

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИБЛИЖЕННОЙ К РЕАЛЬНОЙ ПОМЕХОВОЙ
ОБСТАНОВКИ ПРИ ПОЛУНАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ СРЕДСТВ
СВЯЗИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВОЗДУШНЫМ
ДВИЖЕНИЕМ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ЗАВИСИМЫМ НАБЛЮДЕНИЕМ**

Евтушенко О.А.

Филиал «НИИ Аэронавигация» ФГУП ГосНИИ ГА, e-mail: zatuch@mail.ru

Рассматривается метод моделирования промышленных и атмосферных помех для средств связи метровых и декаметровых диапазонов, позволяющий адаптировать модель к реальным условиям эксплуатации этих средств. Предложен сравнительно простой способ моделирования атмосферных и промышленных помех при полунатурных испытаниях радиоэлектронного оборудования. Статистическое моделирование квазипульсных помех предлагается производить путем формирования реализации импульсной составляющей помехи на основе известных из литературы распределений длительности выбросов помехи и интервалов между ними, полученных в рамках аналитической модели квазипульсных помех. Построена реализация импульсной составляющей квазипульсной помехи. Получены аналитические выражения распределений длительностей выбросов огибающей помехи и интервалов между ними для фиксированного уровня огибающей помехи в рамках логарифмически нормальной модели. Приведен алгоритм формирования импульсной составляющей квазипульсных помех. Делается вывод о преимуществе предлагаемого способа моделирования квазипульсных помех, дающего возможность адаптации модели к условиям эксплуатации приемной радиоэлектронной аппаратуры

Ключевые слова: моделирование, промышленная помеха, атмосферная помеха, связь, испытания.

MODELLING APPROACHED TO THE REAL INTERFERING SITUATIONS AT SEMI-NATURAL TESTS OF MEANS COMMUNICATIONS, USED AT MANAGEMENT OF THE AIR THE MOVEMENT WITH AUTOMATIC DEPENDENT SUPERVISION

Evtushenko O.A.

Branch "Science Search Institute Navigation for aviation" Federal State United Undertaking State Science Search Institute Civil Aviation, e-mail: zatuch@mail.ru

The method of modeling industrial and atmospheric for means of communication of meter and decimeter ranges, allowing to adapt model for real service conditions of these means is considered. Rather easy way of modeling of atmospheric and industrial radio noises at semi-natural tests of the radio-electronic equipment is offered. Statistical modeling of quasipulse hindrances is offered to be made by formation of realization of a pulse component of a hindrance on the basis of the distributions of duration of emissions of a hindrance and intervals between them, known from literature received within analytical model the quasipulse hindrances. Realization of a pulse component of a quasipulse hindrance is constructed. Analytical expressions of distributions of duration of emissions of the bending-around hindrance and intervals between them for the fixed level of the bending-around hindrance within logarithmic normal model are received. The algorithm of formation of a pulse component of a quasipulse hindrance is given. The conclusion about advantage of the offered way of the modeling of quasipulse hindrances giving the chance of adaptation of model to service conditions of the reception radio-electronic equipment is drawn

Keywords: modeling, industrial hindrance, atmosphere hindrance, communication, tests.

Неучет отличия распределения атмосферных и промышленных помех, являющихся основными видами непреднамеренных помех в метровых (МВ) и декаметровых (ДКМВ) диапазонах волн, используемых при управлении воздушным движением (УВД) с автоматическим зависимым наблюдением (АЗН), от нормального приводит к существенному ухудшению качества его функционирования. В статье предложен сравнительно простой способ моделирования указанных помех при полунатурных испытаниях РЭО.

Известные принципы статистического моделирования негауссовых помех [2] предполагают использование четырехмерного совместного распределения амплитуды и фазы смеси сигнала и помехи, которое, как правило, неизвестно. Это представляет значительные трудности при реализации этих методов на практике.

В данной статье статистическое моделирование квазиимпульсных помех типа атмосферных и промышленных предлагается производить путем формирования реализации импульсной составляющей помехи на основе известных из литературы распределений длительности выбросов помехи $W_d(x)$ и интервалов между ними $W_i(x)$, полученных в рамках аналитической модели квазиимпульсных помех, с последующим заполнением интервалов между выбросами нормальным коррелированным шумом.

В качестве аналитической модели импульсной составляющей квазиимпульсной помехи выбрана логарифмически нормальная модель [1], обеспечивающая хорошее совпадение с экспериментальными данными при описании характеристик выбросов атмосферных и промышленных помех [6] в ДКМВ и МВ диапазонах и легко согласующаяся с экспериментальными данными через параметр V_d , характеризующий степень импульсности помехи [4].

Построение имитационной модели квазиимпульсной помехи производится с использованием аппроксимации выбросов огибающей помехи экспоненциальными импульсами. Основанием для выбора такой аппроксимации является экспоненциальный вид огибающей импульсной характеристики одиночного колебательного контура.

Реализация импульсной составляющей помехи формируется в системе координат с логарифмической шкалой по оси ординат путем расстановки на оси времени выбросов огибающей помехи, статистика пересечения которых ($W_d(x)$, $W_i(x)$) полагается известной. Расстановка производится, начиная с самого верхнего уровня и заканчивая уровнем ближайшим к фоновому с интервалом 8–10 дБ. Сказанное иллюстрируется рисунком 1.

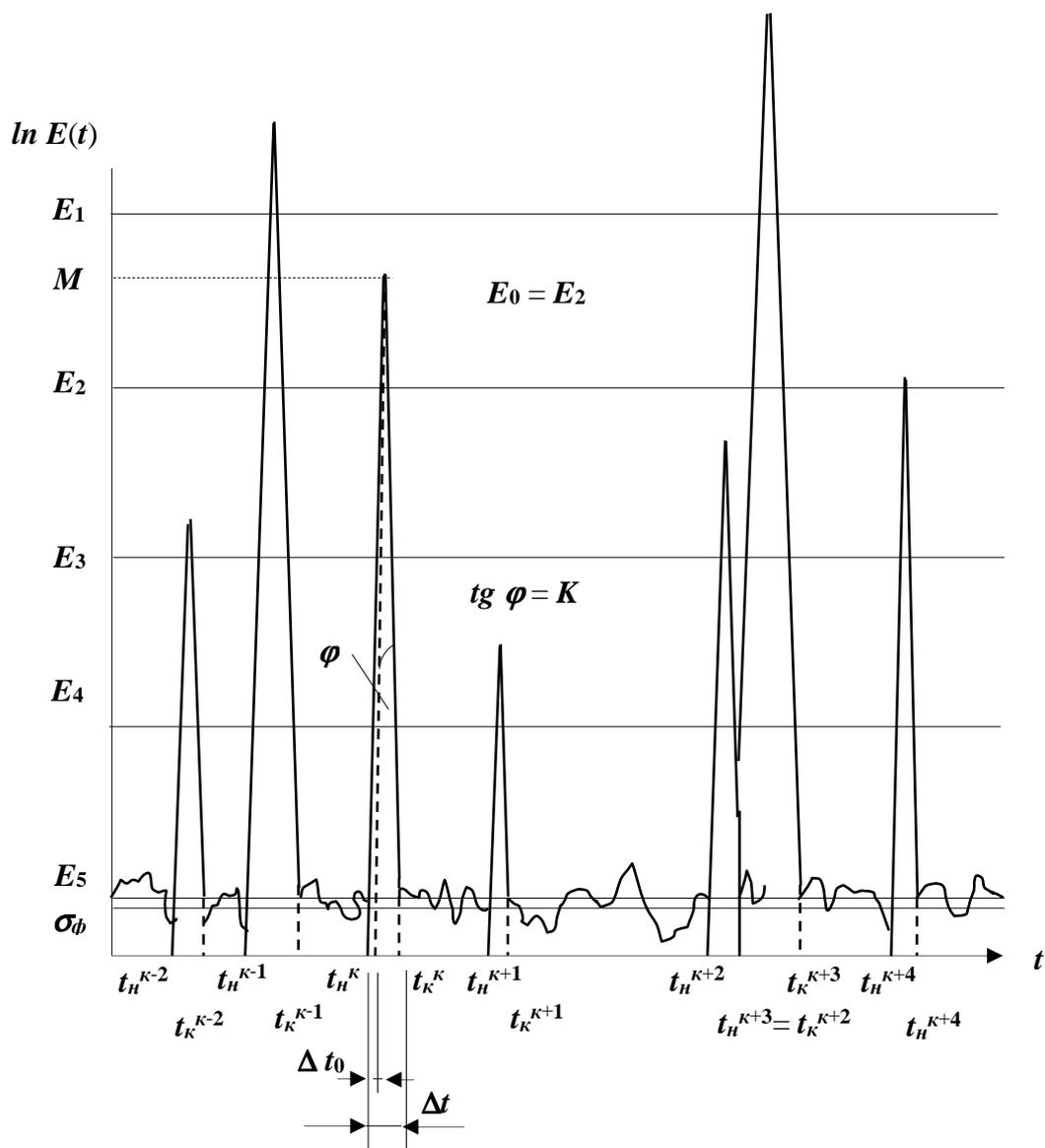


Рис. 1. Построение реализации импульсной составляющей квазиимпульсной помехи

Длительность очередного выброса импульсной составляющей помехи Δt_0 на текущем уровне E_0 определяется с помощью метода Монте-Карло на основании распределения длительностей $W_d(x)$ выбросов на данном уровне. Затем производится пересчет этой длительности в длительность импульса Δt на уровне СКО фоновой составляющей помехи σ_ϕ по формуле:

$$\Delta t = \Delta t_0 + (E_0 - \sigma_\phi) / K, \quad (1)$$

в которой время нормировано относительно величины $\frac{1}{B}$; где B – полоса пропускания

приемника, а E_0 и σ_ϕ – относительно СКО помехи $\sigma_n = \left(\frac{E^2}{2}\right)^{1/2}$. В (1) K – тангенс угла

наклона гипотенузы к лежащему на оси времени основанию прямоугольного треугольника, аппроксимирующего в логарифмическом масштабе выбросы огибающей помехи, численно равный коэффициенту затухания экспоненциального импульса, который в свою очередь равен эффективной ширине полосы его спектра [3], совпадающей с полосой пропускания РПУ B .

Координаты начала (t_n) и конца (t_k) импульса заносятся в двумерный массив, длина которого равна числу выбросов огибающей помехи в формируемом временном интервале. Расстояние между выбросами на текущем уровне определяется на основании распределения интервалов между выбросами огибающей помехи $W_i(x)$.

После завершения расстановки выбросов на очередном уровне аналогичным образом производится заполнение промежутков между выбросами предыдущего уровня. При этом по формуле $M = K \Delta t_0$ определяется пиковое значение очередного формируемого на текущем уровне выброса, и в случае, если M больше предыдущего уровня, то, поскольку выбросы, пересекающие этот уровень, уже сформированы, импульс аннулируется, а на его месте формируется следующий. Таким образом, после заполнения последнего самого нижнего уровня получается опирающаяся на фоновый уровень последовательность выбросов огибающей импульсной составляющей помехи.

Необходимые для формирования импульсной составляющей квазиимпульсной помехи аналитические выражения распределений длительностей выбросов огибающей помехи $W_d(x)$ и интервалов между ними $W_i(x)$ для фиксированного уровня огибающей помехи E_0 были получены в рамках логарифмически нормальной модели [4] для односвязной марковской последовательности примыкающих друг к другу аппроксимирующих (опорных) импульсов [7]. Выражения для распределений имеют вид:

$$W_d(k t_0) = 1 - \rho_{++}^k, \quad (2) \quad W_i(k t_0) = 1 - \rho_{--}^k, \quad (3)$$

$$\text{где } \rho_{++} = K \frac{[R_0, \alpha(E_0)]}{\rho_+}, \quad \rho_{--} = \frac{1 - 2\rho_+ + \rho_+\rho_{++}}{1 - \rho_+}, \quad \rho_+ = F[-\alpha(E_0)],$$

$$R_0 = R(t_0) = 1 + \frac{1}{\sigma} \ln \frac{B_e(t_0)}{B_e(0)}, \quad (\alpha E_0) = \sigma + \frac{1}{\sigma^2} \ln \frac{E_0}{B_e^{1/2}(0)},$$

а σ определяется выражением

$$\text{где } V_d = 20 \lg \frac{\left(\overline{E^2}\right)^{1/2}}{E} = 20 \lg \sqrt{2} \frac{\sigma_n}{E}, \quad (4)$$

$\sigma_n = \frac{(\overline{E^2})^{1/2}}{\sqrt{2}}$ – СКО, а \overline{E} – среднее значение огибающей помехи.

В (3) приняты следующие обозначения:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (5)$$

$$K(x, y) = \frac{1}{2\pi(1-x^2)^{1/2}} \int_y^\infty \int_y^\infty \exp\left[-\frac{u^2 + v^2 - 2xuv}{2(1-x^2)}\right] du dv \quad (6)$$

табулированные функции Лапласа и Крампа [8], $B_e(t)$ – корреляционная функция огибающей помехи, t_0 – длительность опорного импульса.

Для того чтобы аппроксимирующая последовательность импульсов была марковской, длительность аппроксимирующих импульсов t_0 выбирается из условия [5] $\tau_k \gg t_0$ или $1/B \gg t_0$, где τ_k – интервал корреляции процесса на выходе входной цепи приемника. При вычислениях было принято $t_0 = \frac{0,1}{B}$. Вычисление специальных функций $F(x)$ и $K(x, y)$ требует

больших затрат машинного времени. Воспользовавшись аппроксимацией функции $F(x)$ из

$$[8]: \quad F(x) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\sum_{i=1}^5 \alpha_i \lambda^i\right), \quad (7)$$

где $\lambda = \frac{1}{1+\rho x}$, $\rho = 0,2316419$, $\alpha_1 = 0,31938153$, $\alpha_2 = -0,35636378$,

$\alpha_3 = 1,781477$, $\alpha_4 = -1,821256$, $\alpha_5 = 1,3302744$,

обеспечивающей точность не хуже $1,7 \cdot 10^{-7}$, и разложением в ряд подынтегрального выражения в $K(x, y)$ [8], получим выражение

$$K(x, y) = \int_y^\infty \int_y^\infty \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} F(u)^{(n+1)} F(v)^{(n+1)} du dv, \quad (8)$$

в котором мы ограничимся первыми 10 членами ряда. Учитывая связь производных функции Лапласа с полиномами Эрмита:

$$F(x)^{(n+1)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (-1)^n H_n(x) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right), \quad (9)$$

выражение для ρ_{++} можно представить в виде удобном в вычислительном

$$\text{отношении} \quad \rho_{++} = \frac{q^2}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\alpha(E_0^2)}{2}\right] \left[1 + \frac{1}{q^2} \sum_{n=1}^{10} \frac{R_0^n}{n!} H_{(n-1)}^2 \alpha(E_0)\right], \quad (10)$$

$$\text{где} \quad q = \exp\left(\sum_{i=1}^5 \alpha_i \lambda^i\right), \quad \lambda = \frac{1}{1+\rho \alpha(E_0)}. \quad (11)$$

Энергетический спектр огибающей импульсной составляющей помехи, как это принято в [2], аппроксимируется прямоугольным треугольником с основанием B , где B – полоса пропускания входной цепи приемника. При этом выражение для R_0 в (2), (3) и (9) примет вид:

$$R_0 = 1 - \frac{0,033}{\sigma^2}. \quad (12)$$

Таким образом, при известных типе помехи, действующей в канале связи (атмосферная, промышленная), параметре импульсности помехи V_d , полосе пропускания входной цепи приемника B и получаемых в рамках логарифмически нормальной модели распределений длительностей выбросов огибающей помехи $W_d(x)$ и интервалов между ними $W_i(x)$ описанные выше процедуры позволяют сформировать огибающую импульсной составляющей квазиимпульсной помехи. При этом фаза помехи принимается постоянной внутри выброса и распределенной равномерно в различных выбросах.

Фоновая составляющая представляет собой нормальную помеху с дисперсией, определяемой

по формуле $\sigma_\phi^2 = c \frac{\bar{E}^2}{2}$, где

$$c = \begin{cases} 10^{-0,13V_d} & \text{– для промышленной помехи,} \\ 10^{-0,2V_d} & \text{– для атмосферной помехи.} \end{cases}$$

Она заполняет интервалы между выбросами импульсной составляющей. При этом в отличие от последней, формируемой заранее, отсчеты фоновой составляющей вычисляются в процессе моделирования.

Процесс формирования отсчетов импульсной составляющей помехи, алгоритм которого представлен на рисунке 2, начинается после того как массив, описывающий ее, будет заполнен, и сводится к просмотру всех моментов выборки в пределах реализации помехи.

После нахождения амплитуды и фазы помехи в отсчетной точке формируются отсчеты квадратурных компонент помехи $A \cos \phi$ и $A \sin \phi$. Целесообразность перехода к квадратурным компонентам обусловлена тем, что в современных приемных устройствах с цифровой обработкой информации, как правило, используется квадратурный выход, что снижает требования к производительности вычислителя, так как обработка высокочастотного сигнала заменяется обработкой его низкочастотных квадратурных компонент.

Если момент выборки попадает в интервал между начальной (t_n) и конечной (t_k) координатами очередного выброса, то амплитуда помехи в этот момент времени определяется по формуле:

$$A = (t_{om} - t_k) K, \quad (13)$$

где t_{om} – момент взятия отсчета, а A – измеряется в децибелах относительно СКО помехи.

Фаза в отсчетной точке определяется на основе равномерного распределения и остается постоянной для всех отсчетов в пределах выброса. После нахождения амплитуды и фазы помехи в отсчетной точке формируются отсчеты квадратурных компонент помехи $A \cos \varphi$ и $A \sin \varphi$.

Целесообразность перехода к квадратурным компонентам обусловлена тем, что в современных приемных устройствах с цифровой обработкой информации, как правило, используется квадратурный выход, так как это снижает требования к производительности вычислителя, поскольку обработка высокочастотного сигнала заменяется обработкой его низкочастотных квадратурных компонент.

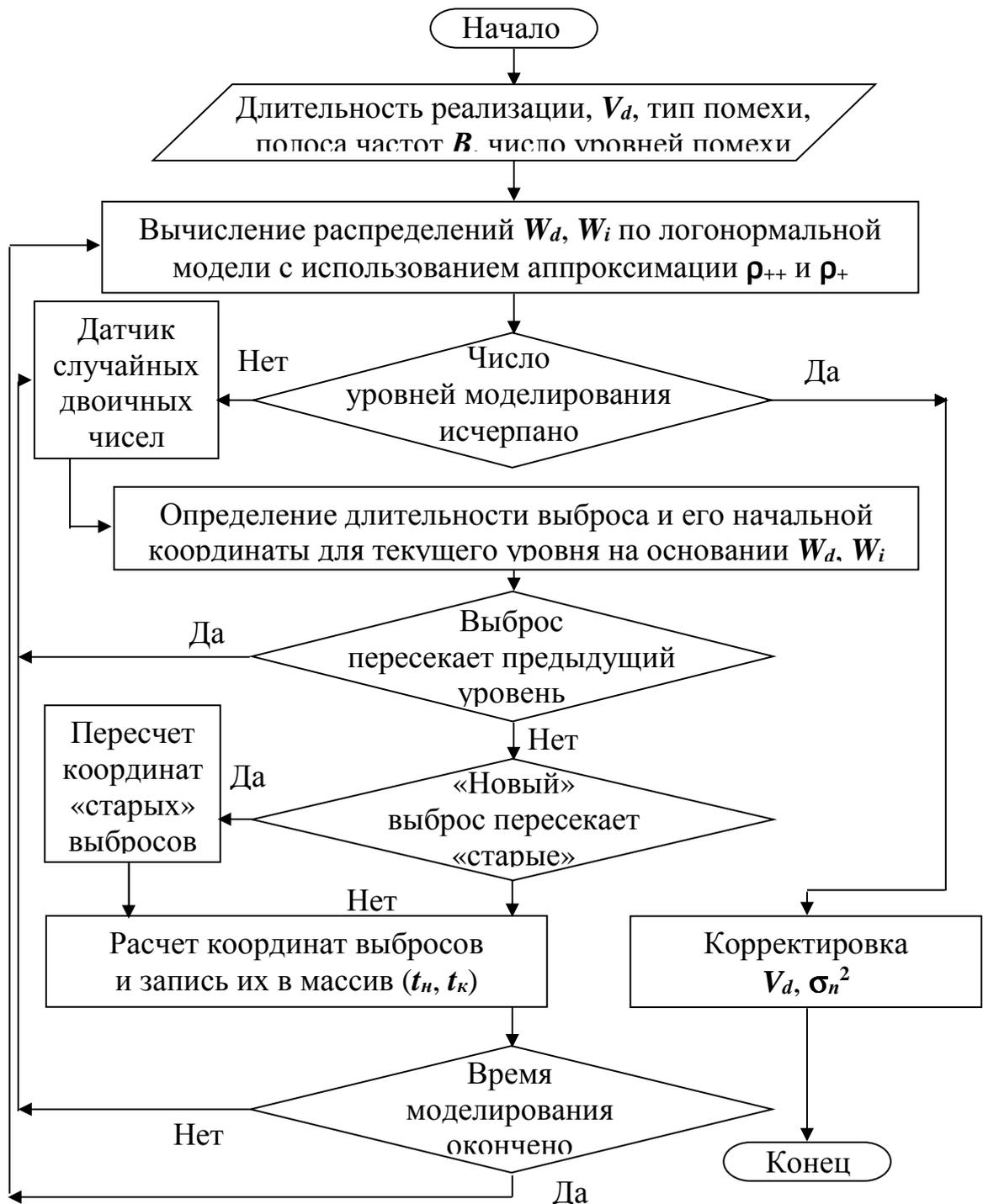


Рис. 2. Алгоритм формирования импульсной составляющей квазиимпульсной помехи

При попадании момента выборки в интервал между выбросами помехи формирование отсчетов квадратурных компонент фоновой составляющей помехи производится непосредственно из двух независимых нормальных процессов с дисперсией $\sigma_{\phi_k}^2 = \frac{\sigma_{\phi}^2}{2}$ и нормированной корреляционной функцией, которая при принятой выше аппроксимации спектра огибающей помехи в виде прямоугольного треугольника с основанием B записывается:

$$r(\tau) = \frac{\sin^2(\pi B \tau)}{(\pi B \tau)^2}. \quad (14)$$

При этом математическое ожидание и дисперсия отсчетных значений квадратурных компонент фоновой составляющей помехи, которые берутся с интервалом Δt , определяются из выражений [8]:

$$m = r(\Delta t) x, \quad (15) \quad \sigma_{\phi_k}^2 = \frac{\sigma_{\phi}^2 [1 - r(\Delta t)^2]}{2}, \quad (15)$$

где x – значение квадратурной составляющей в момент выборки предыдущего отсчета.

Достоинством предлагаемого способа моделирования квазиимпульсных помех является возможность адаптации модели через параметр V_d к условиям эксплуатации приемной радиоэлектронной аппаратуры, поскольку в литературе приводятся экспериментальные данные о зависимости V_d от условий радиоприема: географического района, времени года и времени суток (для атмосферных помех), высоты точки приема (для промышленных помех), а также от частотного диапазона и полосы пропускания приемного устройства (для обоих видов помех).

Список литературы

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 2005.
2. Бусленко Н.П. Метод статистического моделирования. – М.: Статистика, 1970.
3. Затучный Д.А. Оценка степени влияния различных факторов на навигационные определения ВС с использованием СРНС. - Научный Вестник МГТУ ГА, № 159. 2010. С. 143–147.
4. Козлов А.И., Гаранин С.А. К разработке математических моделей влияния радиопомех и случайных воздействий на ВС на определяемые навигационные параметры. – Научный Вестник МГТУ ГА, серия Радиофизика и радиотехника, 2005, № 93.

5. Козлов А.И., Маслов В.Ю. Дифференциальные уравнения эволюции матрицы рассеяния. — Научный Вестник МГТУ ГА, № 210, 2014. С. 43–46.
6. Рубцов В.Д., Зайцев А.Н. О применимости логарифмически нормальной модели для вероятностного описания квазиимпульсных помех // Радиотехника и электроника. Т. XXIX. № 8, 1984.
7. Распределение по Земному шару атмосферных помех и их характеристики. Документы 10-й Пленарной ассамблеи МККР. Отчет 322, Женева, 1964. – М.: Связь, 1965.
8. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982.

Рецензенты:

Козлов А.И., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры «Технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» Московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Москва;

Акиншин Р.Н., д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник секции по оборонным проблемам Министерства обороны (при Президиуме Российской академии наук), г. Москва.