УДК 621.396.62.089.52

С.В. Мелихов, В.А. Кологривов

Оценка чувствительности радиоприемников с настроенными антеннами

Получены выражения для оценки чувствительности радиоприемников с настроенными антеннами при учете собственных и внешних шумов, характеризуемых коэффициентами шума

Введение

В современных литературных источниках внешние для радиоприемника шумы характеризуют зависящими от частоты коэффициентами шума [1, 2]. Однако расчетные соотношения для оценки чувствительности приемников с учетом собственных и внешних шумов или не приводятся [1], или ошибочны [2].

Целью данной работы является вывод расчетных соотношений для оценки чувствительности радиоприемников с настроенными антеннами с учетом собственных и внешних шумов, характеризуемых коэффициентами шума.

1. Оценка чувствительности приемника при аналоговой связи

Чувствительность приемника характеризует его возможность принимать слабые радиосигналы.

Реальная чувствительность приемника при аналоговой связи — это минимально допустимое значение мощности радиосигнала на входе приемника $P_{\text{с.вх0}}$ (либо минимально допустимое эффективное значение ЭДС радиосигнала в антенне $E_{\text{с}}$, либо минимально допустимое эффективное значение напряженности электромагнитного поля радиосигнала в точке приема $\varepsilon_{\text{с}}$), при котором на выходе приемника в исполнительном устройстве (ИУ) обеспечивается заданное отношение средней мощности сигнала S к средней мощности шума N ($\gamma_{\text{вых}} = S/N = SNR$, SNR — Signal to Noise Ratio) [3, 4].

Параметр SNR характеризует качество приема при аналоговой связи.

При малых потерях в фидере, подводящим сигнал от антенны ко входу радиотракта (РТ) приемника (ко входной цепи), или при отсутствии фидера (когда согласованная антенна подключается непосредственно ко входу приемника, имеющему в режиме согласования входное сопротивление $R_{\text{вх}}$) значения $\varepsilon_{\text{с}}$, $E_{\text{с}}$, $P_{\text{с.вх0}}$ связаны между собой следующим образом:

$$P_{\text{с.вх0}} = \left(\frac{E_{\text{с}}}{2}\right)^2 \frac{1}{R_{\text{вх}}} = \frac{E_{\text{с}}^2}{4R_{\text{вх}}}, \quad E_{\text{с}} = \varepsilon_{\text{с}} h_{\text{д}}. \tag{1}$$

Если приемники имеют настроенные антенны, что характерно, например, для приемников мобильных систем связи, то их чувствительность оценивают параметром $P_{\text{с.вх0}}$ [5].

Реальная чувствительность $P_{\text{с.вх0}}$ зависит от уровня собственных шумов приемника; от уровня внешних шумов (помех); от величины потерь в фидере приемника; от полосы пропускания РТ приемника, от величины $\gamma_{\text{вых}}$. Заметим, что коэффициент усиления приемника должен быть достаточным для того, чтобы увеличить принятую мощность $P_{\text{с.вх0}}$ до величины, при которой нормально работает ИУ приемника.

При выводе формулы для оценки чувствительности приемника удобно привести мощность полезного сигнала и все шумовые мощности к выходу РТ (к точке «а», рис. 1).

Поскольку отношение сигнал/шум на выходе детектора $\gamma_{\text{вых Д}} \approx \gamma_{\text{вых}}$ (УНЧ практически не ухудшает отношение сигнал/шум), то значение $\gamma_{\text{вых РТ}} \approx \gamma_{\text{вх Д}}$ можно найти для диодного амплитудного детектора (АД) и диодного частотного детектора (ЧД), используя следующие формулы, определяющие изменение отношения сигнал /шум при детектировании [3]:

$$\gamma_{\text{вх АД}} \approx \frac{\gamma_{\text{вых АД}}}{m_{\text{ср}}}; \tag{2}$$

$$\gamma_{\text{вх ЧД}} \approx \frac{\gamma_{\text{вых ЧД}}}{\sqrt{3M_{\text{ЧМ}}^3}}, \tag{3}$$

где $m_{\text{ср}} \approx 0{,}3$ — средняя величина индекса модуляции АМ сигнала; $M_{\text{ЧМ}} = f_{\text{д max}} / F_{\text{в}}$ — индекс частотной модуляции.

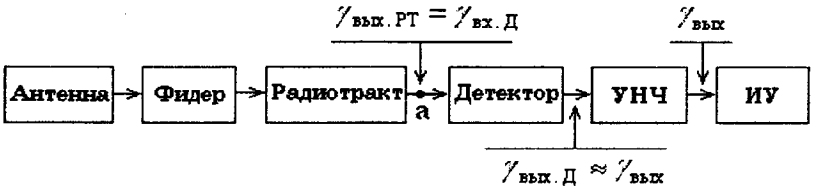

Рис. 1 — Структурная схема приемника

При гетеродинном (синхронном или асинхронном) детектировании (ГД)

$$\gamma_{\text{вх ГД}} \approx \gamma_{\text{вых ГД}}. \tag{4}$$

Собственные шумы радиотракта (РТ) приемника характеризуют коэффициентом шума $N_{\text{пр}}$. Мощность шумов РТ, приведенная к выходу РТ (к точке «а», см. рис. 1) [3, 4]:

$$P_{\text{ш РТ}} = k_{\text{РТ}} P_{\text{ш0}} (N_{\text{пр}} - 1), \tag{5}$$

где $k_{\text{РТ}}$ — коэффициент усиления по мощности РТ приемника; $P_{\text{ш0}} = kT_0 B_{\text{ш}}$ — номинальная мощность теплового шума (мощность, поступающая от шумящего сопротивления $R_{\text{ш}}$ в согласованную нагрузку $R = R_{\text{ш}}$; величина $P_{\text{ш0}}$ не зависит от $R_{\text{ш}}$); $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; $T_0 = 290$ К (считается, что комнатная температура 17 °С); $B_{\text{ш}} \approx 1{,}1 B_{RF}$ — шумовая полоса приемника, Гц; B_{RF} — полоса пропускания приемника для сигнала на радиочастоте (Radio Friqency).

Коэффициент шума фидера как пассивного устройства (при согласовании его входа с антенной, а выхода — со входом РТ) равен его потерям $N_{\Phi} = \eta_n = 1/k_{\Phi}$, где k_{Φ} — коэффициент передачи фидера по мощности. Тогда мощность собственных шумов фидера, приведенная к выходу РТ:

$$P_{\text{шФ}} = k_{\text{РТ}} k_{\Phi} P_{\text{ш0}} (\eta_{\text{п}} - 1) = k_{\text{РТ}} k_{\Phi} P_{\text{ш0}} \left(\frac{1}{k_{\Phi}} - 1 \right). \tag{6}$$

Мощность внешних шумов, приведенная к выходу РТ при условии пренебрежения шумами от сопротивления потерь антенны ($R_{\text{пот}} \approx 0$):

$$P_{\text{ш. внеш}} = k_{\text{РТ}} k_{\Phi} P_{\text{ш0}} \frac{\sum T_i}{T_0} = k_{\text{РТ}} k_{\Phi} P_{\text{ш0}} (N_{\Sigma} - 1), \tag{7}$$

где $\sum T_i = (T_{\text{атм}} + T_{\text{пром}} + T_{\text{гал}} + T_{\text{зем}})$ — суммарная температура внешнего шума; $T_{\text{атм}}$ — температура атмосферного шума; $T_{\text{пром}}$ — температура промышленного шума; $T_{\text{гал}}$ — температура галактического шума; $T_{\text{зем}}$ — температура теплового шума Земли (для слабо направленной приемной антенны принимают $T_{\text{зем}} \approx T_0 = 2{,}9 \cdot 10^2$ К);

$$N_{\Sigma} = 1 + \sum T_i / T_0 — \tag{8}$$

результирующий коэффициент внешнего шума.

Атмосферные (грозовые) и промышленные помехи носят импульсный характер, а интенсивность их спектральных составляющих имеет падающий характер с повышением частоты (рис. 2). Однако в пределах полосы приемника интенсивность спектральных составляющих импульсных помех можно считать постоянной. Поэтому импульсные атмосферные (грозовые) и промышленные помехи называют *атмосферными и промышленными шумами*.

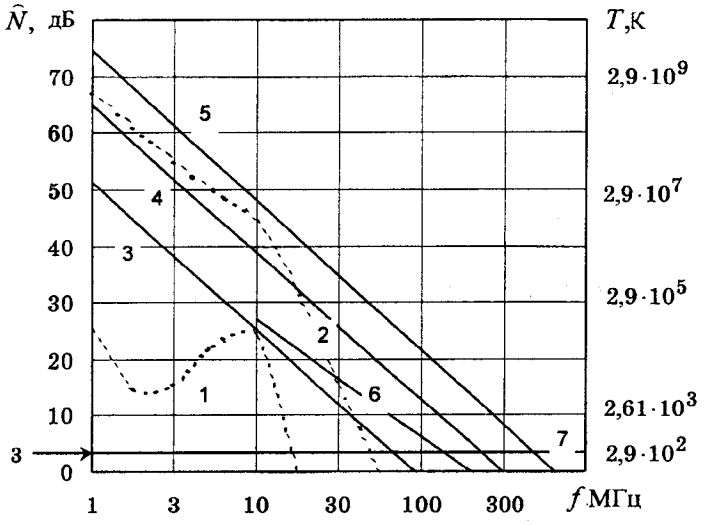

Рис. 2 — Приблизительные зависимости коэффициентов внешнего шума $\hat{N}_i$ или температур внешнего шума $T_i = T_0(N_i - 1)$ от частоты для слабонаправленной приемной антенны:
1 — атмосферный шум днем; 2 — атмосферный шум ночью;
3 — промышленный шум в особо тихих местах;
4 — промышленный шум в малом городе;
5 — промышленный шум в большом городе;
6 — галактический шум; 7 — шум Земли

Интенсивность внешних шумов от различных источников, принимаемых слабонаправленной антенной, можно характеризовать температурами внешнего шума (T_i) или коэффициентами внешнего шума (N_i) (см. рис. 2). Удобнее при расчетах пользоваться величинами коэффициентов шума, выраженными в децибелах: $\hat{N}_i\,[\text{дБ}] = 10\lg(1 + T_i / T_0)$ [1].

При наличии внешних шумов от различных источников необходимо для определенной радиочастоты f оценить результирующий коэффициент внешнего шума N_Σ с использованием зависимостей, изображенных на рис. 2. Для этого преобразуем выражение (8) следующим образом:

$$N_\Sigma = 1 + \frac{T_{\text{атм}}}{T_0} + \frac{T_{\text{пром}}}{T_0} + \frac{T_{\text{гал}}}{T_0} + \frac{T_{\text{зем}}}{T_0} =$$

$$= \left[\left(1 + \frac{T_{\text{атм}}}{T_0}\right) + \left(1 + \frac{T_{\text{пром}}}{T_0}\right) + \left(1 + \frac{T_{\text{гал}}}{T_0}\right) + \left(1 + \frac{T_{\text{зам}}}{T_0}\right)\right] - (s - 1) =$$

$$= \left[10^{0,1\cdot\hat{N}_{\text{атм}}} + 10^{0,1\cdot\hat{N}_{\text{пром}}} + 10^{0,1\cdot\hat{N}_{\text{гал}}} + 10^{0,1\cdot\hat{N}_{\text{зем}}}\right] - (s - 1), \qquad (9)$$

где $\hat{N}_{\text{атм}}$ — коэффициент атмосферного шума, дБ; $\hat{N}_{\text{пром}}$ — коэффициент промышленного шума, дБ; $\hat{N}_{\text{гал}}$ — коэффициент галактического шума, дБ; $\hat{N}_{\text{зем}}$ — коэффициент шума Земли, дБ; s — число слагаемых, учитываемых в квадратных скобках формулы (9).

Полная мощность шума на выходе РТ приемника с учетом выражений (5)–(7):

$$P_{\text{ш.вых РТ}} = P_{\text{ш РТ}} + P_{\text{ш Ф}} + P_{\text{ш.внеш}} = k_{\text{РТ}} k_{\text{Ф}} P_{\text{ш0}} \left[\left(\frac{N_{\text{пр}}}{k_{\text{Ф}}} - 1\right) + (N_\Sigma - 1)\right]. \qquad (10)$$

Мощность сигнала на выходе РТ, соответствующая реальной чувствительности $P_{\text{с.вх0}}$:

$$P_{\text{с.вых РТ}} = k_{\text{РТ}} k_{\text{Ф}} P_{\text{с.вх0}}\,. \qquad (11)$$

Поскольку

$$\gamma_{\text{вых РТ}} = \frac{P_{\text{с.вых РТ}}}{P_{\text{ш.вых РТ}}}, \tag{12}$$

то из уравнений (10)–(12) следует, что реальная чувствительность приемника с согласованной антенной:

$$P_{\text{с.вх0}} = \gamma_{\text{вых РТ}} P_{\text{шо}} \left[\left(\frac{N_{\text{пр}}}{k_{\Phi}} - 1 \right) + (N_{\Sigma} - 1) \right], \tag{13}$$

где на основе выражения (9) с учетом того, что $N_{\text{зем}} = (1 + T_0 / T_0) = 2$ (или $\hat{N}_{\text{зем}} = 3$ дБ, см. рис. 2)

$$N_{\Sigma} = \left[10^{0,1\hat{N}_{\text{атм}}} + 10^{0,1\hat{N}_{\text{пром}}} + 10^{0,1\hat{N}_{\text{гал}}} + 10^{0,1\cdot 3} \right] - (s - 1) =$$

$$= \left[10^{0,1\hat{N}_{\text{атм}}} + 10^{0,1\hat{N}_{\text{пром}}} + 10^{0,1\hat{N}_{\text{гал}}} + 2 \right] - (s - 1). \tag{14}$$

Если частота радиосвязи $f > \sim 520$ МГц, уровни внешних атмосферных, промышленных (даже в большом городе) и галактических шумов пренебрежимо малы. При этом $\hat{N}_{\text{атм}} = \hat{N}_{\text{пром}} = \hat{N}_{\text{гал}} = 0$ дБ (см. рис. 2), следовательно, $N_{\Sigma} = [1 + 1 + 1 + 2] - (4 - 1) = N_{\text{зем}} = 2$. Такой же величине коэффициента внешнего шума соответствует случай, когда приемник находится далеко от источников промышленных шумов (в сельской местности), а $f > \sim 250$ МГц. В этих случаях выражение для оценки реальной чувствительности приемника упрощается и имеет вид

$$P_{\text{с.вх0}} = \gamma_{\text{вых РТ}} P_{\text{шо}} \frac{N_{\text{пр}}}{k_{\Phi}}. \tag{15}$$

2. Оценка чувствительности приемника при цифровой связи

При цифровой связи качество приема оценивают вероятностью битовой ошибки, которую еще называют частотой появления битовой ошибки (BER — Bit Error Rate). Параметр BER для различных видов цифровой манипуляции однозначно связан с нормированным отношением качества для цифровой связи E_b/N_o где E_b — энергия сигнала на 1 бит; N_o — спектральная плотность мощности аддитивного белого гауссовского шума в полосе 1 Гц, а отношение E_b/N_o также однозначно связано с отношением средней мощности сигнала к средней мощности шума на выходе РТ приемника $\gamma_{\text{вых РТ}} = (S/N)_{\text{вых РТ}} = (SNR)_{\text{вых РТ}}$ [6, 7].

Поэтому чувствительность приемника при цифровой связи оценивается по формуле (13) или (15) после того, как определена необходимая величина $\gamma_{\text{вых РТ}}$ из требуемой величины параметра BER.

Таким образом, в данной работе получены расчетные соотношения для оценки чувствительности радиоприемников с настроенными антеннами с учетом собственных и внешних шумов, характеризуемых коэффициентами шума.

Литература

1. Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике / Э. Ред. — М. : Мир, 1990. — 256 с.

2. Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами : учебн. пособие для вузов / М.М. Маковеева, Ю.С. Шинаков. — М. : Радио и связь, 2002. – 440 с.

3. Бобров Н.В. Расчет радиоприемников / Н.В. Бобров. — М. : Связь, 1979. — 368 с.

4. Чистяков Н.И. Радиоприемные устройства / Н.И. Чистяков, В.М. Сидоров. — М. : Связь, 1974. — 408 с.

5. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM / В.И. Попов. — М. : Эко-Трендз, 2005. — 296 с.

6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.

7. Мелихов С.В. Взаимосвязь качественных характеристик для различных видов цифровой манипуляции / С.В. Мелихов, В.А. Кологривов // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. № 6(14). – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2006. – С. 68–77.

Мелихов Сергей Всеволодович
Д-р техн. наук, проф., зав. каф. средств радиосвязи ТУСУРа
Телефон: (3822) 41 37 09
Эл. почта: mrc@main.tusur.ru

Кологривов Василий Андреевич
Доцент каф. средств радиосвязи ТУСУРа
Телефон: (3822) 41 37 09
Эл. почта: mrc@main.tusur.ru

S.V. Melikhov, V.A. Kologrivov

Relation of quality characteristics for different types of digital manipulation

A normalized quality ratio for digital communication, bit error probability, Nyquist and Shannon capacity of communication channel, energy and spectral efficiency, and also frequency bands of radio-signals for different manipulations are considered in the paper.