УДК 621.396.235

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ НЕКОГЕРЕНТНОГО СТРОЕННОГО ПРИЕМА В КАНАЛАХ СВЯЗИ С РЭЛЕЕВСКИМИ ЗАМИРАНИЯМИ

М.Э. Солчатов, к.т.н. А.А. Смирнов, В.А. Миронов
(представил проф. В.П. Пашинцев)

Получено аналитическое выражение для оценки вероятности ошибки некогерентного приема сигналов в канале связи при использовании строенного приема с различной степенью корреляции в ветвях разнесения в условиях рэлеевских замираний.

Известно [1], что замирания в радиоканалах приводят к снижению помехоустойчивости приема сигналов. Для уменьшения влияния замираний широко применяется разнесенный прием. При этом расчет помехоустойчивости, т. е. зависимости вероятности ошибочного приема сигналов ($\mathbf{P_{ош}}$) от отношения сигнал/шум ($\mathbf{h^2}$), в каналах связи с рэлеевскими замираниями для **n** – кратного разнесения ветвей с некогерентной обработкой производится по формуле [1, 2]:

$$\mathbf{P_{ош}} = \sum_{k=1}^{n} \frac{\lambda_k^{2(n-1)}}{\lambda_k + 2} \prod_{\substack{p=1 \\ p\neq k}}^{n} \frac{\lambda_p + 1}{(\lambda_k - \lambda_p)(\lambda_k + \lambda_p + \lambda_k\lambda_p)}, \qquad (1)$$

где λ_i - собственные значения корреляционной матрицы **KQ** ($\mathbf{i = \overline{1,n}}$).

Ввиду сложности аналитического представления (1), расчет $\mathbf{P_{ош}}$ для $\mathbf{n > 2}$ производится численными методами. Только для одного частного случая сдвоенного приема ($\mathbf{n = 2}$) формула (1) преобразуется к аналитическому виду

$$\mathbf{P_{ош}} = \frac{3h^2(1-R^2)+4}{\left[h^4(1-R^2)+4h^2+4\right]\left[h^2(1-R^2)+2\right]}, \qquad (2)$$

где $\mathbf{h^2}$ – отношение средней энергии сигнала к спектральной плотности шума, а **R** – коэффициент взаимной корреляции замираний в ветвях разнесения.

В каналах связи с повышенными требованиями к помехоустойчивости применяют строенный прием (т. е. **n**=3). Однако аналитическое выражение для расчета $\mathbf{P_{ош}}$ в таких каналах связи отсутствует.

Целью статьи является получение аналитического выражения для расчета вероятности ошибки некогерентного строенного приема ($\mathbf{n = 3}$) при наличии рэлеевских замираний и их взаимной корреляции в ветвях разнесения.

Для достижения поставленной цели используем известную [1] методику матричного исчисления для оценки $\mathbf{P_{ош}}$. Для случая строенного приема корреляционная матрица **KQ** сводится к виду

$$\mathbf{KQ = h^2 \begin{bmatrix} 1 & \dot{R}_{12} & \dot{R}_{13} \\ \dot{R}^*_{21} & 1 & \dot{R}_{23} \\ \dot{R}^*_{31} & \dot{R}^*_{32} & 1 \end{bmatrix}}, \tag{3}$$

где $\mathbf{\dot{R}_{ij}}$ – комплексные коэффициенты корреляции между соответствующими ветвями разнесения.

Для действительных значений $\mathbf{\dot{R}_{ij}}$ [1] будем иметь $\mathbf{R_{12}=R_{21}=R_1}$, $\mathbf{R_{32}=R_{23}=R_2}$, $\mathbf{R_{13}=R_{31}=R_3}$. На рис.1 схематически представлено расположение антенн ветвей разнесения с различными коэффициентами корреляции между ними.

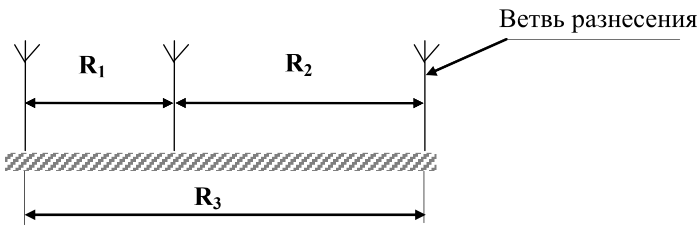

Рис. 1. Схематическое расположение ветвей разнесения с различными коэффициентами корреляции

Собственные значения λ_i матрицы (3) рассчитываются из определителя

$$\mathbf{\det(KQ - \lambda I) = \begin{vmatrix} h^2-\lambda & R_1 & R_3 \\ R_1 & h^2-\lambda & R_2 \\ R_3 & R_2 & h^2-\lambda \end{vmatrix} =}$$

$$\mathbf{= (h^2-\lambda)^3 - h^2(h^2-\lambda)(R_1^2+R_2^2+R_3^2) + 2h^6R_1R_2R_3 = 0,}$$

где **I** – единичная диагональная матрица.

Решая это кубическое уравнение относительно λ, получим искомые собственные значения матрицы (3):

$$\lambda_1 = h^2 + 2r\cos(\varphi/3); \quad \lambda_2 = h^2 - 2r\cos[(\pi-\varphi)/3];$$
$$\lambda_3 = h^2 - 2r\cos[(\pi+\varphi)/3], \tag{4}$$

где

$$r = \frac{h^2}{\sqrt{3}}\sqrt{R_1^2 + R_2^2 + R_3^2}\,; \quad \varphi = \arccos\left\lfloor \frac{3\sqrt{3}(R_1R_2R_3)}{\sqrt{(R_1^2+R_2^2+R_3^2)^3}} \right\rfloor.$$

После подстановки в формулу (1) значений λ_i (4) при $n = 3$ получим искомое аналитическое выражение для вероятности ошибки строенного приема при наличии рэлеевских замираний с учетом взаимной корреляции в ветвях разнесения

$$P_{ош} = \frac{\lambda_1^4(\lambda_2+1)(\lambda_3+1)}{(\lambda_1+2)ab} - \frac{\lambda_2^4(\lambda_1+1)(\lambda_3+1)}{(\lambda_2+2)ac} + \frac{\lambda_3^4(\lambda_1+1)(\lambda_2+1)}{(\lambda_3+2)cb}, \tag{5}$$

где $a = (\lambda_1-\lambda_2)(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_1\lambda_2)$; $b = (\lambda_1-\lambda_3)(\lambda_1+\lambda_3+\lambda_1\lambda_3)$;
$c = (\lambda_2-\lambda_3)(\lambda_2+\lambda_3+\lambda_2\lambda_3)$.

Достоверность полученного выражения (5) подтверждается тем, что при переходе к сдвоенному приему (когда согласно рис.1 $R_1 = R$, $R_2 = 0$, $R_3 = 0$) собственные значения (4) принимают вид $\lambda_1 = h^2(1 + R)$; $\lambda_2 = h^2(1 - R)$, а $\lambda_3 = 0$, поскольку матрица (3) будет иметь квадратичную форму. При этом аналитическое выражение для вероятности ошибки (5) сводится к известному виду (2).

На рис. 2 приведены известные [1, 2] графики зависимости $P_{ош}(h^2)$ при различной корреляции замираний в ветвях разнесения, построенные численным методом расчета по формуле (1) для $n = 3$ в частном случае $R_1 = R_2 = R_3 = R$. Сравнение рис.2 с представленными на рис. 3 результатами аналитического расчета по формуле (5) при тех же значениях R указывает на незначительные (<5 %) отклонения этих графиков в области малых значений $P_{ош}$ (обусловленных ограничением точности проведенных в [1, 2] численных расчетов)

Анализ графиков рис. 3 показывает, что выигрыш от применения строенного приема (в отличие от сдвоенного) более существенно зависит от степени корреляции в ветвях разнесения. Так, при изменении R от 0.99 до 0.6 при $h^2 = 100$ вероятность ошибочного приема возрастает на два порядка: от $P_{ош} \approx 10^{-5}$ до $P_{ош} \approx 10^{-3}$. Однако, в пределах изменения R от 0 до 0.6 значение $P_{ош}$ меняется незначительно. Таким образом, наличие корреляции заметно влияет на эффективность строенного приема при $R > 0.5 - 0.6$. Для сдвоенного приема наличие корреляции заметно влияет на эффективность только при $R > 0.7 - 0.8$ [3]. Полученные результаты показывают, что уменьшение коэффициента корреляции до $R < 0.5 - 0.6$ при $n = 3$ путем существенного увеличения пространственного разнесения антенн или частотного разноса не может дать заметного выигрыша.

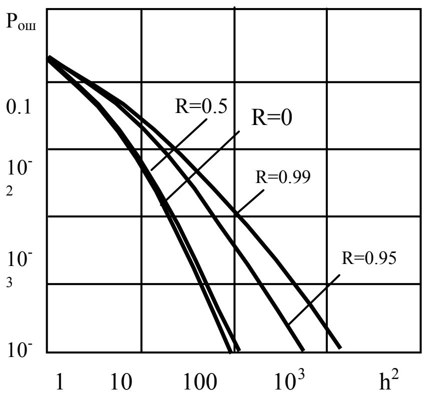

Рис. 2. Численный расчет

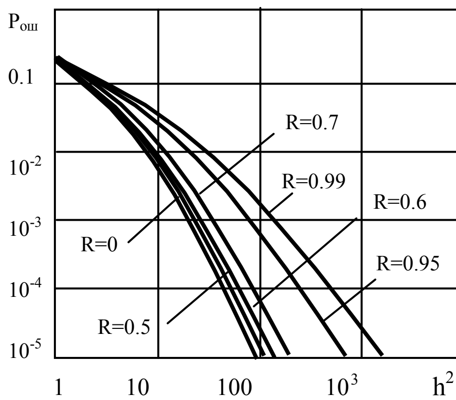

Рис. 3. Аналитический расчет

Таким образом, получено аналитическое выражение (5) для расчета помехоустойчивости некогерентного приема сигналов при использовании строенного приема с различной степенью корреляции в ветвях разнесения в условиях рэлеевских замираний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андронов И.С., Финк Л.М. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. – М.: Сов. радио, 1971. – 345 с.
2. Коржик В.И., Финк Л.М., Щелкунов К.Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.
3. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. – М.: Сов. радио, 1970. – 727 с.

Поступила в редколлегию 21.03.2001