

УДК 621.391:621.396

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.45.2.002](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.002)

Анализ адекватности математических моделей параметров частично-когерентных сигналов в радиотехнических системах

Е.И. Глушанков^{1✉}, З.К. Кондрашов², А.В. Суденкова¹, Е.А. Рылов³

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт микроэлектронной аппаратуры «Прогресс», Москва, Российская Федерация

³Проектно-конструкторское бюро «РИО», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Резюме. В статье рассматривается анализ адекватности марковских моделей параметров частично-когерентных сигналов в радиотехнических системах на основе стохастических дифференциальных уравнений, проведенный в программной среде MATLAB. Представлены результаты моделирования одномерных негауссовских и гауссовских непрерывных, дискретно-непрерывных и смешанных случайных процессов. Методом функциональной (квазигауссовской) аппроксимации осуществляется представление многомерной плотности распределения вероятностей через одномерные плотности компонент и элементы корреляционной матрицы векторного случайного процесса. Для полученных в результате такого представления многомерных плотностей распределения вероятностей и синтезированных на их основе многомерных стохастических дифференциальных уравнений рассмотрено моделирование векторных случайных процессов, описывающих параметры частично-когерентных сигналов в непрерывных каналах связи. Производится оценка соответствия полученных моделей теоретическим распределениям по критерию согласия Колмогорова-Смирнова. Исследуются диапазоны изменений параметров, входящих в состав СДУ, при которых модель можно считать состоятельной, а также влияние параметров на форму рассматриваемых распределений. По полученным результатам можно оценить диапазоны изменения параметров моделей, определяющих вид стохастических дифференциальных уравнений, при которых выполняются требования адекватности полученных моделей частично-когерентных в пространственном и частотном смысле сигналов в радиотехнических системах.

Ключевые слова: частично-когерентные сигналы, стохастические дифференциальные уравнения, критерий Колмогорова-Смирнова, модели распределения Рэлея и Гаусса, функциональная аппроксимация, белый шум, пуассоновский шум.

Для цитирования: Глушанков Е.И., Кондрашов З.К., Суденкова А.В., Рылов Е.А. Анализ адекватности математических моделей параметров частично-когерентных сигналов в радиотехнических системах. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1541> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.002

Analysis of adequacy of mathematical models of parameters of partially coherent signals in radio-technical systems

E.I. Glushankov^{1✉}, Z.K. Kondrashov², A.V. Sudenkova¹, E.A. Rylov³

¹The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, the Russian Federation

²Research Institute of Microelectronic Equipment "Progress", Moscow, the Russian Federation

³*Design Bureau "RIO", Saint-Petersburg, the Russian Federation*

Abstract. The article discusses the analysis of the adequacy of Markov models of parameters of partially coherent signals in radio systems based on stochastic differential equations, carried out in the MATLAB software environment. The results of modeling one-dimensional non-Gaussian and Gaussian continuous, discrete-continuous and mixed random processes are presented. The method of functional (quasi-Gaussian) approximation represents the multidimensional probability distribution density through one-dimensional component densities and elements of the correlation matrix of a vector random process. For the multidimensional probability distribution densities obtained as a result of this representation and the multidimensional stochastic differential equations synthesized on their basis, the modeling of vector random processes describing the parameters of partially coherent signals in continuous communication channels is considered. The compliance of the obtained models with theoretical distributions is assessed using the Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit criterion. The ranges of changes in the parameters included in the SDE at which the model can be considered consistent, as well as the influence of the parameters on the shape of the distributions under consideration, are studied. Based on the results obtained, it is possible to estimate the ranges of changes in the parameters of the models that determine the form of stochastic differential equations, under which the requirements for the adequacy of the obtained models of partially coherent in the spatial and frequency sense of signals in radio systems are met.

Keywords: partially coherent signals, stochastic differential equations, Kolmogorov-Smirnov test, Rayleigh and Gauss distribution models, functional approximation, white noise, Poisson noise.

For citation: Glushankov E.I., Kondrashov Z. K., Sudenkova A.V., Rylov E.A. Analysis of adequacy of mathematical models of parameters of partially coherent signals in radio-technical systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1541> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.002 (In Russ.).

Введение

Одним из конструктивных методов моделирования параметров случайных частично-когерентных сигналов в непрерывных каналах связи является их представление в виде многомерных стохастических дифференциальных уравнений (СДУ), коэффициенты которых определяются, исходя из известных вероятностных характеристик моделируемых процессов, как показано в [1-5]. Выразим векторный в общем случае негауссовский стохастический процесс, который описывает случайные параметры (комплексные амплитуды или амплитуды в квадратурных каналах) частично-когерентных сигналов, в виде следующего многомерного СДУ [1-5]:

$$\frac{dX(t)}{dt} = F[X(t)] + G[X(t)]V(t), \quad (1)$$

где $X(t)$ – векторный L -мерный случайный процесс, L – число каналов пространственно-временной или частотно-временной обработки сигналов, $F[X(t)]$ – L -мерный векторный коэффициент СДУ, $G[X(t)]$ – $(L \times L)$ -мерный матричный коэффициент СДУ, $V(t)$ – L -мерный векторный возбуждающий процесс (формирующий шум), компонентами которого являются белые шумы при моделировании непрерывных случайных процессов или пуассоновские последовательности дельта-импульсов при моделировании дискретно-непрерывных (разрывных) случайных процессов и др., с начальными условиями $X(0) = X_0$. Чтобы синтезировать модель, в форме СДУ (1) необходимо определить коэффициенты СДУ $F[X(t)]$ и $G[X(t)]$ и спектральную плотность мощности шума $V(t)$ по заданным статистическим характеристикам моделируемого процесса $X(t)$. Рассмотрим особенности моделирования сигналов различной пространственной или частотной когерентности. Сигналы на выходе элементов антенн описываются, как правило, тремя способами, каждый из которых учитывает, во-первых, величину

расстояния между антенными элементами или частотный сдвиг в полосе частот, а во-вторых, факт нахождения в ближней или дальней зоне источников сигналов и помех.

В первом случае при пространственной обработке в случае расположения источников излучений в дальней зоне приемной антенны принимаемые сигналы и помехи имеют одинаковые начальные фазы на выходе всех антенных элементов, к значениям которых добавляется только детерминированная составляющая, зависящая от углов прихода сигналов и помех и геометрии антенной системы (пространственный набег фазы), сигналы называются *пространственно-когерентными сигналами* (ПКС) [6]. Тогда случайные параметры сигнала на выходе первого антенного элемента можно представить одномерными СДУ (1), а сигналы на выходе остальных элементов могут быть получены из них по детерминированным функциональным зависимостям, определяемым пространственным набегом.

Во втором случае, при нахождении некоторого количества источников в ближней зоне приемной антенны (при возникновении переотражения радиоволн от поверхности и от элементов конструкции объекта), значения начальной фазы в элементах не совпадают друг с другом, но являются коррелированными между собой. Такие сигналы называются *частично-когерентными сигналами* (ЧКС) [6]. В этом случае они выражаются многомерными (векторными) СДУ. В обоих случаях (ПКС и ЧКС) расстояние между антенными элементами должны лежать в диапазоне $d \approx (0,25 - 0,75)\lambda$, где λ – длина волны. Частичная когерентность сигналов свойственна не только при их представлении в пространственной, но и в частотной области. Это явление в частотной области появляется при приеме широкополосных сигналов в нестационарных каналах с многолучевостью [3]. Данный эффект обусловлен свойством неоднородности смещения частоты Доплера в полосе принимаемого сигнала или влиянием частотно-селективных замираний.

В третьем случае, при интервалах между антенными элементами $d > \lambda$ и некоррелированности сигналов на выходе различных элементов, каждый из них можно описать своим одномерным СДУ. Такие сигналы называются *пространственно-некогерентными сигналами* (ПНКС) [6], они обрабатываются в устройствах пространственно-временной обработки сигналов с пространственным разнесением, принимаемым по параллельным пространственным каналам [7].

Методы синтеза СДУ (1), позволяющие определить коэффициенты $F[X(t)]$ и $G[X(t)]$ по заданным статистическим характеристикам моделируемого процесса $X(t)$, подробно рассмотрены в [1-5] и в дальнейшем будем считать коэффициенты заданными и СДУ полностью задано. При этом важным вопросом является проверка адекватности моделей в форме СДУ, которая может быть проведена, например, по непараметрическим критериям согласия [8]. Проанализируем таким способом адекватность моделей для некоторых наиболее распространенных в радиотехнических приложениях законов распределения.

Моделирование одномерного рэлеевского процесса

Как показано в [1-5], для одномерного случая коэффициенты СДУ можно определить, записав плотность распределения вероятностей (ПРВ) в виде уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова (СДУ (1) справедливо для марковских случайных процессов) и определив коэффициенты сноса и диффузии, по которым вычисляются неизвестные коэффициенты СДУ (1) для различных ПРВ. Так, в случае рассмотрения канала связи с замираниями амплитуда сигнала может быть описана одномерным рэлеевским процессом, для которого СДУ будет иметь следующий вид:

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\frac{4\sigma^2}{N_0}A(t) + \frac{N_0}{4A(t)} + \vartheta_A(t), \quad (2)$$

где $A(t)$ – случайная амплитуда сигнала в условиях замираний при отсутствии зеркальных компонент, σ^2 – дисперсия, $\vartheta_A(t)$ – формирующий аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ), N_0 – спектральная плотность мощности шума.

Результаты моделирования в среде MATLAB СДУ (2) и сравнение полученных значений со значениями, определенными по теоретическому рэлеевскому распределению, по критерию согласия Колмогорова-Смирнова показали, что коэффициент совпадения (вероятность совпадения) теоретического распределения и распределения, полученного моделированием по СДУ, составляют 0,83-0,88.

С увеличением дисперсии амплитуды сигнала σ^2 диапазон значений спектральных плотностей мощности шума N_0 , удовлетворяющих критерию Колмогорова-Смирнова, уменьшается, но смещается в область больших значений N_0 . Для разных комбинаций параметров среднеквадратического отклонения (СКО) и N_0 это значение может быть больше или меньше. Например, в Таблице 1 представлены граничные случаи для сочетаний параметров, когда критерий Колмогорова-Смирнова выполняется.

Таблица 1 – Зависимость граничного значения отношения сигнал/шум (ОСШ) от СКО
Table 1 – Dependence of the boundary value of SNR on σ

ОСШ (граничное), дБ	0,5	-10	-20
СКО, В	2	0,7	0,2

С помощью СДУ (1) возможно моделирование непрерывных случайных негауссовских процессов, для генерации которых используются АБГШ $V(t)$. Кроме моделирования непрерывных процессов СДУ (1) могут применяться и для моделирования дискретно-непрерывных (разрывных) случайных процессов и процессов случайной структуры, описывающих параметры частично-когерентных сигналов. В системах радиосвязи широкое применение находят сигналы, параметры которых не могут быть аппроксимированы непрерывными случайными процессами. Это относится к сигналам с псевдослучайной перестройкой рабочих частот (ППРЧ), к сигналам, используемым в системах радиосвязи с пространственно-временным многостанционным доступом, а также при воздействии на линии радиосвязи импульсных помех. Случайные параметры таких сигналов определяются дискретно-непрерывными (разрывными) случайными процессами.

Разрывной случайный процесс может быть представлен в форме следующего уравнения [1, 9]:

$$\frac{dX(t)}{dt} = F[X(t)] + \eta(t), \quad (3)$$

где $\eta(t) = \sum_k A_k \delta(t-t_k)$ – вектор пуассоновских последовательностей дельта-импульсов с независимыми векторами амплитуд A_k , распределенными по закону $P(A)$. Плотность распределения вероятностей процесса $X(t)$ из (3) описывается уравнением Колмогорова-Феллера [1, 9].

Результаты моделирования в MATLAB СДУ для дискретно-непрерывного процесса (3) и сравнение с теоретическим законом рэлеевского распределения в разных структурах многоструктурного процесса по критерию согласия Колмогорова-Смирнова показали, что значения коэффициента совпадения составляют величины 0,79-0,84.

Результаты моделирования для различных значений мощности шума также представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость граничного значения мощности пуассоновского шума от СКО и А
Table 2 – Dependence of the boundary value of the Poisson noise power on σ and A

$P_{ш}$ (граничная), дБ	23	10,0173	1,4613
СКО	1,5	0,6	0,5
A	20	1	0,1

Кроме моделирования непрерывных процессов в форме СДУ (1) и разрывных процессов в форме СДУ (3), возможно также и моделирование смешанных процессов. Такие процессы могут быть использованы в качестве моделей для межсетевых трафика, межсимвольных помех в сочетании с аддитивным шумом и речью, медленной ППРЧ и др. В общем случае такая нелинейная система может формироваться смесью белого гауссовского шума $V(t)$ и потоком пуассоновских импульсов $\eta(t)$ вида [10]:

$$\frac{dX(t)}{dt} = F[X(t)] + G[X(t)]V(t) + \eta(t). \quad (4)$$

Статистические свойства решения $x(t)$ из (4) могут быть подробно описаны его плотностью переходной вероятности, которая подчиняется дифференциальному уравнению Чепмена-Колмогорова [10].

Результаты моделирования в MATLAB СДУ (4) и сравнении с теоретическим законом рэлеевским распределением по критерию согласия Колмогорова-Смирнова отображены в Таблице 3. По сравнению с СДУ (3) в модели (4) граничное значение ОСШ уменьшилось в 2 раза. Коэффициент совпадения составил в данном случае величину 0,78-0,82.

Таблица 3 – Зависимость граничного значения мощности пуассоновского шума от СКО и N_0
Table 3 – Dependence of the boundary value of the Poisson noise power on σ and N_0

СКО	0,7
$P_{ш}$ (граничная), дБ	7
N_0 , Вт	1
ОСШ (граничное), дБ	-20

Моделирование одномерного гауссовского процесса

Для гауссовской плотности распределения и экспоненциальной корреляционной функции вероятности (ПРВ) линейное СДУ представляется следующим образом [1, 2, 10]:

$$\frac{dA}{dt} = -\alpha A + 2\sigma^2 \vartheta_A(t), \quad (5)$$

где $\alpha = 1/\tau_{корр}$, $\tau_{корр}$ – интервал корреляции. Для СДУ (5) при уменьшении дисперсии σ^2 и увеличении параметра α можно добиться меньшего порогового значения ОСШ. Например, для $\tau_{корр} = 0,01$ и $\sigma = 0,003$ результаты представлены на Рисунке 1.

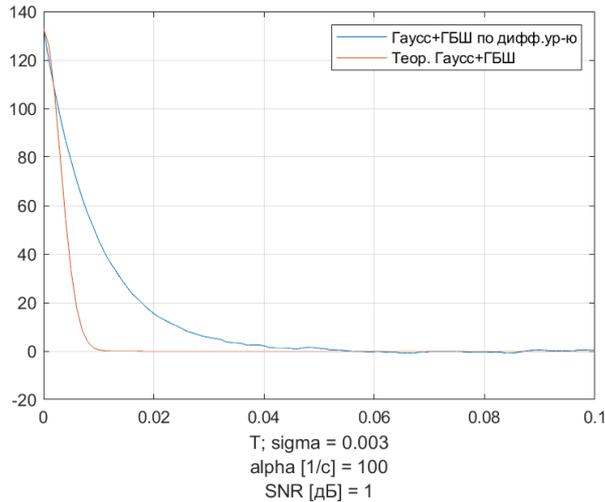


Рисунок 1 – Гауссовское распределение с АБГШ
Figure 1 – Gaussian distribution with AWGN

Зависимости граничного ОСШ от СКО и α приведены в Таблице 4 и на Рисунке 2.

Таблица 4 – Зависимость граничного ОСШ от СКО и α
Table 4 – Dependence of the boundary SNR on σ and α

ОСШ (граничное), дБ	1	18	60	70
СКО	0,003	0,01	0,1	0,2
$\alpha=1/\tau_{\text{корр}}$	100	90	10	8

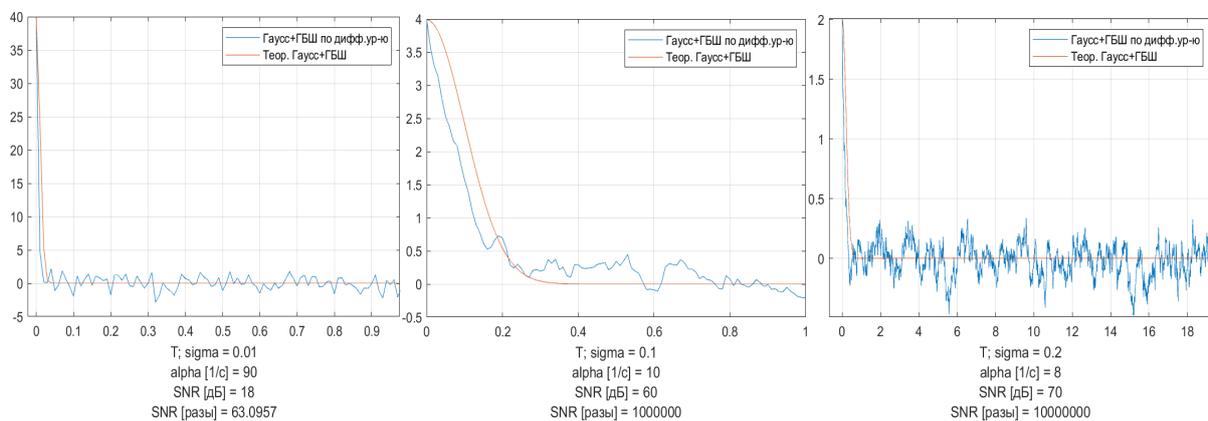


Рисунок 2 – Распределение Гаусса при граничных ОСШ
Figure 2 – Gaussian distribution with boundary SNR

Результаты моделирования в MATLAB СДУ (5) при пуассоновском формирующем шуме для разрывного процесса изображены на Рисунке 3 и в Таблице 5.

Таблица 5 – Зависимость граничной мощности пуассоновского шума от СКО и α
Table 5 – Dependence of the boundary power of Poisson noise on σ and α

$P_{\text{ш}}$ (граничная), дБ	-30	-33	-37
СКО	0,2	0,5	1,5
$\alpha=1/\tau_{\text{корр}}$	10	2	0,6

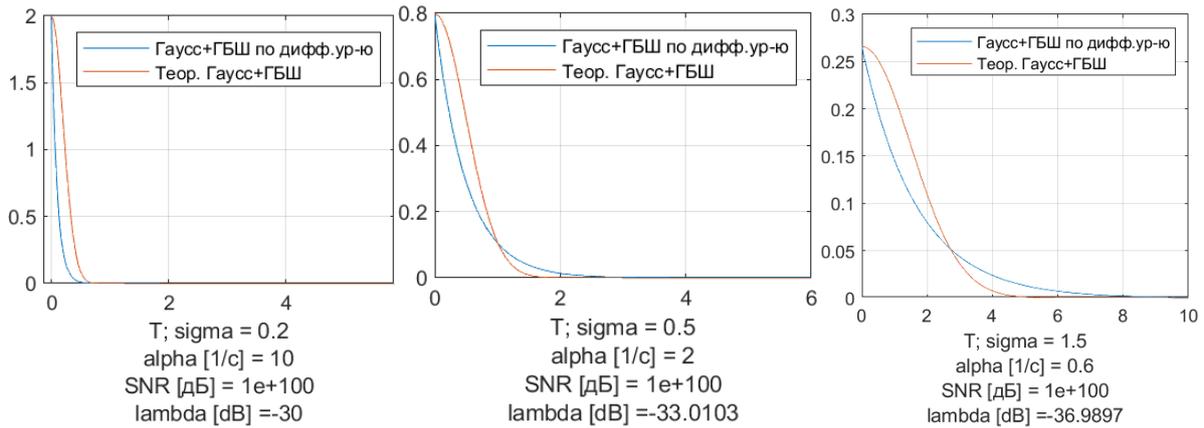


Рисунок 3 – Распределение Гаусса при различных граничных значениях пуассоновского шума
Figure 3 – Gaussian distribution with different boundary values of Poisson noise

Результаты моделирования в MATLAB СДУ (5) для смешанного процесса при АБГШ и пуассоновском шуме $\eta(t)$ представлены на Рисунке 4 и в Таблице 6.

Видно, что мощность пуассоновского шума меняется обратно пропорционально граничному ОСШ.

Таблица 6 – Зависимость граничной мощности шума от ОСШ при $\sigma = 0,5$ для модели: сигнал + АБГШ

Table 6 – Dependence of the boundary noise power on the SNR with $\sigma = 0,5$ for the model: signal + AWGN

СКО	0,5		
$P_{ш}$ (граничная), дБ	-32,2	-35,2	-40
ОСШ (граничное), дБ	-10	10	100

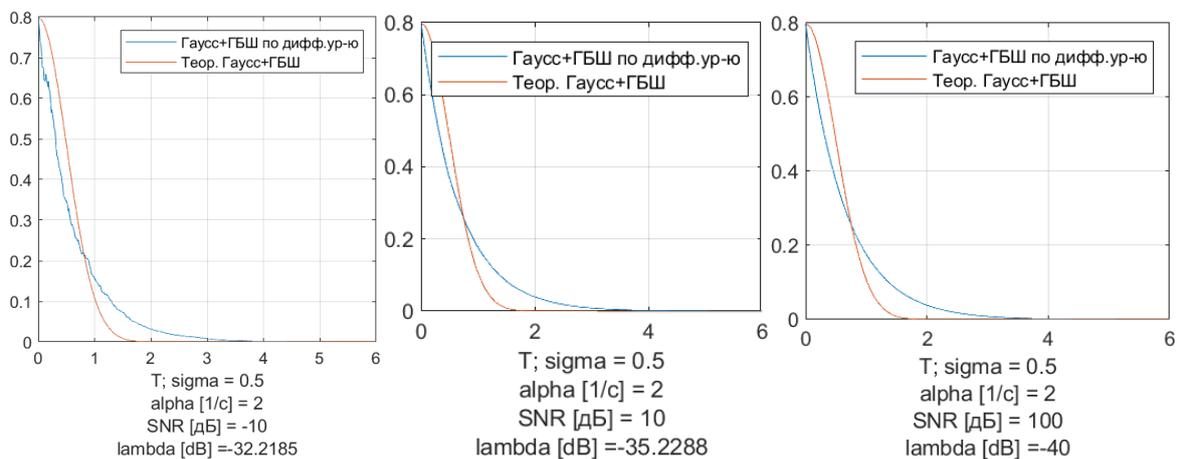


Рисунок 4 – Распределение Гаусса при АБГШ и пуассоновском шуме в граничных значениях мощности шума и ОСШ

Figure 4 – Gaussian distribution with AWGN and Poisson noise in the boundary values of noise power and SNR

С увеличением значения параметра λ (мощность пуассоновского шума) график смещается вправо (Рисунок 5):

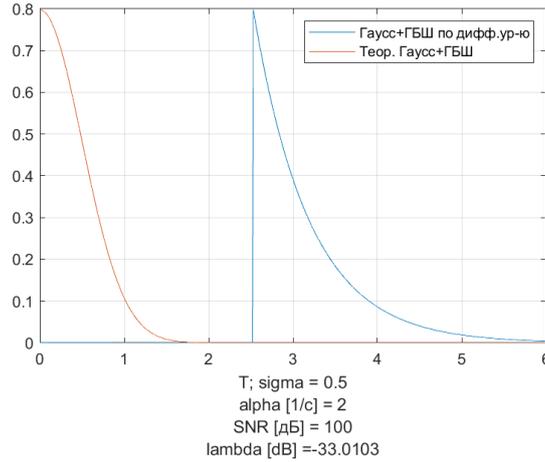


Рисунок 5 – Гауссовское распределение при увеличении параметра λ
Figure 5 – Gaussian distribution with increasing parameter λ

Моделирование многомерного рэлеевского процесса

При моделировании векторных (многомерных) частично-когерентных сигналов для представления многомерных ПРВ конструктивным является использование метода функциональной аппроксимации (квазигауссовской аппроксимацией многомерной плотности) [3-5, 9], при котором L -мерную в общем случае негауссовскую плотность можно представить через ПРВ скалярных компонент векторного процесса и элементов его корреляционной матрицы. При этом для $x_k(t)$ – k -ой компоненты случайного процесса $X(t)$, $k = 1, 2, \dots, L$, запишем СДУ в следующем виде:

$$\frac{\partial x_k(t)}{\partial t} = \frac{B_0}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_k} \ln w_0(x_k) + \frac{\sum_{j=1 \neq k}^L \frac{r_{jk}}{r_{jj}r_{kk}} x_j^0(t)}{1 + \sum_{i=2}^L \sum_{j=1}^{i-1} \frac{r_{ij}}{r_{ij}r_{ii}} x_i^0(t)x_j^0(t)} \right\} + \sqrt{B_0} \vartheta_k(t);$$

$$k = 1, \dots, L. \quad (6)$$

где B_0 – постоянный параметр (коэффициент диффузии), $w_0(x_k)$ – одномерная негауссовская ПРВ $x_k(t)$, r_{jk} – элемент корреляционной матрицы $R_{xx} = \{r_{jk}\}$. Раскрывая в (6) ПРВ, для многомерного рэлеевского процесса получим:

$$\frac{\partial x_k(t)}{\partial t} = \frac{B_0}{2} \left\{ \frac{1}{x_k(t)} - \frac{x_k(t)}{\sigma^2} + \frac{\sum_{j=1 \neq k}^L \frac{r_{jk}}{r_{jj}r_{kk}} x_j^0(t)}{1 + \sum_{i=2}^L \sum_{j=1}^{i-1} \frac{r_{ij}}{r_{ij}r_{ii}} x_i^0(t)x_j^0(t)} \right\} + \sqrt{B_0} \vartheta_k(t);$$

$$k = 1, \dots, L. \quad (7)$$

Аналогично, для многомерного гауссовского процесса имеем:

$$\frac{\partial x_k(t)}{\partial t} = \frac{B_0}{2} \left\{ -\frac{x_k(t) - m}{\sigma^2} + \frac{\sum_{j=1 \neq k}^L \frac{r_{jk}}{r_{jj}r_{kk}} x_j^0(t)}{1 + \sum_{i=2}^L \sum_{j=1}^{i-1} \frac{r_{ij}}{r_{ij}r_{ii}} x_i^0(t)x_j^0(t)} \right\} + \sqrt{B_0} \vartheta_k(t);$$

$$k = 1, \dots, L. \quad (8)$$

Для оценки адекватности построенных моделей (7) и (8) теоретическим рэлеевским и гауссовским распределениям используем критерий согласия Колмогорова-Смирнова [8], который позволяет численно определить степень расхождения эксперимента с теорией для достаточно больших выборок ($n > 40$). Для многомерного

рэлеевского распределения при АБГШ результаты приведены в Таблице 7, а коэффициент совпадения составил 0,86–0,91.

Таблица 7 – Зависимость граничного значения ОСШ от СКО и B_0
Table 7 – Dependence of the boundary value of SNR on SD and B_0

ОСШ (граничное), дБ	0,8	-12	-30
СКО	1,1	0,6	0,2
B_0	8	2	0,9

Для многомерного рэлеевского распределения разрывного процесса при пуассоновском формирующем шуме результаты представлены в Таблице 8 и на Рисунке 6. Хотя вид распределения при таком шуме в целом не меняется, граничные значения мощности шума имеют тенденцию увеличиваться при возрастании СКО Рэля.

Таблица 8 – Зависимость граничного значения мощности шума от СКО
Table 8 – Dependence of the boundary value of noise power on SNR

$P_{ш}$ (граничная), дБ	-18	-10.45	-6,02
СКО	0,1	0,6	0,9

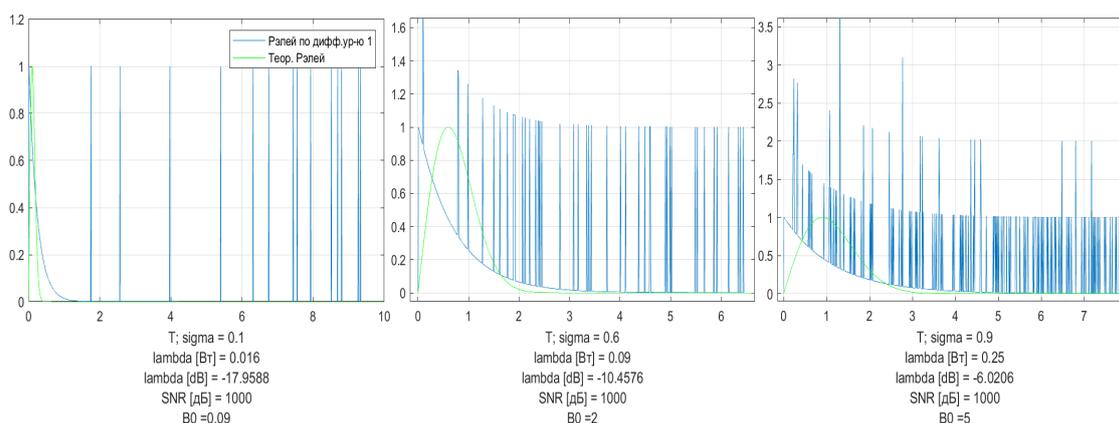


Рисунок 6 – Распределение Рэля при граничных значениях мощности пуассоновского шума
Figure 6 – Rayleigh distribution at boundary values of Poisson noise power

Для многомерного рэлеевского распределения смешанного процесса при АБГШ и пуассоновском формирующем шуме результаты представлены в Таблице 9 и на Рисунке 7.

Таблица 9 – Зависимость мощности шума от ОСШ при $\sigma = 0,1$ для рэлеевского распределения, модель: сигнал + АБГШ + пуассоновский шум
Table 9 – Dependence of noise power on SNR with $\sigma = 0,1$ for Rayleigh distribution, model: signal + ABGN + Poisson noise

СКО	0,1		
$P_{ш}$ (граничная), дБ	-35	-10	1
ОСШ (граничное), дБ	-20	-19,2	-18,2

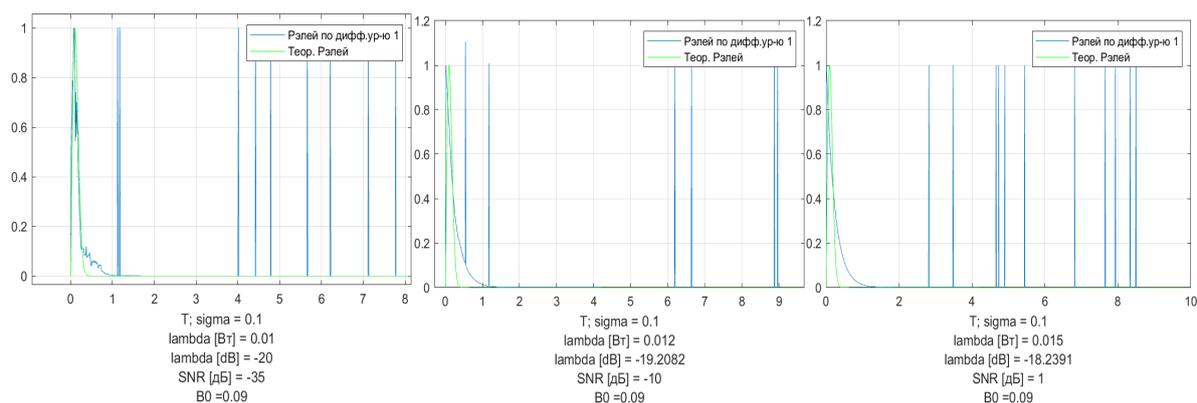


Рисунок 7 – Распределение Рэля для различных граничных значений мощности пуассоновского шума, ОСШ и СКО

Figure 7 – Rayleigh distribution for different boundary values of Poisson noise power, SNR and SD

Моделирование многомерного гауссовского процесса

Для многомерного гауссовского распределения при АБГШ результаты представлены в Таблице 10, а коэффициент совпадения по критерию Колмогорова-Смирнова равен 0,85-0,89. Видно, что для многомерного распределения при любых сочетаниях СКО и B_0 из проверяемых диапазонов (Таблица 10) граничное значение ОСШ равно 10 дБ.

Таблица 10 – Зависимость граничного значения ОСШ от СКО и B_0
Table 10 – Dependence of SNR boundary value on σ and B_0

ОСШ (граничное), дБ	10
СКО	0,1 – 1,5
B_0	0,13 – 25

Для многомерного гауссовского распределения разрывного процесса при пуассоновском формирующем шуме результаты представлены в Таблице 11 и на Рисунке 8.

Таблица 11 – Зависимость граничных значений мощности пуассоновского шума от СКО
Table 11 – Dependence of boundary values of Poisson noise power on SNR

$P_{ш}$ (граничная), дБ	-20	-15,2	-10,45
СКО	0,2	0,6	1

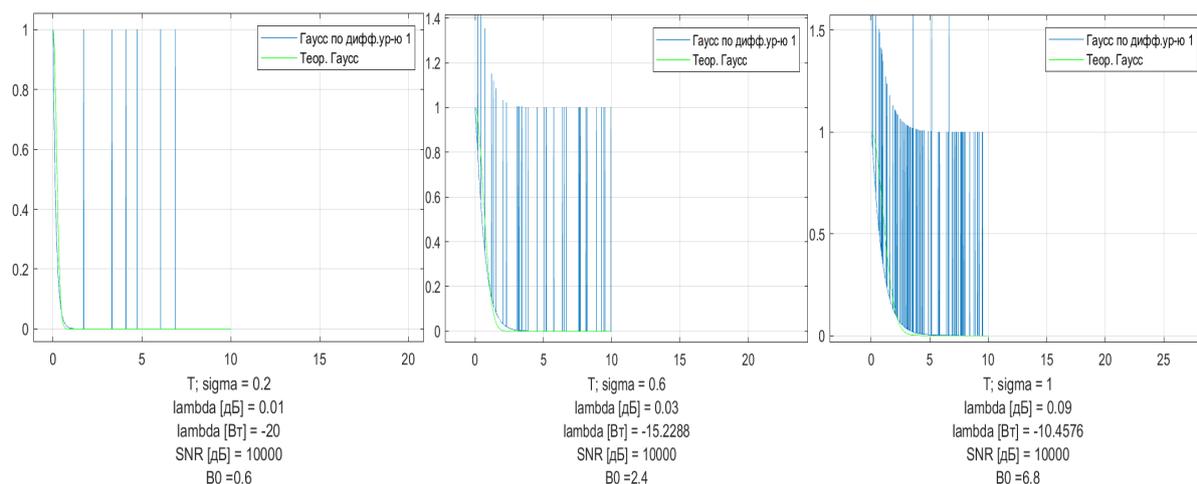


Рисунок 8 – Распределение Гаусса при граничных мощностях пуассоновского шума
Figure 8 – Gaussian distribution with boundary powers of Poisson noise

Для многомерного рэлеевского распределения смешанного процесса при АБГШ и пуассоновском формирующем шуме результаты представлены в Таблице 12 и на Рисунке 9.

Таблица 12 – Зависимость значений мощности шума от ОСШ при $\sigma^2 = 1$
Table 12 – Dependence of noise power values on SNR with $\sigma^2 = 1$

СКО	1		
$P_{ш}$ (граничная), дБ	-20	-11	-9,6
ОСШ (граничное), дБ	10	20	30

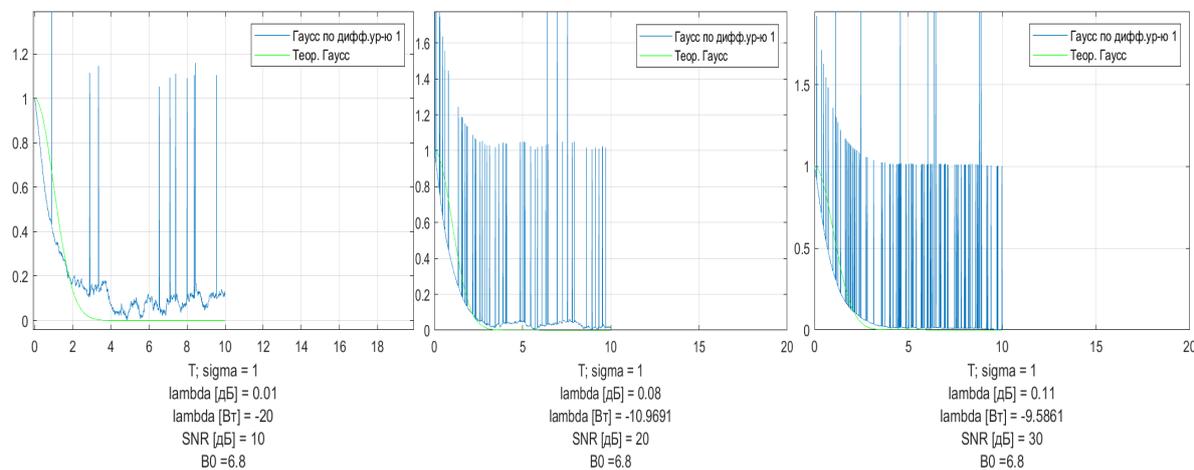


Рисунок 9 – Гауссовское распределение при граничных значениях ОСШ и мощности пуассоновского шума
Figure 9 – Gaussian distribution with boundary values of SNR and Poisson noise power

Заключение

В статье проведен анализ адекватности марковских моделей параметров частично-когерентных сигналов в системах радиосвязи на основе стохастических дифференциальных уравнений в среде MATLAB. Осуществлена оценка соответствия модели теоретическим распределениям по критерию согласия для непрерывных, разрывных и смешанных случайных процессов. Показаны диапазоны изменений

параметров, входящих в СДУ, при которых модель можно считать состоятельной, а также влияние параметров на форму рассматриваемых распределений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кловский Д.Д., Конторович В.Я., Широков С.М. *Модели непрерывных каналов связи на основе стохастических дифференциальных уравнений*. Москва: Радио и связь; 1984. 248 с.
2. Primak S., Kontorovich V., Lyandres V. *Stochastic Methods and Their Applications to Communications: Stochastic Differential Equations Approach*. Chichester: John Wiley & Sons; 2004. 439 p.
3. Глушанков Е.И., Конторович В.Я., Караваев Д.А. Математическое моделирование сигналов в непрерывных каналах связи в форме стохастических дифференциальных уравнений. *Системы управления, связи и безопасности*. 2023;(4):1–35. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-1-35.
4. Глушанков Е.И., Кирик Д.И., Лялина А.Ж. Моделирование и оценивание параметров частично-когерентных сигналов в радиотехнических системах. *Труды учебных заведений связи*. 2021;7(3):16–24. DOI: 10.31854/1813-324X-2021-7-3-16-24.
5. Glushankov E., Lyalina A., Rylov E. Modeling the Satellite Communication Channel Based on Stochastic Differential Equations. В сборнике: *2nd International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems», ITIDMS-II-2021: CEUR Workshop Proceedings: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems» (ITIDMS-II-2021), 1 июля 2021 года, Москва, Россия*. Ахен: M. Jeusfeld c/o Redaktion Sun SITE, Informatik V, RWTH Aachen; 2021. С. 52–59.
6. Кремер И.Я., Кремер А.И., Петров В.М., Понькин В.А., Потапов Н.А. *Пространственно-временная обработка сигналов*. Москва: Радио и связь; 1984. 224 с.
7. Андронов И.С., Финк Л.М. *Передача дискретных сообщений по параллельным каналам*. Москва: Советское радио; 1971. 408 с.
8. Лемешко Б.Ю. *Непараметрические критерии согласия. Руководство по применению*. Москва: ИНФРА-М; 2014. 163 с.
9. Глушанков Е.И., Конторович В.Я. Математическое моделирование сигналов различной пространственной когерентности в системах радиосвязи. В книге: *Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками*. Ленинград: Издательство Ленинградского университета; 1991. С. 432–466.
10. Primak S., Lyandres V., Kontorovich V. Markov Models of Non-Gaussian Exponentially Correlated Processes and Their Applications. *Physical Review E*. 2001;63(6):061103-1–061103-9. DOI: 10.1103/PhysRevE.63.061103.

REFERENCES

1. Klovsii D.D., Kontorovich V.Ya., Shirokov S.M. *Modeli nepreryvnykh kanalov svyazi na osnove stokhasticheskikh differentsial'nykh uravnenii*. Moscow: Radio i svyaz; 1984. 248 p. (In Russ.).
2. Primak S., Kontorovich V., Lyandres V. *Stochastic Methods and Their Applications to Communications: Stochastic Differential Equations Approach*. Chichester: John Wiley & Sons; 2004. 439 p.
3. Glushankov E.I., Kontorovich V.Ya., Karavaev D.A. Signal Modeling in Continuous Communication Channels in the Form of Stochastic Differential Equations. *Sistemy*

- upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*. 2023;(4):1–35. (In Russ.). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-1-35.
4. Glushankov E., Kirik D., Lyalina A. Modeling and Parameter Estimation of Partially Coherent Signals in Radio Engineering Systems. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Telecommunication Universities*. 2021;7(3):16–24. (In Russ.). DOI: 10.31854/1813-324X-2021-7-3-16-24.
 5. Glushankov E., Lyalina A., Rylov E. Modeling the Satellite Communication Channel Based on Stochastic Differential Equations. In: *2nd International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems», ITIDMS-II-2021: CEUR Workshop Proceedings: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems» (ITIDMS-II-2021), 1 July 2021, Moscow, Russia*. Aachen: M. Jeusfeld c/o Redaktion Sun SITE, Informatik V, RWTH Aachen; 2021. P. 52–59.
 6. Kremer I.Ya., Kremer A.I., Petrov V.M., Pon'kin V.A., Potapov N.A. *Prostranstvenno-vremennaya obrabotka signalov*. Moscow: Radio i svyaz; 1984. 224 p. (In Russ.).
 7. Andronov I.S., Fink L.M. *Peredacha diskretnykh soobshchenii po parallel'nym kanalam*. Moscow: Sovetskoe radio; 1971. 408 p. (In Russ.).
 8. Lemeshko B.Yu. *Neparametricheskie kriterii soglasiya. Rukovodstvo po primeniyu*. Moscow: INFRA-M; 2014. 163 p. (In Russ.).
 9. Glushankov E.I., Kontorovich V.Ya. Matematicheskoe modelirovanie signalov razlichnoi prostranstvennoi kogerentnosti v sistemakh radiosvyazi. In: *Adaptivnye radiotekhnicheskie sistemy s antennoymi reshetkami*. Leningrad: Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta; 1991. P. 432–466. (In Russ.).
 10. Primak S., Lyandres V., Kontorovich V. Markov Models of Non-Gaussian Exponentially Correlated Processes and Their Applications. *Physical Review E*. 2001;63(6):061103-1–061103-9. DOI: 10.1103/PhysRevE.63.061103.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Глушанков Евгений Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиосистем и обработки сигналов, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: glushankov57@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4148-3208

Кондрашов Захар Константинович, генеральный директор научно-исследовательского института микроэлектронной аппаратуры «Прогресс», Москва, Российская Федерация.

e-mail: info@i-progress.tech

Суденкова Анастасия Вячеславовна, инженер кафедры радиосистем и обработки сигналов, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-

Evgeniy I. Glushankov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Radio Systems and Signal Processing, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, the Russian Federation.

Zakhar K. Kondrashov, General Director of the Research Institute of Microelectronic Equipment "Progress", Moscow, the Russian Federation.

Anastasia V. Sudenkova, Engineer of the Department of Radio Systems and Signal Processing, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, the Russian Federation.

Бруевича, Санкт-Петербург, Российская
Федерация.
e-mail: wwwsudana@outlook.com

Рылов Евгений Александрович, кандидат технических наук, генеральный директор проектно-конструкторского бюро «РИО», Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: rylov79@mail.ru

Evgeniy A. Rylov, Candidate of Technical Sciences, General Director of the "RIO" design bureau, Saint-Petersburg, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 24.03.2024; одобрена после рецензирования 31.03.2024;
принята к публикации 08.04.2024.*

*The article was submitted 24.03.2024; approved after reviewing 31.03.2024;
accepted for publication 08.04.2024.*