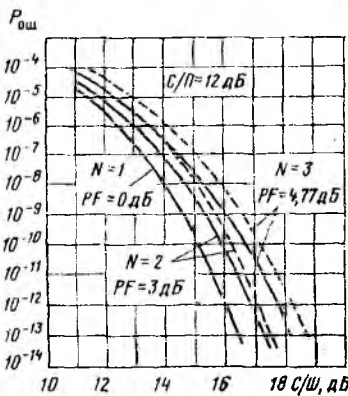


## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДОПУСТИМЫХ ПОМЕХ, ДЕЙСТВУЮЩИХ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Как и в прочих системах, в спутниковых системах связи (ССС) одной из наиболее характерных является помеха типа белого гаусова шума  $\xi(t)$ , имеющая нулевой, средний и определенный уровень спектральной плотности мощности  $N_\xi$  [Вт/Гц]. Поскольку в области УКВ и СВЧ основной вклад в уровень общей мощности шума вносят внутренние помехи приемника, или собственный шум, то  $P_{шпр} = n_{ш} \cdot k \cdot T_0 \cdot \Delta F$ , где  $n_{ш}$  – коэффициент шума приемника,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  [Вт/Гц·град] – постоянная Больцмана,  $T_0$  – абсолютная температура приемного тракта  $T_0 = 300$  К,  $\Delta F$  – полоса частот, в пределах которой осуществляется прием полезного сигнала.

При решении практических задач ЭМС влияние помехи от других РЭС редко когда можно аппроксимировать белым гаусовским шумом, ибо они носят характер узкополосных сигналов с соответствующей модуляцией или имеют даже квазимонохроматический вид. Анализ степени влияния таких помех без конкретизации их спектрально-временных параметров затруднителен. Если при этом принять упомянутую выше аппроксимацию белым гаусовским шумом той же средней мощности, то такой расчет обычно дает завышенную вероятность ошибки  $P_{ош}$ , на величину от половины до 1,5...2 порядков. В отчете 388-5 ITU [1] даются рекомендации по учету не только энергетических соотношений  $P_c/P_{ш}$ , но и мощности полезного сигнала  $P_c$  к мощности помехи  $P_n$ , а также пик-фактора  $\chi^2$ , равного отношению пикового значения к среднеквадратическому огибающей мешающих сигналов (помех).

Пик-фактор оценивается по формуле:



$$\chi^2 = 201g \sum_{i=1}^N n_i - 101g \sum_{i=1}^N n_i^2 \quad (1)$$

На графике [2] из указанного отчета 388-5 представлена зависимость  $P_{ош} = f(P_c/P_{ш})$  при наличии мешающего сигнала с относительным уровнем  $P_c/P_n$ , равного 12 дБ для 3х различных сигнально-помеховых ситуаций:

- когда действует одна помеха с пик-фактором 0 дБ;
- когда действует две помехи с пик-фактором 3 дБ;
- когда действует три помехи с пик-фактором 4,77 дБ.

На тех же графиках штриховой линией представлены графики той же зависимости, являющейся верхней границей вероятности ошибки, полученной для шумовой помехи.

В общем же случае рекомендуется получать свертку спектров полезного и мешающего сигналов:

$$D(F, \delta f) = \frac{\sqrt{2}}{2} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} g_c(q) g_n[v(b - \delta + q)] dq + \int_{-\infty}^{\infty} g_c(q) g_n[v(b + \delta - q)] dq \right\} \quad (2)$$

где  $g_c(q) = F_g W_c(F)$  – нормализованный энергетический спектр полезного сигнала;  $g_n(q) = F_{gn} W_n(F)$  – нормализованный энергетический спектр мешающего сигнала;  $q = n / F_g$ ;  $b = F / F_g$ ;  $\delta = \delta f / F_g$ ;  $v = F_g / F_{gn}$ ;  $\delta f$  – разность несущих частот полезного и мешающего сигналов;  $F_g$ ,  $F_{gn}$  – верхняя граничная частота линейного спектра мешающего и полезного сигнала

При  $\delta f = 0$ , когда несущие частоты совпадают, то  $D(F_g, 0) \approx (F_g / F_{gn}) g_n(F_g / F_{gn})$ . Если спектр полезного сигнала шире спектра мешающего, то

$$D(F_c, \delta f) = \sum_k D(F_c, k\delta), \quad (3)$$

где  $k\delta$  принимает значения в пределах полосы полезного сигнала, то есть от  $-q_{\Delta}/2$  до  $q_{\Delta}/2$ .

Свертка спектров  $D$  используется при расчетах защитных отношений  $H = P_c/P_n$ , которые являются предельно допустимыми при тех или иных принимаемых полезных сигналах  $P_c$  и действующих мешающих  $P_n$ , имеющих «окрашенный» характер. Так согласно «Рекомендации 466-4» в канале тональной частоты в точке относительного нулевого уровня допустимый уровень помехи не должен превышать 800 пВт. Для крайнего правого канала в системе ОКН это значение:

$$H = 59,4 - 20 \lg(\Delta f_k / F_c) + 10 \lg(D / F_c), \quad (4)$$

где  $\Delta f_k$  – эффективное значение девиации частоты сигнала, соответствующее уровню 1 мВт сигнала в канале ТЧ.

Для цифровых систем действуют несколько иные «Рекомендации 523-2», связывающие уровень шума, при котором фиксируется вероятность ошибки  $P_{ош}$ . Обычно это  $P_{ош} = 10^{-6}$ . Так для широко используемой цифровой системы ИКМ с сигналом ФМ-Ч максимально допустимая мощность помехи на входе демодулятора должна быть не более 6 % от мощности шума, соответствующего вероятности ошибки  $P_{ош} \geq 10^{-6}$ . Это защитное отношение

$$H = h_{ном}^2 + 12,2 \text{ [дБ]}, \quad (5)$$

где  $h_{ном}^2 = (P_c/P_w)$ , соответствующее  $P_{ош} = 10^{-6}$ . Из теории связи известно, что при когерентном приеме  $h_{ном}^2 = 10,8$  дБ. При переходе к практическим задачам для реальных каналов ССС в отчете 455-4 рекомендуется дополнительно учитывать еще и энергетические потери, которые для различных методов многостанционного доступа имеют соответственно вид:

$$\Delta h_{МДЧР}^2 = 2,5 + 0,5 \log_2 M; \quad (6)$$

$$\Delta h_{МДВР}^2 = 3,0 + 0,7 \log_2 M, \quad (7)$$

где  $M$  – число позиций многопозиционного сигнала.

Если используется в ССС помехозащищенное кодирование, то защитное отношение соответственно может быть уменьшено на величину  $G_x$  – выигрыша за счет кодирования, при этом защитное отношение (5) приобретает окончательный вид для полезных сигналов ФМ-Ч:

$$H_{ЧР} = 26,5 - G_x + 10 \lg n; \quad (8)$$

$$H_{ВР} = 27,4 - G_x + 10 \lg n. \quad (9)$$

где  $n$  – число мешающих в информационной полосе сигналов.

Получим численное значение защитного отношения для подобной помехи, имеющей такой же вид ФМ-Ч. В данном случае это может интерпретироваться как действие внутрисистемной помехи.

Энергетический спектр такого сигнала имеет форму:

$$S(f) = T \left[ \frac{\sin(\omega_0 - \omega) T/2}{(\omega_0 - \omega) T/2} \right]^2, \quad (10)$$

где  $T = 1/V$  – период, величина, обратная скорости передачи  $V$  [бит/с]. С учетом обозначения расстройки  $F = f_0 - f$  получим другой удобный для расчетов вид

$$S(f) = \frac{1}{\beta V} \left[ \frac{\sin(\pi F / \beta V)}{\pi F / \beta V} \right]^2, \quad (11)$$

где  $\beta$  – коэффициент, зависящий от кратности модуляции, при ФМ-2 значение  $\beta = 1$ , при ФМ-4 значение  $\beta = 0,5$ .

Нормализованный энергетический спектр ФМ сигнала:

$$g(q) = \left[ \frac{\sin \pi q}{\pi q} \right]^2, \quad (12)$$

где  $q = F/\beta V$ .

При совпадающих спектрах полезного сигнала и помехи или когда спектр помехи шире сигнала (при скорости  $V_n > V_c$ ) с использованием (4)...(8) получим

$$H = h_{ном}^2 + 12,2 - G_k + 10 \lg 2 \int_{-q_{\Delta}/2}^{q_{\Delta}/2} g_n(q) dq, \quad (13)$$

С учетом значения верхней границы спектра мешающего сигнала  $F_{ан} = 1/2T$  и что на несущей частоте  $g_n(0) = 1$  выражение (14) приобретает окончательное значение:

$$H = 26,5 - G_k + 10 \lg(\Delta f_u 2T), \quad (15)$$

где  $\Delta f_u$  – ширина информационной полосы полезного сигнала.

Как видно расчет защитных отношений и допустимых помех по критериям ЭМС определяется достаточно строго. Вместе с тем, в ряде случаев пользуются более простыми критериями, которые определяют приемлемые помехи. К таким можно отнести критерий приемлемости помехи, составляющей 10...20 % от полного допустимого уровня шума. В некоторых службах приемлемым считается уровень, лежащий на 5...10 дБ ниже собственных шумов приемника. В ряде ССС с повторным использованием частот совокупный уровень помех отсчитывается не от уровней собственных шумов приемника  $P_{ш} = n_{ш} k T_0 \Delta F$ , а от уровня полезного принимаемого сигнала и составляет 27...30 дБ ниже этого сигнала. Данная цифра определяет ту реально достижимую величину развязки между антеннами в ближней зоне, которую можно получить на практике [3] при наличии современной технологии.

**Список литературы:** 1. CCIR XVI Plenary Assambly. Dubrobnik, 1986, ITV, Geneva, 1986. Vol. 4. 2. Бородич С.В. ЭМС наземных и космических радиослужб. Критерии, условия и расчет. М.: Радио и связь, 1990. 272 с. 3. Буренин Н.И., Поповский В.В. Проблема ЭМС и методы ее решения с помощью антенной техники. М.: Радио и связь, СБ "Антенны" № 38, 1989.

Харьковский государственный технический  
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 14.05.99