

*Alexander E. Zhesterev* – Ph.D. in Engineering (1982), chief of the department of JSC "Russian institute of radio-navigation and time" (Saint Petersburg). The author of more than 25 scientific publications. Area of expertise: radio-location and radionavigation systems; communication theory.

E-mail: zhesterev@mail.ru

*Valery P. Ipatov* – D.Sc. in Engineering (1983), Professor (1985) of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Honored scientist of the RF (2001), honorable radioman of the USSR (1983). The author of more than 250 scientific publications. Area of expertise: radio-electronic system engineering; statistical communication theory; broadband radar, navigation and data systems; signal theory.

E-mail: ival1941@yandex.ru

*Ruslan M. Mamchur* – Master of Science in Radio Engineering (2015), postgraduate student and assistant of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 3 scientific publications. Area of expertise: statistical communication theory; broadband radar, navigation and data systems; signal theory; technical electrodynamics.

E-mail: ruslan.mamchur@mail.ru

УДК 621.391

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

## Разработка и исследование методов демодуляции частотно-манипулированных сигналов

*Предложены различные методы демодуляции частотно-манипулированных сигналов и произведено их сравнение по критерию количества ошибок демодулированного сигнала относительно сигнала до модуляции при различном отношении "сигнал/шум".*

**Демодуляция, частотно-манипулированный сигнал, быстрое преобразование Фурье, автокорреляционная функция, двойная корреляция**

Назначение канала связи – передача той или иной информации. Из теории связи известно, что существуют две основные причины снижения достоверности передачи [1]. Первая причина – снижение отношения "сигнал/шум" (signal noise ratio – SNR). Вторая причина – искажение сигнала. Применительно к аналоговым сигналам используются понятия интермодуляционных искажений (например, интермодуляционные искажения второго порядка (composite secondary order – CSO), интермодуляционные биения третьего порядка (composite triple beat – CTB) и канальные искажения) [2]. В цифровых системах связи большей частью используется понятие межсимвольной интерференции. В настоящей статье рассмотрено определение количества ошибок в зависимости от реализуемого значения SNR и используемого способа демодуляции.

Частотно-манипулированный (ЧМн) сигнал – сигнал, в составе которого излучаются гармони-

ческие колебания одной из двух известных частот в зависимости от значения бита информационной последовательности [3]. Частоты сигналов, соответствующих логическим "1" и "0", определяются как  $f \pm f_0$ , где  $f$  – центральная частота сигнала;  $f_0$  – отклонение частоты, причем логическому "0" соответствует знак "-" в формуле, а логической "1" – знак "+". Полоса частот такого сигнала составляет  $2f_0$ .

**Математическая модель.** Модель разработана в вычислительной среде MatLab. Рассмотрена демодуляция сигнала с частотой логического "0" 1.6 кГц и логической "1" 2.0 кГц. В модели предусмотрена дискретизация с частотой 12.8 кГц. Длительность логического символа составляет 128 отсчетов. В целях анализа потенциальных возможностей принято, что во всех звеньях модели производится символьная синхронизация, позволяю-

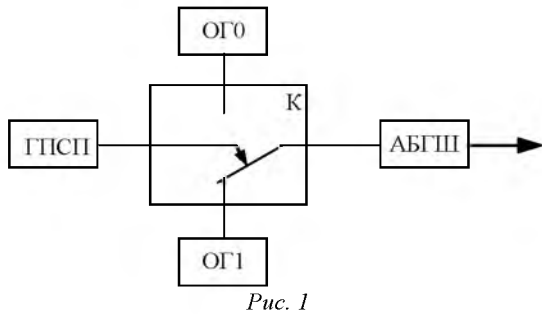


Рис. 1

шая абсолютно точно зафиксировать начало каждого символа (ошибки межсимвольной интерференции не рассматриваются).

Поступающий на анализируемые демодуляторы сигнал формируется схемой, представленной на рис. 1. Последовательность информационных символов формируется генератором псевдослучайной последовательности ГПСЦ. Коммутатор К под управлением этой последовательности включает в ЧМн-сигнал пачки импульсов одной из двух частот, генерируемых опорными генераторами ОГ0 и ОГ1. В сформированный сигнал добавляется аддитивный "белый" гауссовский шум (блок АБГШ) с заданным SNR, определяемым как отношение энергии информационного символа  $E_s$  к спектральной плотности мощности шума  $N_0$ .

Пример амплитудного спектра сформированного сигнала при SNR = 0 дБ показан на рис. 2.

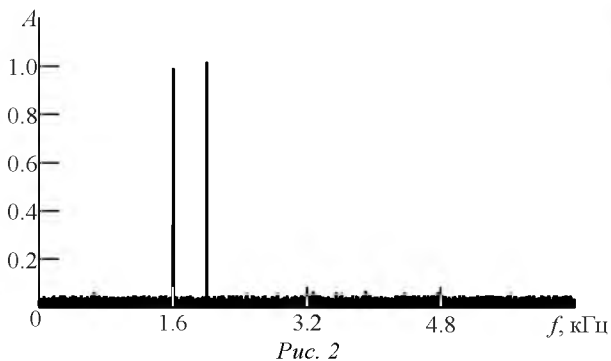


Рис. 2

Сформированный сигнал поступает на блоки демодуляторов. В настоящей статье описаны выходные сигналы и приведены результаты анализа ошибок для нескольких видов демодуляторов:

- демодулятора на основе быстрого преобразования Фурье;
- демодулятора с использованием взаимнокорреляционной функции 1-го порядка;
- демодулятора с использованием взаимнокорреляционной функции 2-го порядка.

**Демодулятор на основе быстрого преобразования Фурье.** В демодуляторе производится быстрое преобразование Фурье на основе выборки из 128 отсчетов. Связь номера дискретного частотного отсчета с частотой  $f_n$  задается формулой  $n = f_n T + 1$ , где  $T$  – длительность символа. При указанной ранее частоте дискретизации и количестве отсчетов, приходящихся на логический символ,  $T = 0.01$  с.

На 17-м частотном отсчете  $n$  спектра  $S$  находится сигнал с частотой логического "0" (рис. 3), а в 21-м канале – сигнал с частотой логической "1" (рис. 4).

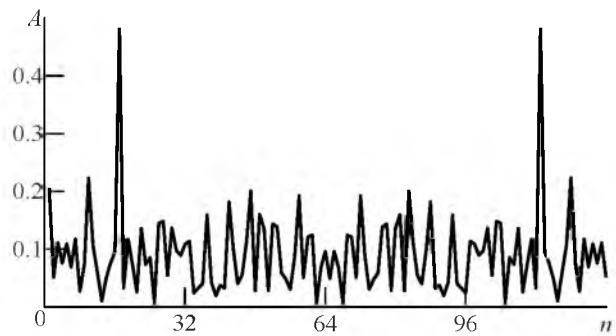


Рис. 3

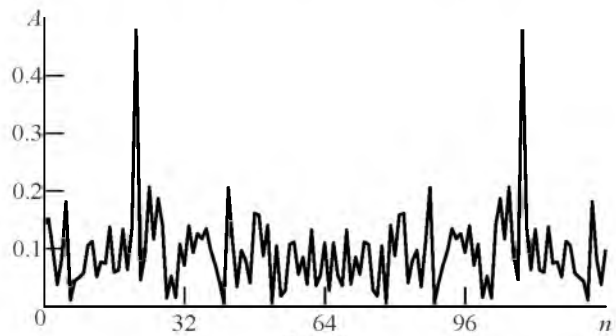


Рис. 4

Решение о значении демодулированного символа принимается по результатам сравнения значений спектра в указанных спектральных отсчетах.

**Демодулятор с использованием взаимнокорреляционной функции 1-го порядка.** Оптимальным обнаружителем сигнала является обнаружитель на основе автокорреляционной функции (АКФ):

$$R_1(m) = \sum_{k=0}^{N-|m|-1} s(k)s(k+m),$$

где  $m$  – смещение, измеряемое количеством отсчетов;  $N$  – количество отсчетов анализируемого сигнала  $s(k)$ .

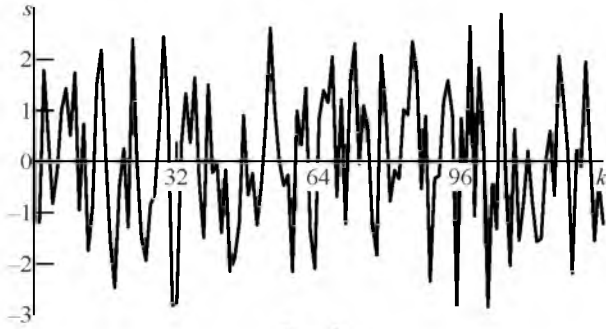


Рис. 5

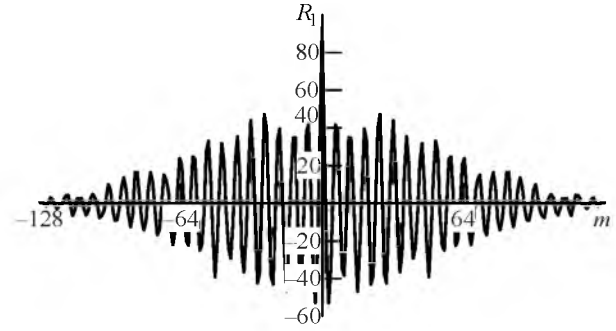


Рис. 6

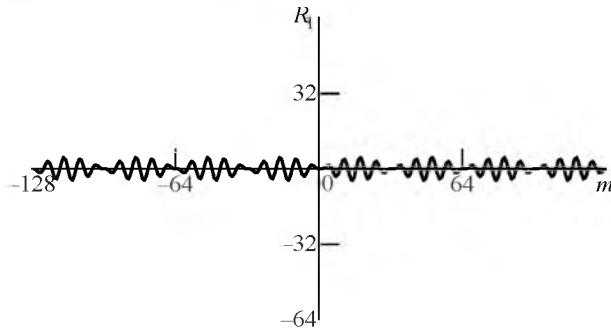


Рис. 7

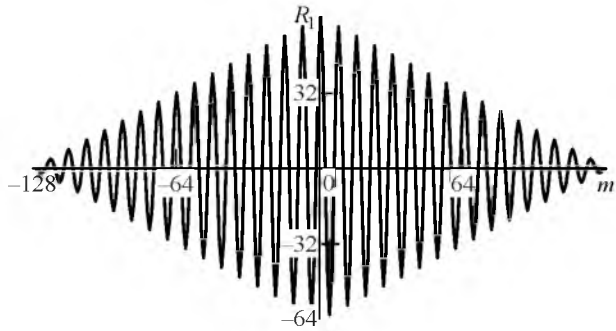


Рис. 8

АКФ синусоиды представляет собой модулированную по амплитуде синусоиду той же частоты, не зависящую от начальной фазы сигнала [4].

Гармонический сигнал в смеси с шумом при SNR = 0 дБ представлен на рис. 5, его АКФ – на рис. 6. АКФ имеет квазипериодический характер (отличие от строгой периодичности обусловлено шумом).

В процессе демодуляции принятого сигнала для устранения чувствительности коррелятора к его начальной фазе определяется АКФ. Далее вычисляются взаимно-корреляционные функции (ВКФ) с образцами переданных гармонических сигналов, соответствующих логическим "0" и "1". Пример ВКФ принятого сигнала по рис. 6 при его несовпадении с переданным сигналом представлен на рис. 7, при совпадении – на рис. 8. Решение принимается в пользу информационного сигнала, для которого максимум ВКФ имеет большее значение.

Демодулятор с использованием взаимно-корреляционной функции 2-го порядка. Корреляционная обработка принятого сигнала на основе ВКФ 2-го порядка позволяет выделить гармонический сигнал с лучшим качеством, чем корреляционная обработка 1-го порядка [5], [6].

В рамках данного метода вначале определяется АКФ 2-го порядка принятого сигнала

$$R_2(m) = \sum_{p=0}^{N_1-|m|-1} R_1(p)R_1(p+m),$$

где  $N_1$  – длина АКФ передаваемых сигналов. Затем аналогично предыдущему методу рассчитываются ВКФ этой функции с образцами переданных сигналов.

ВКФ 2-го порядка с переданным сигналом по рис. 5 (имеющим АКФ по рис. 6) показана на рис. 9.

Дальнейшая обработка полученных ВКФ и принятие решения аналогичны операциям, выполняемым в корреляторе с использованием ВКФ 1-го порядка.

**Результаты.** Для сравнения качества выделения переданных цифровых сигналов демодуляторами определялась точность демодуляции согласно выражению  $P = N_{\text{пр}}/N_{\text{общ}}$ , где  $N_{\text{пр}}$  – количество правильно демодулированных бит;  $N_{\text{общ}}$  – общее количество принятых бит.

Подсчет выполняется в блоке (рис. 10). Результат обработки сравнивается с исходным сигналом, и в течение длительности строка подсчитывается количество ошибок демодуляции.

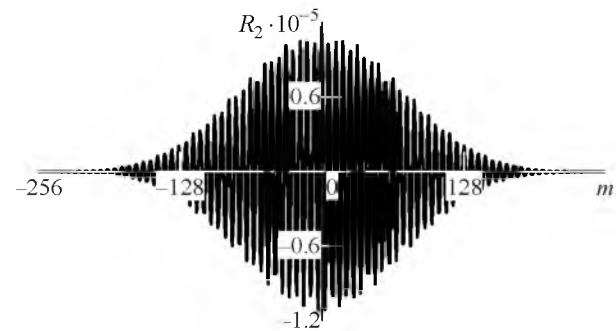


Рис. 9

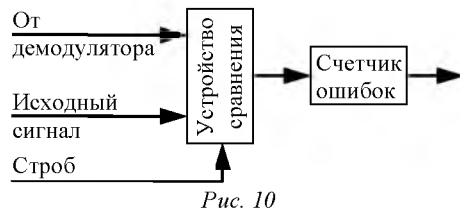


Рис. 10

Промоделированы передача и прием непрерывных посылок бит длительностью 100 с. Результаты тестирования указанных в настоящей статье демодуляторов сведены в таблицу.

Из приведенных данных следует, что наилучшие результаты при значениях SNR > 5 дБ дает демодулятор с использованием ВКФ 2-го порядка,

SNR, дБ	Метод на основе		
	БПФ	ВКФ 1-го порядка	ВКФ 2-го порядка
10	0	0	0
9	0.0091	0.0094	0.0085
8	0.0219	0.0212	0.0217
7	0.0428	0.0445	0.0427
6	0.0727	0.0732	0.0719
5	0.1067	0.1095	0.1072
4	0.1439	0.1470	0.1441
3	0.1817	0.1842	0.1817
2	0.2238	0.2262	0.2249
1	0.2634	0.2642	0.2620
0	0.2971	0.3022	0.2983

а при меньших значениях SNR – демодулятор на основе БПФ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shannon C. E. A mathematical theory of communication // Bell System Technical J. 1948. Vol. 27. P. 379–423 and 623–656.
2. Bond F. E., Meyer H. F. Intermodulation effects in limiter amplifier repeaters // IEEE Trans. Comm. 1970. Vol. COM-18. P. 127–135.
3. Boashash B. Time-Frequency Signal Analysis and Processing – A Comprehensive Reference. Oxford: Elsevier Science, 2003. 771 p.
4. Croxton F. E., Cowden D. J., Klein S. Applied General Statistics. London: Sir Isaac Pitman and Sons, 1968. 754 p.
5. Tetsuya Shimamura, Ngoc Dinh Nguyen. Autocorrelation and double autocorrelation based spectral representations for a noisy word recognition system // INTERSPEECH 2010, 11th Annu. Conf. of the International Speech Communication Association, Makuhari, Chiba, Japan, Sept. 26–30, 2010. Red Hook: Curran Associates, Inc., 2010. P. 1712–1716.
6. Rodgers J. L., Nicewander W. A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient // The American Statistician. 1988. Vol. 42, № 1. P. 59–66.

Статья поступила в редакцию 29 марта 2017 г.

**Для цитирования:** Разработка и исследование методов демодуляции частотно-манипулированных сигналов / Д. И. Каплун, 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.

**Каплун Дмитрий Ильич** – кандидат технических наук (2009), доцент кафедры автоматки 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 автоматки и процессов управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 15 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 автоматки 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

**Латицкий 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

**Фролов Константин Владимирович** – магистр по направлению "Цифровые, микроволновые и оптические системы связи" (2016), инженер 2-й категории ПАО "Интелтех" (Санкт-Петербург). Сфера научных интересов – информационные и телекоммуникационные системы; цифровая связь.

E-mail: intelteh@inteltech.ru

**Скворцов Алексей Кириллович** – инженер по специальности "Многоканальные телекоммуникационные системы" (2010, Военная академия связи им. С. М. Буденного), инженер 2-й категории ПАО "Интелтех" (Санкт-Петербург). Сфера научных интересов – информационные и телекоммуникационные системы; цифровая связь.

E-mail: intelteh@inteltech.ru

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

V. F. Lapizkiy, V. I. Bobrovskiy, K. V. Frolov, A. K. Skvortzov  
PJSC "Inteltech" (Saint Petersburg)

## Development and Study of Demodulation Techniques for Frequency Manipulated Signals

**Abstract.** *The goal of our research is development and study of different demodulation techniques for a frequency shift keyed signals. The signal under study is a frequency-shift keyed (FSK) signal when the information signal regulates the carrier frequency. We consider a model imitating data transmission channels and allowing us to perform error counting. The data transmission channels have ideal synchronization. Several techniques of demodulator design are introduced for demodulating frequency-shift keyed (FSK) signal and we compare the techniques using the criterion of error number of a demodulated signal relative to a signal prior to modulation for different signal-to-noise ratio. Signal-to-noise ratio is calculated as a ratio of the energy of the information symbol to the noise power spectral density. We have tested different demodulation techniques with different signal-to-noise ratio and produced a table containing information on demodulation accuracy for different techniques. Overall, we have simulated 100 sec. of continuous bit packages. We indicate that the best results for signal-to-noise ratio exceeding 5 dB are provided with the technique based on double correlation, and for signal-to-noise ratio less than 5 dB – with the technique based on the fast Fourier transform.*

**Key words:** Demodulation, Frequency-Shift Keyed Signals, Fast Fourier Transform, Autocorrelation Function, Double Correlation

## REFERENCES

1. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical J., 1948, vol. 27, pp. 379–423 and 623–656.
2. Bond F. E., Meyer H. F. Intermodulation Effects in Limiter Amplifier Repeaters. IEEE Trans. Comm., 1970, vol. COM-18, pp. 127–135.
3. Boashash B. Time-Frequency Signal Analysis and Processing – A Comprehensive Reference. Oxford, Elsevier Science, 2003, 771 p.
4. Croxton F. E., Cowden D. J., Klein S. Applied General Statistics. London, Sir Isaac Pitman and Sons, 1968, 754 p.
5. Tetsuya Shimamura, Ngoc Dinh Nguyen. Autocorrelation and Double Autocorrelation Based Spectral Representations for a Noisy Word Recognition System. INTERSPEECH 2010, 11th Annu. Conf. of the International Speech Communication Association, Makuhari, Chiba, Japan, Sept. 26–30, 2010. Red Hook, Curran Associates, Inc., 2010, pp. 1712–1716.
6. Rodgers J. L., Nicewander W. A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient. The American Statistician, 1988, vol. 42, no. 1, pp. 59–66.

Received March, 29, 2017

**For citation:** 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 Zavedeniy Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 2, pp. 11–16. (In Russian).

**Dmitry I. Kaplun** – Ph.D. on 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 15 scientific publications. Area of expertise: information and telecommunication systems; digital communication; digital signal processing.

E-mail: vvgulvanskii@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

**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

**Konstantin V. Frolov** – Master's Degree in Digital, Microwave and Optical Communication Systems (2016) of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". 2nd Class Engineer for PJSC "Inteltech" (Saint Petersburg). Area of expertise: information and telecommunication systems; digital communication.

E-mail: intelteh@inteltech.ru

**Aleksei K. Skvortzov** – Engineer in Multichannel Telecommunication Systems (2010, Military Academy of Communications (Saint-Petersburg)). 2nd Class Engineer for PJSC "Inteltech" (Saint Petersburg). Area of expertise: information and telecommunication systems; digital communication.

E-mail: intelteh@inteltech.ru

---

УДК 621.396.62

С. В. Дворников, А. В. Пшеничников  
Военная академия связи (Санкт-Петербург)

## Помехозащищенная модель радиолинии в условиях динамического преднамеренного воздействия

*Проанализирована эффективность известных режимов функционирования радиолинии в условиях динамического воздействия. На основе полученных результатов обоснована актуальность синтеза помехозащищенных моделей функционирования радиолинии. Сформулирована цель исследования, для достижения которой введено понятие стратегии управления ресурсами радиолинии. Заданы ограничения на параметры преднамеренного воздействия. На основе теории случайных процессов получена модель радиолинии при динамическом преднамеренном воздействии.*

**Помехозащищенность, метод управления, модель радиолинии, преднамеренное воздействие, оценка эффективности**

Обеспечение эффективности линий радиосвязи было и остается приоритетным на всех этапах построения объединенной автоматизированной цифровой сети связи [1]. Учитывая темпы роста возможностей радиотехники, весьма актуальным является обеспечение помехозащищенности и пропускной способности современной сети радиосвязи.

Методы повышения помехозащищенности линий радиосвязи представлены в работах [2]–[5]. Предложенные решения основываются на увеличении базы сигнала с использованием различных технологий. Вопросы повышения пропускной способности линий радиосвязи нашли отражение в работах [6]–[12], в которых на основе методов