

17. *Ignat'ev V.K., Nikitin A.V., Yushanov S.V.* Izmerenie fazovogo sdviga kvazigarmonicheskikh signalov [Measuring phase shift of quasi-harmonic signals], *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye: novye vychislitel'nye tekhnologii* [Numerical methods and programming: new computing technology], 2013, Vol. 14, No. 1, pp. 424-431.
18. *Kelekhsaev B.G.* Sposob opredeleniya kvadraturnykh fazovykh sdvigov sinusoidal'nykh signalov [The method of determining the quadrature phase shifts of the sinusoidal signals]. The application for the invention № RU 93039909. 10.06.1996.
19. *Kalotay P.Z.* Ustroystvo i sposob obrabotki signala dlya opredeleniya fazovogo sdviga [The apparatus and method of signal processing to determine the phase shift], Patent for the invention No. RU 2159410C2. 20.11.2000, Bull. No. 32.
20. *Pomazanov A.V.* Akustoopticheskiy izmeritel' parametrov radiosignalov s adaptivnym upravleniem [Acoustooptic measurer of radioparameters with adaptive control], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 4 (129), pp. 80-83.
21. *Shibaev S.S., Pomazanov A.V., Rozdobud'ko V.V.* Akustoopticheskie izmeriteli parametrov radiosignalov: monografiya [Acousto-optical measuring parameters of radio signals: monograph]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2014, 233 p.
22. *Volik D.P., Shibaev S.S., Pomazanov A.V.* Printsipy postroeniya i realizatsiya akustoopticheskikh izmeriteley parametrov radiosignalov [Radiosignals parameters acoustooptic measurers implementation principles], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 175-182.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент Д.А. Беспалов.

Помазанов Александр Васильевич – Южный федеральный университет; e-mail: pav_tsure@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634361573; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; доцент; к.т.н.

Шибяев Станислав Сергеевич – e-mail: sheab@list.ru; лаборатория нанофотоники и оптоэлектроники; с.н.с.; к.т.н.

Волик Денис Петрович – e-mail: DVLbest@mail.ru; кафедра радиотехнической электроники; ассистент.

Pomazanov Alexander Vasilievich – Southern Federal University; e-mail: pav_tsure@mail.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634361573; the department of telecommunication systems information security; associate professor; cand. of eng. sc.

Shibaev Stanislaw Sergeyevich – e-mail: sheab@list.ru; laboratory of nanophotonics and optoelectronics; senior scientist; cand. of eng. sc.

Volik Denis Petrovich – e-mail: DVLbest@mail.ru; the department of radioengineering electronics; assistant.

УДК 621.373.9

DOI 10.18522/2311-3103-2016-9-102113

Ю.В. Зачиняев

ТРЕБОВАНИЯ К ФОРМЕ ВХОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЧМ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ ФАЗОВОЙ САМОМОДУЛЯЦИИ*

Исследования посвящены одному из подходов к решению проблемы увеличения девиации частоты радиосигналов с линейной частотной модуляцией. Целью исследования является выбор оптимальной формы входного оптического импульса для обеспечения режима работы формирователя сигналов с линейной частотной модуляцией на основе явления фазовой самомодуляции, позволяющего достичь высоких значений девиации частоты сигнала

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-37-00015 мол_а.

при высокой линейности частотной зависимости. В работе проанализирована структура устройства, реализующего формирование сигналов с линейной частотной модуляцией на основе явления фазовой самомодуляции с использованием волоконно-оптических элементов. Исследовано влияние формы входного оптического импульса передающего оптического модуля на девиацию частоты формируемых сигналов и линейность частотной зависимости. Установлена связь между девиацией частоты формируемых сигналов и линейностью частотной зависимости для трех вариантов реализации формы импульса. Показано, что по причине нелинейной частотной зависимости выходного сигнала при использовании супергауссовских импульсов и невысоких значений девиации частоты при использовании колоколообразных импульсов целесообразно применение именно гауссовских импульсов в качестве входного сигнала, обеспечивающих высокие значения девиации частоты при достаточном уровне линейности частотной зависимости. Выявлено, что линейность частотной зависимости выходного сигнала, оцениваемая по критерию минимума коэффициента нелинейности, напрямую зависит от ширины гауссовского импульса, возрастающая с ее увеличением. Установлено, что выбор оптимальной ширины гауссовского импульса определяется требованиями к формирователю в зависимости от сферы назначения. При необходимости достижения высоких значений девиации частоты и отсутствии ограничений по степени линейности закона изменения частоты целесообразным видится уменьшение постоянной времени гауссовского импульса. Результаты исследований связаны с развитием теории радиотехнических процессоров на основе волоконно-оптических структур и могут найти применение в радиолокации, защищенной связи, геолокации и радиотомографии.

Линейно-частотно-модулированные сигналы; эффект фазовой самомодуляции; формирование сверхширокополосных сигналов; девиация частоты; оптическое волокно; передающий оптический модуль.

Yu.V. Zachinyaev

THE REQUIREMENTS TO THE INPUT OPTICAL PULSE SHAPE FOR A CHIRP SIGNAL GENERATION ON THE BASIS OF SELF-PHASE MODULATION

The research is dedicated to one of the approaches in solving the problem of increasing the frequency deviation of the linear frequency modulation signals (LFM). The aim of the research is to obtain the optimal shape of the input optical pulse for the proper functioning of the self-phase modulation based chirp generator which allows achieving high values of the signal frequency deviation along with the high linearity of frequency dependence. The paper analyzes the structure of the device realizing the formation of signals with linear frequency of modulation based on self-phase modulation effect using the optical fiber element. The influence of the input optical pulse shape of transmitting optical module on the deviation of formed signals frequency and the linearity of frequency dependence has been studied. The relationship between the frequency deviation of the generated signal and frequency linearity for the three options for implementation of the pulse shape has also been estimated. It has been shown that because of the output signal nonlinear dependence of the frequency in case of super gaussian pulses and low frequency deviation values when using a bell-shaped pulses it is appropriate to use gaussian pulse as the input signal providing large frequency deviation at proper level of linearity of frequency dependency. It was revealed that the linearity of the output frequency dependence, estimated by the criterion of minimum non-linearity coefficient, depends on the width of the Gaussian pulse, and increases with its growth. It has been found that the choice of the optimum Gaussian pulse width is determined according to the area assignment. If the high values of the frequency deviation are required without restrictions on the linearity of the frequency sweep law it seems appropriate to decrease the time constant of a Gaussian pulse. The results of research are related to the development of the theory of radio processors based on fiber-optic structures and can be used in radars, secure communications, geolocation and tomography.

Linear frequency-modulated signals; effect of self-phase modulation; frequency deviation; pulse shape; optical fiber; optical transmitter module.

Введение. В последние годы расширяется применение радиосигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналов). Помимо радиолокации сигналы с внутриимпульсной ЛЧМ используются также в защищенных системах связи [1, 2], системах наблюдения в плотных средах [3], гидролокации [4]. Перспективными направлениями применения ЛЧМ-сигналов становятся радиотомография и исследование внутренней структуры объектов [5]. Генераторы сигналов с ЛЧМ рассматриваются в качестве основы для построения медицинских устройств, в частности приборов для проведения ультразвуковых исследований [6].

Обзор периодической печати показывает актуальность использования данного класса сложных сигналов и для управления доступом, например, для частотной идентификации [7]. Использование сигналов с ЛЧМ позволяет существенно увеличить дальность действия систем RFID (*Radio Frequency Identification*) при неизменной пиковой мощности передатчика по сравнению с традиционными видами сигналов.

В связи с постоянно возрастающими требованиями к скорости и качеству передачи информации в радиотехнических системах актуальна проблема совершенствования аппаратуры связи, в том числе аппаратуры формирования ЛЧМ-сигналов.

Одним из направлений совершенствования аппаратуры является увеличение девиации частоты формируемого сигнала, поскольку последняя определяет разрешающую способность по дальности, а также энергетическую эффективность радиотехнических систем. Увеличение девиации частоты позволяет при неизменной мощности передатчика повысить дальность обнаружения объектов.

В защищенных системах связи увеличение девиации частоты помимо энергетического выигрыша обеспечивает повышение защищенности телекоммуникационной системы.

Проведенные в [8, 9] анализ и классификация существующих подходов к формированию сверхширокополосных ЛЧМ-сигналов показывают, что предельным для современных методов обработки радиосигналов является значение девиации частоты формируемого сигнала порядка единиц гигагерц (до 10 ГГц).

Одним из путей решения задачи улучшения параметров радиотехнических систем и расширения сфер их применения является использование волоконно-оптической элементной базы для высокоскоростного формирования и обработки широкополосных радиосигналов. Целесообразность такого решения обусловлена свойствами оптических волокон (ОВ): предельно низкими потерями мощности световых сигналов, широкой погонной полосой пропускания (свыше 300 ТГц·км), полной электромагнитной совместимостью с любым электро- и радиооборудованием и идеальной гальванической развязкой от него, а также высокой помехозащищенностью и скрытностью передачи световых сигналов, малыми массогабаритными показателями и топологической гибкостью.

В [10–13] показано, что на основе ОВ возможно построение таких устройств, как гребенчатые фильтры, динамические запоминающие устройства, формователи сложных сигналов.

В качестве альтернативного подхода к формированию ЛЧМ-сигналов на основе волоконно-оптической элементной базы в [14] предложен метод, основанный на фазовой самомодуляции – явлении нелинейной оптики, которое определяется зависимостью показателя преломления в ОВ от интенсивности оптического сигнала при распространении импульса света по волокну. Из-за нелинейности показателя преломления различные участки импульса испытывают разный дополнительный фазовый набег, что приводит к частотной модуляции и уширению спектра импульса [18, 20].

Целью исследований является анализ одного из подходов к решению проблемы увеличения девиации частоты сигналов с линейной частотной модуляцией путем уточнения требований к передающему оптическому формирователю ЛЧМ-радиосигналов на основе явления фазовой самомодуляции, позволяющего увеличить рабочие значения девиации частоты формируемых сигналов.

Структура формирователя ЛЧМ-сигналов. Структура формирователя, реализующая предложенный в [14] метод на основе фазовой самомодуляции, приведена на рис. 1. Устройство включает блок управления (БУ), передающий оптический модуль (ПОМ), волоконно-оптическую линию задержки (ВОЛЗ) длиной $L_{ВОЛЗ}$, оптический attenuator (ОА), приемный оптический модуль (ПРОМ), блок формирования задающих импульсов (БФЗИ), смеситель (См) с двумя входами, генератор, управляемый напряжением (ГУН), полосовой фильтр (ПФ) и электронный усилитель (ЭУ).

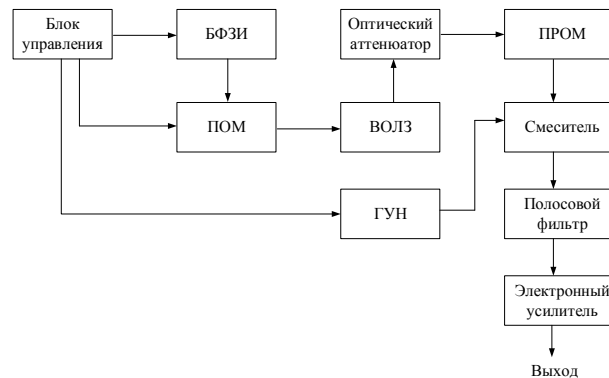


Рис. 1. Структурная схема формирователя ЛЧМ-сигналов

Под воздействием явления фазовой самомодуляции входной оптический импульс, формируемый передающим оптическим модулем (ПОМ) в волоконно-оптической линии задержки (ВОЛЗ), преобразуется в радиоимпульс с линейной частотной модуляцией.

Для обеспечения линейного изменения частоты результирующего сигнала входной оптический сигнал должен иметь вид гауссовского импульса [15]. Для этого в структуре формирователя предусмотрены блок управления и блок формирования задающих импульсов (БФЗИ), модулирующие ПОМ.

Для корректного детектирования мощного оптического импульса высокой мощности в приемном оптическом модуле (ПРОМ) предусмотрен оптический attenuator. Генератор, управляемый напряжением, смеситель и полосовой фильтр служат для преобразования частоты радиосигнала с выхода ПРОМ.

Результаты имитационного моделирования структуры [14] позволили заключить, что характеристики выходного ЛЧМ-сигнала находятся в функциональной связи с основными параметрами ВОЛЗ: длиной ОБ, мощностью входного оптического импульса, дисперсионными параметрами ОБ, погонным затуханием ОБ, а также формой и мощностью входного сигнала ПОМ. Показано, что варьированием значений этих параметров, можно добиться требуемых параметров формируемых сигналов.

Таким образом, можно сделать вывод, что ПОМ является одним из ключевых узлов исследуемого формирователя. Последнее определяет актуальность оценки влияния параметров ПОМ на свойства формируемого ЛЧМ-сигнала.

Анализ использования гауссовских импульсов в качестве входных сигналов формирователя. Ранее в [14–16] также произведен анализ зависимости девиации частоты формируемого сигнала от мощности импульса ПОМ. Поэтому в статье основное внимание уделено оценке влияния формы входного оптического сигнала на свойства формирователя на основе фазовой самомодуляции.

Частной задачей исследования является анализ влияния формы входного оптического импульса на параметры формируемого сигнала.

Как показано в [1], линейная частотная зависимость выходного ЛЧМ-сигнала обеспечивается при гауссовской форме входного импульса

$$U(t) = \exp\left(-0.5\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right). \quad (1)$$

Постоянная времени τ определяет ширину гауссовского импульса по уровню минус 3 дБ. Проведем анализ зависимости девиации частоты ЛЧМ-сигнала и линейности закона модуляции от параметра τ . Для большей общности результатов представим τ как произведение длительности формируемого ЛЧМ-сигнала T_c и коэффициента пропорциональности k : $\tau = k \cdot T_c$. Тогда

$$U(t) = \exp\left(-0.5\left(\frac{t}{k \cdot T_c}\right)^2\right). \quad (2)$$

Согласно [14] частотную зависимость ЧМ-сигнала на выходе ВОЛЗ можно описать производной

$$f(t) = \frac{d}{dt} \left[|U(t)|^2 \cdot \frac{c \cdot S_e \cdot (1 - \exp(-\alpha_f L))}{\alpha_f \cdot E_0 \cdot n_2 \cdot \omega_0} \right], \quad (3)$$

где c – скорость света в вакууме, м/с; S_e – эффективная площадь моды ОВ, м²; α_f – коэффициент затухания ОВ, м⁻¹; L – длина ВОЛЗ, км; E_0 – энергия входного оптического импульса, нДж; n_2 – нелинейный коэффициент преломления; ω_0 – круговая частота оптического излучения, рад/с.

Осуществив дифференцирование, находим

$$f(t) = |U(t)|^2 \cdot \frac{2}{k^2 \cdot T_c} \cdot \left(\frac{t}{T_c}\right) \cdot \frac{c \cdot S_e \cdot (1 - \exp(-\alpha_f L))}{\alpha_f \cdot E_0 \cdot n_2 \cdot \omega_0}. \quad (4)$$

Рис. 2 иллюстрирует закон изменения частоты ЛЧМ-сигнала для различных значений k при следующих параметрах формирователя: $T_c = 10$ нс; $L = 10$ км; $S_e = 5 \cdot 10^{-11}$ м², $n_2 = 2 \cdot 10^{-20}$, $\lambda = 1550$ нм, $\alpha_f = 5 \cdot 10^{-6}$ м⁻¹ (соответствует значению погонного затухания 0,2 дБ/км), $E_0 = 300$ нДж (эти значения параметров будут использованы и в последующих расчетах).

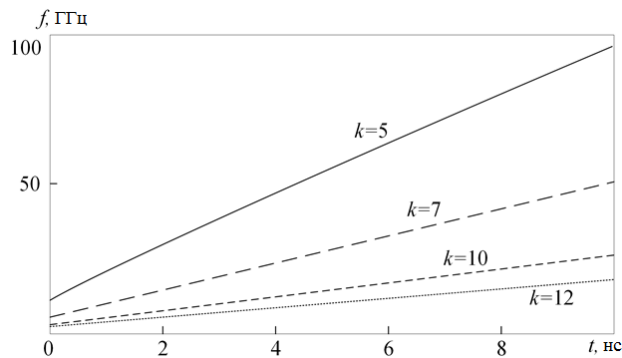


Рис. 2. Временная зависимость частотной характеристики формируемого ЛЧМ-сигнала

Как видно из рис. 2, рост отношения постоянной времени τ к длительности T_c приводит к уменьшению девиации частоты результирующего сигнала, при этом с увеличением k изменение частоты происходит менее значительно. Так, рост постоянной времени с 50 до 70 нс при длительности ЛЧМ-сигнала $T_c = 10$ нс обеспечивает увеличение значения верхней частоты ЛЧМ-сигнала в 1,9 раза. В то же время увеличение постоянной времени с 100 до 120 нс для ЛЧМ-сигнала длительностью $T_c = 10$ нс приводит к росту значения верхней частоты ЛЧМ-сигнала в 1,9 раза.

Более четко зависимость девиации частоты от отношения постоянной времени τ к длительности T_c иллюстрирует график на рисунке 3. Зависимость носит нелинейный характер с локальным максимумом при $k \approx 1$. Данный локальный пик можно объяснить тем, что здесь постоянная времени равна длительности формируемого сигнала. В данном случае огибающая ЛЧМ-сигнала имеет форму гауссовского импульса, что и обуславливает скачок девиации частоты.

Последующий рост отношения постоянной времени τ к длительности T_c приводит к уменьшению девиации частоты.

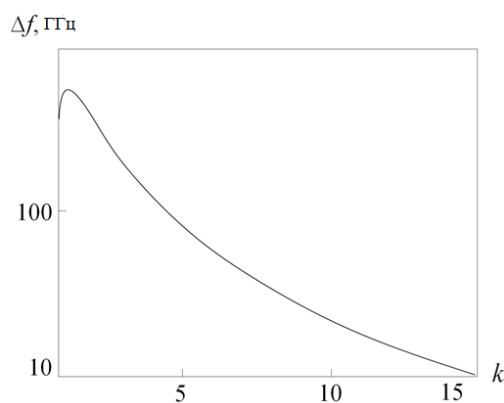


Рис. 3. Зависимости девиации частоты ЛЧМ-сигнала от отношения постоянной времени τ к длительности T_c

Важнейшим параметром формирователя является девиация частоты. Согласно [19] «мерой нелинейности монотонной модуляционной характеристики может служить коэффициент нелинейности, равный перепаду крутизны модуляционной характеристики». Это позволяет использовать для оценки частотной зависимости формируемого ЧМ-сигнала параметр

$$k_{nS} = (R_{\max} - R_{\min}) / R_{\max}, \quad (5)$$

где R_{\max} и R_{\min} – соответственно минимальное и максимальное значение крутизны частотной характеристики ЛЧМ-сигнала.

Формула для расчета крутизны частотной характеристики может быть получена дифференцированием выражения (4). Откуда

$$R(t) = \frac{2 \cdot |U(t)|^2}{k^2 T_c^2} \cdot \frac{c \cdot S_c \cdot (1 - \exp(-\alpha_f L))}{\alpha_f \cdot E_0 \cdot n_2 \cdot \omega_0} \cdot \left(1 - \frac{2}{k^2} \cdot \left(\frac{t}{T_c} \right)^2 \right). \quad (6)$$

На рис. 4 приведен график временной зависимости крутизны $R(t)$ для четырех различных значений отношения постоянной времени τ к длительности T_c . Видно, что с ростом отношения постоянной времени τ к длительности T_c функция $R(t)$ становится более линейной. Так, для $k = 5; 7; 10; 12$ получены значения коэффициента нелинейности k_{nS} соответственно 0,14; 0,095; 0,071; 0,064.

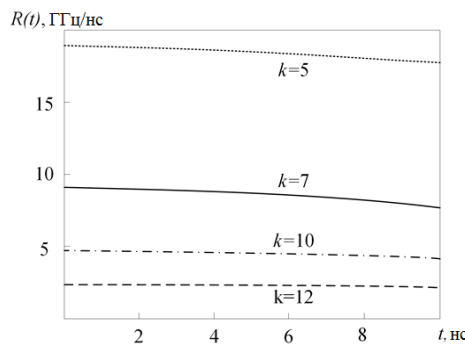


Рис. 4. Временная зависимость крутизны частотной характеристики ЛЧМ-сигнала

Нелинейный характер подтверждается графиком зависимости k_{nS} от отношения постоянной времени τ к длительности T_c на рис. 5. Зависимость коэффициента нелинейности k_{nS} от отношения постоянной времени τ к длительности T_c носит нелинейный характер. Так, увеличение отношения постоянной времени τ к длительности T_c с 1 до 6 позволяет в 14,6 раза повысить линейность частотной зависимости ЛЧМ-сигнала, а с 6 до 12 – всего в 4,7 раза. Для получения линейной частотной зависимости необходимо повышать отношение постоянной времени τ к длительности T_c . При этом повышение целесообразно до значений отношения $k = 9$, после которых k_{nS} изменяется незначительно.

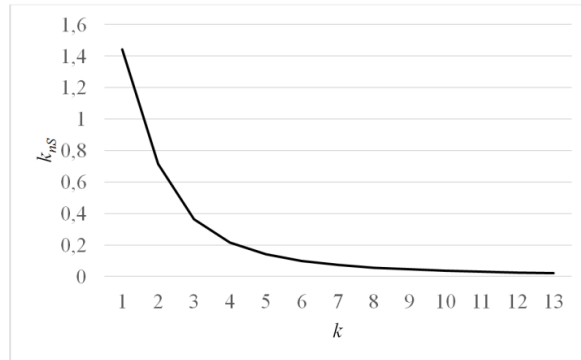


Рис. 5. Зависимость коэффициента нелинейности k_{ns} от отношения постоянной времени τ к длительности T_c

В то же время, как показано выше, увеличение отношения постоянной времени τ к длительности T_c приводит к уменьшению девиации частоты выходного сигнала при прочих равных условиях. Так, максимальная девиация частоты достигается при $k = 1$. При этом значении коэффициент нелинейности k_{ns} приближается к 1,5, что может быть неприемлемым для определенных сфер применения.

Таким образом, при выборе значения отношения постоянной времени τ к длительности T_c следует учитывать требования к линейности частотной зависимости и значению девиации частоты, предъявляемые к проектируемому формирователю.

Анализ использования супергауссовских и колоколообразных импульсов в качестве входных сигналов формирователя. Использование супергауссовских импульсов (3 степени и выше) нецелесообразно по причине нелинейной частотной зависимости формируемых сигналов. На рисунке 6 изображена частотная зависимость ЧМ сигналов на выходе ВОЛЗ при

$$U(t) = \exp\left(-0.5\left(\frac{t}{k \cdot T_c}\right)^{s_g}\right) \quad (7)$$

для четырех значений s_g (2; 3; 4 и 5).

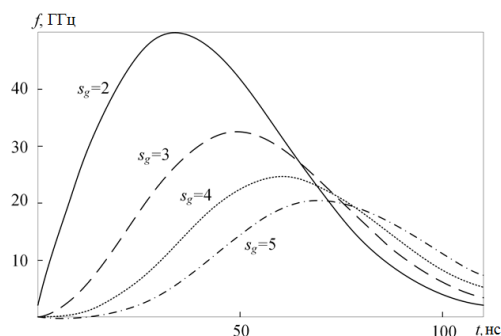


Рис. 6. Частотная характеристика сигналов на выходе ВОЛЗ при различных формах входных супергауссовских импульсов

Как видно из рисунка 6, при $S_g > 2$ частотная характеристика не имеет выделенных линейных участков, причем девиация частоты снижается с ростом S_g .

Кроме того, с ростом S_g для получения сигнала с заданной девиацией частоты требуется большая длительность сигналов, что ограничивает скорость изменения частоты формируемых ЛЧМ-сигналов.

Нелинейность частотной зависимости свергауссовских импульсов и сдвиг по времени связаны с тем, что при увеличении S_g начальный импульс приближается к прямоугольной форме, увеличивая крутизну переднего и заднего фронтов, в то время как частотная модуляция появляется только на склонах импульса.

Можно заключить, что супергауссовские импульсы не пригодны для формирования сигналов с линейной частотной модуляцией с низкими значениями коэффициента нелинейности частотной зависимости.

Колоколообразные импульсы, описываемые формулой

$$U(t) = \left[1 + \left(\frac{t}{k \cdot T_c} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (8)$$

хоть и обеспечивают линейность частотной зависимости формируемых сигналов, но не позволяют получить высокие значения девиации частоты (рис. 7). Девиация частоты сигналов, полученных на основе колоколообразного импульса (8), не превышает 1 кГц при длительности формируемого сигнала $T_c = 10$ нс и указанных выше параметрах ВОЛЗ.

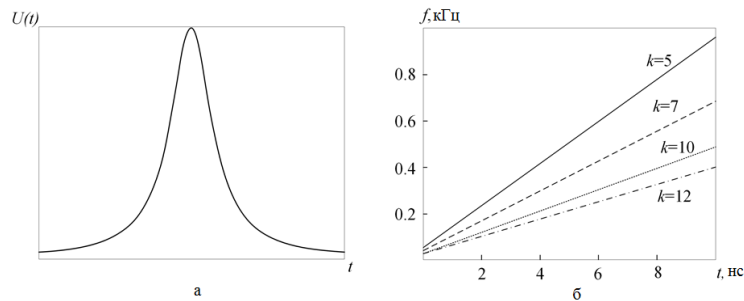


Рис. 7. Форма колоколообразного импульса (а) и зависимость частотных характеристик выходного сигнала от значения коэффициента k (б)

Таким образом, можно сделать вывод, что для использования в формирователе ЛЧМ-сигналов в качестве входных оптических сигналов пригодны только гауссовские импульсы, описываемые формулой (1), обеспечивающие высокие значения девиации частоты при достаточном уровне линейности частотной зависимости.

Заключение. Исследованы вопросы, связанные с генерацией входного оптического импульса оптимальной формы для обеспечения высокой линейности частотной зависимости и девиации частоты ЛЧМ-сигналов формирователя на основе явления фазовой самомодуляции.

Анализ метода формирования ЛЧМ-сигналов на основе явления фазовой самомодуляции и реализующей его структурной схемы на волоконно-оптических структурах позволяет заключить о необходимости оценки влияния параметров передающего оптического модуля на свойства формируемых сигналов.

Исследовано влияние формы входного оптического импульса ПОМ на девиацию частоты формируемых сигналов и линейность частотной зависимости.

Показано, что по причине нелинейной частотной зависимости выходного сигнала при использовании супергауссовских импульсов и невысоких значений девиации частоты при использовании колоколообразных импульсов целесообразно применение именно гауссовских импульсов в качестве входного сигнала.

Выявлено, что линейность частотной зависимости выходного сигнала, оцениваемая по критерию минимума коэффициента нелинейности k_{nS} , напрямую зависит от ширины гауссовского импульса, возрастая с увеличением ширины.

Отмечено, что увеличение ширины гауссовского импульса приводит к уменьшению девиации частоты выходного сигнала при прочих равных условиях.

Сделано заключение о том, что выбор оптимальной ширины гауссовского импульса определяется требованиями к формирователю в зависимости от сферы назначения – при необходимости достижения высоких значений девиации частоты и отсутствии ограничений по линейности закона изменения ЧМ целесообразным видится уменьшение постоянной времени гауссовского импульса.

Результаты исследований связаны с развитием теории радиотехнических процессоров на основе волоконно-оптических структур и могут найти применение в радиолокации, защищенной связи, геолокации и радиотомографии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Springer A., Gugler W.* Spread Spectrum Communications Using Chirp Signals // EUROCOMM. – 2000. – P. 166-170.
2. *Дятлов А.П., Дятлов П.А.* Адаптивный автокорреляционный обнаружитель связанных ЛЧМ-сигналов // Специальная техника. – 2009. – № 6. – С. 34-43.
3. *Ehrenberg J., Torkelson T.* FM slide (chirp) signals: a technique for significantly improving the signal-to-noise performance in hydro acoustic assessment systems // Elsevier Fisheries Research. – 2000. – № 47. – P. 56-67.
4. *Tomizawa Y.A.* Novel Subsurface Radar Using a Short Chirp Signal to Expand the Detection Range // IEICE Trans Commun. – 2000. – № 10. – P. 2427-2434.
5. *Суханов Д.Я., Якубов В.П.* Применение сигналов с линейной частотной модуляцией в трехмерной радиотомографии // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, № 4. – С. 115-119.
6. *Gran F., Jensen J.* Designing non-linear frequency modulated signals for medical ultrasound imaging // 2006 IEEE Ultrasonics Symposium. – 2006. – P. 1714-1717.
7. *Гусаров А.А.* Современные системы радиочастотной идентификации и регистрации объектов // Рынок микроэлектроники. – 2004. – № 2. – URL: http://www.compitech.ru/html/cgi/arhiv/01_04/stat_42.htm (дата обращения: 05.09.2015).
8. *Зачиняев Ю.В.* Анализ и классификация формирователей линейно-частотно-модулированных радиосигналов с точки зрения уменьшения длительности формируемых сигналов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – URL: <http://www.science-education.ru/105-7173> (дата обращения: 05.09.2015).
9. *Зачиняев Ю.В., Румянцев К.Е.* Радиотехнические процессоры на волоконно-оптических структурах. Формирователи ЛЧМ-сигналов: монография. – Саарбрюккен: Изд-во LAP Publishing, 2014. – 177 с.
10. *Кужуяшин А.В.* Исследование и разработка динамических запоминающих устройств на основе волоконно-оптической элементной базы: дис. ... канд. техн. наук. – Таганрог: ТРТУ, 1999. – 160 с.
11. *Зачиняев Ю.В., Румянцев К.Е., Кужуяшин А.В.* Формирование наносекундных ЛЧМ-радиосигналов на волоконно-оптических структурах // Электротехнические и информационные системы и комплексы. – 2011. – Т. 7, № 3. – С. 32-38.
12. *Горбунов А.В., Румянцев К.Е.* Динамические запоминающие устройства на основе бинарных волоконно-оптических структур // Радиотехника. – 2002. – № 12. – С. 73.

13. Горбунов А.В., Румянцев К.Е. Моделирование процесса формирования копий в динамическом запоминающем устройстве с бинарной волоконно-оптической структурой // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2006. – № 2. – С. 36-41.
14. Зачиняев Ю.В., Румянцев К.Е. Формирование радиосигналов с линейной частотной модуляцией с использованием фазовой самомодуляции // Технические и естественные науки: теория и практика: сборник материалов международных научных симпозиумов. Россия, г. Москва, 27-28 марта 2015 г. – Киров: МЦНИИ, 2015. – С. 47-59.
15. Zachinyaev Yuriy, Rumyantsev Konstantin. Self-phase modulation based chirp generator // Proceedings of the 2016 IEEE Radar Conference. – 2016. – DOI: 10.1109/RADAR.2016.7485278.
16. Зачиняев Ю.В. Формирование радиосигналов с линейной частотной модуляцией на основе явления фазовой самомодуляции // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 8 (169). – С. 77-85.
17. Зачиняев Ю.В., Пливак С.А., Шумилин А.С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией на основе явления фазовой самомодуляции // Сборник трудов V Международной конференции по фотонике и информационной оптике. – 2016. – С. 345-346.
18. Агравал Г.П. Нелинейная волоконная оптика: пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
19. Кочемасов В.Н., Белов Л.А., Оконеишиков В.С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. – М.: Радио и связь, 1983. – 192 с.
20. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Изд-во «Syrgus System», 1999. – 673 с.

REFERENCES

1. Springer A., Gugler W. Spread Spectrum Communications Using Chirp Signals, *EUROCOMM*, 2000, pp. 166-170.
2. Dyatlov A.P., Dyatlov P.A. Adaptivnyy avtokorrelyatsionnyy obnaruzhitel' svyaznykh LChM-signalov [Adaptive autocorrelation detector coherent chirp signals], *Spetsial'naya tekhnika* [Special Technique], 2009, No. 6, pp. 34-43.
3. Ehrenberg J., Torkelson T. FM slide (chirp) signals: a technique for significantly improving the signal-to-noise performance in hydro acoustic assessment systems, *Elsevier Fisheries Research*, 2000, No. 47, pp. 56-67.
4. Tomizawa Y.A. Novel Subsurface Radar Using a Short Chirp Signal to Expand the Detection Range, *IEICE Trans Commun.*, 2000, No. 10, pp. 2427-2434.
5. Sukhanov D.Ya., Yakubov V.P. Primenenie signalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey v trekhmernoy radiotomografii [The use of signals with linear frequency modulation in a three-dimensional radiotomography], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Applied Physics], 2010, Vol. 80, No. 4, pp. 115-119.
6. Gran F., Jensen J. Designing non-linear frequency modulated signals for medical ultrasound imaging, *2006 IEEE Ultrasonics Symposium*, 2006, pp. 1714-1717.
7. Gusev A.A. Sovremennyye sistemy radiochastotnoy identifikatsii i registratsii ob"ektov [Modern systems, radio frequency identification and registration of objects], *Rynok mikroelektroniki* [Microelectronics Market], 2004, No. 2. Available at: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/01_04/stat_42.htm (accessed 05 September 2015).
8. Zachinyaev Yu.V. Analiz i klassifikatsiya formirovateley lineynoy-chastotno-modulirovannykh radiosignalov s tochki zreniya umen'sheniya dlitel'nosti formiruemykh signalov [Analysis and classification of generators linear-frequency-modulated radio signals in terms of reducing the duration of the generated signals], *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2012, No. 5. Available at: <http://www.science-education.ru/105-7173> (accessed 05 September 2015).
9. Zachinyaev Yu.V., Rumyantsev K.E. Radiotekhnicheskie protsessory na volokonno-opticheskikh strukturakh. Formirovateli LChM-signalov: monografiya [Electronic processors for fiber-optic structures. Shapers chirp signals: monograph]. Saarbrücken: Izd-vo LAP Publishing, 2014, 177 p.
10. Kukuyashnyy A.V. Issledovanie i razrabotka dinamicheskikh zapominayushchikh ustroystv na osnove volokonno-opticheskoy elementnoy bazy. Dis. kand. tekhn. nauk [The research and development of dynamic memory devices based on fiber-optic element base. Dr. of eng. sc. diss.]. Taganrog: TRTU, 1999, 160 p.

11. *Zachinyaev Yu.V., Rumyantsev K.E., Kukuyashnyy A.V.* Formirovanie nanosekundnykh LChM-radiosignalov na volokonno-opticheskikh strukturakh [The formation of the nanosecond chirp radio signals on fiber-optic structures], *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical and information complexes and systems], 2011, Vol. 7, No. 3, pp. 32-38.
12. *Gorbunov A.V., Rumyantsev K.E.* Dinamicheskie zapominayushchie ustroystva na osnove binarnykh volokonno-opticheskikh struktur [Dynamic memory devices based on binary fiber-optic structures], *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2002, No. 12, pp. 73.
13. *Gorbunov A.V., Rumyantsev K.E.* Modelirovanie protsessa formirovaniya kopiy v dinamicheskom zapominayushchem ustroystve s binarnoy volokonno-opticheskoy strukturoy [Modeling of process of formation of copies in a dynamic storage device with a binary fiber-optic structure], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Proceedings of the Russian Universities: Radioelectronics], 2006, No. 2, pp. 36-41.
14. *Zachinyaev Yu.V., Rumyantsev K.E.* Formirovanie radiosignalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey s ispol'zovaniem fazovoy samomodulyatsii [The formation of radio signals with linear frequency modulation with the use of phase self-modulation], *Tekhnicheskie i estestvennyye nauki: teoriya i praktika: sbornik materialov mezhdunarodnykh nauchnykh e-simpoziumov. Rossiya, g. Moskva, 27-28 marta 2015 g.* [Technical and natural Sciences: theory and practice: materials of the international scientific e-symposia. Russia, Moscow, 27-28 March 2015]. Kirov: MTsNIP, 2015, pp. 47-59.
15. *Zachinyaev Yuriy, Rumyantsev Konstantin.* Self-phase modulation based chirp generator, *Proceedings of the 2016 IEEE Radar Conference*, 2016. DOI: 10.1109/RADAR.2016.7485278.
16. *Zachinyaev Yu.V.* Formirovanie radiosignalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey na osnove yavleniya fazovoy samomodulyatsii [Self-phase modulation based chirp generation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 8 (169), pp. 77-85.
17. *Zachinyaev Yu.V., Plivak S.A., Shumilin A.S.* Formirovanie signalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey na osnove yavleniya fazovoy samomodulyatsii [Formation of signals with linear frequency modulation based on the phenomenon of phase self-modulation], *Sbornik trudov V Mezhdunarodnoy konferentsii po fotonike i informatsionnoy optike* [proceedings of the V International conference on Photonics and information optics], 2016, pp. 345-346.
18. *Agraval G.P.* Nelineynaya volokonnaya optika [Nonlinear fiber optics]: translation from English. Moscow: Mir, 1996, 323 p.
19. *Kochemasov V.N., Belov L.A., Okoneshnikov V.S.* Formirovanie signalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey [Formation of signals with linear frequency modulation]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 192 p.
20. *Ivanov A.B.* Volokonnaya optika: komponenty, sistemy peredachi, izmereniya [Fiber optics: components, transmission systems, measurement]. Moscow: Izd-vo «Syrus System», 1999, 673 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.ф.-м.н., доцент В.М. Федоров.

Зачиняев Юрий Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: yvzach@sfedu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: +79044411988; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; старший преподаватель.

Zachinyaev Yuriy Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: yvzach@sfedu.ru; 2, Chehova street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79044411988; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; assistant professor.

УДК 621.391

DOI 10.18522/2311-3103-2016-9-113121

А.Н. Зикий, П.Н. Зламан

РАНГОВЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ ОДИНОЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ

При автоматическом обнаружении радиолокационных сигналов на фоне помех неизвестного и меняющегося уровня широко используются обнаружители со стабилизацией частоты ложных тревог. К ним относятся шумовая автоматическая регулировка усиления, регулировка порога квантования, обнаружители контраста, знаковые и ранговые об-