

УДК 621.391

## **Стохастическая модуляция и демодуляция сигналов на основе авторегрессий с изменяющимися параметрами при передаче по каналам связи**

<sup>1,2</sup> Андриянов Н. А., <sup>2</sup> Гаврилина Ю. Н.

<sup>1</sup>Ульяновский институт гражданской авиации  
им. Главного маршала авиации Б. П. Бугаева  
ул. Можайского, 8/8, Ульяновск, 432071, Российская Федерация  
nikita-and-nov@mail.ru

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет  
ул. Северный Венец, 32, г. Ульяновск, 432027, Российская Федерация  
nikita-and-nov@mail.ru, st.3472@gmail.com

Получено: 10 сентября 2018 г.

Отрецензировано: 21 сентября 2018 г.

Принято к публикации: 25 сентября 2018 г.

**Аннотация:** Наличие множества устройств связи, одновременно работающих при функционировании различных систем связи, создает сложную обстановку, как с точки зрения правильного приема информации, так и в плане электромагнитной обстановки. В связи с этим требуется решение, обеспечивающее надежный прием сигналов отличным от существующих способом. Для модуляции цифрового сигнала был предложен алгоритм формирования случайных процессов с изменяющимися параметрами. Установлены диапазоны различения параметров, для которых осуществляется эффективная демодуляция. Кроме того, предложен алгоритм модуляции и демодуляции цифровых сигналов, исследована эффективность его работы при различной вариативности параметров, исследована эффективность фильтрации таких сигналов при известных параметрах.

**Ключевые слова:** дважды стохастическая модель, авторегрессия, модуляция сигналов, демодуляция сигналов, корреляционная модуляция, фильтр Калмана, электромагнитная совместимость.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Андриянов Н. А., Гаврилина Ю. Н. Стохастическая модуляция и демодуляция сигналов на основе авторегрессий с изменяющимися параметрами при передаче по каналам связи. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2018. Т. 1, № 4. С. 350—364.

*Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011):* Андриянов, Н. А. Стохастическая модуляция и демодуляция сигналов на основе авторегрессий с изменяющимися параметрами при передаче по каналам связи / Н. А. Андриянов, Ю. Н. Гаврилина // Информационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1, № 4. С. 350—364.

## Stochastic modulation and demodulation of signals based on autoregression with varying parameters during information exchange over communication channels

N. A. Andriyanov<sup>1,2</sup> and Yu. N. Gavrilina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Ulyanovsk Civil Aviation Institute*

*8/8, Mozhaiskogo Str., Ulyanovsk, 432071, Russian Federation  
nikita-and-nov@mail.ru*

<sup>2</sup>*Ulyanovsk State Technical University*

*32, Severny Venets Str., Ulyanovsk, 432027, Russian Federation  
nikita-and-nov@mail.ru, st.3472@gmail.com*

Received: September 10, 2018

Peer-reviewed: September 21, 2018

Accepted: September 25, 2018

**Abstract:** *The presence of a multitude of communication devices that simultaneously operate in the various communication systems creates a complex situation, both in terms of the correct reception of information, and in terms of the electromagnetic environment. In this regard, a solution is required that ensures reliable reception of signals in a different way than the existing ones. To modulate a digital signal, an algorithm for generating random processes with varying parameters was proposed. The ranges of distinguishing parameters for which effective demodulation is performed are established. In addition, the algorithm of modulation and demodulation of digital signals was proposed, the effectiveness of its work with different parameters variability was investigated, the filtration efficiency of such signals was investigated with known parameters.*

**Keywords:** *doubly stochastic model, autoregression, modulation of signals, signal demodulation, correlation modulation, Kalman filter, electromagnetic compatibility.*

**For citation:** N. A. Andriyanov and Yu. N. Gavrilina, “Stochastic modulation and demodulation of signals based on autoregression with varying parameters during information exchange over communication channels,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 1, no. 4, pp. 350–364, 2018. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2018.01.4.27

## 1. Введение

Современные системы связи используют множество различных видов модуляции. В основном все они базируются на применении гармонических сигналов [1—3] и управлении их параметрами.

Последовательности символов, как известно, в таком случае на модуляторе превращаются в гармонические сигналы с разной амплитудой, фазой или частотой. В процессе демодуляции на приемнике сравнивается полученный сигнал и его ожидание для конкретного символа. Например, в демодуляторах могут использоваться алгоритмы, вычисляющие меру корреляционного сходства двух сигналов и принимающие решение после сравнения данной меры с вычисленным порогом.

Вместе с тем продолжающиеся в статистической радиотехнике исследования позволяют использовать в ряде различных задач случайные процессы (СП). В частности, были предложены дважды стохастические авторегрессионные модели [4—9], которые могут быть удачно применены при описании нестационарных во времени сигналов и неоднородных в пространстве полей.

Организация радиосвязи происходит с использованием мобильных и стационарных приемопередающих устройств, как правило, имеющих достаточно малую мощность. При этом должна обеспечиваться устойчивая голосовая связь.

Однако наличие множества таких устройств создает сложную электромагнитную обстановку. В системах связи могут возникать непреднамеренные помехи, при этом качество работы объекта будет снижаться. Это обуславливает необходимость развития новых методов передачи информации, позволяющих улучшить качество связи.

Таким образом, актуальной задачей является обеспечение надежного приема сигналов отличным от существующих способом в связи с наличием множества устройств связи, одновременно работающих при функционировании телекоммуникационных систем. Одним из таких методов может выступить модуляция сигналов с помощью корреляционных параметров авторегрессионных моделей.

## 2. Известные алгоритмы модуляции

Классически считается, что основными методами цифровой манипуляции являются: амплитудная, частотная, фазовая (или вместе угловая) модуляции [10]. Однако существуют и различные модификации классических методов, которые в основном и используются в настоящее время на практике. Рассмотрим их подробнее.

### 2.1. CAP-модуляция

Основной особенностью алгоритма является комбинация манипуляции с помощью амплитуды и фазы, поэтому сам алгоритм представляет амплитудно-фазовую модуляцию и может рассматриваться как частный случай алгоритма QAM [11]. При этом, в отличие от QAM при CAP-модуляции происходит специальная обработка спектра модулированного сигнала, в ходе которой удаляется составляющая, вносимая несущей частотой QAM. Восстановление несущей частоты осуществляется на приемнике. Следующим шагом работы приемника является считывание передаваемого потока данных по сигналу с несущей. Данный подход позволяет сократить избыточность при передаче. За счет этого увеличивается дальность связи, может регулироваться мощность передатчика, уменьшается уровень перекрестных помех в случае использования проводных систем передачи информации.

Принцип работы алгоритма заключается в следующем. После получения модулированного сигнала требуется исключить частоту, которая была предназначена для его переноса. Тем не менее, детальный анализ алгоритма CAP-модуляции позволяет сделать вывод о том, что данный алгоритм в части формирования линейного кода практически ничем не отличается от классических алгоритмов гармонической амплитудной модуляции.

На рис. 1 представлен алгоритм работы со спектром модулируемого сигнала при реализации CAP-модуляции. Здесь синим цветом обозначен спектр информационного сигнала, предназначенного для передачи, величине  $f_{max}$  соответствует верхняя граница спектра по частоте; зеленым цветом представлен спектр передаваемого сигнала, который был перенесен в область высокочастотной составляющей, характеризуемой несущей частотой  $f_c$ ; красным цветом показан спектр модулированного колебания, полученный после применения алгоритма CAP-модуляции.

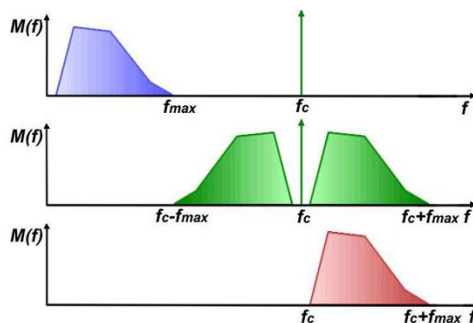


Рис. 1. Алгоритм модуляции CAP. Fig. 1. CAP-modulation

К основным преимуществам данного алгоритма относятся: достаточно простые условия реализации при высокой спектральной эффективности; более чем в 2 раза повышенная энергетическая эффективность формируемого сигнала за счет подавления несущей и одной боковой полосы; в теории с помощью САР-модуляции можно достичь максимальных отношений сигнал/шум (ОСШ), что позволяет покрывать максимально возможные расстояния.

Однако алгоритму САР-модуляции присущ существенный недостаток, связанный с отсутствием каких-либо стандартов по процедуре преобразования сигналов.

## 2.2. Алгоритм модуляции 2B1Q

Известен алгоритм, который сопоставляет двум бинарным символам одно значение напряжения. По принципу своей работы данный алгоритм и получил название — линейное кодирование 2B1Q (2 Binary 1 Quandary) [12, 13]. Анализ алгоритма показывает, что модуляция 2B1Q является разновидностью амплитудно-импульсной модуляции, для которой выбирают четыре уровня напряжения и не происходит возврата к нулевому значению. Алгоритм формирования кода приведен в табл. 1.

Табл. 1 Алгоритм формирования кода 2B1Q  
Table 1. Algorithm for the formation of 2B1Q code

Кодовая группа	Кодовое напряжение
00	-2,5 В
01	-0,833 В
10	+2,5 В
11	+0,833 В

Как показывает анализ представленной выше таблицы, чтобы сформировать необходимое напряжение, требуется исходную последовательность бит разделить на группы, содержащие по 2 символа. Первый бит задает полярность используемого для модуляции напряжения. Можно заметить, что для групп «00» и «01» напряжение имеет отрицательный уровень, а для групп «10» и «11» — положительный. Второй бит задает большую или меньшую амплитуду. В частности, второму «0» соответствует уровень 2,5 В, а второй «1» — уровень 0,83 В.

Таким образом, закодированный в соответствии с правилами 2B1Q сигнал представляет собой последовательность скачкообразно изменяющихся напряжений с 4 возможными уровнями. Пример работы алгоритма 2B1Q представлен на рис. 2.

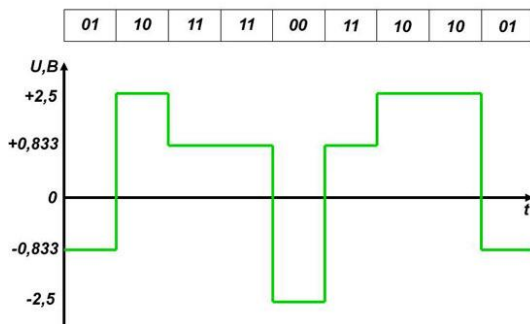


Рис. 2. Пример формирования кода 2B1Q.

Fig. 2. Forming 2B1Q code

### 2.3. Алгоритм модуляции TCM

Наиболее усовершенствованный метод модуляции — TCM (Trellis Coded Modulation), модуляция с решетчатым кодированием или треллис-модуляция [12, 13]. Во-первых, TCM-модулятор снижает требования к каналу связи по отношению ОСШ на 3—6 дБ по сравнению с QAM модуляцией. Во-вторых, данный метод увеличивает число передаваемых бит до 9, что превышает возможности алгоритма QAM.

Одним из основных решений, заложенных в метод модуляции TCM, является введение дополнительного бита, полученного с помощью сверточного кодирования. После того как число бит было увеличено, используются сверточные кодеры [14]. Хотя такой подход приводит к тому, что требуется увеличить общее число посылок в два раза, он обеспечивает выигрыш по ОСШ. Данный выигрыш достигается за счет возможности декодера вносить исправления в принимаемый сигнал. В частности, может быть использован эффективный алгоритм мягкого декодирования Витерби [14]. Анализ принятого избыточного бита и учет ранее принятых сигналов дает возможность более уверенно выбрать наиболее вероятную точку в пространстве сигналов. Усложнение алгоритмов обработки сигналов и увеличение общего числа посылок ведет к увеличению требуемой производительности (вычислительной мощности) декодера, однако современный уровень развития цифровых сигнальных процессоров позволяет решить эту задачу.

### 2.4. OFDM модуляция

Широкое применение в системах радиосвязи нашел алгоритм OFDM модуляции [15]. В телекоммуникациях ортогональное мультиплексирование с частотным разделением (OFDM) представляет собой способ

кодирования цифровых данных на нескольких несущих частотах. OFDM превратилась в популярную схему широкополосной цифровой связи, используемую в таких приложениях, как цифровое телевидение и аудиовещание, доступ к Интернету DSL, беспроводные сети, сети электропередач и 4G мобильной связи.

Основным преимуществом OFDM по схемам с одной несущей является его способность справляться с серьезными условиями канала (например, затухание высоких частот в длинном медном проводе, узкополосная интерференция и частотно-избирательное замирание из-за многолучевого распространения) без сложных фильтров выравнивания. Уравнивание каналов упрощается, поскольку OFDM можно рассматривать как использование многих медленно модулированных узкополосных сигналов, а не одного быстро модулированного широкополосного сигнала. Низкая скорость передачи символов позволяет использовать защитный интервал между доступными символами, что позволяет устранить межсимвольные помехи (ISI) и использовать эхо-сигналы и разброс во времени для достижения коэффициента усиления разнесения, т. е. улучшение ОСШ. Этот механизм также облегчает проектирование одночастотных сетей, где несколько соседних передатчиков одновременно посылают один и тот же сигнал на одной и той же частоте, поскольку сигналы от нескольких удаленных передатчиков могут быть повторно объединены конструктивно, сохраняя помехи традиционной системе с одной несущей.

Таким образом, все рассмотренные алгоритмы модуляции имеют электромагнитное влияние друг на друга. Это связано с тем, что модуляция осуществляется сигналами, находящимися в перекрывающихся частотных диапазонах. Кроме того, большинство методов используют постоянные или гармонические сигналы для модуляции. Интересным представляется решение, в котором модуляция осуществлялась бы посредством передачи случайного сигнала с заданными свойствами.

### 3. Стохастический модулятор

Рассмотрим следующую схему модуляции, которая не вызывает сложностей при передаче информации в случае применения генераторов случайных последовательностей [9]:

1) если необходимо передать символ «0», тогда на определенном временном интервале (длина последовательности) необходимо реализовать модель вида

$$x_i = \rho_0 x_{i-1} + \sqrt{\sigma_x^2 (1 - \rho_0^2)} \xi_i, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  — корреляционный параметр для модуляции «0»-го бита,  $\sigma_x^2$  — дисперсия моделируемого СП,  $\xi_i$  — случайная добавка, ее математическое ожидание равно нулю, а дисперсия равна единице,  $i$  — длина последовательности, отведенной для передачи одного бита.

2) если необходимо передать символ «1», тогда необходимо лишь заменить параметры в модели (1) и получить модель следующего вида

$$x_i = \rho_1 x_{i-1} + \sqrt{\sigma_x^2 (1 - \rho_1^2)} \xi_i, \quad (2)$$

где  $\rho_1$  — корреляционный параметр для модуляции «1»-го бита,  $\sigma_x^2$  — дисперсия моделируемого СП,  $\xi_i$  — случайная добавка, ее математическое ожидание равно нулю, а дисперсия равна единице,  $i$  — длина последовательности, отведенной для передачи одного бита.

Модели (1) и (2) полностью передают алгоритм модуляции двоичного сигнала и не вызывают особых сложностей. Интересно, что совокупный сигнал из «0» и «1» будет представлять собой обычную разрывную модель, параметры которой изменяются на определенных интервалах. Очевидно, что наилучшее различие сигналов будет в том случае, если параметры прямо противоположны. Например, при  $\rho_0 = -0.99$  и  $\rho_1 = 0.99$ . Более того, нам достаточно будет использовать передатчик с одной мощностью в обоих случаях.

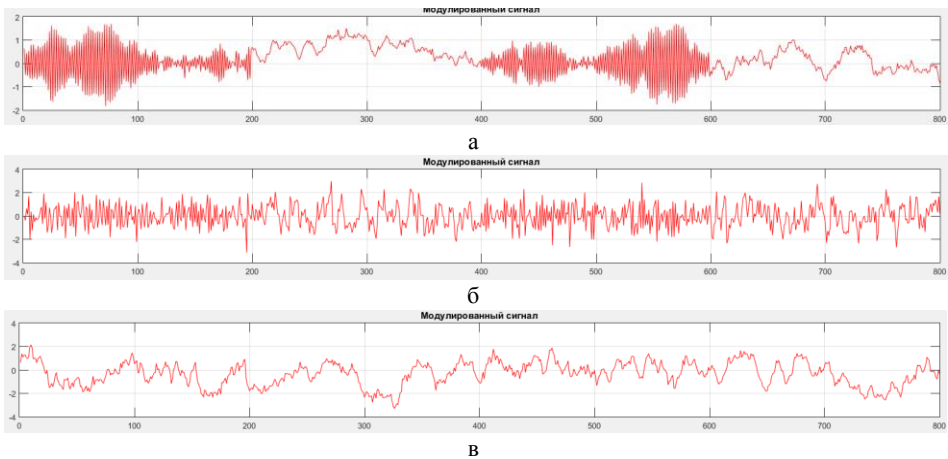


Рис. 3. Модуляция при разных параметрах.  
Fig. 3. Modulation with different parameters



На рис. 3 представлены примеры имитации последовательности «0101» при различных параметрах моделей: а —  $\rho_0 = -0.99$ ,  $\rho_1 = 0.99$ ; б —  $\rho_0 = -0.5$ ,  $\rho_1 = 0.5$ ; в —  $\rho_0 = 0.92$ ,  $\rho_1 = 0.95$ . Продолжительность одного бита составляет 200 отсчетов.

Известно, что при передаче по каналам связи будут присутствовать помехи. Тем не менее, для исследований интересен и абсолютный случай. Поэтому сначала выполним оценку того, как работает алгоритм различения и обнаружения по такой схеме в случае идеального канала связи. Затем исследуем возможности фильтрации принимаемых сигналов с известными параметрами. Таким образом, обнаружение передаваемых символов сопряжено с задачей оценивания корреляционных параметров на участке модулированного сигнала, соответствующего длительности одного бита.

#### 4. Демодуляция в идеальном канале

Проведем исследования по модуляции и демодуляции сигналов в случае использования моделей (1) и (2).

На рис. 4 представлен пример моделирования последовательности для передачи сигнала «1101». При этом продолжительность одного бита равна 200 отсчетам. Для модуляции «0» используется отрицательная корреляция  $\rho_0 = -0.99$ , а для модуляции «1» используется положительная корреляция  $\rho_1 = 0.99$ .



Рис. 4. Последовательность бит на передатчике и результат модуляции  
Fig. 4. Transmitter bit sequence and modulation result

Анализ рис. 4 показывает, что предложенный метод позволяет отойти от гармонических сигналов при модуляции. При этом в процессе демодуляции необходимо выполнить следующие оценки последовательно на каждом из участков модуляции

$$\hat{\rho}_j = \frac{1}{\hat{\sigma}_{jx}^2 (M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (x_{ji} - \hat{m}_{jx})(x_{j(i+1)} - \hat{m}_{jx}), \quad (3)$$

где используются оценки среднего значения и дисперсии, полученные по выборке для конкретного бита.

Соответственно дальше по полученным оценкам необходимо выполнить демодуляцию, связанную с обнаружением на заданном участке «0» или «1».

На рис. 5 показан процесс демодуляции по полученным с помощью выражения (3) оценкам. При этом пороговым значением в данном случае считается величина  $\frac{\rho_0 + \rho_1}{2}$ . Если оценка больше данной величины, то принимается решение о том, что передавалась «1». В противном случае, принимается решение о передаче «0».

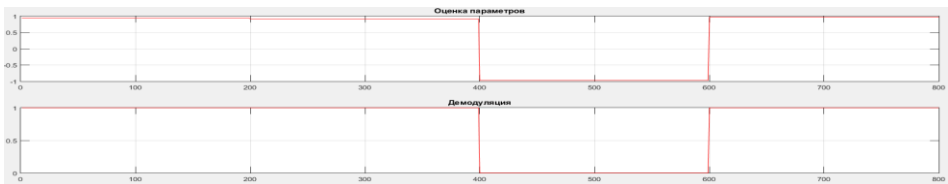


Рис. 5. Оценка параметров и результат демодуляции

Fig. 5. Parameter estimation and demodulation result

Выполним исследование эффективности демодуляции в зависимости от разности между корреляционными параметрами для передачи «0» и «1». Будем проводить серию экспериментов из  $N=1000$  раз для последовательности «1010», при этом  $\rho_1 = 0.99$ , а  $\rho_0 = -0.99$  и последовательно приближается к  $\rho_1$ . Полученные зависимости представлены в табл. 2.

Табл. 2 Исследование эффективности демодуляции

Table 2. Demodulation efficiency study

$\Delta\rho$	1,98	1,58	1,18	0,78	0,38	0,1	0,05	0,025	0,01
$P_D$	1	1	1	0,997	0,991	0,665	0,288	0,072	0,014

На рис. 6 представлен график данной зависимости.

Анализ кривой на графике рис. 6 показывает, что добиться 100%-демодуляции в отсутствии помех можно уже при различии корреляционных параметров около 0.5, если брать достаточно большой коэффициент корреляции для передачи «1».

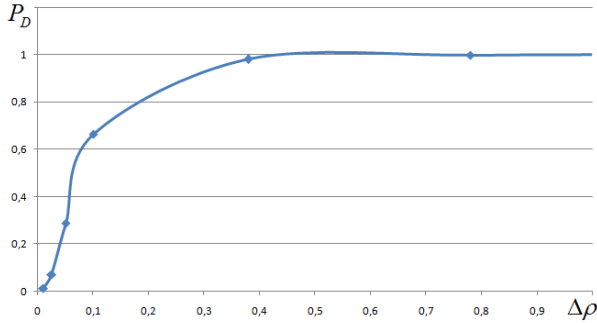


Рис. 6. Эффективность демодуляции.

Fig. 6. Demodulation efficiency

### 5. Эффективность фильтрации

Пусть необходимо осуществить оптимальное рекуррентное оценивание СП по имеющимся зашумленным данным

$$z_i = x_i + n_i, i = 1, 2, \dots, \tag{4}$$

где  $n_i, i = 1, 2, \dots$ , — белый гауссовский шум с дисперсией  $\sigma_n^2$ .

Исходя из того, что используется авторегрессия с кратными корнями характеристических уравнений [16], включающая в себя представленную авторегрессию первого порядка, можно записать расширенный вектор состояния

$$\bar{x}_i = (x_i, x_{i-1}, \dots, x_{i-m+1})^T. \tag{5}$$

Тогда можно переписать модель наблюдений

$$z_i = C\bar{x}_i + n_i, i = 1, 2, \dots, \tag{6}$$

где  $C = (1 \ 0 \dots 0)$ .

Само уравнение также следует записать в матрично-векторной форме

$$\bar{x}_i = \wp \bar{x}_{i-1} + \xi_i, i = 1, 2, \dots, \tag{7}$$

$$\text{где } \wp = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \dots & \rho_{1m} \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}; \rho_{1j} = (-1)^{j+1} C_m^j \rho^j;$$

$$\bar{\xi}_i = (\xi_i, 0, \dots, 0)^T; V_{\bar{\xi}} = M\{\bar{\xi}_i \bar{\xi}_i^T\}.$$

После выполненных преобразований воспользуемся стандартными уравнениями линейного фильтра Калмана для нахождения оптимальных оценок информационного СП

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{zi} + P_i C^T \frac{1}{\sigma_n^2} (z_i - C \hat{x}_{zi}), P_i = P_{zi} (E + \frac{1}{\sigma_n^2} C^T C P_{zi})^{-1}, \quad (8)$$

где  $P_{zi} = \wp P_{i-1} \wp^T + V_{\xi}$ ;  $\hat{x}_{zi} = \wp \hat{x}_{i-1}$ .

На каждом  $i$ -м шаге оценивания строится оптимальный прогноз

$\hat{x}_{zi} = \sum_{j=1}^m \rho_{1j} \hat{x}_{i-j}$  на основе предыдущих оценок  $\hat{x}_{i-j}$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$  и находится наилучшая (в смысле минимума дисперсии ошибки  $P_{11i} = M \{ (x_i - \hat{x}_i)^2 \}$ ) оценка

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{zi} + P_{11i} \frac{1}{\sigma_n^2} (z_i - \hat{x}_{zi}), \quad (9)$$

где  $P_{11i} = P_{\text{э}11i} / \left( 1 + \frac{P_{\text{э}11i}}{\sigma_n^2} \right)$ .

Остальные компоненты вектора  $\hat{x}_i$  вычисляются на основе интерполяции предшествующих оценок с учетом очередного наблюдения  $z_i$  и взаимных ковариаций ошибок оценивания.

На рис. 7 представлены полученные на основе фильтрации (4—9) дисперсии ошибок фильтрации АР первого порядка (сплошные линии) для разных отношений сигнал/шум  $q = \sigma_x^2 / \sigma_n^2$  при корреляционном параметре  $\rho = 0.99$ .

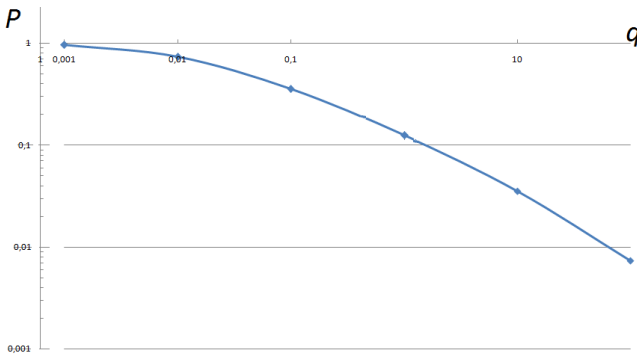


Рис. 7. Эффективность фильтрации авторегрессионного СП.

Fig. 7. Filtration efficiency of autoregressive random process

Анализ полученной зависимости показывает, что возможно достижение эффективной фильтрации ( $P < 0,1$ ) уже при сопоставимых значениях сигнал шум.

## 6. Заключение

Таким образом, полученные результаты показывают, что для случая хорошо отделенных значений параметров предложенный алгоритм эффективно справляется с поставленной задачей (разница более 0.5). Кроме того, для предложенных моделей существуют оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы фильтрации, что позволяет выполнять различение также и в условиях помех. Показано, что при корреляции 0,99 одного из параметров можно получить дисперсии ошибок фильтрации меньше 0,1 уже при сопоставимых отношениях сигнал/шум.

## Список литературы

1. Кулешов В. Н., Удалов Н. Н., Богачев В. М. и др. Генерирование колебаний и формирование радиосигналов. М. : МЭИ, 2008. 416 с.
2. Самохин В. П., Киндяков Б. М. Памяти Эдвина Армстронга (18.12.1890—31.01.1954) // Наука и образование. № 1. 2014.
3. Кузнецов А. П., Курулев А. П., Батура М. П.. Теория электрических цепей. Минск, 2015. 413 с.
4. Васильев К. К., Дементьев В. Е., Андриянов Н. А. Сравнительный анализ точечного прогнозирования дважды стохастической и авторегрессионных моделей // DSPA : Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2016. Т. 6, № 2. С. 290—294.
5. Azanov P. T., Danilov A. N., Andriyanov N. A. Development of software system for analysis and optimization of taxi services efficiency by statistical modeling methods // CEUR Workshop Proceedings. 2017. Т. 1904. С. 232—238.
6. Andriyanov N. A., Sonin V. A. Using mathematical modeling of time series for forecasting taxi service orders amount // Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference «Fuzzy Technologies in the Industry – FTI 2018», CEUR Workshop Proceedings. Т. 2258, С. 462—472.
7. Vasiliev K., Dementiev V., Andriyanov N. Representation and processing of multispectral satellite images and sequences // Procedia Computer Science. 2018. Т. 126. С. 49—58.
8. Андриянов Н. А., Гаврилина Ю. Н. Обнаружение двоичных символов на основе модуляции дважды стохастическими моделями // 73-я Международная конференция радиоэлектронные устройства и системы для ифокоммуникационных технологий (REDS-2018). Материалы конференции. С. 213—215.
9. Андриянов Н. А., Гаврилина Ю. Н. Обнаружение и различение сигналов, модулируемых авторегрессиями с изменяющимися корреляционными свойствами. В кн.: 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2018 (Севастополь, 9—15 сент. 2018 г.). 2018. С. 356—360.
10. Теория электрической связи : учебное пособие / К. К. Васильев, В. А. Глушков, А. В. Дормидонтов, А. Г. Нестеренко ; под общ. ред. К. К. Васильева. Ульяновск : УлГТУ, 2008. 452 с.

11. Gelgor A., Gorlov A., Popov E. On the synthesis of optimal finite pulses for bandwidth and energy efficient single-carrier modulation // *Internet of Things, Smart Spaces and Next Generation Networks and Systems*. Springer International Publishing. 2015. P. 655—668.
12. Горюнов А. Г., Ливенцов С. Н., Чурсин Ю. А. Телеконтроль и телеуправление : учебное пособие. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 139 с.
13. Иванов М. Т., Сергиенко А. Б., Ушаков В. Н. Радиотехнические цепи и сигналы : Учебник для вузов. Стандарт третьего поколения / под ред. В. Н. Ушакова. СПб. : Питер, 2014. 336 с.
14. Гладких А. А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. Ульяновск : УлГТУ, 2010. 379 с.
15. Berger L. T., Schwager A., Pagani P., Schneider D. M. MIMO Power Line Communications : Narrow and Broadband Standards, EMC, and Advanced Processing. Devices, Circuits, and Systems. CRC Press, 2014. 696 с.
16. Васильев К. К., Андриянов Н. А. Анализ авторегрессий с кратными корнями характеристических уравнений // *Радиотехника*. 2017. № 6. С. 13—17.

## References

- [1] V. N. Kuleshov et al. *Generirovanie kolebaniy i formirovanie radiosignalov* [Oscillation and radio signal generation]. Moscow, MEI, 2008. (In Russ.).
- [2] V. P. Samokhin and B. M. Kindiakov, “Pamyati Edwina Armstronga [In memory of Edwin Armstrong],” *Science and Education*, no. 1, 2014. (In Russ.).
- [3] A. P. Kuznetsov et al. *Theoriya elektriceskikh tcepey* [Electrical Circuit Theory]. Minsk, 2015. (In Russ.).
- [4] K. K. Vasiliev et al. “Srvnitelnyi analiz tochecnogo prognozirovaniia dvazhdy stochasticheskoi i avtoregressionnoi modelei [Comparative analysis of point prediction of double stochastic and autoregressive models],” *DSPA*, 2016, vol. 6, no. 2. pp. 290–294. (In Russ.).
- [5] P. T. Azanov et al. “Development of software system for analysis and optimization of taxi services efficiency by statistical modeling methods,” *CEUR Work-shop Proceedings*, 2017, vol. 1904, pp. 232–238.
- [6] N. A. Andriyanov and V. A. Sonin, “Using mathematical modeling of time series for forecasting taxi service orders amount,” *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference “Fuzzy Technologies in the Industry – FTI 2018,” CEUR Workshop Proceedings*, 2018, vol. 2258, pp. 462–472.
- [7] K. Vasiliev et al. “Representation and processing of multispectral satellite images and sequences,” *Procedia Computer Science*, vol. 126, pp. 49–58, 2018.
- [8] N. A. Andriyanov and Yu. N. Gavrilina, “Obnaruzhenie dvoichnykh simbolov na osnove modulyacii dvazhdy stochasticheskimi modeliami [Detection of binary symbols based on modulation by double stochastic models],” *REDS: Telecommunications devices and systems*, p. 213–215, 2018. (In Russ.).
- [9] N. A. Andriyanov and Yu. N. Gavrilina, “Obnaruzhenie i razlichenie signalov, moduliruemykh avtoregressiyami s izmenyayuschimisya correlyacionnymi svoistvami [Detection and discrimination of signals modulated by autoregression with varying correlation properties],” in *Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2018 28<sup>th</sup> International Crimean Conference*, 2018, pp. 356–360. (In Russ.).
- [10] K. K. Vasiliev et al. *Theoriya elektriceskoy svyazi* [Theory of electrical communication]. Ulyanovsk: UISTU, 2008. (In Russ.).

- [11] A. Gelgor et al. “On the synthesis of optimal finite pulses for bandwidth and energy efficient single-carrier modulation,” in *Internet of Things, Smart Spaces and Next Generation Networks and Systems*, Springer International Publishing, 2015, pp. 655–668.
- [12] A. G. Goryunov et al. *Telekontrol i teleupravlenie* [Telecontrol and control system]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2011. (In Russ.).
- [13] M. T. Ivanov et al. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio circuits and signals]. St. Petersburg: 2014. (In Russ.).
- [14] A. A. Gladkikh, *Osnovy teorii myagkogo dekodirovaniya izbytochnykh kodov v stirayuschem kanale svyazi* [Fundamentals of the theory of soft decoding of redundant codes in the erasing communication channel]. Ulyanovsk: UISTU, 2010. (In Russ.).
- [15] L. T Berger et al. *MIMO Power Line Communications: Narrow and Broadband Standards, EMC, and Advanced Processing. Devices, Circuits, and Systems*. CRC Press, 2014.
- [16] K. K. Vasiliev and N. A. Andriyanov, “Analiz avtoregressii s kratnymi kornyami kharakteristicheskikh uravnenii [Analysis of autoregression with multiple roots of characteristic equations],” *Radiotekhnika*, no. 6, pp. 13—17, 2017. (In Russ.).

### Информация об авторах

**Андрьянов Никита Андреевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры авиационной техники Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, и кафедры «Телекоммуникации» Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0735-7697.

**Гаврилина Юлия Николаевна**, аспирант кафедры «Телекоммуникации» Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

### Information about the authors

**Nikita A. Andriyanov**, Cand. Sci. (Eng.), lecturer of Aviation Engineering Department of Ulyanovsk Civil Aviation Institute and lecturer of Telecommunications Department of Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0735-7697.

**Yuliya N. Gavrilina**, graduate student of Telecommunications Department of Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.