



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.3>

УДК: 621.391.01

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ НЕГАУССОВСКИХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

В.М. Артюшенко¹, В.И. Воловач^{2,3}

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
105064, г. Москва, Гороховский пер., 4

² Поволжский государственный университет сервиса,
445017, г. Тольятти, ул. Гагарина, 4

³ МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

Статья поступила в редакцию 21 декабря 2025 г.

Аннотация. В работе проводится исследование и анализ задачи имитационного моделирования негауссовских аддитивных помех, основанного на использовании систем дифференциальных уравнений. Рассмотрены основные принципы построения имитаторов негауссовских аддитивных помех в радиоканалах радиотехнических систем и устройств, включая как сосредоточенные по частоте, так и сосредоточенные по времени (импульсные) помехи. Рассмотрены математические модели негауссовских аддитивных помех, представленные в виде стохастических дифференциальных уравнений, а также подходы к их практическому применению при создании физических имитаторов каналов и разработке алгоритмов оптимального приема сигналов. Модели данного типа обладают рядом существенных преимуществ. Особое внимание уделено моделям, описываемым нелинейными стохастическими дифференциальными уравнениями.

Ключевые слова: имитационное моделирование, аддитивная негауссовская помеха, нелинейное стохастическое дифференциальное уравнение, канал связи, имитатор канала, импульсная помеха, разрывной марковский процесс.

Финансирование: Работа выполнена за счет средств Государственного задания №FSFZ-2024-0006.

Автор для переписки: Воловач Владимир Иванович, volovach.vi@mail.ru

Введение

Проектирование современных систем связи требует глубокого и точного понимания характеристик канала, предназначенного для передачи информации. На этапе теоретической разработки необходимо построение математических моделей каналов связи, тогда как при проведении экспериментальных исследований и испытаний особую значимость приобретают их физические аналоги – имитаторы каналов [1-7 и др.]. Возрастающие требования к надежности и качеству связи в последние годы делают задачи моделирования каналов особенно актуальными.

Такие модели служат основой для построения имитаторов каналов, используемых при тестировании аппаратуры. В реальных условиях не только помехи, но и параметры среды передачи часто имеют случайный характер и могут изменяться во времени и пространстве, что требует применения стохастических методов моделирования.

Следует отметить, что совершенствование систем связи приводит к необходимости уточнения существующих моделей каналов, вследствие чего ранее детерминированные модели становятся стохастическими.

Как известно, для изучения случайных процессов, описывающих аддитивные помехи, действующих в различных радиотехнических системах и устройствах, созданы многочисленные аппаратно-технические комплексы (имитаторы каналов), позволяющие осуществлять моделирование методами цифро-аналоговой или цифровой техники в реальном масштабе времени. Такие

устройства уже давно нашли широкое применение на практике для генерирования нормальных случайных процессов [8-14].

Как правило, в статистической теории связи аддитивные помехи принято подразделять, на сосредоточенные по времени или по спектру (импульсные помехи и сосредоточенные по частоте) и рассосредоточенные по времени и спектру (гладкие помехи), обычно аппроксимируемые нормальным флюктуационным шумом.

Рассмотрим и проанализируем основные принципы построения имитаторов аддитивных помех первого типа, базирующиеся на применение нелинейных стохастических дифференциальных уравнений (СДУ).

Цель работы: рассмотреть и проанализировать принципы и методы имитационного моделирования импульсных и сосредоточенных аддитивных помех, включая негауссовские, на основе систем нелинейных стохастических дифференциальных уравнений и возможности построения на их основе физических имитаторов каналов связи.

1. Имитатор импульсных помех

При передаче информации по многим видам реальных каналов связи существенную роль играют импульсные помехи. Как известно, импульсные помехи относятся к разрывным случайным процессам с плотностью распределения вероятностей (ПРВ), существенно отличающихся от гауссовского, поэтому при их имитации метод СДУ оказывается особенно удобным [13-19].

К типу импульсных, как известно, относят случайные процессы, которые можно рассматривать как последовательности «импульсов» той или иной формы с длительностью, которая предполагается малой в рамках решаемой конкретной задачи (например, если она намного меньше длительности элемента сигнала) [20, 21]. Процессы подобного типа допускают представление в виде реакции некоторой в общем случае нелинейной системы на последовательность дельта-импульсов (рис. 1).

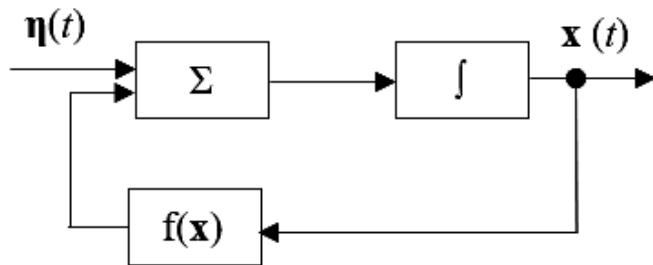


Рис. 1. Структурная схема моделирования разрывного марковского процесса.

Импульсные помехи \mathbf{x} могут быть описаны СДУ вида:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\eta}(t), \quad (1)$$

где

$$\boldsymbol{\eta}(t) = \sum_k \mathbf{A}_k \delta(t - t_k) \quad (2)$$

— вектор пуассоновских последовательностей дельта-импульсов со случайными амплитудами, образующими вектор \mathbf{A}_k и распределенными по закону $W(\mathbf{A})$;

$\mathbf{f}(\mathbf{x})$ — векторная функция, удовлетворяющая условиям Липшица [13].

Случайный процесс, порождаемый СДУ (1), относится к типу разрывных марковских процессов. Его вероятностные характеристики могут быть найдены из уравнения Колмогорова – Феллера (УКФ) [13].

Если оно является одномерным, то форма импульсов близка к экспоненциальной, что приемлемо в качестве первого приближения при имитации многих индустриальных помех.

Структурная схема имитатора импульсных помех, моделирующего СДУ (1), совпадает со схемой, представленной на рис. 1, где функция $f(x)$ будет определяться с помощью соотношения [22]

$$f(x) = \frac{\nu}{W_{ct}(x)} \int_{x_1}^x [I(x) - W_{ct}(x)] dx,$$

а входным воздействием является пуассоновская последовательность дельта-импульсов с заданной ПРВ амплитуд закону $W(\mathbf{A})$.

Заметим, что при $W(\mathbf{A}) = \delta(A - A_0)$

$$f_{A_0}(x) = \frac{\nu \int_{x_1}^x [W_{ct}(x - A_0) - W_{ct}(x)] dx}{W_{ct}(x)}.$$

Здесь $W_{ct}(x)$ – стационарные плотности вероятности случайных импульсных процессов, порождаемых СДУ; A_0 – «амплитуда» воздействующих импульсов; x_1 – любая точка интервала, на котором определен процесс $x(t)$; ν – параметр, характеризующий интенсивность потока импульсов.

При имитации каналов связи возникает потребность в моделировании как случайных, так и детерминированных последовательностей импульсов. Форму импульсов в некоторых случаях, допустимо считать экспоненциальной, в других – по требованию разработчиков систем связи она может воспроизводиться и иной.

Поскольку амплитуда каждого импульса помехи $x(t)$, описываемой СДУ (1), равна сумме значений скачка и реализации $x(t)$ к моменту скачка, то из выражения

$$W_{ct}(x) = \gamma(x) \frac{\nu}{f(x)} \exp \left\{ \nu \int_{x_1}^x \frac{dz}{f(z)} - \beta x \right\},$$

где c – произвольная постоянная интегрирования; $\beta > 0$ – некоторая константа, $\gamma(t)$ – решение уравнения вида

$$f(x) \frac{d^2 \gamma(x)}{dx^2} + \nu \frac{d}{dx} \gamma(x) - \nu \beta \gamma(x) = 0,$$

для нелинейной функции в СДУ (1) получаем выражение:

$$f_{A_0}(x) = \nu \frac{1}{W(x + A_0)} \left[\int_0^{x+A} W(a) da - \int_0^x W(a) da \right],$$

где $x \geq 0$; $W(a)$ – ПРВ амплитуд импульсов на выходе модели.

Обычно она близка к логарифмически-нормальному распределению

$$W(a) = \frac{1}{a\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp\left\{-\frac{(\ln a - m_m)^2}{2\sigma_m^2}\right\},$$

где m_m , σ_m – соответственно математическое ожидание и дисперсия величины $\ln a$ (параметры распределения).

При этом

$$f_{A_0}(x) = \nu \sqrt{2\pi\sigma x} \left[\Phi\left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{x + A_0}{\mu}\right) - \Phi\left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{x}{\mu}\right) \right] \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_m^2} \ln^2 \frac{x + A_0}{\mu}\right\}, \quad (3)$$

где $\sigma = \sigma_m$, $\mu = m_m$ – параметры указанного распределения; $\Phi(z)$ – функция Крампа.

Структурная схема устройства для моделирования пуассоновской последовательности импульсов прямоугольной формы с законом распределения амплитуд с логарифмически-нормальным распределением представлена на рис. 2, где ГППИ – генератор пуассоновской последовательностей дельта-импульсов, СДУ – система, описываемая СДУ, K – ключ.

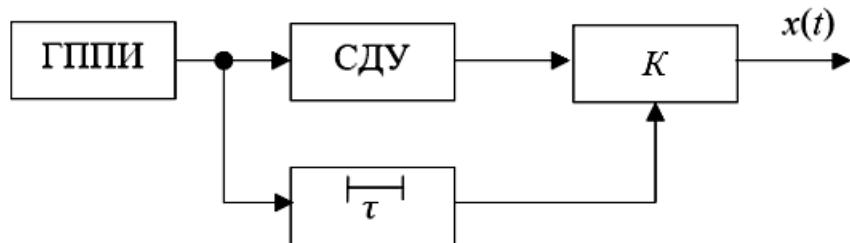


Рис. 2. Структурная схема блока моделирования импульсных помех на основе СДУ.

Это устройство является частью имитатора импульсных помех, общая структурная схема которой показана на рис. 3, и помимо формирования указанных импульсов служит также для получения «потока заполнения» пачек импульсов, где T – триггер.

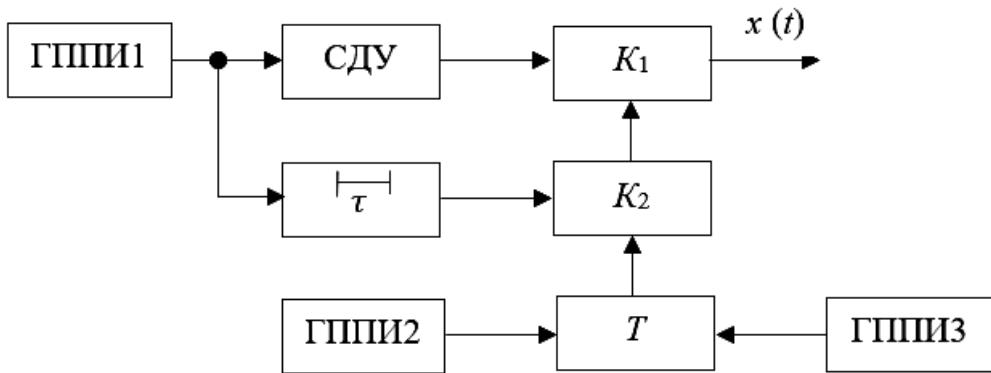


Рис. 3. Структурная схема совместного моделирования быстрых и медленных замираний.

В состав устройства входит генератор пуссоновской последовательности дельта-импульсов ГППИ1, а в имитаторе в целом имеются два других аналогичных генератора: ГППИ2 и ГППИ3. Вместе со спусковой схемой T последние формируют поток пачек помех с требуемыми статистическими характеристиками.

Отметим, что система, описываемая СДУ с функцией (3), имеет постоянную времени $\tau_c \approx 0,8 / \sigma v$, когда $A_0 = \mu$, то есть при $\sigma \geq 1$ формируемый ею процесс является разрывным, а при $\sigma \ll 1$ – близок к диффузионному.

Для того, чтобы характер реализации моделируемой помехи не зависел от v , а также для получения импульсов прямоугольной формы, на выходах описанных схем установлены ключи K , стробируемые от ГППИ1.

В случае моделирования импульсов экспоненциальной формы (при $\sigma \geq 1$) необходимость в ключе K_1 и элементе задержки на τ в схеме рис. 3 отпадает.

2. Моделирование сосредоточенных помех

Обычно в отведенной для данной системы связи полосе частот присутствует случайное число сосредоточенных по спектру помех, причем центральные частоты их спектров также случайны.

В реальных радиоканалах они существенно зависят от используемого диапазона волн, времени суток, года и т.д. Поэтому в дальнейшем примем

следующую упрощенную картину распределения сосредоточенных помех в канале связи.

Будем считать, что в полосе канала присутствует не более N_{Π} негауссовых аддитивных помех, причем каждая из них представляет собой колебание со случайной частотой.

Поскольку эти случайные частоты могут принимать значения, лежащие и вне полосы канала, результирующее число частот, действующих в каждый момент времени в полосе канала, также оказывается случайным.

В первом приближении процесс случайного изменения каждой из частот можно описать СДУ вида (1) при $n=1$:

$$\frac{df(x)}{dt} = \alpha f(x) + \eta(t),$$

где $\alpha \ll 1$.

Конкретное значение α определяется исходя из допустимой относительной погрешности γ_f в поддержании частоты помехи в течение времени ее существования T_0 по формуле:

$$\alpha = -(1/T_0) \ln(1 - \gamma_f).$$

Структурная схема устройства моделирования сосредоточенных помех, реализующего описанный подход, приведена на рис. 4.

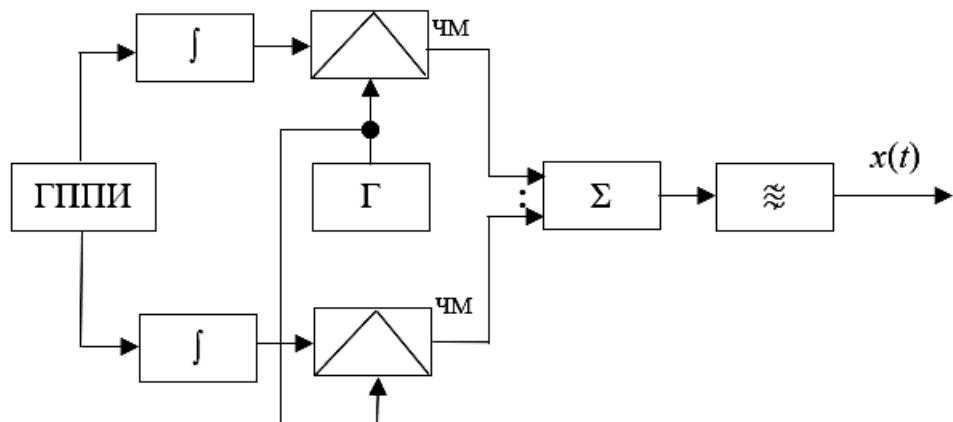


Рис. 4. Структурная схема блока моделирования замирающих сосредоточенных помех на основе СДУ.

Расчет устройства производится следующим образом. Если известно среднее время существования T_0 одной помехи в полосе канала F , то в генераторе пуассоновской последовательности импульсов ГППИ задается интенсивность $\nu = 1/T_0$. При условии, что процессы изменения частот помехи статистически независимы, вероятность появления в полосе канала N помех определяется равенством

$$P_F(N) = \prod_{i=1}^N \int_F W_i(f) df = \left[\int_F W(f) df \right]^N, \quad (4)$$

где $W(f)$ – ПРВ решения СДУ (4). Вероятность $P_F(N)$ считается заданной.

Тогда

$$\int_F W(f) df = \sqrt[N]{P_F(N)}. \quad (5)$$

Поскольку $f(t) \geq 0$, то $W(f)$ можно аппроксимировать гиперэрланговским распределение [19], а в первом приближении – гамма-распределением

$$W(x) = \frac{x^\alpha \exp\{-x/\beta\}}{\beta^{\alpha+1} \Gamma(\alpha+1)}, \quad x \geq 0,$$

где $\beta > 0$, $\alpha > -1$.

Таким образом, задаваясь значением γ_f , можно найти α . Тогда с учетом (5), опуская промежуточные вычисления, получаем

$$\left[\frac{\beta^{\nu/\alpha}}{\Gamma(\nu/\alpha)} \right] \int_F x^{\nu/\alpha-1} \exp\{-\beta x\} dx = \sqrt[N]{P_F(N)}, \quad (6)$$

что позволяет определить параметр β ПРВ амплитуд

$$W(A) = \beta \exp\{-\beta A\}.$$

В сочетании с устройством моделирования замираний (рис. 5) описанный имитатор помех может быть эффективно использован при испытаниях различной аппаратуры передачи дискретных и непрерывных сообщений по радиоканалам.

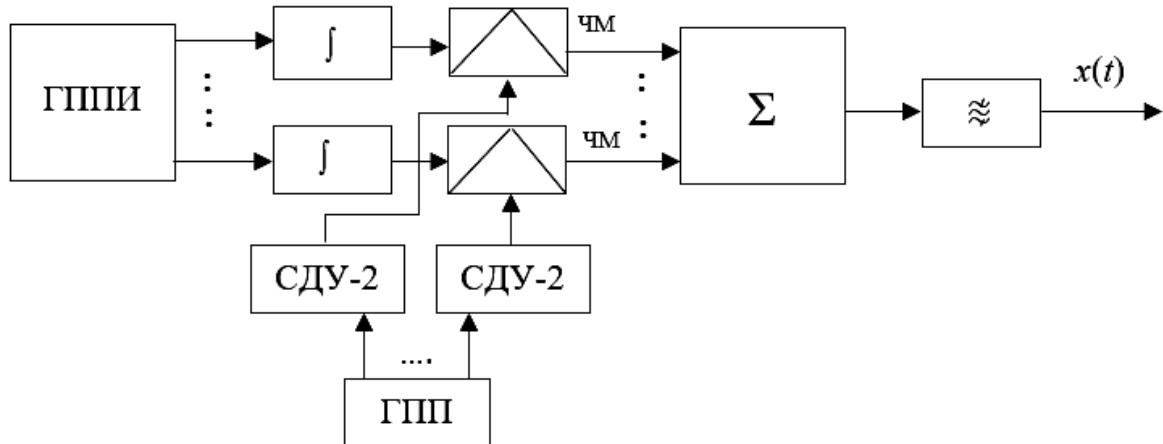


Рис. 5. Структурная схема моделирования незамирающих сосредоточенных помех на основе СДУ.

Хотя синтез математической модели канала в форме СДУ не всегда оказывается простой задачей, реализация полученного СДУ существенных трудностей обычно не вызывает.

Как видно из представленных структурных схем, для аналогового моделирования СДУ необходимы функциональные преобразователи различного вида, инверторы, сумматоры, активные фильтры и другие элементы, реализация которых известна и хорошо практически отработана, допускает широкое использование серийно выпускаемых микропроцессоров. Вместо генераторов белого шума часто используются генераторы псевдослучайных последовательностей. Методы реализации и расчета генераторов подробно освещены в различных источниках, например, в [23].

3. Методы анализа и синтеза марковских моделей разрывных процессов

Под решением задачи анализа СДУ (1) в соответствии с общим подходом, будем понимать определение ПРВ $W(\mathbf{x}, t)$ или $p(\mathbf{x}, t | \mathbf{x}_0, t_0)$ (порождаемого им процесса $\mathbf{x}(t)$) путем решения уравнения УКФ

$$\frac{\partial W(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = - \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} [f_i(\mathbf{x}, t) W(\mathbf{x}, t)] + \nu \int W(\mathbf{x} - \mathbf{A}, t) p(A) dA - \nu W(\mathbf{x}, t), \quad (7)$$

где ν – интенсивность пуссоновского потока дельта-импульсов, при заданных начальных и граничных условиях.

Решение УКФ позволяет вычислить известными методами [13] моментные функции и спектральные характеристики векторного процесса $\mathbf{x}(t)$ или любой его компоненты.

Рассмотрим вначале некоторые возможные подходы к этой задаче, рекомендованные в [13].

Известно, что уравнения типа (7) можно решать несколькими способами: методом интегральных преобразований по Фурье или Лапласу, методом разложения по полной системе функций и др. Указанные два метода, по существу, сводятся к восстановлению распределения вероятностей по некоторому числу его моментов, т. е. к решению так называемой проблемы моментов [22].

Однако в случае нелинейных СДУ при ограниченном числе членов в представлении характеристической функции в виде ряда понятие ПРВ оказывается лишенным практического смысла [18]. При бесконечном числе членов получить выражение для суммы ряда удается только в случае линейного СДУ. Сказанное позволяет отказаться здесь от рассмотрения перечисленных методов. Рассмотрим возможность решения УКФ [12].

Пусть начальные условия

$$W(\mathbf{x}, t_0) = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0).$$

Вводя в рассмотрение характеристическую функцию $\Theta(\mathbf{v}, t)$, связанную преобразованием Фурье с переходной плотностью вероятности $p(\mathbf{x}, t | \mathbf{x}_0, t_0)$, получаем из уравнения УКФ

$$\frac{\partial \Theta(\mathbf{v}, t)}{\partial t} = -\sum_{i=1}^n (-iv_k) F\{f_k(\mathbf{x})W(\mathbf{x}, t)\} + v\Theta[P(v-1)],$$

где F – символ преобразования Фурье; $P(v)$ – характеристическая функция распределения $p(\mathbf{A})$.

Широкий класс нелинейных функций $f_k(\mathbf{x})$ в СДУ (1) допускает представление

$$f_k(\mathbf{x}) = -\sum_{q,l} a_{kq} x_q x_l + \sum_q b_{kq} + c_k.$$

Поскольку

$$F\{f_k(\mathbf{v})W\} = f_k\left(\frac{d}{d\mathbf{v}}\right)\Theta,$$

имеем

$$\frac{\partial\Theta}{\partial t} = \sum_{k=1}^n \left\{ \sum_{q,l} a_{kq} \frac{\partial^2\Theta}{\partial v_q \partial v_l} - \sum_{q,l} b_{kq} \frac{\partial\Theta}{\partial v_q} + (-ic_k)\Theta \right\} (-iv_k).$$

Нетрудно заметить, что полученное уравнение аналогично [18] и, следовательно, может быть в принципе решено методом, данным в [12]. Однако при этом необходимо учитывать правило приближения распределений по оценкам их характеристических функций [19].

Рассмотрим возможность синтеза моделей вида (1).

Рассмотрим интегральный член в $\partial W(\mathbf{x}, t) / \partial t$

$$J = \int_{R^n} W_{ct}(\mathbf{x} - \mathbf{A}) p(\mathbf{A}) d\mathbf{A}$$

и положим $\frac{\partial W(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = 0$, так как исследуется стационарный режим.

Используя разложение $W_{ct}(\mathbf{x} - \mathbf{A})$ при $W_{ct}(0) \neq 0$ в ряд Тейлора, получаем представление

$$J = \sum_q \frac{W_{ct}^q(0)}{q!} F_q(\mathbf{x}), \quad (8)$$

где

$$F_q(\mathbf{x}) = \int_{R^n} (\mathbf{x} - \mathbf{A})^q p(\mathbf{A}) d\mathbf{A}.$$

Произведя необходимые преобразования, с учетом (8) получаем

$$\nabla' [\mathbf{f}(\mathbf{x}) W_{ct}(\mathbf{x})] \nu I(\mathbf{x}), \quad (9)$$

где

$$I(\mathbf{x}) = \nu \left[\sum_q \frac{W_{ct}^q(0)}{q!} F_q(\mathbf{x}) - W_{ct}(\mathbf{x}) \right];$$

$$\nabla' [\mathbf{f}(\mathbf{x}) W_{ct}(\mathbf{x})] = - \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} [f_i(\mathbf{x}) W_{ct}(\mathbf{x})].$$

Если $W_{ct}^q(0) = 0$, то вместо (8) можно использовать представление

$$J = \sum_q \frac{(-1)^q}{q!} W_{ct}^q(\mathbf{x}) \mathbf{M}[\mathbf{A}^q],$$

после чего аналогично предшествующему случаю записывается $I(\mathbf{x})$.

Полагая

$$p(\mathbf{A}) = \delta(\mathbf{A} - \mathbf{A}_0),$$

получаем

$$-\nabla' [\mathbf{f}(\mathbf{x}) W_{ct}(\mathbf{x})] = \nu W_{ct}(\mathbf{x} - \mathbf{A}_0) - \nu W_{ct}(\mathbf{x}). \quad (10)$$

Решениями уравнений (9) и (10) являются функции $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ и $\mathbf{f}_{A_0}(\mathbf{x})$,

соответственно.

Для получения исходных функций $p(\mathbf{A})$, $W_{ct}(\mathbf{x})$ и ν примем следующие допущения:

- 1) величину n и ПРВ $W_{ct}(\mathbf{x})$ можно определить по известной $W_N(\mathbf{y})$ из [12];
- 2) интенсивность потока импульсов ν_A совпадает с частотой ν_x скачков процесса $\mathbf{x}(t)$, то есть последние не перекрываются во времени.

Тогда, учитывая [12], получаем

$$\nu_x \mathbf{M}[\mathbf{A}^q] = \varkappa_{qx} q \alpha, \quad (11)$$

где $\alpha \approx 1/\tau_{\text{кор}}$; $M[\mathbf{A}^q]$ – начальный момент q -го порядка; \varkappa_{qx} – q -й кумулянт ПРВ $W_{\text{ct}}(\mathbf{x})$.

Таким образом $F_q(\mathbf{x})$ известна.

Заметим, что на практике при определении $p(\mathbf{A})$ целесообразно переходить от $M[\mathbf{A}^q]$ к $\varkappa_{qx\mathbf{A}}$ и затем пользоваться методами построения $p(\mathbf{A})$ по известному набору кумулянтов.

Обоснованность принятых допущений может быть проверена экспериментально только для каждого конкретного случая, поэтому использование соотношений (8)–(11) в общем случае затруднительно. Однако они с успехом могут быть использованы при синтезе моделей в классе одномерных и двумерных СДУ. Эти модели хорошо описывают многие виды индустриальных и атмосферных импульсных помех в радиоканалах.

Заключение

Таким образом, в результате проведенного исследования рассмотрены принципы и методы имитационного моделирования аддитивных негауссовых помех на основе систем дифференциальных уравнений. Показано, что использование стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) позволяет наиболее полно и адекватно описывать динамические процессы, протекающие в реальных каналах связи, а также учитывать влияние случайных факторов, оказывающих воздействие на передачу сигналов.

Особое внимание уделено негауссовским моделям аддитивных помех, представленным в форме нелинейных СДУ, которые отличаются повышенной гибкостью и способны более точно отражать реальные статистические свойства. Рассмотрены подходы к их построению на основе априорной информации о вероятностных характеристиках аддитивных помех, а также методы идентификации параметров моделей по экспериментальным данным, полученным при измерениях в действующих системах связи.

Проведенный анализ подтвердил, что применение таких моделей существенно расширяет возможности проектирования и оптимизации систем передачи данных. На их основе могут быть разработаны эффективные алгоритмы оптимального приема сигналов, повышающие устойчивость связи к внешним воздействиям и шумам. Кроме того, использование физических имитаторов каналов, реализованных по описанным принципам, обеспечивает возможность проведения экспериментов и отладки оборудования в условиях, максимально приближенных к реальным.

Финансирование: Работа выполнена за счет средств Государственного задания №FSFZ -2024-0006.

Литература

1. Радько П.Н. Многоканальный имитатор многолучевого канала для исследования дуплексных и сетевых режимов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 1. – С. 121-123.
2. Самойлов А.Г. Имитаторы многолучевых радиоканалов // Проектирование и технология электронных средств. – 2003. – № 4. – С. 32-36.
3. Стругов Ю.Ф., Семенов А.М., Добровольский С.М., Батырев И.А. Разработка имитатора многолучевого канала связи с аддитивными и мультипликативными помехами // Техника радиосвязи. – 2019. – Вып. 4 (43). – С. 27-38. <https://doi.org/10.33286/2075-8693-2019-27-38>
4. Ерохин А.А., Гафаров Е.Р., Александрин А.М., Рязанцев Р.О., Стригова Е.А., Поленга С.В. Разработка радиотракта приемной антенной системы ГНСС // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2025. – № 9. – С. 3-3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.10>

5. Tarboush S., Sarieddeen H., Chen H., Loukil M.H., Jemaa H., Alouini M.S., and Al-Naffouri T.Y. TeraMIMO: A channel simulator for wideband ultra-massive MIMO terahertz communications // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – Т. 70. – №. 12. – С. 12325-12341. <https://doi.org/10.48550/arXiv/2104/11054>
6. Ju S., Kanhere O., Xing Yu., Pappaport T.S. A millimeter-wave channel simulator NYUSIM with spatial consistency and human blockage // 2019 IEEE Global Communications conference (GLOBECOM). IEEE, 2019. – РР. 1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM3843720199013273>
7. Sun S., MacCartney G.R., Rappaport T.S. A novel millimeter-wave channel simulator and applications for 5G wireless communications // 2017 IEEE international conference on communications (ICC). IEEE, 2017. – РР. 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7996792>
8. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. – М.: Сов. радио, 1971. – 324 с.
9. Галкин А.П., Лапин А.Н., Самойлов А.Г. Моделирование каналов систем связи. – М.: Связь, 1979. – 94 с.
10. Гроп Д. Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
11. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. – М.: Радио и связь, 1982. – 304 с.
12. Кловский Д.Д., Конторович В.Я., Широков С.М. Модели непрерывных каналов связи на основе стохастических дифференциальных уравнений / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
13. Конторович В.Я., Ляндрес В.З. Вопросы синтеза моделей случайных сигналов и помех в виде стохастических дифференциальных уравнений // В кн.: Тез. докл. VIII Всесоюзн. конф. по теории кодирования и передачи информации. – Москва-Куйбышев, 1981. – Ч. 5. – С. 98-103.
14. Корн Г. Моделирование случайных процессов на аналоговых и аналого-цифровых машинах. – М.: Мир, 1968. – 316 с.

15. Четвериков В.Н., Баканович Э.А., Меньков А.В. Вычислительная техника для статистического моделирования. – М.: Сов. радио, 1978. – 286 с.
16. Артюшенко В.М., Воловач В.И., Тяжев А.И. Моделирование непрерывных марковских процессов в дискретном времени на примере радиолокационных сигналов, описываемых стохастическими дифференциальными уравнениями // Радиотехника. – 2016. – № 12. – С. 28-36.
17. Малахов А.Н., Саичев А.И. К вопросу о кинетических уравнениях в теории случайных волн // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. – 1974. – № 5. – С. 699-709.
18. Моделирование многолучевых радиоканалов для анализа и синтеза систем передачи информации / Под ред. В.И. Сифорова и А.В. Проснна. – М.: Наука, 1978. – 170 с.
19. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В. и др.; Под ред. В.С. Королюка. – Киев: Наукова думка, 1978. – 528 с.
20. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ построения математической модели двумерных распределений и потенциальной эффективности подавления негауссовых импульсных помех // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.7>
21. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Квазиоптимальная демодуляция смеси узкополосного сигнала и аддитивной негауссовой помехи с полосовым спектром // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.4.4>
22. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М.: Сов. радио, 1977. – 488 с.
23. Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов. – М.: Сов. радио, 1975. – 703 с.

Для цитирования:

Артюшенко В.М., Воловач В.И. Имитационное моделирование аддитивных негауссовых помех на основе системы дифференциальных уравнений // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.3>