

УДК 621.37

DOI: 10.25559/SITITO.15.201901.107-114

Определение радиотехнических параметров фазоманипулированных сигналов

А. А. Маслов, М. В. Сотникова*

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

* m.sotnikova@spbu.ru

Аннотация

На протяжении десятилетий развивались и продолжают активно развиваться радиотехнические системы – системы, осуществляющие извлечение, передачу или разрушение информации при помощи радиоволн. Несущие ту или иную информацию радиоволны называются радиосигналом. Таким образом, для радиотехнических систем характерным признаком является использование радиосигналов.

В связи с развитием электронной вычислительной техники методы и алгоритмы обработки радиосигналов претерпевают определённые изменения. Также совершенствуются и средства приёма/передачи, технологии и методы защиты передаваемой информации. По этой причине необходимы качественные методы определения радиотехнических параметров сигналов с целью их дальнейшей обработки. В работе рассматриваются методы определения таких характеристик, как несущая частота, скорость манипуляции и вид модуляции для фазоманипулированных сигналов. Задача определения данных параметров в настоящее время актуальна по нескольким причинам: определение параметров поможет идентифицировать передающее устройство, в случае успешного распознавания вида модуляции можно восстановить передаваемое сообщение, а также появится возможность наведения активных помех для подавления связи.

Существует определённое количество алгоритмов для определения радиотехнических параметров сигналов, но основным недостатком некоторых из них является необходимость наличия определённой информации. Наибольший же интерес представляют методы, позволяющие получать информацию о сигнале в условиях, когда известна только лишь частота дискретизации, а также методы, позволяющие точно определить вид модуляции.

В настоящей работе описана математическая модель фазоманипулированного сигнала, основные свойства данного типа сигналов и предложен метод, позволяющий определить радиотехнические параметры фазоманипулированных сигналов в условиях априорной неопределённости.

Ключевые слова: фазовая манипуляция, кумулянтный анализ, радиотехнические параметры, определение параметров сигнала, модуляция, несущая частота, символьная скорость.

Для цитирования: Маслов А. А., Сотникова М. В. Определение радиотехнических параметров фазоманипулированных сигналов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15, № 1. С. 107-114. DOI: 10.25559/SITITO.15.201901.107-114

© Маслов А.А., Сотникова М.В., 2019



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Determination of Radio Engineering Parameters of Phase-Shift Keying Signals

A. A. Maslov, M. V. Sotnikova*

Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

*m.sotnikova@spbu.ru

Abstract

For decades, radio engineering systems have evolved and continue to actively develop - systems that extract, transmit, or destroy information using radio waves. The radio waves carrying this or that information are called a radio signal. Thus, for radio systems, a characteristic feature is the use of radio signals.

In connection with the development of electronic computing techniques and algorithms for processing radio signals undergo certain changes. Reception / transmission facilities, technologies and methods for protecting the transmitted information are also being improved. For this reason, qualitative methods are needed to determine the radio parameters of signals with a view to their further processing. The paper discusses methods for determining such characteristics as carrier frequency, manipulation rate, and modulation type for phase-shifted signals. The task of determining these parameters is currently relevant for several reasons: the definition of parameters will help identify the transmitting device, in case of successful recognition of the modulation type, you can restore the transmitted message, and it will also be possible to induce active interference to suppress communication.

There are a number of algorithms for determining radio parameters of signals, but the main disadvantage of some of them is the need for certain information. Aspects of interest concern methods of the methods that allow to obtain information about the signal in conditions where only the sampling frequency is known, as well as methods that allow you to accurately determine the type of modulation.

This paper describes a mathematical model of a phase-shift keyed signal, the basic properties of this type of signal, and proposes a method to determine the radio engineering parameters of the phase-shift keyed signals under conditions of a priori uncertainty.

Keywords: phase-shift keying, cumulant analysis, radio parameters, determination of signal parameters, modulation, carrier frequency, symbol rate.

For citation: Maslov A.A., Sotnikova M.V. Determination of Radio Engineering Parameters of Phase-Shift Keying Signals. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2019; 15(1):107-114. DOI: 10.25559/SITITO.15.201901.107-114



Введение

На протяжении десятилетий развивались и продолжают активно развиваться радиотехнические системы – системы, осуществляющие извлечение, передачу или разрушение информации при помощи радиоволн. Несущие ту или иную информацию радиоволны называются радиосигналом. Таким образом, для радиотехнических систем характерным признаком является использование радиосигналов.

В связи с развитием электронной вычислительной техники методы и алгоритмы обработки радиосигналов претерпевают определённые изменения, совершенствуются технологии приёма/передачи. С другой стороны, по причине роста популярности радиоэлектронных устройств и в связи с высокой степенью их распространённости возрастает уровень помех, из-за чего процесс обработки может вызвать определённые затруднения. По этой причине необходимы качественные методы определения радиотехнических параметров сигналов. Задача определения параметров в настоящее время актуальна по нескольким причинам: их определение поможет идентифицировать передающее устройство, в случае успешного распознавания вида модуляции можно восстановить передаваемое сообщение, а также появится возможность наведения активных помех для подавления связи. В данной статье рассматриваются методы определения таких характеристик, как несущая частота, скорость манипуляции и вид модуляции для фазоманипулированных сигналов.

Фазоманипулированные сигналы находят широкое применение в системах радиосвязи, так как они способствуют повышению степени помехоустойчивости системы и уровню электромагнитной совместимости, а также позволяют наиболее эффективно использовать радиодиапазон канала.

Существует определённое количество алгоритмов для определения радиотехнических параметров сигналов. Например, в [1-3] предложен метод распознавания вида модуляции по сигнальному созвездию, а в [4] для решения подобной задачи предложен подход, заключающийся в анализе дисперсии и коэффициента эксцесса для частотно-модулированных. Пороговый подход, особенно актуальный в настоящее время, описан в работе [5].

Наибольший интерес представляют методы, позволяющие получать информацию о сигнале в условиях, когда известна только лишь частота дискретизации, а также методы, позволяющие точно определить вид модуляции [8-11].

В настоящей работе предлагается метод, позволяющий определить радиотехнические параметры фазоманипулированных сигналов в условиях априорной неопределённости.

Математическая модель фазоманипулированного сигнала

Под модуляцией сигнала понимается процесс изменения одного или нескольких параметров несущего сигнала по закону информационного сигнала, при этом несущий сигнал – высокочастотный, а информационный – низкочастотный и носит название модулирующего. Модулированный сигнал – сигнал, который получается в процессе модуляции. Модуляция используется для передачи информационных сигналов и повышения помехоустойчивости процесса передачи. Процесс модуляции изменяет форму и спектральные характеристики сигнала. Если

модулирующий сигнал – цифровой, то процесс цифровой модуляции называют манипуляцией цифрового сигнала.

В настоящей работе рассматриваются фазоманипулированные сигналы, т.е. сигналы, в процессе манипуляции которых происходит изменение фазы [6].

Опишем аналитический несущий сигнал следующим выражением:

$$s(t) = A \cos(\omega t + \theta). \quad (1)$$

Тогда выражение для фазоманипулированного сигнала будет иметь вид:

$$s_m(t) = A \cos(\omega t + \theta_j), \quad j = \overline{1, J}, \quad (2)$$

где A – амплитуда, ω – начальная частота, θ – фаза несущего колебания. Как видно из (2), при фазовой манипуляции происходит изменение фазы θ_j несущего колебания по закону:

$$\theta_j = \frac{\pi(2j-1)}{J}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (3)$$

Изменения, происходящие по закону (2), (3) показаны на рис.

1. В качестве примера выбран сигнал с параметрами $A = 1$, $\omega = 0$, $J = 2$, – сигнал с двоичной фазовой манипуляцией. В качестве модулирующего сигнала взята битовая последовательность [10010110].



Рис. 1. Фазовая манипуляция
Fig. 1. Phase manipulation

При различных значениях J из формулы (3) получатся различные виды фазовой манипуляции. Так при $J = 2$ на одну смену фазы приходится один бит и фазовая манипуляция в этом случае называется двоичной или бинарной (BPSK – Binary Phase Shift Keying). При $J = 4$ и $J = 8$ на одну смену фазы приходится 2 и 3 бита соответственно и фазовая манипуляция в этих случаях называется квадратурной и восьмеричной (QPSK, PSK-8). Фазовая манипуляция более высоких порядков используется крайне редко.

Постановка задачи определения радиотехнических параметров сигнала

Для фазоманипулированного сигнала, описанного выражением (2) определим следующие параметры: f_{sr} – частота дискретизации сигнала (2) (Hz), f_c – частота высокочастотного несущего сигнала (Hz), Br – скорость передачи сигнала по каналу связи (Baud), m – тип модуляции.

Задача определения радиотехнических параметров сигнала (2) формулируется следующим образом: для фазоманипулированного сигнала (2) с известной частотой дискретизации f_{sr} определить параметры f_c , Br и однозначно классифицировать сигнал по виду модуляции m .



Радиотехнические параметры сигналов

Большинство средств и алгоритмов обработки сигналов работают по принципу априорной известности основных радиотехнических параметров сигнала, таких как несущая частота, символьная скорость и вид модуляции сигнала. В реальности же для эффективной работы эти параметры необходимо определить самостоятельно.

Под несущей частотой понимается частота несущего колебания, в процессе модуляции которого изменяются один или несколько его параметров (в данном случае фаза). Сам же сигнал часто называют *несущая* или *несущий*. В англоязычной литературе используется понятие *carrier*.

Символьная скорость, или скорость манипуляции – скорость передачи сигнала по каналу связи; максимальное количество изменений информационного параметра несущего периодического сигнала. Символьная скорость измеряется в бодах. Иногда скорость манипуляции называют бодовой скоростью. В условиях априорной неопределённости информации о сигнале в подавляющем большинстве случаев для определения вида модуляции необходимо обладать информацией о двух вышеописанных характеристиках. Существует несколько подходов к определению как несущей частоты, так и символьной скорости. Опишем более надёжные методы определения данных параметров для фазоманипулированных сигналов.

Номинал несущей частоты может быть определён методами гармонического анализа: путём возведения сигнала в степень, соответствующую порядку модуляции и дальнейшего спектрального анализа получившегося сигнала [7]. В частности, для фазоманипулированных сигналов при возведении сигнала в степень происходит умножение текущей фазы, при котором последовательно снимается один уровень манипуляции. Рассмотрим возведение в степень сигнала (2):

$$s_m^2(t) = A^2 \cos^2(\omega t + \theta_j), \quad j = 1, J, \quad (4)$$

$$s_m^2(t) = \frac{1}{2} A^2 [1 + \cos(2\omega t) \cos(2\theta_j) - \sin(2\omega t) \sin(2\theta_j)],$$

$$j = 1, J.$$

Для BPSK сигнала множество фаз выглядит как $\theta = \{0, \pi\}$. Значит $s_m^2(t) = \frac{1}{2} A^2 [1 + \cos(2\omega t)]$. Таким образом, получили

выражение, описывающее сигнал с удвоенной начальной частотой и не содержащее информации об исходной фазе.

Аналогично для QPSK при

$$\theta = \left\{ \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4} \right\}$$

$$s_m^4(t) = \frac{1}{8} A^4 [4 \cos(2\omega t) + \cos(4\omega t) + 3]. \quad (5)$$

Для PSK-8 при $\theta = \{0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi, \frac{5\pi}{4}, \frac{3\pi}{2}, 2\pi\}$:

$$s_m^8(t) = \frac{1}{128} A^8 [56 \cos(2\omega t) + 28 \cos(4\omega t) + 8 \cos(6\omega t) + \cos(8\omega t) + 35]. \quad (6)$$

Нетрудно заметить, что выражения (5) и (6) также не зависят от фазы. Для более высоких порядков модуляции такая ситуация всегда будет сохраняться.

При возведении в степень сигнала происходит соответствующая трансформация спектра и в нём возникают гармоники, которые позволяют определить значение несущей частоты. В случае фазоманипулированных сигналов количество гармоник нечётно и несущей соответствует центральная гармоника. Само значение несущей может быть вычислено по формуле:

$$f_c = \frac{(M - 2^{N-1}) f_{sr}}{2^N}.$$

Здесь f_c - значение несущей частоты, f_{sr} - частота дискретизации сигнала, N - порядок преобразования Фурье, M - позиция пика, соответствующего необходимой гармонике на спектре.

Скорость манипуляции может быть определена аналогичным способом, лишь с небольшими отличиями¹. В данном случае (для фазоманипулированных сигналов) значение скорости манипуляции определяется как расстояние между центральной и боковой гармониками на спектре возведённого в степень сигнала. Численное значение скорости манипуляции определяется согласно приведенной формуле, как разность между значениями, соответствующими центральной и боковой гармоникам.

Для определения вида модуляции существует несколько подходов. Наиболее простой основан на проведении гармонического анализа, как и в случае, описанном для поиска несущей частоты. Соответственно при возведении сигнала в степень, соответствующую порядку модуляции изменяется число гармоник на спектре: для BPSK сигнала, возведённого во вторую степень характерно появление трёх гармоник, центральная из которых максимальна; для QPSK подобная картина будет наблюдаться в случае возведения сигнала в четвёртую степень, а для PSK-8, соответственно, в восьмую. Но основной недостаток данного метода заключается в его высокой чувствительности к помехам, накладываемым на сигнал в процессе передачи. Так на практике может быть несложно определить частоту, соответствующую центральной гармонике, но при этом может быть невозможно определить их количество.

Другой метод основан на анализе фазовых созвездий. Представим фазоманипулированный сигнал (2) как линейную комбинацию ортонормированных сигналов [12-13]:

$$S_m(t) = S_1 \tilde{S}_1 + S_2 \tilde{S}_2; \quad (7)$$

$$\tilde{S}_1 = \sqrt{\frac{2}{Br}} S_1(t) \cos(\omega t),$$

$$\tilde{S}_2 = -\sqrt{\frac{2}{Br}} S_2(t) \sin(\omega t).$$

Компоненты \tilde{S}_1 и \tilde{S}_2 - синфазная и квадратурная составляющие фазоманипулированного сигнала, Br - скорость. Таким образом, исходный сигнал $S_m(t)$ представляется двумерным вектором $[S_1(j, J), S_2(j, J)]$. Если представить значения S_1 на горизонтальной, а S_2 на вертикальной оси полярной системы координат, то получим пространственные диаграммы для

¹ ОСТ 45.163-2001 Спутниковые линейные тракты передачи сигналов цифрового телевидения. Основные параметры. Методы измерений. Москва: ЦНТИ «ИНФОРМСВЯЗЬ», 2002. Введен в действие 28.04.2001. URL: http://www.xjob.ru/%D0%9E%D0%A1%D0%A2_45.163-2001 (дата обращения: 10.02.2019).



каждого из видов манипуляции. Данные диаграммы, изображённые на рис.2 называют сигнальными или фазовыми созвездиями.

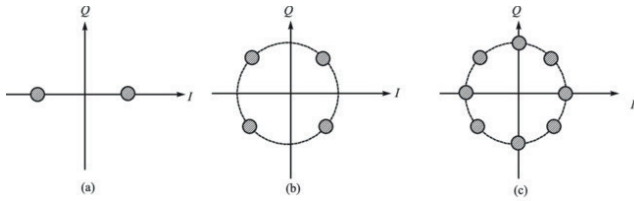


Рис. 2. Сигнальные созвездия а) BPSK, б) QPSK, в) PSK-8
Fig. 2. Signal constellations а) BPSK, б) QPSK, в) PSK-8

Основным недостатком такого метода является необходимость максимально точного определения значения несущей частоты, так как из-за даже небольшого отклонения форма созвездия может существенным образом измениться, вследствие чего сигнал будет невозможно классифицировать. Также данный метод очень чувствителен к шумам и качеству принимающего устройства.

Алгоритм кумулянтного анализа для определения вида модуляции

Наибольший интерес представляет алгоритм определения вида модуляции, основанный на пороговом методе классификации статистических признаков фазоманипулированных сигналов. В качестве таких признаков выбраны кумулянты (полуинварианты, семинварианты) – коэффициенты разложения в ряд Маклорена характеристической функции случайной величины [14-21]. Такой подход даёт алгоритм менее чувствительный к нежелательному шуму и отклонению от несущей частоты.

Рассмотрим (1) как случайный стационарный процесс. Пусть $s(t)$ - ему сопряжённый. В таком случае можно выразить совместные моменты как $E_{k+n,n} = E[s^k(t)s^n(t)]$.

В этом случае $C_{k+n,n} = cum[s, s, \dots, s, s, s, \dots, s]$ - выражение кумулянта порядка $k+n, n$ для (1). Кумулянты характеризуют статистическую связь между распределениями мгновенной фазы сигнала и могут быть выражены через совместные моменты согласно (8):

$$C_{k+n,n} = cum[\underbrace{s, s, \dots, s}_k, \underbrace{s, s, \dots, s}_n] = \tag{8}$$

$$\sum_{\forall \Omega} (-1)^{p-1} (p-1)! E \left[\prod_{i \in \Omega_1} s_i \right] \dots E \left[\prod_{i \in \Omega_p} s_i \right]$$

где $p = k+n$ и суммирование происходит по множеству $\Omega = (\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_p)$ при $i = \overline{1, p}$.

В качестве примера рассмотрим общую схему и конкретный случай вычисления кумулянта порядка 4,3:

$$cum[a, b, c, d] = (-1)^{p-1} (p-1) E[a, b, c, d] + (-1)^{p-1} (p-1) 4 E[a] E[b, c, d] + (-1)^{p-1} (p-1) 6 E[a] E[b] E[c, d] + (-1)^{p-1} (p-1) 3 E[a, b] E[c, d] + (-1)^{p-1} (p-1) E[a] E[b] E[c] E[d];$$

$$p = 4 : cum[a, b, c, d] = E[a, b, c, d] - 4 E[a] E[b, c, d] + 12 E[a] E[b] E[c, d] - 3 E[a, b] E[c, d] - 6 E[a] E[b] E[c] E[d];$$

$$a = s; b = c = d = s : C_{4,3} = cum[s, s, s, s] = E[s, s, s, s] - 4 E[s] E[s, s, s] + 12 E[s] E[s, s] E[s] - 3 E[s, s] E[s, s] - 6 E[s] E[s] E[s] E[s] = E_{4,3} - 4 E_{1,0} E_{3,3} + 12 E_{1,0} E_{1,1} E_{2,0} - 3 E_{2,1} E_{2,2} - 6 E_{1,0} E_{1,1}^3 ; E_{3,3} = E_{1,1} = 0 ; C_{4,3} = E_{4,3} - 3 E_{2,1} E_{2,2} .$$

Для решения задачи классификации фазоманипулированных сигналов рассмотрим значения кумулянтов порядков 2,0; 2,1; 4,0; 4,1; 4,2; 8,0. Рассмотрение кумулянтов других порядков не повысит качество распознавания для данного случая, а напротив, излишне усложнит метод. Вычисление происходит по формулам:

$$\begin{aligned} C_{2,0} &= E_{2,0}; \\ C_{2,1} &= E_{2,1}; \\ C_{4,0} &= E_{4,0} - 3 E_{2,0}^2; \\ C_{4,1} &= E_{4,1} - 3 E_{2,2} E_{2,1}; \\ C_{4,2} &= E_{4,2} - E_{2,2}^2 - 2 E_{2,1}^2; \\ C_{8,0} &= E_{8,0} - 28 E_{2,0} E_{6,0} - 35 E_{4,0}^2 + 420 E_{2,0}^2 E_{4,0} - 630 E_{2,0}^4. \end{aligned} \tag{9}$$

Было проанализировано по 100 сигналов. Значения кумулянтов для каждого вида манипуляции занесены в таблицу.

Табл. 1. Значения кумулянтов
Tab. 1. Cumulant values

	$C_{2,0}$	$C_{2,1}$	$C_{4,0}$	$C_{4,1}$	$C_{4,2}$	$C_{8,0}$
BPSK	1.000	-0.026	-2.000	0.000	-0.309	-0.016
QPSK	0.000	-0.003	-0.998	0.000	-0.663	-0.006
PSK-8	-0.003	0.009	0.000	0.000	-0.690	0.000

Нетрудно заметить, что значения кумулянтов различны для всех трёх рассматриваемых типов манипуляции, что и позволит с точностью произвести классификацию обрабатываемого сигнала. В процессе экспериментов значения стандартного отклонения кумулянтов каждого сигнала не превысило 20% от среднего значения, что даёт необходимую для решения подобных задач точность и не позволит неверно классифицировать сигнал.

Тем не менее, важным недостатком данного метода является сложность вычисления значений кумулянтов выше восьмого порядка. Основное же достоинство – высокая точность и однозначность классификации. Также данный подход можно использовать для построения алгоритма интеллектуальной классификации видов модуляции с помощью нейронных сетей.



Таким образом, получен следующий алгоритм определения радиотехнических параметров фазоманипулированных сигналов:

- производим предварительную обработку сигнала (передискретизация, фильтрация) [22-24];
- с помощью анализа кумулянтов предварительно определяем тип модуляции;
- определяем несущую частоту сигнала с помощью методов гармонического анализа (определённый на предыдущем шаге тип даёт значение порядка модуляции для верного возведения сигнала в степень)
- находим скорость манипуляции сигнала методами гармонического анализа;
- (необязательный шаг) с целью уточнения правильности определения вида модуляции, при наличии большой частотной отстройки между действительной и определённой ранее несущей частотами, производим сдвиг сигнала на несущую частоту путём умножения рассматриваемого сигнала на сгенерированный тон, имеющий частоту отстройки, и повторяем шаг 1.

Заключение

В работе предложен алгоритм определения радиотехнических параметров фазоманипулированного сигнала. Описаны существующие методы решения задачи определения вида модуляции, представлен метод, отличающийся подходом к распознаванию вида модуляции: без необходимости применения анализа спектральных характеристик. Рассмотрены их преимущества и недостатки, а также предложен общий алгоритм определения радиотехнических параметров.

Стоит отметить, что данный алгоритм может быть применим и для сигналов с другими видами модуляций, но с определёнными особенностями. Так, например, для FSK сигналов, количество гармоник на спектре при проведении гармонического анализа будет чётным, а однозначную классификацию вида модуляции даст анализ кумулянтов порядка 8,4 и 6,3.

Список использованных источников

- [1] *Аджемов С.С., Кленов Н.В., Терешонок М.В., Чиров Д.С.* Методы распознавания видов цифровой модуляции сигналов в когнитивных радиосистемах // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2015. № 6. С. 19-27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25580690> (дата обращения: 10.02.2019).
- [2] *Mobasser B.G.* Digital modulation classification using constellation shape // Signal Processing. 2000. Vol. 80, Issue 2. Pp. 251-277. DOI: 10.1016/S0165-1684(99)00127-9
- [3] *Velampalli C.* Hierarchical blind modulation classification in the presence of carrier frequency offset / C. Velampalli // Master's Thesis. Communications Research Center, 2010. Pp. 1-39.
- [4] *Воробьёва Е.И., Немцов Р.А., Чураков П.П.* Распознавание вида модуляции сигналов в системах радиомониторинга // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11, № 4. С. 72-75. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24191703> (дата обращения: 10.02.2019).
- [5] *Аведьян Э.Д., Дам В.Н.* К выбору кумулянтных признаков в задаче распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов // Информатизация и связь. 2015. № 4. С. 11-15. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24853422> (дата обращения: 10.02.2019).
- [6] *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер. 2002. 608 с.
- [7] *Боев Н.М.* Системы связи. Подвижные системы связи. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. 60 с.
- [8] *Караван О.В.* Различие созвездий сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией в условиях параметрической априорной неопределенности: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ярославль, 2010. 120 с.
- [9] *Беляева М.Б.* Распознавание модуляции: что можно узнать, если заранее не известно ничего // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 2. С. 55-63. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20279708> (дата обращения: 10.02.2019).
- [10] *Петров А.В.* Слепые методы оценки параметров сигналов в цифровых системах передачи информации: дис. ... канд. тех. наук. СПб., 2016. 156 с.
- [11] *Zaihe Y.* Automatic modulation classification of communication signals: doctor's dissertation of New Jersey Institute of Technology, 2006. pp. 231.
- [12] *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
- [13] *Прокус Дж.* Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
- [14] *Gardner W.A., Spooner C.M.* The cumulant theory of cyclostationary time-series. I. Foundation // IEEE Transactions on Signal Processing. 1994. Vol. 42, no. 12. Pp. 3387-3408. DOI: 10.1109/78.340775
- [15] *Leonov V.P., Shiryayev A.N.* On a Method of Calculation of Semi-Invariants // Theory of Probability & Its Applications. 1959. Vol. 4, Issue 3. Pp. 319-329. DOI: 10.1137/1104031
- [16] *Dandawate A.V., Giannakis G.B.* Asymptotic theory of mixed time averages and kth-order cyclic-moment and cumulant statistics // IEEE Transactions on Information Theory. 1995. Vol. 41, no. 1. Pp. 216-232. DOI: 10.1109/18.370106
- [17] *Кендалл М.Дж.* Теория распределений. Т. 1. / Под ред. А.Н. Колмогорова. М.: Наука, 1966. 587 с.
- [18] *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. 6-е изд. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.
- [19] *Малахов А.Н.* Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. М.: Советское радио, 1978. 376 с.
- [20] *Токмачев М.С.* Вычисление кумулянтов и моментов распределения Майкснера // Вестник Новгородского государственного университета. 2013. Т. 2, № 75. С. 47-51. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21700130&> (дата обращения: 10.02.2019).
- [21] *Бородкин Д.К.* Программный модуль для аналитической записи совместных моментов через кумулянтов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 4(44). С. 113-117. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22630906> (дата обращения: 10.02.2019).
- [22] *Maslov A., Lepikhin T.* Development of adaptive filtering algorithm for multi-frequency audiofile // Proceedings of



- the 2015 International Conference "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov (SCP), St. Petersburg, 2015. Pp. 573-575. DOI: 10.1109/SCP.2015.7342208
- [23] Maslov A., Lepikhin T. Comparative characteristics and selection of optimal filtering algorithm signal using LabVIEW software package // Proceedings of the International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM). AIP Publishing LLC, 2015. DOI: 10.1063/1.4912672
- [24] Маслов А.А., Лепихин Т.А. Проектирование LMS-алгоритма адаптивной фильтрации с использованием программного пакета LabVIEW // Процессы управления и устойчивость. 2015. Т. 2, № 1. С. 447-451. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24327225> (дата обращения: 10.02.2019).
- Поступила 10.02.2019; принята к публикации 25.02.2019; опубликована онлайн 19.04.2019.
- Об авторах:**
- Маслов Алексей Андреевич**, аспирант, кафедра компьютерных технологий и систем, факультет прикладной математики – процессов управления, Санкт-Петербургский государственный университет (198504, Россия, г. Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский пр., д. 35), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9678-7199>, a.maslov@spbu.ru
- Сотникова Маргарита Викторовна**, доцент, профессор кафедры компьютерных технологий и систем, факультет прикладной математики – процессов управления, Санкт-Петербургский государственный университет (198504, Россия, г. Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский пр., д. 35), доктор физико-математических наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0726-7448>, m.sotnikova@spbu.ru
- Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
- References**
- [1] Adjemov S.S., Klenov N.V., Tereshonok M.V., Chirov D.S. Methods for the Automatic Recognition of Digital Modulation of Signals in Cognitive Radio Systems. *Moscow University Physics Bulletin*. 2015; 70(6):448-456. (In Eng.) DOI: 10.3103/S0027134915060028
- [2] Mobasseri B.G. Digital modulation classification using constellation shape. *Signal Processing*. 2000; 80(2):251-277. (In Eng.) DOI: 10.1016/S0165-1684(99)00127-9
- [3] Velampalli C. Hierarchical blind modulation classification in the presence of carrier frequency offset. Master's Thesis. Communications Research Center, 2010, pp. 1-39. (In Eng.)
- [4] Vorobjeva E.I., Nemtsov R.A., Churakov P.P. Recognition of Signals Modulation Type in the Radio Monitoring Systems. *Bulletin of Voronezh state technical University*. 2015; 11(4):72-75. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24191703> (accessed 10.02.2019). (In Russ.)
- [5] Avedyan E.D., Nkhich D.V. To the selection of the best cumulants features in the recognition task of the digital modulation kind of the radio signals. *Informatization and communication*. 2015; 4:11-15. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24853422> (accessed 10.02.2019). (In Russ.)
- [6] Sergienko A.B. Digital Signal Processing. SPb.: Peter, 2002. (In Russ.)
- [7] Boev N.M. Communication systems. Mobile communication systems. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2013. (In Russ.)
- [8] Karavan O.V. Distinction of constellations of signals with quadrature amplitude modulation under parametric a priori uncertainty: dis. ... Ph.D. (Phys.-Math.). Yaroslavl, 2010. (In Russ.)
- [9] Beljaeva M. Modulation Recognition: What can we find out not knowing anything a priori. *Digital Signal Processing*. 2013; 2:55-63. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20279708> (accessed 10.02.2019). (In Russ.)
- [10] Petrov A.V. Blind methods for estimating the parameters of signals in digital information transmission systems: dis. ... Ph.D. (Engineering). SPb., 2016. (In Russ.)
- [11] Zaihe Y. Automatic modulation classification of communication signals: doctor's dissertation of New Jersey Institute of Technology, 2006. (In Eng.)
- [12] Sklar B. Digital Communication. Fundamentals and Application. 2nd edition. Prentice Hall, 2001. (In Eng.)
- [13] Proakis J., Salehi M. Digital communications. 3th edition. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2000. (In Eng.)
- [14] Gardner W.A., Spooner C.M. The cumulant theory of cyclostationary time-series. I. Foundation. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1994; 42(12):3387-3408. (In Eng.) DOI: 10.1109/78.340775
- [15] Leonov V.P., Shiryaev A.N. On a Method of Calculation of Semi-Invariants. *Theory of Probability & Its Applications*. 1959; 4(3):319-329. (In Eng.) DOI: 10.1137/1104031
- [16] Dandawate A.V., Giannakis G.B. Asymptotic theory of mixed time averages and kth-order cyclic-moment and cumulant statistics. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1995; 41(1):216-232. (In Eng.) DOI: 10.1109/18.370106
- [17] Kendall M.G., Stuart A. The Advanced Theory of Statistics: Vol. 1. Distribution Theory. Macmillan, New York, 1961. (In Eng.)
- [18] Wentzel E.S. Probability Theory (First Steps). Imported Pubn, 1975. (In Eng.)
- [19] Malakhov A.N. Kumuliantnyi analiz sluchainykh negaussovykh protsessov i ikh preobrazovaniy [Cumulant Analysis of Random Non-Gaussian Processes and Their Transformations]. M.: Soviet Radio, 1978. (In Russ.)
- [20] Tokmachev M.S. Calculating The Cumulants And Moments Of The Meixner Distribution. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. Yaroslava Mudrogo = Vestnik of Yaroslavl the Wise Novgorod State University*. 2013; 2(75):47-51. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21700130> (accessed 10.02.2019). (In Russ.)
- [21] Borodkin D.K. A Software module for analytical writing joint moments in terms of cumulants. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2014; 4(44):113-117. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22630906> (accessed 10.02.2019). (In Russ.)
- [22] Maslov A., Lepikhin T. Development of adaptive filtering algorithm for multi-frequency audiofile. Proceedings of the 2015 International Conference "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov (SCP), St. Petersburg, pp. 573-575, 2015. (In Eng.) DOI: 10.1109/SCP.2015.7342208
- [23] Maslov A., Lepikhin T. Comparative characteristics and se-



lection of optimal filtering algorithm signal using LabVIEW software package. Proceedings of the International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM). AIP Publishing LLC, 2015. (In Eng.) DOI: 10.1063/1.4912672

- [24] Maslov A., Lepikhin T. Projection of the LMS-algorithm of adaptive filtering using the LabVIEW software package. *Control Processes and Stability*. 2015; 2(1):447-451. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24327225> (accessed 10.02.2019). (In Russ.)

Submitted 10.02.2019; revised 25.02.2019;
published online 19.04.2019.

About the authors:

Alexey A. Maslov, Postgraduate Student, Department of Computer Applications and Systems, Faculty of Applied Mathematics and Control Processes, Saint Petersburg State University (35 University Av., Peterhof, St. Petersburg 198504, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9678-7199>, a.maslov@spbu.ru

Margarita V. Sotnikova, Professor, Department of Computer Applications and Systems, Faculty of Applied Mathematics and Control Processes, Saint Petersburg State University (35 University Av., Peterhof, St. Petersburg 198504, Russia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0726-7448>, m.sotnikova@spbu.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

