

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИСКАЖЕНИЙ НА ДОСТОВЕРНОСТЬ КОГЕРЕНТНОГО ПРИЕМА ДИСКРЕТНЫХ СООБЩЕНИЙ

А.В. Краснокутский, О.Г. Пикалов  
(представил д.т.н., проф. В.И. Долгов)

Впервые получены формульные соотношения для показателя достоверности приема дискретных сообщений - вероятности ошибки когерентного приема в условиях аппаратурных искажений, сосредоточенных помех, релейских замираний.

Одним из наиболее важных требований, предъявляемых к системам радиосвязи, является достоверность передаваемой от источника сообщения к получателю информации. Выполнению этого требования неизбежно препятствуют ошибки, вызванные искажениями сигналов при прохождении их по реальным каналам связи. Основными причинами искажения сигналов являются: отклонение параметров аппаратуры от номинальных значений и наличие аддитивных и мультипликативных помех в непрерывном канале. Известные [1] исследования помехоустойчивости когерентного приема дискретных сообщений выполнены в предположении идеальности аппаратуры связи. Анализ комплексного влияния аппаратурных искажений и различного рода помех на верность приема информации выполнен только для систем некогерентного приема [2].

Пусть передающее устройство формирует два варианта сигнала  $S_{rн}(t), r = 1, 2$ , форма которого, в общем случае, несколько отличается от формы эталонного (опорного) сигнала  $S_{rэ}(t)$  вследствие неидеальности передающего тракта и наличия аппаратурных искажений сигнала.

Тогда поступающая на вход приемного устройства сумма полезного сигнала и помех представляется в виде:

$$S_{вх}(t) = \mu_c S_{rн}(t, \varphi_c) + \mu_n S_n(t, \varphi_n) + \xi(t), \quad 0 < t < T, \quad (1)$$

где  $\mu_c$  и  $\mu_n$  - коэффициенты передачи по каналу сигнала и помехи, соответственно;  $\varphi_c$  и  $\varphi_n$  - начальные фазы высокочастотного заполнения сигнала и помехи, соответственно;  $S_{rн}(t)$  и  $S_n(t)$  - функции времени, определяющие формы соответственно  $r$ -го варианта искаженного сигнала и сосредоточенной помехи;  $T$  - длительность элемента сигнала;  $\xi(t)$  - аддитивная помеха типа белого гауссовского шума.

Полная вероятность ошибочного приема элемента сигнала может быть представлена в виде

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \iiint\limits_{G(\mu_c, \varphi_c, \mu_n, \varphi_n)} W(\mu_c, \varphi_c, \mu_n, \varphi_n) \{ P[x_1 < x_2 | S_1(t), \mu_c, \varphi_c, \mu_n, \varphi_n] + P[x_1 > x_2 | S_2(t), \mu_c, \varphi_c, \mu_n, \varphi_n] \} d\mu_c d\varphi_c d\mu_n d\varphi_n, \quad (2)$$

где  $W(\mu_c, \varphi_c, \mu_n, \varphi_n)$  - совместная плотность вероятности параметров сигнала и сосредоточенной помехи;  $G(\mu_c, \varphi_c, \mu_n, \varphi_n)$  - область интегрирования, определяемая пределами изменения параметров  $\mu_c, \varphi_c, \mu_n, \varphi_n$ ;  $P[x_1 < x_2 | S_1(t)]$  и  $P[x_1 > x_2 | S_2(t)]$  - вероятности ошибочного приема элемента сигнала при наличии сосредоточенной помехи и при передаче, соответственно,  $S_1(t)$  и  $S_2(t)$ , вычисленные в предположении постоянства их параметров.

Рассчитанная вероятность ошибки когерентного поэлементного приема искаженного сигнала в условиях сосредоточенной помехи, отсутствия замираний сигнала и помехи ( $\varphi_c = \text{const}$ ,  $\varphi_n = \text{const}$ ) и равномерного распределения  $\varphi_c$  и  $\varphi_n$  имеет вид следующего выражения:

$$P_{\text{ош}} = \exp\left(-\frac{\gamma^2 h^2 \lambda^2}{4}\right) \sum_{k=0}^{\infty} \varepsilon_k (-1)^k I_k\left(\frac{\gamma^2 h^2 \lambda^2}{4}\right) \times \times \frac{\gamma}{\sqrt{2\pi}} \frac{h}{\pi} \int_{-\infty}^0 \exp\left[-\frac{\gamma^2 h^2}{2}(u-q)^2\right] I_{2k}\left[\gamma^2 h^2 \lambda(u-q)\right] du. \quad (3)$$

Здесь коэффициенты

$$q = \frac{\mu_c}{P_c T} \int_0^T S_{r_3}(t) S_{r_n}(t) dt - \quad (4)$$

корреляции эталонных и искаженных сигналов,

$$\lambda = \frac{\mu_c \mu_n}{P_c T} \sqrt{\left[ \int_0^T S_{r_3}(t) S_n(t) dt \right]^2 + \left[ \int_0^T S_{r_3}(t) \tilde{S}_n(t) dt \right]^2} - \quad (5)$$

корреляции эталонных сигналов и помех характеризуют степень влияния, соответственно аппаратурных искажений и помех в канале на вероятность ошибки.  $\tilde{S}_n(t)$  - функция, сопряженная по Гильберту с  $S_n(t)$ ;

$P_c = \frac{\mu_c^2}{T} \int_0^T S_{r_3}^2(t) dt$  - мощность эталонного сигнала,  $h^2$  - отношение энергии сигнала к спектральной плотности флюктуационного шума;  $I_k(\alpha)$  -

модифицированная функция Бесселя  $k$  - порядка;  $\epsilon_k = 1$  при  $k = 0$  и  $\epsilon_k = 0$  при  $k = 1, 2, 3, \dots$ ;  $\gamma^2 = 1$ , если  $\int_0^T S_{1\gamma}(t)S_{2\gamma}(t)dt = 0$  (ортогональные сигналы) и  $\gamma^2 = 2$ , если  $S_{1\gamma}(t) = -S_{2\gamma}(t)$  (противоположные сигналы).

В частном случае отсутствия аппаратных искажений ( $q = 1$ ) и воздействия помех на полезный сигнал ( $\lambda = 0$ ) из выражения (3) следует известная в теории передачи сообщений формула [3]

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2} [1 - \Phi(\gamma h)]. \quad (6)$$

Таким образом, рассмотрен вопрос о помехоустойчивости систем когерентного приема для случая, когда параметры сигнала и помехи постоянны.

Однако на реальных линиях радиосвязи как полезный сигнал, так и сигналы мешающих станций зачастую подвержены замираниям. При этом коэффициенты передачи  $\mu_c$  и  $\mu_n$  и начальной фазы  $\Phi_c, \Phi_n$  изменяются с течением времени и являются в месте приема в той или иной степени неопределенными.

Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в большем числе случаев коэффициенты передачи  $\mu_c$  и  $\mu_n$  являются случайными величинами с релеевскими:

$$W(\mu) = \frac{2\mu}{-2} \exp\left(-\frac{2\mu^2}{-2}\right), \quad (7)$$

либо райсовскими распределениями:

$$W(\mu) = \frac{2\mu}{\mu_\Phi} \exp\left(-\frac{\mu^2 + \mu_p^2}{\mu_\Phi}\right) I_0\left(2\frac{\mu\mu_p}{\mu_\Phi}\right), \quad (8)$$

где  $\bar{\mu}$  - среднестатистические значения  $\mu$ ;  $\mu_\Phi$  и  $\mu_p$  - соответственно флуктуирующие и регулярные составляющие коэффициентов передачи. Кроме того, замирания сигналов в обычных условиях приема (отсутствие ионосферных возмущений, оптимальные рабочие частоты и т.д.) происходят достаточно медленно, так что на протяжении многих элементов сигнала  $\mu_c$  и  $\Phi_c$  практически не изменяются.

С другой стороны, распределение (7) для коэффициентов передачи является наименее благоприятным, так как известно, что из всех реально возможных случаев именно релеевские замирания сигналов и помех приводят к наибольшим энергетическим потерям в системах связи. Что

же касается  $\Phi_n$ , то по-прежнему полагаем ее значения неизвестными в точке приема и равномерно распределенными в интервале  $[0, 2\pi]$ . Для случая замирающей по закону (7) помехи и незамирающего сигнала выражение для вероятности ошибки получаем усреднением (1) по  $\mu_n$ :

$$P_{\text{ош}}^{(n)} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{\gamma h q}{\sqrt{1 + \gamma^2 h^2 \bar{\lambda}^2 / 2}} \right) \right], \quad (9)$$

где  $\Phi(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\alpha \exp(-x^2/2) dx$  - функция Крампа;  $\bar{\lambda}^2$  - среднестатистическое значение  $\lambda^2$ .

При замирающих по закону (7) сигнале и помехе усреднением по  $\mu_c$  выражения (9) получаем следующую вероятность ошибки

$$P_{\text{ош}}^{(cn)} = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\gamma^2 h^2 \bar{q}^2}{2 + \gamma^2 h^2 \bar{\lambda}^2 + \gamma^2 h^2 \bar{q}^2}} \right), \quad (10)$$

где  $\bar{q}$  и  $\bar{\lambda}^2$  - среднестатистические значения величин  $q$  и  $\lambda^2$ .

В полученных выражениях для вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}$  учитывается комплексное влияние аппаратурных искажений и различного рода помех в канале на достоверность когерентного приема дискретных сообщений.

Как видно из рис.1, системы когерентного приема очень чувствительны к воздействию помех. Наличие незначительных внешних помех ( $\lambda^2 = 0.1$ ) приводит к снижению достоверности приема в 5-7 раз. Отклонение параметров аппаратуры от номинальных так же ведет к росту  $P_{\text{ош}}$ . Как следует из рис.2, при отклонение параметров аппаратуры даже в пределах допусков ( $q = 0.9$ ) вероятность ошибки  $P_{\text{ош}}$  увеличивается в 1.2-1.4 раза.

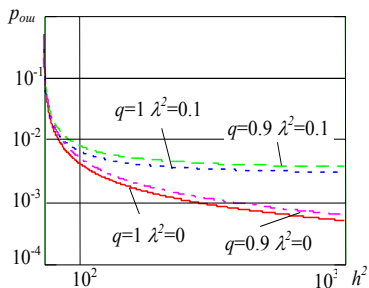


Рис.1.

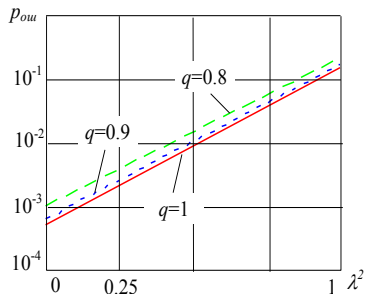


Рис.2.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Витерби Э.Д. Принципы когерентной связи. - М.: Сов. радио, 1970. - 392 с.

2. Федоренко В.В., Будко П.А. Помехоустойчивость некогерентного приема искаженных в аппаратуре сигналов при воздействии сосредоточенной помехи // Радиоэлектроника. - 1997. - №3. - С.69-73 (Изв. высш. учеб. заведений).

3. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. - М.: Сов. радио, 1970. - 728 с.