

ОСОБЕННОСТИ АВТОДИНОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2016

К. А. Игнатков кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры технологий и средств связи Института радиотехники и информационных технологий-РТФ, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, k.a.ignatkov@gmail.com

В статье приведены функциональная и эквивалентная схемы автодинного генератора. Рассмотрены особенности формирования автодинных и шумовых характеристик с учётом нелинейности фазовой характеристики автодина. Приведены аналитические выражения для шумового процесса в случае одновременного воздействия на автодин собственного отражённого излучения и собственных шумов. Показано позитивное влияние применения высокочастотного внешнего резонатора на формирование низкочастотных информационных сигналов, проявляющееся в увеличении динамического диапазона, снижении автодинной девиации частоты, сужении спектра СВЧ-излучения. Приведены результаты экспериментального исследования обычных и стабилизированных внешним высокочастотным резонатором автодинов.

Автодин, стабилизация частоты, внешний высокочастотный резонатор, коэффициент внешней обратной связи, коэффициент стабилизации.

Цитирование: Игнатков К.А. Особенности автодинов миллиметрового диапазона // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 189-196.
DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-189-196

Автодины (АД) являются простейшими приёмопередающими устройствами, функционально представляющими собой лишь совокупность автогенератора и средств выделения автодинного отклика. Принцип действия этих устройств основан на автодинном эффекте, состоящем в изменениях параметров колебаний генератора под воздействием собственного отражённого от объекта локации излучения или информационного излучения от стороннего источника. Автогенератор в этих устройствах выполняет одновременно функции радиопередающего устройства и приёмника. Простота конструкции автодинов обеспечивает их низкую стоимость, малые габариты и массу приёмопередающих модулей.

Актуальным является выполнение теоретических и экспериментальных исследований обычных и стабилизированных по частоте внешним высокочастотным резонатором автодинных модулей, изготовленных с применением гибридно-интегральной технологии на основе мезапланарных диодов Ганна КВЧ-диапазона, необходимых для выработки рекомендаций по созданию перспективных автодинных модулей и методики их расчёта. Необходимость исследований автодинных приёмо-передающих устройств миллиметрового (крайне высокочастотного – КВЧ, от 30 до 300 ГГц) диапазона связана с тем, что эти устройства по сравнению с автодинами диапазона СВЧ (от 3 до 30 ГГц) имеют качественные отличия в своём функционировании, а также в подходах к их анализу.

Цель работы – обобщение результатов исследований обычных и стабилизированных по частоте внешним высокочастотным резонатором автодинных модулей миллиметрового диапазона.

Функциональная схема простейшего радиолокатора, у которого автодинный генератор (АД) непосредственно связан с антенной (А) без каких-либо развязывающих элементов, представлена на рис. 1, а. Рабочее смещение на активный элемент (АЭ) автодинного генератора подаётся от источника питания E_{Π} через блок регистрации (БР).

Электромагнитные колебания, вырабатываемые АД, излучаются через приёмопередающую антенну (А) в направлении отражающего объекта (ОО). Отражённое излучение через антенну (А) возвращается в генератор (АД), вызывая в нём автодинный эффект.

Возникающие в результате этого автодинные изменения среднего значения тока или напряжения в цепи питания АЭ генератора преобразуются с помощью простейшей цепи автосмещения или специальной схемы блока регистрации БР в напряжение выходного сигнала u_0 (сигнал «автодетектирования»). Возможно выделение полезного сигнала с помощью дополнительной схемы, которая преобразует автодинные изменения амплитуды или частоты автоколебаний в напряжение выходного сигнала u_1 (сигнал «внешнего детектирования»).

Эквивалентная схема автодина, приведённая к плоскости АЭ, представлена на рис. 1, б. На этой схеме по высокой частоте $Y_{\text{кc}}$ отображает проводимость колебательной системы (КС), которая включает в себя также проводимость нагрузки $Y_{\text{н}}$. Параллельно указанным проводимостям (рис. 1, б) подключены эквивалентные источники мгновенного тока внутренних шумов $j_{\text{ш}}(t)$ генератора и воздействия собственного отражённого от объекта излучения $j_{\text{с}}(t, \tau)$, которое запаздывает относительно текущего времени t на время $\tau = 2l/c$, где l – расстояние до отражающей поверхности; c – скорость распространения электромагнитного СВЧ-излучения.

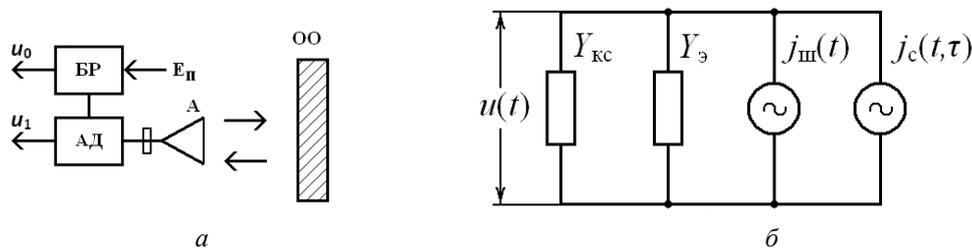


Рис. 1. Функциональная (а) и эквивалентная (б) схемы автодинного генератора

Основными автодинными параметрами генераторов являются коэффициенты автодетектирования K_0 , автодинного усиления K_a и девиации частоты L_a , а характеристиками – зависимости амплитуды $a_1 = \Delta A / A_0$ и частоты $\chi = \Delta \omega / \omega_0$ колебаний и сигнала автодетектирования $i = \Delta I_s / I_{s0}$ от изменений времени запаздывания отражённого излучения [1-3].

Выражения для нормированных относительно максимальных значений амплитудной (АХА) $a_n(\tau_n)$, частотной (ЧХА) $\chi_n(\tau_n)$ характеристик и характеристика автодетектирования автодина (ХАД) $i_n(\tau_n)$ с учётом внутренних и внешних параметров системы «автодин – отражающий объект – автодин» получены на основе результатов анализа эквивалентной схемы (рис. 1, б) в квазистатическом приближении [3; 4]:

$$\chi_n(\tau_n) = \chi(\tau_n) / \chi_m = -\sin[\delta(\tau_n) + \theta]; \quad (1)$$

$$a_n(\tau_n) = a_1(\tau_n) / a_{1m} = \cos[\delta(\tau_n) - \psi_1]; \quad (2)$$

$$i_n(\tau_n) = i(\tau_n) / a_{0m} = \cos[\delta(\tau_n) - \psi_0]; \quad (3)$$

$$\delta(\tau_n) = 2\pi\tau_n - C_{oc} \sin[\delta(\tau_n) + \theta], \quad (4)$$

где $\delta(\tau_n)$ – фазовая характеристика АД (ФХА); $C_{oc} = \chi_m \omega_0 \tau = 2\pi N \Gamma L_a$ – параметр внешней обратной связи автодинной системы (в некоторых работах назван параметром искажений), $i_{0m} = \Gamma K_0$; $a_{1m} = \Gamma K_a$; $\chi_m = \Gamma L_a$ – амплитудные значения соответствующих автодинных откликов; ψ_0 – угол относительного фазового смещения сигнала, регистрируемого в цепи смещения активного элемента; ψ_1 – угол относительного фазового смещения автодинных изменений амплитуды колебаний; θ – угол фазового смещения автодинных изменений частоты автоколебаний. Влияние внешних параметров на формирование автодинных характеристик при его аналитическом анализе отображается посредством обобщённого параметра внешней обратной связи C_{oc} автодинной системы. Влияние на величину данного параметра оказывают: модуль коэффициента отражения $\Gamma(t, \tau) \equiv \Gamma$; дальность до ОО, выраженная в количестве длин полуволн СВЧ-излучения N ; автодинная девиация частоты L_a . Подробнее влияние данного параметра на автодинные характеристики и формирование его величины рассмотрено в [3; 4]. В генераторах КВЧ-диапазона при перемещении отражающего объекта ярко выражено явление нелинейности ФХА, вызванное неравномерностью набега фазы, что ведёт к искажениям в других автодинных характеристиках (рис. 2, кривые 2). Подробно условия наличия и отсутствия искажений рассмотрены в [2].

В ходе исследования автодинных КВЧ-генераторов выявлено, что наиболее эффективным способом снижения величины автодинных искажений выходных сигналов является использование внешнего высокодобротного резонатора. При этом функциональная схема автодина дополняется только лишь самым высокодобротным резонатором, подключённым непосредственно к АД [5].

Степень уменьшения девиации частоты и параметра внешней обратной связи стабилизированного автодина (САД) в работе [5] предложено характеризовать коэффициентом стабилизации $S_f = \frac{L_a}{L_a^{cm}}$, который показывает во сколько раз величина автодинной девиации частоты исследуемого генератора меньше, чем у обычного АД при одном и том же уровне отражённого излучения. Величина параметра внешней обратной связи стабилизированного автодина C_{oc}^{cm} находится с известным параметром C_{oc} внешней обратной связи обычного АД в соотношении $C_{oc} / C_{oc}^{cm} = S_f$. Коэффициент S_f САД является важнейшим, поскольку он характеризует выигрыш по ряду основных параметров автодинной системы [5]. Полученные для стабилизированных автодинов выражения, описывающие автодинные характеристики, качественно совпадают с теми же выражениями для одноконтурных автодинов [5]. При этом нормированные по амплитудному значению автодинные отклики по изменениям тока смещения АЭ $i(\tau_n)$ и амплитуды колебаний $a_1(\tau_n)$ отличаются только углами относительного фазового смещения ψ_0^{ct} и ψ_1^{ct} . Поэтому в исследовании использовано понятие обобщённого отклика $a(\tau_n)$, в котором учитывается угол смещения ψ^{ct} . При этом под $a(\tau_n)$ имеется в виду $i(\tau_n)$ или $a_1(\tau_n)$. Тогда выражения для установившихся значений нормированных характеристик автодинных изменений частоты $\chi_n(\tau_n)$ и обобщённого отклика $a_n(\tau_n)$ примут вид:

$$\chi_n(\tau_n) = \chi(\tau_n) / \chi_m = -\sin[\delta(\tau_n) + \theta], \quad a_n(\tau_n) = a(\tau_n) / a_m = \cos[\delta(\tau_n) - \psi^{ct}],$$

где $\chi_m = \Gamma L_a^{ct}$ и $a_m = \Gamma K_a^{ct}$ или $a_m = \Gamma K_0^{ct}$ – максимальные относительные изменения частоты и обобщённого отклика.

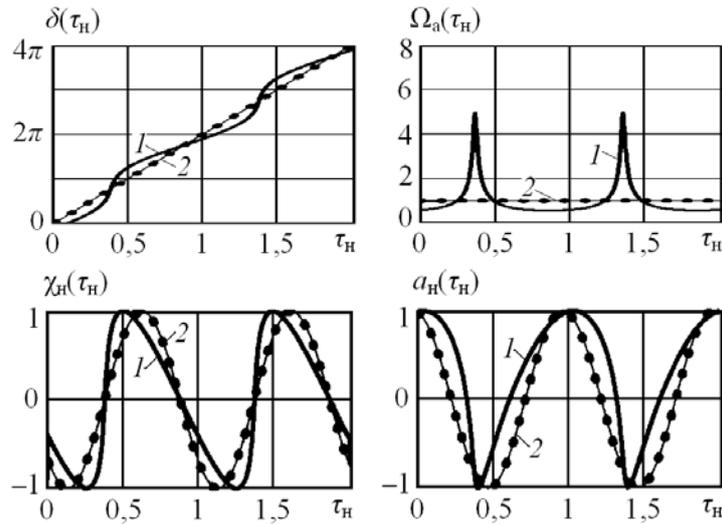


Рис. 2. ФХА $\delta(\tau_n)$ и их производные $\Omega_n(\tau_n)$, ЧХА $\chi_n(\tau_n)$ и АХА $a_n(\tau_n)$, рассчитанные для аналогичных условий функционирования и различных величин параметров искажений: $C_{oc} = 0,8$ для обычного АД (кривые 1), $C_{oc}^{ct} \ll 1$ для САД (кривые 2)

Свойственные обычным АД явления нелинейности фазовой характеристики и искажения сигналов сохраняются и у стабилизированных АД, но уровень этих искажений существенно ниже вследствие меньшего значения величины автодинной девиации частоты, что видно из сравнения кривых 1 и 2 (рис. 2).

Выражения (1) – (4) с учётом внутренних шумов генератора принимают вид:

$$\chi_n(\tau_n, t) = (\chi/\chi_m) = -\chi_{шн}(t) - \sin[\delta(\tau_n, t) + \theta]; \quad (5)$$

$$a_n(\tau_n, t) = (a/a_m) = a_{шн}(t) + \cos[\delta(\tau_n, t) - \psi_1]; \quad (6)$$

$$i_n(\tau_n, t) = (i/i_m) = i_{шн}(t) + \cos[\delta(\tau_n, t) - \psi_0]; \quad (7)$$

$$\delta(\tau_n, t) = 2\pi\tau_n - p_{ш}(t) - C_{oc}\sin[\delta(\tau_n, t) + \theta], \quad (8)$$

где $\chi_{шн}(t)$, $a_{шн}(t)$, $i_{шн}(t)$ – составляющие относительного уровня частотного и амплитудного шума.

В случае одновременного воздействия на АД отражённого излучения и собственных шумов шумовой процесс может быть описан выражениями, полученными как разности (5)–(8) и (1)–(4) [6]:

$$\chi_{шн}(\tau_n, t) = \chi_n(\tau_n, t) - \chi_n(\tau_n) = -\chi_{шн}(t) - \sin[\delta(\tau_n, t) + \theta] + \sin[\delta(\tau_n) + \theta]; \quad (9)$$

$$a_{шн}(\tau_n, t) = a_n(\tau_n, t) - a_n(\tau_n) = a_{шн}(t) + \cos[\delta(\tau_n, t) - \psi_1] - \cos[\delta(\tau_n) - \psi_1]; \quad (10)$$

$$i_{шн}(\tau_n, t) = i_n(\tau_n, t) - i_n(\tau_n) = i_{шн}(t) + \cos[\delta(\tau_n, t) - \psi_0] - \cos[\delta(\tau_n) - \psi_0]; \quad (11)$$

$$\delta_{шн}(\tau_n, t) = \delta(\tau_n, t) - \delta(\tau_n). \quad (12)$$

Для случая, когда уровень сигнала значительно превышает шум, данные выражения для малых компонентов шума можно линеаризовать [6]:

$$\delta_{\text{ш}}(\tau_{\text{н}}, t) = -\chi_{\text{шн}}(t) \frac{C_{\text{oc}}}{2\pi} \frac{d\delta(\tau_{\text{н}})}{d\tau_{\text{н}}}; \quad (13)$$

$$\chi_{\text{шн}}(\tau_{\text{н}}, t) = -\chi_{\text{шн}}(t) \left[1 + \frac{C_{\text{oc}}}{2\pi} \frac{d\delta(\tau_{\text{н}})}{d\tau_{\text{н}}} \frac{d\chi_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})}{d\tau_{\text{н}}} \right]; \quad (14)$$

$$a_{\text{шн}}(\tau_{\text{н}}, t) = a_{\text{ш}}(t) - \chi_{\text{ш}}(t) \frac{C_{\text{oc}}}{2\pi} \frac{d\delta(\tau_{\text{н}})}{d\tau_{\text{н}}} \frac{da_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})}{d\tau_{\text{н}}}; \quad (15)$$

$$i_{\text{шн}}(\tau_{\text{н}}, t) = i_{\text{ш}}(t) - \chi_{\text{ш}}(t) \frac{C_{\text{oc}}}{2\pi} \frac{d\delta(\tau_{\text{н}})}{d\tau_{\text{н}}} \frac{di_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})}{d\tau_{\text{н}}}. \quad (16)$$

Для случая отсутствия шумов, когда $p_{\text{ш}}(t) = \chi_{\text{ш}}(t) = a_{\text{ш}}(t) = i_{0\text{ш}}(t) = 0$, на рис. 3 представлены графики ФХА $\delta(\tau_{\text{н}})$, частотной (ЧХА) $\chi_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$, амплитудной (АХА) $a_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$ характеристик и характеристики автодетектирования (ХАД) $i_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$, рассчитанные при величинах $\gamma = 1$ и $\rho = -0,2$ (верхний ряд характеристик) для значений параметра обратной связи $C_{\text{oc}} = 0,8$ (кривые 1) и $C_{\text{oc}} = 0,08$ (кривые 2).

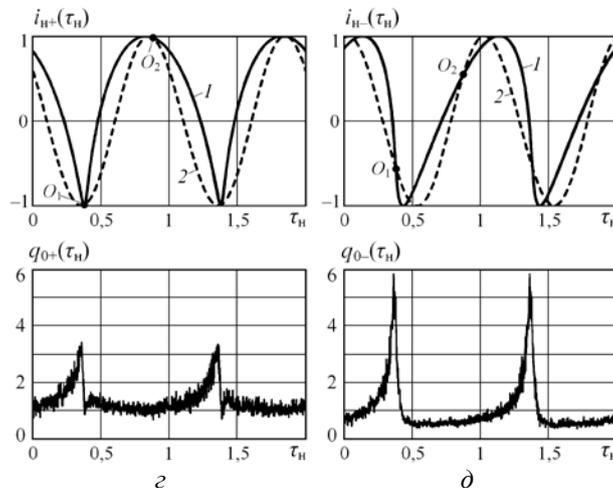
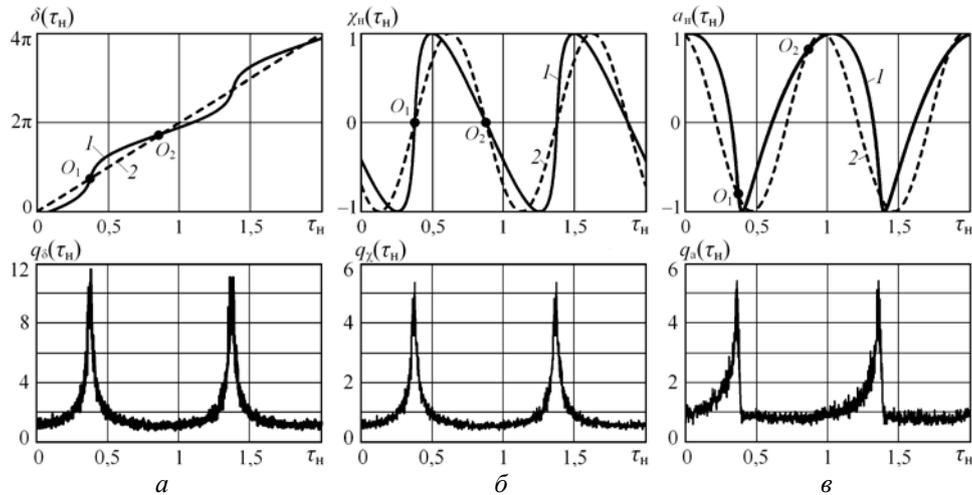


Рис. 3. ФХА (а), ЧХА (б), АХА (в), ХАД (г, д)

и соответствующие им шумовые характеристики $q_{\delta}(\tau_{\text{н}})$, $q_{\chi}(\tau_{\text{н}})$, $q_a(\tau_{\text{н}})$, $q_{0\pm}(\tau_{\text{н}})$

ХАД $i_{n\pm}(\tau_n)$ рассчитаны для различных по знаку значений коэффициента $\kappa_{\text{чд}}$: $\kappa_{\text{чд}} = 0,2$, (рис. 3, з) и $\kappa_{\text{чд}} = -0,2$ (рис. 3, д). Буквами O_1 и O_2 на ЧХА (рис. 3, б) обозначены точки пересечения оси абсцисс. На рис. 3, а; 3, в – д этими же буквами обозначены проекции этих точек на остальные характеристики.

Результаты расчётов относительных изменений среднеквадратических уровней фазового $q_\delta(\tau_n) = \frac{|\overline{\delta_{\text{ш}}(\tau_n, t)}|}{|\overline{\delta_{\text{ш}}(O_2)}|}$, частотного $q_\chi(\tau_n) = \frac{|\overline{\chi_{\text{ш}}(\tau_n, t)}|}{|\overline{\chi_{\text{ш}}(t)}|}$, амплитудного $q_a(\tau_n) = \frac{|\overline{a_{\text{ш}}(\tau_n, t)}|}{|\overline{a_{\text{ш}}(t)}|}$ шума и шума в цепи смещения $q_{i\pm}(\tau_n) = \frac{|\overline{i_{\text{ш}}(\tau_n, t)}|}{|\overline{i_{\text{ш}}(t)}|}$ АЭ в зависимости от нормированного времени τ_n до отражающей поверхности при принятых выше значениях γ , ρ , $\kappa_{\text{чд}}$ и величине параметра обратной связи $C_{\text{ос}} = 0,8$ представлены соответственно в виде графиков на рис. 3. Здесь $\delta_{\text{ш}}(O_2)$ – среднеквадратический уровень фазового шума в точке O_2 при заданной величине параметра $C_{\text{ос}}$.

При сравнении обычного и стабилизированного автодинов в условиях одинакового уровня отражённого излучения высокое значение коэффициента стабилизации частоты генератора с внешним высокочастотным резонатором обеспечивает значительное уменьшение уровня искажений сигнала и, соответственно, при высоком значении коэффициента стабилизации S_f нестационарность уровня шумов у САД может полностью отсутствовать.

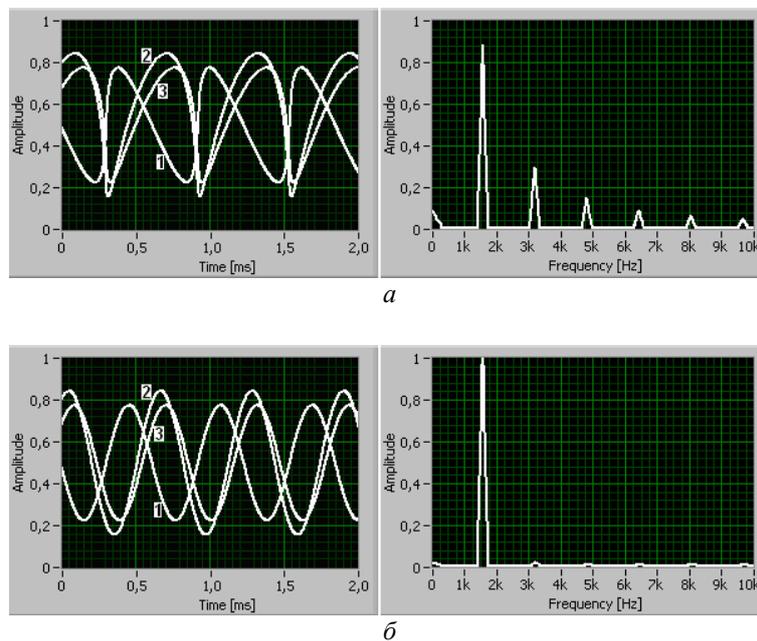


Рис. 4. Осциллограммы (слева) АД отклика по изменению частоты генерации (кривые 1), амплитуды колебаний (кривые 2), сигнала автодетектирования (кривые 3) и спектрограммы (справа) для отклика по изменению амплитуды колебаний обычного (а) и стабилизированного (б) АД, полученные от движущегося отражателя

Для подтверждения выводов теоретического анализа были проведены экспериментальные исследования с использованием автодинного генератора «Тигель-08» 8-миллиметрового диапазона длин волн на основе многомезового диода Ганна. Условия проведения эксперимента для обычного и стабилизированного автодинов были идентичны, при этом расчётные значения параметра искажений получены в первом случае

$C_{oc} \approx 0,8$ и $C_{oc}^{ct} \approx 0,014$ – во втором. Из сравнения указанных величин следует, что коэффициент стабилизации частоты исследуемого САД равен $S_f = C_{oc} / C_{oc}^{ct} \approx 60$. Это означает, что динамический диапазон САД почти на 35 дБ шире, чем у обычного модуля. Из полученных спектрограмм (рис. 4) видно, что уровень высших гармонических составляющих у САД значительно ниже, чем у обычного АД.

Полученные результаты показали преимущества автодинов со стабилизацией частоты перед обычными (нестабилизованными) автодинами по основным параметрам: увеличенный динамический диапазон, сниженная автодинная девиация частоты, суженный спектр СВЧ-излучения. Показана целесообразность разработки и производства новых типов монолитных и гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона, стабилизированных дополнительным высокодобротным резонатором. В качестве активного элемента перспективных автодинных модулей целесообразно использование не только мезозонных ганновских структур, но и полевых транзисторов, частота генерации опытных образцов которых превосходит терагерцовый рубеж.

Автор выражает признательность профессору кафедры технологии и средств связи УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина Носкову Владиславу Яковлевичу за помощь в проведении исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006

Библиографический список

1. Гершензон Е.М., Туманов Б.Н., Бузыкин В.Т., Калыгина В.М., Левит Б.И. Общие характеристики и особенности автодинного эффекта в автогенераторах // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27, № 1. С. 104-112.
2. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 2. Теоретические и экспериментальные исследования // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 7. С. 1-34.
3. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ-генераторов // Радиотехника. 2012. № 6. С. 24-43.
4. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 7. Динамика формирования автодинных и модуляционных характеристик // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 6. С. 3-52.
5. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 8. Автодины со стабилизацией частоты внешним высокодобротным резонатором // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 12. С. 3-38.
6. Носков В.Я., Игнатков К.А. Особенности шумовых характеристик автодинов при сильной внешней обратной связи // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, № 12. С. 112-124.

PECULIARITIES OF MILLIMETER RANGE AUTODYNES

© 2016

K. A. Ignatkov Candidate of Science, senior engineer, Department of Communications Facilities and Technologies (CET), Institute of Radioelectronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, k.a.ignatkov@gmail.com

A functional diagram and an equivalent circuit diagram of an autodyne oscillator are presented in the paper. Features of the formation of autodyne and noise characteristics are discussed taking into account the nonlinearity of autodyne phase characteristics. Analytical expressions for the noise process are given for the case of simultaneous influence of the autodyne's reflected self-radiation and self-noise on the autodyne. The positive influence of the use of an external high-Q resonator on the formation of low-frequency data signals is shown. It consists in the increase of the dynamic range, reduction of autodyne frequency deviation, narrowing of microwave radiation spectrum. The results of experimental research of conventional autodynes and those stabilized by an external high-Q resonator are presented in the paper.

Autodyne; frequency stabilization; external high-Q resonator; ratio of external feedback; stabilization coefficient.

Citation: Ignatkov K.A. Peculiarities of millimeter range autodynes. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 189-196. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-189-196

References

1. Gershenzon E.M., Tumanov B.N., Buzykin V.T., Kalygina V.M., Levit B.I. General characteristics and peculiarities of the autodyne effect in self oscillators // *Radiotekhnika i elektronika*. 1982. V. 27, no. 1. P. 104-112. (In Russ.)
2. Votiropin S.D., Noskov V.Ya., Smohkiy S.M. Modern Ilybrid-Integreted Autodyne Oscillators of Microvave and Millimeter Ranges and Their Application. Part 2. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2007. No. 7. P. 1-34. (In Russ.)
3. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Smolskiy S.M. Autodyne Characteristic Dependence on the UHF Oscillators Inherent Parameters. *Radiotekhnika*. 2012. No. 6. P. 24-43. (In Russ.)
4. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Smolskiy S.M. Modern hybrid-integrated autodyne oscillators of microwave and millimeter-wave ranges and their application. Part 7. Dynamics of formation of autodyne and modulation characteristics. *Uspekhi sovremennoi radioelektro-niki*. 2013. No. 6. P. 3-52. (In Russ.)
5. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Smolskiy S.M. Modern hybrid-integrated autodyne oscillators of microwave and millimeter-wave ranges and their applications. Part 8. Autodynes with frequency stabilization by means of the external high-Q resonator. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2013. No. 12. P. 3-38. (In Russ.)
6. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A. Peculiarities of Noise Characteristics of Autodynes Under Strong External Feedback. *Russian Physics Journal*. 2014. V. 56, Iss. 12. P. 1445-1460. DOI: 10.1007/s11182-014-0198-6