

Отношение сигнал/шум – один из важнейших факторов, определяющих качество работы любой радиотехнической системы. Для сетей кабельного телевидения (СКТ, по терминологии нового ГОСТа) этот параметр тем более важен, что он является фактически единственной доступно измеряемой величиной, характеризующей качество работы всей системы в целом. Согласитесь, что честно измерить СТВ/CSO на реальной сети средствами кабельных операторов практически невозможно.

Вместе с тем, когда речь заходит о расчетах отношения сигнал/шум, понятия коэффициента шума прибора, шумовых характеристиках оптических трактов то, как правило, наблюдается полнейшая неразбериха и путаница. Вызвано это, по всей видимости, тем, что в нашей литературе отсутствует четкое и последовательное изложение перечисленных вопросов применительно к телевизионным сетям, а искать ответы, переворачивая горы литературы, не каждому по силам, да и времени на все не хватает. Поэтому мы решили попытаться прояснить эти понятия, чтобы у читателя возникла ясная и однозначная картина того, что же происходит на самом деле.

Настоящая статья отнюдь не претендует на глубокое исследование вопроса или какую-то особую новизну, и многим специалистам покажется весьма банальной – в ней говорится о хорошо известных вещах. Мы лишь попытались сконцентрировать накопленный опыт, чтобы помочь тем сотрудникам, кто испытывает некоторый дискомфорт от недостаточно ясного понимания проблемы. Цель данной работы – обратить внимание специалистов на некоторые нюансы классического расчета шумов и возникающие при этом заблуждения.

1. Понятия коэффициента шума и собственного шума устройства.

Каждый элемент сети в большей или меньшей степени генерирует электрический шум. Электроны в проводнике находятся в хаотическом температурном движении, поэтому на каждом сопротивлении, в каждом проводящем канале полевого транзистора возникает так называемый *температурный (тепловой) шум* сопротивления – белый шум, который равномерно распределен по всем частотам. Статистический (случайный) характер тока, текущего через р-п потенциальный барьер в полупроводниковых диодах и транзисторах, приводит к образованию так называемого *дробового шума*. Генерация и рекомбинация электронов и дырок в полупроводнике также имеет случайный характер и создает так называемый *шум генерации-рекомбинации*. При исследовании шумов в любой радиотехнической системе, в том числе в сети кабельного телевидения, все шумы (тепловые, дробовые, рекомбинационные), возникающие в отдельных элементах сети – усилителях, конверторах, кабелях, пассивных элементах – учитываются введением универсального параметра, определяемого для каждого элемента – так называемого *коэффициента шума* прибора. Зная эти коэффициенты (из каталогов) для всех входящих в систему составляющих и входное отношение сигнал/шум, можно однозначно определить отношение сигнал/шум на выходе. Учитывая важность этого параметра для дальнейшего изложения, остановимся подробнее на его определении и некоторых связанных с ним заблуждениях.

Определение термина «коэффициент шума» приводится практически в каждом учебнике по радиотехнике и устройствам СВЧ. Но в литературе он определяется по-разному. Очень широкое распространение получило определение коэффициента шума как показателя ухудшения отношения сигнал/шум на выходе прибора по сравнению с этим отношением на его входе. Т.е. коэффициент шума определяется здесь как отношение:

$$F = \frac{(C/N)_{in}}{(C/N)_{out}}, \quad (1.1)$$

или, в логарифмических единицах (дБ),

$$F_{(lg)} = 10 \lg \frac{(C/N)_{in}}{(C/N)_{out}}. \quad (1.2)$$

Во многих учебниках и справочниках определение коэффициента шума на этом, к большому сожалению, и заканчивается, что приводит в дальнейшем к путанице и недоразумениям.

Действительно, допустим, мы принимаем с эфирной антенны ТВ программу с отношением сигнал/шум 60 дБ (померили прибором на выходе антенны) и подаем ее на усилитель головной

станции, имеющий коэффициент шума 6 дБ (по каталогу). На выходе этого усилителя мы должны вроде бы получить отношение сигнал/шум 54 дБ, как следует из вышеприведенного определения, чего в действительности никогда не произойдет, а получим мы практически те же 60 дБ, что и на входе. Это происходит вследствие того, что в приведенном определении опущена очень существенная оговорка, что *под входным отношением сигнал/шум понимается отношение "чистого" (не содержащего шума) сигнала к (только!) тепловому шуму, создаваемому подключенным к входу устройства согласованному сопротивлению*, в качестве которого должно выступать выходное сопротивление генератора этого самого сигнала. Таким образом, речь здесь идет не о реальных значениях сигналов и шумов на входе и выходе, а о весьма искусственных величинах, что сводит на нет красоту и лаконичность приведенного определения.

Мы воспользуемся несколько иным определением коэффициента шума. Это определение приводится в ряде серьезных учебников, а также в Большой Советской энциклопедии и более физично по своей сути. Ниже будет показано, что оба эти определения (с указанной оговоркой) эквивалентны.

Под коэффициентом шума F устройства при температуре T будем понимать отношение полной мощности всех шумов на выходе этого устройства в полосе измерения Δf к выходной мощности шума такого же идеального (нешумящего) устройства в той же полосе при условии, что единственный источник входного шума в обоих случаях – тепловой шум согласованного сопротивления, подключенного к входу устройства и находящегося при температуре T .

Это определение не так лаконично и, может быть, наглядно как предыдущее, но зато гораздо более корректно. Отметим попутно еще одну маленькую, но важную деталь. Речь здесь идет о тепловом шуме, создаваемом именно *внешним*, подключаемым к входу сопротивлением, а *не входным (внутренним)* сопротивлением устройства, как указывается в некоторой литературе. Т.е. устройство представляется в виде черного ящика без внутренней структуры. Это очень важно иметь в виду, особенно при рассмотрении каскадирования устройств. В противном случае неизбежно возникнет путаница при выводе формул.

Если обозначить через K коэффициент передачи устройства (будем считать его постоянным в полосе измерения), а через $n_t K$ – мощность теплового шума согласованного сопротивления на входе в полосе Δf при температуре T , то для идеального (нешумящего) устройства мощность выходного шума будет равна $n_t K$ и коэффициент шума в соответствии с определением запишется как

$$F = \frac{N_{out}}{n_t K}, \quad (1.3)$$

где N_{out} – полная мощность всех шумов на выходе устройства в полосе Δf .

Для предотвращения путаницы в дальнейшем, сразу оговоримся, что здесь и ниже мы используем линейные единицы. При переходе к логарифмическим величинам мы это будем специально оговаривать и вводить индекс (lg) , как это сделано в формуле (1.2).

Полную мощность шума на выходе можно представить в виде суммы усиленного (если, допустим, речь идет об усилителе) входного теплового шума $n_t K$ и собственного шума устройства N^o , тогда можно записать:

$$F = \frac{n_t K + N^o}{n_t K} = 1 + \frac{N^o}{n_t K}, \quad (1.4)$$

откуда можно выразить собственный шум устройства через его коэффициент шума:

$$N^o = (F - 1)n_t K. \quad (1.5)$$

Заметим, что эти формулы справедливы для любого устройства, не обязательно усилителя.

Собственный шум – это параметр, эквивалентно описывающий шумовые характеристики устройства. В ряде случаев, особенно при расчете большого числа каскадно соединенных устройств пользоваться им удобнее, чем коэффициентом шума. В литературе можно встретить эквивалентное определение собственного шума, приведенного к входу устройства, n^o . Физически приведенный к входу собственный шум можно рассматривать как добавку к тепловому входному шуму, в результате которой на выходе устройства получается полный выходной шум: $N_{out} = (n_t + n^o)K$. Связь между n^o и N^o очевидна: $N^o = n^o K$, поэтому (1.5) переписывается в виде:

$$n^o = (F - 1)n_t. \quad (1.5')$$

Мощность теплового шума согласованного сопротивления в полосе Δf выражается известной формулой Найквиста:

$$n_t = kT\Delta f, \quad (1.6)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт·с/К – постоянная Больцмана,
 T – температура сопротивления, К,
 Δf – полоса измерения, Гц.

Для принятого у нас стандарта телевизионного вещания шумовая полоса выбирается равной 5,75 МГц, поэтому при стандартной температуре $T = 293$ К (20°C) получим $n_t = 2,32 \cdot 10^{-14}$ Вт или, в логарифмических единицах, $n_{t(\text{lg})} = 2,41$ дБмкВ (ниже мы специально остановимся на связи мощности и напряжения в логарифмических единицах).

Из определения приведенного к входу собственного шума n^0 , связи его с коэффициентом шума (1.5) и формулы Найквиста (1.6) вытекает еще один (уже третий!) альтернативный параметр для описания шумовых свойств устройства – его шумовая температура: $T_{\text{ш}} = (F - 1)T$. Для идеального (нешумящего) устройства его $T_{\text{ш}} = 0$.

Коэффициент шума – величина, которая может зависеть как от частоты, так и от температуры. Как правило, с ростом частоты и температуры она возрастает. В каталогах обычно приводится худшее значение этого параметра в рабочем частотном диапазоне при комнатной температуре. Зависимость коэффициента шума от температуры связана в основном с тепловыми шумами прибора, а от частоты – с шумами дробовыми и рекомбинации. Однако, в расчетах, как правило, эти зависимости не учитываются.

Покажем теперь эквивалентность приведенных определений коэффициента шума. Пусть на вход устройства подключено согласованное сопротивление, обеспечивающее тепловой шум n_t и действует какой-то сигнал C_{in} . Домножим числитель и знаменатель в (1.3) на C_{in} , получим:

$$F = \frac{C_{in} N_{out}}{C_{in} n_t K} = \frac{C_{in} / n_t}{C_{in} K / N_{out}} = \frac{(C/N)_{in}}{(C/N)_{out}},$$

что совпадает с формулой (1.1).

В заключение этого раздела заметим, что понятие коэффициента шума применимо не только к активным элементам сети, но и вообще к любому устройству, представляемому в виде четырехполюсника. Можно легко показать, что для пассивного устройства, имеющего затухание $L > 1$ (и, соответственно, коэффициент передачи $K = 1/L < 1$) коэффициент шума численно равен этому затуханию: $F = L$. Чем больше затухание в пассивном элементе сети, тем больше его коэффициент шума. Этот факт просто отражает затухание сигнала при прохождении его через пассивный четырехполюсник и не говорит о какой-то дополнительной генерации шума.

2. Коэффициент шума каскадированных устройств. Формула Фрииса.

Выше мы говорили о шумовых характеристиках отдельного устройства. В сетях кабельного телевидения сигнал, распространяясь от антенны к абоненту, последовательно проходит все элементы каждой ветви, т.е. по отношению к этому сигналу мы имеем каскадное включение устройств – усилителей, ответвителей, кабелей и т.п. Наша задача – определить шумовые свойства всей цепочки, зная характеристики каждого элемента.

Пусть мы имеем m каскадно включенных устройств, каждое из которых имеет собственный коэффициент передачи K_i , коэффициент шума F_i и все устройства между собой согласованы по входу и выходу, т.е. как это принято в телевидении имеют входной и выходной импеданс 75 Ом, что, как правило, всегда более-менее выполняется (рис.1). Пусть к входу первого элемента

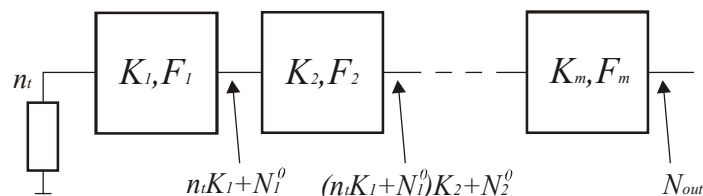


Рис.1

подключено согласованное сопротивление, обеспечивающее тепловой шум n_t на входе нашей цепочки. В соответствии с принятым определением найдем коэффициент шума всей этой цепи.

Входной тепловой шум сопротивления, проходя последовательно все элементы, будет усиливаться/ослабляться соответственно коэффициентам передачи устройств K_i и к нему будут

добавляются собственные шумы всех этих устройств N_i^o . Поэтому выходной шум нашей цепи будет равен:

$$N_{out} = n_t K_1 K_2 \dots K_m + N_1^o K_2 K_3 \dots K_m + N_2^o K_3 \dots K_m + \dots + N_{m-1}^o K_m + N_m^o. \quad (2.1)$$

С другой стороны, если бы наша цепочка была идеальной (нешумящей), то выходной шум составил бы $n_t K_1 K_2 \dots K_m$. Отсюда в соответствии с определением (1.3) получим коэффициент шума каскадно включенных устройств:

$$F = \frac{n_t K_1 K_2 \dots K_m + N_1^o K_2 K_3 \dots K_m + N_2^o K_3 \dots K_m + \dots + N_{m-1}^o K_m + N_m^o}{n_t K_1 K_2 \dots K_m} =$$

$$= 1 + \frac{N_1^o}{n_t K_1} + \frac{N_2^o}{n_t K_1 K_2} + \dots + \frac{N_{m-1}^o}{n_t K_1 \dots K_{m-1}} + \frac{N_m^o}{n_t K_1 \dots K_m}$$

откуда, вспоминая связь собственного шума и коэффициента шума (1.5):

$$N_i^o = (F_i - 1)n_t K_i,$$

сразу получим:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K_1} + \dots + \frac{F_{m-1} - 1}{K_1 K_2 \dots K_{m-2}} + \frac{F_m - 1}{K_1 \dots K_{m-1}}. \quad (2.2)$$

Это известная формула, полученная Фриисом еще в 1944 году. Здесь обычно обращают внимание на то, что результирующий коэффициент шума определяется, в основном, шумами первого каскада, поскольку F_1 входит в формулу без знаменателя, тогда как остальные слагаемые имеют в знаменателях коэффициенты передачи входящих в цепочку устройств. Если бы речь шла исключительно о каскадировании усилителей, для которых, как правило, $K_i \gg 1$, то это было бы вполне справедливо. У нас же в качестве звеньев цепи выступают *все устройства*, образующие ветвь СКТ, как усилители, так и все пассивные элементы – ответвители, аттенюаторы, отрезки коаксиального кабеля, для которых, как уже говорилось выше, коэффициент шума численно равен затуханию и может быть весьма большим. Коэффициент же передачи в этом случае будет существенно меньше единицы. Из этого можно сделать вывод, что для улучшения шумовых свойств цепочки необходимо стремиться к тому, чтобы первый каскад был каскадом усиления с возможно большим усилением и меньшим коэффициентом шума.

Приведем маленький пример. Пусть у нас антенна подключается к усилителю головной станции с коэффициентом шума F кабелем снижения с затуханием L . Т.е. мы имеем двухкаскадную систему, коэффициент шума которой по формуле Фрииса (2.2) будет равен:

$$F = L + \frac{F - 1}{1/L} = LF,$$

или в децибелах

$$F_{(lg)} = L_{(lg)} + F_{(lg)}.$$

И если коэффициент шума усилителя был, допустим, 10 дБ (не самый плохой усилитель), и затухание в кабеле снижения 10 дБ, то результирующий коэффициент шума системы будет 20 дБ, что уже, согласитесь, не так хорошо. Если же этот усилитель поставить на мачте до кабеля снижения, то результирующий коэффициент шума по формуле Фрииса получится равным 10,4 дБ, что при том же выходном уровне сигнала уже гораздо лучше. Поэтому при длинных спусках очень полезно использовать мачтовые антенные усилители. Здесь же стоит обратить внимание на следующее. Обычно в телевизионных усилителях перед собственно схемой усиления производители устанавливают аттенюатор и эквалайзер для выравнивания спектра входного сигнала. Коэффициент же шума усилителя, обозначенный в каталоге, приводится без учета этих деталей на входе – точнее, молчаливо предполагается, что они находятся в положении максимального пропускания. Как только мы начинаем пользоваться входными регулировками, у нас сразу же возрастает коэффициент шума. Установили аттенюатор на 10 дБ – и на 10 дБ вырос коэффициент шума! Об этом также необходимо помнить и учитывать это при расчетах сетей. Именно по этой причине в хороших усилителях на входе добавляют каскад предусиления и только после него устанавливают регулируемые аттенюатор и эквалайзер.

3. Расчет выходного отношения сигнал/шум в прямом канале.

Конечной целью расчета телевизионной сети по шумовым параметрам в прямом канале является определение итогового отношения сигнал/шум у абонента. В данном разделе будем

исходить из того, что в нашей сети имеется единственный источник сигнала – головная телевизионная станция. В принципе, возможна ситуация, когда к абоненту поступают сигналы от нескольких источников – допустим к сигналу, формируемому центральной головной станцией на каком-то этапе подмешиваются сигналы местных телевизионных студий. Расчет шумов в этом случае сводится к суммированию шумов от всех источников в полосе сигнала и имеет некоторую специфику, на которой мы здесь останавливаться не будем. Предположим, что источник сигнала всего один, что справедливо для большинства практических случаев.

Перед тем как приступить к дальнейшему изложению, давайте определим, что же мы понимаем под сигналом, шумом и отношением сигнал/шум в телевизионных кабельных сетях. Мы не заостряли внимания на этом вопросе выше, как бы считая, что это и так интуитивно понятно. На самом же деле, как показывает опыт общения с операторами, проектировщиками и инженерно-техническим персоналом СКТ, каждый понимает эти моменты по-своему, в результате чего происходят разночтения и казусы в подходах и трактовке результатов.

Прежде всего, отметим, что телевизионная сеть – это радиочастотная система, работающая с высокочастотными сигналами, т.е. с несущими, модулированными низкочастотными видеосигналами. Поэтому, говоря об отношении сигнал/шум применительно к системам СКТ всегда имеют в виду именно отношение мощности высокочастотного сигнала (несущей) к шуму, а не отношение видеосигнал/шум. Это находит отражение и в обозначениях, используемых в формулах. Отношение сигнал/шум в СКТ принято обозначать как C/N или CNR (Carrier to Noise Ratio), т.е. *несущая/шум*, в то время как для видеосигнала отношение *сигнал/шум* обозначают S/N или SNR (Signal to Noise Ratio). Для того чтобы не путать эти понятия мы в дальнейшем будем пользоваться термином несущая/шум, чтобы было ясно, что речь идет о высокочастотном сигнале. С другой стороны, качество изображения на телевизоре абонента определяется как раз демодулированным видеосигналом, поэтому представляет большой интерес связь между отношениями сигнал/шум на радио- и видеочастотах. Это довольно непростой вопрос, связанный с используемым телевизионным стандартом, глубиной модуляции, алгоритмом работы демодулятора и схем обработки сигнала в телевизоре, а также с особенностями человеческого зрения – они учитываются так называемой процедурой «взвешивания» шума путем добавления в измерительный тракт «взвешивающего фильтра», отражающего частотную зависимость нашего восприятия шума на экране. Мы не будем останавливаться подробно на этой проблеме, отметим лишь, что в литературе встречаются различные данные на этот счет – обычно предполагается, что взвешенное отношение S/R на 1,5-3 дБ выше соответствующего отношения C/N.

Если посмотреть на спектр высокочастотного аналогового телевизионного сигнала, точнее, на спектр его яркостной составляющей, то мы увидим, что почти вся мощность этого сигнала сосредоточена вблизи несущей – более 90% в полосе 1 МГц. Поэтому за уровень аналогового сигнала в сетях кабельного телевидения принято принимать эффективное напряжение немодулированной несущей. Средняя мощность за период этой немодулированной несущей будет тогда практически соответствовать полной мощности высокочастотного телевизионного аналогового сигнала. Для всевозможных расчетов в СКТ удобнее уровни сигналов выражать в логарифмических единицах, поскольку тогда практически все вычисления сводятся к операциям сложения-вычитания. Обычно за сигнал с нулевым уровнем принимают сигнал с действующим напряжением $U_0 = 1$ мкВ, а уровень реального сигнала определяют как $20 \lg$ их отношения:

$$C_{(lg)} = 20 \lg \frac{U}{U_0}, \text{ [дБмкВ]},$$

где U – действующее значение немодулированной несущей реального сигнала.

Действующее значение немодулированной несущей измеряется в реальном сигнале в момент передачи синхроимпульса (разумеется, для негативной модуляции несущей, принятой в большинстве стран).

Совершенно аналогично можно ввести логарифмические единицы для уровня мощности высокочастотного сигнала, определив его как $10 \lg$ отношения мощности сигнала к опорной мощности P_0 . Если теперь за опорную мощность принять мощность, выделяемую на сопротивлении $R = 75$ Ом сигналом с действующим напряжением 1 мкВ, то в логарифмических единицах уровни сигнала, выражаемые через напряжения и через мощности, будут совпадать:

$$C_{(lg)} = 10 \lg \frac{P}{P_0} = 10 \lg \frac{U^2 / R}{U_0^2 / R} = 10 \lg \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 = 20 \lg \frac{U}{U_0}, \text{ [дБмкВ]}.$$

Таким образом, мы видим еще одно очень ценное качество логарифмического представления уровня сигнала – совершенно не надо задумываться, о чем идет речь – напряжении

или мощности. Возникает одна универсальная величина – уровень. И когда мы говорим об отношении несущая/шум мы вполне можем пользоваться нашими измерительными приборами, отградуированными в дБмкВ, понимая под измеренным значением *мощность* сигнала, поскольку логарифмические единицы на самом деле являются величинами *безразмерными*. Здесь же можно коснуться и работы спектроанализатора. Обычно спектроанализатор измерителя ТВ сигналов имеет полосу измерения 1МГц, в которой, как уже говорилось, вблизи несущей сосредоточена практически вся мощность сигнала. Поэтому уровень несущей на экране спектроанализатора, отградуированного в дБмкВ, будет совпадать с измеренным уровнем сигнала в режиме просмотра изображения, когда происходит измерение действующего напряжения несущей во время синхроимпульса.

Перейдем теперь к понятию уровня шума. Если взглянуть на экран спектроанализатора, то наряду с пичками от аналоговых ТВ сигналов мы увидим более-менее равномерный во всем частотном диапазоне шумовой "забор", образующий как бы фундамент для полезных сигналов. Но уровень этого "забора" отнюдь не обозначает уровень шума, который входит в отношение несущая/шум. Не надо забывать, что спектроанализатор показывает нам не абсолютную величину мощности или уровня сигнала, а его спектральную плотность, т.е. мощность, приходящуюся на полосу измерения спектроанализатора. И только потому, что полоса измерения телевизионного спектроанализатора выбирается, как правило, 1 МГц, и практически вся мощность аналогового ТВ сигнала сосредоточена в этой полосе, мы наблюдаем на экране реальный уровень телевизионного сигнала. Для любого другого более широкополосного сигнала, а уж тем более белого шума, это совсем не так. Для нахождения полной мощности широкополосного сигнала или шума необходимо проинтегрировать спектральную плотность в исследуемой частотной полосе. Поскольку спектральная плотность шума практически постоянна в полосе канала, то для определения реального уровня шума достаточно умножить ее на ширину шумовой полосы. Для отечественного телевизионного сигнала SECAM шумовая полоса, как уже отмечалось, принята равной 5,75 МГц. Поэтому, для определения отношения несущая/шум, необходимо найти полную мощность шума в этой полосе. Для этого мы должны значение спектральной плотности шума (уровень того самого "забора") в [Вт/Гц] умножить на отношение шумовой полосы к полосе измерения спектроанализатора, т.е. 5,75МГц/1МГц. Поскольку спектроанализатор выдает значение спектральной плотности уже в логарифмических единицах, дБмкВ, то к этому значению мы просто должны добавить величину $10\lg(5,75\text{МГц}/1\text{МГц}) = 7,6$ дБ. Другими словами, если на экране спектроанализатора уровень нашего сигнала составляет 70 дБмкВ, а "уровень" шума 30 дБмкВ, то отношение несущая/шум будет равно 32,4 дБ, а вовсе не 40 дБ, как многие ошибочно полагают.

Все, что было сказано выше об уровне шума, можно в полной мере отнести и к измерению уровня цифровых сигналов. Тот "уровень" цифровых пакетов, который мы наблюдаем на спектроанализаторе, вовсе не является настоящим уровнем, пригодным для проведения расчетов, а точно так же нуждается в пересчете в зависимости от реально занимаемой полосы. Например, когда говорят, что уровень цифровых пакетов должен быть на 10 дБ ниже уровня аналоговых сигналов, то для цифровых пакетов QAM, занимающих полосу 6 МГц, это означает, что на экране спектроанализатора разница между ними должна составлять 17,8 дБ (т.е. 10 дБ + $10\lg(6\text{МГц}/1\text{МГц})$).

После всех этих предварительных замечаний перейдем, наконец, к вычислению выходного отношения несущая/шум. Пусть нам заданы уровни несущей C_{in} и шума N_{in} на входе цепочки, состоящей из m последовательно соединенных устройств, каждое из которых характеризуется коэффициентом передачи K_i и коэффициентом шума F_i (Рис.2).

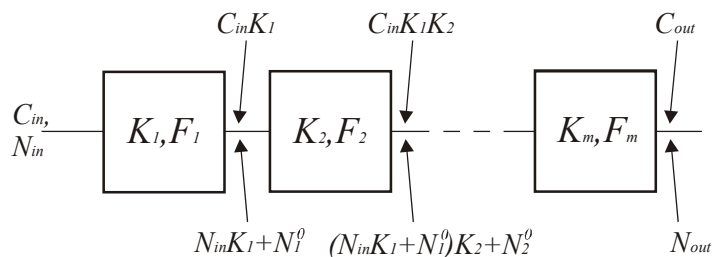


Рис.2

Наша задача – определить отношение C/N на выходе. Заметим, что теперь под входным

шумом N_{in} мы понимаем полный шум на входе цепочки, включая тепловой шум и все шумы, накопленные до этого. Т.е. тот реальный шум, который можно измерить.

Точно так же, как и при выводе формулы Фрииса (см. (2.1)) найдем уровень результирующего шума на выходе нашей цепи:

$$N_{out} = N_{in} K_1 K_2 \dots K_m + N_1^o K_2 K_3 \dots K_m + N_2^o K_3 \dots K_m + \dots + N_{m-1}^o K_m + N_m^o,$$

где $N_i^o = (F_i - 1)n_i K_i$ - собственный шум i -го устройства.

Сигнал на выходе будет равен:

$$C_{out} = C_{in} K_1 K_2 \dots K_m.$$

Деля одно на другое, получим:

$$\begin{aligned} \frac{N_{out}}{C_{out}} &= \frac{N_{in} K_1 K_2 \dots K_m + N_1^o K_2 K_3 \dots K_m + N_2^o K_3 \dots K_m + \dots + N_{m-1}^o K_m + N_m^o}{C_{in} K_1 K_2 \dots K_m} = \\ &= \frac{N_{in}}{C_{in}} + \frac{N_1^o}{\underbrace{C_{in} K_1}_{C_1}} + \frac{N_2^o}{\underbrace{C_{in} K_1 K_2}_{C_2}} + \dots + \frac{N_m^o}{\underbrace{C_{in} K_1 K_2 \dots K_m}_{C_m}} = \\ &= \frac{1}{C_{in} / N_{in}} + \frac{1}{C_1 / N_1^o} + \frac{1}{C_2 / N_2^o} + \dots + \frac{1}{C_m / N_m^o} \end{aligned}$$

Здесь мы ввели обозначение: C_1, C_2, \dots, C_m - выходные уровни сигналов соответственно на выходе 1-го, 2-го, ..., m -го устройства.

Таким образом, мы получили хорошо известную формулу для вычисления выходного отношения несущая/шум в сетях кабельного телевидения:

$$\frac{1}{(C/N)_{out}} = \frac{1}{(C/N)_{in}} + \frac{1}{(C/N)_1} + \frac{1}{(C/N)_2} + \dots + \frac{1}{(C/N)_m}, \quad (3.1)$$

или, в логарифмическом виде:

$$(C/N)_{out(lg)} = -10 \lg \left[10^{\frac{(C/N)_{in(lg)}}{10}} + 10^{\frac{(C/N)_{1(lg)}}{10}} + 10^{\frac{(C/N)_{2(lg)}}{10}} + \dots + 10^{\frac{(C/N)_{m(lg)}}{10}} \right]. \quad (3.2)$$

Очень важно иметь в виду, что в этих формулах, как следует из вывода, под отношением $(C/N)_i$ понимается отношение несущей на выходе i -го устройства к *собственному* шуму этого устройства:

$$(C/N)_i = \frac{C_i}{N_i^o} = \frac{C_i}{(F_i - 1)n_i K_i}. \quad (3.3)$$

Очень часто об этом забывают, опуская -1 в знаменателе и понимая под $(C/N)_i$ отношение выходного сигнала к *полному* выходному шуму устройства, в котором кроме *собственного* шума присутствует еще и усиленный *входной тепловой* шум. Это приводит к ошибкам в расчетах, которые накапливаются при увеличении числа каскадов.

Формула (3.2) очень удобна для практических расчетов, поскольку оказывается, что для определения выходного отношения несущая/шум достаточно рассмотреть лишь прохождение сигнала вдоль трассы, а шумовые параметры, входящие в формулу, оказываются свойствами входящих в цепочку элементов и могут быть определены заранее. Не стоит только забывать, что в качестве элементов нашей цепи необходимо рассматривать *все* устройства, вплоть до отрезков кабеля и используемых входных аттенуаторов/эквалайзеров в усилителях, иначе расчет получится неверным.

Остановимся теперь на расчете отношения несущая/шум для сети, использующей оптический сегмент. В принципе, расчет здесь совершенно аналогичен, если рассматривать систему «оптический передатчик-приемник» как отдельное устройство, включенное в цепь прохождения сигнала. Есть только одна особенность. В отличие от остальных компонентов сети, имеющих определенные, приводимые в каталогах, значения коэффициента шума, для системы оптический передатчик-приемник производители такой параметр не дают, но приводят графики зависимости выходного отношения несущая/шум для системы передатчик-приемник в зависимости от мощности оптического излучения на входе приемника и количества используемых каналов. Возникает вопрос, как пользоваться такими графиками при расчетах? Для ответа на него прежде всего заметим, что при измерениях производитель оборудования использует на входе системы «чистые» сигналы с генератора, следовательно входной шум обусловлен наличием

только теплового шума на входе передатчика. С другой стороны, измеренные значения, представленные на графиках есть отношение несущей к *полному* шуму на выходе оптического приемника, т.е. к шуму, складывающемуся из усиленного входного теплового шума и *собственного* шума системы. Если воспользоваться найденным из графика значением и непосредственно использовать его в формуле (3.2), то мы совершим ту же ошибку, о которой говорилось касательно формулы (3.3). Поэтому, строго говоря, необходимо поступать следующим образом. Найдя из графика выходное отношение несущая/шум для нужного числа каналов в сети при имеющемся входном оптическом уровне на приемнике и, зная расчетный уровень сигнала на выходе оптического приемника, определяем полную мощность шума на выходе. Далее определяем коэффициент передачи оптической системы как отношение сигнала на выходе приемника к сигналу на входе передатчика. По определению находим коэффициент шума системы (формула (1.3)) и подставляем все это в формулу (3.3). И только после этого можно использовать полученное для оптики значение C/N в формуле (3.2) для проведения дальнейших вычислений. Однако, справедливости ради, стоит заметить, что приведенная методика, хотя и является более точной, дает не очень существенную для практического расчета поправку в итоговое отношение несущая/шум и ей, особенно при ручных расчетах, в принципе, можно пренебречь.

И в конце – два слова о практических измерениях несущая/шум в сетях кабельного телевидения. Как уже говорилось в начале статьи, такие измерения – фактически единственная доступная оператору возможность объективного контроля качества сигнала. Все остальное – визуальная оценка на экране телевизора. И многие недорогие измерители уровня декларируют эту возможность. Как правило, алгоритм измерения заключается в следующем – пользователь выбирает канал, а прибор в автоматическом режиме меряет уровень несущей, затем отстраивается по частоте немного левее, за полосу канала, где, предположительно, никаких сигналов быть не должно, измеряет там уровень шума и, деля одно на другое, выдает результат. Насколько можно доверять этому результату? Боюсь разочаровать владельцев таких устройств, но доверять подобным измерениям мы бы очень не советовали. Во-первых, нет никакой гарантии, что там, куда прибор отстраивается нет ничего, кроме шума. Там могут присутствовать какие-то помехи, «хвосты» от соседних каналов и бог знает что еще, что будет восприниматься устройством как шум и ошибочно измерено. Во-вторых, мы уже говорили о необходимости пересчета уровней в зависимости от измерительной полосы прибора и шумовой полосы сигнала. Причем, шумовая полоса для сигналов PAL и SECAM, строго говоря, разная. Заложена ли в приборе такой алгоритм пересчета? Ни в одном описании популярных на нашем рынке измерителей мы не находили этой информации. Ну и последнее, но самое главное. Уровень шума для измерения отношения C/N должен измеряться обязательно *в полосе канала*, а не за ее пределами! В противном случае можно говорить лишь о шумовых характеристиках самой сети, но никак не о качестве телевизионного сигнала, поскольку сигнал может быть сильно зашумлен уже до ввода его в сеть кабельного телевидения. Действительно, сигнал с эфирной антенны может достигать уровня более 100 дБмкВ и измеритель C/N при этом просто зашкалит, в то время как картинку на телевизоре из-за шумов смотреть будет невозможно. В то же время, если бы прибор измерял уровень шума в полосе канала, допустим, там, где сигнал яркости уже «закончился», а звук еще не «начался», то результат измерения был бы существенно другим. Вообще говоря, поскольку отношение сигнал/шум у лучших студийных камер не превышает, как правило, 60 дБ и в дальнейшем при распространении сигнала, разумеется, не улучшается, то говорить о каких-то величинах, больших этого значения, вообще не имеет смысла. В этом отношении гораздо корректнее работают приборы, которые меряют уже демодулированное отношение сигнал/шум. Они измеряют размах яркостного сигнала и взвешенный шум в какой-нибудь пустой строке, выбираемой автоматически или вручную и усредняя результат по нескольким измерениям. Достоверность такой методики оказывается, конечно, на порядок выше.

В заключение, хотелось бы выразить особую благодарность Виталию Анатольевичу Германову за плодотворные дискуссии и важные замечания, оказавшие неоценимую помощь при подготовке данной работы.

4. Некоторые пояснения

При подготовке статьи к печати в журнале «Телеспутник» у редколлегии возникло несколько вопросов, которые я здесь привожу в режиме вопрос-ответ. Возможно, такие же вопросы возникли и у других читателей.

Вопрос: Как осуществляется переход к логарифмам при вычислении суммарного C/N – от формулы (3.1) к (3.2)?

В статье:

$$\frac{1}{(C/N)_{out}} = \frac{1}{(C/N)_{in}} + \frac{1}{(C/N)_1} + \frac{1}{(C/N)_2} + \dots + \frac{1}{(C/N)_m}, \quad (3.1)$$

или, в логарифмическом виде:

$$(C/N)_{out(lg)} = -10 \lg \left[10^{\frac{(C/N)_{in(lg)}}{10}} + 10^{\frac{(C/N)_{1(lg)}}{10}} + 10^{\frac{(C/N)_{2(lg)}}{10}} + \dots + 10^{\frac{(C/N)_{m(lg)}}{10}} \right]. \quad (3.2)$$

Это просто. Сначала выражаем слагаемые в правой (3.1) части через их логарифмический вид. Поскольку

$$(C/N)_{(lg)} = 10 \lg(C/N), \quad (1)$$

то, соответственно,

$$(C/N) = 10^{\frac{(C/N)_{(lg)}}{10}}, \quad (2)$$

а

$$\frac{1}{(C/N)} = 10^{-\frac{(C/N)_{(lg)}}{10}}. \quad (3)$$

Теперь подставляем (3) в (3.1) и получаем то, что стоит в квадратных скобках в (3.2). А потом просто в (3.1) левую часть записываем в логарифмическом виде, как в (1). Поскольку $(C/N)_{out}$ стоит в знаменателе, то перед 10 в (3.2) появляется минус. Вот и все.

Вопрос: Непонятно, почему при измерении полезного сигнала прибором, из него не надо вычитать уровень шума – ведь измеряться вроде должна сумма шума и полезного сигнала?

Строго говоря, совершенно верно – измеряется сумма. Но здесь надо иметь в виду следующее. Как правило, в сетях КТВ мы имеем дело с отношениями несущая/шум больше 40 дБ (по ГОСТу, как известно, отношение несущая/шум у абонента должно быть не менее 43 дБ – соответственно, во всей остальной сети это отношение должно быть выше). Кроме того, измеряя уровень сигнала в полосе 1 МГц, шум при этом тоже добавляется только в этой полосе. Следовательно, в полосе 1 МГц отношение несущая/шум будет еще больше – 47,6 дБ (добавка в 7,6 дБ появилась из-за «сужения» шумовой полосы с 5,75 МГц до 1 МГц).

А теперь посмотрим на абсолютный уровень несущей и шума при таком отношении C/N . Пусть, к примеру, $C_{(lg)} = 60$ дБмкВ, а $N_{(lg)} = 12,4$ дБмкВ соответственно. При этом в линейных единицах получим (эффективные значения): $C = 1$ мВ, а $N = 0,0042$ мВ, что почти на три порядка ниже. То есть погрешность измерения при этом (если не вычитать уровень шума) составляет не более 0,5%. Поэтому никто его и не вычитает.

Вопрос: Вы пишете, что для пассивных элементов $K_{ш}$ равен затуханию сигнала. Это значит, что собственные шумы пассивных элементов пренебрежимо малы?

Если подставить этот $K_{ш}$ в формулу, связывающую $K_{ш}$ и собственный шум устройства (1.5), то мы получим, что собственный шум пассивного устройства равен

$$N^0 = n_t - \frac{n_t}{L},$$

где L – затухание. Т.е. при больших затуханиях пассивный элемент ведет себя просто как согласованная нагрузка, а при отсутствии затухания он совсем не шумит, как будто его и нет, что совершенно логично. Насчет того, можно ли этим пренебрегать – если уровень шума уже достаточно большой (накопился), то пассивное устройство своего шума практически не добавит, в этом случае можно; если же пассивное устройство стоит в самом начале линии, когда уровень шумов еще соизмерим с тепловым, то в этом случае, безусловно, нет.