

Особенности формирования и обработки сигналов в автодинных радиолокаторах с частотной модуляцией с учетом нелинейности модуляционной характеристики

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

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

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

✉ noskov@oko-ek.ru

Аннотация

Представлены результаты исследования особенностей формирования и обработки сигналов автодинных систем ближней радиолокации (СБРЛ) с частотной модуляцией (ЧМ) при наличии нелинейности модуляционной характеристики. На основе математической модели автодинного генератора выполнено численное моделирование влияния нелинейности модуляционной характеристики на форму и спектр автодинного сигнала. Установлено, что даже малая нелинейность этой характеристики вызывает существенное искажения формы и спектра автодинного сигнала. Предложен метод квазистатической коррекции закона частотной модуляции зондирующего излучения применением цифрового сигнального процессора, не требующий усложнения СВЧ части автодинной СБРЛ с ЧМ. Приведены результаты экспериментальных исследований автодинной СБРЛ 8-мм диапазона, выполненной на основе генератора на диоде Ганна с управлением частоты варикапом.

Ключевые слова

автодин, автодинный сигнал, автодинный отклик, частотная модуляция, система ближней радиолокации, нелинейность модуляционной характеристики, генератор на диоде Ганна

Для цитирования

Носков В. Я., Богатырев Е. В., Игнатков К. А., Шайдуров К. Д. Особенности формирования и обработки сигналов в автодинных радиолокаторах с частотной модуляцией с учетом нелинейности модуляционной характеристики. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):119–143. DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.003.

Features of the Formation and Processing of Signals in an Autodyne Radar with Frequency Modulation Taking into Account the Nonlinearity of the Modulation Characteristic

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

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

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

✉ noskov@oko-ek.ru

Abstract

The results of the study of the features of the formation and processing of signals of autodyne short-range radar systems (SRR) with frequency modulation (FM) involving non-linearity of the modulation characteristic are presented. The numerical simulation of the nonlinear influence of the modulation characteristic on the shape and spectrum of the autodyne signal is implemented on the basis of the mathematical model of the autodyne generator. We have established that even a small non-linearity of this characteristic causes a significant distortion of the shape and spectrum of the autodyne signal. A method of quasi-static correction of the law of frequency modulation of probing radiation using a digital signal processor is proposed, which does not require complication of the microwave part of the autodyne SRR with FM. The results of experimental studies of an 8-mm autodyne SRR made on the basis of a Gann diode oscillator with frequency control by varicap are presented.

Keywords

autodyne, autodyne signal, autodyne response, frequency modulation, non-linearity modulation characteristic, short-range radar, Gunn-diode oscillator

For citation

Noskov V. Ya., Bogatyrev E. V., Ignatkov K. A., Shaidurov K. D. Features of the Formation and Processing of Signals in an Autodyne Radar with Frequency Modulation Taking into Account the Nonlinearity of the Modulation Characteristic. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):119–143. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.003.

1. Введение

Приемо-передающие системы автодинного типа (просто автодины¹) являются малогабаритными, надежными и технологичными устройствами, нашедшими самое широкое применение в решении различных задач на транспорте, в промышленно-

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

сти, научных исследованиях и военном деле [1–8]. Принцип действия таких устройств основан на автодинном эффекте, состоящем в изменениях амплитуды, частоты и рабочего тока автогенератора при воздействии на него отраженного излучения. Регистрация этих изменений в виде сигналов и их обработка обеспечивают возможность получения информации об отражающем объекте и параметрах его движения.

При воздействии на автодин отраженного излучения от движущегося объекта частота автодинного отклика равна частоте Доплера. В связи с этим наиболее широкое применение автодины нашли в простых доплеровских системах ближней радиолокации (СБРЛ) для решения задач обнаружения движущихся объектов и измерения скорости, пройденного пути, ускорения, амплитуды и частоты вибраций [7–10].

Применение различных видов модуляции излучения (амплитудной, частотной, фазовой и их комбинации) значительно повышает устойчивость СБРЛ к воздействию активных и пассивных помех, а также расширяет функциональные возможности автодинных СБРЛ [10–15]. При этом частотная модуляция (ЧМ) излучения благодаря ряду своих достоинств используется в СБРЛ значительно чаще других видов модуляции. Поэтому исследованию особенностей формирования и обработки сигналов автодинных СБРЛ с ЧМ посвящено большое число публикаций [13–18]. Анализ результатов этих исследований показывает, что наиболее информативными и гибкими в применении являются автодинные системы, использующие линейные законы ЧМ: несимметричный и симметричный пилообразный. Они позволяют сравнительно просто одновременно измерять дальность до объектов локации и скорость их перемещения [15–18].

Однако применение этих видов модуляции частоты в автодинных СБРЛ наталкивается на ряд трудностей, связанных как со сложностью анализа процессов, возникающих в автогенераторах при одновременном воздействии на автодин собственного запаздывающего отраженного излучения, так и учетом влияния нелинейности модуляционной характеристики генератора на форму и спектр формируемого сигнала. Острота этой проблемы особенно возрастает в условиях применения больших значений девиации частоты излучения в миллиметровом диапазоне, когда стоит задача предельного повышения разрешающей способности СБРЛ с ЧМ по дальности.

В настоящее время в связи со значительным ростом возможностей микропроцессорных устройств стала актуальной задача их применения для улучшения характеристик автодинных СБРЛ с ЧМ. Высокопроизводительные вычислители современных сиг-

нальных процессоров способны выполнить не только внутрисхемную цифровую фильтрацию и спектральную обработку сигнала автодинного отклика, но и, как показано ниже, коррекцию модуляционной характеристики генератора. Решению указанной задачи, направленной на исследование особенностей формирования сигнальных характеристик, а также поиск новых методов коррекции закона частотной модуляции зондирующего излучения автодинных генераторов посвящена настоящая статья.

2. Основные уравнения для анализа автодинов с частотной модуляцией

Для анализа влияния нелинейности перестроечной характеристики автогенератора на формирование автодинного сигнала воспользуемся результатами разработки математической модели одноконтурного автодинного генератора с ЧМ изменением смещения на варикапе, полученными в работе [19] с учетом собственных шумов генератора и шумов источника питания. Здесь для случая отсутствия указанных шумов запишем выражения (4) – (6) из [19] для относительных автодинных изменений амплитуды $a_1(t, \tau) = (A - A_0) / A_0$ и частоты $\chi(t, \tau) = (\omega - \omega_0) / \omega_0$ колебаний генератора, а также относительной величины напряжения $a_0(t, \tau)$ на выходе блока регистрации в цепи его питания в виде:

$$a_1(t, \tau) = -m_{\text{ам}} f_{\text{мод}}(t) + \Gamma K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1], \quad (1)$$

$$\chi(t, \tau) = -m_{\text{чм}} f_{\text{мод}}(t) - \Gamma L_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (2)$$

$$a_0(t, \tau) = -m_{\text{пд}} f_{\text{мод}}(t) + \Gamma K_0 \cos[\delta(t, \tau) - \psi_0], \quad (3)$$

где A, A_0 и ω, ω_0 – текущие и стационарные значения амплитуды и частоты колебаний генератора; $m_{\text{ам}} = (\Delta A_m^{\text{ам}} / A_0)$, $m_{\text{чм}} = \Delta \omega_m^{\text{чм}} / \omega_0$ – коэффициенты амплитудной и частотной модуляции колебаний; $\Delta A_m^{\text{ам}}$ – наибольшее отклонение амплитуды от стационарного значения A_0 при модуляции частоты; $\Delta \omega_m^{\text{чм}}$ – девиация частоты колебаний генератора вследствие ЧМ; $m_{\text{пд}}$ – коэффициент «прямого детектирования», характеризующий процесс преобразования автодинных изменений амплитуды и частоты колебаний на нелинейности активного элемента генератора в отклик в цепи его питания; $f_{\text{мод}}(t)$ – нормированная модулирующая функция, имеющая период $T_{\text{мод}} = 2\pi / \Omega_{\text{мод}}$; $\Gamma = (P_c / P_0)^{1/2}$ – приведенный к выходу генератора коэффициент отражения, характеризующий затухание излучения по амплитуде при его распространении до объекта локации и обратно; P_c, P_0 – мощность приходящего от объекта локации сигнала, и выходная мощность генератора соответственно; K_a, L_a, K_0 – коэффициенты автодинного усиления, девиации частоты и автодетектирования соответственно, зави-

сящие от внутренних параметров и свойств генератора [18–20]; ψ_1 , θ , ψ_0 – углы фазового смещения автодинных изменений амплитуды и частоты колебаний, а также сигнала в цепи питания АЭ, зависящие от внутренних параметров и свойств генератора; $\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau)$ – мгновенный набег фазы отраженного излучения при его распространении до объекта локации и обратно; $\Psi(t)$, $\Psi(t, \tau)$ – полная фаза колебаний в текущий момент времени t и в момент времени $t - \tau$ из предыстории системы «генератор – объект локации»; τ – время распространения (запаздывания) отраженного излучения.

Выражения (1) – (3) не являются окончательными, поскольку содержат неявную функцию запаздывающего аргумента – набег фазы $\delta(t, \tau)$ отраженного излучения. Для большинства практических случаев, как показано в работе [21], когда время запаздывания τ отраженного излучения значительно меньше периода $\tau \ll T_a$ регистрируемого сигнала, анализ особенностей формирования автодинного отклика в генераторе с ЧМ можно проводить, полагая $\delta(t, \tau) = \omega\tau$. С учетом этого замечания с учетом (2) получим:

$$\delta(t, \tau) = \omega_0\tau + \omega_0 m_{\text{чм}} \tau f_{\text{мод}}(t) - \Gamma L_a \omega_0 \tau \sin[\delta(t, \tau) + \theta]. \quad (4)$$

Как видим из (4) относительно фазы $\delta(t, \tau)$, данное выражение является по-прежнему неявным. Для ее окончательного выявления используем метод последовательных приближений. В общем виде при выполнении условий $C_{\text{ос}} < 1$ решение k -го приближения этим методом имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta(t, \tau_n) = & (2\pi\tau_n)_{(0)} + \pi B_{\text{чм}} f_{\text{мод}}(t) - C_{\text{ос}} \sin[(2\pi\tau_n)_{(1)} + \\ & + \pi B_{\text{чм}} f_{\text{мод}}(t) + \theta - \dots - C_{\text{ос}} \sin[(2\pi\tau_n)_{(k-1)} + \pi B_{\text{чм}} f_{\text{мод}}(t) + \\ & + \theta - C_{\text{ос}} \sin[(2\pi\tau_n)_{(k)} + \pi B_{\text{чм}} f_{\text{мод}}(t) + \theta]] \dots \end{aligned} \quad (5)$$

где индексами в круглых скобках около слагаемых $(2\pi\tau_n)$ обозначен порядок приближения; $\tau_n = \omega_0\tau / 2\pi$ – нормированное (безразмерное) время; $B_{\text{чм}} = \omega_0 m_{\text{чм}} \tau / \pi$ – параметр частотной модуляции, характеризующий изменение фазы автодинного сигнала при ЧМ и определяющий число периодов сигнала, укладывающихся на периоде модулирующей функции при неподвижном объекте локации; $C_{\text{ос}} = \Gamma L_a \omega_0 \tau$ – параметр обратной связи автодинной системы генератор – объект локации, физический смысл которого – изменение фазы формируемого сигнала из-за автодинных изменений частоты генерации [22].

Отметим, что параметр обратной связи $C_{\text{ос}}$ является одним из важнейших в теории автодинных систем. Величина этого параметра, зависящая от времени τ запаздывания и уровня Γ отраженного излучения, а также через коэффициент L_a от внутрен-

них свойств генератора, определяет степень ангармонических искажений сигналов автодинов.

Из выражений (1) и (3) видно, что при ЧМ генератора и одновременном воздействии отраженного излучения его отклик по изменению амплитуды колебаний и смещению в цепи питания генератора, кроме полезного сигнала (вторые слагаемые), содержит также составляющие сигнала (первые слагаемые), повторяющие закон модуляции. Данные составляющие не содержат полезной информации об объекте, поэтому в дальнейшем анализе их рассматривать не будем. Кроме того, эти выражения отличаются лишь амплитудными значениями и сдвигом фаз ψ_1 и ψ_0 . Поэтому в дальнейшем будем рассматривать обобщенное выражение для нормированного автодинного отклика в виде:

$$a_n(t, \tau_n) = \frac{a(t, \tau)}{a_m(t, \tau)} = \cos[\delta(t, \tau_n) - \psi], \quad (6)$$

где $a(t, \tau)$, $a_m(t, \tau)$ – текущие и максимальные значения автодинного отклика по изменению амплитуды колебаний ΓK_a или смещения в цепи питания ΓK_0 соответственно; ψ – обобщенный угол фазового смещения ψ_1 или ψ_0 .

Зависимости (5) и (6) в теории автодинных систем обычно называются фазовой (ФХА) и сигнальной (СХА) характеристиками автодина соответственно [20].

Следуя [15], представим математическую модель модуляционной характеристики в виде суммы линейной $f_{\text{лин}}(t_n) = t_n$ и нелинейной $f_{\text{нл}}(t_n) = v_n \cos(\pi t_n)$ функций

$$f_{\text{мод}}(t_n) = f_{\text{лин}}(t_n) + f_{\text{нл}}(t_n), \quad (7)$$

где v_n – коэффициент, характеризующий нелинейность модуляционной характеристики; $t_n = t / T_{\text{мод}} = \Omega_{\text{мод}} t / 2\pi$ – нормированное время модулирующей функции, действительной в пределах $-0,5t_n \leq t_n \leq 0,5t_n$. Как видно из (7), в данном случае расчет автодинного сигнала согласно (5) и (6) сводится к учету двойной модуляции частоты.

Обычно для СБРЛ с ЧМ выполняется условие $\tau \ll T_{\text{мод}}$. С учетом выполнения этого условия для неподвижного объекта локализации ($\tau_n = 0$) при $C_{\text{ос}} = 0$, $\psi = 0$ и равенстве $B_{\text{чм}}$ целому положительному числу k разложение в ряд Фурье автодинного отклика (6) с учетом (5) и (7) имеет вид:

$$a_n(t) = J_0(v_n k) \cos(n \Omega_{\text{мод}} t) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(v_n k) \cos(k \pm n) \Omega_{\text{мод}} t. \quad (8)$$

Из анализа (8) следует, что при идеальной модуляционной характеристике, когда $v_n = 0$, в спектре сигнала присутствует лишь одна составляющая, имеющая частоту $k \Omega_{\text{мод}}$. Даже неболь-

шая нелинейность модуляционной характеристики в единицы процентов приводит к значительному искажению спектра автодинного сигнала и изменениям его мгновенной частоты. Более подробные выводы о влиянии нелинейности на формирование сигналов и их спектр сделаем после анализа результатов численного моделирования.

3. Численное моделирование автодинных характеристик

Модуляционные характеристики всех известных генераторов с ЧМ в той или иной степени нелинейные. Типичная модуляционная характеристика – это выпуклая кривая с производной, уменьшающейся с ростом частоты. Величину нелинейности обычно определяют как отношение максимального отклонения модуляционной характеристики от линейного закона к ее диапазону перестройки частоты за период модуляции $T_{\text{мод}}$.

Для расчета сигнальных характеристик автодинных СБРЛ с линейной ЧМ по несимметричному пилообразному закону и оценки влияния нелинейности модуляционной характеристики на формирование автодинного сигнала воспользуемся аппроксимацией этой характеристики разрывными функциями. В качестве линейной зависимости $f_{\text{лин}}(t_n)$ будем использовать функцию вида [18; 19]:

$$f_{\text{лин}}(t_n) = \frac{2}{\pi} \arctg \left(\tg \frac{2\pi t_n + \pi}{2} \right). \quad (9)$$

При этом имитацию нелинейности модуляционной функции в (7) выполним с помощью полупериода функции квадрата косинуса:

$$f_{\text{нл}}(t_n) = 2v_n \{ 2\cos^2[(\pi/4)f_{\text{лин}}(t_n)] - 1 \}. \quad (10)$$

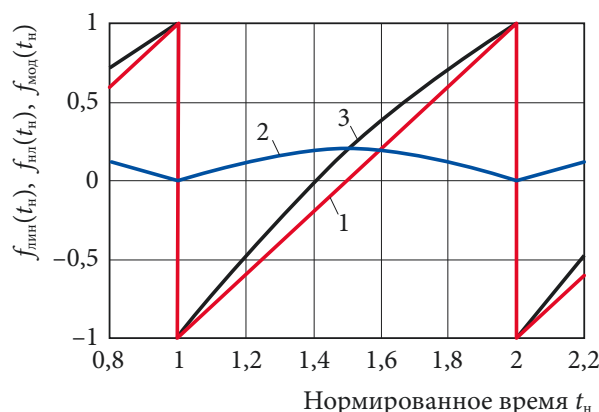


Рис. 1. Временные диаграммы линейной (кривая 1), нелинейной (кривая 2) и результирующей (кривая 3) модулирующих функций

Fig. 1. Timing diagrams of linear (curve 1), nonlinear (curve 2) and resulting (curve 3) modulating functions.

На рис. 1 приведены временные диаграммы линейной $f_{\text{лин}}(t_n)$ (кривая 1), нелинейной $f_{\text{нл}}(t_n)$ (кривая 2) и результирующей или суммарной $f_{\text{мод}}(t_n)$ (кривая 3) функций модуляции, рассчитанные согласно (9), (10) и (7) соответственно. Максимальное значение функции $f_{\text{нл}}(t_n)$ соответствует наибольшему отклонению $f_{\text{мод}}(t_n)$ от линейной зависимости. Половина этого отклонения численно равно коэффициенту ν_n нелинейности модуляционной характеристики. В данном случае коэффициент нелинейности составляет $\nu_n = 10\%$.

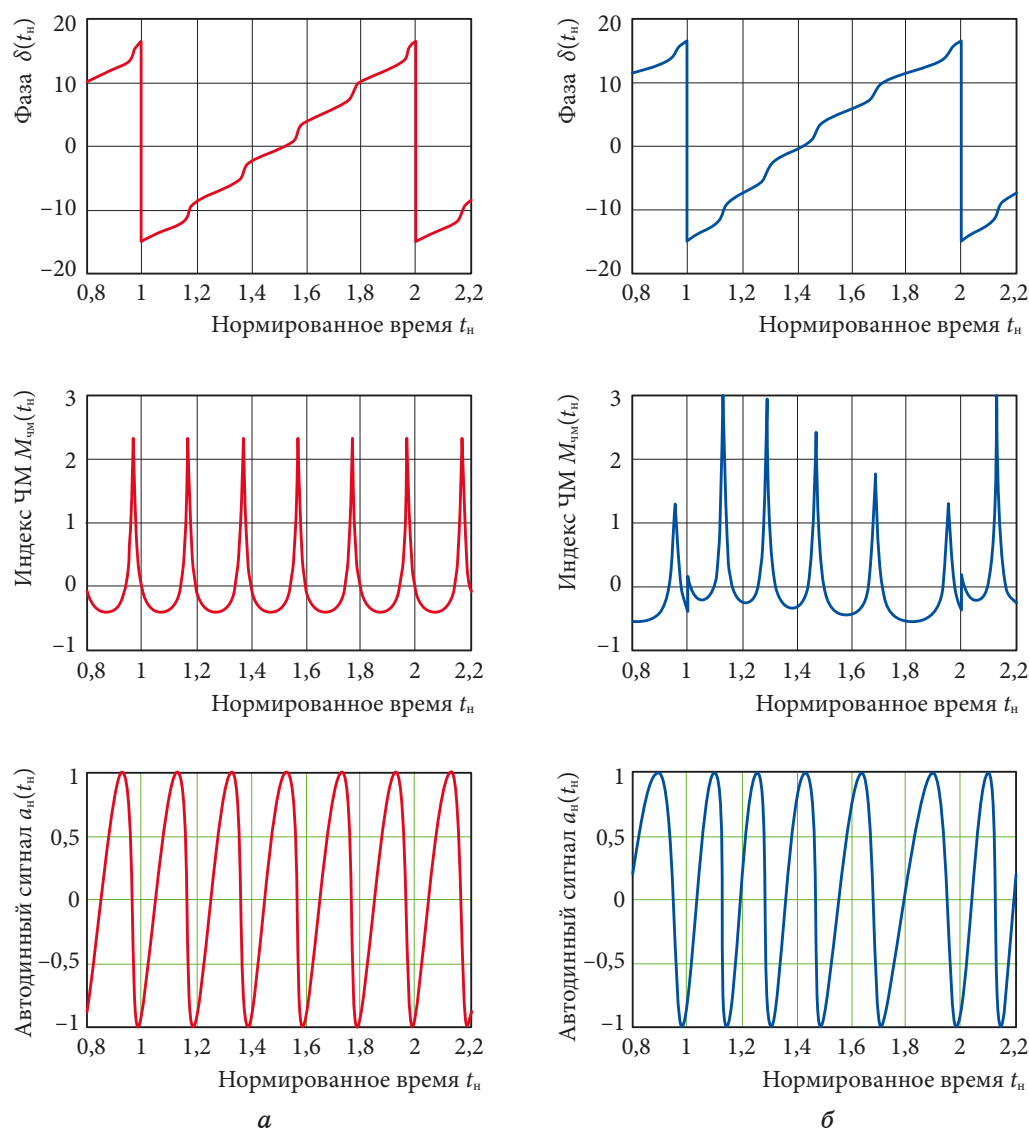


Рис. 2. Временные диаграммы ФХА $\delta(t_n)$, индекса ЧМ $M_{\text{чм}}(t_n)$ и СХА $a_n(t_n)$, рассчитанные при $C_{\text{ос}} \ll 1$ и различных значениях коэффициента ν_n нелинейности: $\nu_n = 0$ (а) и $\nu_n = 0.1$ (б)

Fig. 2. Timing diagrams of APC $\delta(t_n)$, index of FM $M_{\text{чм}}(t_n)$ and ASC $a_n(t_n)$, calculated at $C_{\text{ос}} \ll 1$ and different values of the coefficient ν_n of non-linearity: $\nu_n = 0$ (a) and $\nu_n = 0.1$ (b)

На рис. 2 и 3 для случаев линейной (а) и нелинейной (б) модуляционной характеристики представлены временные диаграммы формирования ФХА $\delta(t_n)$, мгновенного индекса $M_{\text{чм}}(t_n)$ ЧМ автодинного сигнала и СХА $a_n(t_n)$. Расчеты выполнялись согласно (5), (6) с учетом (9) и (10) при $\tau_n = 0$, $B_{\text{чм}} = 5$, $\psi = 0,2$, $\theta = 1$ и $k = 50$ для различных значений $C_{\text{oc}} = 0,1$ (рис. 2) и $C_{\text{oc}} = 0,7$ (рис. 3) и коэффициента нелинейности модуляционной характеристики v_n : $v_n = 0$ (а) и $v_n = 0,1$ (б). При этом мгновенный индекс $M_{\text{чм}}(t_n)$ ЧМ автодинного сигнала вычислялся по формуле:

$$M_{\text{чм}}(t_n) = \frac{1}{2\pi B_{\text{чм}}} \frac{d\delta(t_n)}{dt_n} - 1. \quad (11)$$

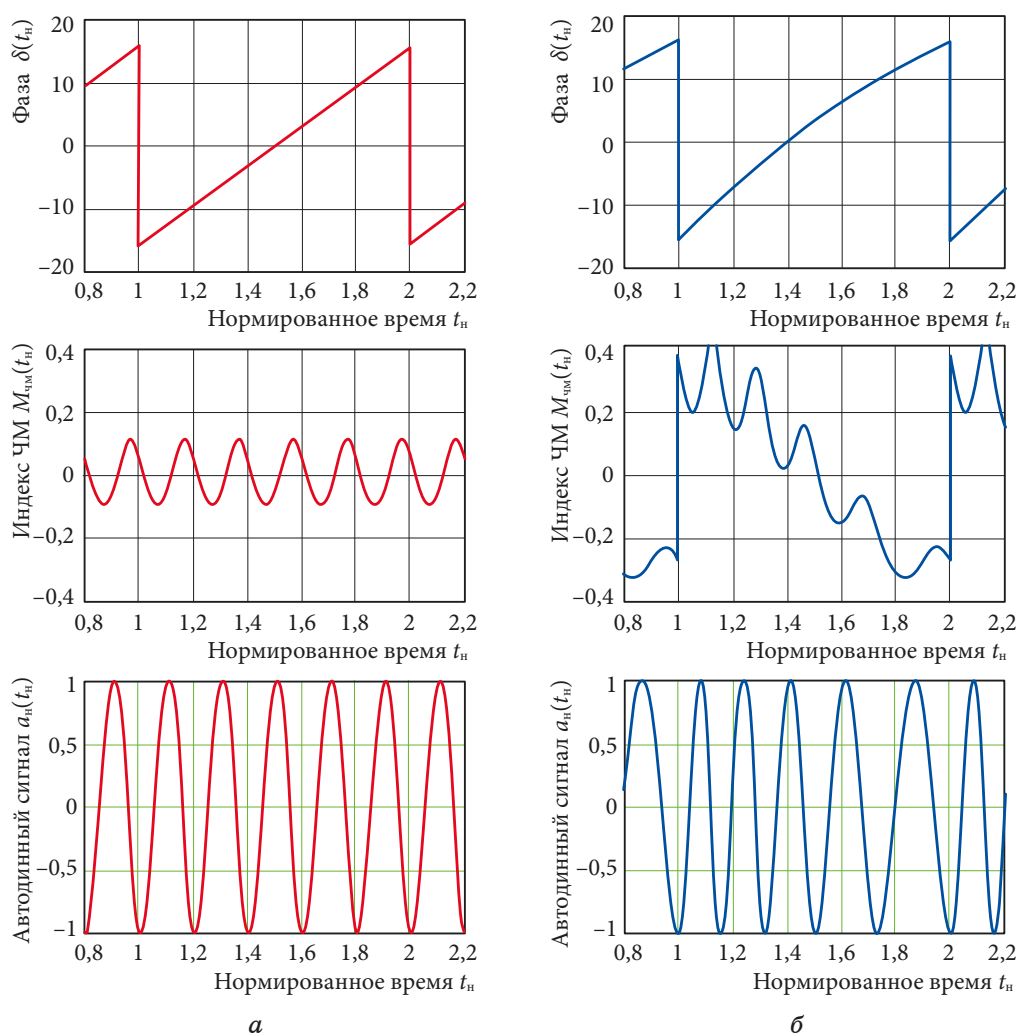


Рис. 3. Временные диаграммы ФХА $\delta(t_n)$, индекса ЧМ $M_{\text{чм}}(t_n)$ и СХА $a_n(t_n)$, рассчитанные при $C_{\text{oc}} = 0,7$ и различных значениях коэффициента v_n нелинейности: $v_n = 0$ (а) и $v_n = 0,1$ (б)

Fig. 3. Timing diagrams of APC $\delta(t_n)$, FM and ASC index $M_{\text{чм}}(t_n)$ and $a_n(t_n)$, calculated at $C_{\text{oc}} = 0,7$ and various values of the coefficient v_n of non-linearity: $v_n = 0$ (а) and $v_n = 0,1$ (б)

Как видно из (5) и (11), мгновенный индекс $M_{\text{чм}}(t_{\text{н}})$ ЧМ автодинного сигнала учитывает как нелинейность модуляционной характеристики, так и нелинейность набега фазы $\delta(t_{\text{н}})$ отраженного излучения, вызванной автодинными изменениями частоты генерации.

На рис. 4 и 5 представлены результаты расчета с помощью встроенной подпрограммы быстрого преобразования Фурье (БПФ) математического пакета «MathCAD» спектров автодинного сигнала $A_{\text{н}}(F_{\text{н}})$. Вычисления выполнялись при $\tau_{\text{н}} = 0$, $B_{\text{чм}} = 5$, $C_{\text{ос}} = 0$, $\psi = 0,2$, $\theta = 1$, $k = 50$ и различных значениях коэффициента $\nu_{\text{н}}$ нелинейности модуляционной характеристики: $\nu_{\text{н}} = 0$ (а), $\nu_{\text{н}} = 0,05$ (б), $\nu_{\text{н}} = 0,1$ (в), $\nu_{\text{н}} = 0,2$ (г).

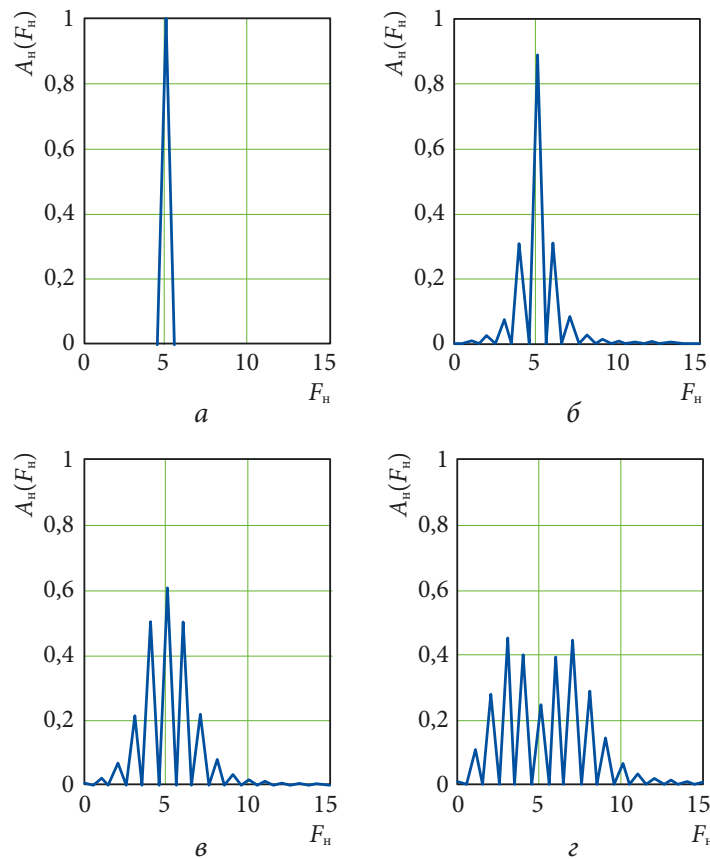


Рис. 4. Спектры автодинного сигнала $A_{\text{н}}(F_{\text{н}})$, рассчитанные при $C_{\text{ос}} \ll 1$ и различных значениях коэффициента $\nu_{\text{н}}$ нелинейности: $\nu_{\text{н}} = 0$ (а), $\nu_{\text{н}} = 0,05$ (б), $\nu_{\text{н}} = 0,1$ (в), $\nu_{\text{н}} = 0,2$ (г)

Fig. 4. Spectra $A_{\text{н}}(F_{\text{н}})$ of an autodyne signal calculated for $C_{\text{ос}} \ll 1$ and different values of the nonlinearity coefficient $\nu_{\text{н}}$: $\nu_{\text{н}} = 0$ (а), $\nu_{\text{н}} = 0,05$ (б), $\nu_{\text{н}} = 0,1$ (с), $\nu_{\text{н}} = 0,2$ (d)

Из приведенных на рис. 2 и 4 под литерой *а* временных диаграмм, рассчитанных при отсутствии нелинейности модуляционной характеристики ($\nu_{\text{н}} = 0$), следует, что в случае «слабого»

отраженного излучения, когда $C_{oc} \ll 1$, в автодине формируются практически гармонические сигналы, как в системах гомодинного типа [15]. При этом в спектре сигнала присутствует только одна составляющая с частотой $F_n = k\Omega_{mod} / 2\pi$, соответствующая принятому выше условию $B_{чм} = k$ (рис. 4а). В случае, когда величина C_{oc} соизмерима с единицей, но при этом $C_{oc} \leq 1$, наблюдаются ангармонические искажения «сильных» сигналов, которые проявляются в изменениях их «наклона волн» (рис. 3а) и появлении его высших гармонических составляющих (рис. 5а). Эти результаты соответствуют результатам исследований, полученным в работах [16–18] для случая, когда выполняется принятое здесь неравенство $\tau \ll T_{mod}$.

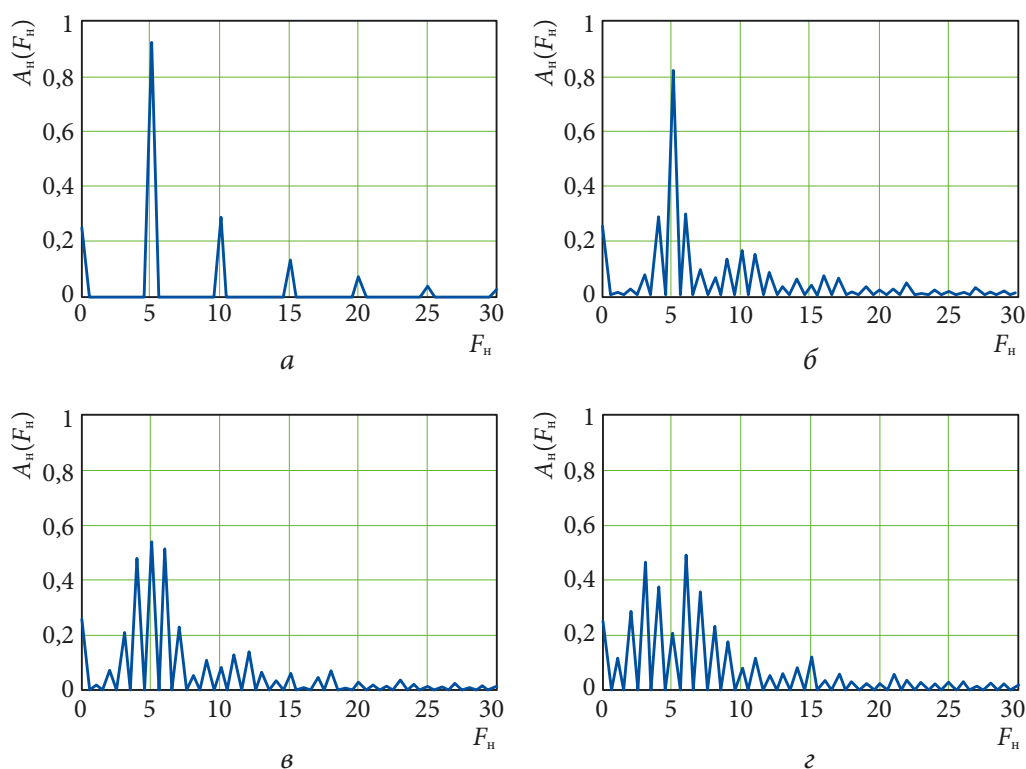


Рис. 5. Спектры автодинного сигнала $A_n(F_n)$, рассчитанные при $C_{oc} = 0,7$ и различных значениях коэффициента v_n нелинейности: $v_n = 0$ (а), $v_n = 0,05$ (б), $v_n = 0,1$ (в), $v_n = 0,2$ (г)

Fig. 5. Spectra of the autodyne signal $A_n(F_n)$ calculated for $C_{oc} = 0,7$ and at different values of the nonlinearity coefficient v_n : $v_n = 0$ (a), $v_n = 0,05$ (b), $v_n = 0,1$ (c), $v_n = 0,2$ (d)

Наличие нелинейности модуляционной характеристики, как видно на графиках рис. 2 и 3 под литерой б, вызывает значительные изменения вида временных диаграмм формирования автодинного сигнала, а также ширины и виде его спектра (рис. 4, 5). Если на графиках ФХА $\delta(t_n)$ появление дополнительной нелинейности заметно лишь при больших значениях коэффициента

v_n , то на графиках индекса ЧМ $M_{\text{чм}}(t_n)$ и СХА $a_n(t_n)$ эти изменения в виде изменений периода и появления скачков в начале и конце цикла модуляции хорошо видны и при небольших значениях коэффициента v_n нелинейности модуляционной характеристики. При этом ширина спектра сигнала $A_n(F_n)$ значительно увеличивается с ростом коэффициента нелинейности v_n даже при пренебрежимо малой величине параметра обратной связи, когда $C_{\text{oc}} \ll 1$ (рис. 4б–г). Боковые составляющие отстоят от центральной частоты и между собой на частоту, кратную частоте модуляции. Эти результаты согласуются с выводами, сделанными выше из анализа (8). В случае больших значений параметра C_{oc} , когда величина C_{oc} соизмерима с единицей, каждая из высших гармоник автодинного сигнала $A_n(F_n)$ с увеличением коэффициента v_n нелинейности модуляционной характеристики также распадаются на ряд боковых составляющих (рис. 5б–г).

Как видно из спектральных диаграмм рис. 5, присутствующая в спектре сигнала на частоте $F_n = 0$ постоянная составляющая при наличии автодинных искажений сигналов, когда $C_{\text{oc}} \neq 0$, практически не зависит от нелинейности модуляционной характеристики. Она определяется лишь величиной параметра C_{oc} . Данная составляющая заслуживают особого внимания при изучении свойств автодинных сигналов СБРЛ с ЧМ. Ее учет может потребоваться, например, при обработке сигналов автодинных систем и анализе их помехоустойчивости.

4. Суть метода линеаризации модуляционной характеристики

Нелинейность модуляционной характеристики СБРЛ с ЧМ, как следует из результатов выполненных выше исследований, вызывает значительные изменения формы и спектра автодинного сигнала. Эти изменения отрицательно сказываются на таких важных показателях СБРЛ, как точность измерения дальности и ее разрешающая способность. Одно из направлений разработки прецизионных СБРЛ связано с компенсацией отклонений параметров модуляции с помощью линии задержки, имитирующей объект локации на заданном расстоянии [23]. Однако применение линии задержки значительно усложняет приемо-передающий модуль СБРЛ и сводит к минимуму основное достоинство автодинных систем – их конструктивную простоту.

Проблему линеаризации характеристики перестройки частоты реальных СВЧ-генераторов нам удалось разрешить с помощью метода квазистатической коррекции модуляционной характеристики без ущерба преимуществ автодинного принципа построения. Суть этого метода состоит в формировании с помо-

щью цифрового сигнального процессора (ЦСП) управляющего напряжения на варикапе по специально подобранному корректирующему закону $V_{\text{корр}}(t)$, при котором модулирующая функция $f_{\text{мод}}[V_{\text{корр}}(t)]$ является строго линейной зависимостью от времени t . Для этого выбор закона изменения управляющего напряжения от времени может быть определен следующим выражением:

$$V_{\text{корр}}(t) = f_{\text{идеал}}^{-1} \{f_{\text{мод}}[V(t)]\}, \quad (12)$$

где $f_{\text{идеал}}^{-1}$ – функция обратная к строго линейной «идеальной» перестроечной характеристике генератора. На практике функцию $V_{\text{корр}}(t)$ легко найти графически или с помощью полиномиальной аппроксимации, используя табулированные значения функций $V(t)$ и $f_{\text{мод}}(V)$ в узлах заданной сетки. Так, например, на рис. 6а приведен график перестроечной характеристики генератора 8-мм диапазона на диоде Ганна. Корректирующая функция $V_{\text{корр}}(t)$ нормированного времени t_n для этой характеристики представлена на рис. 6б.

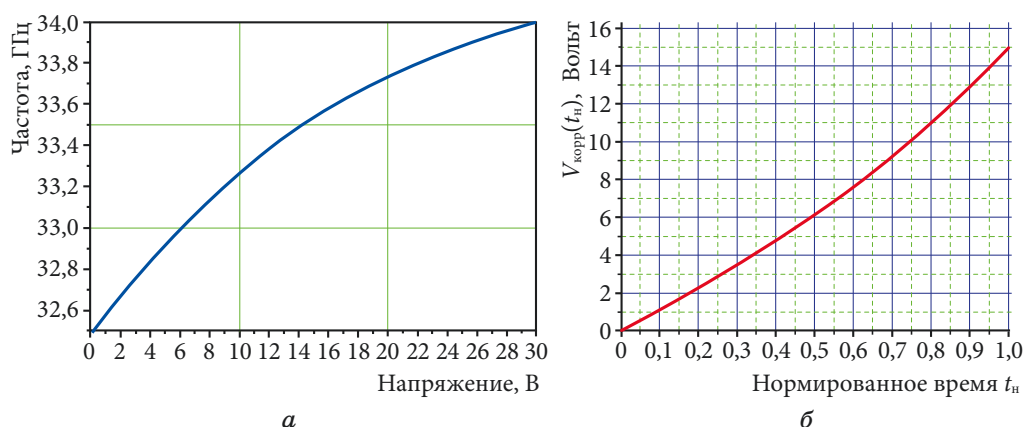


Рис. 6. Графики перестроечной характеристики генератора на диоде Ганна (а) и зависимости управляющего напряжения на варикапе как функции нормированного времени t_n при квазистатической коррекции модуляционной характеристики (б)

Fig. 6. Graphs of the tuning characteristics of the Gunn diode oscillator (a) and the dependence of the control voltage on the varicap as a function of normalized time with a quasi-static correction of the modulation characteristic (b)

Реализация корректирующей функции $V_{\text{корр}}(t_n)$ выполнена нами путем цифрового синтеза требуемой зависимости управляющего напряжения по заранее сформированной таблице значений. Для этого в соответствии со снятой характеристикой генератора формируется таблица цифровых кодов, которая записывается в постоянное запоминающее устройство цифрового сигнального процессора (ЦСП). В процессе работы устройства формирования управляющего напряжения ЦСП последователь-

но выбирает из таблицы хранящийся в его энергонезависимой памяти очередной цифровой код и отправляет его по шине последовательного порта в цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). В процессе последовательной выборки значений из таблицы с тактовой частотой работы ЦАП на его выходе формируется ступенчатый сигнал модуляции $U_{\text{DCFM}}(t_n) = U_{\text{CFM}}(t_n) + U_{\text{SC}}(t_n)$ (рис. 7), который содержит, помимо желаемой составляющей $U_{\text{CFM}}(t_n)$, также и паразитную составляющую $U_{\text{SC}}(t_n)$, имеющую периодичность работы ЦАП. При достаточно высокой скорости выборок и высокой разрядности ЦАП паразитная составляющая сигнала $U_{\text{SC}}(t_n)$, связанная с наличием ступенек, будет иметь малую амплитуду и высокую частоту. В таком случае паразитные составляющие можно легко отфильтровать применением ФНЧ относительно невысокого порядка.

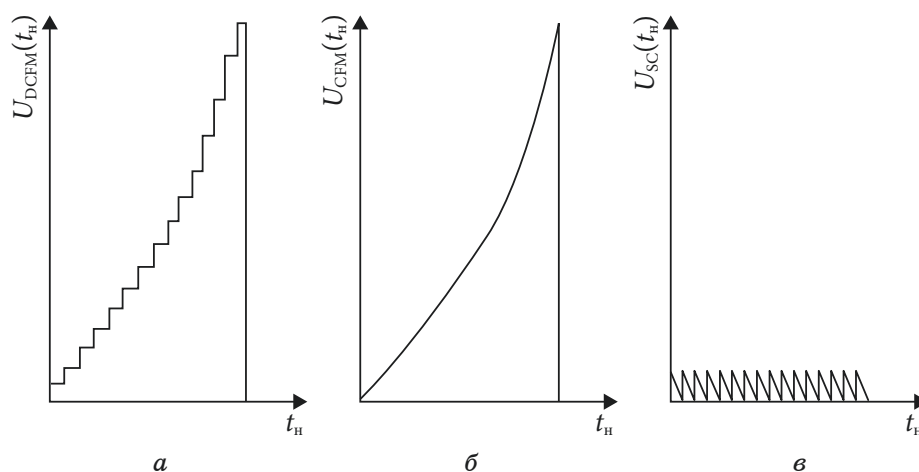


Рис. 7. Графики ступенчатого сигнала $U_{\text{DCFM}}(t_n)$ на выходе ЦАП (а), сигнала модуляции $U_{\text{CFM}}(t_n)$ после фильтрации помех (б) и паразитной составляющей $U_{\text{SC}}(t_n)$ помех (в)

Fig. 7. Graphs of the step signal $U_{\text{DCFM}}(t_n)$ at the DAC output (а), the modulation signal $U_{\text{CFM}}(t_n)$ after filtering the interference (б) and the parasitic component $U_{\text{SC}}(t_n)$ of the interference (с)

5. Особенности цифровой обработки сигналов автодинной СБРЛ с ЧМ

Структурная схема автодинной СБРЛ 8-мм диапазона с линейной модуляцией частоты представлена на рис. 8 [10]. Основой СБРЛ является автодинный СВЧ-модуль 2, выполненный на базе диода Ганна АА727А и варикапа ЗА637А-6 в корпусном исполнении. Выходная мощность излучения составляет 25 мВт, центральная частота – 36,5 ГГц. СВЧ-модуль обеспечивает перестройку частоты в полосе до 500 МГц. Закон ЧМ – несимметричный пилообразный, частота модуляции 10 кГц.

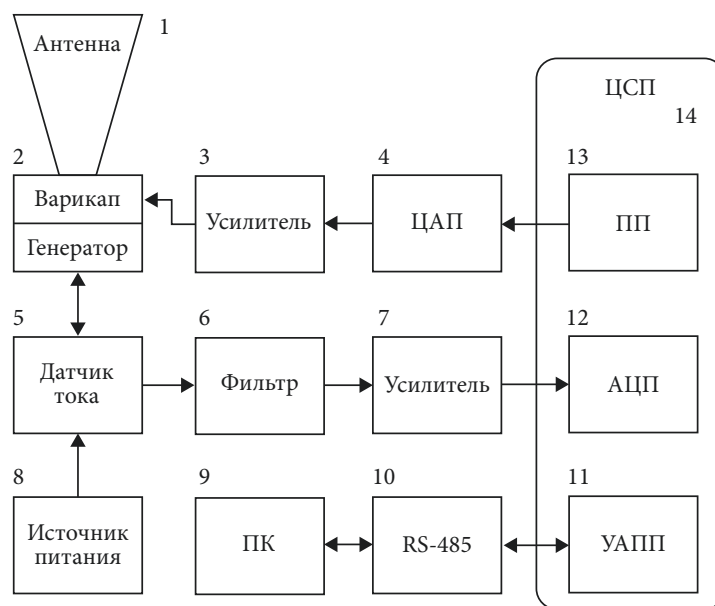


Рис. 8. Структурная схема автодинной СБРЛ с линейной ЧМ:

- 1 – рупорно-линзовая антенна; 2 – СВЧ-генератор на диоде Ганна с перестройкой частоты варикапом; 3 – усилитель с ФНЧ; 4 – цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП); 5 – датчик тока в цепи питания генератора; 6 – фильтр; 7 – усилитель; 8 – блок питания; 9 – персональный компьютер (ПК); 10 – преобразователь RS-485; 11 – универсальный асинхронный приемо-передатчик (УАПП); 12 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 13 – последовательный порт (ПП); 14 – центральный сигнальный процессор (ЦСП)

Fig. 8. Block diagram of a LFM SRR:

- 1 – horn-lens antenna; 2 – Gunn diode microwave oscillator with frequency tuning by varicap; 3 – amplifier with a low-pass filter; 4 – digital-to-analog converter (DAC); 5 – current sensor in the oscillator power circuit; 6 – filter; 7 – amplifier; 8 – power supply unit; 9 – personal computer (PC); 10 – RS-485 converter; 11 – universal asynchronous transceiver (UART); 12 – analog-to-digital converter (ADC); 13 – serial port (SP); 14 – digital signal processor (DSP)

Линейно частотно-модулированный радиосигнал, процесс формирования которого был описан выше, излучается антенной в контролируемое пространство. Отраженный от объекта локации радиосигнал попадает через антенну обратно в генератор и вызывает в нем автодинный эффект – изменения амплитуды и частоты колебаний, а также тока в цепи питания генератора. С помощью датчика тока отклик генератора в цепи питания преобразуется в автодинный сигнал, который наряду с полезной составляющей содержит также составляющую паразитной амплитудной модуляцией (ПАМ) колебаний генератора при его ЧМ (см. первые слагаемые в (1) и (3)).

Составляющая ПАМ создает серьезные проблемы для достижения предельных технических параметров автодинных СБРЛ с ЧМ. Уровень ее может значительно превышать уровень полезного сигнала. Это значительно сужает динамический диапазон

системы и затрудняет обработку полезного сигнала. В нашем случае применение цифровой обработки автодинного сигнала позволило решить указанную проблему. Суть этого решения состоит в следующем.

Первично по старту системы производится ее инициализация, что включает в себя настройку периферийных устройств цифрового сигнального процессора, распределение внутренней памяти, установку значений внутренних переменных, копирование исполняемых инструкций из низкопроизводительного ПЗУ в высокопроизводительное ОЗУ. На следующем шаге алгоритма работы вычислительного ядра производится установка значения пилообразного напряжения путем передачи в ЦАП цифрового кода. Синхронно, что важно, с установкой напряжения на ЦАП производится выборка из АЦП (оцифровка входного сигнала) с последующим сохранением результата в оперативной памяти процессора. Последовательное повторение приведенных выше шагов формирует, таким образом, массив данных в памяти ЦСП, который представляет собой оцифрованный сигнал автодинного отклика.

Далее накопленный массив данных подвергается цифровой фильтрации путем применения фильтра верхних частот с конечной импульсной характеристикой, что улучшает характеристики сигнала, позволяет снизить влияние ПАМ и низкочастотных шумов. Затем сигнал передается в программный модуль быстрого преобразования Фурье для вычисления его спектральных составляющих. После этого производится анализ спектра автодинного сигнала и принятие решения. Если требуется перед принятием решения визуализация спектра, то производится отправка полученного Фурье-спектра на индикацию.

6. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования особенностей автодинных сигналов проводились с описанным выше образцом СБРЛ с ЧМ, предназначенным для решения задач автоматизации технологических процессов на сортировочной горке [10; 24]. Основной целью экспериментов являлось исследование достигнутой точности измерения расстояния до отражателя, величины его перемещения и разрешающей способности по дальности.

В первой группе опытов производились измерения при отражении сигнала от подвижного короткозамкнутого поршня, расположенного в волноводном тракте, соединенном с СВЧ-выходом автодинной СБРЛ с ЧМ. На рис. 9а представлены спектральные диаграммы сигналов автодинного отклика при отношении сигнал-шум около 20 дБ, которые соответствуют трем положениям подвижного короткозамыкателя в волноводном тракте. Как

следует из результатов измерений, автодинная СБРЛ позволяет регистрировать перемещения отражателя при данном отношении сигнал-шум с точностью до 30 см. Следует отметить, что достигнутая точность соответствует теоретическому пределу го-модинных СБРЛ с линейной ЧМ, имеющих полосу перестройки частоты 500 МГц.

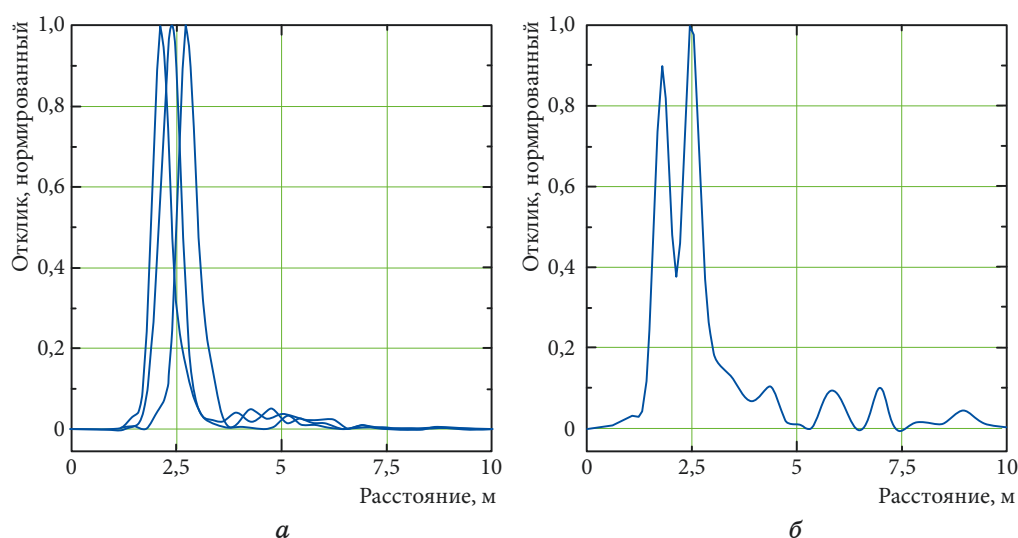


Рис. 9. Спектры автодинного сигнала, полученные от короткозамыкателя, которые соответствуют трем его положениям с разностью в 0,3 м (*а*) и от двух близко расположенных отражателей с разными коэффициентами отражения (*б*)

Fig. 9. Spectra of the autodyne signal obtained when the signal is reflected from the movable short circuit, which correspond to three positions with a difference of 0.3 m (*a*) and from two closely spaced reflectors with different reflection coefficients (*b*)

Во второй группе опытов производились измерения разрешающей способности по дальности автодинной СБРЛ. Для этого к СВЧ-выходу системы подключалась рупорная антенна, а два уголкового отражателя располагались вдоль трассы распространения сигнала. На рис. 9б представлены спектральные диаграммы сигналов автодинного отклика от двух отражателей, расположенных на минимально регистрируемом расстоянии. Как видно на рисунке, амплитуда автодинного отклика для разных уголкового отражателей имеет различное значение, так как более близкий отражатель имеет меньший коэффициент отражения. Рис. 9б иллюстрирует разрешающую способность по дальности автодинной СБРЛ с полосой перестройки частоты 500 МГц. Как следует из результатов измерений при отношении сигнал-шум около 20 дБ, разрешающая способность составила 60 см.

Как видно на графиках рис. 9, в спектрах выходных сигналов автодинной СБРЛ отсутствуют гармонические составляющие

ПАМ и компоненты, связанные с процессом модуляции генератора. Таким образом, экспериментально показано, что применение цифровой обработки и формирования сигнала модуляции частоты генератора позволило решить задачу достижения высокой разрешающей способности при измерении дальности в автодинных СБРЛ с ЧМ.

Попутно был проведен эксперимент приема и обработки «сильного» сигнала. Для этого случая на рис. 10 представлен спектр автодинного сигнала, полученного от стены пятиэтажного здания, находящегося на расстоянии около 70 м от СБРЛ. В спектре сигнала видны характерные пики от «блестящих точек» на стене здания, обозначенные цифрами a_1, b_1, c_1, d_1 . Кроме основных гармоник, в спектре присутствуют также вторая и третья гармоники, появление которых, очевидно, связано с ангармоническими искажениями формы автодинного сигнала. Если рассмотреть спектр второй гармоники, то можно заметить, что компоненты a_2, b_2, c_2, d_2 являются порождением компонентов a_1, \dots, d_1 первой гармоники. При этом различие по частоте между соседними гармониками a_2, \dots, d_2 в два раза больше, чем между их основными компонентами. Это хорошо видно на примере третьей гармоники, где точкам c_3 и d_3 соответствуют точки c_1 и d_1 первой гармоники. Отсюда следует, что более тонкая структура отражающего объекта проявляется в гармониках более высокого порядка спектра автодинной СБРЛ с ЧМ. Сигналы от расположенных поблизости отражателей, плохо различимые при обработке сигналов первой гармоники, будут лучше различаться при обработке второй или третьей гармоник.

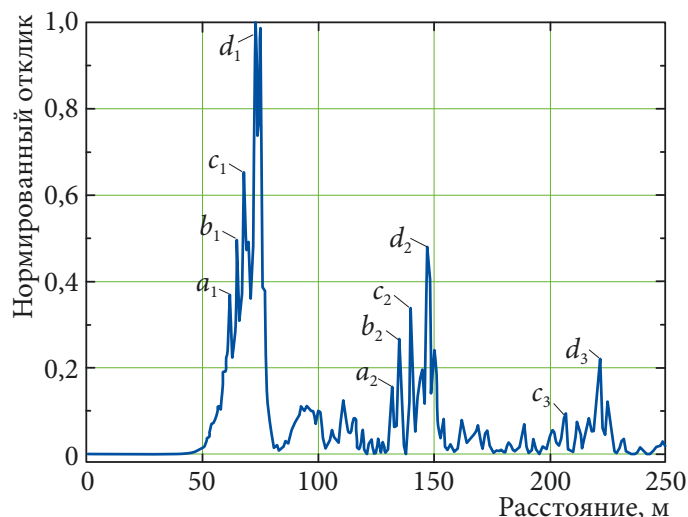


Рис. 10. Спектр автодинного сигнала, полученного от стены пятиэтажного здания

Fig. 10. The spectrum of an autodyne signal received from the wall of a five-story building

Если учесть, что в СБРЛ с линейной ЧМ непрерывного излучения ширина элементарного фильтра дискретного преобразования Фурье зависит только от полосы перестройки частоты и определяет максимальное разрешение объектов локации, то анализ гармоник автодинного сигнала более высокого порядка позволяет получить разрешение выше теоретического предела для СБРЛ с линейной ЧМ. С другой стороны, при решении задач обнаружения объектов локации в условиях «сильного» отраженного излучения наличие в спектре сигнала высших гармоник может быть причиной ложного срабатывания автодинной СБРЛ с ЧМ. Для исключения такой ситуации при цифровой обработке сигнала необходимо учитывать отмеченный здесь фактор.

7. Заключение

Выполнено численное моделирование формирования сигналов в автодинной СБРЛ с ЧМ в случае наличия нелинейности модуляционной характеристики СВЧ-генератора. Проведенный расчет позволяет сделать вывод, что нелинейность модуляционной характеристики генератора является одним из его важнейших параметров, поскольку даже небольшая нелинейность этой характеристики приводит к значительному изменению мгновенной частоты автодинного сигнала, а также искажению его формы и спектра. От степени линейности этой характеристики, ее стабильности зависят алгоритм обработки автодинного сигнала, погрешность измерения дальности и скорости, требуемая величина девиации частоты и целый ряд других параметров СБРЛ с ЧМ.

Предложен метод линеаризации перестроечной характеристики СВЧ-генератора путем квазистатической коррекции управляющего напряжения с использованием цифрового сигнального процессора. Описан также принцип цифровой обработки сигнала автодинной СБРЛ с ЧМ, избавляющий сигнал от сопутствующей составляющей паразитной амплитудной модуляции.

Экспериментально показано, что применение метода линеаризации модуляционной характеристики генератора и принципа цифровой обработки автодинного сигнала в СБРЛ с ЧМ позволяют решить задачу достижения предельно высоких показателей по точности и разрешающей способности при измерении дальности до объектов локации без усложнения СВЧ-части.

Полученные в настоящей работе результаты анализа сигналов развивают и дополняют результаты известных исследований, выполненных в работах [16–19], в части учета нелинейности модуляционной характеристики при расчете автодинного

отклика генератора. Выявленные закономерности формирования сигналов и предложенный метод линеаризации модуляционной характеристики в автодинных СБРЛ с ЧМ 8-мм диапазона имеют достаточно общий характер. Поэтому полученные результаты работы, как нам представляется, могут использоваться также при расчетах сигналов автодинных систем, выполненных на основе полупроводниковых лазерных модулей [25–27].

Список литературы

1. Usanov D.A., Skripal A.I., Skripal A.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.000043882.16801.3a
2. Alidoost S.A., Sadeghzade R., Fatemi R. Autodyne system with a single antenna. In: *11th Intern. Radar Symposium (IRS-2010)*. Lithuania, Vilnius. 2010. Vol. 2. P. 406–409.
3. 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
4. Mirsaitov F.N., Safonova E.V., Boloznev V.V. Microwave autodyne vibrosensor in aeroengine diagnostics. *European Frequency and Time Forum (EFTF)*. 2014. P. 140–143. DOI: 10.1109/EFTF.2014.7331447
5. Носков В.Я. Двухдиодный автодинный приемопередатчик. *Приборы и техника эксперимента*. 2015;(4):65–70. DOI: 10.7868/S0032816215030246 (На англ. яз.: DOI: 10.1134/S002044121503)
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. (На англ. яз.: DOI: 10.1007/s11018-016-1035-9)
7. Kim S; Kim B.-H., Yook J.-G., Yun G.-H. Proximity vital sign sensor using self-oscillating mixer. *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)*. 2016. P. 1446–1448. DOI: 10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601402
8. Ветрова Ю.В., Дорошенко А.А., Постельга А.Э., Усанов Д.А. Ди-станционный контроль движения поверхности объекта с использова-нием двухканального СВЧ-автодинного генератора. *Радиотехника и электроника*. 2019;64(4):387–395. DOI: 10.1134/S0033849419040119 (На англ. яз.: DOI: 10.1134/S1064226919040119)
9. 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
10. Носков В.Я., Варавин А.В., Васильев А.С., Ермак Г.П., За-карлюк Н.М., Игнатков К.А., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и милли-метрового диапазонов и их применение. Часть 9. Радиолокационное применение автодинов. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2016;(3):32–86.

11. 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
12. Носков В.Я., Богатырев Е.В., Игнатков К.А.. Принцип построения бортового радиолокационного датчика для обнаружения быстро движущихся целей. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2019;12:16–22.
13. 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
14. Noskov V.Ya., Galeev R.G., Bogatyrev E.V., Ignatkov K.A., Shaidurov K.D. Autodyne Sensor Signals with Amplitude-Frequency Modulation of Radiation. *Sensors*, 2020;20(24):7077. DOI: 10.3390/s20247077
15. Komarov I.V., Smolskiy S.M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Norwood, MA: Artech House; 2003. 153 p.
16. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Chupahin A.P., Vasiliev A.S., Ermak G.P., Smolskiy S.M. Signals of autodyne radars with frequency modulation according to symmetric saw-tooth law. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2016;75(17):1551–1566. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i17.40
17. 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
18. Noskov V.Yu., Ignatkov K.A., Chupahin A.P., Vasiliev A.V., Ermak G.P., Smolskiy S.M. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika Radioaparaturuvannia*. 2016;(67):50–57. DOI: 10.20535/RADAP.2016.67.50-57
19. Носков В.Я., Васильев А.С., Ермак Г.П., Игнатков К.А., Чупахин А.П. Флуктуационные характеристики автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2017;60(3):154–165. DOI: 10.20535/S0021347017030049 (На англ. яз.: DOI: 10.3103/S0735272717030049)
20. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов. *Радиотехника*. 2012;(6):24–46.
21. 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
22. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скриполь Ан.В. *Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов*. Саратов: Изд-во Саратовского университета; 2003. 308 с.
23. Комаров В.М., Плохих А.П., Андреева Т.М. Радиолокационные измерители высоты и наклонной дальности с непрерывным ча-

стотно-модулированным излучением. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1991;(12):52–70.

24. 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 and Radio Engineering*. 2012;71(6):567–580. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i6.80

25. Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing applications (Review article). *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2002;4(6):283–294. DOI: 10.1088/1464-4258/4/6/371

26. Sobolev V.S., Kashcheeva G.A. Self-mixing frequency-modulated laser interferometry. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2008;44(6):519–529. DOI: 10.3103/S8756699008060058

27. Usanov D.A., Skripal A.V., Astakhov E.I. Determination of nanovibration amplitudes using frequency-modulated semiconductor laser autodyne. *Quantum Electronics*. 2014;44(2):184–188. DOI: 10.1070/QE2014v044n02ABEH015176

References

1. 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.000043882.16801.3a

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

3. 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

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

5. Noskov V.Yu. A double-diode autodyne transceiver. *Instruments and Experimental Techniques*. 2015;58(4):505–509. DOI: 10.1134/S0020441215030240 (Russ.: DOI: 10.7868/S0032816215030246)

6. Noskov V.Yu., Ignatkov K.A., Chupakhin 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. Kim S; Kim B.-H., Yook J.-G., Yun G.-H. Proximity vital sign sensor using self-oscillating mixer. *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)*. 2016. P. 1446–1448. DOI: 10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601402

8. Vetrova I.V., Doroshenko A.A., Postel'ga 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):409–416. DOI: 10.1134/S1064226919040119 (Russ.: DOI: 10.1134/S0033849419040119)

9. 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
10. 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. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2016;(3):32–86. (In Russ.)
11. 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
12. Noskov V.Ya., Bogatyrev E.V., Ignatkov K.A. Principle of constructing an airborne radar sensor for detecting fast-moving targets. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2019;12:16–22. (In Russ.)
13. 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
14. Noskov V.Ya., Galeev R.G., Bogatyrev E.V., Ignatkov K.A., Shaidurov K.D. Autodyne Sensor Signals with Amplitude-Frequency Modulation of Radiation. *Sensors*, 2020;20(24):7077. DOI: 10.3390/s20247077
15. Komarov I.V., Smolskiy S.M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Norwood, MA: Artech House; 2003. 153 p.
16. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Chupahin A.P., Vasiliev A.S., Ermak G.P., Smolskiy S.M. Signals of autodyne radars with frequency modulation according to symmetric saw-tooth law. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2016;75(17):1551–1566. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i17.40
17. 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
18. Noskov V.Yu., Ignatkov K.A., Chupahin A.P., Vasiliev A.V., Ermak G.P., Smolskiy S.M. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika Radioaparobuduvannia*. 2016;(67):50–57. DOI: 10.20535/RADAP.2016.67.50-57
19. Noskov V.Ya., Vasilev A.S., Ermak G.P., Ignatkov K.A., Chupakhin A.P. Fluctuation characteristics of autodyne radars with frequency modulation. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2017;60(3):123–131. DOI: 10.3103/S0735272717030049 (Russ.: DOI: 10.20535/S0021347017030049)
20. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Smolskiy S.M. Autodyne characteristic dependence on the uhf oscillators inherent parameters. *Radioengineering*. 2012;(6):24–46. (In Russ.)
21. 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

22. Usanov D.A., Skripal A.V., Skripol A.V. *Semiconductor RF and Optical Autodyne Physics*. Saratov: Saratov University; 2003. 308 p. (In Russ.)

23. Komarov V.M., Plokhikh A.P., Andreeva T.M. Radar height and inclined range meters with continuous frequency-modulated radiation. *Zarubezhnaya radioelektronika*. 1991;(12):52–70. (In Russ.)

24. 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 and Radio Engineering*. 2012;71(6):567–580. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i6.80

25. Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing applications (Review article). *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2002;4(6):283–294. DOI: 10.1088/1464-4258/4/6/371

26. Sobolev V.S., Kashcheeva G.A. Self-mixing frequency-modulated laser interferometry. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2008;44(6):519–529. DOI: 10.3103/S8756699008060058

27. Usanov D.A., Skripal A.V., Astakhov E.I. Determination of nanovibration amplitudes using frequency-modulated semiconductor laser autodyne. *Quantum Electronics*. 2014;44(2):184–188. DOI: 10.1070/QE2014v044n02ABEH015176

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.

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

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

Information about the authors

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

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

Evgeniy V. Bogatyrev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Engineering, Siberian Federal University, Technical Director of JSC NPP Radiosvyaz, Krasnoyarsk, Russia.

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

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

Поступила / Received: 09.06.2021

Принята в печать / Accepted: 27.06.2021