

## ОРГАНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА НАВИГАЦИОННЫХ ПОСТОВ И ОБЪЕКТА НАВИГАЦИИ В АКТИВНО-ПАССИВНОЙ СИСТЕМЕ

Г. Н. Ульянов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор

Н. Г. Черенок<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

И. О. Игнатьев<sup>а</sup>, преподаватель

<sup>а</sup>Михайловская военная артиллерийская академия, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** широкое применение беспилотных летательных аппаратов, выполняющих задачи на ограниченном пространстве, требует специальных каналов передачи данных, которые будут функционировать в условиях воздействия преднамеренных помех. **Цель:** разработка помехоустойчивых методов формирования и передачи сообщений для таких каналов связи. **Результаты:** предложены методы, изменяющие классическую систему кодирования и обработки дискретного сообщения, которые позволяют передавать  $N$ -битный символ за один такт с декодированием передаваемого сообщения в базе Чебышёва. Для этого выбран носитель, отличный от гармонического, — это импульсы, описываемые классическими ортогональными полиномами Чебышёва первого рода.  $N$ -битный символ формируется путем простого суммирования импульсов Чебышёва с возрастающими номерами. Импульсы, кодирующие «1», имеют нулевую начальную фазу, импульсы, кодирующие «0», — противофазны. Принятый  $N$ -битный символ дискретизируется аналого-цифровым преобразователем с использованием тактовых импульсов, подчиняющихся закону косинуса, и обрабатывается стандартной программой быстрого преобразования Фурье. На выходе схемы обработки получаем параллельный код из положительных и отрицательных импульсов, соответствующий переданному сообщению. Оценка вероятности битовой ошибки для отношения сигнал/шум, равного  $-1$  дБ, при передаче 64-битного символа соответствует ошибке современных систем передачи данных при отношении сигнал/шум более  $+6$  дБ. **Практическая значимость:** предлагаемые методы кодирования и обработки, кроме выигрыша в помехоустойчивости, позволяют увеличить скорость обмена данными, а также избавиться от межсимвольной интерференции, причина которой здесь просто исключена, что дает возможность в той же полосе частот традиционного гармонического базиса передавать больший объем информации.

**Ключевые слова** — несинусоидальный полиномиальный переносчик, передача одним импульсом, обработка в базе Чебышёва.

### Введение

Локальные навигационные системы (ЛНС) активно-пассивного типа в своем составе имеют четыре навигационных поста, располагающихся на беспилотном летательном аппарате (БПЛА). Каждый из них имеет передающую и антенную системы. Высокочастотный сигнал должен на борту объекта навигации обеспечить получение:

- времени прихода сигнала от навигационного поста со своим идентификационным признаком;
- сокращенных координат (пятизначных) этого же навигационного поста.

Указанные данные являются исходными для реализации алгоритма определения координат объекта навигации на борту БПЛА.

Целью работы является разработка новых методов формирования и обработки сообщений для ЛНС, базирующейся на БПЛА.

### Способ формирования сигнала на борту ЛНС

Учитывая динамику функционирования ЛНС (при обязательном учете помехового воздействия), следует в первую очередь позаботиться о выборе переносчика информации для рассматриваемой

системы. Традиционные переносчики, используемые в качестве модели гармонические функции, практически исчерпали свои возможности как по объему и скорости передачи, так и по помехозащищенности. Увеличивая объем и скорость передачи, уменьшаем помехоустойчивость и наоборот.

В то же время сигналы с синусоидальными переносчиками являются весьма частным случаем более сложных сигналов, у которых переносчики вообще несинусоидальны. Модель таких колебаний имеет вид [1]

$$u(t) = A(t)H[\Phi(t)]. \quad (1)$$

Известных авторам практических предложений несинусоидальных переносчиков всего два — функции Уолша [2, 3] и полиномы Эрмита [4, 5].

Авторы предлагают для организации информационного обмена использовать переносчик, моделью которого служит один из классических ортогональных полиномов Якоби — многочлен Чебышёва первого рода:

$$T_n(x) = \cos[n \arccos(x)], \quad (2)$$

где  $x = \frac{2t}{\tau_n}$ ,  $-1 \leq x \leq 1$ ;  $n = 1, 2, \dots$  — номер сигнала.

Временные и спектральные диаграммы предлагаемого носителя представлены на рис. 1, а и б соответственно.

Импульсы Чебышёва с увеличением номера сигнала ( $n \geq 8$ ) являются радиоимпульсами с фазовой модуляцией, переходящей в частотную, а их односторонние спектры смещаются в область более высоких мгновенных частот при возрастании номера сигнала.

От классических полиномов  $T_n(x)$ , широко применяемых в прикладной математике, выбранная модель отличается тем, что не использует весовую функцию. Однако ортогональность свою импульсы сохраняют.

Огибающая импульса Чебышёва имеет прямоугольную форму, т. е. переносчик максимально использует площадь импульса.

Сравнивая соотношение (2) с моделью (1), отметим, что  $A(t) = 1$ , а полная фаза колебания  $\Phi(t) = n \arccos \frac{2t}{\tau_n}$ .

Модель (2) является тригонометрической формой полинома Чебышёва первого рода, поэтому назовем выбранный переносчик полиномиальным.

Мгновенная частота импульса Чебышёва определяется как производная от полной фазы

$$|f(t)| = \frac{n}{\pi \tau_n \sqrt{1 - \left(\frac{2t}{\tau_n}\right)^2}} \quad (3)$$

и зависит от двух параметров — номера сигнала  $n$  и его длительности  $\tau_n$  (рис. 2).

Параметры графика соответствуют частоте сантиметрового диапазона. Гармоники наивысших частот дают малый вклад в энергетику импульса.

$N$ -битный символ формируется путем простого суммирования импульсов Чебышёва с возрастающими номерами. Импульсы, кодирующие двоичную «1», имеют нулевую начальную

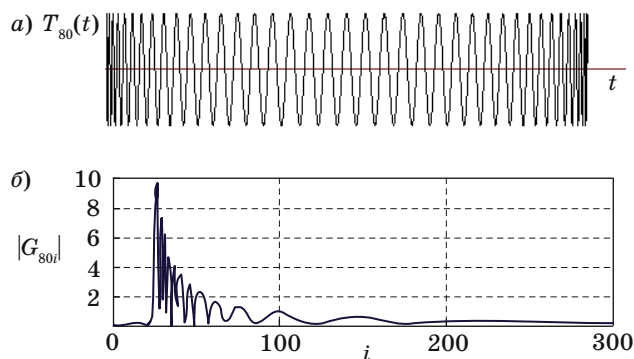


Рис. 1. Импульс Чебышёва и фурье-спектр импульса Чебышёва для  $n = 80$

фазу, импульсы, кодирующие двоичный «0», — фазу  $\pi$ .

Такая кодировка позволяет обеспечить наилучшую из возможных помехоустойчивость. Результат суммирования показан на рис. 3.

Сформированный импульс имеет такое же распределение мгновенных частот, как и его составляющие (ср. рис. 1, а и 3). Фурье-спектр сформированного импульса представлен на рис. 4.

Начальная частота спектра, рассчитанная по соотношению (3) при  $t = 0$ , равна 964 МГц, а оценки частоты спектра при уровне гармоник, равном  $-20$  и  $-40$  дБ, имеют значения 1,96 и 9,517 ГГц соответственно. Такие параметры определяют сформированный импульс как сверхширокополосный (UWB) сигнал.

Таким образом, в результате объединения всех разрядов информации (двоичных сигналов) в одном импульсе, который по связной терминологии называют также символом, передается символ, содержащий  $N$  двоичных разрядов.

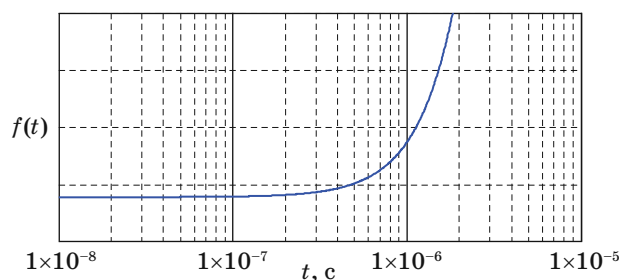


Рис. 2. Изменение мгновенной частоты в импульсе Чебышёва

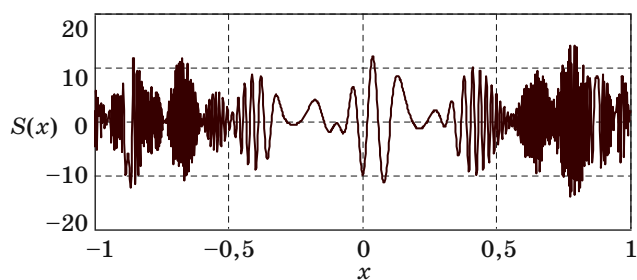


Рис. 3. Импульс, содержащий 48-битный символ

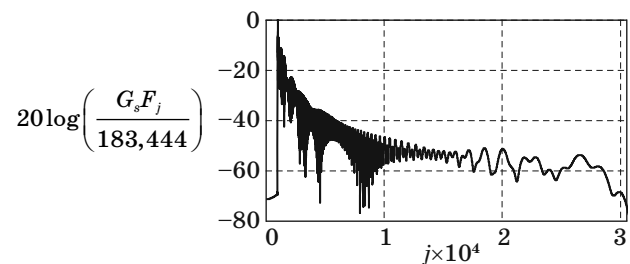


Рис. 4. Фурье-спектр сформированного символа

Объем передаваемой информации в единицу времени в двоичных символах достигает величины [6]

$$R = \frac{\log_2 L}{T} = F_T \log_2 L,$$

где  $L$  — число уровней, из которых можно производить выбор в каждом такте;  $T$  — длительность тактового интервала.

Скорость передачи нашего символа [бит/с] зависит от количества двоичных единиц информации в импульсе. При  $N = 32$   $R = \frac{5}{T}$  [бит/с].

Например, если тактовые импульсы идут с частотой 33 МГц (принята в ЭВМ Багет [7]), то при  $N = 48$   $R = \log_2 48 \cdot 33 \cdot 10^6 = 5,585 \cdot 33 \cdot 10^6 = 184$  Мбит/с.

**Способ обработки сигнала на приемном пункте**

В пункте обработки производится преобразование принятого импульса в цифровой код. Для этого применяем функциональное квантование [8], в соответствии с которым тактовые импульсы, подаваемые на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), имеют  $\Delta t$ , изменяющиеся по закону косинуса (рис. 5).

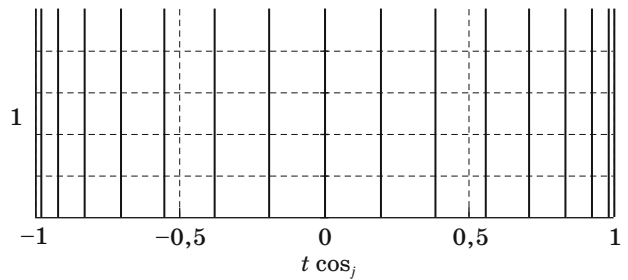
Такая дискретизация позволяет превратить принятый сигнал в сумму гармоник<sup>1</sup>. Для этой реализации, записанная в регистр с выхода АЦП, считывается в обычном линейном времени. Результат этих подготовительных действий с импульсом, представленным на рис. 3, показан на рис. 6, а.

Теперь обрабатываемый символ состоит не из суммы импульсов Чебышёва  $T_n(x)$ , а из суммы гармоник  $\cos(nx)$ , его фурье-спектр показан на рис. 6, б.

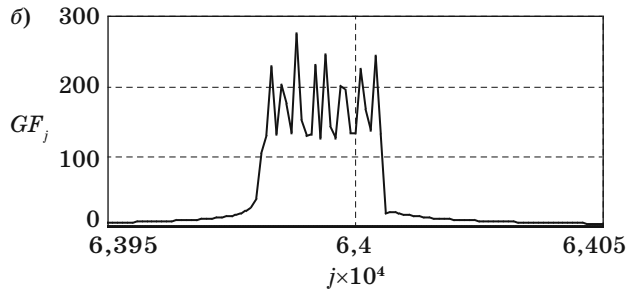
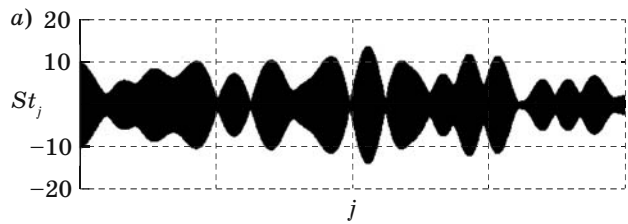
К этой сумме добавляем зеркальную копию [8] и применяем стандартную процедуру быстрого преобразования Фурье для получения сообщения в параллельном коде уже в базе Чебышёва. Результат обработки процедурой быстрого преобразования фурье-импульса (см. рис. 6, а) показан на рис. 7. Здесь каждая позиция, начиная с номера 3030, соответствует двоичному нулю при отрицательной полярности и двоичной единице при положительной полярности.

Для оценки помехоустойчивости предлагаемой специальной системы обмена данными в ЛНС проведено моделирование обработки сигнала, являющегося 64-битным символом при воздействии аддитивной шумовой помехи с гауссовым распределением плотности вероятности.

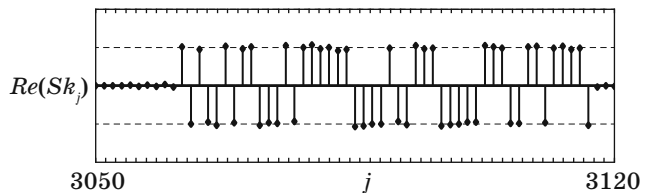
<sup>1</sup> График полинома Чебышёва первого рода — это проекция гармоники, описываемой  $\cos[\Phi(t)]$ , на цилиндр.



■ Рис. 5. Иллюстрация импульсов нелинейного времени для 16 тактов



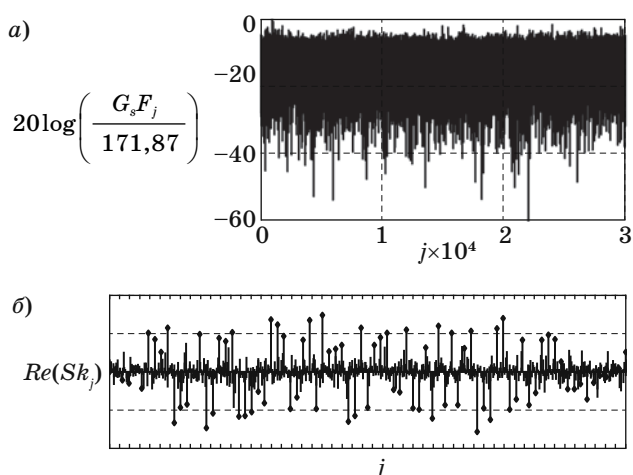
■ Рис. 6. Преобразованный в сумму гармоник 48-битный символ (а) и его фурье-спектр (б)



■ Рис. 7. Спектральная диаграмма напряжения, являющегося суммой 48 классических ортогональных полиномов Чебышёва первого рода с номерами от  $n = 3030$  до  $n = 3077$ , в базе Чебышёва

Фурье-спектр такого импульса при  $\sigma_0 = 5,618$  (отношению сигнал/помеха соответствуют  $-15$  дБ) представлен на рис. 8, а, а спектр в базе Чебышёва — на рис. 8, б.

На рис. 8, б наблюдаем, что в результате воздействия помехи происходит как уменьшение амплитуды бита, являющегося составляющей чебышёвского базиса, так и ее увеличение. Выставив уровень порога для положительных и отрицательных импульсов, считываем передаваемую информацию.



■ **Рис. 8.** Фурье-спектр напряжения (а) и спектральная диаграмма напряжения в базисе Чебышёва (б), являющегося суммой 64 классических ортогональных полиномов Чебышёва первого рода с номерами от  $n = 3030$  до  $n = 3093$ , при воздействии аддитивной шумовой помехи ( $\sigma_0 = 5,618$ )

Ошибкой, появляющейся при воздействии помехи, считается изменение знака чебышёвской составляющей спектра с плюса на минус и с минуса на плюс в любом бите из 64.

Для оценки вероятности ошибки проведено по 64 опыта обработки сигнала, являющегося 64-битным символом с шумом, для каждого отношения сигнал/шум, соответствующего  $-0,5$ ;  $-1,0$ ;  $-1,5$ ;  $-2,0$  дБ.

Результаты представлены на рис. 9. Оценка вероятности ошибки производилась на один бит информации. При помехе, равной сигналу, ошибки не обнаружены. При отношении сигнал/шум, равном  $-0,5$  дБ, появились единичные ошибки в отдельных битах.

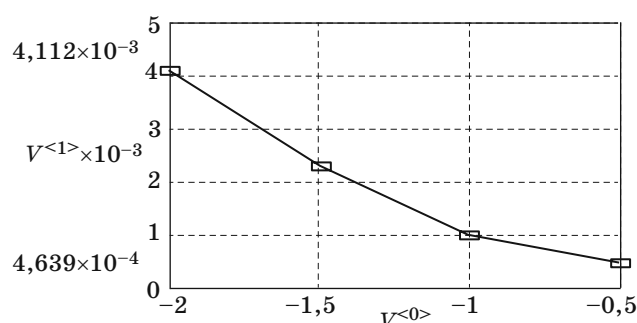
Несколько двойных ошибок имели место только при отношении сигнал/шум, равном  $-2$  дБ.

Сравнивая полученный результат с теоретическими оценками помехоустойчивости современных систем выделения сигнала [9], констатируем лучшую помехоустойчивость предлагаемого метода. Действительно, значение вероятности битовой ошибки, равное  $10^{-3}$  в системах с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ-64), достигается при отношениях сигнал/шум более 16 дБ [9].

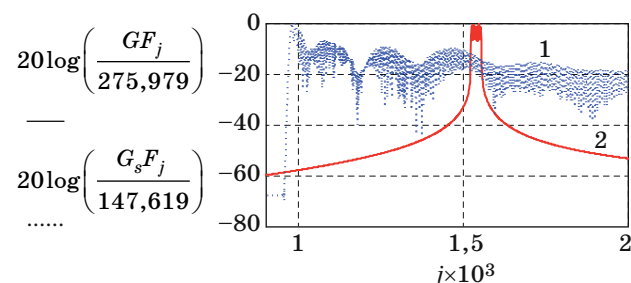
При практической реализации специальной системы передачи данных следует учесть характеристику реального канала связи, которая может ухудшить полученные оценки.

Физическая природа выигрыша проиллюстрирована на рис. 10, где представлены фурье-спектры принятого и дискретизированного импульсов с оценками значений по частотной оси.

Начальное значение частоты спектра сформированного импульса, рассчитанное по соотноше-



■ **Рис. 9.** Результат оценки помехоустойчивости сигнала, являющегося суммой 64 импульсов Чебышёва 1-го рода с номерами от  $n = 8$  до  $n = 71$ , при воздействии аддитивной шумовой помехи с гауссовым законом распределения



■ **Рис. 10.** Сравнение фурье-спектров сформированного и обработанного импульсов: 1 — спектр суммы импульсов Чебышёва; 2 — спектр суммы гармоник

нию (3), в 1,6 раза меньше центральной частоты спектра импульса на выходе АЦП.

Другая особенность — практически прямоугольная форма спектра. Оценка ширины спектра составляет 35 МГц. Главный же эффект в том, что уровень мешающих гармоник стал после обработки на 40 и более децибел меньше. За счет этого и происходит уменьшение влияния шума и широкополосной помехи.

### Заключение

Система формирования и обработки, основанная на системе полиномиальных переносчиков, при организации информационного обмена навигационных постов и объекта навигации в активно-пассивной системе позволяет получить следующие положительные эффекты:

- вести обмен данными в ЛНС при отношении сигнал/шум меньше единицы;
- обеспечить значение вероятности битовой ошибки, равное  $10^{-3}$  при отношении сигнал/шум  $-1$  дБ.

Предлагаемые методы кодирования и обработки обеспечивают выигрыш в помехоустойчивости, увеличение скорости обмена данными



и скрытности информационного обмена, передача большего объема информации в той же полосе частот традиционного гармонического базиса.

Такое кодирование позволяет также избавиться от межсимвольной интерференции [9, 10], причина которой здесь исключена.

## Литература

1. Агеев Д. В. Интенсивность сигнала с несинусоидальными переносчиками // Радиотехника. 1975. Т. 30. № 4. С. 1–8.
2. Harmuth H. F. *Transmission of Information by Orthogonal Functions*. — Berlin, Heidelberg, New York, 1970. — 262 p.
3. Агаев Ф. Г. Обработка сигналов синхронной системой передачи информации // Петербургский журнал электроники. 2002. № 2. С. 44–48.
4. A Novel Pulse Design Based on Hermite Function for UWB Communications // The Journal of China Uni-

- versities of Posts and Telecommunications. 2006. Vol. 13. N 1. P. 49–52.
5. Gomes J., Mishra B. K. Image Transmission Using Hermite Based UWB Communication with Simple Receiver // Intern. Journal of Ubiquitous Engineering. Oct. 2011. Vol. 6. N 4. P. 13–28.
6. Першин В. Г. Формирование и генерирование сигналов в цифровой радиосвязи. — Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2015. — 614 с.
7. Изделие 1Б33. А-ТГ2.009.004. ИЭ. — М.: МО, 1983. — 52 с.
8. Черенок Н. Г. Системы цифровой обработки сигналов. Основы цифровой обработки. Ч. 1. — СПб.: Военный университет ПВО (филиал), 2001. С. 50–56.
9. Proakis J. G. *Digital Communications*. — McGraw-Hill, 1995. — 1004 p.
10. Сергиенко А. Б. Цифровая связь. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. — 163 с.

UDC 621.391.8

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.91

## Information Exchange between Navigation Posts and a Navigation Object in an Active-Passive System

Ulianov G. N.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, gulianov@yandex.ru

Cherenok N. G.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, ncherenok@ya.ru

Ignatiev I. O.<sup>a</sup>, Lecturer, ioi73@mail.ru

<sup>a</sup>Mikhailovskaya Military Artillery Academy, 22, Komsomola St., 195009, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Extensive use of air drones performing tasks in a limited space requires special data transmission channels which can function in a purposeful noise environment. **Purpose:** The goal is developing noise-proof methods of forming and transmitting messages in such data transmission channels. **Results:** We have offered methods which modify the classic system of encoding and processing a discrete message. They allow you to transmit an N-bit symbol at one time cycle, decoding the transmitted message in Chebyshev basis. Pulses described by classical orthogonal Chebyshev polynomials of the first kind were chosen as a carrier, different from a harmonic one. An N-bit symbol is formed by simple summarization of Chebyshev pulses with ascending numbers. Pulses encoding “1” have a zero initial phase, while pulses encoding “0” are antiphase. A received N-bit symbol is discretized by an analog-digital converter with timing pulses complying with the cosine law, and processed by a standard fast Fourier transform program. At the output of the processing scheme, we have a parallel code made of positive and negative pulses corresponding to the transmitted message. The estimated probability of a bit error for the ratio  $U_s/U_n = -1$  dB when transmitting a 64-bit symbol corresponds to an error of the existing data transmission systems at  $U_s/U_n > +6$  dB. **Practical relevance:** The proposed methods of data encoding and processing, beside the gain in interference immunity, can increase the speed of data exchange and allow you to get rid of inter-symbol interference, the cause of which is simply excluded here. This provides the possibility to transmit a higher amount of information in the same frequency band of the traditional harmonic basis.

**Keywords** — Non-Sinusoidal Polynomial Carrier, Single Pulse Transmission, Chebyshev Processing.

## References

1. Ageev D. V. The Intensity of the Signal is not Sinusoidal Vector Control. *Radiotekhnika*, 1975, vol. 30, no. 4, pp. 1–8 (In Russian).
2. Harmuth H. F. *Transmission of Information by Orthogonal Functions*. Berlin, Heidelberg, New York, 1970. 262 p.
3. Agaev F. G. Signal Processing Simultaneous Information Transfer System. *Peterburgskii zhurnal elektroniki*, 2002, no. 2, pp. 44–48 (In Russian).
4. A Novel Pulse Design Based on Hermite Function for UWB Communications. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2006, vol. 13, no. 1, pp. 49–52.
5. Gomes J., Mishra B. K. Image Transmission Using Hermite Based UWB Communication with Simple Receiver. *International Journal of Ubiquitous Engineering*, October 2011, vol. 6, no. 4, pp. 13–28.
6. Pershin V. G. *Formirovanie i generirovanie signalov v tsifrovoi radiosvazi* [The Formation and Generation of Signals in Digital Radio]. Minsk, Novoe znanie Publ.; Moscow, INFRA-M Publ., 2015. 614 p. (In Russian).
7. *Izdelie 1B33. A-TG2.009.004. IE* [Product 1B33. A-TG2.009.004. IE]. Moscow, Ministerstvo obrony Publ., 1983. 52 p. (In Russian).
8. Cherenok N. G. *Sistemy tsifrovoi obrabotki signalov. Osnovy tsifrovoi obrabotki. Ch. 1* [System of Digital Processing of Signals. Fundamentals of Digital Processing. Part 1]. Saint-Petersburg, Voennyi universitet PVO Publ., 2001, pp. 55–56 (In Russian).
9. Proakis J. G. *Digital Communications*. McGraw-Hill, 1995. 1004 p.
10. Sergienko A. B. *Tsifrovaia sviaz'* [Digital Communications]. Saint-Petersburg, “LETI” Publ., 2012. 163 p. (In Russian).