

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2022.6.4.001

УДК 621.373.12; 621.396.962.3

## Особенности сигналов от распределенных целей автодинного импульсного радиолокатора с линейной частотной модуляцией

В. Я. Носков<sup>1</sup> ✉, Е. В. Богатырев<sup>2</sup>, Р. Г. Галеев<sup>3</sup>, Д. С. Вишняков<sup>1</sup><sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, Мира, 19<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79<sup>3</sup> Сибирский университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева, Россия, 660037, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

✉ v.y.noskov@urfu.ru

### Аннотация

Разработана математическая модель для описания сигналов автодинной системы ближней радиолокации (СБРЛ) с одновременной импульсной модуляцией (ИМ) амплитуды и линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Рассматриваются особенности формирования сигналов, полученных от распределенной цели в виде ансамбля произвольного числа точечных отражателей. Выполнены расчеты сигналов предложенным методом шагов для случая двух точечных отражателей на объекте локации, расположенных на различных расстояниях от СБРЛ. Установлены отличительные свойства сигналов, формируемых при приеме первого и последующих излучений, отраженных от цели. После посылки зондирующего излучения прием первого отраженного излучения от совокушности блестящих точек сопровождается формированием линейной суперпозиции сигналов от отдельных отражателей. Прием последующих отражений вызывает появление комбинационного взаимодействия сигналов отдельных отражателей. Характер и величина такого взаимодействия определяется величиной параметра обратной связи автодинной СБРЛ, зависящего от величин девиации частоты и времени запаздывания отраженного излучения. Результаты экспериментальных исследований автодинной СБРЛ с одновременной ИМ амплитуды и ЛЧМ получены при использовании генераторного модуля, выполненного на диоде Ганна 8-миллиметрового диапазона.

### Ключевые слова

автодин, автодинный эффект, автодинный сигнал, радиоимпульсный автодин, автодин с частотной модуляцией, параметр обратной связи, система ближней радиолокации

© Носков В. Я., Богатырев Е. В., Галеев Р. Г., Вишняков Д. С., 2022

### Для цитирования

Носков В. Я., Богатырев Е. В., Галеев Р. Г., Вишняков Д. С. Особенности сигналов от распределенных целей автодинного импульсного радиолокатора с линейной частотной модуляцией. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(4):351–377. DOI: 10.15826/urej.2022.6.4.001.

## Features of Signals from Distributed Targets of an Autodyne Pulse Radar with Linear Frequency Modulation

V. Ya. Noskov<sup>1</sup> ✉, E. V. Bogatyrev<sup>2</sup>, R. G. Galeev<sup>3</sup>, D. S. Vishnyakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia  
B. N. Yeltsin, 19 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

<sup>2</sup> Siberian Federal University, 79, Svobodny Pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia

<sup>3</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31,  
im. gazeti “Krasnoyarskii rabochii” Pr. Krasnoyarsk, 660037, Russia

✉ v.y.noskov@urfu.ru

### Abstract

A mathematical model has been developed to describe the signals of an autodyne short-range radar system (SRRS) with simultaneous pulse modulation (PM) of amplitude and linear frequency modulation (LFM). The features of the formation of signals received from a distributed target in the form of an ensemble of an arbitrary number of point reflectors are considered. Calculations of signals by the proposed step method are performed for the case of two point reflectors on a location object situated at different distances from the SRRS. The distinctive properties of the signals generated when receiving the first and subsequent radiation reflected from the target are established. After sending the probing radiation, the reception of the first reflected radiation from a set of brilliant points is accompanied by the formation of a linear superposition of signals from individual reflectors. The reception of subsequent reflections causes the appearance of a combinational interaction of the signals of individual reflectors. The nature and magnitude of such interaction is determined by the magnitude of the feedback parameter of the autodyne SRRS, which depends on the values of the frequency deviation and the delay time of the reflected radiation. The results of experimental studies of the autodyne SRRS with simultaneous amplitude and LPM have been obtained using the oscillator module made on the 8-millimeter Gann diode.

### Keywords

autodyne, autodyne effect, autodyne signal, radio pulse autodyne, frequency-modulated autodyne, feedback parameter, short-range radar system.

### For citation

Noskov V. Ya., Bogatyrev E. V., Galeev R. G., Vishnyakov D. S. Features of Signals from Distributed Targets of an Autodyne Pulse Radar with Linear Frequency Modulation. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(4):351–377. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2022.6.4.001.

## Введение

Автодинные системы ближней радиолокации (СБРЛ) находят широкое применение в системах для определения параметров движения на транспорте и робототехнике, в аппаратуре для определения физических характеристик веществ и экспресс-анализа параметров технологических процессов, а также в средствах медицинской диагностики пациентов и других [1–6]. В этих радарх приемопередающие устройства, выполненные на базе автодинов<sup>1</sup> (АД), представляют собой автогенератор, выполняющий одновременно функции передатчика зондирующего излучения и приемника отраженного от объекта локации излучения.

Принцип действия этих устройств основан на автодинном эффекте, который состоит в изменениях параметров автоколебаний, таких как амплитуда и частота, а также постоянных токов электродов и напряжения смещения активного элемента автогенератора, под воздействием собственного отраженного от объекта локации электромагнитного излучения. Регистрация этих изменений в виде полезного автодинного сигнала низкой частоты дает возможность (при соответствующей обработке) извлекать информацию о скорости и направлении движения, расстоянии и пройденном пути исследуемого объекта, а также его электрофизических параметрах. Применение АД в СБРЛ особенно привлекательно, прежде всего простотой технического решения и низкой стоимостью, малыми габаритами и массой приемопередающего устройства при его достаточно высоком энергетическом потенциале [7–9].

Применение импульсной модуляции (ИМ) амплитуды и частотной модуляции (ЧМ) зондирующего излучения значительно расширяет функциональные возможности СБРЛ, а также улучшает их параметры и характеристики [10]. В случае, когда время задержки  $\tau$  отраженного от цели излучения меньше длительности генерируемых  $t_{\text{имп}}$  радиоимпульсов ( $\tau < t_{\text{имп}}$ ), процесс приема происходит одновременно с передачей зондирующего радиоимпульса. В этом случае излучаемые и отраженные колебания являются когерентными и процесс выделения полезного сигнала основан на регистрации изменений картины их интерференции в самом автогенераторе, то есть на автодинном эффекте. При условии  $\tau > t_{\text{имп}}$  излучаемый и отраженный радиоимпульсы не перекрываются во времени, поэтому в этом случае в момент действия зондирующего импульса выходной сигнал АД отсутствует [11; 12]. Частотная модуляция зондирующего излучения

<sup>1</sup> В литературе наряду с широко распространенным термином «autodyne» часто используют термины: oscillator-detector, self-oscillating mixer (SOM), self-mixing oscillator, self-detecting oscillator и др.

АД вызывает периодические изменения картины интерференции излучаемых и отраженных колебаний в колебательной системе автогенератора, которые определяют соответствующее формирование «преобразованных» автодинных сигналов [13; 14].

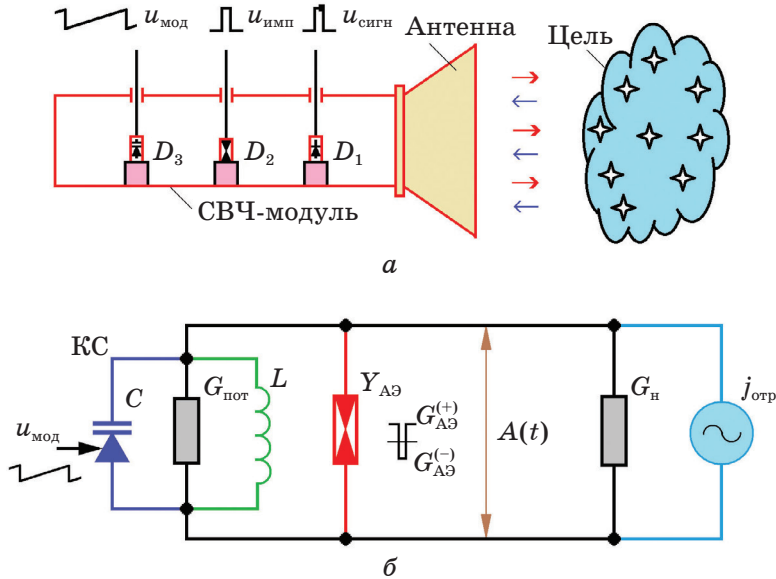
Одновременное использование ИМ и ЧМ излучения обеспечивает повышение помехоустойчивости СБРЛ, возможность формировать ближнюю и дальнюю границы зоны обнаружения по расстоянию, регистрировать появление движущихся объектов в контролируемой зоне, а также измерять их скорость движения и оценивать дальность до цели [15]. Кроме того, прерывистость работы автогенератора повышает скрытность работы СБРЛ, а также значительно снижает его энергопотребление. Благодаря отмеченным достоинствам радиоимпульсные АД широко используются в устройствах военного назначения, в различных датчиках предотвращения наезда на препятствия в автомобильном и железнодорожном транспорте, в радиоволновых датчиках охранного назначения и многих других приложениях [16–19].

В реальных условиях работы СБРЛ автодин взаимодействует с излучением, отраженным от распределенного, пространственно неоднородного объекта локации. Однако все известные нам исследования, посвященные изучению свойств сигналов от распределенного объекта, были выполнены в основном применительно к АД непрерывного излучения без модуляции [20]. Ряд результатов таких исследований получен отдельно для радиоимпульсных АД и автодинов с ЧМ. При этом свойства сигналов при одновременном использовании ИМ и ЧМ автодина изучены только на примере элементарного точечного отражателя [15]. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть также случай, когда на СБРЛ с ИМ и ЧМ воздействует отраженное излучение от распределенного объекта. Результаты этих исследований, необходимые для правильного применения АД в СБРЛ и расширения их функциональных возможностей, приведены в настоящей статье.

### Основные соотношения для анализа

Для разработки математической модели взаимодействия автодинной СБРЛ с собственным отраженным от пространственно распределенного объекта излучением рассмотрим представленную на рис. 1а функциональную схему. СВЧ-модуль автодинной СБРЛ непосредственно связан с антенной. Он содержит три последовательно соединенные волноводные секции, в которые помещены (считая от антенны) детекторный диод  $D_1$ , генераторный диод  $D_2$  и варикап  $D_3$ . Рабочее смещение на генераторный диод  $D_2$  подается от импульсного модулятора, который

формирует запускающий импульс  $u_{\text{имп}}$ . Частота  $\omega$  излучения СВЧ-модуля управляется напряжением  $u_{\text{мод}}$ , которое поступает на варикап  $D_3$ . Электромагнитные колебания, вырабатываемые в СВЧ-модуле, излучаются антенной в направлении цели, представленной совокупностью блестящих точек.



**Рис. 1.** Функциональная (а) и эквивалентная (б) схемы СВЧ-модуля автодинной СБРЛ с одновременной импульсной и частотной модуляцией

**Fig. 1.** Functional (a) and equivalent (b) schemes of the microwave module of the autodyne SRRS with simultaneous pulse and frequency modulation

Отраженное от цели излучение возвращается через антенну в СВЧ-модуль и вызывает в нем автодинный эффект, который состоит в изменениях амплитуды и частоты колебаний, а также среднего значения тока в цепи смещения генераторного диода  $D_2$ . Изменения амплитуды колебаний обычно регистрируются в виде автодинного сигнала  $u_{\text{сигн}}$  с помощью детекторного диода  $D_1$ . В некоторых СБРЛ выходной сигнал регистрируется в цепи питания диода  $D_2$  с помощью последовательно включенного резистора или широкополосного трансформатора [21].

Эквивалентная электрическая схема СВЧ-модуля представлена на рис. 1б. Его колебательная система (КС) представлена на схеме параллельным контуром, который содержит емкость  $C$ , индуктивность  $L$  и проводимость собственных потерь  $G_{\text{пот}}$ . При этом емкость  $C$  представляет собой совокупность емкостей собственно резонатора, постоянной части эквивалентных емко-

стей варикапа и активного элемента (АЭ) генераторного диода  $D_2$ . Параллельно контуру подключены проводимость нагрузки  $G_H$  и источник тока  $j_{отр}$  отраженного от цели сигнала

$$j_{отр} \equiv j_{отр}(t, \tau) = \sum_{k=1}^K j_k(t, \tau_k).$$

При этом  $G_H$  отображает входную проводимость антенны, а источник тока  $j_{отр}$  – воздействие на автодинный генератор совокупности парциальных источников тока  $j_k(t, \tau_k)$ , вызванных отраженным излучением от соответствующих блестящих точек (элементарных отражателей) цели. Здесь  $\tau_k = 2l_k/c$  – время запаздывания отраженного излучения от  $k$ -й блестящей точки, находящейся на расстоянии  $l_k$ ;  $c$  – скорость распространения радиоволн.

Активный элемент (АЭ) СВЧ-модуля (например, диод Ганна) в данной схеме по высокой частоте также подключен параллельно резонатору. Средняя за период колебаний проводимость  $Y_{АЭ}$  этого элемента в общем случае является величиной комплексной. Она зависит от амплитуды  $A$  и текущей частоты  $\omega$  колебаний:

$$Y_{АЭ} = G_{АЭ} + jB_{АЭ} \equiv G_{АЭ}(A, \omega) + jB_{АЭ}(A, \omega),$$

где  $G_{АЭ}$ ,  $B_{АЭ}$  – резистивная и реактивная проводимости АЭ соответственно. Будем полагать далее, что в процессе импульсной модуляции проводимость  $G_{АЭ}$  изменяется. Она имеет положительное значение  $G_{АЭ}^{(+)}$ , когда генерация отсутствуют, и становится отрицательной  $G_{АЭ}^{(-)}$ , когда создаются условия возбуждения колебаний и формирования зондирующего радиоимпульса (см. диаграмму на поле рис. 1б).

Основной задачей анализа рассматриваемой модели является определение законов установления амплитуды и частоты автоколебаний после включения СВЧ-модуля во время формирования радиоимпульса. При этом особый интерес представляют исследования процесса изменения генерации автоколебаний относительно режима его автономных колебаний при воздействии первых радиоимпульсов, вернувшихся от каждой блестящей точки через время распространения отраженного излучения. Затем рассмотрим реакцию АД на вторые и последующие парциальные воздействия измененным излучением от предыдущего воздействия, которые также вызывают дополнительные изменения параметров автоколебаний. После воздействия на генератор многократных парциальных отражений излучения от всей совокупности блестящих точек в нем устанавливаются конечные значения автодинного отклика, характерные для непрерывного режима работы АД [14].

Для решения поставленной задачи полагаем, что установление режима стационарных колебаний происходит за пренебрежимо малое время по сравнению с величиной наименьшего времени запаздывания  $\tau_k$ . При этом, учитывая обычно достаточно высокое значение нагруженной добротности  $Q_H = \omega_c C / G$ , где  $G = G_{\text{пот}} + G_H$ ,  $\omega_c = (LC)^{-1/2}$  – собственная частота КС, полагаем, что колебания на АЭ являются квазигармоническими. Тогда выражение для выходных колебаний, излучаемых посредством антенны в направлении объекта локации, в общем виде можно записать как:  $u(t) = \text{Re}[A(t)\sigma(t)\exp j\Psi(t)]$ . Здесь  $\Psi(t) = \omega_0 t + \varphi$  – полная фаза колебаний АД;  $A = A(t)$ ,  $\varphi = \varphi(t)$  – медленно меняющиеся амплитуда и фаза в текущий момент времени  $t$ ;  $\sigma(t)$  – функция Хевисайда.

Отраженные от объекта колебания и принятые антенной, но не вошедшие еще в резонатор СВЧ-модуля АД, являются также квазигармоническими. Запишем их в виде совокупности парциальных колебаний тока, полученных от  $K$  блестящих точек:

$$j_{\text{отр}}(t, \tau) = \text{Re} \sum_{k=1}^K J_k(t, \tau_k) \sigma(\tau_k) \exp j\Psi_k(t, \tau_k),$$

где  $J_k(t, \tau_k)$ ,  $\Psi_k(t, \tau_k)$  – парциальные амплитуда и фаза отраженных колебаний АД от  $k$ -й блестящей точки;  $\sigma(\tau_k) \equiv \sigma(t = \tau_k)$  – сдвинутая на время  $\tau_k$  функция  $\sigma(t)$ .

С учетом сделанных выше пояснений для схемы рис. 1б на основании законов Кирхгофа запишем:

$$\text{Re}[\dot{A}Y_{\text{АЭ}}] + \text{Re}[\dot{A}Y_{\text{КС}}] = j_{\text{отр}}(t, \tau), \quad (1)$$

где  $Y_{\text{КС}} \equiv Y_{\text{КС}}(\omega) = G[1 + j2Q_H(\omega - \omega_c)/\omega_c]$  – проводимость колебательной системы (КС).

Обычно амплитуда отраженной от цели и поступившей в резонатор АД волны значительно меньше амплитуды собственных колебаний генератора. Поэтому дальнейший анализ автодинного отклика выполним в приближении малого сигнала. Для этого применим к анализу уравнения (1) метод Курокавы [22]. Далее по известной методике [23] выполним линеаризацию образовавшейся системы укороченных уравнений в окрестности режима стационарных колебаний автономного генератора, когда  $j_{\text{отр}} = 0$  и  $A = A_0$ ,  $\omega = \omega_0$ . После ряда элементарных преобразований получим систему дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом для малых относительных вариаций амплитуды  $a = (A - A_0)/A_0$  и частоты  $\chi = (\omega - \omega_0)/\omega_0$  колебаний:

$$(Q_H/\omega_c)(da/dt) + \alpha a + \varepsilon \chi = \eta \sum_{k=1}^K \Gamma_k \sigma(\tau_k) \cos \delta_k(\tau_k), \quad (2)$$

$$(\mathcal{Q}_H / \omega_c)(d\varphi/dt) + \beta a + \mathcal{Q}_H \chi = -\eta \sum_{k=1}^K \Gamma_k \sigma(\tau_k) \sin \delta_k(\tau_k), \quad (3)$$

где  $\alpha = (A_0 / 2G)(\partial G_{AЭ} / \partial A)_0$ ,  $\varepsilon = (\omega_0 / 2G)(\partial G_{AЭ} / \partial \omega)_0$ ,  $\beta = (A_0 / 2G)(\partial B_{AЭ} / \partial A)_0$  – параметры, определяющие приведенную крутизну инкремента, неизодромность и неизохронность АД соответственно [23];  $\Gamma_k \equiv \Gamma_k(t, \tau_k) = \Gamma_{0k} A_k(t, \tau_k) / A(t)$ ,  $\delta_k(\tau_k) \equiv \delta_k(t, \tau_k) = \Psi(t) - \Psi_k(t, \tau_k)$  – модуль и фаза мгновенного парциального коэффициента отражения по напряжению от  $k$ -й блестящей точки, приведенные к зажимам АД;  $A_k(t, \tau_k)$ ,  $\Psi_k(t, \tau_k)$  – амплитуда и фаза колебаний АД в момент времени  $(t - \tau_k)$ ;  $\Gamma_{0k}$  – коэффициент отражения, характеризующий затухание излучения по амплитуде при его распространении до  $k$ -й блестящей точки и обратно;  $\eta = \mathcal{Q}_H / \mathcal{Q}_{вн}$ ,  $\mathcal{Q}_{вн}$  – КПД и внешняя добротность КС.

При ЧМ автономного генератора изменением напряжения смещения на варикапе, когда  $\Gamma_{0k} = 0$ , происходит как частотная  $\omega_{ЧМ}(t)$ , так и «паразитная» амплитудная модуляция (АМ)  $A_{АМ}(t)$  излучения [24]:

$$\omega_{ЧМ}(t) = \omega_0 + \Delta\omega_{ЧМ}(t) = \omega_0 [1 + m_{ЧМ} f_{мод}(t)], \quad (4)$$

$$A_{АМ}(t) = A_0 [1 + a_{АМ}(t)] = A_0 [1 + m_{АМ} f_{мод}(t)], \quad (5)$$

где  $m_{ЧМ} = \Delta\omega_{ЧМ} / \omega_0$  и  $m_{АМ} = \Delta A_{АМ} / A_0$  – коэффициенты ЧМ и амплитудной (АМ) модуляции излучения соответственно;  $\Delta\omega_{ЧМ}$ ,  $\Delta A_{АМ}$  – максимальные отклонения амплитуды и частоты генерации от их стационарных значений  $A_0$  и  $\omega_0$  вследствие модуляции колебаний генератора;  $f_{мод}(t)$  – нормированная модулирующая функция, имеющая частоту  $\Omega_{мод}$ .

Нахождение общего решения системы уравнений (2), (3) с учетом (4) и (5) при произвольных значениях ИМ и ЧМ, а также значений  $\Gamma_k$  и  $\delta_k(\tau_k)$  на сегодня не представляется возможным. Для продолжения анализа этой системы примем следующие упрощающие допущения, не умаляющие практическую ценность полученных результатов. Полагаем, что наименьший период автодинного отклика  $T_k$  значительно больше наибольшего времени запаздывания отраженного излучения  $\tau_k$ , а также времени установления автодинного отклика  $\tau_a = \mathcal{Q}_H / \alpha \omega_0 (1 - \gamma\rho)$ , где  $\gamma = \beta / \alpha$ ,  $\rho = \varepsilon / \mathcal{Q}_H$  коэффициенты неизохронности и неизодромности автогенератора соответственно [23]:  $T_k \gg \tau_k, \tau_a$ . Кроме того, полагаем, что период повторения радиоимпульсов  $T_{имп}$  значительно меньше периода модулирующей функции  $T_{мод} = 2\pi / \Omega_{мод}$ :  $T_{имп} \ll T_{мод}$ .

Первое допущение позволяет записать:  $\Gamma_k = \Gamma_{0k}$  [23]. Такое приближение в математической модели АД полагает учет лишь



фазового запаздывания отраженного излучения. Остальные допущения дают основания для нахождения квазистатического [25] решения первого приближения системы (2) и (3) с учетом (4) и (5). Для этого, полагая в (2) и (3)  $da/dt = d\varphi/dt = 0$ , решаем образовавшуюся систему алгебраических уравнений методом Крамера. В результате получим выражения для автодинного отклика по изменению относительной амплитуды  $a(t)$  и абсолютных значений частоты  $\omega(t)$  колебаний в виде:

$$a(t) = m_{\text{AM}} f_{\text{мод}}(t) + K_a \sum_{k=1}^K \Gamma_k \sigma(\tau_k) \cos(\delta_k - \psi), \quad (6)$$

$$\omega(t) = \omega_0 \left\{ 1 + m_{\text{ЧМ}} f_{\text{мод}}(t) - L_a \sum_{k=1}^K \Gamma_k \sigma(\tau_k) \sin(\delta_k + \theta) \right\}, \quad (7)$$

где  $K_a = \eta(1 + \rho^2)^{1/2} / \alpha(1 - \gamma\rho)$ ,  $L_a = \eta(1 + \gamma^2)^{1/2} / Q_{\text{H}}(1 - \gamma\rho)$  – коэффициенты автодинного усиления и автодинной девиации частоты генерации;  $\psi = \arctg(\rho)$ ,  $\theta = \arctg(\gamma)$  – углы фазового смещения автодинного отклика.

Далее рассмотрим последние слагаемые в (6) и (7), определяющие формирование полезных составляющих автодинного отклика. Для этих составляющих получим нормированные выражения для амплитудной  $a_{\text{H}}(t) = a(t) / \Gamma_{\Sigma} K_a$  (АХА) и частотной  $\chi_{\text{H}}(t) = \chi(t) / \Gamma_{\Sigma} L_a$  (ЧХА) характеристик автодинной СБРЛ с ИМ и ЧМ в виде:

$$a_{\text{H}}(t) = \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \cos(\delta_k - \psi), \quad (8)$$

$$\chi_{\text{H}}(t) = - \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \sin(\delta_k + \theta), \quad (9)$$

где  $R_k = \Gamma_k / \Gamma_{\Sigma}$  – нормированный модуль парциального коэффициента отражения  $k$ -й блестящей точки;  $\Gamma_{\Sigma} = \sum_{k=1}^K \Gamma_k$  – сумма модулей парциальных коэффициентов отражения от  $K$  блестящих точек объекта локации. АХА  $a_{\text{H}}(t)$  и ЧХА  $\chi_{\text{H}}(t)$  являются основными характеристиками автодинной СБРЛ, определяющими вид и спектральный состав формируемых в АД сигналов [25]. Отметим также, что, исходя из условия нормировки, сумма значений  $R_k$  по всем  $k$  должна быть равной единице.

Выражения (6) – (9) согласно методу шагов [26] позволяют записать основные соотношения для расчета абсолютных значений фазы  $\delta_k$  и частоты  $\omega(t)$  генерации, а также АХА  $a_{\text{H}}(t)$  и ЧХА  $\chi_{\text{H}}(t)$  автодинной СБРЛ с ИМ и ЧМ для общего случая воздействия излучения от  $K$  блестящих точек отражающего объекта.

**Шаг 0.** Данный шаг соответствует интервалу времени  $t \in (0, \tau_1)$  от момента включения генератора до прихода первого отраженного излучения. Как и в случае точечного отражателя [26], в этом случае  $\omega^{(0)}(t) = \omega_{\text{ЧМ}}(t) = \omega_0 + \Delta\omega_{\text{ЧМ}} f_{\text{мод}}(t)$  и  $a^{(0)}(t) = m_{\text{АМ}} f_{\text{мод}}(t)$ , а  $a_{\text{н}}^{(0)}(t) = \chi_{\text{н}}^{(0)}(t) = 0$ . Таким образом, на этом интервале имеем для каждого отдельного радиоимпульса режим стационарных колебаний, зависящий только от модулирующей функции  $f_{\text{мод}}(t)$ . При этом автодинный отклик СБРЛ отсутствует.

Здесь и далее индексы в скобках сверху при переменных означают номер шага.

**Шаг 1.** В результате воздействия первого ансамбля отраженного излучения от  $K$  блестящих точек объекта локации происходят автодинные изменения набега фаз  $\delta_k^{(1)}$  отраженного излучения от отдельных отражателей, частоты  $\omega^{(1)}(t)$  колебаний, а также АХА  $a_{\text{н}}^{(1)}(t)$  и ЧХА  $\chi_{\text{н}}^{(1)}(t)$  АД в виде простых сумм отдельных составляющих из (6)–(9):

$$\delta_k^{(1)} = \omega^{(0)}(t)\tau_k = \omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k = [\omega_0 + \Delta\omega_{\text{ЧМ}} f_{\text{мод}}(t)]\tau_k, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \omega^{(1)}(t) &= \omega_{\text{ЧМ}}(t) - \Delta\omega^{\max} \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \sin(\delta_k^{(1)} + \theta) = \\ &= \omega_{\text{ЧМ}}(t) - \Delta\omega^{\max} \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k + \theta], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} a_{\text{н}}^{(1)}(t) &= \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \cos(\delta_k^{(1)} - \psi) = \\ &= \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \cos[\omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k - \psi], \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \chi_{\text{н}}^{(1)}(t) &= \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \sin(\delta_k^{(1)} + \theta) = \\ &= \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k + \theta], \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\Delta\omega^{\max} = \sum_{k=1}^K \Delta\omega_k^{\max} = \Gamma_{\Sigma} \omega_0 L_a -$$

максимальные отклонения частоты при воздействии на АД совокупности всех парциальных отражений от  $K$  блестящих точек объекта локации;  $\Delta\omega_k^{\max}$  – тоже, но вызванные отражением от  $k$ -й блестящей точки.

**Шаг 2.** Измененные на первом шаге колебания после задержки на время прохождения излучения до ансамбля отражателей и обратно воздействуют на генератор, у которого параметры колебаний принимают новые значения фазы  $\delta_k^{(2)}$ , частоты  $\omega^{(2)}(t)$ , АХА  $a_H^{(2)}(t)$  и ЧХА  $\chi_H^{(2)}(t)$ :

$$\delta_k^{(2)} = \omega^{(1)}(t)\tau_k = \omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k - \sum_{k=1}^K C_k^{\text{OC}} \sigma(\tau_k) \sin[\omega^{(0)}(t)\tau_k + \theta], \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \omega^{(2)}(t) &= \omega_{\text{ЧМ}}(t) - \Delta\omega \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \sin(\delta_k^{(2)} + \theta) = \\ &= \omega_{\text{ЧМ}}(t) - \Delta\omega \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k + \\ &+ \theta - \sum_{k=1}^K C_k^{\text{OC}} \sigma(2\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k + \theta]], \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} a_H^{(2)}(t) &= \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \cos(\delta_k^{(2)} - \psi) = \\ &= \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \cos[\omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k - \psi - \sum_{k=1}^K C_k^{\text{OC}} \sigma(2\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k + \theta]], \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \chi_H^{(2)}(t) &= \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \sin(\delta_k^{(2)} + \theta) = \\ &= \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k + \theta - \sum_{k=1}^K C_k^{\text{OC}} \sigma(2\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k + \theta]], \end{aligned} \quad (17)$$

где  $C_k^{\text{OC}} = \Delta\omega \max R_k \tau_k = \omega_0 L_a \Gamma_k \tau_k$  – парциальный параметр обратной связи (ОС) автодинной СБРЛ [27], обусловленный воздействием отраженного излучения от  $k$ -й блестящей точки объекта локации;  $\sigma(2\tau_k)$  – здесь и далее цифра перед  $\tau_k$  означает множитель временного сдвига величины  $\tau_k$  для функция  $\sigma(t)$ .

**Шаг 3.** Для данного шага выражения для автодинного отклика имеют вид:

$$\begin{aligned} \delta_k^{(3)} &= \omega^{(2)}(t)\tau_k = \omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k - \sum_{k=1}^K C_k^{\text{OC}} \sigma(\tau_k) \sin[\omega^{(1)}(t)\tau_k + \theta] = \\ &= \omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k - \sum_{k=1}^K C_k^{\text{OC}} \sigma(\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k + \\ &+ \theta - \sum_{k=1}^K C_k^{\text{OC}} \sigma(2\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t)\tau_k + \theta]], \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
\omega^{(3)}(t) &= \omega_{\text{ЧМ}}(t) - \Delta\omega \max \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \sin(\delta_k^{(3)} + \theta) = \\
&= \omega_{\text{ЧМ}}(t) - \Delta\omega \max \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t) \tau_k + \\
&\quad + \theta - \sum_{k=1}^K C_k^{\text{OC}} \sigma(2\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t) \tau_k + \\
&\quad + \theta - \sum_{k=1}^K C_k^{\text{OC}} \sigma(3\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t) \tau_k + \theta]], \tag{19}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{\text{H}}^{(3)}(t) &= \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \cos(\delta_k^{(3)} - \psi) = \\
&= \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \cos[\omega_{\text{ЧМ}}(t) \tau_k - \psi - \sum_{k=1}^K C_k^{\text{OC}} \sigma(2\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t) \tau_k + \\
&\quad + \theta - \sum_{k=1}^K C_k^{\text{OC}} \sigma(3\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t) \tau_k + \theta]], \tag{20}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\chi_{\text{H}}^{(3)}(t) &= \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \sin(\delta_k^{(2)} + \theta) = \\
&= \sum_{k=1}^K R_k \sigma(\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t) \tau_k + \theta - \sum_{k=1}^K C_k^{\text{OC}} \sigma(2\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t) \tau_k + \\
&\quad + \theta - \sum_{k=1}^K C_k^{\text{OC}} \sigma(3\tau_k) \sin[\omega_{\text{ЧМ}}(t) \tau_k + \theta]], \tag{21}
\end{aligned}$$

**Шаг  $n$ .** Из (10)–(21) видно, что результат воздействия  $(n - 1)$  отраженного излучения на анализируемый процесс автоколебаний  $n$ -го шага можно записать:

$$\delta_k^{(n)} = \omega^{(n-1)}(t) \tau_k, \tag{22}$$

$$\omega^{(n)}(t) = \omega_{\text{ЧМ}}(t) - \Delta\omega \max \sum_{k=1}^K R_k \sigma(n \tau_k) \sin(\delta_k^{(n)} + \theta), \tag{23}$$

$$a_{\text{H}}^{(n)}(t) = \sum_{k=1}^K R_k \sigma(n \tau_k) \cos(\delta_k^{(n)} - \psi), \tag{24}$$

$$\chi_{\text{H}}^{(n)}(t) = \sum_{k=1}^K R_k \sigma(n \tau_k) \sin(\delta_k^{(n)} + \theta). \tag{25}$$

Полученные выражения (10)–(24), имеющие сложный ветвящийся вид, используем далее для численного анализа свойств сигналов автодинной СБРЛ с ИМ и ЧМ. Здесь дополнительно

отметим, что на значения параметра обратной связи  $C_k^{OC}$  накладывается ограничение, что сумма значений  $C_k^{OC}$  по всем  $k$  должна быть не более единицы. В противном случае формирование автодинного отклика может происходить скачками.

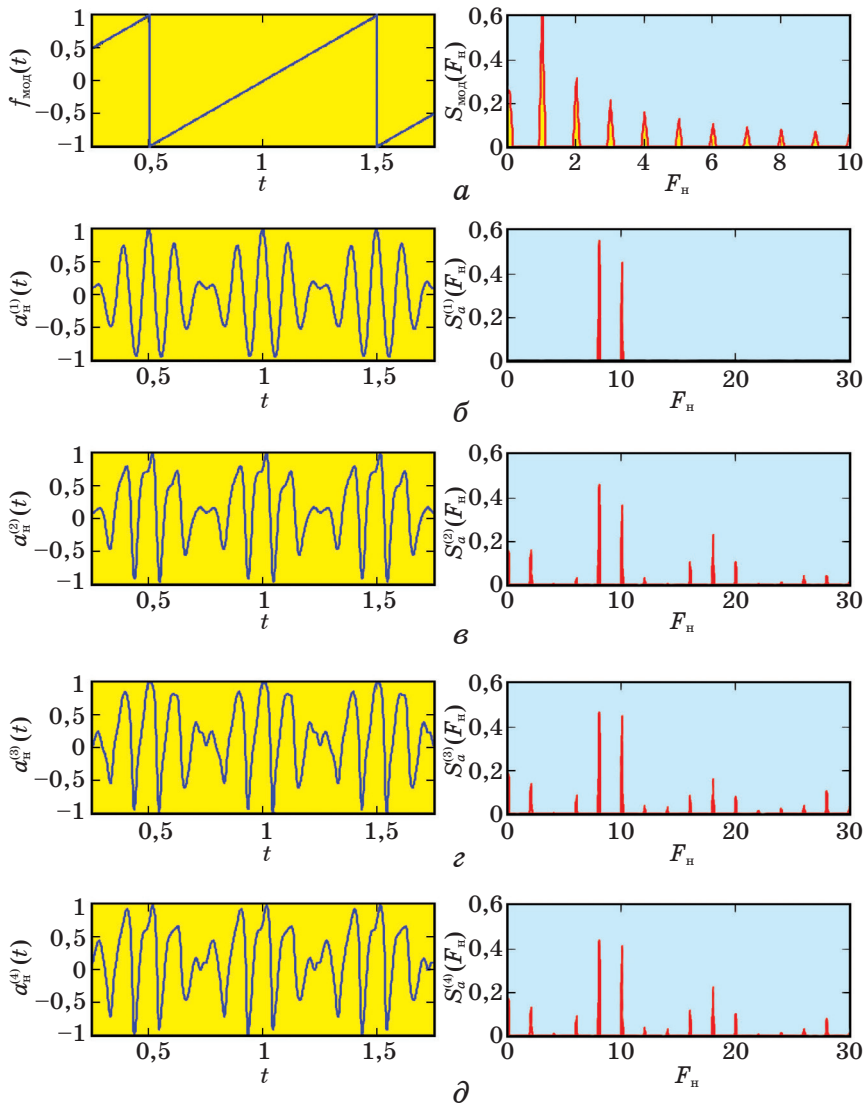
### Расчет автодинных сигналов

Основные свойства сигналов рассмотрим на примере представления объекта локации в виде двух блестящих точек. При этом выберем соотношение периодов выходных сигналов и периода модулирующей функции кратными с тем, чтобы исключить влияние точек разрыва фазы. Анализ сигналов выполним на примере использования в автодинной СБРЛ с ИМ и ЧМ несимметричного пилообразного закона модулирующей функции вида:  $f_{\text{мод}}(t) = (2/\pi)\arctg[\text{tg}(\pi t)]$ .

Результаты расчетов АХА в виде временных диаграмм  $a_n^{(n)}(t)$  и спектральных характеристик  $S_a^{(n)}(F_n)$  автодинных сигналов по изменению амплитуды колебаний представлены на рис. 2б–д. Расчеты АХА  $a_n^{(n)}(t)$  выполнялись согласно (12), (16), (20) и (24) для различных порядковых номеров  $n$  воздействия отраженного излучения с применением пакета программ MathCAD для персонального компьютера. На рис. 2а для лучшего представления протекающих процессов формирования сигналов показаны временная диаграмма  $f_{\text{мод}}(t)$  и спектральная характеристика  $S_{\text{мод}}(F_n)$  модулирующей функции. Здесь  $S_a^{(n)}(F_n)$  и  $S_{\text{мод}}(F_n)$  – спектральные характеристики, построенные для модулей амплитудных коэффициентов разложения функций  $a_n^{(n)}(t)$  и  $f_{\text{мод}}(t)$  в ряды Фурье за период модулирующей функции соответственно;  $F_n = 2\pi F/\Omega_{\text{мод}}$  – нормированная частота.

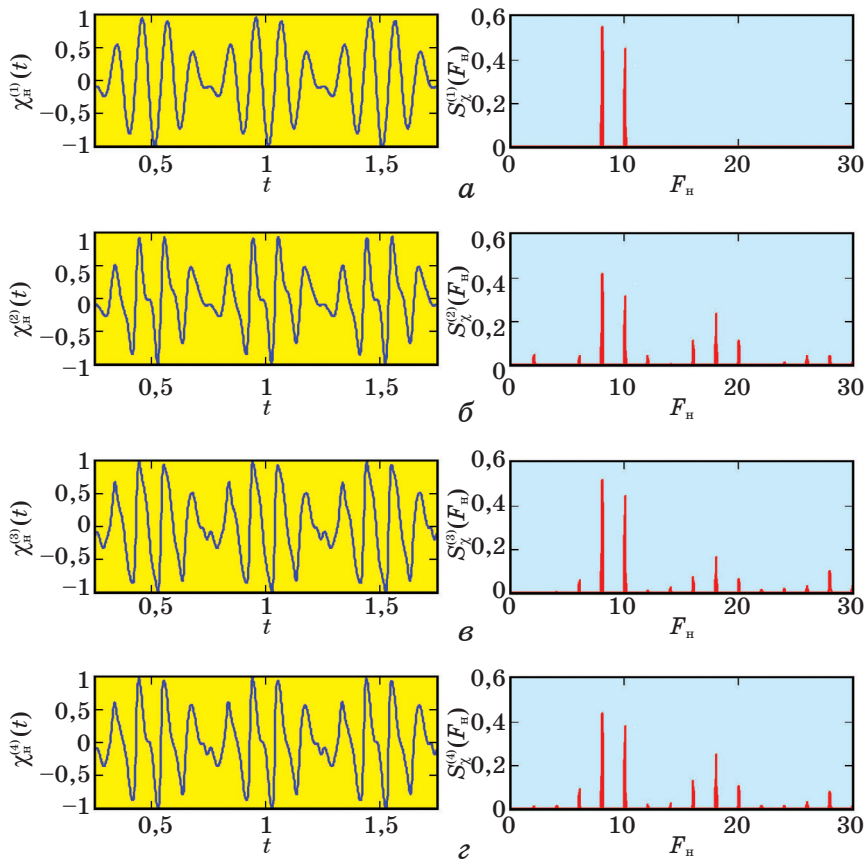
Результаты расчетов ЧХА в виде временных диаграмм  $\chi_n^{(n)}(t)$  и спектральных характеристик  $S_\chi^{(n)}(F_n)$  автодинного отклика по изменению частоты колебаний представлены на рис. 3а–г. Расчеты ЧХА  $\chi_n^{(n)}(t)$  выполнялись согласно (11), (17), (21) и (25). Здесь  $S_\chi^{(n)}(F_n)$  – спектральные характеристики, построенные для модулей амплитудных коэффициентов разложения функций  $\chi_n^{(n)}(t)$  в ряды Фурье за период модулирующей функции.

Вычисления представленных на рис. 2 и 3 характеристик выполнялись для АД 8-миллиметрового диапазона, частота которого  $\omega_0 = 2\pi \times 37,5 \times 10^9$ , девиация ЧМ  $\Delta\omega_{\text{ЧМ}} = 2\pi \times 30 \times 10^6$ , углы смещения автодинных откликов  $\theta = 1$  и  $\psi = -0,2$ . Полагалось, что две блестящие точки в виде элементарных отражателей находятся от АД на расстояниях:  $l_1 = 20$  м и  $l_2 = 25$  м. При этом соотношения собственных амплитуд сигналов на входе АД:  $R_1 = 0,55$ ,  $R_2 = 0,45$ , а парциальные параметры обратной связи АД:  $C_1^{OC} = 0,45$ ,  $C_2^{OC} = 0,55$ .



**Рис. 2.** Временные диаграммы  $f_{\text{мод}}(t)$ , АХА  $a_n^{(n)}(t)$  (слева) и спектральные характеристики  $S_{\text{мод}}(F_H)$ ,  $S_a^{(n)}(F_H)$  (справа) модулирующей функции (а) и сигналов по изменению амплитуды колебаний автодинной СВРЛ с ИМ и ЧМ, рассчитанные для различных порядковых номеров  $n$  воздействия отраженного излучения от двух блестящих точек:  $n = 1$  (б),  $n = 2$  (в),  $n = 3$  (г) и  $n = 4$  (д)

**Fig. 2.** Time diagrams  $f_{\text{mod}}(t)$ , ACA  $a_n^{(n)}(t)$  (left) and spectral characteristics  $S_{\text{mod}}(F_H)$ ,  $S_a^{(n)}(F_H)$  (right) of the modulating function (a) and signals for changing the amplitude of oscillations of the autodyne SRRS with PM and FM, calculated for different ordinal numbers  $n$  of the effects of reflected radiation from two brilliant points:  $n = 1$  (b),  $n = 2$  (c),  $n = 3$  (d) and  $n = 4$  (e)



**Рис. 3.** ЧХА в виде временных диаграмм  $\chi_n^{(n)}(t)$  (слева) и спектральные характеристики  $S_{\chi}^{(n)}(F_H)$  (справа) автодинного отклика по изменению частоты колебаний автодинной СБРЛ с ИМ и ЧМ, рассчитанные для различных порядковых номеров  $n$  воздействия отраженного излучения от двух блестящих точек:

$n = 1$  (а),  $n = 2$  (б),  $n = 3$  (в) и  $n = 4$  (г)

**Fig. 3.** FCA in the form of time diagrams  $\chi_n^{(n)}(t)$  (on the left) and spectral characteristics  $S_{\chi}^{(n)}(F_H)$  (on the right) of the autodyne response to a change in the oscillation frequency of the autodyne SRRS with PM and FM, calculated for different ordinal numbers of the reflected radiation exposure from two brilliant points:

$n = 1$  (a),  $n = 2$  (b),  $n = 3$  (c) and  $n = 4$  (d)

Из характеристик рис. 2б и рис. 3а видно, что на первом шаге результата воздействия излучения от отдельных блестящих точек, находящихся на различных расстояниях, представляет собой линейную суперпозицию гармонических сигналов, как у систем гомодинного типа. На этом участке переходной характеристики АД излучаемые и отраженные колебания радиоимпульсного осциллятора не имеют взаимной зависимости,

поскольку здесь частота генерации  $\omega^{(0)}(t)$  изменяется только вследствие ЧМ и набег фазы  $\delta_k^{(1)}$  линейно связан с величиной времени запаздывания  $\tau_k$ :  $\delta_k^{(1)} = \omega^{(0)}(t)\tau_k$ .

На втором и последующих шагах (см. рис. 2б–д и рис. 3б–г) ясно видно проявление нелинейного взаимодействия парциальных сигналов, полученных от отдельных отражателей. В результате такого взаимодействия в спектрах  $S_a^{(n)}(F_n)$  и  $S_\chi^{(n)}(F_n)$  результирующих откликов по изменению амплитуды  $a_n^{(n)}(t)$  и частоты  $\chi_n^{(n)}(t)$  колебаний соответственно присутствуют, кроме основных гармонических составляющих отклика, их высшие гармоники, а также суммарные, разностные и комбинационные компоненты. При этом отличия спектральных характеристик  $S_\chi^{(n)}(F_n)$  состоят в отсутствии постоянной составляющей и существенно меньшем уровне гармонических составляющих в области низких (разностных) частот, чем в спектре  $S_a^{(n)}(F_n)$ .

Вычисления характеристик автодинного отклика при иных начальных условиях функционирования автодинной СБРЛ с ИМ и ЧМ показали следующее. Установлено, что уменьшение параметра обратной связи  $C_k^{OC}$  вызывает уменьшение искажения сигналов, полученных от отдельных блестящих точек объекта локации, и степени их нелинейного взаимодействия между собой. В случае выполнения сильного неравенства, когда  $C_k^{OC} \ll 1$ , явлением нелинейности автодинной СБРЛ с ИМ и ЧМ можно вообще пренебречь. Это условие наиболее эффективно достигается уменьшением автодинной девиации частоты  $\Delta\omega^{max}$ , например применением в АД перестраиваемого по частоте высокодобротного резонатора [28].

## Экспериментальные результаты

Экспериментальные исследования особенностей сигналов автодинной СБРЛ с ИМ и ЧМ проводились с СВЧ-модулем 8-миллиметрового диапазона в составе радиолокационного датчика, разработанного для контроля занятости железнодорожного переезда [19]. Модуль выполнен на основе диода Ганна АА727А и варикапа ЗА637А-6. Выходная мощность излучения составляла 50 мВт, центральная частота 37,5 ГГц, девиация частоты 150 МГц, частота ЧМ 10 кГц, частота ИМ 500 кГц. Антенна рупорная, с шириной диаграммы направленности  $15 \times 15$  градусов.

Структурная схема автодинной СБРЛ с ИМ и ЧМ приведена на рис. 4. Центральный сигнальный процессор ЦСП 15, выполняющий одновременно функции формирования закона ЧМ излучаемого сигнала и первичной обработки автодинных сигналов реализован на основе цифрового сигнального процессора TMS320F2808 фирмы Texas Instrument. В составе этого процессо-



ра использованы блоки, отвечающие за выполнение следующих функций: аналого-цифровой преобразователь АЦП 12 сигнала; приемопередатчик шины последовательного порта 13, управляющий работой цифро-аналогового преобразователя ЦАП 4; универсальный асинхронный приемопередатчик УАПП 11, который осуществляет обмен информацией с блоком индикации и управления; высокоскоростное вычислительное ядро, выполняющее все функции цифровой обработки сигнала (спектральный анализ, цифровую фильтрацию сигнала, анализ сигнала и формирование данных для индикации). Блок ЦАП 4 предназначен для формирования пилообразного закона модулирующего напряжения, подаваемого на варикап СВЧ-модуля 2 через усилитель 3.

Блок синхронизации, формирования и модуляции 14 вырабатывает две последовательности импульсов. Первая, предназначенная для ИМ излучения автодинной СБРЛ, поступает в цепь питания СВЧ-модуля 2 через датчик тока 5. Длительность этих импульсов  $t_{\text{имп}}$  определяет граничное значение рабочей зоны по дальности  $l_{\text{лим}} = ct_{\text{имп}}/2$ , за пределами которой формируется дальняя «мертвая зона» автодинной СБРЛ с ИМ. Вторая последовательность, предназначенная для временной селекции и выделения автодинного сигнала, поступает на управляющий вход схемы «выборки-хранения» 6. Длительность селекторных импульсов  $t_{\text{сел}}$  выбрана несколько меньшей величины, чем  $t_{\text{имп}}$ . При этом задние фронты обоих импульсов совпадают. Такой выбор условий формирования импульсов способствует исключению прохождения в блок обработки шумов, порождаемых нестационарным процессом формирования переднего фронта радиоимпульсов в СВЧ-модуле 2.

Формируемый в СВЧ-модуле 2 радиосигнал, имеющий одновременно ИМ и ЧМ, излучается антенной 1. Излучение, отраженное от объекта локации, попадает обратно в СВЧ-модуль 2 и вызывает в нем автодинный эффект – изменения амплитуды и частоты колебаний, а также среднего значения тока диода Ганна. Последние регистрируются в цепи питания с помощью резистора или широкополосного трансформатора датчика тока 5, преобразующего автодинные изменения тока в напряжение выходного сигнала. Полученный таким образом сигнал имеет вид последовательности импульсов, амплитуда которых определяется значением автодинного отклика. Посредством схемы «выборки-хранения» 6 эта последовательность путем запоминания амплитуды импульсов и ее «затягивания» на период повторения преобразуется в сигнал ступенчатой формы. Далее ступенчатый сигнал, проходя через фильтр 7 и усилитель 8, сглаживается и поступает на АЦП 12 процессора ЦСП 15.

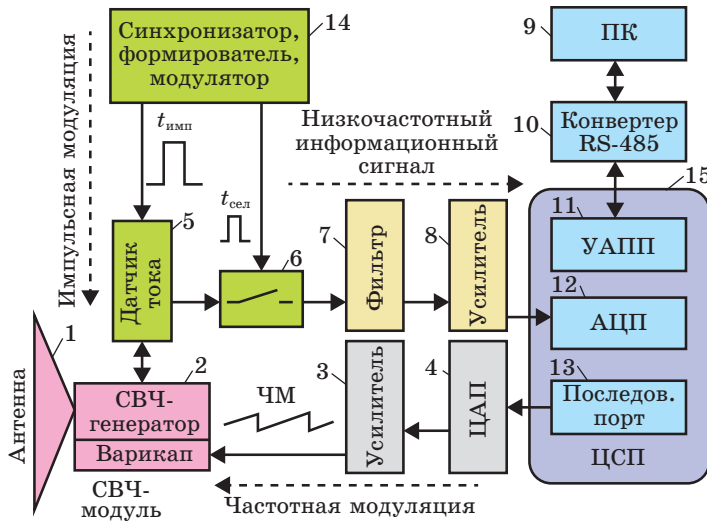


Рис. 4. Структурная схема автодинного радиолокатора с одновременно импульсной и частотной модуляцией

Fig. 4. Block diagram of an autodyne radar with both pulse and frequency modulation

Вычислительным ядром ЦСП 15 сначала производится предварительная фильтрация сигнала. Она служит для исключения из спектра принятого сигнала компонентов, связанных с паразитной АМ и отражений от ближних объектов, информация от которых не представляет интереса. Для этого к исходному сигналу применяется алгоритм «скользящее среднее», который выступает в качестве фильтра нижних частот [29]. После выделения низкочастотных составляющих этим фильтров они вычитаются из исходного сигнала, в результате чего вблизи СБРЛ формируется «мертвая зона».

Дальнейшая цифровая обработка оставшихся на выходе основного фильтра составляющих сигнала состоит в определении среднего числа периодов сигнала за один цикл модулирующей функции. Это дает после умножения результата на калибровочный коэффициент значение дальности до цели. Полученные результаты анализа сигнала далее передаются через универсальный асинхронный передатчик УАПП 11 и преобразователь RS-485 10 на персональный компьютер ПК 9, используемый в качестве системы отображения радиолокационной информации. Когда в диаграмме направленности антенны 1 находится отражающий объект, на выходе фильтра анализатора спектра ЦСП 15 присутствует сигнал. Амплитуда его характеризует отражающую способность наблюдаемого объекта, а частота фильтра – дистанцию до объекта.

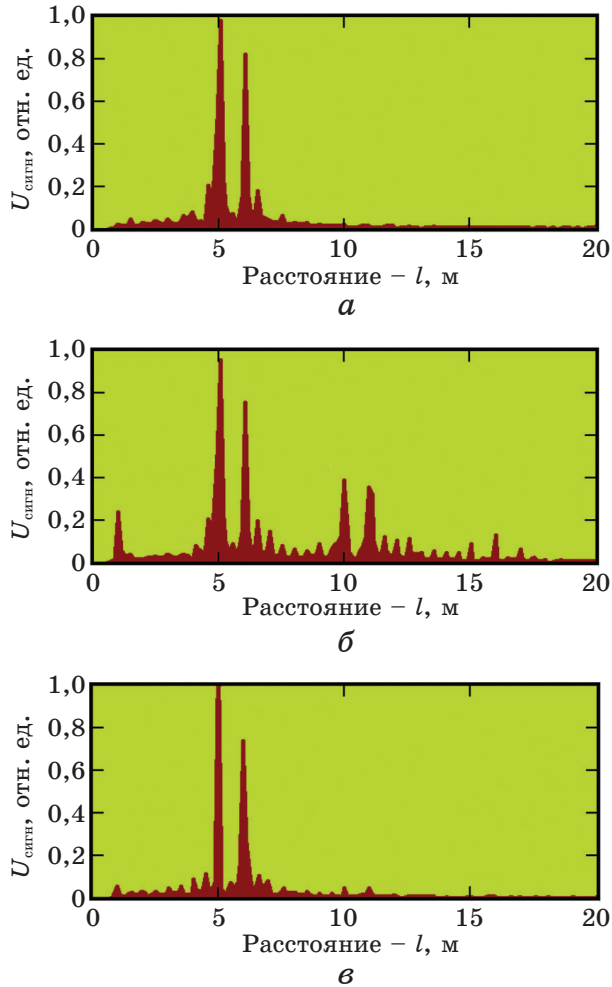
Экспериментальные исследования сигналов выполнялись в следующей последовательности. В поле излучения антенны, визуально не перекрывая друг друга, на расстояниях  $l_1 = 5$  м и  $l_2 = 6$  м от ее раскрыва устанавливались на треногах два одинаковых уголкового отражателя с эффективной площадью рассеяния около  $10 \text{ м}^2$ . Первый опыт выполнялся при длительности модулирующего импульса  $t_{\text{имп}} = 50 \times 10^{-9}$  с, а второй – при  $t_{\text{имп}} = 100 \times 10^{-9}$  с. При этих значениях длительностей предельные дальности  $l_{\text{лим}}$  действия СБРЛ соответственно равны:  $l_{\text{лим.1}} = 7,5$  м и  $l_{\text{лим.2}} = 15$  м.

Далее, для определения величины параметра обратной связи  $C_k^{\text{OC}}$  СВЧ-модуль 2 переводился в режим непрерывного излучения и при отсутствии модуляции выполнялись измерения величины автодинной девиации частоты с помощью анализатора спектра Е4407В и переносчика частоты. Для выполнения этих измерений указанные приборы подключались через направленный ответвитель к волноводному тракту между выходом СВЧ-модуля 2 и антенной 1. Уголкового отражатели при выполнении этих измерений приводились поочередно к возвратно-поступательному перемещению относительно СБРЛ в пределах нескольких длин волн. В результате для первого отражателя автодинная девиация частоты составила  $\Delta\omega_1^{\text{max}} \approx 2\pi \times 2,4 \times 10^6$ , а для второго –  $\Delta\omega_2^{\text{max}} \approx 2\pi \times 1,5 \times 10^6$ . При этом расчетные значения параметров обратной связи АД соответственно равны:  $C_1^{\text{OC}} \approx 0,5$  и  $C_2^{\text{OC}} \approx 0,4$ .

На рис. 5а, б представлены спектральные характеристики выходных сигналов  $U_{\text{сигн}}$  блока обработки СБРЛ, полученных при выполнении первого и второго опытов соответственно. Первому опыту соответствует случай формирования автодинного сигнала, полученного в результате приема первой совокупности парциальных отражений. Второму опыту – случай формирования сигнала, полученного в результате приема первой и следом второй совокупности парциальных отражений. На рис. 5б приведена дополнительная спектральная характеристика, соответствующая второму случаю, но после внесения дополнительного затухания 10 дБ в волноводный тракт между СВЧ-модулем 2 и антенной 1. В результате параметры обратной связи АД получили следующие значения:  $C_1^{\text{OC}} \approx 0,05$  и  $C_2^{\text{OC}} \approx 0,04$ , т.е.  $C_1^{\text{OC}}, C_2^{\text{OC}} \ll 1$ .

В первом случае (рис. 5а) на спектральной диаграмме преобладают основные гармоники сигналов, принятых от уголкового отражателей. Нелинейное взаимодействие между ними практически не наблюдается. Во втором случае (рис. 5б) имеют место высшие гармонические составляющие сигналов и компоненты их нелинейного взаимодействия. В случае уменьшения величин параметров обратной связи АД, так что они становятся

значительно меньше единицы, формирование сигналов в зоне воздействия двух (и более) парциальных отражений от объекта локации, происходит независимо (линейно), как у СБРЛ гомодинного типа (рис. 5*в*).



**Рис. 5.** Спектральные характеристики автодинных сигналов  $U_{\text{сигн}}$  автодинной СБРЛ с ИМ и ЧМ, полученных одновременно от двух отражателей в поле излучения антенны для случаев, когда длительность модулирующих импульсов  $t_{\text{имп}} = 50 \times 10^{-9}$  с (а) и  $t_{\text{имп}} = 100 \times 10^{-9}$  с (б), а также при внесении дополнительного затухания сигнала 10 дБ (в) и  $t_{\text{имп}} = 100 \times 10^{-9}$  с

**Fig. 5.** Spectral characteristics of the autodyne signals  $U_{\text{сигн}}$  of the autodyne SRRS with PM and FM received simultaneously from two reflectors in the radiation field of the antenna for cases when the duration of the modulating pulses is  $t_{\text{имп}} = 50 \times 10^{-9}$  с (a) and  $t_{\text{имп}} = 100 \times 10^{-9}$  с (b), as well as when additional attenuation of the signal is 10 dB (b) and  $t_{\text{имп}} = 100 \times 10^{-9}$  с

Из сравнения полученных характеристик рис. 5а, б и характеристик, представленных на рис. 2б, в, видно их качественное соответствие. Отсюда следует, что полученные данные эксперимента подтвердили адекватность разработанной выше математической модели для анализа и расчета сигнальных и спектральных характеристик автодинной СБРЛ с ИМ и ЧМ.

## Заключение

Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в настоящей работе, показали, что при воздействии на автодинной СБРЛ с ИМ и ЧМ первого ансамбля отраженного излучения от совокупности блестящих точек, принадлежащих пространственно распределенному объекту локации, спектр автодинного отклика представляет собой линейную суперпозицию монохроматических составляющих сигналов, полученных от отдельных точек, как у систем гомодинного типа. Последующие воздействия на АД ансамблей парциальных отражений вызывают комбинационное взаимодействие всех спектральных составляющих между собой. Это обусловлено автодинными изменениями частоты автоколебаний, которые вызывают нелинейность фазового набега отраженной волны.

Степень проявления этой нелинейности определяется величиной совокупного параметра обратной связи АД, зависящего как от уровня отраженного излучения, так и времени его распространения до отражателей и обратно. Кроме того, из выполненных исследований следует, что для уменьшения нелинейных искажений автодинного сигнала и расширения динамического диапазона радиоимпульсных СБРЛ с ЧМ необходимо в генераторных модулях, особенно в диапазоне миллиметровых волн, применять меры по стабилизации частоты. Решение данной проблемы возможно при использовании модуля, в котором стабилизация частоты достигается, например, с помощью управляемого по частоте высокодобротного резонатора [30].

Полученные в настоящей работе результаты развивают и дополняют результаты ранее выполненных исследований в части учета ЧМ [12] и ИМ [14] генератора на случай взаимодействия АД с отраженным излучением от пространственно распределенного объекта локации, что было не рассмотрено также в [15].

Исследованные в настоящей работе особенности автодинного сигнала радиоимпульсных АД были впервые экспериментально установлены при проведении испытаний автодинной СБРЛ с ИМ и ЧМ, разработанной для контроля занятости железнодорожных переездов [19]. Правильный учет этих особенностей при выборе параметров модуляции и обработке сигналов создан-

ной нами СБРЛ обеспечили значительное улучшение ряда ее характеристик. Изготовленные образцы СБРЛ показали высокую надежность функционирования в условиях высокой интенсивности транспортного потока через неохраняемый железнодорожный переезд, когда наблюдается значительное увеличение пассивных помех.

### Список литературы

1. Lazarus M. J., Pantoja F. P., Somekh M. et al. New direction-of-motion Doppler detector. *Electronics Letters*. 1980;16(25):953–955. DOI: 10.1049/el:19800679.
2. Usanov D. A., Skripal A. V., Postelga A. E. A microwave autodyne meter of vibration parameters. *Instruments & Experimental Techniques*. 2004;47(5):689–693. DOI: 10.1023/B:INET.0000043882.16801.3a
3. Чернявский А. Ж., Данилин С. А., Ворох Д. А., Данилин А. И. Применение первичных автодинных СВЧ преобразователей для диагностирования установок и оборудования энергетического и транспортного машиностроения. *Датчики и системы*. 2021;(3):23–36. DOI: 10.25728/datsys.2021.3.3
4. Alidoost S. A., Sadeghzade R., Fatemi R. Autodyne system with a single antenna. *In Proceedings of the 11-th International Radar Symposium (IRS 2010)*. Vilnius (Lithuania), pp. 406–409.
5. 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.
6. Носков В. Я., Игнатков К. А., Чупахин А. П. Применение двухдиодных автодинов в устройствах радиоволнового контроля размеров изделий. *Измерительная техника*. 2016;(7):24–28. DOI: 10.1007/s11018-016-1035-9.
7. Nagasaku T., Kondoh H., Shunoda H. *Radar Sensor*. Patent US 6717544 B2. Pub. Date: April, 6, 2004. Filed: Aug. 26, 2002.
8. Votoropin S. D. Autodyne Sensors of the EHF Range on Gunn Diodes. *38<sup>th</sup> European Microwave Conference*, 2008, pp. 1330–1333. DOI: 10.1109/EUMC.2008.4751709.
9. Utagawa H., Matsui T. *Microwave/Millimeter Wave Sensor*. Patent Appl. Publ. US 2010/0117891 A1. Pub. Date: May 13, 2010. Filed: Mar. 31, 2008.
10. Jefford P. A., Howes M. S. Modulation schemes in low-cost microwave field sensor. *IEEE Transaction of Microwave Theory & Technique*. 1985;31(8):613–624. DOI: 10.1109/TMTT.1983.1131559.
11. 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.
12. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Анализ автодинного эффекта радиоимпульсного генератора. *Известия вузов. Физика*. 2008;51(3):64–70. DOI: 10.1007/s11182-008-9051-0.

13. Komarov I. V., Smolskiy S. M. *Fundamentals of short-range FM radar*. Norwood: Artech House, 2003. DOI: 10.1109/MAES.2004.1346903.
14. 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. DOI: 10.1007/s11182-008-9083-5.
15. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Анализ автодинного эффекта радиоимпульсного генератора с частотной модуляцией. *Известия вузов. Физика*. 2008;51(7):80–89. DOI: 10.1007/s11182-008-9105-3.
16. Иванов В. Э., Носков В. Я., Смольский С. М. Двухканальная радиоимпульсная СБРЛ на диоде Ганна. В: *19-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМуКо'2009)*. Севастополь, 2009. С. 817–820.
17. 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 & Techniques*. 1980;28(12):1437–1442. DOI: 10.1109/TMTT.1980.1130263.
18. 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 & Radio Engineering*. 2010;69(5):451–458. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80.
19. Ermak G. P., Popov I. V., Vasiliev A. S., Varavin A. V., Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Radar sensors for hump yard and rail crossing applications. *Telecommunication & Radio Engineering*. 2012;71(6):567–580. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i6.80.
20. Воторопин С. Д., Донсков С. В., Носков В. Я., Смольский С. М. Анализ автодинного сигнала от распределенного отражающего объекта. В: *17-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМуКо'2007)*. Севастополь, 2007. С. 744–747. DOI: 10.1109/CRMICO.2007.4368928.
21. 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. DOI: 10.18127/j20700784-201902-01
22. Kurokava K. Injection Locking of Microwave Solid-State Oscillators. *Proceedings of the IEEE*. 1973;61(10):1386–1410. DOI: 10.1109/PROC.1973.9293.
23. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Autodyne signals in case of random delay time of the reflected radiation. *Telecommunication & Radio Engineering*. 2013;72(16):1521–1536. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i16.70.
24. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visnik NTUU KPI, Seriya – Radiotekhnika. Radioaparotobuduvan*. 2016(67):50–57.

25. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. About applicability of quasi-static method of autodyne systems analysis. *Radioelectronics & Communications Systems*. 2014;57(3):139–148.

26. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Dynamics of autodyne response formation in microwave generators. *Radioelectronics & Communications Systems*. 2013;56(5):227–242. DOI: 10.3103/S0735272714030054.

27. Носков В. Я., Игнатков К. А. Особенности шумовых характеристик автодинов при сильной внешней обратной связи. *Известия вузов. Физика*. 2013;56(12):112–124. DOI: 10.1007/s11182-014-0198-6.

28. Носков В. Я., Игнатков К. А. Шумовые характеристики автодинов со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором. *Радиотехника и электроника*. 2016;61(9):905–918. DOI: 10.7868/S0033849416090102

29. Hussain Z. M., Sadik A. Z., O’Shea P. *Digital Signal Processing: An Introduction with MATLAB and Applications*. Springer, 2011, 350 p.

30. Касаткин Л. В., Чайка В. Е. *Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн*. Севастополь, Вебер, 2006, 319 с.

## References

1. Lazarus M. J., Pantoja F. P., Somekh M. et al. New direction-of-motion Doppler detector. *Electronics Letters*. 1980;16(25):953–955. DOI: 10.1049/el:19800679.

2. Usanov D. A., Skripal A. V., Postelga A. E. A microwave autodyne meter of vibration parameters. *Instruments & Experimental Techniques*. 2004;47(5):689–693. DOI: 10.1023/B:INET.0000043882.16801.3a

3. Chernyavskiy A. Zh., Danilin S. A., Vorokh D. A., Danilin A. I. Application of primary autodyne microwave transducers for diagnosing of machines and equipment of power and transport engineering. *Sensors & Systems*. 2021;(3):23–36. DOI: 10.25728/datsys.2021.3.3

4. Alidoost S. A., Sadeghzade R., Fatemi R. Autodyne system with a single antenna. In: *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Radar Symposium (IRS 2010)*. Vilnius (Lithuania), pp. 406–409.

5. 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.

6. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Application of two-diode autodynes in devices for radiowave control of product dimensions. *Measurement Techniques*. 2016;59(7):715–721. DOI: 10.1007/s11018-016-1035-9.

7. Nagasaki T., Kondoh H., Shunoda H. *Radar Sensor*. Patent US 6717544 B2. Pub. Date: April, 6, 2004. Filed: Aug. 26, 2002.

8. Votoropin S. D. Autodyne Sensors of the EHF Range on Gunn Diodes. In: *38<sup>th</sup> European Microwave Conference*, 2008, pp. 1330–1333. DOI: 10.1109/EUMC.2008.4751709.



9. Utagawa H., Matsui T. *Microwave/Millimeter Wave Sensor*. Patent Appl. Publ. US 2010/0117891 A1. Pub. Date: May 13, 2010. Filed: Mar. 31, 2008.
10. Jefford P. A., Howes M. S. Modulation schemes in low-cost microwave field sensor. *IEEE Transaction of Microwave Theory and Technique*. 1985;31(8):613–624. DOI: 10.1109/TMTT.1983.1131559.
11. 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.
12. Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. Analysis of autodyne effect of an rf oscillator. *Russian Physics Journal*. 2008;51(3):291–298. DOI: 10.1007/s11182-008-9051-0.
13. Komarov I. V., Smolskiy S. M. *Fundamentals of short-range FM radar*. Norwood: Artech House, 2003. DOI: 10.1109/MAES.2004.1346903.
14. 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.
15. Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. An analysis of the autodyne effect of a radio-pulse oscillator with frequency modulation. *Russian Physics Journal*. 2008;51(7):750–759. DOI: 10.1007/s11182-008-9105-3.
16. Ivanov V. E., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. Double-channel radio-pulse short-range radar on Gunn diode. In: *Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”*, Sevastopol (Ukraine), 2009, pp. 817–820.
17. 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.
18. 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 & Radio Engineering*. 2010;69(5):451–458. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80.
19. Ermak G. P., Popov I. V., Vasiliev A. S., Varavin A. V., Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Radar sensors for hump yard and rail crossing applications. *Telecommunication & Radio Engineering*. 2012;71(6):567–580. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i6.80.
20. Votoropin S. D., Donskov S. V., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. Analysis of the autodyne signal from the distributed reflecting object. In: *Proceedings of 17<sup>th</sup> International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”*, Sevastopol (Ukraine), 2007, pp. 744–747. DOI: 10.1109/CRMICO.2007.4368928.
21. Noskov V. Ya., Smolskiy S. M., Ignatkov K. A., Mishin D. Ya., Chupahin A. P. Modern hybrid-integrated autodyne oscillators of microwave and mm-wave ranges and its’ application. Part 11. Fundamentals of autodyne implementation. *Successes of modern electronic engineering*. 2019;(2):5–33. DOI: 10.18127/j20700784-201902-01 (In Russ.).

22. Kurokava K. Injection Locking of Microwave Solid-State Oscillators. *Proceedings of the IEEE*. 1973;61(10):1386–1410. DOI: 10.1109/PROC.1973.9293.

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

24. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visnik NTUU KPI, Seriya – Radiotekhnika. Radioaparatorobudovan*. 2016(67):50–57.

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

26. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Dynamics of autodyne response formation in microwave generators. *Radioelectronics & Communications Systems*. 2013;56(5):227–242. DOI: 10.3103/S0735272713050026.

27. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Peculiarities of noise characteristics of autodynes under strong external feedback. *Russian Physics Journal*. 2013;56(12):1445–1460. DOI: 10.1007/s11182-014-0198-6.

28. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Noise Characteristics of Autodynes with Frequency Stabilization by Means of an External High-Q Cavity. *Journal of Communications Technology & Electronics*. 2016;61(9):1052–1063. DOI: 10.7868/S0033849416090102

29. Hussain Z. M., Sadik A. Z., O’Shea P. *Digital Signal Processing: An Introduction with MATLAB and Applications*. Springer; 2011. 350 p.

30. Kasatkin L. V., Chaika V. E. *Semiconductor devices of the millimeter wave range*. Sevastopol, Weber; 2006. 319 p.

## Информация об авторах

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

**Богатырев Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Россия.

**Галеев Ринат Гайсеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и специальной электронной аппаратуры Сибирского университета науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия.

**Вишняков Даниил Сергеевич**, аспирант кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

## Information about the authors

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

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

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

**Daniil S. Vishnyakov**, Postgraduate Student, Department of Radioelectronics and Telecommunications, Institute of Radioelectronics and Information Technologies – RTF, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.

Поступила / Received: 19.10.2022

Принята в печать / Accepted: 01.12.2022