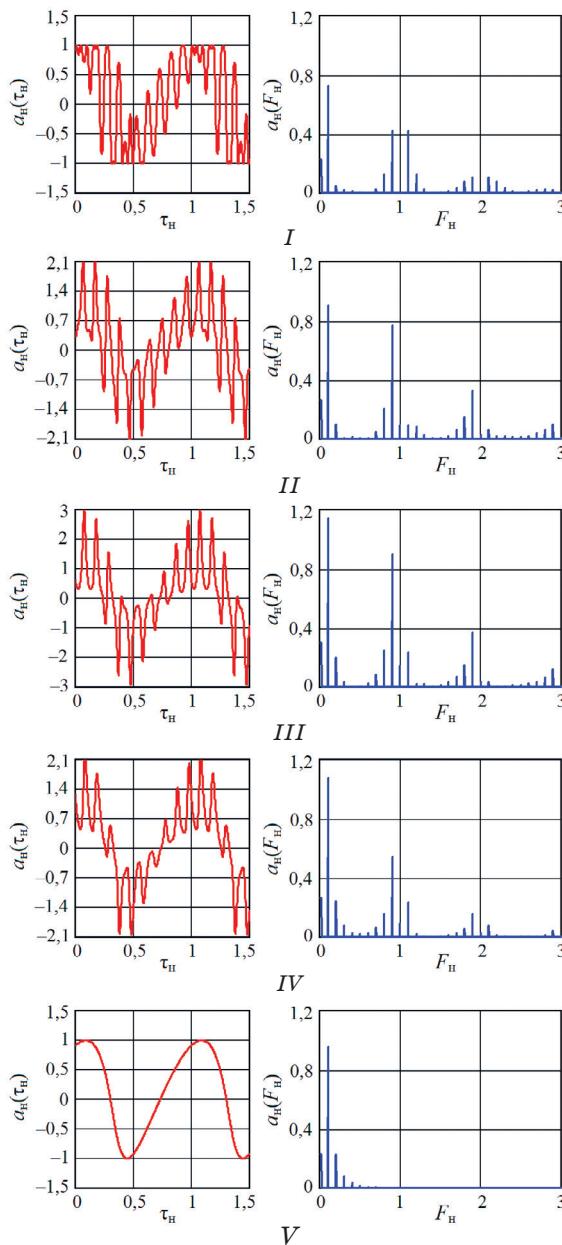


Рис. 8. Временные $a_h(t_h)$ и спектральные $a_h(F_h)$ диаграммы автодинного сигнала, рассчитанные для генератора с АМ при наличии ЧМ ($p_{\text{ЧМ}} = 1$) и различных значениях r_h : $r_h = 0$ (I); $r_h = 0.25$ (II); $r_h = 0.5$ (III); $r_h = 0.75$ (IV); $r_h = 1$ (V)

Fig. 8. Time $a_h(t_h)$ and spectral $a_h(F_h)$ diagrams of the autodyne signals calculated for the oscillator with AM at the presence of FM ($p_{\text{ЧМ}} = 1$) and different values r_h : $r_h = 0$ (I); $r_h = 0.25$ (II); $r_h = 0.5$ (III); $r_h = 0.75$ (IV); $r_h = 1$ (V)

ХАС автодинного отклика на гармониках частоты модуляции существенно отличаются от ХАС, формируемой в области «нулевых» (доплеровских) частот (см. рис. 1 и 2–4). Это отличие состоит в наличии «мертвых» зон в ХАС на гармониках, где наблюдается подавление сигналов, отраженных от объектов, находящихся на определенных расстояниях от СБРЛ. Одна из таких важнейших зон находится в непосредственной близости от СБРЛ, где $r_n = 0$. 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 АМ и ЧМ при выделении сигналов на гармониках частоты модуляции является весьма важным свойством этих систем, обеспечивающим их повышенную помехоустойчивость.

Из результатов выполненных расчетов видно, что в автодинных СБРЛ с АМ по синусоидальному закону наиболее целесообразно использование больших значений коэффициента АМ. При этом появляется возможность выделения сигналов на высших гармониках частоты модуляции, на которых форма ХАС является более предпочтительной для ряда применений, а уровень ПАМ – значительно ниже. Однако при гармоническом законе АМ уровень сигнала на высших гармониках резко спадает с увеличением их номера. И применение гармоник выше третьего порядка становится нерациональным. При этом наличие сопутствующей ЧМ излучения АД способствует изменению соотношения между уровнями гармоник в пользу повышения их порядка.

Временные диаграммы $a_n(\tau_n)$, как видно из рис. 7, содержат медленную (доплеровскую) и быструю составляющие. Медленная составляющая, в «чистом» виде показанная на рис. 7, I, аналогична амплитудной характеристике (АХА) обычного немодулированного автодина [37]. Из графиков рис. 7, I и V видно, что как в начале, так и в конце каждой ХАС автодинный отклик на выходе АД с АМ представлен только в виде доплеровского сигнала. Отклик на гармониках частоты модуляции Ω_m в этих случаях отсутствует. При смещении в среднюю область ХАС происходит наложение на доплеровскую составляющую сигнала дополнительных составляющих в форме «пиков», обусловленных процессом взаимодействия отраженных АМ колебаний с излучаемыми, также «промодулированными» по амплитуде с частотой Ω_m (см. рис. 7, II–IV). Эти дополнительные составляющие вызывают соответствующий рост уровня сигнала как на нулевой, так и на гармониках частоты модуляции Ω_m . Как показали расчеты, амплитуда пиков существенно возрастает

ет с приближением коэффициента m_{AM} к единице, а также при переходе в область средней части ХАС, где $r_h = 0.5$. Из полученных на рис. 7 спектрограмм видно, что спектральные составляющие, полученные в АД с АМ на частотах, кратных частоте модуляции Ω_m , при движении объекта локации 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 дополнительной ЧМ, сопутствующей процесс АМ, как видно из графиков рис. 8, I, вызывает фазовую модуляцию доплеровского сигнала в начале ХАС, где $r_h = 0$, и перенос сигнала на гармоники частоты Ω_m модуляции. Однако в конце каждой ХАС автодинный отклик на выходе автодина с АЧМ представлен только в виде доплеровского сигнала и отклик на гармониках частоты Ω_m модуляции в этих случаях отсутствует (см. рис. 8, V). В средней части ХАС происходит наложение на составляющие сигнала, обусловленных процессом АМ, дополнительных составляющих связанных с процессом ЧМ (см. рис. 7, II–IV). Отличия по фазе этих составляющих вызывает заметную асимметрию спектра сигналов на гармониках частоты модуляции. Тогда как составляющая сигнала на «нулевой» доплеровской частоте имеет практическию амплитуду.

Наличие ангармонических искажений на временных диаграммах и высших гармоник частоты автодинного сигнала в его спектре (см. рис. 7, I, V и 8, V) объясняется известной нелинейностью набега фазы $\delta(t, \tau)$ отраженного излучения, вызванной автодинными изменениями частоты генерации АД [37]. Степень этих искажений сигналов определяется преимущественно величиной параметра обратной связи C_{OC} . Так при $C_{OC} \ll 1$ автодинные изменения являются практически гармоническими, а с его увеличением – значительно отличаются от синусоидальных, приобретая «наклон волн» автодинного сигнала. «Направление» этого наклона зависит от знака и величины параметров неизохронности (через угол θ) и неизодромности (через угол ψ), генератора и относительного направления движения объекта локации. Данные искажения являются причиной появления высших гармоник доплеровского сигнала, как в области низких (доплеровских) частот, так и в окрестности гармоник частоты Ω_m модуляции.

4. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования, цель которых – проверка выводов теоретического анализа, выполнялись на примере генераторного модуля “Тигель-08М” 8-мм диапазона (см. рис. 9, I),

изготовленного по гибридно-интегральной технологии на основе двухмезового диода Ганна [42]. На подложке этого модуля в щелевой резонатор параллельно (по СВЧ) установлены чипы пластинарного диода Ганна и детекторный диод с барьером Шоттки, связанные по цепям смещения (показаны на рис. 9, II цифрами «1» и «2» соответственно). Одна из мез диода Ганна выполнена большого сечения. Плотность тока в ней недостаточна для возбуждения доменов сильного поля, поэтому она является пассивной. Вторая меза малого сечения является активной и создает условия для возбуждения колебаний в генераторе. Детекторный диод предназначен для выделения автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний.

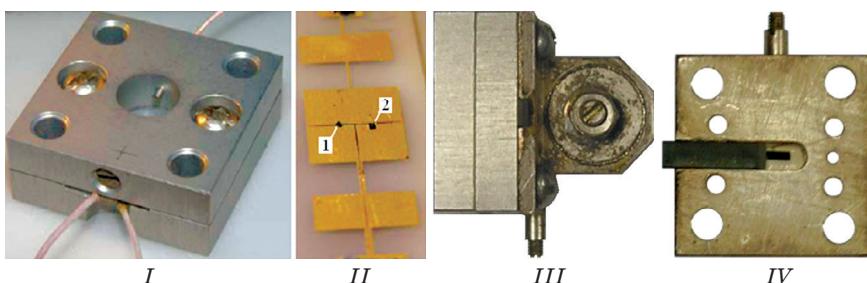


Рис. 9. Внешний вид модуля “Тигель-08М” (I), топологии диодной вставки (II), АГ со стабилизирующим резонатором (III) и элемента резистивной связи с резонатором (IV)

Fig. 9. External view of the module “Tigel-08M” (I), topology of the diode insertion (II), oscillator with the stabilizing resonator (III) and the element of resistor coupling with the resonator (IV)

В конструкции модуля “Тигель-08М” подложка помещается между двух пластин, образующих его корпус (см. рис. 9, I). В центре лицевой пластины предусмотрено отверстие круглой формы для вывода СВЧ излучения, а задняя плата – глухая с винтом для регулировки частоты. С целью стабилизации частоты генерации к задней стенке модуля пристыковывался дополнительный высокодобротный резонатор (см. рис. 9, III). Связь между рабочим и стабилизирующим резонаторами выполнена через сквозную прорезь в задней стенке в виде отрезка волноводного канала. Стабилизирующий резонатор, изготовленный из суперинвара и работающий на волне H_{011} , имел собственную добротность порядка $5 \cdot 10^3$. Резистивная связь обеспечивалась введением в окно связи с резонатором клиновидной вставки из поглотителя, положение которой в процессе настройки можно регулировать (см. рис. 9, IV).

Предварительно модуль настраивался в режим максимальной чувствительности без стабилизации частоты

по изложенной в [43] методике с использованием имитатора доплеровского сигнала. Для этого изменялась величина связи с нагрузкой путем вариации положения предусмотренного в конструкции модуля винта и подбиралась величина напряжения смещения U_0 на диоде Ганна. Оптимальная величина этого напряжения для исследуемого модуля была выбрана в пределах $U_0 = 3.6 \dots 4$ В, ток потребления составил 0.2 А. Частота генерации модуля 37.5 ГГц, его выходная мощность 15 мВт.

При настройке в режим максимальной автодинной чувствительности стабилизированного модуля корректировалась также связь между рабочим и стабилизирующим резонаторами посредством изменения положения поглощающей вставки и размеров отверстия связи. Данная связь устанавливалась такой величины, чтобы выходная мощность генератора уменьшалась не более чем на 5...10% от номинального значения. Совпадение частоты генерации с собственной частотой стабилизирующего резонатора контролировалось по моменту «захвата частоты», когда автодинная девиация частоты генерации имела минимальное значение.

Функциональная схема экспериментальной установки приведена на рис. 10. В ней предусмотрена регистрация автодинного отклика при изменении расстояния до отражателя-имитатора, скорости его перемещения, уровня отраженного сигнала и других факторов.

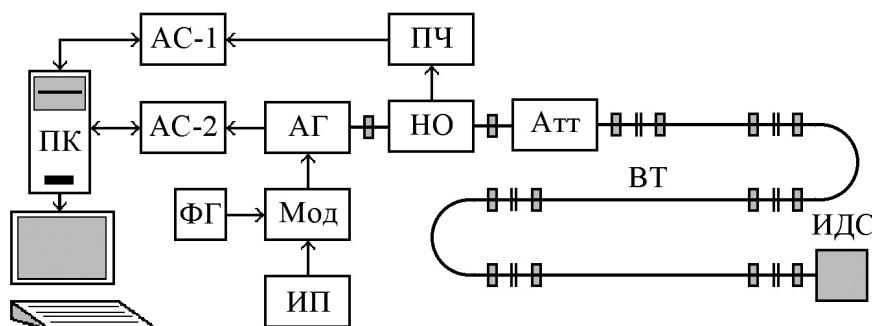


Рис. 10. Функциональная схема стенда для исследований АД с АЧМ:
 АГ – автодинный генератор; АС-1 и АС-2 – анализаторы спектра;
 Атт – аттенюатор; ВТ – волноводный тракт; ИДС – имитатор
 доплеровского сигнала; ИП – источник питания; Мод – модулятор;
 НО – направленный ответвитель; ПК – персональный компьютер; ПЧ – переносчик частоты сигнала; ФГ – функциональный генератор

Fig. 10. Functional diagram of the workbench for AD with AFM investigations: АГ – autodyne oscillator; АС-1 and АС-2 – spectrum analyzers; Атт – the attenuator; ВТ – waveguide path; ИДС – the Doppler signal imitator, ИП – power supply; Мод – modulator; НО – directional coupler; ПК – personal computer; ПЧ – frequency converter; ФГ – functional generator

Исследуемый автодинный генератор АГ (см. рис. 10) связан с имитатором доплеровского сигнала ИДС [36] 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 объекта локации и обратно излучения. Боковое плечо направленного ответвителя НО подключено к входу переносчика частоты ПЧ, выход которого соединен с входом первого анализатора спектра АС-1. Выходной сигнал встроенного в АГ детектора поступает на вход второго анализатора спектра АС-2. Оба анализатора спектра типа USB-SA44B связаны с персональным компьютером ПК через USB-кабели. Питание от стабилизированного источника питания ИП на исследуемый генератор АГ поступает через модулятор Мод, выполненный на биполярном транзисторе. На управляющий вход модулятора Мод синусоидальное напряжение частотой 10 МГц поступает от функционального генератора ФГ. При этом требуемый коэффициент АМ автодинного генератора АГ контролируется анализатором спектра АС-1.

В экспериментах были реализованы следующие условия: длина волноводного тракта ВТ сечением $7.2 \times 3.4 \text{ мм}^2$ между генератором АГ и имитатором ИДС (см. рис. 10) равнялась $l_b = 9.5 \text{ м}$, т.е. время запаздывания отраженного излучения в волноводе, рассчитанное по формуле $\tau = 2l_b/c\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{kp})^2}$, где λ_{kp} – критическая длина волны волновода, составляло $\tau = 75 \cdot 10^{-9} \text{ с}$. Данное расстояние примерно соответствует при выбранной частоте модуляции 10 МГц середине ХАС. Переменным аттенюатором Атт в тракте устанавливалась величина коэффициента отражения Γ_0 , при которой автодинная девиация частоты составляла $\Delta\omega_a = 2\pi \cdot 1.5 \cdot 10^6$, а расчетное значение параметра обратной связи $C_{oc} = 0.5$. Величина девиации частоты $\Delta\omega_a$ оценивалась с помощью анализатора спектра АС-1 при работающем ИДС по ширине спектра СВЧ излучения АГ.

На рис. 11, I представлен спектр СВЧ колебаний генератора АГ, полученного от стабилизированного по частоте модуля с АМ глубиной около 50 %. Величина АМ оценивалась по соотношению основной и боковых составляющих спектра, полученного с помощью анализатора спектра АС-1 (см. рис. 10). Спектр СВЧ колебаний нестабилизированного этого же модуля при прежней глубине АМ представлен на рис. 11, II. Асимметрия спектра в последнем случае указывает на наличие сопутствующей ЧМ.

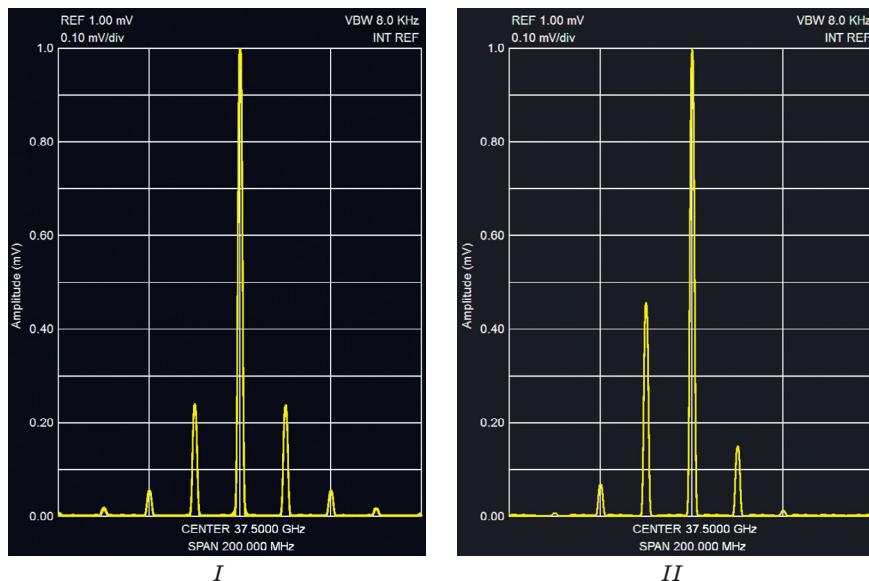


Рис. 11. Спектры СВЧ колебаний выходных сигналов стабилизированного (I) и обычного (II) (нестабилизированного) генераторов

Fig. 11. Spectrums of microwave oscillations of the output of the stabilized (I) and usual (II) (non-stabilized) oscillators

При указанных выше условиях эксперимента с помощью анализатора спектра АС-2 (см. рис. 10) нами были получены спектры автодинных сигналов для стабилизированного и обычного генераторных модулей, которые представлены на рис. 12, I и II соответственно. При этом скорость движения отражателя имитатора ИДС поддерживалась постоянной, при которой частота автодинного сигнала составляла 10 кГц. На спектрах представлены области нулевой и первых трех гармоник частоты модуляции. Наличие высших гармоник частоты Доплера в указанных областях спектра обусловлено ангармоническими искажениями сигналов. Эти искажения, как известно [12], наблюдаются, 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 сигнал становится синусоидальным. Из спектров рис. 12 также видно, что уровень первой гармоники ПАМ значительно превышает уровень гармоник более высокого порядка. Существенные отличия вида спектра исследуемых генераторных модулей состоят в асимметрии спектров в окрестности гармоник частоты модуляции в случае нестабилизированного генераторного модуля,

у которого уровень сопутствующей ЧМ излучения значительно больше, чем у стабилизированного модуля (см. рис. 12, II).

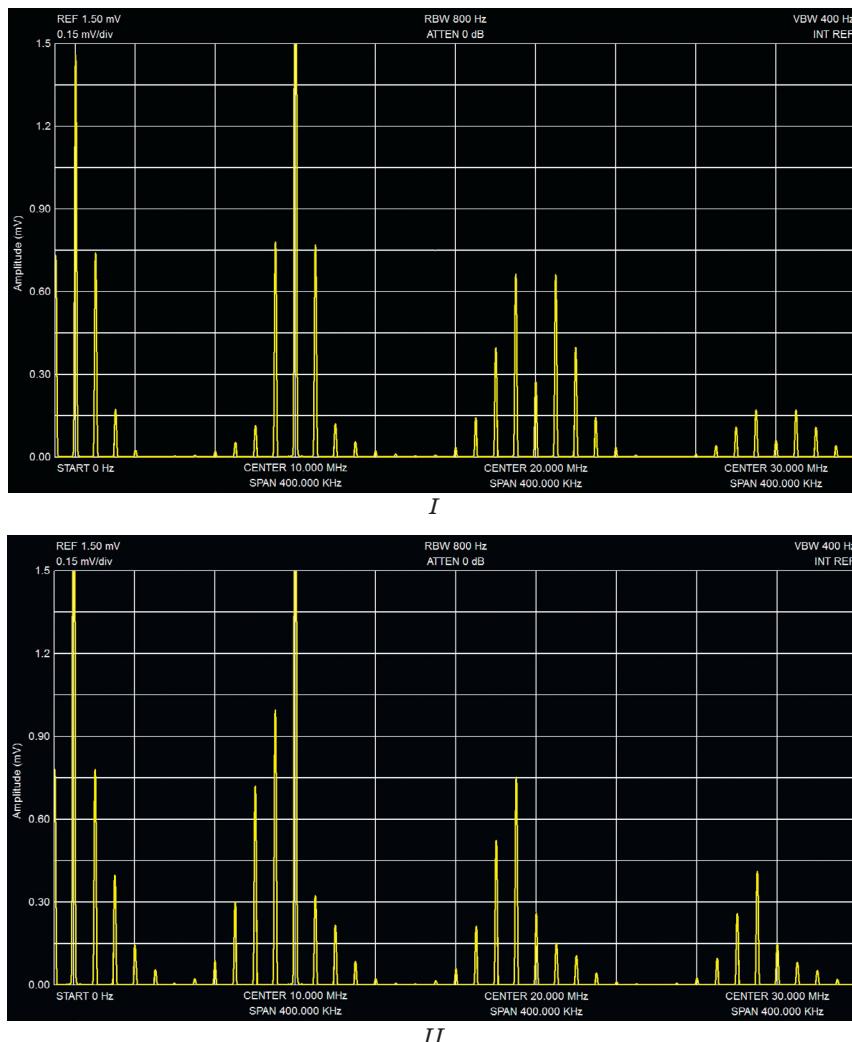


Рис. 12. Спектры автодинного сигнала, полученные для стабилизированного по частоте генератора на диоде Ганна с АМ (I) и для обычного (нестабилизированного) генератора, в котором присутствует сопутствующая ЧМ (II)

Fig. 12. Spectrums of the autodyne signal obtained for the stabilized oscillator in the frequency on the Gunn diode with AM (I) and for the usual (non-stabilized) oscillator, in which the attended FM is present (II)

Из сравнения рассчитанных выше спектральных диаграмм, представленных на рис. 7, и 8 под номером III, и экспериментальных спектров, приведенных на рис. 12 видно их качеств-

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

Заключение

Разработана математическая модель автодинного генератора с одновременной амплитудной и частотной модуляцией (АЧМ) излучения, обеспечивающая возможность расчета характеристик амплитудной селекции (ХАС), формы и спектра автодинного сигнала для общего случая произвольного соотношения времени запаздывания отраженного от объекта локации излучения и периода модулирующей функции. В результате выполненных расчетов для случая гармонического закона модуляции и экспериментальных исследований АД на диодах Ганна установлено влияние сопутствующей частотной модуляции на формирование автодинных сигналов.

При отсутствии или сравнительно «малом» уровне ЧМ максимум автодинного отклика соответствует середине зоны амплитудной селекции. В случае «высокого» уровня ЧМ происходит смещение области главного максимума в сторону больших значений нормированного расстояния r_n и появление многогорбой ХАС. При этом амплитуда отклика на всех гармониках Ω_m частоты модуляции, включая «нулевую», во всех случаях наличия или отсутствия сопутствующей ЧМ значительно возрастает с приближением коэффициента m_{AM} амплитудной модуляции к единице.

Автодинным генераторам с АЧМ также, как и обычным (немодулированным) автодинам, свойственны ангармонические искажения сигналов вследствие автодинных изменений частоты генерации в условиях, когда величина параметра C_{oc} обратной связи соизмерима с единицей. Наличие искажений автодинных сигналов требует своего учета при выборе параметров автодинных генераторов и в устройствах обработки сигналов.

Отличительные особенности автодинов с АЧМ состоят в том, что автодинный отклик переносится также на гармоники частоты Ω_m модуляции, причем эффективность этого переноса повышается с увеличением глубины модуляции и зависит также от сопутствующей величины девиации частоты генерации и расстояния до объекта локации. Благодаря этому автодины с АЧМ на гармониках частоты модуляции обладают свойством амплитудной селекции отражающих объектов на определенных расстояниях.

ниях, что обеспечивает повышение помехоустойчивости СБРЛ, выполненных на их основе.

Попутно установлено, что по сравнению с обычным нестабилизированным автодином стабилизированный автодинный генератор обеспечивает значительное уменьшение сопутствующей ЧМ и величины степени искажений сигналов. Полученные результаты исследований, дополняющие и развивающие предшествующие исследования АД в данном направлении [33; 35–38], показали преимущества автодинов со стабилизацией частоты перед обычными (нестабилизированными) автодинами и целесообразность разработки и производства новых типов монолитных и гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона, стабилизированных дополнительным высокодобротным резонатором.

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. 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
4. Takayama Y. Doppler signal detection with negative resistance diode oscillators. *IEEE Trans. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1973;21(2):89–94. DOI: 10.1109/TMTT.1973.1127929
5. Gupta M-S., Lomax R. J., Haddad G. I. Noise consideration in self-mixing IMPATT-diode oscillators for short-range Doppler radar applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1974;22(1):37–43. DOI: 10.1109/TMTT.1974.1128158
6. Nygren T., Sjolund A. Sensitivity of Doppler radar with self-detecting diode oscillators. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* 1974;22(5):494–498. DOI: 10.1109/TMTT.1974.1128268.
7. Kotani M., Mitsui S., Shirahata K. Load-variation detector characteristics of a detector-diode loaded Gunn oscillator. *Electronics and Communications in Japan*. 1975;58-B(5):60–66.
8. Somekh M. G., Richmond W., Moroz J., Lazarus M. T. Development of pulsed self-oscillating mixer. *Electronics Letters*. 1980;16(15):597–599. DOI: 10.1049/el:19800414
9. Хотунцев Ю. Л., Тамарчак Д. Я. *Синхронизированные генераторы и автодины на полупроводниковых приборах*. М.: Радио и связь; 1982.
10. Богачев В. М., Лысенко В. Г., Смольский С. М. *Транзисторные генераторы и автодины*. М.: МЭИ; 1993.

11. Komarov I. V., Smolskiy S. M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Norwood, MA: Artech House Publishers; 2003.
12. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скриполь Ан. В. *Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов*. Саратов: Изд. Саратовского университета; 2003.
13. 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.
14. 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
15. Usanov D. A., Skripal Al. V., Skripal An. V., Postelga A. E. A microwave autodyne meter of vibration parameters. *Instruments and Experimental Techniques*. 2004;47(5):689–693. DOI: 10.1023/B:INET.0000043882.16801.3a
16. Данилин А. И., Второпин С. Д., Чернявский А. Ж. Использование автодинных приемопередающих модулей на диодах Ганна для определения деформаций лопаток турбомашины. В: *11-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2001)*, Севастополь, 10–14 сент. 2001 г. Севастополь: Вебер; 2001. С. 654–656. DOI: 10.1109/CRMICO.2001.961705
17. Соловьев Ю. Л., Рудаков А. В. Малогабаритное устройство миллиметрового диапазона для систем ближней радиолокации. В: *18-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2008)*, Севастополь, 8–12 сент. 2008 г. Севастополь: Вебер; 2008. С. 113. DOI: 10.1109/CRMICO.2008.4676311
18. Votoropin S. D. Autodyne sensors of the EHF range on Gunn diodes. In: *38th European Microwave Conference. Amsterdam, October 27–31, 2008*. Amsterdam; 2008. P. 1330–1333. DOI: 10.1109/EUMC.2008.4751709
19. Armstrong B. M., Brown R., Rix F., Stewart J. A. C. Use of microstrip impedance-measurement technique in the design of a BARITT diplex Doppler sensor. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1980;28(12):1437–1442. DOI: 10.1109/TMTT.1980.1130263
20. Lazarus M. J., Pantoja F. P., Somekh M., Novak S., Margison S. New direction-of-motion Doppler detector. *Electronics Letters*. 1980;16(25):953–954. DOI: 10.1049/el:19800679
21. Yasuda A., Kuwashima S., Kanai Y. A shipborne-type wave-height meter for oceangoing vessels, using microwave Doppler radar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1985;10(2):138–143. DOI: 10.1109/JOE.1985.1145094
22. Efanov A. A., Diskus C. G., Stelzer A., Thim H. W., Lubke K., Springer A. L. Development of a low-cost 35 GHz radar sensor. *Annals of Telecommunications*. 1997;52(3):219–223. DOI: 10.1007/BF02996047
23. 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. Режим доступа: <http://radiotec.ru/number/1528>

24. 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

25. Alidoost S. A., Sadeghzade R., Fatemi R. Autodyne system with a single antenna. In: *11th Intern. Radar Symposium (IRS-2010)*. Lithuania: Vilnius; 2010. Part 2. P. 406–409.

26. 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

27. Usanov D. A., Postelga A. E. Reconstruction of complicated movement of part of the human body using radio wave autodyne signal. *Biomedical Engineering*. 2011;45(1):6–8. DOI: 10.1007/s10527-011-9198-9

28. Nguyen C., Kim S. *Theory, Analysis and Design of RF Interferometric Sensors*. Springer Science+Business Media; 2012. DOI: 10.1007/978-1-4614-2023-1

29. Mirsaitov F. N., Safonova E. V., Boloznev V. V. Microwave autodyne vibrosensor in aeroengine diagnostics. In: *European Frequency and Time Forum (EFTF), Neuchatel, June 23–26, 2014*. Neuchatel; 2014. P. 140–143. DOI: 10.1109/EFTF.2014.7331447

30. Kim S; Kim B.-H., Yook J.-G., Yun G.-H. Proximity vital sign sensor using self-oscillating mixer. In: *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC), Seoul, Aug. 21–25, 2016*. Seoul; 2016. P. 1446–1448. DOI: 10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601402

31. 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

32. Ветрова Ю. В., Дорошенко А. А., Постельга А. Э., Усанов Д. А. Дистанционный контроль движения поверхности объекта с использованием двухканального СВЧ-автодинного генератора. *Радиотехника и электроника*. 2019;64(4):387–395. DOI: 10.1134/S0033849419040119

33. 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>

34. Острейковский А. В. Применение автомодуляции в автодинных СВЧ генераторах ММ-диапазона. В: *13-я Международная Крымская микроволновая конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2003)*, Севастополь, 8–12 сент. 2003 г. Севастополь; М.: Вебер; 2003. С. 170–171.

35. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Autodyne signals in case of random delay time of the reflected radiation. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2013;72(16):1521–1536. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i16.70

36. Носков В. Я., Игнатков К. А. Динамические особенности автодинных сигналов. *Известия вузов. Физика*. 2013;56(4):56–64. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19054968>
37. 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>
38. 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
39. Woodyard J. R. *Radio system for distance and velocity measurement*. Pat. US2424263, filed Feb. 23, 1943.
40. Шаров Ю. В., Кислов О. А. Об одном способе измерения малых дальностей. В: *Радиоприемные устройства*. М.: Труды МЭИ; 1972. С. 63–67.
41. Разгоняев Ю. В. Об определении расстояния до движущегося объекта рециркуляционным методом. В: *Методы и устройства формирования и обработки сигналов*. М.: Труды МЭИ; 1979. С. 21–24.
42. 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>
43. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 2. Теоретические и экспериментальные исследования. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2007;(7):3–33. Режим доступа: <http://radiotec.ru/article/2182>

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. 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
4. Takayama Y. Doppler signal detection with negative resistance diode oscillators. *IEEE Trans. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1973;21(2):89–94. DOI: 10.1109/TMTT.1973.1127929
5. Gupta M-S., Lomax R. J., Haddad G. I. Noise consideration in self-mixing IMPATT-diode oscillators for short-range Doppler radar applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1974;22(1):37–43. DOI: 10.1109/TMTT.1974.1128158

6. Nygren T., Sjolund A. Sensitivity of Doppler radar with self-detecting diode oscillators. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* 1974;22(5):494–498. DOI: 10.1109/TMTT.1974.1128268
7. Kotani M., Mitsui S., Shirahata K. Load-variation detector characteristics of a detector-diode loaded Gunn oscillator. *Electronics and Communications in Japan.* 1975;58-B(5):60–66.
8. Somekh M. G., Richmond W., Moroz J., Lazarus M. T. Development of pulsed self-oscillating mixer. *Electronics Letters.* 1980;16(15):597–599. DOI: 10.1049/el:19800414
9. Khotuntsev Yu. L., Tamarchak D. Ya. *Synchronized oscillators and autodyne on semiconductor devices.* Moscow: Radio and communications; 1982. (In Russ.)
10. Bogachev V. M., Lysenko V. G., Smolsky S. M. *Transistor oscillators and autodyne.* Moscow: MPEI; 1993. (In Russ.)
11. Komarov I. V., Smolskiy S. M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar.* Norwood, MA: Artech House Publishers; 2003.
12. Usanov D. A., Skripal Al. V., Skripal An. V. *Physics of Semiconductor RF and Optical Autodynes.* Saratov: Saratov University Publisher; 2003. (In Russ.)
13. Gershenson E. M., Tumanov B. N., Buzykin V. T., Kalygina V. M., Levit B. I. General characteristics and features of the autodyne effect in self-oscillators. *Radiotekhnika i elektronika.* 1982;27(1):104–112. (In Russ.)
14. 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
15. Usanov D. A., Skripal Al. V., Skripal An. V., Postelga A. E. A microwave autodyne meter of vibration parameters. *Instruments and Experimental Techniques.* 2004;47(5):689–693. DOI: 10.1023/B:INET.0000043882.16801.3a
16. Danilin A. I., Votoropin S. D., Tcherniavski A. G. Using of autodyne transceiver modules on Gunn diodes for determination of turbomachine blades deformations. In: *11th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, September 10–14, 2001.* Sevastopol: Veber; 2001, pp. 654–656. DOI: 10.1109/CRMICO.2001.961705654–656
17. Solovyov Y. L., Rudakov A. V. The miniature module MM-wave range for radar systems. In: *18th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, September 8–12, 2008.* Sevastopol: Veber; 2008, pp. 113. DOI: 10.1109/CRMICO.2008.4676311
18. Votoropin S. D. Autodyne sensors of the EHF range on Gunn diodes. In: *38th European Microwave Conference. Amsterdam, October 27–31, 2008.* Amsterdam; 2008, pp. 1330–1333. DOI: 10.1109/EUMC.2008.4751709
19. Armstrong B. M., Brown R., Rix F., Stewart J. A. C. Use of microstrip impedance-measurement technique in the design of a BARITT

- diplex Doppler sensor. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1980;28(12):1437–1442. DOI: 10.1109/TMTT.1980.1130263
20. Lazarus M. J., Pantoja F. P., Somekh M., Novak S., Margison S. New direction-of-motion Doppler detector. *Electronics Letters*. 1980;16(25):953–954. DOI: 10.1049/el:19800679
21. Yasuda A., Kuwashima S., Kanai Y. A shipborne-type wave-height meter for oceangoing vessels, using microwave Doppler radar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1985;10(2):138–143. DOI: 10.1109/JOE.1985.1145094
22. Efanov A. A., Diskus C. G., Stelzer A., Thim H. W., Lubke K., Springer A. L. Development of a low-cost 35 GHz radar sensor. *Annals of Telecommunications*. 1997;52(3):219–223. DOI: 10.1007/BF02996047.
23. Noskov V. Ya., Varavin A. V., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Zakarlyuk N. M., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Modern hybrid-integrated autodyne oscillators of microwave and millimeter wave ranges and their application. Part 9. Autodyne radar applications. *Successes of Modern Electronic Engineering*. 2016;(3):32–86. (In Russ.) Available at: <http://radiotec.ru/number/1528>
24. 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.2003.81.812575
25. Alidoost S. A., Sadeghzade R., Fatemi R. Autodyne system with a single antenna. In: *11th Intern. Radar Symposium (IRS-2010)*. Lithuania: Vilnius; 2010. Part 2, pp. 406–409.
26. 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
27. Usanov D. A., Postelga A. E. Reconstruction of complicated movement of part of the human body using radio wave autodyne signal. *Biomedical Engineering*. 2011;45(1):6–8. DOI: 10.1007/s10527-011-9198-9
28. Nguyen C., Kim S. *Theory, Analysis and Design of RF Interferometric Sensors*. Springer Science+Business Media; 2012. DOI: 10.1007/978-1-4614-2023-1
29. Mirsaitov F. N., Safonova E. V., Boloznev V. V. Microwave autodyne vibrosensor in aeroengine diagnostics. In: *European Frequency and Time Forum (EFTF), Neuchatel, June 23–26, 2014*. Neuchatel; 2014, pp. 140–143. DOI: 10.1109/EFTF.2014.7331447
30. Kim S; Kim B.-H., Yook J.-G., Yun G.-H. Proximity vital sign sensor using self-oscillating mixer. In: *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC), Seoul, Aug. 21–25, 2016*. Seoul; 2016, pp. 1446–1448. DOI: 10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601402
31. 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

32. Vetrova Iu. V., Doroshenko A. A., Postelga A. E., Usanov D. A. Remote control of the surface movement of an object using a two-channel SHF autodyne generator. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2019;64(4):409–417. DOI: 10.1134/S1064226919040119
33. 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>
34. Ostreykovskyy O.V. Self-modulation in autodyne microwave MM-range oscillators. In: *13th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, September 8–12, 2003*. Sevastopol; Moscow: Veber; 2003, pp. 170–171. (In Russ.)
35. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Autodyne signals in case of random delay time of the reflected radiation. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2013;72(16):1521–1536. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i16.70
36. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Dynamic features of autodyne signals. *Russian Physics Journal*. 2013;56(4):420–428. DOI: 10.1007/s11182-013-0051-3
37. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Autodyne characteristic dependence on the UHF oscillator's inherent parameters. *Radiotekhnika*. 2012;(6):24–46. (In Russ.)
38. 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
39. Woodyard J. R. *Radio system for distance and velocity measurement*. Pat. US2424263, filed Feb. 23, 1943.
40. Sharov Yu. V., Kislov O. A. About one method of measuring short ranges. In: *Radio receivers*. Moscow: Transactions of MPEI; 1972, pp. 63–67. (In Russ.)
41. Razgonyaev Yu. V. On determining the distance to a moving object by the recirculation method. In: *Methods and devices for the formation and processing of signals*. Moscow: Proceedings of MPEI; 1979, pp. 21–24. (In Russ.)
42. 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>
43. Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. Modern hybrid-integrated autodyne oscillators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 2. Theoretical and experimental investigations. *Successes of Modern Electronic Engineering*. 2007;(7):3–33. (In Russ.) Available at: <http://radiotec.ru/article/2182>

Информация об авторах

Носков Владислав Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32).

Смольский Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры Формирования и обработки радиосигналов, заместитель директора Института радиотехники и электроники, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14).

Игнатков Кирилл Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры Радиоэлектроники и телекоммуникаций, заместитель директора по науке Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ, Уральский федеральный университет 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).

Sergey M. Smolskiy – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Formation and Processing of Radio Signals Department, Deputy Director of the Institute of Radio Engineering and Electronics, National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, 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, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia).

Поступила / Received: 30.03.2020

Принята в печать / Accepted: 08.04.2020