

УДК 621.373.9

Ю.В. Зачиняев

ФОРМИРОВАНИЕ РАДИОСИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ ФАЗОВОЙ САМОМОДУЛЯЦИИ*

Исследован один из подходов к решению проблемы увеличения девиации частоты сигналов с линейной частотной модуляцией. В ходе исследования проведен анализ литературы и патентной документации, подтвердивший актуальность тематики и необходимость проведения исследований с целью более эффективного использования сигналов с линейной частотной модуляцией в таких областях как радиолокация, системы контроля и управления доступом, защищенной связи. Предложена структура устройства, реализующего формирование сигналов с линейной частотной модуляцией на основе явления фазовой самомодуляции. Устройство включает в себя узлы формирования задающего оптического импульса, волоконно-оптическую линию задержку, в которой происходит преобразование оптического гауссовского импульса в сигнал с линейной частотной модуляцией, приемный оптический модуль, а также узлы преобразования частоты сформированного сигнала. Описан принцип работы устройства, получены аналитические выражения, позволяющие оценить основные параметры формируемых сигналов: девиацию частоты и центральную частоту ЛЧМ-сигнала. Проведено моделирование работы формирователя, подтвердившее эффективность работы формирователя: спектр сигнала соответствует спектру канонического ЛЧМ-сигнала, а уровень боковых лепестков автокорреляционной функции не превышает значения минус 13,4 дБ. Показано, что предложенное техническое решение позволяет существенно увеличить значение девиации частоты по сравнению с существующими на сегодняшний день аналогами. Граничное значение девиации частоты современных подходов к формированию сигналов с ЛЧМ не превышает 1–10 ГГц. Формирователь на основе явления фазовой самомодуляции позволяет получить значения девиации частоты порядка 30–40 ГГц при длительности формируемых сигналов от 100 пс, ограничиваясь возможностями элементной базы, в частности, оптических приемных модулей.

Линейно-частотно-модулированные сигналы; эффект фазовой самомодуляции; формирование сверхширокополосных сигналов.

Yu.V. Zachinyaev

SELF-PHASE MODULATION BASED CHIRP GENERATION

The present work is aimed at the research and analysis of the approach to solving the problem of increasing the frequency deviation of the linear frequency modulated signals. According to the literature and patent documents analysis the relevance of the research field and the necessity of the further research for better use of linear frequency modulated signals in areas such as radiolocation, access control, secure communications were confirmed. The structure of the linear frequency modulated signals generator based on the phase self-modulation effect has been provided. Generator includes optical units forming the master pulse, fiber-optic delay line transforming a Gaussian optical pulse signal into the chirp signal, optical receiver module and frequency conversion components. The operation principle of such device, analytical expressions to get the basic parameters of the generated signals – chirp central frequency and frequency deviation – were considered. Simulation of the chirp generator proving the efficiency of the device was performed – the shape of the frequency spectrum corresponds with the spectrum of the default chirp, and the autocorrelation sidelobes don't exceed minus 13,4 dB level. It has been shown that the proposed technical solution allows to substantially increase the value of frequency deviation as compared to currently existing analogues. The boundary value of frequency deviation of modern approaches to the chirp generating does not exceed 1–10 GHz. Chirp generator based on self-phase modulation effect provides a frequency deviation of the order of 30–40 GHz with a pulse width of 100 ps and is limited by the parameters of the element base, in particular, optical receiver modules.

Linear frequency modulated signals; phase self-modulation effect; ultra wideband signal generation.

* Работа выполнена на основе гос. задания Минобрнауки РФ № 213.01-11/2014-9.

Введение. В последние годы большое внимание уделяется вопросам применения сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) в нетрадиционных областях, например, в сфере передачи информации, в том числе для защищенной связи. Анализ литературных источников выявил актуальность использования данного класса сложных сигналов и для управления доступом, в частности, для частотной идентификации [1]. Использование сигналов с ЛЧМ позволяет существенно увеличить дальность действия систем RFID (*Radio Frequency IDentification*) при неизменной пиковой мощности передатчика по сравнению с традиционными типами сигналов.

В [2–6] предложены схема организации системы передачи данных на основе ЛЧМ-сигналов. Например, для передачи логической единицы используется импульс с линейно возрастающим законом изменения частоты, логического нуля – импульс с линейно убывающим законом изменения частоты, причем обработка данных производится на основе коррелятора по критерию максимального правдоподобия.

В [7] показано, что в современных командных радиоприемниках, обладающих высокой скрытностью, часто используют ЛЧМ-сигналы, которые весьма затруднительно обнаружить в сложной радиоэлектронной обстановке. Авторами статьи предложен подход к обнаружению таких сигналов.

Можно заключить, что ЛЧМ-сигналы правомерно рассматривать как один из элементов обеспечения информационной безопасности в телекоммуникационных системах, что делает актуальными разработку и совершенствование устройств для формирования и обработки этих сигналов.

Одним из направлений такого совершенствования является увеличение девиации частоты формируемого сигнала. Девиация определяет разрешающую способность по дальности.

В защищенных системах связи повышение девиации частоты помимо энергетического выигрыша обеспечивает повышение защищенности телекоммуникационной системы. Это связано с тем, что технические возможности злоумышленника ограничены. Если его оборудование обработки и перехвата сигналов имеет ограниченную полосу пропускания, которая не превышает ширины спектра передаваемого ЛЧМ-сигнала, то перехват исключен.

Проведенные в [8–10] 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).

Невозможность применения традиционных методов для обработки и формирования высокоскоростных и широкополосных сигналов приводит к необходимости использования оптической элементной базы и оптических методов обработки сигналов [11–14], в частности использования явления фазовой самомодуляции (ФСМ) для формирования ЛЧМ-сигналов.

Явление ФСМ определяется зависимостью показателя преломления в оптическом волокне (ОВ) от интенсивности оптического сигнала при распространении импульса света по ОВ. Из-за нелинейности показателя преломления различные участки импульса испытывают различный дополнительный фазовый набег, что приводит к частотной модуляции и к уширению спектра импульса [15].

Целью исследования является разработка метода формирования ЛЧМ-радиосигналов на основе явления фазовой самомодуляции, позволяющего увеличить рабочие значения девиации частоты формируемых сигналов.

Принцип формирования ЛЧМ-сигнала на основе ФСМ. Структура устройства, формирующего ЛЧМ-сигналы на основе явления ФСМ, изображена на рис. 1. Устройство включает блок управления (БУ), передающий оптический модуль (ПОМ),

волоконно-оптическую линию задержки (ВОЛЗ) длиной $L_{ВОЛЗ}$, оптический аттенуатор (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).

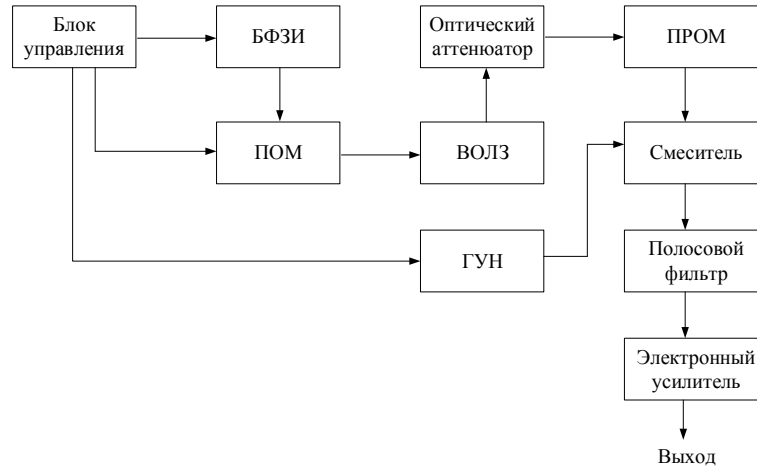


Рис. 1. Структура формирователя ЛЧМ-сигналов на основе явления ФСМ

ПОМ генерирует оптический импульс с энергией \mathcal{E}_0 и длительностью $T_{ЛЧМ}$, причем $T_{ЛЧМ} > 100$ пс. Ограничение снизу по длительности позволяет не учитывать дисперсию групповых скоростей (ДГС), что упрощает реализацию устройства.

Форма импульса и его длительность определяется блоком формирования задающих импульсов, модулирующим оптическое излучение ПОМ. Для обеспечения линейного характера частотной зависимости сигнала на выходе ВОЛЗ и возможности дальнейшего преобразования частоты сформированного ЛЧМ-сигнала требуется обеспечить форму импульса (рис. 2), описываемую выражением [15]

$$U(t) = \begin{cases} \exp\left(-0.5\left(\frac{t+0,11 \cdot T_{ЛЧМ}}{k \cdot T_{ЛЧМ}}\right)^2\right) & \text{при } 0 \leq t < T_{ЛЧМ}; \\ 0 & \text{при } 0 > t \geq T_{ЛЧМ}, \end{cases} \quad (1)$$

где k – коэффициент, определяющий ширину гауссовского импульса. Длительность формируемого сигнала $T_{ЛЧМ}$ определяется по уровню минус 3 дБ.

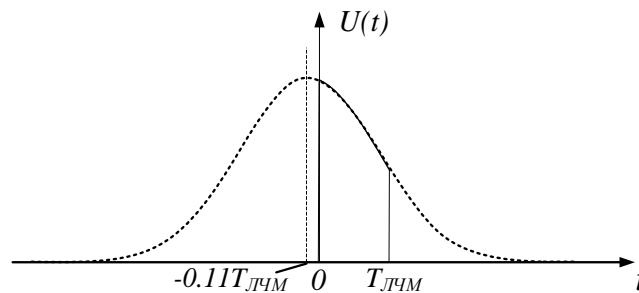


Рис. 2. Требуемая форма импульса БФЗИ

На рис. 2 показано, что сигнал на входе ПОМ представляет собой ограниченный по времени гауссовский импульс. Сдвиг импульса по времени на величину $0,11 \cdot T_{ЛЧМ}$ позволяет упростить требования к полосовому фильтру при преобразовании частоты ЛЧМ-сигнала за счет смещения его начальной частоты в сторону увеличения.

Ширина гауссовского импульса, задаваемая коэффициентом k , определяет линейность частотной зависимости сигнала на выходе ВОЛЗ, а также величину девиации частоты результирующего сигнала и подбирается в зависимости от требований к линейности закона изменения частоты требуемого сигнала.

Устройство управления осуществляет регулировку моментов срабатывания БФЗИ, длительность импульса и пиковой мощности ПОМ.

В ВОЛЗ длиной $L_{ВОЛЗ}$ под воздействием явления ФСМ спектр входного импульса расширяется, а в результате фазового набега появляется частотная модуляция. Огибающая оптического сигнала на выходе ВОЛЗ имеет форму линейно-частотно-модулированного сигнала и в комплексной форме описывается формулой [15]

$$S(t) = \text{Re} \left[U(t) \cdot \exp(i \cdot U^2(t)) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot z_e}{L_{нл}} \right], \quad (2)$$

где $L_{нл}$ – нелинейная длина ВОЛЗ.

Нелинейная длина ОВ ВОЛЗ может быть найдена по формуле [16]

$$L_{нл} = \frac{c \cdot S_e}{P_0 \cdot n_2 \cdot \omega_0}, \quad (3)$$

где c – скорость света в вакууме, S_e – эффективная площадь моды ОВ, n_2 – нелинейный коэффициент преломления, ω_0 – круговая частота оптического излучения.

Эффективная длина ОВ ВОЛЗ z_e связана с длиной ВОЛЗ $L_{ВОЛЗ}$ и коэффициентом затухания ОВ $\alpha_{ОВ}$ соотношением [16]

$$z_e = \frac{1}{\alpha_{ОВ}} (1 - \exp(-\alpha_{ОВ} L_{ВОЛЗ})). \quad (4)$$

Пиковая мощность оптического импульса ПОМ связана с энергией импульса соотношением $P_0 = \mathcal{E}_0 / T_{ЛЧМ}$.

В случае, когда ДГС можно пренебречь ($T_{ЛЧМ} > 100$ пс), соответствующий фазовый набег сигнала в ВОЛЗ определяется выражением [15]

$$\Phi_{нл}(L, T) = |U_0(t)|^2 \cdot \frac{z_e}{L_n}, \quad (5)$$

где $U_0(t)$ – амплитуда поля в начале ВОЛЗ ($L = 0$).

С учетом выражений (3)–(5) находим

$$\Phi_{нл}(L, T) = |U(t)|^2 \cdot \frac{c \cdot S_e \cdot (1 - \exp(-\alpha_{ОВ} L)) T_{ЛЧМ}}{\alpha_{ОВ} \cdot \mathcal{E}_0 \cdot n_2 \cdot \omega_0}. \quad (6)$$

Продифференцировав выражение (6) по времени, можно определить мгновенную частоту $F_{нл}(L, T)$ огибающей импульса. Для временного промежутка $0 \leq t < T_{ЛЧМ}$ справедлива формула

$$F_{нл}(L, T) = |U(t)|^2 \cdot \frac{2}{k^2} \cdot \left(\frac{t}{T_{ЛЧМ}} + 0,11 \right) \cdot \frac{c \cdot S_e \cdot (1 - \exp(-\alpha_{ОВ} L))}{\alpha_{ОВ} \cdot \mathcal{E}_0 \cdot n_2 \cdot \omega_0}. \quad (7)$$

Девияция частоты ЛЧМ-сигнала как разность между двумя значениями частот f_{\min} и f_{\max} прямо пропорциональна эффективной длине оптического волокна (которая обратно пропорциональна погонному затуханию ОВ), и обратно пропорциональна нелинейной длине ОВ ВОЛЗ. С учетом выражений (1) и (7) находим формулу для расчета девияции частоты ЛЧМ-сигнала:

$$\Delta F = \frac{2 \cdot c \cdot S_e \cdot (1 - \exp(-\alpha_{OB} L))}{k^2 \cdot \alpha_{OB} \cdot \mathcal{E}_0 \cdot n_2 \cdot \omega_0} \cdot \left[1,11 \cdot \exp\left(-\left(\frac{1,11 \cdot T_{ЛЧМ}}{k^2 \cdot T_{ЛЧМ}}\right)^2\right) - 0,11 \exp\left(-\left(\frac{0,11 \cdot T_{ЛЧМ}}{k^2 \cdot T_{ЛЧМ}}\right)^2\right) \right] \cdot (8)$$

$$\Delta F = \frac{2 \cdot c \cdot S_e \cdot (1 - \exp(-\alpha_{OB} L))}{k^2 \cdot \alpha_{OB} \cdot \mathcal{E}_0 \cdot n_2 \cdot \omega_0} \cdot \left(1,11 \cdot \exp\left(-\left(\frac{1,11}{k^2}\right)^2\right) - 0,11 \cdot \exp\left(-\left(\frac{0,11}{k^2}\right)^2\right) \right) \cdot$$

При этом для расчета центральной частоты ЛЧМ-сигнала f_c справедлива формула

$$f_c = \frac{2 \cdot c \cdot S_e \cdot (1 - \exp(-\alpha_{OB} L))}{k^2 \cdot \alpha_{OB} \cdot \mathcal{E}_0 \cdot n_2 \cdot \omega_0} \cdot \left[0,11 \cdot \exp\left(-\left(\frac{0,11}{k^2}\right)^2\right) + 0,61 \cdot \exp\left(-\left(\frac{0,61}{k^2}\right)^2\right) \right] \cdot (9)$$

Как следует из формул (8)–(9), изменяя параметры ОВ ВОЛЗ (в частности длину ВОЛЗ, коэффициент затухания ОВ ВОЛЗ, длину волны оптического излучения), а также энергию импульсов ПОМ, можно регулировать девияцию частоты и центральную частоту ЛЧМ-сигнала.

Оптическое излучение с выхода ВОЛЗ через оптический аттенюатор, уменьшающий мощность сигнала для обеспечения работы последующих узлов, подается на приемный оптический модуль ПРОМ, преобразующий оптическое излучение в электрический сигнал. Для изменения центральной частоты сформированный ЛЧМ-сигнал с выхода ПРОМ подается на смеситель. При этом результирующее значение центральной частоты определяется несущей частотой генератора ГУН, который, в свою очередь, управляется БУ. Для фильтрации побочных компонентов преобразования частоты радиосигнал с выхода смесителя поступает на полосовой фильтр ПФ и усиливается в электронном усилителе ЭУ.

Временные диаграммы работы устройства изображены на рис. 3.

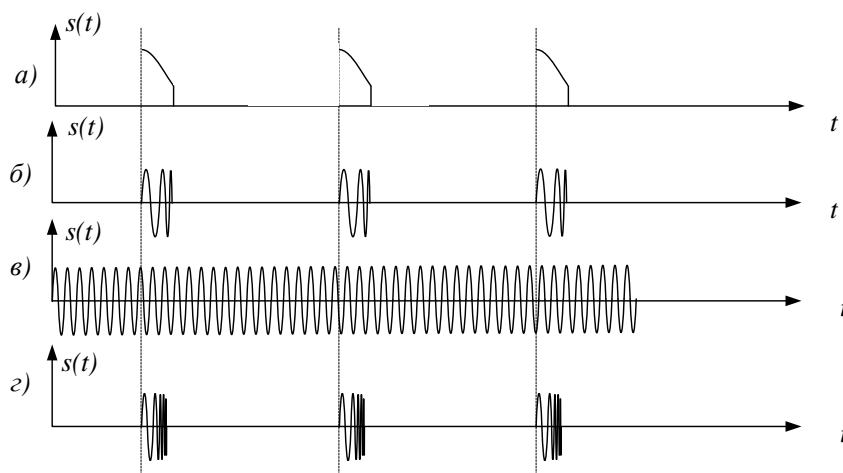


Рис. 3. Эпюры напряжений на выходе функциональных узлов устройства формирования ЛЧМ-сигналов: ПОМ (а), ВОЛЗ (б), ГУН (в), ЭУ (г)

На рис. 3,а представлена временная диаграмма сигнала на выходе ПОМ, описываемого формулой (1) и подаваемого на вход ВОЛЗ. На рис. 3,б изображен эпюр сигнала на выходе ВОЛЗ – как видно, под воздействием ФСМ он имеет форму ЛЧМ-сигнала, а мгновенная частота описывается формулой (7). На рис. 3,в,г приведены соответственно несущее колебание, формируемое генератором ГУН и используемое для преобразования частоты и сигнал на выходе ЭУ, представляющий собой выходной сигнал устройства.

Результаты моделирования формирователя. Анализ спектральных и корреляционных характеристик полученного ЛЧМ-сигнала проведен посредством имитационного моделирования процесса формирования в пакетах MATLAB и MATHCAD при следующих параметрах: длительность формируемого сигнала $T_{ЛЧМ} = 10$ нс, центральная частота формируемого сигнала $f_0 = 18$ ГГц, девиация частоты формируемого сигнала $\Delta F = 10,7$ ГГц, длина ВОЛЗ $L_{ВОЛЗ} = 10$ км, эффективная площадь моды ОВ $S_e = 5 \cdot 10^{-11}$ м², нелинейный коэффициент преломления $n_2 = 2 \cdot 10^{-20}$, длина волны оптического излучения $\lambda = 1550$ нм, коэффициент затухания ОВ $\alpha_{ОВ} = 5 \cdot 10^{-6}$, энергия входного оптического импульса $\mathcal{E}_0 = 0,3$ мкДж.

На рис. 4 представлены спектр полученного ЛЧМ-сигнала и график его автокорреляционной функции в сравнении с аналогичными характеристиками классического ЛЧМ-сигнала.

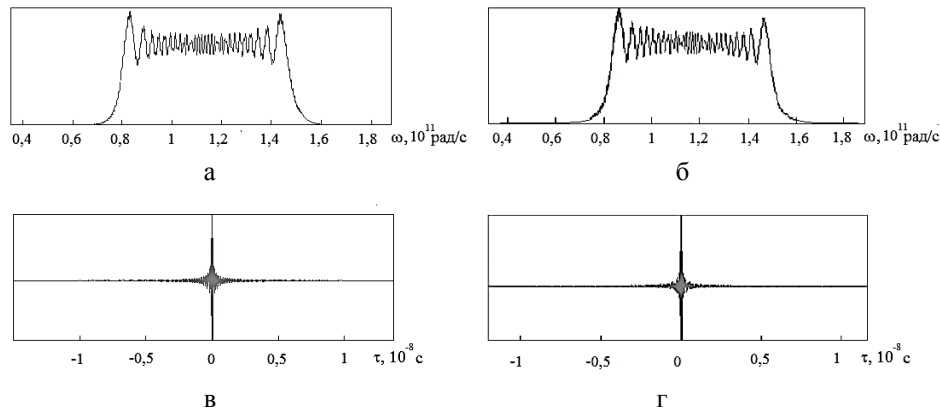


Рис. 4. Спектр канонического ЛЧМ-сигнала (а), спектр полученного сигнала (б), автокорреляционная функция канонического ЛЧМ-сигнала (в), автокорреляционная функция полученного ЛЧМ-сигнала (г)

Из рис. 4 видно, что спектр полученного сигнала соответствует спектру канонического ЛЧМ-сигнала. Уровень боковых лепестков автокорреляционной функции сигнала, полученного при моделировании, составил минус 13,4 дБ, что аналогично соответствующему значению для канонического ЛЧМ-сигнала, что подтверждает эффективность устройства формирования при генерировании сигнала для обозначенных выше целей.

Теоретическое значение девиации частоты сигнала согласно (8) может принимать значения порядка десятков гигагерц, следовательно, максимальное значение девиации частоты, доступное технически, определяется возможностями элементов устройства – ограничением полосы пропускания ПРОМ и ПФ. Значение полосы пропускания серийно выпускаемых современных ПРОМ достигает

40–50 ГГц [17–20]. ПФ достаточно узкополосны, причем полоса пропускания серийных экземпляров не превышает 15–20 ГГц (при частоте несущей 40–50 ГГц). Таким образом, можно заключить, что девиация частоты предлагаемого решения может достигать 15–20 ГГц при длительности формируемых импульсов от 100 пс.

Заключение. Предложен подход к увеличению девиации частоты ЛЧМ-сигналов на основе использования эффекта нелинейной оптики – фазовой самомодуляции.

Решение позволяет добиться существенного увеличения девиации частоты ЛЧМ-сигнала, диапазона длительностей формируемых сигналов (от 100 пс и выше), а также расширения диапазона рабочих частот, что дает возможность улучшить параметры существующих радиотехнических систем и расширить применение ЛЧМ-сигналов в других отраслях.

Проведен анализ литературы и патентной документации, подтвердивший актуальность тематики и необходимость проведения исследований с целью более эффективного использования сигналов с линейной частотной модуляцией в таких областях как радиолокация, системы контроля и управления доступом, защищенной связи. Предложена структура устройства, реализующего формирование сигналов с линейной частотной модуляцией на основе явления фазовой самомодуляции.

Получены аналитические отношения, оценивающие параметры формируемых сигналов (в частности, девиацию частоты) по характеристикам оптического волокна и передающего оптического модуля.

На основе анализа рынка оптоэлектронных элементов дана оценка о граничном значении девиации частоты, достигаемом на основе предлагаемого решения.

Полученные результаты могут найти применение в радиолокации, радиотомографии, защищенной связи, а также в развитии теории формирования сложных сигналов на основе волоконно-оптических структур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *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: 05.02.2015).
2. *Raveendra K.R.* Digital Transmission using Multi-Mode Continuous Phase Chirp Signals // IEEE Proc. Commun. – 1986. – Vol. 143, No. 2. – P. 87-92.
3. *Springer A. Gugler W.* Spread Spectrum Communications Using Chirp Signals // EUROCOMM. – 2000. – P. 166-170.
4. *Huaping L.* Multicode Ultra-Wideband Scheme Using Chirp Waveforms // IEEE Journal on selected areas in communications. – 2006. – Vol. 24, No. 4. – P. 885-891.
5. *Berni A.J., Greeg W.D.* On the Utility of Chirp Modulation for Digital Signaling // IEEE Trans. on Commun. – 1973. – Vol. 21, No. 6. – P. 748-751
6. *Kaminsky E.J. and Simanjuntak L.* Chirp Slope Keying for Underwater Communications // Proc. SPIE 5778. – 2005. – P. 894-905.
7. *Дятлов А.П., Дятлов П.А.* Адаптивный автокорреляционный обнаружитель связных ЛЧМ-сигналов // Специальная техника. – 2009. – № 6. – С. 34-43.
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: 05.02.2015).
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. *Merrill I. Skolnik.* Radar Handbook. – 2d ed. – McGraw-Hill, 1990. – 1220 p. ISBN-13: 978-0070579132.
11. *Румянцев К.Е., Горбунов А.В.* Динамические запоминающие устройства на основе бинарных волоконно-оптических структур // Радиотехника. – 2002. – № 12. – С. 73-80.

12. Кукуяшиный А.В. Особенности формирования ЛЧМ сигналов с использованием волоконно-оптических структур // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2007. – № 9. – С. 75-88.
13. Кукуяшиный А.В., Тимонов В.В. Требования к элементной базе волоконно-оптических процессоров // Радиотехнические и телевизионные средства сбора и обработки информации: Сборник научных статей / Под ред. К.Е. Румянцева. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 162 с.
14. Зачиняев Ю.В., Румянцев К.Е., Кукуяшиный А.В. Формирование наносекундных ЛЧМ-радиосигналов на волоконно-оптических структурах // Электротехнические и информационные системы и комплексы. – 2011. – Т. 7, № 3. – С. 32-38.
15. Агравал Г.П. Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
16. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Изд-во «Syrgus System», 1999. – 673 с.
17. Paschotta R. Encyclopedia of Laser Physics and Technology. – Berlin: Wiley-VCH, 2008. – 844 p.
18. Papichaya C., Delphine M. Ge/SiGe multiple quantum well photodiode with 30 GHz bandwidth // Applied physics letters. – 2011. – P. 121-123.
19. Beling A., Zhou Q., Sinsky J.H. 30 GHz fully packaged modified uni-traveling carrier photodiodes for high-power applications // Avionics Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP). – 2013. – P. 9-10.
20. Finisar XPDV21x0R 50 GHz // Finisar Photodetector Product Brief. https://www.finisar.com/sites/default/files/downloads/xpdv21x0r_50ghz_photodetector_product_brief_reval.pdf (дата обращения 12.11.2015 г.).

REFERENCES

1. Gusarov A.A. Sovremennyye sistemy radiochastotnoy identifikatsii i registratsii ob"ektov [The modern system of 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 February 2015).
2. Raveendra K.R. Digital Transmission using Multi-Mode Continuous Phase Chirp Signals, *IEEE Proc. Commun.*, 1986, Vol. 143, No. 2, pp. 87-92.
3. Springer A., Gugler W. Spread Spectrum Communications Using Chirp Signals, *EUROCOMM.*, 2000, pp. 166-170.
4. Huaping L. Multicode Ultra-Wideband Scheme Using Chirp Waveforms, *IEEE Journal on selected areas in communications*, 2006, Vol. 24, No. 4, pp. 885-891.
5. Berni A.J., Greeg W.D. On the Utility of Chirp Modulation for Digital Signaling, *IEEE Trans. on Commun.*, 1973, Vol. 21, No. 6, pp. 748-751.
6. Kaminsky E.J. and Simanjuntak L. Chirp Slope Keying for Underwater Communications, *Proc. SPIE 5778*, 2005, pp. 894-905.
7. Dyatlov A.P., Dyatlov P.A. Adaptivnyy avtokorrelyatsionnyy obnaruzhitel' svyaznykh LChM-signalov [Adaptive autocorrelation detector coherent chirp signals], *Spetsial'naya tekhnika* [Special Equipment], 2009, No. 6, pp. 34-43.
8. Zachinyaev Yu.V. Analiz i klassifikatsiya formirovateley lineynno-chastotno-modulirovannykh radiosignalov s tochki zreniya umen'sheniya dlitel'nosti formiruemykh signalov [Analysis and classification of shapers are linear-frequency-modulated radio signals from the point of view 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 February 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 LFM signals: Monograph]. Saarbrücken: Izd-vo LAP Publishing, 2014, 177 p.
10. Merrill I. Skolnik. Radar Handbook. 2d ed. McGraw-Hill, 1990, 1220 p. ISBN-13: 978-0070579132.
11. Rumyantsev K.E., Gorbunov A.V. Dinamicheskie zapominayushchie ustroystva na osnove binarnykh volokonno-opticheskikh struktur [Dynamic storage device based on binary fiber-optic structures], *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2002, No. 12, pp. 73-80.

12. *Kukuyashnyy A.V.* Osobennosti formirovaniya LChM signalov s ispol'zovaniem volokonno-opticheskikh struktur [Features of formation of the chirp signals using fiber-optic structures], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Information Counteraction to the Terrorism Threats], 2007, No. 9, pp. 75-88.
13. *Kukuyashnyy A.V., Timonov V.V.* Trebovaniya k elementnoy baze volokonno-opticheskikh protsessorov [Requirements for components of fiber-optic processors], *Radiotekhnicheskie i televizionnye sredstva sbora i obrabotki informatsii: Sbornik nauchnykh statey* [Radio and television means of collecting and processing information: Collection of scientific articles], Ed. By K.E. Rumyantseva. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 162 p.
14. *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* [Electrical and data processing facilities and systems], 2011, Vol. 7, No. 3, pp. 32-38.
15. *Agraval G.P.* Nelineynaya volokonnaya optika [Nonlinear fiber optics]: Translation from English. Moscow: Mir, 1996, 323 p.
16. *Ivanov A.B.* Volokonnaya optika: komponenty, sistemy peredachi, izmereniya [Fiber optics: components, transmission systems, measurement]. Moscow: Izd-vo «Syrus System», 1999, 673 p.
17. *Paschotta R.* Encyclopedia of Laser Physics and Technology. Berlin: Wiley-VCH, 2008 844 p.
18. *Papichaya C., Delphine M.* Ge/SiGe multiple quantum well photodiode with 30 GHz bandwidth, *Applied physics letters*, 2011, pp. 121-123.
19. *Beling A., Zhou Q., Sinsky J.H.* 30 GHz fully packaged modified uni-traveling carrier photodiodes for high-power applications, *Avionics Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP)*, 2013, pp. 9-10.
20. Finisar XPDV21x0R 50 GHz, *Finisar Photodetector Product Brief*. Available at: https://www.finisar.com/sites/default/files/downloads/xpdv21x0r_50ghz_photodetector_product_brief_reval.pdf ((accessed 12 November 2015).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Костоготов.

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 telecommunication systems information security; cand. of eng. sc.; senior lecturer.

УДК 621.374.4

П.А. Землянухин

УМНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ УСТРОЙСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ НА БАЗЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА И ОГРАНИЧИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ*

Исследования посвящены рассмотрению вопросов связанных с построением умножителей частоты гармонических колебаний на базе колебательного контура и ограничителя напряжения, формирующего импульсы напряжения, управляющие колебательным контуром. В работе показан принцип работы умножителя частоты, рассмотрены переходные процессы, происходящие в элементах умножителя частоты, выданы рекомендации по построению умножителей частоты и величинах углов отсечки импульсов напряжения при настройке умножителя частоты на различные гармоники частоты входного сигнала. Показано, что использо-

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ высшим учебным заведениям в части проведения научно-исследовательских работ. Тема № 213.01-11/2014-9.