

УДК 621.391

Д. И. Каплун, В. В. Гульванский, И. И. Канатов,
Д. М. Клионский, А. Б. Хачатурян, Д. Н. Бутусов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
В. Ф. Лапицкий, В. И. Бобровский
ПАО "Интелтех" (Санкт-Петербург)

Разработка и исследование демодуляторов сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты¹

Представлены разработка и исследования различных методов демодуляции частотно-манипулированных сообщений в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты при заданном диапазоне изменения отношения "сигнал/шум" (ОСШ). Разработанные методы основаны на использовании спектрального и корреляционного анализа. На основе разработанной в MATLAB/Simulink модели канала связи вычислена ошибка исследуемых методов демодуляции при различных значениях ОСШ. В результате исследования определен наилучший метод демодуляции при заданном ОСШ.

Демодуляция, частотно-манипулированный сигнал, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, автокорреляционная функция

Псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ) – метод передачи информации по радиоканалу, особенность которого заключается в смене несущей частоты в процессе передачи сообщения. Частота меняется в соответствии с псевдослучайной последовательностью чисел, известной как отправителю, так и получателю. Метод повышает помехозащищенность канала связи [1].

Интенсивное развитие метода ППРЧ началось в 1941 г., когда был зарегистрирован первый патент на устройство помехоустойчивого радиуправления противокорабельной торпедой. В устройстве был описан механизм передачи сигналов с ППРЧ с самолета [2].

Метод ППРЧ используется как в специальной, так и в гражданской сфере. Сигнал, передаваемый с использованием указанного метода, устойчив к глушению (до того момента, пока третья сторона² не знает используемую кодовую последовательность, управляющую сменой несущих частот), что позволяет использовать его в специальных целях (однако сигнал требует дополнительного шифрования) [2].

Обязательное условие использования ППРЧ-сигналов – детерминированность псевдослучайной последовательности радиоимпульсов, т. е. заранее

определенные разбросы частот и временные положения последних, что необходимо для организации синхронного приема. При зашумлении канала передачи рассматриваемый вид связи более защищен от активного подавления, так как расписание частот отсутствует у "третьих" сторон.

Целью представленного исследования являлось определение степени влияния режима ППРЧ на демодуляцию частотно-манипулированных (ЧМ) сигналов. Для этого были разработаны демодуляторы ЧМ-сигналов на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ) и корреляционного метода [4], функционирующие как в одноканальном режиме, так и в режиме ППРЧ.

Модели генератора и приемника сигналов. Генератор сигналов (рис. 1) создает многоканальный сигнал с частотной манипуляцией. В каждом канале возможна передача с одной центральной частотой или с их сменой (режим ППРЧ). Входными параметрами генератора являются количество каналов, скорость сообщения, массив центральных частот, частота дискретизации и вид частотной манипуляции. В выходные сигналы каналов зашумляется "белый" шум с заданным отношением "сигнал/шум" (ОСШ).

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-07-00862 А.

² Под третьей стороной понимается любое устройство, не участвующее в передаче информации конкретным ППРЧ-сигналом [3].

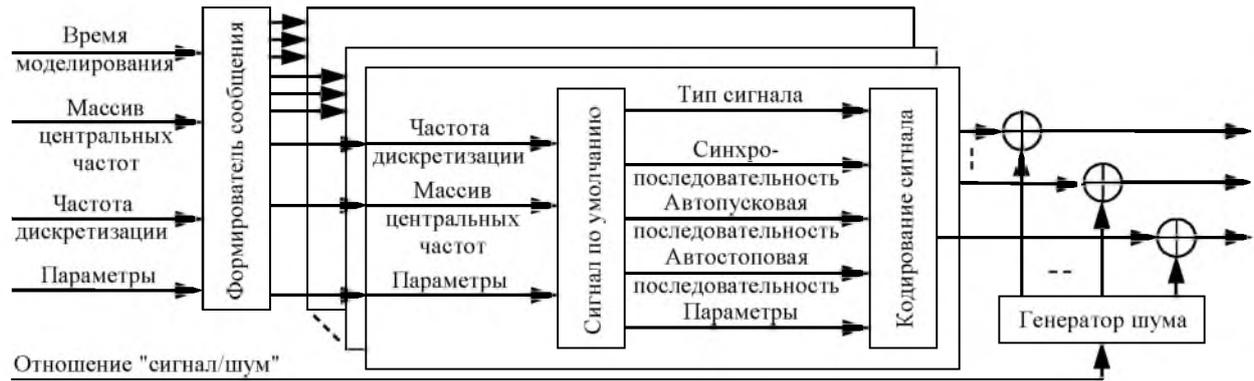


Рис. 1

Сообщение состоит из синхропоследовательности, пусковой комбинации, собственно информационного сообщения и стоповой комбинации.

Синхропоследовательность представляет собой меандр одной из известных частот, определяемой скоростью передачи информации. Пусковая комбинация служит для определения типа передаваемого сообщения, синхронизации передатчика и приемника. Также в коде пусковой комбинации зашифрован тип передачи: ППРЧ или передача на одной несущей частоте. Стоповая комбинация служит для определения конца сообщения.

На выходах каналов передатчика формируются частотно-манипулированные сигналы. Частоты, соответствующие символам логических 1 и 0 информационного сообщения, определяются по формуле $f \pm f_0$, где f – центральная частота, а f_0 – ее отклонение. Логической 1 соответствует знак "+" в формуле, логическому 0 – знак "-". В рассмотренной далее реализации предусмотрено три значения частоты f_0 : 100, 200 и 500 Гц.

Структурная схема приемника представлена на рис. 2. Энергетический обнаружитель фиксирует наличие сигнала в определенном канале и устанавливает параметры передачи, после чего каналный активатор запускает соответствующий канал обработки.

Обработка принятого сигнала предусматривает следующие процедуры:

- определение скорости и типа сообщения;

- определение режима передачи: одноканальный или ППРЧ;
- демодуляция сигнала, переданного на одной частоте;
- демодуляция сигнала, переданного в режиме ППРЧ;
- демодуляция каждого модулированного символа;
- сборка принятого сообщения.

Синхронизация происходит по синхропоследовательности с помощью корреляторов. На первые входы корреляторов подается принятый сигнал, на второй вход каждого коррелятора – образцы принятых в системе передачи синхропоследовательностей. Решение принимается по превышению выходным сигналом одного из корреляторов порогового значения. По результатам синхронизации определяется скорость передачи сообщения (скорость модуляции).

По пусковой комбинации, которая передается на центральной частоте, по результатам корреляционного анализа определяются тип модуляции и режим передаваемого сообщения. Демодулированная комбинация сравнивается с базой пусковых комбинаций, где находится информация о передаваемых сообщениях.

В соответствии с определенным типом сообщения происходит демодуляция символов. Параллельно данные анализируются на совпадение со стоповой комбинацией. При соответствии принятых данных этой комбинации обработка сигнала заканчивается.

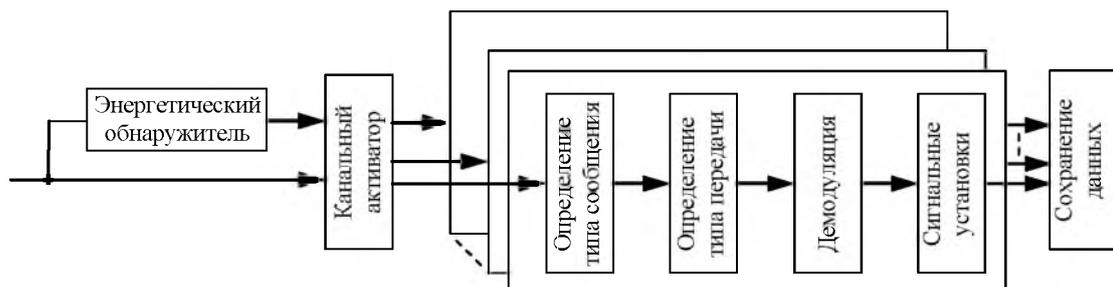


Рис. 2

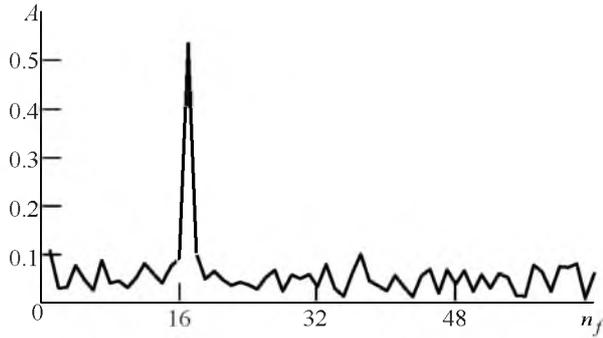


Рис. 3

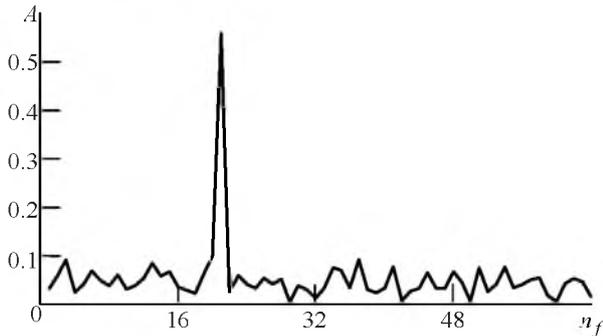


Рис. 4

При приеме сигналов, переданных в режиме ППРЧ, дополнительно в соответствии с расписанием частот изменяется предполагаемая центральная частота.

Демодуляция каждого манипулированного символа осуществляется с помощью скриптов – программ демодуляции, основанных на различных алгоритмах. Авторами настоящей статьи проведен сравнительный анализ результатов декодирования на основе БПФ и корреляции принятого символа с

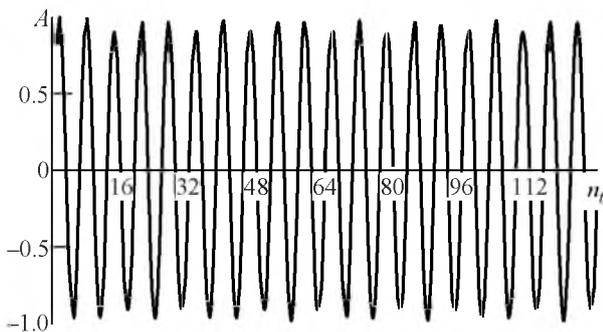


Рис. 5

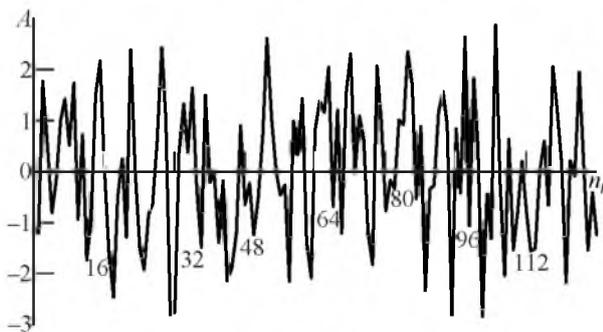


Рис. 7

образцами, имеющимися на приемной стороне. Для этого разработаны необходимые демодуляторы [4], функционирующие при передаче как в одночастотном режиме, так и в режиме ППРЧ. Результаты анализа приведены в заключительной части статьи.

Исследовался сигнал с центральной частотой $f = 1.8$ кГц при $f_0 = 0.2$ кГц. БПФ выполнялось над выборкой из 128 отсчетов сигнала n_f . При этом частота передачи логического 0 находится в 17-м частотном канале (рис. 3), а частота логической 1 – в 21-м канале (рис. 4). После БПФ определяется канал, содержащий максимум спектра принятого сигнала, и по его номеру принимается решение о принятом символе.

Оптимальным обнаружителем сигнала является обнаружитель на основе взаимно корреляционной функции (ВКФ) принятого сигнала и образцов сигналов, имеющихся на приемной стороне. На рис. 5 представлен синусоидальный сигнал с частотой 2.0 кГц после его дискретизации с принятой в приемнике частотой дискретизации 12.8 кГц. Автокорреляционная функция (АКФ) этого сигнала представляет собой синусоиду той же частоты, не содержащую информации о фазе сигнала (рис. 6). Это свойство можно использовать при создании фильтра гармонического сигнала в конкретном канале.

При искажении синусоидального сигнала шумом (пример такого сигнала представлен на рис. 7) его АКФ искажается (рис. 8) [5], однако сохраняет существенный центральный пик, что позволяет построить на ее основе помехоустойчивый обнаружитель.

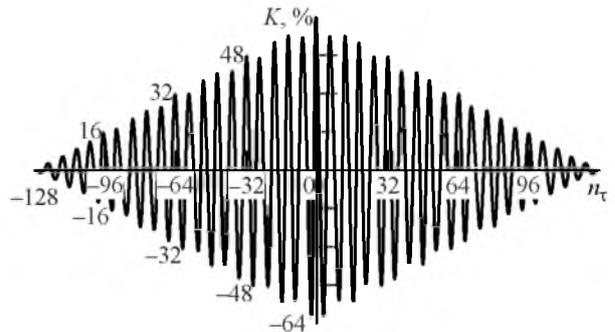


Рис. 6

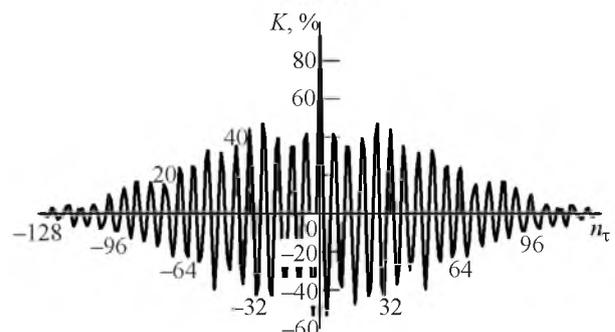


Рис. 8

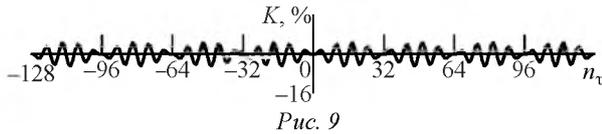


Рис. 9

По синхроимпульсу из выборки в 128 символов подсчитываются ВКФ. Далее определяются ВКФ с сигналами частот логических единиц и нулей. При совпадении частот формируется АКФ синусоидального сигнала (см. рис. 6), а при несовпадении – ВКФ с синусоидой другой частоты (рис. 9), имеющая существенно меньшие значения. Решение о приеме символа логической 1 или 0 принимается по функции, имеющей больший размах.

На этом этапе собирается вся информация о передаваемых сообщениях и записывается в файл. В нем хранятся параметры о сигнале: цен-

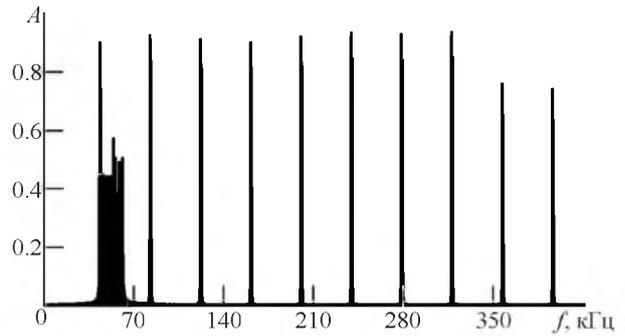


Рис. 10

формация передается в режиме ППРЧ, в остальных каналах – в режиме с одной центральной частотой.

Проверялась корректность приема 400 переданных сообщений при различных ОСШ. Принятые символы декодировались с использованием БПФ и корреляционной обработки. В таблице

ОСШ, дБ	Метод модуляции				ОСШ, дБ	Метод модуляции			
	Одна несущая		ППРЧ			Одна несущая		ППРЧ	
	Метод демодуляции					Метод демодуляции			
	БПФ	Корреляция	БПФ	Корреляция		БПФ	Корреляция	БПФ	Корреляция
	Количество принятых сообщений					Количество принятых сообщений			
17	0	0	0	0	12	1	1	1	1
16	0	0	0	0	11	24	24	23	23
15	0	0	0	0	10	113	112	114	114
14	0	0	0	0	9	386	381	384	379
13	1	1	0	0	8	400	400	400	400

тральная частота, девиация, режим передачи, режим модулирования, время начала передачи, время конца передачи и само переданное сообщение.

Исследование режима ППРЧ. В качестве тестового сигнала генерировался многоканальный сигнал с 1000 разнесенных по частоте каналов. Частота дискретизации составила 10 кГц, шаг частот 300 Гц. Моменты начала передачи сообщений в каналах случайны.

Пример спектра сигнала представлен на рис. 10 (спектр первых десяти каналов). В первом канале ин-

приведено количество принятых сообщений в зависимости от ОСШ при использованных режимах передачи и декодирования [6].

Из результатов проведенного исследования следует, что рассмотренные режимы передач дают практически одинаковые результаты по количеству ошибок при приеме сигнала. Демодуляция с использованием корреляционной обработки демонстрирует несколько лучшие результаты по сравнению с демодуляцией на основе БПФ, однако это преимущество незначительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barry J. R., Lee E. A., Messerschmitt D. G. Digital Communication. 3rd ed. New York: Kluwer Academic, 2004. 838 p.
2. Hui T. Bluetooth Frequency Hopping Scheme / National University of Singapore. URL: <http://opensource.nus.edu.sg/projects/bluetooth/bluetooth.html> (дата обращения: 25.12.2017).
3. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 833 с.
4. Разработка и исследование методов демодуляции частотно-манипулированных сигналов / Д. И. Каплун, Статья поступила в редакцию 30 августа 2017 г.
5. В. В. Гульванский, И. И. Канатов, Д. М. Клионский, В. Ф. Лапицкий, В. И. Бобровский, К. В. Фролов, А. К. Скворцов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 2. С. 11–16.
5. Time-Frequency Signal Analysis and Processing – A Comprehensive Reference / ed. by B. Boashash. Oxford: Elsevier Science, 2003. 771 p.
6. Spread Spectrum in Mobile Communication / O. Berg, T. Berg, S. Haavik, J. Hjelmstad, R. Skaug. London: The Institution of Electrical Engineers, 1998. 478 p.

Для цитирования: Разработка и исследование демодуляторов сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / Д. И. Каплун, В. В. Гульванский, И. И. Канатов, Д. М. Клионский, А. В. Хачатурян, Д. Н. Бутусов, В. Ф. Лапизкий, В. И. Бобровский // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 6. С. 15–21.

Каплун Дмитрий Ильич – кандидат технических наук (2009), доцент кафедры автоматике и процессов управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов; радиоэлектроника.

E-mail: mitya_kapl@front.ru

Гульванский Вячеслав Викторович – магистр техники и технологии по направлению "Управление в технических системах" (2015), аспирант кафедры автоматике и процессов управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 10 научных работ. Сфера научных интересов – информационные и телекоммуникационные системы; цифровая связь; цифровая обработка сигналов.

E-mail: vvgulvanskii@gmail.com

Канатов Иван Иванович – кандидат технических наук (1974), доцент (1980) кафедры автоматике и процессов управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – математическая теория систем; цифровая обработка сигналов.

E-mail: iikanatov@etu.ru

Клионский Дмитрий Михайлович – кандидат технических наук (2013), доцент кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов; вейвлет-анализ; спектральный анализ; моделирование в MATLAB.

E-mail: klio2003@list.ru

Хачатурян Алёна Борисовна – кандидат технических наук (2014), доцент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – теория сигналов; статистические методы обработки радиотехнических сигналов; дистанционное зондирования водной и земной поверхностей; рассеяние радиоволн шероховатыми поверхностями; математическое моделирование радиолокационных систем.

E-mail: khachaturyan.al@gmail.com

Бутусов Денис Николаевич – кандидат технических наук (2012), доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 70 научных работ. Сфера научных интересов – математическое, программное и методическое обеспечение встраиваемых САПР и киберфизических систем, включая аппаратно-ориентированные методы численного интегрирования; алгоритмы встраиваемых систем управления и обработки сигналов; нелинейная динамика в технических системах; параллельные и распределенные вычисления; архитектура аппаратных генераторов хаотических сигналов.

E-mail: dnbutusov@mail.ru

Лапизкий Владимир Францевич – кандидат технических наук (2000), доцент (2001), начальник отдела ПАО "Интелтех" (Санкт-Петербург). Автор 68 научных работ. Сфера научных интересов – информационные и телекоммуникационные системы; цифровая связь.

E-mail: lvf333@ya.ru

Бобровский Вадим Игоревич – доктор технических наук (2009), доцент (2010), начальник отдела ПАО "Интелтех" (Санкт-Петербург). Автор 139 научных работ. Сфера научных интересов – информационные и телекоммуникационные системы; цифровая связь.

E-mail: v.bobrovskiy@ntc1.inteltech.ru

D. I. Kaplun, V. V. Gulvanskiy, I. I. Kanatov, D. M. Klionskiy, A. V. Khachaturyan, D. N. Butusov
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

V. F. Lapizkiy, V. I. Bobrovskiy
PJSC "Inteltech" (Saint Petersburg)

Development and Study of Demodulators for Frequency Hopping Spread Spectrum Signals

Abstract. Demodulation task is encountered in many practical applications including digital signal processing and digital communications. Demodulation is connected with the communication system performance. Demodulation depends on a number of factors including signal-to-noise ratio (SNR) in the received message. In practice, it is necessary to minimize the number of errors for the given SNR and therefore new demodulation techniques are constantly developed with increased interference immunity. Demodulators aimed at for frequency-hopping spread spectrum signals have to meet special requirements since the message length can reach several ms and the number of messages can exceed several dozens.

Frequency-hopping spread spectrum is a technique of information transmission via radio channel and it is distinguished by variable carrier frequency that can change many times. The carrier frequency changes according to a pseudo random number sequence, which is available to both a sender and a recipient. This technique improves interference immunity of a communication channel.

Frequency-hopping spread spectrum is used in civil and special applications. This signal is stable to jamming (until the third side finds out the number sequence), which makes it possible to use it for special purposes (however, the signal still needs additional encryption).

Demodulation includes signal detection, synchronization, message type determination (modulation speed and modulation type), decoding, determination of autostarting and autostop combinations (for message identification), composition of the received message. The paper considers the tasks beginning with message type determination.

Message type determination can be carried out several ways: using the cross-correlation function, spectral analysis, etc. Since the structure of a synchrosequence is known, it is possible to obtain more precise results using the cross-correlation function. Several synchrosequences are formed for each message and then we compute their cross-correlation with the received message. The analysis includes the comparison all the results of cross-correlation function computation and finally we make a decision regarding the message.

Determination of autostarting and autostop combinations is performed by comparing autostarting and autostop combinations from the database. Each autostarting combination determines the receiver operation mode (single-channel or frequency-hopping spread spectrum). Determination of combinations is performed during signal demodulation.

Reception of a frequency-hopping spread spectrum signal is performed according to the frequency plan. According to this plan, the carrier frequency changes in fixed time points. After receiving the autostarting combination of frequency-hopping spread spectrum, a reception mode for frequency-hopping spread spectrum signal is switched on. After receiving the autostop combination this mode is terminated.

The output of a demodulator is the message itself, modulation type, and carrier frequency. The outcome of demodulator performance can be represented with a table. The first column of this table contains the carrier frequency, the second column contains frequency deviation, the third column – modulation type, the fourth one – message speed, the fifth one and further – the message itself.

In the paper, we provide new demodulation techniques of frequency-modulated messages for the given SNR. The developed techniques are based on spectral analysis and correlation analysis. We determine the computational complexity of the developed demodulation techniques. The total error is computed for each SNR and the selected demodulation technique using the developed MATLAB/Simulink model for a communication channel. Finally, we conclude about the best demodulation technique for the selected message type for the given SNR.

Key words: Demodulation, Frequency-Manipulated Signal, Frequency Hopping Spread Spectrum, Autocorrelation Function

REFERENCES

1. Barry J. R., Lee E. A., Messerschmitt D. G. Digital Communication; 3rd ed. New York, Kluwer Academic, 2004, 838 p.
2. Hui T. Bluetooth Frequency Hopping Scheme. National University of Singapore. Available at: <http://opensource.nus.edu.sg/projects/bluetooth/bluetooth.html> (accessed: 25.12.2017).
3. Rabiner L. R., Gould B. Theory and application of digital signal processing. London, Prentice Hall, 1975, 762 p.
4. Kaplun D. I., Gulvanskiy V. V., Kanatov I. I., Klionskiy D. M., Lapizkiy V. F., Bobrovskiy V. I., Frolov K. V., Skvortzov A. K. Development and Study of Demodulation Techniques for Frequency Manipulated Signal. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 2, pp. 11–16. (In Russian)
5. Time-Frequency Signal Analysis and Processing – A Comprehensive Reference; ed. by B. Boashash. Oxford, Elsevier Science, 2003, 771 p.
6. Berg O., Berg T., Haavik S., Hjelmstad J., Skaug R. Spread Spectrum in Mobile Communication. London, The Institution of Electrical Engineers, 1998, 478 p.

Received August, 30, 2017

For citation: Kaplun D. I., Gulvanskiy V. V., Kanatov I. I., Klionskiy D. M., Khachatryan A. B., Butusov D. N., Lapizkiy V. F., Bobrovskiy V. I. Development and Study of Demodulators for Frequency Hopping Spread Spectrum Signals. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 6, pp. 15–21. (In Russian)

Dmitry I. Kaplun – Ph.D. in Engineering (2009), Associate Professor of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing; radio electronics.
E-mail: mitya_kapl@front.ru

Vyacheslav V. Gulvanskiy – Master's Degree in Engineering and Technology in Engineering System Management (2015), postgraduate student of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 10 scientific publications. Area of expertise: information and telecommunication systems; digital communication; digital signal processing.
E-mail: vgulvanski@gmail.com

Ivan I. Kanatov – Ph.D. in Engineering (1974), Associate Professor (1980) of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: mathematical system theory; digital signal processing.

E-mail: iikanatov@etu.ru

Dmitry M. Klionskiy – Ph.D. in Engineering (2013), Associate Professor of the Department of Software and Computer Application of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: wavelet-analysis; spectral analysis; MATLAB modeling.

E-mail: klio2003@list.ru

Alena B. Khachatryan – Ph.D. in Engineering (2014), Associate Professor of the Department of Radio Equipment Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 20 scientific publications. Area of expertise: signal theory, statistical signal processing methods, remote sensing of water and earth surface, scattering of radio waves by rough surfaces, mathematical simulation of radar systems.

E-mail: khachatryan.al@gmail.com

Denis N. Butusov – Ph.D. in Engineering (2012), Associate Professor of the Department of Computer-Aided Design of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 70 scientific publications. Area of expertise: mathematical models; applied and computational mathematics; numerical methods; nonlinear dynamics; numerical modelling; finite-difference schemes; recurrence analysis; bifurcation analysis; ODE solvers; computer-aided design; chaos theory; scientific computation; cloud computing; parallel algorithms; embedded systems; data acquisition and processing.

E-mail: dnbutusov@mail.ru

Vladimir F. Lapizkiy – Ph.D. in Engineering (2000), Associate Professor (2001). Head of the Department for PJSC "Inteltech" (Saint Petersburg). The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: information and telecommunication systems; digital communication.

E-mail: lvf333@ya.ru

Vadim I. Bobrovskiy – D.Sc. in Engineering (2009), Associate Professor (2010), Head of Department of PJSC "Inteltech" (Saint Petersburg). The author of 139 scientific publications. Area of expertise: information and telecommunication systems; digital communication.

E-mail: v.bobrovskiy@ntcl.inteltech.ru

УДК 681.5+612.13

С. А. Пыко, Н. С. Пыко, О. А. Маркелов, Ю. Д. Ульяницкий, М. И. Богачев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Исследование взаимной динамики стохастических нормально распределенных процессов при аддитивной амплитудной расстройке между ними¹

Функционирование сложных систем возможно характеризовать совместными статистическими характеристиками порождаемых этими системами сигналов. Рассмотрены три подхода к оцениванию стабильности взаимного поведения двух тестовых процессов. Первый подход основан на расчете коэффициента фазовой синхронизации (КФС) между процессами. Второй метод базируется на определении взаимной условной энтропии (ВУЭ) процессов. Согласно третьему методу для оценивания стабильности взаимной динамики процессов используется среднее значение функции когерентности (ФК). Исследована чувствительность указанных методов к аддитивной амплитудной расстройке между процессами. Рассмотрены два типа процессов: с кратковременной зависимостью и заданным временем корреляции (ВК) и с долговременной зависимостью, определяемой значением показателя Херста. В исследованиях генерировались две копии процесса с известными корреляционными свойствами. Затем в одну из копий вносилась аддитивная амплитудная помеха с независимыми отсчетами, подчиняющимся равномерному или нормальному распределению с одинаковой дисперсией. Для каждого типа помехи и каждого значения ее интенсивности оценивались статистические характеристики КФС, ВУЭ и ФК. Выявлено, что чувствительность рассмотренных методов к нормально распределенной расстройке выше, чем к равномерной. При этом

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (исследовательский проект № 16-19-00172).