

## К оценке помехозащищенности радиосистем с широкополосными сигналами

П. З. Баулин<sup>1</sup>, М. А. Кобелев<sup>2</sup>, А. И. Куприянов<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>ОАО «Российские космические системы»

<sup>3</sup>д.т.н., профессор Московского авиационного института  
(национального исследовательского университета)

e-mail: <sup>1,2</sup>contact@spasecorp.ru, <sup>3</sup>mai@mai.ru

**Аннотация.** Рассматриваются потенциальные характеристики помехозащищенности цифровых систем передачи информации, использующие сигналы с расширением спектра. В качестве моделей помех анализируются шумовые, узкополосные (квазигармонические) и имитирующие сигналоподобные. В качестве критерия качества помехозащиты используется вероятность ошибки приема символа.

**Ключевые слова:** помехозащищенность, расширение спектра, узкополосные и имитирующие помехи

## To the Estimation of Broadband Radio Systems Interference Immunity

P. Z. Baulin<sup>1</sup>, M. A. Kobelev<sup>2</sup>, A. I. Kuprijanov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Joint Stock Company "Russian space systems"

<sup>3</sup>doctor of engineering science, professor of the Moscow aviation institute  
(national research university)

e-mail: <sup>1,2</sup>contact@spasecorp.ru, <sup>3</sup>mai@mai.ru

**Abstract.** Potential characteristics of protection against hindrances of digital systems the information transfers using signals with expansion of a spectrum are considered. As models of hindrances are analyzed noise, narrow-band (as though harmonious) and similar to a signal hindrances. As criterion of quality protection against hindrances the probability of a mistake of reception of a symbol is used.

**Key words:** protection against hindrances, signals with expansion of spectrum, narrow-band and similar to a signal hindrances

## Введение

Для информационных систем современных ракетно-космических комплексов весьма актуальна проблема обеспечения помехоустойчивости и помехозащищенности. При этом считается, что именно сигналы с расширением спектра способны обеспечивать высокую помехозащищенность, эффективно противостоять средствам активного радиопротиводействия [2–4], то есть у систем разного функционального назначения, использующих подобные сигналы, высокая помехозащищенность. В данной статье приводятся результаты оценки потенциальной помехозащищенности систем с сигналами, формируемыми с использованием методов расширения спектра [4]. В качестве моделей помеховой обстановки рассматриваются шумовые, узкополосные (станционные) и имитирующие помехи.

## 1. Действие помех на систему приема и регенерацию символов

Сигналы с расширением спектра формируются за счет фазовой модуляции расширяющей последовательностью. Практические схемы приема таких сигналов используют, как правило, подсистемы регенерации символов с последующей согласованной (корреляционной) обработкой регенерированной последовательности.

### 1.1. Шумовая помеха

Вероятность ошибки приема (регенерации) символа сигнала в условиях действия шумовой помехи известна и равна [1–4]

$$p_{\text{ош}} = p(s_0)p(s_1 | s_0) + p(s_1)p(s_0 | s_1) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \sqrt{\frac{Q}{2N}}(1 - \rho) \right) \right], \quad (1)$$

где  $\rho$  — коэффициент взаимной корреляции сигналов, которыми передаются противоположные символы; в рассматриваемом случае оптимальных противоположных сигналов  $\rho = -1$ ;  $Q$  — энергия сигнала —  $Q = P_{\text{сг}}$ ;  $N$  — суммарная спектральная

плотность шума приемника и организованной помехи;  $\Phi(x)$  — интеграл вероятности в форме

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz. \quad (2)$$

В популярных пакетах программ для математических вычислений интеграл вероятностей именуется  $\Phi(x) = \text{erf}(x)$ .

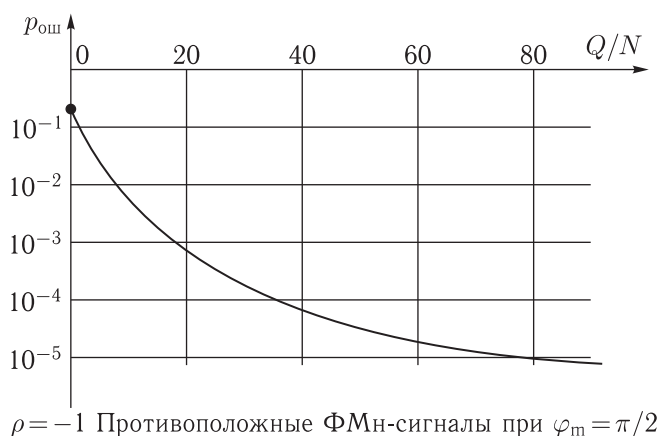


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум

Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум представлена на рис. 1 [1].

### 1.2. Синусоидальная помеха

Синусоидальная (узкополосная, станционная) помеха с уровнем, не приводящим к срыву синхронизма в подсистемах слежения за несущей и тактовой частотами, вызовет флуктуации фазы принимаемого и обрабатываемого сигнала. При таком помеховом воздействии на входе демодулятора приемника широкополосного сигнала наблюдается колебание:

$$x(t) = s(t) + u_{\text{п}}(t) + n(t) = a_{\text{с}} \cos[\omega_{\text{с}} t + g(t) \cos \varphi_{\text{м}} + \varphi_0] + a_{\text{п}} \cos \omega_{\text{п}} t + n(t), \quad (3)$$

где  $s(t)$  — полезный сигнал;  $u_{\text{п}}(t)$  — узкополосная помеха, вероятно и со скользящей частотой;  $n(t)$  — аддитивный шум;  $\omega_{\text{с}}$  — частота несущей сигнала;  $\omega_{\text{п}}$  — частота помехи;  $g(t) = \pm 1$  — модулирующая

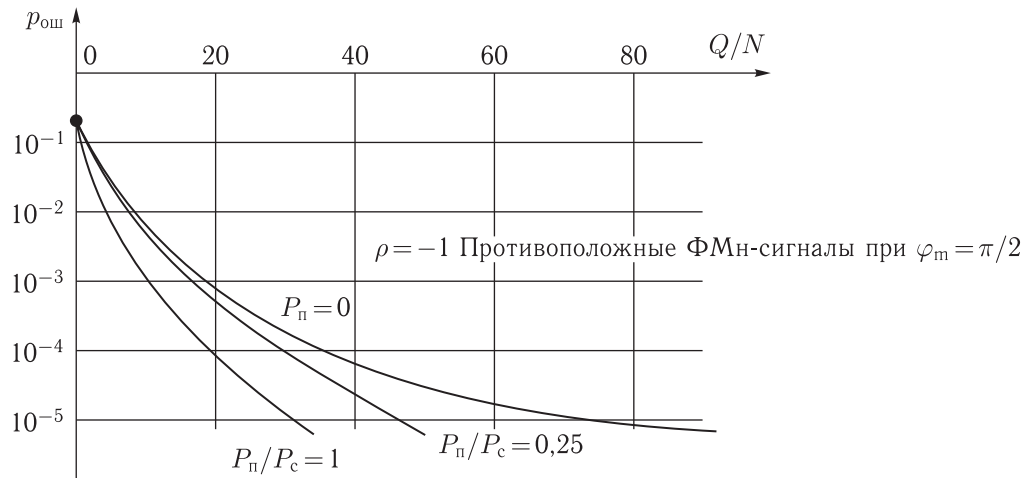


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки от соотношения сигнал/шум при наличии узкополосной помехи

функция сигнала;  $\varphi_m$  — индекс фазовой модуляции сигнала, расширяющей спектр последовательностью  $g(t)$ .

При этом на выходе демодулятора

$$\xi_c = \pm u_c + u_n \cos \psi + n'(t) = \pm u_c + \xi(t),$$

где  $\psi(t) = (\omega_c - \omega_n)t + \varphi_n$  — случайная фаза помехового колебания, равномерно распределенная на сегменте  $\pm\pi$ .

Вероятность ошибки компаратора, принимающего решения по каждому принятому символу в соответствии с правилом

$$g^* = \begin{cases} +1, & \text{если } \xi_c \geq 0; \\ -1, & \text{если } \xi_c < 0. \end{cases} \quad (4)$$

В среднем по множеству символов составит

$$\langle p_{\text{ош}} \rangle = \left\langle \Phi \left( \frac{u_c + u_n \cos \psi}{\sigma} \right) \right\rangle, \quad (5)$$

где  $\Phi(\cdot)$  — интеграл вероятностей;  $\sigma$  — с.к.о. шума; угловые скобки означают усреднение по множеству.

Численное интегрирование и результат усреднения в (5) позволяет дополнить приведенные на рис. 1 графики зависимости вероятности ошибок для ситуаций, когда наряду с аддитивными шумами на демодулятор действует узкополосная помеха рис. 2.

### 1.3. Имитирующая помеха

При действии имитирующей помехи сигнал на выходе интегратора корреляционного приемника составит

$$\xi_c = \pm u_c + \int_0^{\tau_n} u_n g_n(t) \cos \psi(t) dt + \int_0^{\tau_n} n(t) dt, \quad (6)$$

где  $g_n(t) = \pm 1$  — модулирующая функция сигнала-подобной помехи;  $\tau_n$  — длительность символа полезного сигнала.

Искажение принятого сигнала помехой будет наиболее сильным в том случае, когда помеха в наибольшей степени совпадает по параметрам с подавляемым сигналом. Прежде всего — по длительности символа и несущей частоте. При этом  $\psi(t)$  в (6) равна нулю,  $\cos \psi(t) = 1$  и вероятность ошибки приема каждого символа сигнала будет максимальной. Но помеха не может быть синхронизована с подавляемым сигналом по моментам начала и конца каждого символа в точке приема. Временной сдвиг начала каждого символа сигнала-подобной помехи относительно начала интегрирования (момента  $t = 0$  в (2)) случаен и равновероятен на сегменте  $\tau \in [1; \tau_n]$ . Поэтому среднее значение помеховой составляющей в (2) составит

$$\pm u_n \int_0^{\tau_n} (\tau_n - 2\tau) \frac{1}{\tau_n} d\tau = 0, \quad (7)$$

а дисперсия этой составляющей соответственно

$$u_{\pi}^2 \int_0^{\tau_{\pi}} (\tau_{\pi} - 2\tau)^2 \frac{1}{\tau_{\pi}} d\tau = \frac{u_{\pi}^2 \tau_{\pi}^2}{3} = P_{\pi} \frac{\tau_{\pi}^2}{6} = \frac{2}{3} P_{\pi} \frac{1}{\Delta f_c^2}, \quad (8)$$

где  $\Delta f_c = \frac{2}{\tau_c}$  — ширина спектра сигнала (и сигнала подобной помехи);  $P_{\pi}$  — мощность помехи в точке приема.

Таким образом, действие имитирующей помехи эквивалентно действию аддитивного шума со спектральной плотностью  $N_{\pi} = \frac{2}{3} \frac{P_{\pi}}{\Delta f_c}$  и, следовательно, с достаточной степенью подробности описывается зависимостью рис. 1.

## 2. Действие помех на систему синхронизации

### 2.1. Синусоидальная помеха

Скользящая по частоте узкополосная (в пределе — синусоидальная) помеха, попав в полосу захвата системы ФАП по несущей, может вызвать ложный захват и, перестраиваясь по частоте, увести частоту гетеродина, вызвав срыв синхронизации. Это, естественно, сорвет и демодуляцию сигнала.

Считается [1], что для системы ФАП порядка второго и выше время вхождения в синхронизм определяется приближенным соотношением

$$t_{\text{захв}} \simeq \alpha \frac{(\Delta f_p)^2}{(\Delta f_{\text{ш}})^3}, \quad (9)$$

где  $\Delta f_p$  — расстройка по частоте;  $\Delta f_{\text{ш}}$  — шумовая полоса системы ФАП;  $\alpha = 4 \dots 5$  — коэффициент, зависящий от передаточной функции контура системы ФАП.

Очевидно, что с наибольшей вероятностью захват системы ФАП произойдет при расстройке частоты помехи, близкой к величине шумовой полосы. Поэтому можно считать, что время захвата составит  $t_{\text{захв}} \simeq \frac{3 \dots 4}{\Delta f_{\text{ш}}}$  и в течение этого времени скользящая по частоте помеха будет присутствовать в полосе захвата системы ФАП. Следовательно, скорость перестройки частоты скользящей помехи, максимизирующая вероятность ложного захвата и срыв

синхронизации за счет увода частоты опорного колебания, должна быть не больше чем

$$\frac{\partial f}{\partial t} \sim \frac{\Delta f_{\text{ш}}}{t_{\text{захв}}} = (0,25 \dots 0,30) (\Delta f_{\text{ш}})^2, \quad (10)$$

что согласуется с данными, приведенными в [1].

При большей скорости перестройки вероятность захвата частоты помехового колебания и срыва синхронизации должна уменьшаться.

Другим фактором, влияющим на вероятность успеха деструктивного воздействия уводящей по частоте помехи на систему синхронизации, является мощность помехи. Захват частоты помехи наиболее вероятен в случае превышения мощности помехи над мощностью несущей сигнала  $P_{\pi} > P_c$ .

Точно определить вероятность срыва синхронизации скользящей помехой довольно сложно в силу неизвестности многих параметров, определяющих структуру систему приема и обработки сигнала. Основательные результаты можно получить только экспериментально. Но можно качественно иллюстрировать приведенные выше рассуждения о зависимости вероятности срыва системы синхронизации графиком рис. 3.

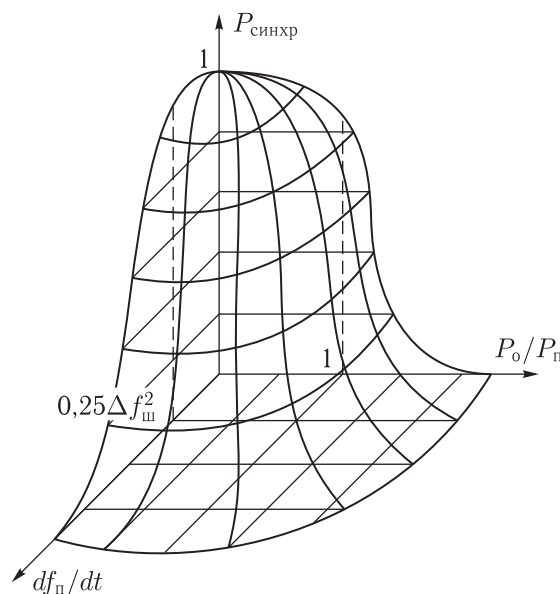


Рис. 3. Качественная зависимость вероятности срыва синхронизации скользящей по частоте узкополосной помехой

## 2.2. Шумовая помеха

Обычно считается [2], что синхронизм в системе ФАП возможен, если соотношение сигнал/шум в полосе ФАП не хуже 5–10 по мощности. Значит, условие срыва сопровождения при слежении за несущей принимаемого сигнала представляется в виде

$$(N_{\text{шп}} + N_{\text{ш}}) \Delta f_{\text{ш}} > 5, \quad (11)$$

где  $N_{\text{шп}}$  — спектральная плотность шумовой помехи, а  $N_{\text{ш}}$  — спектральная плотность;  $\Delta f_{\text{ш}}$  — как и прежде, шумовая полоса системы ФАП.

Поскольку мощность организованной шумовой помехи, скорее всего, превосходит мощность собственных шумов приемника, влиянием спектральной плотности  $N_{\text{ш}}$  можно пренебречь. Тогда приведенная ко входу приемника мощность организованной в ходе радиоэлектронного противодействия шумовой помехой, согласованной с полезным сигналом по ширине спектра, должна для срыва синхронизма иметь мощность

$$P_{\text{п}} > 5 \frac{\Delta f_{\text{с}}}{\Delta f_{\text{ш}}} \quad (12)$$

тем большую, чем шире спектр подавляемого сигнала.

## 2.3. Имитирующая помеха

Имитирующая помеха, даже согласованная с сигналом по ширине спектра, не может быть

когерентной сигналу в точке приема. Поэтому она будет помехой для системы ФАП постольку, поскольку накрывает шумовую полосу. Используя то же условие о соотношении сигнал/шум порядка 5–10 по мощности, можно утверждать, что мощность имитирующей помехи на входе приемника должна также составлять  $P_{\text{п}} > 5 \frac{\Delta f_{\text{с}}}{\Delta f_{\text{ш}}}$ . Это позволяет сделать вывод о том, что имитирующая, сигналоподобная приеха, которая традиционно считается самой опасной и поэтому предпочтительной для организации радиоэлектронного противодействия, в случае сигнала с расширением спектра не опаснее шумовой.

## Список литературы

1. Витерби Э.Д. Принципы когерентной связи. М.: Сов. радио, 1970. 392 с.
2. Куприянов А.И., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. М.: Вузовская книга, 2011. 800 с.
3. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи. Основы теории и принципы реализации. М.: Наука, 2009. 358 с.
4. Помехозащищенность систем со сложными сигналами / Под ред. Г.И. Тузова. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.