
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.396
DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-221-228

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ СИГНАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В РАДИОКАНАЛАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

С. В. ДВОРНИКОВ, А. В. ПШЕНИЧНИКОВ

*Военная академия связи им. С. М. Буденного, 194064, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: siracooz77@mail.ru*

Для повышения эффективности передачи данных по радиоканалам контрольно-измерительных комплексов предложена модель помехоустойчивой сигнальной конструкции на основе гексагональной структуры и 4-позиционной квадратурной модуляции. В целях повышения спектральной эффективности сигнальной конструкции обосновано использование амплитудно-фазобалансной модуляции. Реализовано устройство формирования разработанной модели.

Ключевые слова: помехоустойчивость, спектральная эффективность, сигнальные конструкции

Введение. При диагностике радиоэлектронной аппаратуры широко используются методы неразрушающего контроля [1], что позволяет получить достоверные сведения о состоянии рассматриваемого объекта. При этом особый интерес представляют методы передачи данных по радиоканалам контрольно-измерительных комплексов (КИК) на удаленные диспетчерские пункты [2]. Очевидно, что в этом случае важным фактором является выбор сигнальной конструкции как носителя информации. Традиционно для этого используются частотно-модулированные сигналы [3], обеспечивающие достаточный уровень помехозащищенности. Однако в условиях ограниченного частотного ресурса радиоканалов эффективная передача данных КИК связана с определенными сложностями.

Таким образом, поиск новых спектрально-эффективных сигнальных конструкций является актуальной задачей, имеющей важное практическое значение для систем передачи данных КИК.

Модель модуляционного формата радиоканалов передачи данных КИК. Предельные возможности системы передачи информации, согласно работе [3], оцениваются как

$$\hat{C} = F \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right), \quad (1)$$

где $P_S = E_b V$ — средняя мощность сигнала; E_b — энергия, затрачиваемая на передачу одного бита информации; V — скорость передачи информации; $P_N = N_0 F$ — средняя мощность шума в полосе частот F ; N_0 — спектральная плотность мощности шума.

Анализ формулы (1) показывает, что увеличение пропускной способности радиоканала в общем случае ограничивается его энергетическим ресурсом. Следовательно, за основу разработки сигнальной конструкции следует изначально принимать помехоустойчивые форматы. К таковым, согласно [3, 4], относится сигнал на основе QPSK (Quadrature Phase Shift Keying — квадратурная фазовая модуляция). Это обстоятельство способствовало его использованию в стандарте DVB-T2 (Digital Video Broadcasting) [5] для обеспечения эффективной передачи видеoinформации. В указанном стандарте предложено интересное решение по трансформации констелляционных диаграмм сигнальных конструкций, формируемых по принципу квадратурного синтеза [6]. В ходе данных процедур для каждой точки сигнального созвездия выбираются независимые координаты, что при демодуляции позволяет, при определенных условиях, воссоздать констелляционную диаграмму даже по одной восстановленной координате и тем самым повысить помехоустойчивость процедур демодуляции в целом. При этом энергетические параметры формируемой сигнальной конструкции остаются неизменными [7, 8].

Среди сигнальных созвездий для радиоканалов передачи данных КИК интерес представляют так называемые гексагональные структуры [8], обеспечивающие наибольшую компактность точек констелляционных диаграмм. На рис. 1 показана констелляционная диаграмма QPSK-сигнала: *а* — без трансформации; *б* — трансформированная по стандарту DVB-T2; *в* — на основе гексагональной структуры.

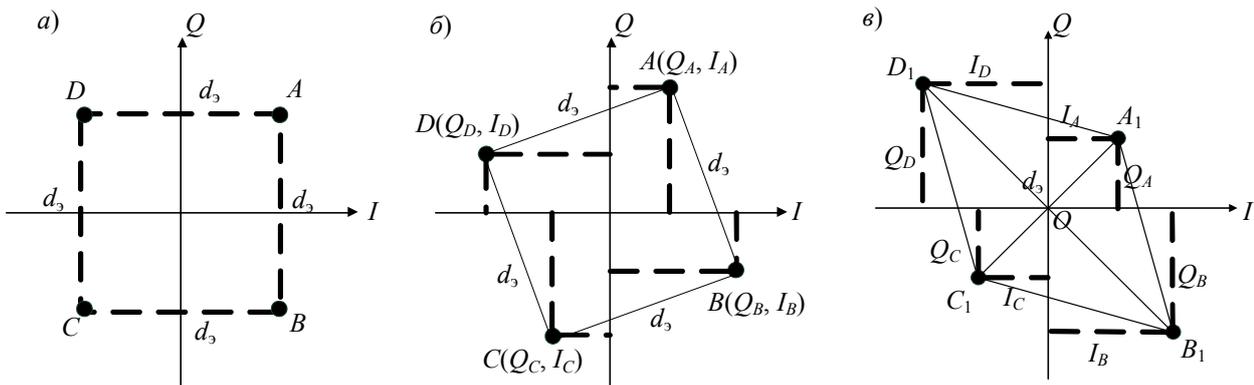


Рис. 1

Для получения аналитического выражения, описывающего трансформированный сигнал SG_4 на основе гексагональной структуры, определим значения для коэффициентов A и B в математической модели представления квадратурных сигналов, предложенной в работе [4]:

$$S_I(t) = A_i \sin\left(2\pi f_0 t + \frac{\pi}{2}\right) + B_i \sin(2\pi f_0 t), \tag{2}$$

где A и B — коэффициенты трансформации, определяющие положение точек сигнального созвездия на комплексной плоскости $\{I, Q\}$.

Модель (2) отображает сигнальную конструкцию QPSK, представленную на рис. 1, *в*, при следующих значениях A и B :

— для синфазного канала

$$A_i = \begin{cases} \sqrt{2}/2 & \text{при } L_i = 1 \text{ и } L_{i+1} = 1, \\ -\sqrt{6}/2 & \text{при } L_i = 0 \text{ и } L_{i+1} = 1, \\ -\sqrt{2}/2 & \text{при } L_i = 0 \text{ и } L_{i+1} = 0, \\ \sqrt{6}/2 & \text{при } L_i = 1 \text{ и } L_{i+1} = 0; \end{cases}$$

— для квадратурного канала

$$B_i = \begin{cases} \sqrt{2}/2 & \text{при } L_i = 1 \text{ и } L_{i+1} = 1, \\ \sqrt{6}/2 & \text{при } L_i = 0 \text{ и } L_{i+1} = 1, \\ -\sqrt{2}/2 & \text{при } L_i = 0 \text{ и } L_{i+1} = 0, \\ -\sqrt{6}/2 & \text{при } L_i = 1 \text{ и } L_{i+1} = 0, \end{cases}$$

где L — элемент импульсной битовой последовательности, т.е. данные, поступающие от комплекса в цифровом виде.

В общем случае помехоустойчивость сигнала определяется таким показателем, как минимальное евклидово расстояние d_3 — наименьшее геометрическое расстояние между точками сигнального созвездия на фазовой плоскости [3]. Согласно этому показателю сигналы на основе квадратурной амплитудной модуляции (КАМ) обладают лучшей помехоустойчивостью, чем аналогичные им многомерные сигналы, сформированные на основе фазовой модуляции [3, 8].

Между тем трансформация сигнала SG_4 , обеспечиваемая в соответствии с предлагаемым методом, приводит к уменьшению расстояния между точками A и C сигнального созвездия до величины, равной d_3 , и к увеличению расстояния между точками B и D при сохранении средней энергии сигнального созвездия (см. рис. 1, в). Аналитически это можно представить следующим образом:

$$E = |OA|^2 + |OB|^2 + |OC|^2 + |OD|^2 = |OA_1|^2 + |OB_1|^2 + |OC_1|^2 + |OD_1|^2 = E_1.$$

В работе [9] для оценки помехоустойчивости сигнальных конструкций обосновано использование вектора переходных вероятностей, который формируется на основе вероятностей ошибочного приема значений напряжений формируемого сигнала. С этих позиций помехоустойчивость предложенной сигнальной конструкции (см. рис. 1, в) выше по сравнению с приведенными на рис. 1, а, б.

Метод формирования спектрально-эффективных сигнальных конструкций. Анализ временной структуры сигнала SG_4 (рис. 2) указывает на разрыв фазы и скачкообразное изменение амплитуды в местах смены информационной битовой последовательности, что в общем случае негативно сказывается на спектральной эффективности радиоканала передачи данных КИК. Для уменьшения скачкообразного изменения фазы предлагается обеспечить плавный набег фазы и амплитуды сигнала на длительность информационного импульса. Осуществить такие процедуры можно путем дополнительной балансной модуляции каждой из квадратурной составляющих, что аналогично модуляции с минимальным набегом фазы [3, 10]. В результате обеспечивается компактность представления сигнала в частотном пространстве.

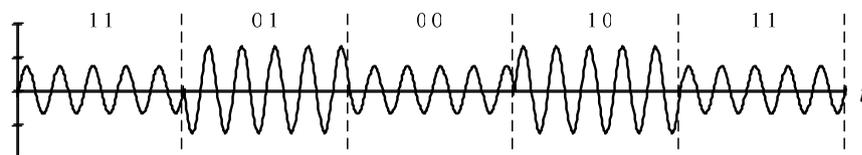


Рис. 2

Формируемый вид модуляции целесообразно определить как амплитудно-фазобалансную модуляцию (АФБМ). Результирующий сигнал будет по-прежнему соответствовать QPSK-сигналам, но обладать при этом более высокой спектральной эффективностью, т. е. частотной компактностью.

Реализация предложенного подхода к формированию сигналов на основе 4-позиционной квадратурной модуляции предусматривает выполнение следующих технических операций [11].

1. Последовательность информационных двоичных импульсов, поступающая от комплекса, разбивается на блоки, состоящие из двух символов, и формируются комбинации кодовых пар (рис. 3).

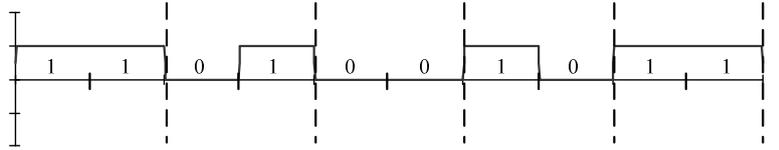


Рис. 3

2. Осуществляется манипуляция амплитуды несущего колебания в зависимости от значений импульсов битовой последовательности. Для этого несущее колебание умножают на коэффициент $A = \sqrt{3}/\sqrt{2}$ при поступлении комбинаций символов 01 или 10 или на коэффициент $B = 1/\sqrt{2}$ — при 11 или 00 (рис. 4). При этом значения коэффициентов A и B подбираются так, чтобы средняя энергия синфазного колебания (СК) была такой же, как и сигнала, определенного стандартом V.22 [12]:

$$E = |OA|^2 + |OB|^2 + |OC|^2 + |OD|^2 = (B|OA|)^2 + (A|OB|)^2 + (B|OC|)^2 + (A|OD|)^2 = E_1.$$

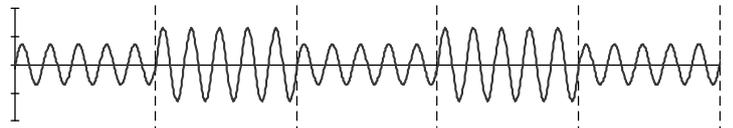


Рис. 4

3. Из опорного сигнала формируются синфазное колебание и квадратурное колебание (КК), сдвинутые по фазе на 90° относительно друг друга, причем СК сдвигается относительно КК на длительность бита (рис. 5).

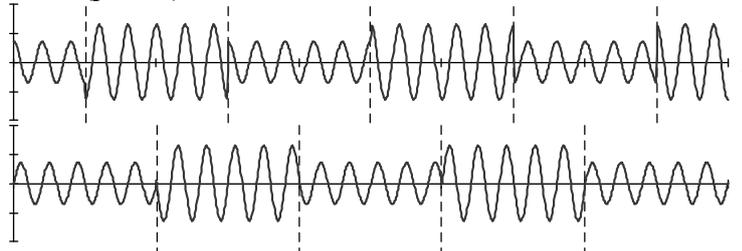


Рис. 5

4. Осуществляется балансная модуляция СК и КК посредством гармонического сигнала с частотой в два раза меньшей, чем частота следования импульсов (на рис. 6 пунктирная линия), так чтобы огибающие колебаний были равны нулю в начале и в конце каждого информационного импульса.

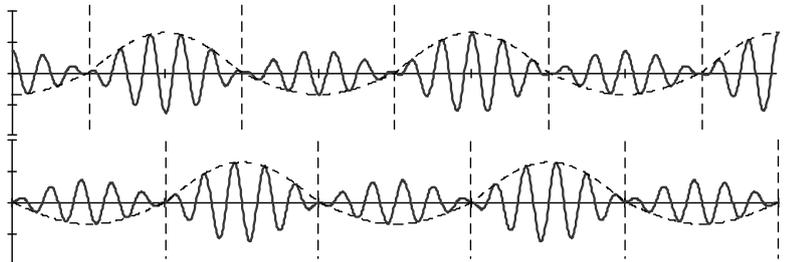


Рис. 6

5. На основе суммирования модулированных СК и КК формируется результирующий АФБМ-сигнал (рис. 7).

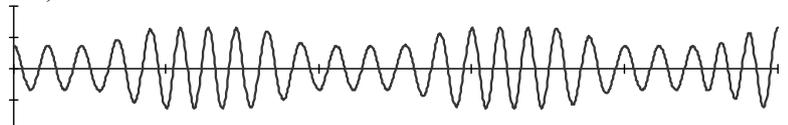


Рис. 7

Совокупность рассмотренных процедур целесообразно определить как метод формирования АФБМ.

Таким образом, в сформированных сигналах изменения значений фаз и амплитуд происходят плавно на протяжении информационного импульса. Поэтому спектр АФБМ-сигнала является более компактным, а затухание его частотных составляющих происходит за пределами основного лепестка.

Структурная схема устройства, реализующего разработанный метод, представлена на рис. 8, где ЗГ — задающий генератор, БУ — блоки умножения, ФВК — блок формирования весовых коэффициентов, ДЧ — делитель частоты, ФВ — фазовращатели, ИС — источники сообщений, С — синхронизаторы, ФМ — фазовые манипуляторы, БМ — балансные модуляторы.

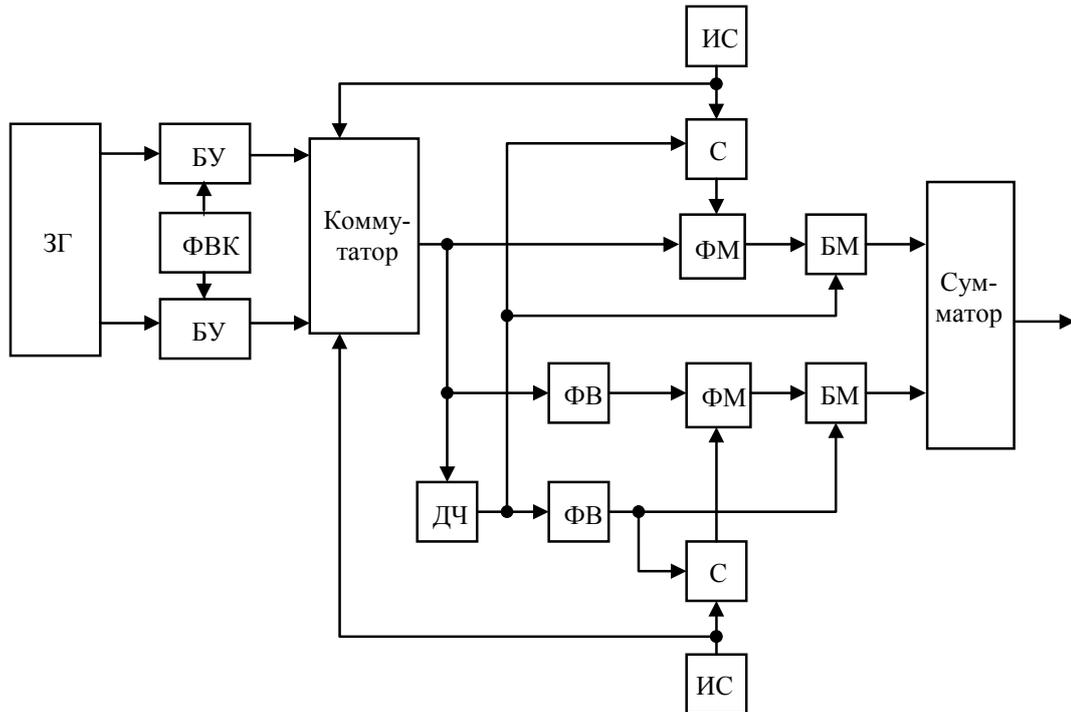


Рис. 8

Основным отличием предлагаемой схемы от известных является наличие в ней двух балансных модуляторов, благодаря которым амплитуда квадратурной и синфазной составляющих изменяется не скачкообразно, а плавно на протяжении длительности импульса.

Сравнительная характеристика спектров QPSK- и АФБМ-сигналов, полученная при моделировании в среде MathCAD с использованием разработанной методики, представлена на рис. 9 и в таблице.

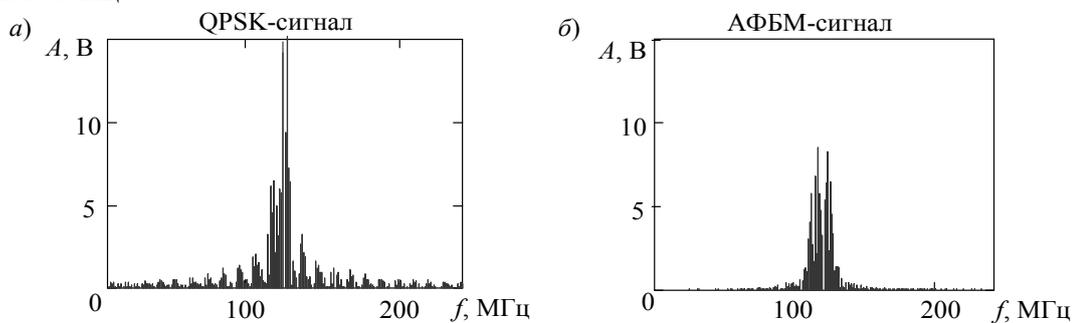


Рис. 9

$\Delta E, \%$	99	98	97	96	95	92	85
$\frac{\Delta f_{\text{QPSK}}}{\Delta f_{\text{АФБМ}}}$	5,5	3,4	2,6	2,2	1,9	1,2	1,1

В верхней строке таблицы указана суммарная энергия, а в нижней строке показано, насколько меньшая полоса частот требуется АФБМ-сигналу для локализации такого же значения энергии, как и QPSK-сигналу.

Анализ полученных результатов показывает, что АФБМ-сигналы обладают лучшей локализацией энергии в частотной области, чем QPSK-сигналы. Так, полоса частот, в пределах которой сосредоточено 98 % энергии спектра, для АФБМ-сигналов в 3,4 раза меньше, чем для QPSK-сигналов. Спектральная эффективность сигналов выравнивается за пределами 85 % локализации энергии. Следовательно, применение АФБМ-сигналов наиболее эффективно при высоких значениях (> 92 %) локализации спектральной энергии.

Для энергетической оценки формируемой сигнальной конструкции выберем $\Delta E=96\%$, чему соответствует $\Delta f_{\text{QPSK}}/\Delta f_{\text{АФБМ}} = 2,2$ (см. таблицу). Таким образом, в выделенной полосе частот возможно формирование либо одного 4-позиционного QPSK-сигнала при двух одновременно передаваемых импульсах битовой последовательности, либо двух 4-позиционных АФБМ-сигналов при четырех одновременно передаваемых импульсах. Другими словами, в выделенной полосе частот применение АФБМ-сигналов вместо QPSK позволит повысить скорость передачи информации в 2 раза.

Для количественной оценки эффективности АФБМ-сигналов авторами был проведен эксперимент по передаче и приему информационных битов в радиоканале с аддитивным белым гауссовым шумом с использованием QPSK- и АФБМ-сигналов. В среде Simulink построены имитационные модели радиолиний, по каждой из которых передан 1 млн информационных бит. Сформирована статистика неправильно принятых битов, на основе которой получена зависимость вероятности „битовой“ ошибки (p_b) от отношения сигнал/шум: $h_0 = P_S/P_N$, отражающая оценку помехоустойчивости сигналов [3] (рис. 10).

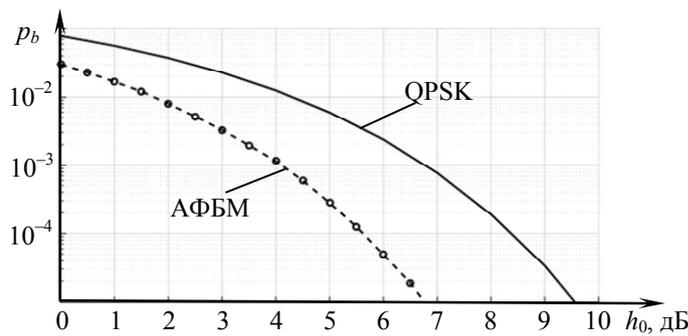


Рис. 10

Анализ представленной зависимости показывает, что АФБМ-сигналы обладают лучшей помехоустойчивостью. Так, выбранное в качестве оценки сигналов [3] значение $p_b=10^{-5}$ для АФБМ-сигналов достигается при значении h_0 , на 3 дБ меньшем, чем для QPSK-сигналов. С другой стороны, энергетический выигрыш в 3 дБ, при фиксированных значениях h_0 и выделенной полосе частот Δf , приводит к увеличению скорости передачи информации в 2 раза.

Заключение. Особенность разработанных модели помехоустойчивой сигнальной конструкции и метода ее формирования для передачи данных по радиоканалам контрольно-измерительных комплексов заключается в том, что в основе модели и метода лежат процедуры трансформации констелляционной диаграммы помехоустойчивого QPSK-сигнала гексагональной структуры. Представленные технические решения позволяют не только обеспечить спектральную компактность сигнала, но и сохранить его помехоустойчивость.

Предложенный метод может быть применим к любым видам сигнальных конструкций, формируемых на основе квадратурных составляющих. Модель АФБМ-сигнала может быть использована для передачи видеоинформации. Перспективные исследования связаны с применением разработанного метода к сигнальным конструкциям на основе КАМ-16, КАМ-32,

КАМ-64 [13] для увеличения пропускной способности радиоканалов КИК, а также для обработки акустических сигналов [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каневский И. Н., Сальников Е. Н. Неразрушающие методы контроля: Учеб. пособие. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. 243 с.
2. Кулешов С. В. Потенциальные свойства цифровых каналов передачи данных // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 11. С. 17—20.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2003. 1104 с.
4. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Бурыкин Д. А. Структурно-функциональная модель сигнального созвездия с повышенной помехоустойчивостью // Информационная и космос. 2015. № 2. С. 4—7.
5. Framing Structure, Channel Coding and Modulation for a Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2). DVB Document A122, June. 2008.
6. Дворников С. В., Устинов А. А., Русин А. А., Литкевич Г. Ю., Боголепов Г. С., Бурыкин Д. А. Анализ факторов, влияющих на помехоустойчивость сигналов квадратурной амплитудной манипуляции // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2014. № 1. С. 3—11.
7. Дворников С. В., Погорелов А. А., Пшеничников А. В., Литкевич Г. Ю. Теоретические положения трансформации констелляционных диаграмм сигнальных конструкций // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2015. № 6 (23). С. 119—126.
8. Прокис Дж. Цифровая связь / Пер. с англ.; Под. ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
9. Гужва А. Ю., Дворников С. В., Русин А. А., Пшеничников А. В. Методика трансформации сигнального созвездия КАМ-16 с изменением его формы // Электросвязь. 2015. № 2. С. 28—31.
10. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Манаенко С. С. Помехоустойчивая модель сигнала КАМ-16 с трансформированным созвездием // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 9. С. 685—689.
11. Пат. 2579951 РФ. Способ формирования сигналов четырехпозиционной квадратурной манипуляции / Д. В. Бурыкин, С. В. Дворников, С. С. Дворников, А. В. Пшеничников, Е. Ю. Пономарев. 12.01.2015.
12. Протоколы модуляции [Электронный ресурс]: <<http://www.vicgain.ru/modems/6.htm>>.
13. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Русин А. А., Дворников А. С. Повышение помехоустойчивости сигналов КАМ-16 с трансформированными созвездиями // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2014. № 2. С. 51—56.
14. Алексеев А. А., Аладинский В. А., Железняк В. К., Комарович В. Ф., Дворников С. В. Применение методов частотно-временной обработки акустических сигналов для анализа параметров реверберации // Науч. приборостроение. 2001. Т. 11, № 1. С. 65—76.

Сведения об авторах

Сергей Викторович Дворников

— д-р техн. наук, профессор; Военная академия связи им. С. М. Буденного; кафедра радиосвязи; E-mail: practicdsv@yandex.ru

Александр Викторович Пшеничников

— канд. техн. наук, доцент; Военная академия связи им. С. М. Буденного; кафедра радиосвязи; E-mail: siracooz77@mail.ru

Рекомендована кафедрой радиосвязи

Поступила в редакцию 06.12.16 г.

Ссылка для цитирования: Дворников С. В., Пшеничников А. В. Формирование спектрально-эффективных сигнальных конструкций в радиоканалах передачи данных контрольно-измерительных комплексов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 3. С. 221—228.

**DESIGN OF SPECTRAL-EFFICIENT SIGNAL CONSTRUCTION
IN RADIO DATA TRANSMISSION CONTROL AND MEASURING COMPLEXES****S. V. Dvornikov, A. V. Pshenichnikov**

*S. M. Budyonny Military Academy of Telecommunications, 194064, St. Petersburg, Russia
E-mail: siracooz77@mail.ru*

A model of noise-immune signal construction is developed to improve the efficiency of data transmission by radio control and measuring complexes. The proposed construction is based on a hexagonal structure and 4-way quadrature modulation. The use of amplitude and phase balanced modulation is shown to increase the spectral efficiency of the signal construction. A device is implemented for the developed model realization.

Keywords: noise immunity, spectral efficiency, signal design

Data on authors

- Sergey V. Dvornikov** — Dr. Sci., Professor; S. M. Budyonny Military Academy of Telecommunications; Department of Radio Communication; E-mail: practicsv@yandex.ru
- Alexander V. Pshenichikov** — PhD, Associate Professor; S. M. Budyonny Military Academy of Telecommunications; Department of Radio Communication; E-mail: siracooz77@mail.ru

For citation: *Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V. Design of spectral-efficient signal construction in radio data transmission control and measuring complexes // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 3. P. 221—228 (in Russian).*

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-221-228