

УДК 621.396.62.089.52

## Оценка чувствительности радиоприемника с использованием коэффициентов внешних и внутренних шумов

Мелихов С. В.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Томск, 634034, Российская Федерация

**Цель работы:** разработка методики и вывод формулы для оценки реальной чувствительности радиоприемника с использованием коэффициентов внешних и внутренних шумов. **Методы исследования:** схемотехнический анализ условий приема с использованием диаграмм уровней сигнала и шума для типовой структуры радиотракта приемника. **Результат:** разработана методика и получена новая формула для оценки реальной чувствительности радиоприемника, учитывающие внутренние шумы радиотракта приемника и совокупность внешних шумов различного вида – атмосферный шум, промышленный шум, галактический шум, тепловой шум Земли. **Научная новизна:** использование полученной формулы, в отличие от известной, позволяет при расчете чувствительности радиоприемника устранить систематическую ошибку, значения которой лежат в пределах от 2 до 5 дБ при значениях результирующего коэффициента внешнего шума от 0 до 40 дБ и более. **Практическая / Теоретическая значимость:** результаты работы могут быть полезны для разработчиков приемных трактов различных радиосистем.

**Ключевые слова:** радиоприемник, радиотракт, полосовой фильтр, фидер, малошумящий усилитель, усилитель-селектор, коэффициент внешнего шума, коэффициент внутреннего шума, формула Фрииса, реальная чувствительность радиоприемника

### Введение

В работах [1, 2] для диапазона частот (1...1000) МГц приведены зависимости спектральной плотности мощности внешних радиозумов от различных источников, которые характеризуются коэффициентами  $\hat{N}_i$  (в дБ) относительно уровня  $N_0 = k$ ,  $T_0 = 4 \cdot 10^{-21}$  Вт/Гц ( $\hat{N}_0 = 10 \lg(k T_0) = -204$  дБВт/Гц) или температурами  $T_i = T_0(N_i - 1)$  (рисунок 1). Уровень  $N_0 = 4 \cdot 10^{-21}$  Вт/Гц характеризует спектральную плотность мощности аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) в полосе 1 Гц. Импульсные атмосферные (грозовые) и промышленные помехи в [1, 2] получили название «шумы», поскольку интенсивность их спектральных составляющих в полосе пропускания приемника можно считать постоянной.

Однако в [1, 2] не приводятся методики для оценки чувствительности приемника с использованием приведенных на рисунке 1 зависимостей, где 1 – атмосферный шум днем; 2 – атмосферный шум ночью; 3 – промышленный шум в сельской местности; 4 – промышленный шум в малом городе; 5 – промышленный шум в большом городе; 6 – галактический шум; 7 – тепловой шум Земли.

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

Мелихов С. В. Оценка чувствительности радиоприемника с использованием коэффициентов внешних и внутренних шумов // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 3. С. 5. EDN: IHBCRE

#### Reference for citation:

Melikhov S. Radio Receiver Sensitivity Assessment Using External and Internal Noise Coefficients // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 3. P. 5. EDN: IHBCRE

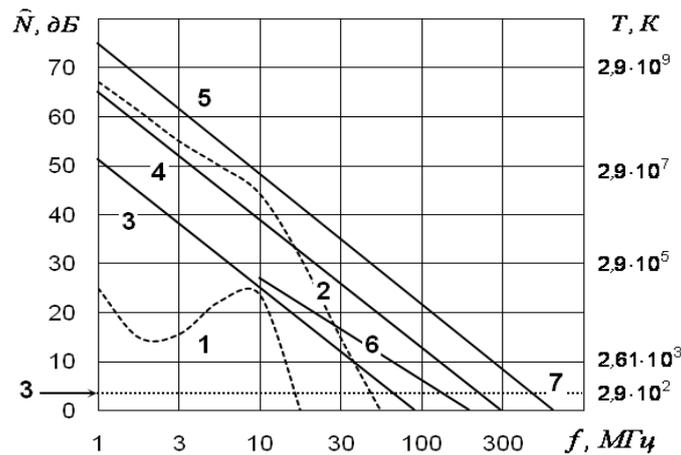


Рис. 1. Зависимости спектральной плотности мощности внешних шумов от различных источников

В соответствии с методикой оценки чувствительности приемника с использованием коэффициентов внешних шумов, предложенной в [3], при наличии на радиочастоте  $f$  внешних шумов от нескольких различных источников, прежде всего, необходимо определить результирующий коэффициент внешнего шума:

$$\begin{aligned}
 N_{\text{внеш}} &= (1 + \sum T_i/T_0) = (1 + T_{\text{атм}}/T_0 + T_{\text{пром}}/T_0 + T_{\text{гал}}/T_0 + T_{\text{зем}}/T_0) = \\
 &= \{(1 + T_{\text{атм}}/T_0) + (1 + T_{\text{пром}}/T_0) + (1 + T_{\text{гал}}/T_0) + (1 + T_{\text{зем}}/T_0)\} - (s - 1) = \quad (1) \\
 &= [10^{0,1 \cdot \hat{N}_{\text{атм}}} + 10^{0,1 \cdot \hat{N}_{\text{пром}}} + 10^{0,1 \cdot \hat{N}_{\text{гал}}} + 10^{0,1 \cdot \hat{N}_{\text{зем}}}] - (s - 1),
 \end{aligned}$$

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;  $T_{\text{зем}} = T_0 = 290 \text{ К}$  – температура теплового шума Земли;  $\hat{N}_{\text{атм}}$  – 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 выражения (1).

Следует заметить, что:

– при радиосвязи на частотах  $f \geq 500 \text{ МГц}$  уровни атмосферного, промышленного (даже в большом городе), галактического шумов пренебрежимо малы ( $\hat{N}_{\text{атм}} = \hat{N}_{\text{пром}} = \hat{N}_{\text{гал}} = 0 \text{ дБ}$ ) и необходимо учитывать только шум Земли ( $\hat{N}_{\text{зем}} = 3 \text{ дБ}$ ), следовательно, с использованием (1):

$$\begin{aligned}
 N_{\text{внеш}} &= [10^{0,1 \cdot \hat{N}_{\text{атм}}} + 10^{0,1 \cdot \hat{N}_{\text{пром}}} + 10^{0,1 \cdot \hat{N}_{\text{гал}}} + 10^{0,1 \cdot \hat{N}_{\text{зем}}}] - (s - 1) = \quad (2) \\
 &= [10^{0,1 \cdot 0} + 10^{0,1 \cdot 0} + 10^{0,1 \cdot 0} + 10^{0,1 \cdot 3}] - (4 - 1) = [1 + 1 + 1 + 2] - (4 - 1) = 2 = N_{\text{зем}};
 \end{aligned}$$

– при радиосвязи на частотах  $f \geq 250 \text{ МГц}$  и нахождении приемника вдали от источников промышленных шумов (в сельской местности) также:

$$\hat{N}_{\text{атм}} = \hat{N}_{\text{пром}} = \hat{N}_{\text{гал}} = 0 \text{ дБ и } N_{\text{внеш}} = N_{\text{зем}} = 2;$$

– при космической радиосвязи на частотах  $f < 200 \text{ МГц}$  для определения  $\hat{N}_{\text{гал}}$  необходимо пользоваться зависимостью 6 (см. рисунок 1), а при  $f \geq 200 \text{ МГц}$  полагать, что  $T_{\text{гал}} \approx 50 \text{ К}$  и  $N_{\text{внеш}} = N_{\text{гал}} \approx 1,172$  ( $\hat{N}_{\text{внеш}} = \hat{N}_{\text{гал}} \approx 0,7 \text{ дБ}$ ) [1, 2].

После расчета результирующего коэффициента внешнего шума оценку реальной чувствительности приемника с настроенной антенной и выполненного по структурной схеме, изображенной на рисунке 2, в работе [3] предложено рассчитывать по выражению:

$$\begin{aligned} \check{P}_{c\_вх\_0} &= \gamma_{\text{вых\_РТ}} P_{\text{ш\_0}} [(N_{\text{внеш}} - 1) + (N_{\text{УС}}/k_{\Phi} - 1)] = \\ &= \gamma_{\text{вых\_РТ}} N_0 B_{\text{ш\_RF}} [(N_{\text{внеш}} - 2) + \eta_{\Phi} N_{\text{УС}}], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\gamma_{\text{вых\_РТ}}$  – отношение сигнал / шум на выходе радиотракта (РТ) приемника;  $P_{\text{ш\_0}} = k T_0 B_{\text{ш\_RF}}$  – номинальная мощность теплового шума (Вт) в шумовой полосе приемника  $B_{\text{ш\_RF}} \approx B_{\text{RF}}$ ;  $B_{\text{RF}}$  – полоса пропускания приемника (Гц) для сигнала с радиочастотой (Radio Frequency);  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T_0 = 290$  К (при  $17^\circ\text{C}$ );  $N_{\text{УС}}$  – коэффициент шума усилителя-селектора (УС) приемника (УС выполняет функции основного усиления и селекции радиосигнала и в случае супергетеродинного приемника с однократным преобразованием частоты состоит из преселектора, преобразователя частоты и усилителя промежуточной частоты);  $k_{\Phi}$  – коэффициент передачи по мощности фидера;  $\eta_{\Phi} = 1/k_{\Phi} = N_{\Phi}$  – потери радиосигнала в фидере;  $N_{\Phi}$  – коэффициент шума фидера.

На рисунке 2 используются следующие обозначения: А – приемная антенна;  $\Phi$  – фидер с коэффициентом передачи по мощности (КПМ)  $k_{\Phi}$  и коэффициентом шума (КШ)  $N_{\Phi} = 1/k_{\Phi}$ ; УС – усилитель-селектор с КПМ  $k_{\text{УС}}$  и КШ  $N_{\text{УС}}$ ; Д – детектор; УНЧ – усилитель низкой частоты; ОУ – оконечное устройство.

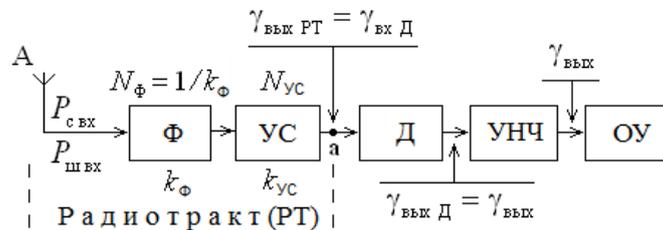


Рис. 2. Структурная схема приемника

На рисунке 3а представлена диаграмма уровней сигнала и шума в характерных точках структурной схемы РТ приемника с использованием (3). Расчет проведен при  $N_{\text{внеш}} = 1 = 0$  дБ (отсутствие внешнего шума),  $N_{\text{УС}} = 4$  дБ,  $\eta_{\Phi} = 1/k_{\Phi} = N_{\Phi} = 1,26 = 1$  дБ,  $B_{\text{RF}} = 0,2 \cdot 10^6$  Гц,  $U_{c\_вых\_РТ} = 1$  В,  $R_{н\_РТ} = 50$  Ом,  $\gamma_{\text{вых\_РТ}} = \gamma_{\text{вых\_УС}} = 10 = 10$  дБ следующим образом:

$$\begin{aligned} \check{P}_{c\_вх\_0} &= \gamma_{\text{вых\_РТ}} N_0 B_{\text{ш\_RF}} [(N_{\text{внеш}} - 2) + \eta_{\Phi} N_{\text{УС}}] = 10 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 290 \cdot 0,2 \times \\ &\times 10^6 [(1 - 2) + 1,26 \cdot 2,5] = 1,72 \cdot 10^{-14} \text{ Вт} \approx -138 \text{ дБВт}, \end{aligned}$$

$$P_{c\_вых\_РТ} = \frac{U_{c\_вых\_РТ}^2}{R_{н\_РТ}} = \frac{(1 \text{ В})^2}{50} \text{ Ом} = 0,02 \text{ Вт} \approx -17 \text{ дБВт},$$

$$P_{\text{ш\_вых\_РТ}} = P_{c\_вых\_РТ} - \gamma_{\text{вых\_РТ}} = -17 \text{ дБВт} - 10 \text{ дБ} = -27 \text{ дБВт}, \quad (4)$$

$$k_{\text{УС}} = P_{c\_вых\_РТ} - P_{c\_вх\_0} - k_{\Phi} = -17 \text{ дБВт} - (-138 \text{ дБВт}) - (-1 \text{ дБ}) = 122 \text{ дБ},$$

$$\gamma_{\text{вх\_УС}} = \gamma_{\text{вых\_РТ}} + N_{\text{УС}} = 10 \text{ дБ} + 4 \text{ дБ} = 14 \text{ дБ},$$

$$\gamma_{\text{вх\_Ф}} = \gamma_{\text{вх\_УС}} + N_{\Phi} = 14 \text{ дБ} + 1 \text{ дБ} = 15 \text{ дБ},$$

$$\check{P}_{\text{ш\_вх}} = P_{\text{ш\_вых\_РТ}} - k_{\text{УС}} - N_{\text{УС}} = -27 \text{ дБВт} - 122 \text{ дБ} - 4 \text{ дБ} = -153 \text{ дБВт}.$$

Заметим, что в проведенных расчетах значение  $\check{P}_{\text{ш\_вх}} = -153$  дБВт определено, исходя из рассчитанного по формуле (2) значения реальной чувствительности приемника  $\check{P}_{c\_вх\_0} = -138$  дБВт.

Однако очевидно, что при отсутствии внешнего шума на вход фидера приемника поступает мощность шума сопротивления настроенной и согласованной антенны:

$$P_{\text{ш\_вх}} = P_{\text{ш\_0}} = k T_0 B_{\text{ш\_RF}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 290 \cdot 0,2 \cdot 10^6 \approx -151 \text{ дБВт}. \quad (5)$$

При этом уровни сигнала и шума на входе фидера, а также коэффициент передачи по мощности УС должны иметь значения, указанные на рисунке 3б:  $P_{с\_вх\_0} = -136$  дБВт;  $P_{ш\_вх} = -151$  дБВт;  $k_{УС} = 120$  дБ.

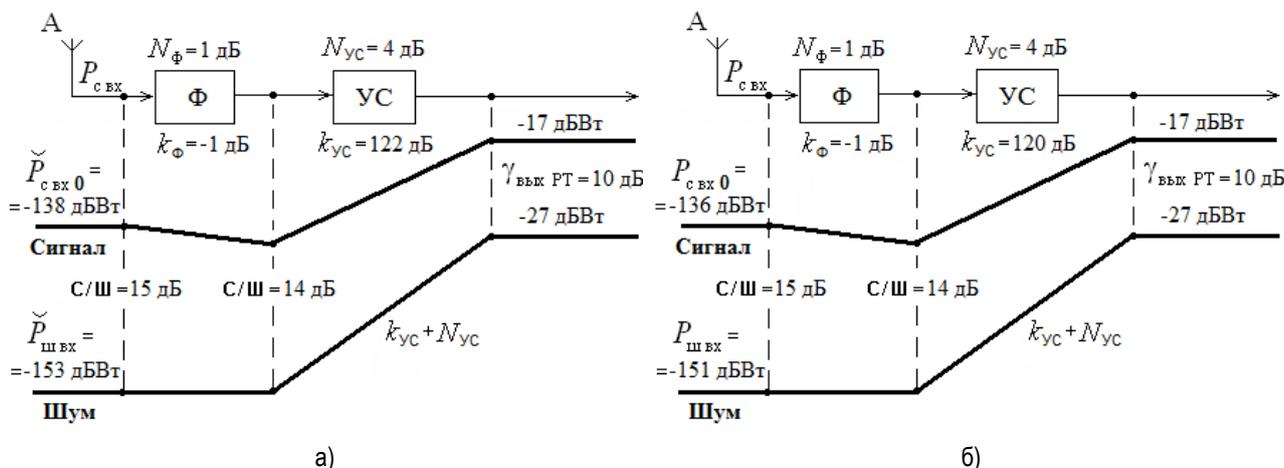


Рис. 3. Диаграммы уровней сигнала и шума для РТ приемника в отсутствии внешних шумов:

- а) при расчете чувствительности приемника  $\check{P}_{с\_вх\_0} = -138$  дБВт по формуле (3);
- б) при уровне шума  $P_{ш\_вх} = -151$  дБВт от настроенной и согласованной антенны

Отличие значения  $\check{P}_{с\_вх\_0} = -138$  дБВт (см. рисунок 3а) от значения  $P_{с\_вх\_0} = -136$  дБВт (см. рисунок 3б) позволяет сделать вывод о том, что выражению (3) присуща систематическая ошибка. При вышеприведенных параметрах блоков РТ приемника ошибка в оценке чувствительности составляет приблизительно 2 дБ (1,6 раза по мощности). Это является следствием того, что в [3] при выводе (3) не учтен шум сопротивления настроенной и согласованной антенны, а также неверно представлена мощность внешнего шума с использованием параметра  $N_{внеш}$ . Целесообразно поэтому провести более корректный вывод формулы для оценки реальной чувствительности приемника с использованием коэффициентов внешних и внутренних шумов.

### Вывод новой формулы для оценки чувствительности приемника с использованием коэффициентов внешних и внутренних шумов

При выводе формулы для оценки чувствительности приемника с использованием результирующего коэффициента внешнего шума, не имеющей систематической ошибки, необходимо найти мощность полезного сигнала и мощность шума на выходе РТ приемника (в точке «а», см. рисунок 2).

Мощность сигнала на выходе РТ, соответствующая реальной чувствительности приемника  $P_{с\_вых\_0}$ , вычисляется по выражению:

$$P_{с\_вых\_РТ} = k_{\Phi} k_{УС} P_{с\_вх\_0}. \quad (6)$$

Для нахождения мощности внутреннего (собственного) шума на выходе РТ выразим коэффициент шума РТ ( $N_{РТ}$ ) через параметры последовательно включенных и согласованных по входу и выходу Ф и УС (см. рисунок 2) с использованием формулы Фрииса [4]:

$$N_{РТ} = N_{\Phi} + \frac{(N_{УС} - 1)}{k_{\Phi}} = \eta_{\Phi} N_{УС}. \quad (7)$$

Мощность внутреннего шума на выходе РТ при настроенной и согласованной антенне:

$$P_{ш\_вых\_РТ\_внут} = k_{\Phi} k_{УС} P_{ш\_0} N_{РТ} = k_{\Phi} k_{УС} B_{ш\_RF} (N_0 N_{РТ}) = k_{\Phi} k_{УС} B_{ш\_RF} (N_0 \eta_{\Phi} N_{УС}). \quad (8)$$

Рассматривая произведение  $(N_0 N_{PT})$  в (8), можно сделать вывод о том, что коэффициент шума РТ ( $N_{PT}$ ) показывает во сколько раз спектральная плотность мощности шума на входе РТ в полосе 1 Гц за счет внутреннего шума больше уровня  $N_0 = k T_0 = 4 \cdot 10^{-21}$  Вт/Гц.

Поскольку отношение сигнал / шум на выходе РТ приемника можно определить как:

$$\gamma_{\text{ВЫХ\_РТ}} = \frac{P_{\text{С\_ВЫХ\_РТ}}}{P_{\text{Ш\_ВЫХ\_РТ}}}, \quad (9)$$

то при  $P_{\text{Ш\_ВЫХ\_РТ}} = P_{\text{Ш\_ВЫХ\_РТ\_ВНУТ}}$  с учетом (6) и (9) реальная чувствительность приемника с настроенной и согласованной антенной с учетом только внутреннего шума вычисляется по выражению:

$$P_{\text{С\_ВХ\_0}} = \gamma_{\text{ВЫХ\_РТ}} B_{\text{Ш\_RF}} N_0 \eta_{\Phi} N_{\text{УС}} = \gamma_{\text{ВЫХ\_РТ}} P_{\text{Ш\_0}} \eta_{\Phi} N_{\text{УС}}. \quad (10)$$

Если антенной принимается внешний шум, который не коррелирован с внутренним шумом РТ, то их результирующее воздействие на входе приемника характеризуется эквивалентным коэффициентом шума:

$$N_{\text{ЭКВ}} = N_{\text{ВНЕШ}} N_{\text{РТ}} \quad (\text{или в «децибелах»: } \hat{N}_{\text{ЭКВ}} = \hat{N}_{\text{ВНЕШ}} + \hat{N}_{\text{РТ}}). \quad (11)$$

В этом случае  $N_{\text{ЭКВ}}$  показывает, во сколько раз спектральная плотность мощности шума на входе РТ в полосе 1 Гц за счет внешнего и внутреннего шума больше уровня:

$$N_0 = k T_0 = 4 \cdot 10^{-21} \text{ Вт/Гц.}$$

Тогда реальная чувствительность приемника с настроенной и согласованной антенной с учетом внешнего и внутреннего шума определяется по выражению:

$$\begin{aligned} P_{\text{С\_ВХ\_0}} &= \gamma_{\text{ВЫХ\_РТ}} B_{\text{Ш\_RF}} (N_0 N_{\text{ЭКВ}}) = \gamma_{\text{ВЫХ\_РТ}} B_{\text{Ш\_RF}} (N_0 N_{\text{ВНЕШ}} \eta_{\Phi} N_{\text{УС}}) = \\ &= \gamma_{\text{ВЫХ\_РТ}} P_{\text{Ш\_0}} N_{\text{ВНЕШ}} \eta_{\Phi} N_{\text{УС}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Расчет значения  $P_{\text{С\_ВХ\_0}}$  по формуле (12) при отсутствии внешнего шума ( $N_{\text{ВНЕШ}} = 1 = 0$  дБ) соответствует значению  $P_{\text{С\_ВХ\_0}}$ , указанному на рисунке 4:

$$\begin{aligned} P_{\text{С\_ВХ\_0}} &= \gamma_{\text{ВЫХ\_РТ}} P_{\text{Ш\_0}} N_{\text{ВНЕШ}} \eta_{\Phi} N_{\text{УС}} = \\ &= 10 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 290 \cdot 0,2 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 1,26 \cdot 2,5 = 2,52 \cdot 10^{-14} \text{ Вт} \approx -136 \text{ дБВт}. \end{aligned} \quad (13)$$

На основе (12) нетрудно получить аналитическое выражение для расчета систематической ошибки ( $\delta$ ) при оценке реальной чувствительности приемника по формуле (3):

$$\delta = \frac{P_{\text{С\_ВХ\_0}}}{\bar{P}_{\text{С\_ВХ\_0}}} = \frac{N_{\text{ВНЕШ}} \eta_{\Phi} N_{\text{УС}}}{(N_{\text{ВНЕШ}} - 2) + \eta_{\Phi} N_{\text{УС}}}. \quad (14)$$

В таблицу 1, при вышеприведенных параметрах блоков РТ приемника и разных значениях  $N_{\text{ВНЕШ}}$ , сведены значения  $\bar{P}_{\text{С\_ВХ\_0}}$  и  $P_{\text{С\_ВХ\_0}}$ , рассчитанные по (3) и (12), а также значения  $\delta$ , вычисленные по (14). На рисунке 4 изображена зависимость  $\delta$  от  $N_{\text{ВНЕШ}}$ .

Расчет реальной чувствительности приемника можно проводить с использованием температур внешних шумов  $T_i$  (см. рисунок 1), для чего необходимо (12) с учетом (1) привести к следующему виду:

$$P_{\text{С\_ВХ\_0}} = \gamma_{\text{ВЫХ\_РТ}} P_{\text{Ш\_0}} N_{\text{ВНЕШ}} \eta_{\Phi} N_{\text{УС}} = \gamma_{\text{ВЫХ\_РТ}} P_{\text{Ш\_0}} (1 + \sum T_i/T_0) \eta_{\Phi} N_{\text{УС}}. \quad (15)$$

Таблица 1. Взаимосвязь значений: коэффициента внешнего шума; реальной чувствительности приемника, рассчитанной по (3) и (12); систематической ошибки

| $N_{\text{внеш}}, \text{дБ}$ | $\bar{P}_{\text{с.вх.0}}, \text{дБВт}$ | $P_{\text{с.вх.0}}, \text{дБВт}$ | $\delta, \text{дБ}$ |
|------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 1 = 0                        | -138                                   | -136 дБВт                        | 2                   |
| 2 =                          | -136                                   | -133 дБВт                        | 3                   |
| 4 = 6                        | -133,8                                 | -130 дБВт                        | 3,8                 |
| 10 = 10                      | -130,5                                 | -126 дБВт                        | 4,5                 |
| 100 = 20                     | -120,9                                 | -116 дБВт                        | 4,9                 |
| 10000 = 30                   | -111                                   | -106 дБВт                        | 5                   |

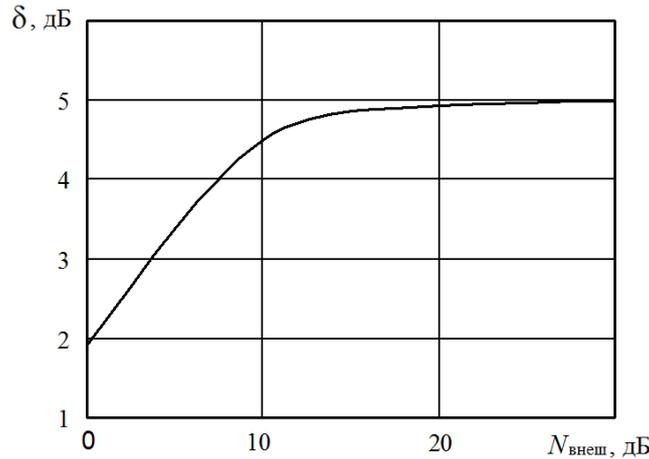


Рис. 4. Зависимость ошибки  $\delta$  от результирующего коэффициента внешнего шума  $N_{\text{внеш}}$

По аналогии с вышеприведенными рассуждениям нетрудно получить выражения для определения реальной чувствительности приемника со структурной схемой, изображенной на рисунке 5 (ПФ – фидер с КПМ ( $k_{\text{ПФ}}$ ) и КШ ( $N_{\text{ПФ}} = 1/k_{\text{ПФ}}$ ); МШУ – малошумящий усилитель с КПМ ( $k_{\text{МШУ}}$ ) и КШ ( $N_{\text{МШУ}}$ ):

$$P_{\text{с.вх.0}} = \gamma_{\text{вых.РТ}} P_{\text{ш.0}} \left\{ N_{\text{внеш}} \eta_{\text{ПФ}} \left[ N_{\text{МШУ}} + \frac{(\eta_{\text{Ф}} N_{\text{УС}} - 1)}{k_{\text{МШУ}}} \right] \right\}, \quad (16)$$

$$P_{\text{с.вх.0}} = \gamma_{\text{вых.РТ}} P_{\text{ш.0}} \left\{ (1 + \sum T_i/T_0) \eta_{\text{ПФ}} \left[ N_{\text{МШУ}} + \frac{(\eta_{\text{Ф}} N_{\text{УС}} - 1)}{k_{\text{МШУ}}} \right] \right\}, \quad (17)$$

где  $\eta_{\text{ПФ}} = 1/k_{\text{ПФ}}$  – потери радиосигнала в полосовом фильтре с коэффициентом передачи по мощности  $k_{\text{ПФ}}$ .

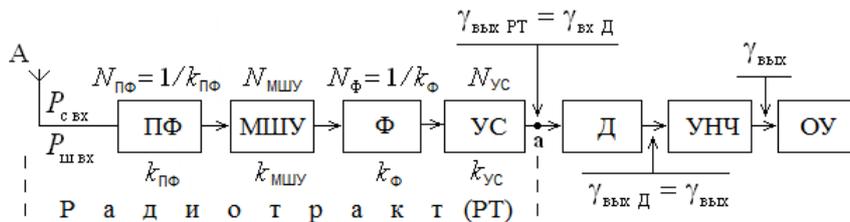


Рис. 5. Структурная схема приемника

Заметим, что (16) приводится к виду (12) при  $\eta_{\text{ПФ}} = 1$ ,  $N_{\text{МШУ}} = 1$ ,  $k_{\text{МШУ}} = 1$ , что соответствует отсутствию в структуре приемника ПФ и МШУ.

### Выводы и дальнейшие перспективы исследования

1. Предложена двухэтапная методика и получена новая формула (16) для оценки реальной чувствительности радиоприемника. На первом этапе для конкретной частоты приема в диапазоне (1...1000) МГц с использованием коэффициентов внешних шумов, изображенных на рисунке 1, по выражению (1) рассчитывается результирующий коэффициент внешних шумов  $N_{\text{внеш}}$ , учитывающий в совокупности атмосферный, промышленный, галактический и тепловой шум Земли. На втором этапе оценивается реальная чувствительность радиоприемника по формуле (16), в которую входит коэффициент  $N_{\text{внеш}}$ , а также шумовые и передаточные параметры блоков приемника.

2. Использование новой формулы (16), полученной в результате схемотехнического анализа условий приема с использованием диаграмм уровней сигнала и шума для типовой структуры радиотракта приемника, вместо формулы (3), предложенной в [3], позволяет при оценке реальной чувствительности радиоприемника устранить систематическую ошибку  $\delta$ , значения которой лежат в пределах от 2 до 5 дБ при значениях результирующего коэффициента внешнего шума от 0 до 40 дБ и более.

3. Зависимость ошибки  $\delta$  от  $N_{\text{внеш}}$  имеет нелинейный характер и приближительное значение 5 дБ при  $N_{\text{внеш}} \geq 20$  дБ (см. рисунок 4).

4. Предложенная методика оценки чувствительности радиоприемника в диапазоне (1...1000) МГц с использованием результирующего коэффициента внешнего шума проще и нагляднее, чем методика с использованием напряженностей поля внешних шумов с размерностью (дБ мкВ)/ $(\text{м} \sqrt{\text{кГц}})$  [5, 6].

В заключение целесообразно отметить, что дальнейшим перспективным исследованием является формирование зависимостей (или банка данных), характеризующих коэффициенты внешнего шума для радиочастот выше 1 ГГц, что даст возможность использования формулы (16) для этих радиочастот. Формирование таких зависимостей возможно на основе данных о шумовой температуре антенны приемника в диапазоне (1–300) ГГц, приведенных, например, в [5–9].

### Литература

1. Ред Э. Т. Схемотехника радиоприемников. М.: Мир, 1989. 152 с.
2. Ред Э. Т. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. М.: Мир, 1990. 256 с.
3. Мелихов С. В., Кологривов В. А. Оценка чувствительности радиоприемников с настроенными антеннами // Доклады ТУСУРа (Томск). 2006. № 6 (14). С. 63–67. EDN: KUBZPX
4. Соковишен М. Основы измерения коэффициента шума в радиочастотном и микроволновом диапазонах // Современная электроника. 2015. № 5. С. 66–69.
5. Калихман С. Г., Левин Я. М. Радиоприёмники на полупроводниковых приборах. Теория и расчёт. М.: Связь, 1979. 352 с.
6. Пушкарев В. П. Радиоприемные устройства. Саратов: Ай Пи Ар Медиа, 2019. 226 с.
7. Крохин В. В. Элементы радиоприемных устройств сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1964. 694 с.
8. Радиоприемные устройства / Под ред. Н. В. Боброва. М.: Сов. радио, 1971. 496 с.
9. Радиоприемные устройства / Под общей ред. В. И. Сифорова. М.: Сов. радио, 1974. 560 с.

Статья поступила 09 декабря 2024 г.

Одобрена после рецензирования 23 декабря 2024 г.

Принята к публикации 24 декабря 2024 г.

### Информация об авторе

Мелихов Сергей Всеволодович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехнических систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. E-mail: mrc@main.tusur.ru

## Radio Receiver Sensitivity Assessment Using External and Internal Noise Coefficients

S. Melikhov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
Tomsk, 634034, Russian Federation

**The purpose:** development of a methodology and derivation of a formula for estimating the real sensitivity of a radio receiver using external and internal noise coefficients.

**Research methods:** circuit analysis of reception conditions using diagrams of signal and noise levels for a typical receiver radio path structure.

**Results:** a methodology was developed and a new formula was obtained for estimating the real sensitivity of a radio receiver, taking into account the internal noise of the radio path of the receiver and a combination of external noise of various types - atmospheric noise, industrial noise, galactic noise, thermal noise of the Earth.

**The novelty:** the use of the obtained formula, in contrast to the known one, allows, when calculating the sensitivity of a radio receiver, to eliminate a systematic error, the values of which lie in the range from 2 to 5 dB for values of the resulting external noise coefficient from 0 to 40 dB or more.

**Practical / theoretical significance:** the results of the work may be useful for developers of receiving paths of various radio systems.

**Key words:** radio receiver, radio path, bandpass filter, feeder, low-noise amplifier, selector amplifier, external noise factor, internal noise factor, Friis formula, real sensitivity of the radio receiver

### Information about Authors

Melikhov Sergey – holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Professor, Professor at the Department of Radio Engineering systems (Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics). E-mail: mrc@main.tusur.ru