

Раздел III. Методы и средства дефектоскопии и неразрушающего контроля

УДК 629.78.05

DOI 10.23683/2311-3103-2017-8-118-127

Ю.А. Гелозе, П.П. Клименко, А.В. Максимов, В.В. Петренко

СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ МАНИПУЛИРОВАННЫХ МИНИМАЛЬНЫМ СДВИГОМ МЕТОДОМ ЦИФРОВОГО ПРЯМОГО СИНТЕЗА

Работа посвящена цифровым системам связи. Рассматривается формирование сигналов, манипулированных минимальным сдвигом (частоты) (ММС) MSK (minimum shift keying). Интерес к этим сигналам обусловлен их высокой спектральной эффективностью при постоянной огибающей, что позволяет применять в радиопередающем и радиоприемном устройствах узкополосные селекторы. Сигналы ММС широко используются в сотовой связи стандарта GSM, спутниковой связи и в спутниковых навигационных системах. Особенность сигналов ММС состоит в том, что за время одного такта фаза линейно (без разрыва) изменяется на величину, точно равную 90° , что и обеспечивает его спектральную эффективность. Для выбора устройства формирования сигнала ММС рассмотрены математические методы описания этого сигнала. Одно из математических описаний ММС сигнала тесно связано с четырехфазной фазовой модуляцией (4-ФМ) (QPSK) со сдвигом (OQPSK) с дополнительным синус-косинусным сглаживанием сигналов в квадратурных каналах. Отмечено, что дополнительное умножение сигналов на тригонометрические функции затруднительно. Другое математическое описание ММС сигнала представляется как специальная форма двоичной частотной модуляции с непрерывной фазой (ЧМНФ) и индексом модуляции равным 0,5. Выявлены недостатки частотного метода формирования сигнала ММС при использовании аналоговой схемотехники. Показано, что на основе программируемой цифровой техники этот метод позволяет сравнительно просто синтезировать сигналы ММС. Исследования, выполненные в работе, показали, что использование метода прямого цифрового синтеза частот с дополнительной коррекцией начальных значений фазы каждом такте для формирования сигналов ММС обеспечивает его характеристики, близкими к характеристикам идеального сигнала ММС. В результате исследования разработана система на кристалле для формирования ММС сигнала. Формирователь сигнала реализован на базе ПЛИС фирмы Altera семейства Cyclone II. Алгоритмы работы реализованы в среде Quartus II и описаны на VHDL. «Макетирование» выполнено в Quartus II. Приведены результаты «макетирования».

Связь; модуляция; фаза; частота; спектр; фильтрация; цифра; микросхема.

Y.A. Gelozhe, P.P. Klimenko, A.V. Maksimov, V.V. Petrenko

SYSTEM-ON-A-CRYSTAL FOR FORMING SIGNALS MANIPULATED BY MINIMUM SHIFT BY THE METHOD OF DIGITAL DIRECT SYNTHESIS

This work is devoted to digital communication systems. The formation of signals manipulated by minimum shift (frequency) (MMC) MSK (minimum shift keying) is considered. Interest in these signals is due to their high spectral efficiency with a constant envelope, which makes it possible to use narrowband selectors in radio transmitting and radio receivers. MSK-signals are

widely used in GSM, satellite communication and satellite navigation systems. The peculiarity of MSK signals is that during a single clock cycle the phase is linearly and without discontinuity changes by an amount exactly equal to 90° , which ensures its spectral efficiency. To select the device for forming an MSK signal, mathematical methods for describing this signal are considered. One of the mathematical descriptions of the MSK signals is closely related to the four-phase QPSK modulation (QPSK) with offset (OQPSK) with additional sinus cosine signal smoothing in quadrature channels. It is noted that additional multiplication of signals by trigonometric functions is difficult. Another mathematical description of the MSK signals is represented as a special form by the binary continuous-phase (QMNF) modulation and the modulation index equal to 0.5. The drawbacks of the frequency method for the formation of an MSK signal are found when using analog circuitry. However, based on programmable digital technology, this method makes it possible to synthesize MSK signals relatively simply. The research performed in the work showed that the use of the method of direct digital frequency synthesis for the generation of MSK signals provides its characteristics close to those of an ideal MSK signal, which fully corresponds to its strict mathematical description. As a result of the study, a system was developed on a chip to form an MSK signal. The signal former is based on the Cyclone II Altera FPGA. The algorithms are implemented in the Quartus II environment and are described in VHDL. The prototyping is done in Quartus II. The results of the prototyping are presented.

Communication; modulation; phase; frequency; spectrum; filtering; digit; microchip.

Введение. В настоящее время в современных системах цифровой радиосвязи часто используются сигналы, манипулируемые минимальным сдвигом (частоты) (ММС) MSK (minimum shift keying) [1–9]. Интерес к этим сигналам обусловлен их высокой спектральной эффективностью при постоянной огибающей, что позволяет применять в радиопередающем и радиоприемном устройствах узкополосные селекторы.

ММС сигналы широко используют в системах: сотовой связи стандарта GSM, в спутниковой связи (спутниковых радиолиниях) [9]. Согласно [10] эти сигналы применяют и в оптическом диапазоне. Кроме того сигналы с ММС модуляцией применяют в спутниковых навигационных системах ГЛОНАС и GPS. С незначительными доработками этот сигнал, так же планируется использовать в спутниковых навигационных системах Galileo (европейская спутниковая навигационная система), Compass (китайская спутниковая навигационная система).

Для формирования и приема сигналов с манипуляцией ММС разрабатывают новые, более простые и совершенные методы и схемотехнические решения, что подтверждается работами [10–23].

Цели работы. Анализ различных точных математических моделей сигналов ММС, позволяющих синтезировать требуемый сигнал методом прямого цифрового синтеза частот. Исследование основных характеристик сигнала ММС, синтезированного вышеупомянутым цифровым методом и сравнение их с характеристиками идеального сигнала ММС, точно соответствующего его математической модели.

1. Описание и особенности ММС сигнала. Манипуляция с минимальным сдвигом (ММС или MSK) – это специальная форма двоичной частотной модуляции с непрерывной фазой (ЧМНФ), в которой индекс манипуляции равен 0,5 [1]. Изменение частоты увеличивает или уменьшает фазу сигнала точно на 90° за каждый такт T [4]. Таким образом, в первом случае сигнал представляется как

$$s(t) = \sin(\omega_0 t + 2\pi \int f_i dt + n\pi/2), \quad 0 < t < T, \quad (1)$$

$$\text{где } f_i = \begin{cases} f_i = \frac{1}{4T} & \text{для информационного элемента 1,} \\ f_i = -\frac{1}{4T} & \text{для информационного элемента 0.} \end{cases}$$

Во втором случае манипуляция с минимальным сдвигом тесно связана с четырехфазной ФМ (QPSK) со сдвигом (OQPSK), как можно видеть из следующего выражения:

$$s(t) = \sin \left[\omega_0 t + \frac{n\pi}{2} + A(t) \frac{\pi t}{2T} \right] = \sin[\omega_0 t + \varphi(t)] = \\ = \cos \left[A(t) \frac{\pi t}{2T} \right] \sin \left(\omega_0 t + \frac{n\pi}{2} \right) + \sin \left[A(t) \frac{\pi t}{2T} \right] \cos \left(\omega_0 t + \frac{n\pi}{2} \right), \quad (2)$$

где $A(t)=\pm 1$. Очевидно, что фаза этого колебания изменяется на 90° в каждом временном интервале точно так же, как при четырехфазной ФМ со сдвигом, за исключением того, что изменение фазы происходит линейно, а не мгновенно. Таким образом, если амплитудная модуляция четырехфазной ФМ со сдвигом производится колебаниями $\sin(x)$ и $\cos(x)$, то сигналы на выходе будут идентичны сигналам при манипуляции минимальным сдвигом. Следует отметить, что для поддержания постоянства огибающей $s(t)$ необходимо модулировать сигналы в обоих (синфазном и квадратурном) каналах в течении каждого временного интервала. График изменения фазы сигнала ММС имеет вид, показанный на рис. 1.

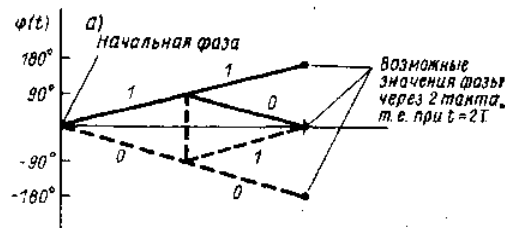


Рис. 1. График изменения фазы сигнала ММС

Из рис. 1 видно, что фаза сигнала ММС изменяется по линейному закону и за время одного такта она получает приращение $\pi/2$.

2. Формирование ММС сигнала. Формирование ММС сигнала с использованием модулятора на переключаемых генераторах. Модулятор сигнала ММС можно реализовать на переключаемых генераторах [7]. Непосредственное применение переключаемых генераторов с различными частотами, определяемыми (1), позволяет получить частотно-манипулированный сигнал с разрывом фазы. Для непрерывности фазы модулированного колебания, в случае перехода с одной частоты на другую, фазы и частоты переключаемых генераторов должны быть синхронизированы, что обеспечивает когерентность и стабильность фаз колебаний. Кроме того, переключения с одной частоты на другую не могут происходить в произвольные моменты времени. Следовательно, общий задающий генератор должен быть синхронизирован с тактовым генератором информационного потока. Обеспечить такую синхронизацию является сложной задачей, особенно для произвольных частот несущего колебания.

Следует отметить, что применение программируемой цифровой техники позволит синтезировать сигнал частотным методом с малыми погрешностями.

Формирование ММС сигнала с использованием модулятора на основе стабилизированного по частоте автогенератора. В соответствии с [7] модулятор сигнала ММС можно реализовать на основе автогенератора, стабилизированного по частоте. Он позволяет реализовать частотную модуляцию с любым индексом модуляции и непрерывной фазой, поскольку управляемый по частоте автогенератор автоматически обеспечивает непрерывность фазы.

Формирование сигнала ММС с помощью стабилизированного автогенератора применяется на практике, но имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, способ модуляции является, по существу аналоговым, так как величина девиации непосредственно зависит от амплитуды модулирующего сигнала. Это приводит к тому, что стабильность девиации частоты в широком диапазоне частот и температур очень часто оказывается неприемлемо низкой. Во-вторых, стабилизация несущей частоты автогенератора, по сути, несовместима с поддержанием требуемого индекса девиации на частотах, близких к несущей. Значительные искажения спектра модулированного сигнала в непосредственной близости от несущей частоты дополнительно снижает достоверность принимаемой информации [7].

Из вышеизложенного следует, что формирование сигнала ММС в контуре стабилизации частоты приводит к искажению сигнала.

Формирование ММС сигнала с использованием квадратурного ММС модулятора. Формирование сигнала ММС может быть выполнено с применением (2). Из (2) видно, что квадратурные сигналы перемножаются на тригонометрические функции. Выполнение этой операции при использовании аналоговой техники приводит к существенным искажениям сигнала.

Следует отметить, что применение синус-косинусного сглаживания трудно осуществить в аналоговом формирователе ММС сигнала. Выполнение этой операции при использовании программируемой цифровой техники, также является нежелательным.

Учитывая отмеченное, далее рассматривается формирование сигнала ММС на основе программируемой цифровой техники без выполнения синус-косинусного сглаживания.

3. Формирование сигнала ММС с использованием метода цифрового прямого синтеза частот. Частотно-манипулированный сигнал с непрерывной фазой может быть получен при использовании микросхемы прямого синтеза частот (Digital Direct **Synthesis** – DDS). Частоты и фазы последовательно генерируемых колебаний определяются выражением (1).

Согласно (1) девиация частоты сигнала ММС должна быть точно равна $\pm \frac{1}{4T}$, что и приводит к требуемому приращению фазы сигнала за один такт, равному $\pm 90^\circ$. Обеспечить точное значение упомянутой девиации частоты и одновременно необходимые фазовые соотношения затруднительно, особенно для непрерывной передачи больших массивов данных. Обусловлено это следующими факторами. Частота опорного автогенератора имеет некоторую нестабильность частоты, что при некоторых условиях приводит к неконтролируемому набегу фаз. Частота дискретизации при формировании высокочастотного синусоидального колебания может быть недостаточно высокой, что приведет к заметным запаздываниям фазы сигнала. Кроме того, нестабильность частоты тактирования информационного потока, наряду с вышеупомянутыми факторами, может приводить к появлению большого набега фаз, что полностью искажает структуру сигнала ММС.

Устранение неконтролируемого набега фаз и, следовательно, создание условий для передачи больших массивов данных, возможно применив специальный алгоритм управления фазой генерируемого колебания. Фазу, сложившегося к концу предыдущего такта, необходимо округлить до ближайших значений $0, \pm 90^\circ$ и это значение фазы использовать как начальное в следующем такте. Начальная фаза колебаний при передаче первого информационного элемента принимается за ноль. Сброс, возникающей фазовой ошибки, исключает неконтролируемый набег фаз, и, следовательно, позволит передавать непрерывно большие массивы данных.

Микросхема DDS непосредственно генерирует высокочастотное модулированное колебание, закон изменения частоты которого, определяется внешним управляющим процессором. В последнее время для формирования и демодуляции различных видов сигнала используют методы ЦОС. Модемы строят на основе цифровых сигнальных процессоров и программируемых интегральных логических схемах (ПЛИС). Такой подход считается перспективным, поскольку имеются ПЛИС с малым потреблением тока, эти микросхемы работают с высокими тактовыми частотами и оправдывают свою стоимость [23]. Кроме того, использование программируемых логических схем позволяет получить хорошее качество манипулированного сигнала, с относительно малой номенклатурой элементной базы.

В ходе исследования данного вопроса разработана система на кристалле для формирования сигнала ММС, структурная схема которой, представлена на рис. 2. Подробно данный вопрос рассматривается в [9]. Схема содержит: персональный компьютер, преобразователь уровня сигнала, поступающего с СОМ порта, ПЛИС и ЦАП.

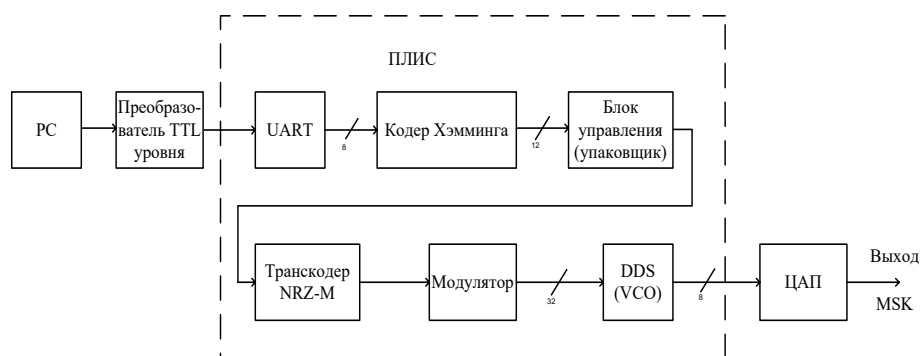


Рис. 2. Структурная схема системы на кристалле – «Формирователь ММС (MSK) сигнала»

В состав ПЛИС входит приемо-передатчик UART; кодер Хэмминга; блок упаковки; транскодер NRZ-M, обеспечивающий защиту от «обратной» работы [1], блок модулятора, формирующий коды частоты генератору DDS (Direct Digital Synthesis). С DDS сигналы поступают на ЦАП, на выходе которого получаем сигнал ММС (MSK). Блок упаковки осуществляет преобразование кода из последовательного в параллельный. Кроме того, для обеспечения вхождения в режим синхронизма демодулятора, блок упаковки добавляет в начале передаваемого пакета данных меандр (преамбулу) [1].

Схема, представленная на рис. 2, реализована на базе ПЛИС фирмы Altera семейства Cyclone II. Алгоритмы работы реализованы в САПР Quartus II и описаны на VHDL (рис. 3). Результаты моделирования в САПР Quartus II Wave Editor представлены на рис. 4 в виде временных диаграмм: сигнал на выходе блока «упаковщик», поступающий на вход транскодера NRZ-M; сигнал на выходе транскодера NRZ-M и частотно-модулированный сигнал с минимальным сдвигом (ММС) на выходе DDS.

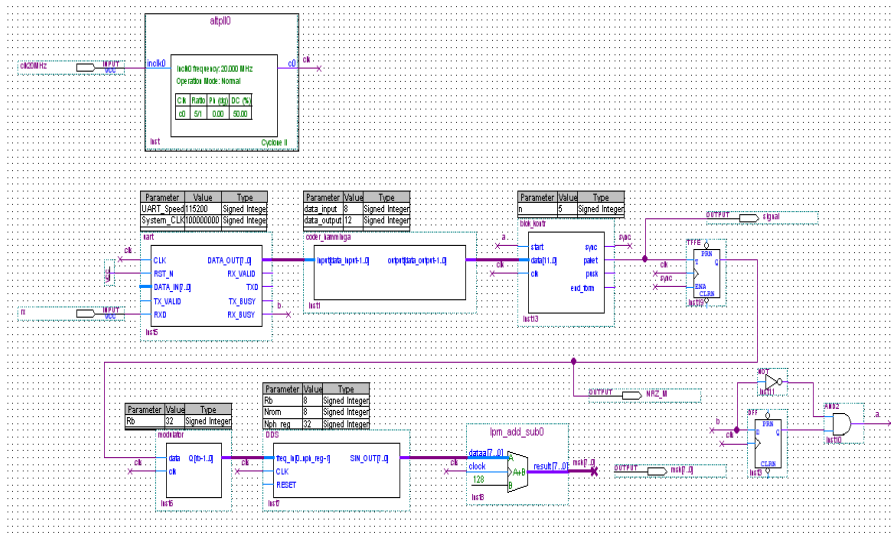


Рис. 3. Реализация системы в среде Quartus II

После моделирования и отладки схемы в программном продукте Quartus II выполнено «макетирование». Диаграммы получены с использованием осциллографа фирмы Lecroy.

Из рис. 4 видно, что частота сигнала незначительно изменяется при изменении уровня сигнала NRZ-M, поскольку индекс модуляции мал. Огибающая сигнала – постоянна, скачки фазы отсутствуют, как и должно быть для сигнала MMC. Из полученных результатов моделирования процесса формирования сигнала MMC в САПР Quartus II следует, что формирование этого сигнала может быть осуществлено с использованием микросхемы прямого синтеза частот (*Digital Direct Synthesis – DDS*).

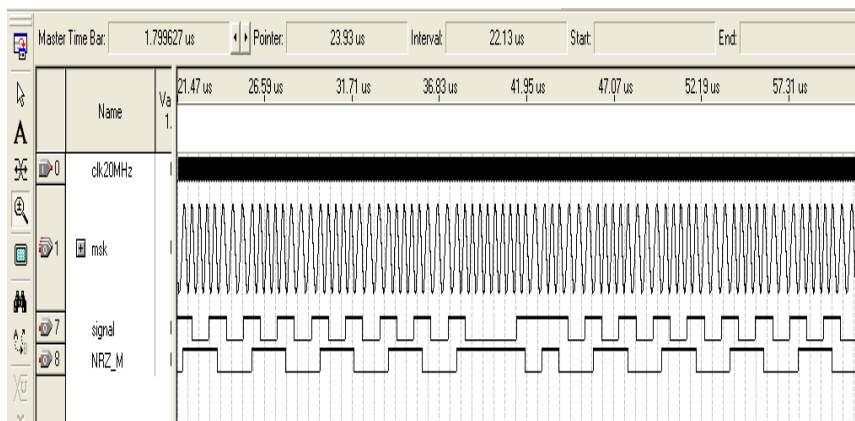


Рис. 4. Результаты моделирования в Quartus II

4. Исследование основных показателей качества цифрового формирователя сигнала MMC. Произведем сравнение спектра сигнала MMC, сформированного методом цифрового прямого синтеза частот (DDS), и спектра этого сигнала, полученного теоретически для идеального сигнала и показанного в [4].

На рис. 5 приведен спектр сигнала ММС, сформированного упомянутым цифровым методом.

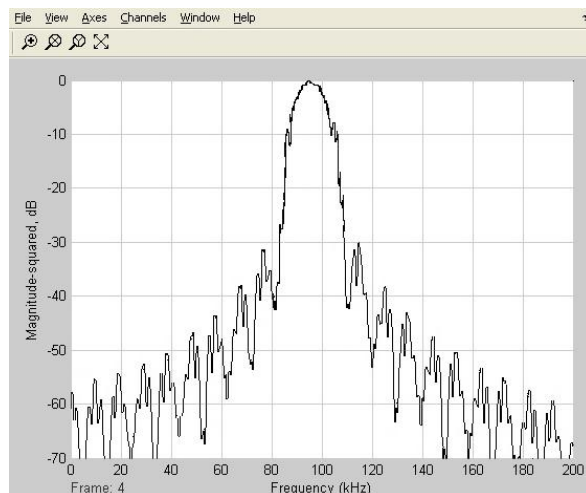


Рис. 5. Спектр сигнала ММС, сформированного цифровым методом

Из рис. 5 видно, что край основного (первого) лепестка спектра сигнала ММС имеет уровень -43 дБ. Отметим, что уровень первого лепестка теоретического спектра составляет -41 дБ [4]. Уровень края второго лепестка спектра синтезированного сигнала ММС составляет -54 дБ, а уровень этого лепестка у теоретического спектра составляет -51 дБ [4]. Как видно, разница по первому лепестку составляет 2 дБ, а по второму 3 дБ. Следует отметить, что показанный спектр определен для формирователя с преселектором, ослабляющим третий и последующий лепестки спектра. Поэтому уровень второго лепестка отличается на 3 дБ от теоретического.

Из сравнения основных показателей качества спектра сигнала, сформированного цифровым методом и спектра, полученного в [4], видно что, максимальная разница составляет 2 дБ, следовательно, спектральная эффективность сформированного цифрового сигнала близка к таковой для идеального сигнала ММС.

Выводы. Из проведенных исследований видно, что формирование сигнала ММС целесообразно проводить с помощью метода цифрового прямого синтеза частот (Digital Direct **Synthesis** – DDS). Обусловлено это тем, что нет необходимости умножения высокочастотного колебания на тригонометрические функции, базовые сигналы можно сформировать не только с заданной частотой, но и с требуемой начальной фазой. Это позволит синтезировать радиосигнал, обеспечивающий передачу больших информационных массивов, поскольку в каждом такте можно обеспечить требуемое изменение фазы, близкое к $\pm 90^\circ$, избегая при этом большого набега фаз, происходящего за большое время.

Исследования показали, что спектр сигнала, сформированного цифровым методом, незначительно отличается от спектра идеального сигнала ММС.

Например, край основного лепестка спектра идеального сигнала имеет уровень -41 дБ, а синтезированного цифровым методом составляет -43 дБ. Уровень края второго лепестка теоретического спектра составляет -51 дБ, а второго лепестка спектра синтезированного сигнала ММС составляет -54 дБ.

Полученные расхождения спектров соответствуют погрешности измерений, вызываемой конечной длительностью эксперимента и использованием преселектора, ослабляющего спектральные составляющие за пределами второго лепестка спектра.

Так как характеристики спектров синтезированного и идеального сигналов ММС близки, то спектральная эффективность сформированного цифровым методом сигнала остается столь же высокой, как и для идеального сигнала ММС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Прокис Дж.* Цифровая связь: пер. с англ. / под ред. Д.Д. Кловского. – М: Радио и связь. 2000. – 800 с.
2. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – 2-е изд., испр.: пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
3. *Крохин А.В., Беляев В.Ю., Гореликов А.В., Дрямов Ю.А., Муравьев С.А.* Методы модуляции и приема цифровых частотно-манипулированных сигналов с непрерывной фазой // Зарубежная радиотехника. – 1982. – № 4. – С. 102-103.
4. *Спилкер Дж.* Цифровая спутниковая связь: пер. с англ. / под ред. В.В. Маркова. – М.: Связь, 1979. – 592 с.
5. *Nezami M.K.* RF Architectures and Digital Signal // Processing Aspects of Digital Wireless Transceivers 2003.
6. *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. «Методы модуляции и расширения спектра»: пер. с англ. / под ред. В.И. Журавлева. – М.: Изд-во «Радио и связь», 2000.
7. *Галкин В.И.* Цифровая мобильная радиосвязь: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 432 с.
8. *Петренко В.В., Геложье Ю.А.* Формирователь сигнала модулированного с минимальным сдвигом // Теоретические и методические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем» («Системотехника-2012»): Сб. научных статей. Вып. VI. – Таганрог: ЮФУ, 2012.
9. *Dayan Adiohel Guimaraes.* Contributions to the understanding of the MSK modulations // Revista Telecommunication. MAIO DE 2008. – Vol. 11, № 01.
10. US Patent Mar. 25 2003. Optical MSK modulator. Douglas M. Gill, Hoboken, NJ (US).
11. *Outting J.* A Comparison of Modulation Techniques for Digital Radio // IEEE Transactions on communications. – December 1979. – Vol. COM 27, No. 12. – P. 1752-1762.
12. *Mathwich R.* The effect of Tandem Band and amplitude Limiting on the E_b/N_0 performance of minimum (frequency) shift keying (MSK) // IEEE Transactions on communications. – October 1977. – Vol. COM 22, No 10. – P. 1525-1539.
13. *Пархоменко Н.Г., Боташев Б.М., Колобанов П.М., Хоружий С.Г., Ефимов В.В.* Оптимальный алгоритм восстановления несущей частоты для сигналов с манипуляцией минимальным сдвигом // Радиоконтроль. – 1999. – Вып. 2. – С. 20-28.
14. *Paolo Novilini and Giovanni Guasti.* Clock Data Recovery Design Techniques for E1/T1 Based on Direct Digital Synthesis. Xilinx XAPP868 (v1.0) January 29, 2008.
15. *Петренко В.В., Геложье Ю.А.* Демодулятор MSK сигнала // Теоретические и методические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем» («Системотехника-2013»): Сб. научных статей. Вып. VII. – Таганрог: ЮФУ, 2013.
16. *Петренко В.В., Геложье Ю.А.* Модель формирователя и демодулятора MSK сигнала в MatLab // Теоретические и методические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем» («Системотехника-2013»): Сб. научных статей. Вып. VII. – Таганрог: ЮФУ, 2013.
17. Патент России 1345366 Н 04 L 27/10. 15.05.87. Формирователь сигнала. Таганрогский технологический институт им. В.Д. Калмыкова. Ю.А. Геложье, А.А. Кибирев, В.А. Втулкин, М.Ю. Геложье.
18. US Patent Apr. 6, 1982. Synchronization for MSK burst communications. Smith A. Rhodes, Falls Church, Va.

19. US Patent Apr. 15, 1986. MSK digital demodulator burst communications. Constantine Gumacos, Broomall Pa.; Nicola A. Macina, Somerville, N.J.
20. US Patent Jul. 3, 2007. Coherent demodulation of hopped MSK waveforms system and method. Eric O., Zuber, South Amana, IA (US); Terry Golubiewski, Marengo, IA (US).
21. US Patent Apr. 23, 2009. Correlation device and method for different modulation signals. Kunt-tso Chen, Fang-Yang Hsiang.
22. US Patent 7,729,440 B2 Jun. 1, 2010. Frequency modulator for digital transmission. Gerard Dussart, Saint Sebastian sur Loire (FR).
23. US Patent 7,881,409 B2 Feb. 1, 2011. Demodulator, chip and method for digital demodulating an FSK signal. Maysam Ghovanloo, Releg, NC (US); Khalil Najafi, Ann Arbor, MI (US).

REFERENCES

1. *Prokis Dzh.* Tsifrovaya svyaz' [Digital communication]: translation from English, ed. by D.D. Klovsogo. Moscow: Radio i svyaz', 2000, 800 p.
2. *Sklyar B.* Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye [Digital communication. The theoretical basis and practical application]. 2nd ed.: translation from English. Moscow: Izd. dom «Vil'yams», 2003, 1104 p.
3. *Krokhin A.V., Belyaev V.Yu., Gorelikov A.V., Dryamov Yu.A., Murav'ev S.A.* Metody modulyatsii i priema tsifrovyykh chastotno-manipulirovannykh signalov s nepreryvnoy fazoy [Methods of modulation and digital frequency-manipulated signals with continuous phase], *Zarubezhnaya radiotekhnika* [Foreign radio], 1982, No. 4, pp. 102-103.
4. *Spilker Dzh.* Tsifrovaya sputnikovaya svyaz' [Digital satellite communication]: translation from English, ed. by V.V. Markova. Moscow: Svyaz', 1979, 592 p.
5. *Nezami M.K.* RF Architectures and Digital Signal, *Processing Aspects of Digital Wireless Transceivers 2003*.
6. *Feer K.* Besprovodnaya tsifrovaya svyaz'. «Metody modulyatsii i rasshireniya spektra» [Wireless digital communication. "Methods of modulation and spread spectrum"]: translation from English, ed. by V.I. Zhuravleva. Moscow: Izd-vo «Radio i svyaz'», 2000.
7. *Galkin V.I.* Tsifrovaya mobil'naya radiosvyaz': ucheb. posobie dlya vuzov [Digital mobile radio: textbook for universities]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007, 432 p.
8. *Petrenko V.V., Gelozhe Yu.A.* Formirovatel' signala modulirovannogo s minimal'nym sdvigom [A signal generator modulated with minimum shift], *Teoreticheskie i metodicheskie problemy effektivnogo funktsionirovaniya radiotekhnicheskikh sistem» («Sistemotekhnika-2012»): Sb. nauchnykh statey* [Theoretical and methodical problems of functioning of technical systems" ("systems Engineering-2012"): Collection of scientific articles]. Issue VI. Taganrog: YuFU, 2012.
9. *Dayan Adiohel Guimaraes.* Contributions to the understanding of the MSK modulation, *Revesta Telecommunication. MAIO DE 2008*, Vol. 11, No. 01.
10. US Patent Mar. 25 2003. Optical MSK modulator. Douglas M. Gill, Hoboken, NJ (US).
11. *Outting J. A* Comparison of Modulation Techniques for Digital Radio, *IEEE Transactions on communications*, December 1979, Vol. COM 27, No. 12, pp. 1752-1762.
12. *Mathwich R.* The effect of Tandem Band and amplitude Limiting on the E_b/N_0 performance of minimum (frequency) shift keying (MSK), *IEEE Transactions on communications*, October 1977, Vol. COM 22, No. 10, pp. 1525-1539.
13. *Parkhomenko N.G., Botashev B.M., Kolobanov P.M., Khoruzhiy S.G., Efimov V.V.* Optimal'nyy algoritm vosstanovleniya nesushchey chastoty dlya signalov s manipulyatsiey minimal'nym sdvigom [The optimal reconstruction algorithm of the carrier frequency for signals with minimum shift keying], *Radiokontrol'* [The radio control], 1999, Issue 2, pp. 20-28.
14. *Paolo Novilini and Giovanni Guasti.* Clock Data Recovery Design Techniques for E1/T1 Based on Direct Digital Synthesis. Xilinx XAPP868 (v1.0) January 29, 2008.
15. *Petrenko V.V., Gelozhe Yu.A.* Demodulyator MSK signala [Demodulator MSK signal], *Teoreticheskie i metodicheskie problemy effektivnogo funktsionirovaniya radiotekhnicheskikh sistem» («Siste-motekhnika-2013»): Sb. nauchnykh statey* [Theoretical and methodological problems of functioning of technical systems" ("Systems Engineering-2013"): Collection of scientific articles]. Issue VII. Taganrog: YuFU, 2013.

16. Petrenko V.V., Gelozhe Yu.A. Model' formirovatel'ya i demodulyatora MSK signala v MatLab [Model generator and demodulator of MSK signal in MatLab], *Teoreticheskie i metodicheskie problemy effektivnogo funktsionirovaniya radiotekhnicheskikh sistem* («Sistemotekhnika-2013»): *Sb. nauchnykh, statey* [Theoretical and methodological problems of functioning of technical systems" ("systems Engineering-2013"): Collection of scientific articles], Issue VII. Taganrog: YuFU, 2013.
17. Gelozhe Yu.A., Kibirev A.A., Vtulkin V.A., Gelozhe M.Yu. Patent Rossii 1345366 H 04 L 27/10. 15.05.87. Formirovatel' signala [A signal generator]. Taganrogskiy tekhnologicheskii institut im. V.D. Kalmykova.
18. US Patent Apr. 6, 1982. Synchronization for MSK burst communications. Smith A. Rhodes, Falls Church, Va.
19. US Patent Apr. 15, 1986. MSK digital demodulator burst communications. Constantine Gumacos, Broomall Pa.; Nicola A. Macina, Somerville, N.J.
20. US Patent Jul. 3, 2007. Coherent demodulation of hopped MSK waveforms system and method. Eric O., Zuber, South Amana, IA (US); Terry Golubiewski, Marengo, IA (US).
21. US Patent Apr. 23, 2009. Correlation device and method for different modulation signals. Kunt-tso Chen, Fang-Yang Hsiang.
22. US Patent 7,729,440 B2 Jun. 1, 2010. Frequency modulator for digital transmission. Gerard Dussart, Saint Sebastian sur Loire (FR).
23. US Patent 7,881,409 B2 Feb. 1, 2011. Demodulator, chip and method for digital demodulating an FSK signal. Maysam Ghovanloo, Releg, NC (US); Khalil Najafi, Ann Arbor, MI (US).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Макаров.

Максимов Александр Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: kafmps@tppark.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел. 88634328058; кафедра встраиваемых систем; доцент.

Гелозе Юрий Андреевич – e-mail: rts@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел: 88634371637; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

Клименко Павел Петрович – кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

Петренко Владислав Валерьевич – АО ТНИИС; e-mail: vlad-petrenko@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Р. Люксембург, 154а; тел. 89286061763; инженер-конструктор 2 категории.

Maksimov Aleksandr Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: kafmps@tppark.ru; 81, Petrovskay street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328058; the department of embedded systems; associate professor.

Gelozhe Yury Andreevich – e-mail: rts@tsure.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371637; the department of radio engineering and telecommunication systems; associate professor.

Klimenko Pavel Petrovich – the department of radio engineering and telecommunication systems; associate professor.

Petrenko Valdislav Valerievich – JSC TNIS; e-mail: vlad-petrenko@mail.ru; 154a, R. Luksemburg, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79286061763; engineer designer 2 categories.