

КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА

С.Н.Песков, директор МВКПК, к.т.н.

По теории шумов имеется большое число публикаций. Цель настоящей публикации – в краткой доступной форме изложить основные положения и законы из теории шумов, которые помогут более осознанно и грамотно подойти к расчету шумовых параметров СКТ. Приведем основные постулаты с максимальным приближением к практическим выводам и рекомендациям.

□ Среднее значение квадрата электродвижущей силы (ЭДС) флюктуационных шумов резистора R определяется формулой Найквиста

$$\overline{e_w}^2 = 4kTR\Pi, \quad (1)$$

где: $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

T - абсолютная температура. $T = T_0 = 293^0$ К соответствует нормальной температуре;

Π - полоса пропускания приемного тракта до входа демодулятора ($\Pi = 5,75$ МГц для системы SECAM и $\Pi = 4,75$ МГц для системы PAL);

Пример 1. Найти ЭДС шумов резистора с сопротивлением 75 Ом при $T_0=273^0$ С и $\Pi = 5,75$ МГц.

Решение. Формула (1) сразу дает ответ:

$$\sqrt{\overline{e_w}^2} = \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 75 \cdot 5,75 \cdot 10^6} = 2,64 \text{ мкВ} (8,44 \text{ dB}\mu\text{V})^1.$$

□ Реактивные элементы пассивной комплексной цепи с сопротивлением $Z = r + jx$ не вносят дополнительной шумовой мощности. Физически это означает, что любая идеальная трансформирующая цепь не вносит собственных шумов. Шумы вносят только резистивные компоненты.

□ Антенну (источник сигнала), согласованную со входом приемника, при оценке ее шумовых свойств можно заменить эквивалентным источником шумовой ЭДС с внутренним сопротивлением, равным сопротивлению излучения антенны. Шумовая мощность, поступающая в нагрузку, определяется по формуле:

$$P_w = \kappa T_A \Pi, \quad (2)$$

где T_A - шумовая температура антенны.

В формуле (2) под шумовой температурой можно понимать шумовую температуру абсолютно любого активного устройства, включая усилительные и оптические устройства. Под шумовой полосой следует понимать только полезную полосу канала, реализуемую тем или иным фильтрующим устройством (чаще всего - полосовым фильтром).

Пример 2. Определить шумовое напряжение, развиваемое на входе идеального нешумящего усилителя от источника сигнала с $R=75$ Ом при нормальной температуре T_0 в полосе телевизионного канала $\Pi=5,75$ МГц.

Решение. Воспользуемся формулой (2):

¹ Напомним правило логарифмирования для напряжений: $U_{[dB\mu V]} = 20 \lg U_{[\mu]}$

$$P_{ш} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 5,75 \cdot 10^6 = 2,32 \cdot 10^{-14} \text{ Вт } (-106,3 \text{ dBm}),$$

$$\text{соответственно } U_{ш} = \sqrt{P_{ш} R} = \sqrt{2,32 \cdot 10^{-14} \cdot 75} = 1,32 \text{ мкВ } (2,41 \text{ dB}\mu\text{V}).$$

Из данного примера наглядно видно, что на выходе даже идеального (нешумящего) усилителя всегда присутствуют шумы, обязанные самому источнику сигнала. Этот факт необходимо учитывать в расчетах.

□ Типовая величина шумовой температуры антенн спутникового телевизионного вещания (СТВ) составляет $30 \dots 90 \text{ K}^0$ и зависит от качества обработки поверхности рефлектора, от его площади раскрытия и от частотного диапазона использования (меньшему диапазону частот соответствует большая шумовая температура).

Без большой погрешности, при расчете диаметра рефлектора параболической антенны D через известное значение эффективной изотропно излучаемой мощности $P_{ЭИИМ}$ (справочная величина, выражаемая в $\text{dB}\cdot\text{Вт}$, отражающая величину произведения излучаемой мощности передатчика бортового ретранслятора на коэффициент усиления передающей антенны в направлении к точке приема) и требуемое отношение сигнал/шум (S/N) на выходе приемника-демодулятора можно воспользоваться соотношением:

$$D \geq 10^{\frac{(S/N - P_{ЭИИМ})}{20}}. \quad (3)$$

Так, для $P_{ЭИИМ} = 44 \text{ dB}\cdot\text{Вт}$ и $S/N = 54 \text{ dB}$, потребуется антенна с диаметром рефлектора 3,2 метра. При индивидуальном приеме ($S/N = 42 \text{ dB}$) потребуется антенна с $D = 0,8$ метра, или решая обратную задачу:

$$S/N_{[\text{dB}]} = P_{ЭИИМ[\text{dBW}]} + 20 \lg D_{[\text{м}]} . \quad (4)$$

Например, при имеющейся антенне с диаметром рефлектора 1,2 метра и удовлетворительном качестве приема аналоговых сигналов: $S/N = 38 \text{ dB}$, можно принимать сигналы СТВ с $P_{ЭИИМ} = 33,9 \text{ dBW}$.

□ Шумовая температура антенн наземного телевизионного вещания (НТВ) определяется эмпирической зависимостью:

$$T_A = \frac{T_0}{2} \left[100 \left(\frac{50}{f_{из}} \right)^2 + 1,5 \right] \quad (5)$$

и обычно лежит в пределах $290 \dots 15000 \text{ K}^0$. В выражении (5) частота несущей изображения $f_{из}$ подставляется в мегагерцах. Следует отметить, что данная формула является весьма приближенной. Шумовая температуры антенны (собственно говоря - шумы атмосферы) колеблется в пределах $\pm 6 \text{ dB}$ в зависимости от погодных условий, времени суток и времени года. В силу этого, при проведении расчетов по качеству принимаемого сигнала для крупных СКТ, следует всегда принимать наихудшее значение.

Пример 3. Рассчитать S/N на выходе приемной антенны НТВ по каналу E51 (711,25 МГц) при уровне сигнала на выходе антенны $U_A = 65 \text{ dB}\mu\text{V}$.

Решение: Согласно (5) шумовая температура антенны составит:

$$T_A = \frac{293}{2} \left[100 \left(\frac{50}{711,25} \right)^2 + 1,5 \right] = 292^0 \text{ K} ,$$

что эквивалентно шумовому напряжению

$$U_{\text{шА}} = \sqrt{KT\Pi R} = \sqrt{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 292 \cdot 5,75 \cdot 10^6 \cdot 75} = 1,32 \text{ мкВ (2,4 dB}\mu\text{V)} .$$

Искомое отношение S/N составит:

$$S / N = U_A - U_{\text{шА}} = 65 - 2,4 = 62,6 \text{ dB} .$$

При том же уровне сигнала на выходе антенны, но по каналу R1 (49,75 МГц), шумовое напряжение уже составит 9,45 мкВ (19,5 dBμV), что эквивалентно реализуемому отношению сигнал/шум S/N = 45,5 dB.

□ При построении СКТ используются активные устройства (например, усилители), для которых используется понятие коэффициента шума - F.

Коэффициент шума на некоторой частоте есть отношение мощности шума от всех причин на выходе линейного четырехполюсника $P_{\Sigma \text{ш.вых}}$ к части выходной мощности, обусловленной тепловыми шумами источника сигнала $P_{\text{Иш.вых}}$:

$$F = \frac{P_{\Sigma \text{ш.вых}}}{P_{\text{Иш.вых}}} . \quad (6)$$

Из приведенного определения следует:

- ◆ коэффициент шума не зависит от сопротивления нагрузки четырехполюсника;
- ◆ коэффициент шума зависит от сопротивления источника сигнала и шумовых параметров самого четырехполюсника;
- ◆ коэффициент шума всегда $F \geq 1$. Идеальному (не шумящему) четырехполюснику соответствует $F = 1$ (0 dB).

Существует и другое определение коэффициента шума. Коэффициент шума – это отношение несущая/шум на входе (C_1/N_1) к несущая/шум на выходе (C_2/N_2) усилителя (или любого активного четырехполюсника):

$$F = \frac{|C_1 / N_1|}{|C_2 / N_2|} . \quad (7)$$

Чем меньше численное значение коэффициента шума усилителя, тем меньший вклад он вносит в снижение отношения сигнал/шум по трассе. Типовые значения коэффициента шума мачтовых усилителей составляют 1,5...4,5 dB, магистральных усилителей 6...10 dB и домовых усилителей 5...8 dB.

□ Шумовая мощность, обязанная усилителю и приведенная к его входу, зависит от коэффициента шума усилителя:

$$P_{\text{ш}} = kT_{\text{yc}} \Pi = k\Pi T_0 (F - 1) . \quad (8)$$

Пример 4. Рассчитать отношение сигнал/шум (S/N) на входе мачтового усилителя с коэффициентом шума $F = 2$ dB (1,58) для условия примера 3.

Решение. 1. Воспользовавшись формулой (8), вычисляем шумовую температуру усилителя:

$$T_{\text{yc}} = T_0 (F - 1) = 293(1,58 - 1) = 171,4 \text{ }^{\circ}\text{K} .$$

2. Вычисляем суммарное шумовое напряжение, развиваемое на входе усилителя, обязанное его шумовой температуре (T_{yc}) и шумовой температуре антенны T_A :

$$U_{u\Sigma} = \sqrt{k(T_A + T_{yc})PIR} = \quad (9)$$

$$= \sqrt{1,38 \cdot 10^{-23} (292 + 171,4) \cdot 5,75 \cdot 10^6 \cdot 75} = 1,66 \text{ мкВ (4,4 dB}\mu\text{V)} .$$

3. Выходное отношение S/N составит:

$$S / N = U_A - U_{u\Sigma} = 65 - 4,4 = 60,6 \text{ dB} .$$

При использовании усилителя с $F = 10 \text{ dB}$ (типичное значение коэффициента шума головных станций – ГС), выходное $S/N = 53 \text{ dB}$. Пример 4 наглядно показывает, что для формирования (поддержания) высокого S/N необходимо, по возможности, использовать малошумящие усилители. Следует и второй важный вывод: формируемое отношение S/N на выходе мачтового усилителя не зависит от его коэффициента усиления. На практике вполне достаточно иметь мачтовый усилитель с коэффициентом усиления порядка 20 dB даже при кабеле снижения длиной в 50 метров .

□ При включении на входе усилителя пассивного четырехполюсника с потерями $\alpha_{[dB]}$ (аттенуатор, кабель снижения, поляризатор малошумящего конвертера и т.п.), эквивалентный коэффициент шума, приведенный ко входу пассивного четырехполюсника будет равен сумме потерь пассивного четырехполюсника и коэффициента шума усилителя, выраженной в децибелах, т.е.:

$$F_{\text{эке}[dB]} = \alpha_{[dB]} + F_{[dB]} . \quad (11)$$

Пример 5. Определить формируемое отношение сигнал/шум S/N для условий примера 3 в предположении, что между антенной и мачтовым усилителем включен кабель снижения с потерями в 5 dB .

Решение полностью аналогично примеру 4:

$$F_{\text{эке}} = \alpha + F = 5 + 2 = 7 \text{ dB (5,0)} ;$$

$$T_{yc} = T_0(F - 1) = 293(5 - 1) = 1175,5 \text{ }^\circ\text{K} ;$$

$$U_{u\Sigma} = \sqrt{k(T_A + T_{yc})PIR} = \sqrt{1,38 \cdot 10^{-23} (292 + 1175,5) \cdot 5,75 \cdot 10^6 \cdot 75} = 2,96 \text{ мкВ (9,4 dB}\mu\text{V)} .$$

$$S / N = 65 - 9,4 = 55,6 \text{ dB} .$$

Сравнение примеров 3 и 5 показывает, что мачтовые усилители (или саму ГС при отсутствии антенного усилителя) с целью формирования максимального S/N следует размещать как можно ближе к антенне, т.е. необходимо минимизировать потери между антенной и мачтовым усилителем.

□ Коэффициент шума каскадно включенных активных устройств определяется по формуле Фриза:

$$F_{\Sigma} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K_1} + \frac{F_3 - 1}{K_1 \cdot K_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{K_1 \dots K_{n-1}} . \quad (12)$$

Из формулы (12) следует, что при $K_i \gg 1$, $F_{\Sigma} \approx F_1$, т.е. коэффициент шума приемного устройства в основном определяется коэффициентом шума первого усилителя. Так, например, если для примеров 3-5 на выходе мачтового усилителя с коэффициентом усиления 20 dB включить кабель снижения с потерями до 10 dB , то вкладом шумов ГС или последующего усилителя можно пренебречь.

□ Формулу (10) с учетом (выражений 5, 8 и 9) для облегчения расчетов можно упростить:

$$S / N_{[dB]} = U_{A[dB\mu V]} - 20 \lg \sqrt{(T_A + T_{yc})} + 22,3 . \quad (13)$$

Следует отметить, что формула (13) имеет очень удобное практическое применение.

□ При приеме аналоговых SAT сигналов, отношение S/N на выходе тюнера-демодулятора (ГС) можно найти по простой приближенной формуле:

$$S / N_{[dB]} = C / N_{[dB]} + 34 , \quad (14)$$

где C/N - отношение несущая/шум на входе ГС. Так, например, если $C/N = 16$ dB, то $S/N = 50$ dB.

□ Отношение C/N при зондаже сигналов СТВ вычисляется по формуле:

$$C / N = 10 \lg(10^{\frac{\Delta}{10}} - 1) , \quad (15)$$

где $\Delta = U_{\Sigma[dB\mu V]} - U_{ш[dB\mu V]}$. Здесь U_{Σ} - суммарное напряжение (сигнал + шум), фиксируемое измерительным прибором при приеме сигнала (максимальное показание); $U_{ш}$ - шумовое напряжение (шум), фиксируемое измерительным прибором при отводе антенны в более вертикальное положение (минимальное показание при отсутствии сигнала).

Например, если $U_{\Sigma} = 78$ dB μ V и $U_{ш} = 70$ dB μ V, то $\Delta = 8$ dB и $C/N = 7,25$ dB.

□ При подаче от генератора на вход усилителя идеального (не зашумленного) сигнала, на его выходе формируется S/N , равное приведенному динамическому диапазону усилителя:

$$S / N_{[dB]} = U_{вых[dB\mu V]} - K_{[dB]} - F_{[dB]} - 2,4 . \quad (16)$$

Так, для усилителя с коэффициентом усиления $K = 35$ dB и коэффициентом шума $F = 7$ dB при $U_{вых} = 98$ dB μ V, выходное отношение S/N составит 53,6 dB.

□ При каскадировании n активных устройств с соответствующими S/N_i , суммарное S / N_{Σ} составит:

$$S / N_{\Sigma} = -10 \lg(10^{-(S/N_1)/10} + 10^{-(S/N_2)/10} + 10^{-(S/N_n)/10}) . \quad (17)$$

Под активными устройствами могут пониматься мачтовый усилитель, ГС, оптическая система, магистральные и домовые усилители и т.п. Например, для КСКТП, включающую в свой состав антенную систему с $S/N = 54$ dB, ГС с $S/N = 54$ dB, оптическую систему с $S/N = 52,5$ dB, три однотипных магистральных усилителя с $S/N = 53,6$ dB и один домовый усилитель с $S/N = 58,6$ dB, выходное отношение S / N_{Σ} составит 45,5 dB.

Из (17) следует, что если по магистрали включено n каскадно подсоединенных устройств с одинаковыми режимами работы (см. 16), то суммарное S / N_{Σ} определится как:

$$S / N_{\Sigma} = S / N - 10 \lg(n) . \quad (18)$$

Так, при каскадировании двух однотипных усилителей, выходное S / N_{Σ} понизится на 3 dB в сравнении с исходным (16).

➤ Отношение несущая/шум оптической системы, состоящей из передатчика и приемника определяется по формуле:

$$C/N_{\Sigma} = \frac{m^2}{2\Pi} \left(R + \frac{2q}{P_{ex}S} + \frac{I_n^2}{P_{ex}^2 S^2} \right)^{-1}, \quad (19)$$

где: m - индекс оптической модуляции;

Π - полоса телевизионного канала (Гц);

R - относительная интенсивность шумов передатчика (дБ/Гц);

$q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ - заряд электрона в кулонах;

P_{ex} - уровень входной оптической мощности оптического приемника (Вт);

S - чувствительность фотодетектора (А/Вт). Типовое значение составляет 0,85 А/Вт для длины волны 1310 нм и 0,95 для 1550 нм;

I_n - эквивалентный шумовой ток трансимпедансного каскада, стоящего следом за фотоприемником. Типовое значение составляет 7 пА \sqrt Гц.

Автор полагает, что приведенные методические указания позволяют правильно подойти к расчету шумовых параметров СКТ в той или иной ситуации. Наша компания с удовольствием ответит на все ваши вопросы, замечания и пожелания.

Май, 2009г.