

## ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННОЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕШАЮЩЕГО СИГНАЛА НА РАДИОСТАНЦИЮ

**Rodionov S. S. Probability-time approach to the estimation of influence of the interfering signal on the radio station.** A probability of interfering signal impact (non deliberate interference) on the radio receiver is considered in the framework of a model of two random streams. Streams coincidence probability data for exponential distribution of pause durations of interfering transmitter and random switching of the receiver are presented. Functional dependence of the probability from time parameters of transmitter and receiver operation and from the coincidence interval for pulses of streams is determined. Examples of interfering signal impact efficiency estimates on radio line with different types of both the expected signal being received and interference with account of coincidence period are considered. Probability-time approach to the appearance of the interfering signal at the input of the radio and assessment of its impact can be used in the choice of methods and means to ensure electromagnetic compatibility.

**Keywords:** radio frequency resource, random impulsive streams, coincidence interval, indicator function, linear detector, electromagnetic compatibility

**Родионов С. С. Ймовірнісно-часовий підхід до оцінки дії сигналу завади на радіостанцію.** Розглядається ймовірність дії сигналу завади (ненавмисної завади) на приймач радіостанції з позицій збігу у часі двох випадкових потоків. Приводиться значення ймовірності збігу потоків для експоненціального закону щільності розподілу тривалості пауз передавача завади і довільному включенні в роботу приймача. Визначена функціональна залежність ймовірності від часових параметрів роботи передавача і приймача і від інтервалу збігу імпульсів потоку. Розглянуті приклади оцінки ефективності дії сигналу завади на радіолінії з різними видами корисного вхідного сигналу і завади з урахуванням часу збігу.

**Ключові слова:** радіочастотний ресурс, випадкові імпульсні потоки, інтервал збігу, індикаторна функція, лінійний детектор, електромагнітна сумісність

**Родионов С. С. Вероятностно-временной подход к оценке воздействия мешающего сигнала на радиостанцию.** Рассматривается вероятность воздействия мешающего сигнала (непреднамеренной помехи) на приемник радиостанции с позиций совпадения во времени двух случайных потоков. Приводится значение вероятности совпадения потоков для экспоненциального закона плотности распределения длительности пауз мешающего передатчика и произвольном включении в работу приемника. Определена функциональная зависимость вероятности от временных параметров работы передатчика и приемника и от интервала совпадения импульсов потока. Рассмотрены примеры оценки эффективности воздействия мешающего сигнала на радиолинии с различными видами принимаемого полезного сигнала и помехи с учетом времени совпадения.

**Ключевые слова:** радиочастотный ресурс, случайные импульсные потоки, интервал совпадения, индикаторная функция, линейный детектор, электромагнитная совместимость

### Вступлення. Постановка задачі

Необходимость и актуальность проведения исследований по обеспечению совместного функционирования современных радиоэлектронных средств (РЭС) и их электромагнитной совместимости обусловлена многими факторами, среди которых основными являются [1-3]:

– широкое внедрение РЭС в различных областях народного хозяйства и, как следствие, постоянное возрастание общего числа одновременно действующих стационарных и мобильных радиотехнических устройств;

- расширение полос частот и увеличением загрузки диапазона радиочастот;
- повышение мощности радиопередатчиков и чувствительности приемников.

Состояние электромагнитной совместимости (ЭМС) работающих в группировке радиоэлектронных средств определяется их радиочастотным ресурсом (РЧР) [4],

энергетическими характеристиками передачи и приема радиосредств, видами излучаемых сигналов и методами их обработки [5, 6].

Составляющие радиочастотного ресурса, а также соответствующие энергетические характеристики РЭС в общем случае носят случайный характер [1, 7].

Дадим вероятностную оценку временной составляющей РЧР с точки зрения появления непреднамеренных помех (мешающих сигналов) на входе приемника радиолинии.

### Вероятностная оценка РЧР при воздействии непреднамеренных помех

Составляющие радиочастотного ресурса, определяемые для  $i$ -го РЭС как

$$V_i = B_i S_i T_i,$$

где  $B_i$  – используемый диапазон радиочастот;

$S_i$  – площадь заданной зоны работы РЭС;

$T_i$  – время работы (передачи-приема информации).

При случайных включениях мешающего передатчика и приемника полезного сигнала, при возможном ослаблении радиоволн при их распространении в различных условиях местности, изменении режимов радиосвязи между РЭС в группировке и при наличии других факторов указанную оценку рассмотрим с позиции совпадения случайных импульсных потоков [7].

При условии, что потоки интервалов работы приемника  $i$ -го РЭС и передатчика  $j$ -го мешающего РЭС независимы и поток мешающего передатчика стационарен, вероятность совпадения потоков по времени обоих средств равна [1]

$$P_{\xi ij}^t = \bar{F}_j \left[ \bar{t}_j + \int_0^{t_i} dy \int_0^{\infty} \varphi_j(\tau) d\tau \right]$$

где:  $\bar{F}_j = \frac{1}{t_j + \tau_j} = \frac{1}{\int_0^{\infty} t \varphi_j(t) dt + \int_0^{\infty} \tau \varphi_j(\tau) d\tau}$  – средняя частота включения источника помех;

$\bar{t}_j, \bar{\tau}_j$  и  $\varphi_j(t), \varphi_j(\tau)$  – математические ожидания длительностей импульсов и пауз мешающего передатчика и их соответствующие плотности вероятностей;

$t_i$  – время, в течение которого приемник открыт для приема полезного сигнала.

На практике могут иметь место различные виды законов распределения плотности вероятностей пауз потока, характеризующего временной режим мешающих передатчиков.

При экспоненциальном законе плотности распределения  $\varphi_j(\tau)$  пауз вероятность совпадения времени работы определяется как

$$P_{\xi ij(\xi=1)}^t = 1 - \bar{F}_j \bar{\tau}_j \exp\left(-\frac{t_k}{\tau_j}\right),$$

где  $t_k$  – интервал времени работы приемника, включаемого в произвольный момент времени.

Заметим, что значение  $P_{\xi ij(\xi=1)}^t$  для других законов  $\varphi_j(\tau)$  можно найти в [1].

Интервал искажения полезного сигнала помехой определяется временем совпадения  $\tau_{\text{сов}}$  указанных импульсов потоков.

Считая, что функция распределения числа импульсов помехи, попадающих в интервал  $t_k$ , является распределением Пуассона, имеем следующее значение вероятности для одиночного совпадения на интервал  $\tau_{\text{сов}}$  импульсов  $t_j$  и  $t_k$  [8, 9].

$$P_{\text{сов}} = 1 - e^{-\bar{F}_j(t_j+t_k-2\tau_{\text{сов}})} = \bar{F}_j(t_j + t_k - 2\tau_{\text{сов}}).$$

Рассмотрим на примерах конкретных радиолиний воздействие в течение времени  $\tau_{\text{сов}}$  мешающих сигналов.

**Пример 1.** На вход приемника, открытого в течение  $t_k$ , поступает сигнал

$$X_{\text{вх}}(t) = S(t) + \xi(t) + \gamma(t/\tau_{\text{сов}})\eta(t),$$

где:  $S(t)$  – полезный сигнал, представляющий из себя кодовую последовательность сигналов;

$\xi(t)$  и  $\eta(t)$  – соответственно аддитивная помеха, поступающая вместе с полезным сигналом, и мешающий сигнал – широкополосная импульсная помеха (например, от работы дугового сварочного аппарата). При линейном входном тракте приемника помехи имеют равномерные спектральные плоскости  $G_\xi$  и  $G_\eta$ , нулевые средние значения и дисперсии  $\sigma_\xi^2$  и  $\sigma_\eta^2$ ;

$$\gamma\left(\frac{t}{\tau_{\text{сов}}}\right) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq t \leq t_k - \tau_{\text{сов}} \\ 1 & \text{при } t_k - \tau_{\text{сов}} < t < t_k \end{cases} \text{ – индикаторная функция.}$$

Будем считать, что все сигналы  $S_i(t)$  имеют одинаковую энергию  $E_s$  на интервале длительности символа  $T_0$  ортогональны, а линейный тракт приемника имеет идеальную прямоугольную характеристику с полосой пропускания по видеочастоте  $F_0$ .

Отношение сигнал-помеха при действии только одной помехи  $\xi(t)$  равно

$$q_0^2 = \frac{E_s}{G_\xi} = h^2 F_0 T_0, \quad h^2 = \frac{P_s}{\sigma_\xi^2},$$

а при действии суммарной помехи  $\xi(t)$  и  $\eta(t)$

$$q_1^2 = \frac{E_s}{G_\xi + G_\eta} = h_1^2 F_0 T_0, \quad h_1^2 = \frac{P_s}{\sigma_\xi^2 + \sigma_\eta^2},$$

где  $P_s = \frac{E_s}{T_0}$  – средняя мощность сигнала.

Практически в любой схеме обработки при различении сигналов вероятность ошибок является монотонно убывающей функцией от отношения сигнал-помеха [5]. Обозначая через  $P_E(q)$  вероятность ошибок, имеем при  $q_0 > q_1$  значение  $P_E(q_0) < P_E(q_1)$ .

Если зафиксировать интервал совпадения

$$\tau_{\text{сов}} = kT_0,$$

то средняя вероятность ошибок приема полезного сигнала, состоявшего из  $N$  сигналов, в течение времени  $t_k$ , равного

$$t_k = NT_0$$

определяется выражением

$$\begin{aligned} P(N/k) &= (P_E(q_0)(NT_0 - kT_0) + P_E(q_1)kT_0)/(NT_0) = \\ &= P_E(q_0)(1 - k/N) + P_E(q_1)k/N. \end{aligned}$$

Приведем пример определения вероятности подавления радиоимпульса сигнала  $S(t)$  с совпадающей по частоте гармонической помехой  $\eta(t)$ .

Вероятность  $P(q_1)$  того, что результирующая амплитуда суммы сигнала к помехи окажется меньше порогового уровня  $U_0$  ( $0 \leq U_0 \leq U_s$ ), если сдвиг фаз между высокочастотными колебаниями импульсов является случайным и может с одинаковой вероятностью быть равным значению из интервала  $0 \div 2\pi$ , равна [9]

$$P(q_1) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_0^2 - (U_s - U_n)^2}{U_s U_n}} & \text{при } |U_s - U_n| < U_0, \\ 0 & \text{при } |U_s - U_n| \geq U_0, \end{cases}$$

где  $U_s$  и  $U_n$  – амплитуды сигнала к помехи.

**Пример 2.** Пусть на приемник с линейным детектором в течение времени  $\tau_{\text{сов}}$  воздействует амплитудно-модулированная (АМ) помеха

$$u_n(t) = U_n[1 + m_n(t)] \cos(\omega_n t + \varphi_n)$$

при одновременном приеме полезного сигнала

$$u_c(t) = U_c[1 + m_c(t)] \cos(\omega_c t + \varphi_c),$$

где:  $U_n$  и  $U_c$  – амплитуды;  $m_n(t)$  и  $m_c(t)$  – модулирующие функции;

$\omega_n$  и  $\omega_c$  – несущие частоты;  $\varphi_n$  и  $\varphi_c$  – начальные фазы, соответственно, помехи и сигнала.

Огибающая суммарного сигнала на входе детектора

$$\begin{aligned} U_{\text{ог}} &= K_{\text{прм}} \sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_{\text{ос}}^2 + 2U_{\text{оп}}U_{\text{ос}} \cos(\omega_n - \omega_c)t} = \\ &= K_{\text{прм}} \sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_{\text{ос}}^2} \sqrt{1 + \frac{2U_{\text{оп}}U_{\text{ос}} \cos(\omega_n - \omega_c)t}{U_{\text{оп}}^2 + U_{\text{ос}}^2}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где:  $U_{\text{оп}} = U_n[1 + m_n(t)]$  – огибающая помехи;

$U_{\text{ос}} = U_c[1 + m_c(t)]$  – огибающая сигнала;

$K_{\text{прм}}$  – коэффициент усиления приемника.

Раскладывая выражение (1) в биномиальный ряд и ограничиваясь в разложении тремя членами, что справедливо при  $m_c < 1$  и  $m_n < 1$ , в результате преобразований получаем выражение для напряжения на выходе детектора [8, 10, 11]

$$U_d = K K_d (U_{=} + U_{\Omega c} + U_{\Omega n} + U_{\Omega \delta}), \quad (2)$$

где:  $U_{=} = U_c \sqrt{1 + b^2}$  – постоянная составляющая;

$$U_{\Omega c} = \frac{U_c(2+b^2)}{2(1+b^2)^{3/2}} m_c - \text{составляющая продетектированного сигнала}; \quad (3)$$

$$U_{\Omega n} = \frac{U_n b(2b^2+1)}{2(1+b^2)^{3/2}} m_n - \text{составляющая продетектированной помехи}; \quad (4)$$

$$U_{\Omega \delta} = \frac{U_n}{\sqrt{1+b^2}} \left[ 1 + \frac{b^2}{1+b^2} m_c + \frac{1}{1+b^2} m_n \right] \cos \Omega \delta t - \text{составляющая биений между сигналом и помехой}; \quad (5)$$

$\Omega = \omega_n - \omega_c$  – частота биений;

$b = \frac{U_n}{U_c} > 1$  – отношение амплитуд помехи и сигнала.

Таким образом, как показывает выражение (2), подавление радиолинии происходит в общем случае вследствие маскировки сигнала продетектированной помехой (слагаемое (4)) и составляющей биений (слагаемое (5)). Кроме того, при  $b > 1$  происходит непосредственное подавление в нелинейном устройстве (детекторе) сигнала помехой. Так, из (3) и (4) имеем

$$\left( \frac{U_{\Omega c}}{U_{\Omega n}} \right)_{\text{вых}} = \frac{b^2 + 2 m_c}{2b^2 + 1} \frac{1}{m_n b^2}.$$

Например, при  $b = 2$  и  $m_c = m_n$

$$\left( \frac{U_{\Omega c}}{U_{\Omega n}} \right)_{\text{вых}} = \frac{1}{6}.$$

Следовательно, для данных условий отношение помеха/сигнал на выходе детектора возрастает в 3 раза.

Решение об эффективности рассматриваемой помехи должно учитывать отношение  $\frac{t_k}{\tau_{сов}}$  и информационную структуру полезного сигнала.

**В заключение** отметим следующее. При комплексной оценке ЭМС РЭС необходимо рассматривать и вероятностные показатели других составляющих РЧР, энергетические режимы работы передающей и приемной аппаратуры РЭС, а также возможности использования тех или иных средств защиты от мешающего сигнала, попадающего на вход приемника.

### **Литература**

1. Феоктистов Ю. А. Теория и методы оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / Ю. А. Феоктистов, В. В. Матусов, Л. И. Башурин, В. И. Селезнев ; под ред. Ю. А. Феоктистова. – Москва : Радио и связь, 1988 – 216 с.
2. Шиллер Й. Мобильные телекоммуникации / Й. Шиллер. – Москва : Вильямс, 2005. – 192 с.
3. Родионов С. С. Адаптивный принцип защиты радиоэлектронных средств от непреднамеренных помех / С. С. Родионов, Ф. Н. Кондаков // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2015. – №4. – С. 75-79.
4. Брагин А. С. Основы управления использованием радиочастотного ресурса / А. С. Брагин. – Київ: НТУУ «КПІ», 2003. – 377 с.
5. Борисов В. Н. Помехозащищенность системы радиосвязи / В. Н. Борисов, В. М. Зинчук. – Москва, Радио и связь, 1999. – 252 с.
6. Комиссаров Ю. А. Помехоустойчивость и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / Ю. А. Комиссаров, С. С. Родионов. – Київ: Техніка, 1978. – 208 с.
7. Седякин М. Н. Элементы теории случайных потоков / М. Н. Седякин. – Москва : Сов. радио, 1965. – 262 с.
8. Вакин С. А. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки / С. А. Вакин, Л. Н. Шустов. – Москва : Сов. радио, 1968. – 418 с.
9. Горяинов В. Г. Статистическая радиотехника. Примеры и задачи. Учеб. пособие для вузов / В. Г. Горяинов, А. Г. Журавлев, В. И. Тихонов ; под ред. В. И. Тихонова. – 2-е изд. – Москва : Сов. радио, 1980. – 544 с.
10. Василевич Л. Ф. Радиоэлектронное подавление / Л. Ф. Василевич. – Киев: КВВАИУ, 1989. – 238 с.
11. Лазуткин Б. А. Радіотехнічні пристрої з компенсацією завад / Б. А. Лазуткин. – Київ : Техніка, 1972. – 116 с.

### *Автор статті*

**Родионов Сергій Сергійович** – кандидат технічних наук, професор кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел.: +380 (99) 064 61 58. E-mail: rodionov1934@mail.ru

### *Authors of the article*

**Rodionov Serhiy Serhiyovych** – candidate of sciences (technical), professor at radio technologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel. +380 (99) 064 61 58. E-mail: rodionov1934@mail.ru.

Дата надходження в редакцію: 17.11.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Дружинін В. А.