

УДК 621.391.63

В. И. КИРИЛЛОВ, доктор технических наук, Е. А. КОВРИГА, магистр технических наук, аспирант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

АНАЛИЗ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОТ СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Изложен комплексный подход к рассмотрению функциональной схемы волоконно-оптической и гибридной волоконно-коаксиальной сети кабельного цифрового телевидения; описаны шумы, возникающие в звеньях оптической системы; выведена результирующая формула для расчета отношения сигнал/шум и вероятности ошибок для всей волоконно-оптической системы. Приведена методика расчета собственных шумов в коаксиальном тракте, а также результирующего отношения сигнал/шум на выходе гибридного волоконно-коаксиального участка. На примерах систем с реальными параметрами проанализировано изменение защищенности от собственных шумов в зависимости от выбранной структуры сети.

В настоящее время все более широкое распространение в качестве абонентской «последней мили» получают сети, организованные по технологии FTTH «волоконно до квартиры», которые позволяют предложить абонентам не только услуги доступа в Интернет, IP-TV, телефонии, но и передачу широковещательных программ цифрового кабельного телевидения [1]. Одним из нормируемых параметров при построении таких сетей является вероятность ошибки, зависящая от отношения мощностей полезного сигнала и шума. При расчете телевизионной системы в качестве источников шумов рассматривают активные устройства: оптический передатчик ОП; волоконно-оптический усилитель ВОУ; оптический приемник ОПР [2].

Расчет шумов на выходе ОПР, вносимых ОП. Зная относительную спектральную плотность шума ОП R/N , чувствительность фотодиода ОПР r и среднюю оптическую мощность на входе ОПР $P_{\text{ОПР}}$, можно рассчитать мощность шума на выходе фотодетектора, которая создается за счет шумовых процессов в оптическом передатчике [2]:

$$P_{\text{ш_ОП}} = (rP_{\text{ОПР}})^2 R/N \Delta f R_n, \quad (1)$$

где Δf – шумовая полоса ОПР; R_n – сопротивление нагрузки фотодиода.

Расчет составляющей шума на выходе ОПР, обусловленной наличием ВОУ (эрбиевого усилителя EDFA). Основным источником шума в оптических усилителях – усиленная спонтанная эмиссия сигнала (ASE). Ее вклад в шум ОПР $P_{\text{ш_УС}}$ происходит за счет биений составляющих спонтанной эмиссии с усиливаемым сигналом [3]:

$$P_{\text{ш_УС}} = 4\eta P_{\text{ОПР}} \eta P_{\text{ОПР_ASE}} R_n, \quad (2)$$

где η – квантовая эффективность фотодетектора; $P_{\text{ОПР_ASE}}$ – мощность усиленной спонтанной эмиссии ASE, пересчитанная ко входу оптического приемника.

Расчет собственных шумов ОПР. В качестве абонентских ОПР будем рассматривать более дешевые по сравнению с лавинными фотодиодами PIN-диоды. Мощность собственных шумов фотодетектора в основном обусловлена двумя составляющими:

– дробовым шумом [2]

$$P_{\text{ш_ОПР_др}} = 2erP_{\text{ОПР}} \Delta f R_n, \quad (3)$$

где e – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

– тепловым шумом [4]

$$P_{\text{ш_ОПР_т}} = kTNF_{\text{предус}} \Delta f, \quad (4)$$

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

солютная температура резистора, °К; $NF_{\text{предус}}$ – шум-фактор предусилителя, следующего непосредственно за фотодетектором.

Расчет результирующего отношения сигнал/шум (ОСШ) ведется с учетом некоррелированности шумов ОП, ВОУ и ОПР, пересчитанных на выход фотодетектора ОПР:

$$P_c / P_{\text{ш}} = \frac{(rP_{\text{ОПР}} m)^2 R_n}{P_{\text{ш_ОП}} + P_{\text{ш_УС}} + P_{\text{ш_ОПР_др}} + P_{\text{ш_ОПР_т}}}, \quad (5)$$

где m – индекс модуляции; $P_{\text{ш_ОП}}$, $P_{\text{ш_УС}}$, $P_{\text{ш_ОПР_др}}$ и $P_{\text{ш_ОПР_т}}$ – мощности шумов активных элементов системы, рассчитываемые по формулам (1) – (4) соответственно.

Расчет вероятности ошибки в групповом электрическом сигнале. Вероятность ошибки в s -м цифровом канале ($s = 1, 2, \dots, n$, где $n \approx 60$) для многопозиционной одночастотной модуляции M_s -КАМ (M_s – число позиций модуляции КАМ-сигнала), которая применяется в сетях цифрового кабельного телевидения, можно рассчитать по следующей формуле [5, 6]:

$$P_{\text{ошс}} \approx \frac{2(1-L_s^{-1})}{\log_2 L_s} \cdot Q \left[\sqrt{\frac{3P_{\text{CS}} / P_{\text{шс}}}{L_s^2 - 1}} \right], \quad (6)$$

где Q – Гауссов интеграл ошибок; L_s – число разрешенных значений уровней амплитуд в s -м цифровом канале ($L_s = \sqrt{M_s}$); $P_{\text{CS}}/P_{\text{шс}}$ – отношение сигнал/шум в s -м цифровом канале.

Если в первом приближении принять, что на всех каналах применяют однотипные варианты КАМ и используется «плотная упаковка» группового электрического сигнала, то можно полагать, что $P_{\text{CS}}/P_{\text{шс}} = \text{const} = P_c/P_{\text{ш}}$ из (5) и $L_s = \text{const} = L$. Максимально допустимым значением вероятности ошибки для сетей цифрового телевидения, при которой работают восстановительные механизмы кода Рида-Соломона, является величина 10^{-4} [7]. Если провести расчет для сети [8], то ОСШ составит 21,52 дБ, а вероятность ошибки – $3,69 \cdot 10^{-8}$. Следовательно, полученное значение вероятности ошибки удовлетворяет нормам. Если предположить, что в предыдущем примере исключен ВОУ, то ОСШ составит 13,24 (или 11,23 дБ), вероятность ошибки $3,87 \cdot 10^{-2}$. То есть при таком построении сети нельзя восстановить требуемую помехозащищенность за счет кода Рида-Соломона.

Для уменьшения вероятности ошибки возможны следующие варианты проектирования:

1) установка волоконно-оптического усилителя;

2) уменьшение длины волоконно-оптического тракта и количества подключенных абонентов;

3) усложнение схемы оптического приемника для ослабления влияния тепловых шумов.

Однако следует иметь в виду, что существует достаточно большое число районов старой застройки, в которых телевизионные сигналы распределяются по коаксиальным линиям связи. В этом случае целесообразно строить гибридные оптико-коаксиальные сети НФС [2].

При расчете ОСШ по мощности на выходе сети НФС $S_{\text{вых}}$ необходимо учитывать ОСШ по мощности электрического сигнала на выходе ВОЛС $S_{\text{ВОЛС}}$ [2]:

$$1/S_{\text{вых}} = 1/S_{\text{ВОЛС}} + 1/S_{\text{к}}, \quad (7)$$

где $S_{\text{к}}$ – ОСШ по мощности коаксиального участка сети НФС без учета шумов от участка ВОЛС.

Мощность тепловых шумов на абонентской розетке рассчитывается по формуле [4]

$$P_{\text{ш.к}} = P_0(F_1 - 1)G_1L_1G_2L_2 \dots G_nL_n + \dots + P_0(1 - L_{n-1})G_nL_n + P_0(F_n - 1)G_nL_n + \dots + P_0(1 - L_n), \quad (8)$$

где $P_0 = kT_0\Delta f$ – мощность теплового шума, выделяемая в согласованную нагрузку; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/(Гц·град) – постоянная Больцмана; $T_0 = 293$ К – стандартная температура окружающей среды; Δf – шумовая полоса, Гц; F_i – коэффициент шума i -го усилителя ($i = 1, 2, \dots, n$); G_i – коэффициент усиления по мощности i -го усилителя. Потери в линиях определяются коэффициентом передачи по мощности L_i , который зависит от типа кабеля, длины кабельного участка, наличия муфт и ответвителей [9]. Если принять, что выполняется условие $G_iL_i \approx 1$, то формулу (8) можно привести к более простому виду [2, 9]:

$$P_{\text{ш.к}} \approx P_0(F_1 + F_2 + \dots + F_n). \quad (9)$$

При этом мощность полезного сигнала на абонентской розетке

$$P_{\text{с.к}} = P_{\text{вх.к}}G_1L_1G_2L_2 \dots G_nL_n \approx P_{\text{вх.к}}, \quad (10)$$

где $P_{\text{вх.к}}$ – мощность полезного сигнала на входе коаксиального сегмента.

Соответственно, отношение сигнал/шум

$$S_{\text{к}} \approx P_{\text{вх.к}}/[P_0(F_1 + F_2 + \dots + F_n)]. \quad (11)$$

Однако накопление тепловых шумов при прохождении телевизионного сигнала по сети кабельного телевидения не является основным ограничивающим фактором. Значительное ограничение возникает из-за взаимовлияния телесигналов, т. е. появления комбинационных помех второго и третьего порядка. При использовании нескольких последовательно включенных усилителей необходимо рассчитать максимальный выходной уровень (МВУ) на выходе каждого из них. Разница между МВУ и тепловым шумом на выходе n -го усилителя, выраженная в дБ, есть ОСШ. Для примера возьмем модуляцию КАМ-16. «Порог» срабатывания механизма кода Рида-Соломона наступит при ОСШ $s_k = 19$ дБ [10], т. е. для нормального функционирования сети необходимо, чтобы разница между уровнем мощности накопленного теплового шума и МВУ на выходе последнего усилителя составляла не менее 19 дБ. Как правило, в паспорте на усилители указывают МВУ в режиме усиления двух или трех сигналов. Реальные же МВУ для каждой конкретной сети можно определить из следующих выражений [2, 9]:

$$A_{\text{МВУ.к}} = A_{\text{МВУ.п}} - 7,5 \lg(K - 1); \quad (12)$$

$$A_{\text{МВУ.к.п}} = A_{\text{МВУ.к}} - 10 \lg(n), \quad (13)$$

где $A_{\text{МВУ.к}}$ – МВУ в режиме усиления K телевизионных каналов, дБмкВ; $A_{\text{МВУ.п}}$ – паспортное значение МВУ, дБмкВ; $A_{\text{МВУ.к.п}}$ – МВУ в режиме усиления K телевизионных каналов с числом идентичных усилителей, равным n , дБмкВ.

Как видно из результатов расчетов, полностью коаксиальная сеть длиной 35 км, по которой транслируются 60 каналов цифрового телевидения, обладает очень низким ОСШ (11 дБ). Следовательно, такая сеть не может быть реализована на практике. При построении гибридных оптоволоконных сетей и сокращении длины коаксиального участка обеспечивается возрастание ОСШ: 22 дБ при длине коаксиального тракта в 10 км.

Таким образом, при проектировании сетей НФС цифрового кабельного телевидения необходимо руководствоваться следующими положениями:

1) при расчете результирующего ОСШ следует учитывать ОСШ от двух участков – волоконного и коаксиального;

2) при использовании коаксиальных линий увеличивается число необходимого активного оборудования (усилителей) и снижается ОСШ по сравнению с волоконно-оптическим трактом той же длины;

3) для достижения оптимального соотношения цены и качества следует анализировать различные структуры сетей (в т. ч. и полностью волоконно-оптические). Однако каждый предлагаемый вариант требует самостоятельного расчета по вышеприведенной методике с учетом факторов стоимости и надежности сети доступа.

Список литературы

- 1 Типовое техническое решение по предоставлению телекоммуникационных услуг с применением оптического доступа FTTH на базе технологии пассивных оптических сетей / ОАО «Уралсвязьинформ». – Екатеринбург, 2010. – 32 с.
- 2 Приемные распределительные системы телевидения (проектирование и расчет) / М. С. Воробьев [и др.]. – Челябинск : Издатель Татьяна Лурье, 2002. – 240 с.
- 3 Складов, О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учеб. пособие / О. К. Складов. – СПб. : Изд-во Лань, 2010. – 272 с.
- 4 Кириллов, В. И. Многоканальные системы передачи : учеб. / В. И. Кириллов. – 2-е изд. – М. : Новое знание, 2003. – 751 с.
- 5 OFDM to power high bit rates in next-gen optical access networks / Naveena Genay [and oth.] // Lightwave. – Sept. 2009. – P. 32–36.
- 6 ГОСТ Р 52592-2006. Тракт передачи сигналов цифрового вещательного телевидения. Звенья тракта и измерительные сигналы. Общие требования. – М. : ИПК «Изд-во стандартов», 2007. – 32 с.
- 7 Бителева, А. Цифровое кабельное ТВ. Ч. 4. Сигнал DVB в распределительной сети. Использование альтернативных стандартов / А. Бителева // Теле-Спутник. – Янв. 2008. – С. 86–90.
- 8 Кириллов, В. И. Шумы в волоконно-оптических сетях кабельного цифрового телевидения / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Веснік сувязі. – 2012. – № 4. – С. 37–41.
- 9 Системы кабельного телевидения / З. А. Зима [и др.]; под ред. М. Ф. Тюхтина. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 600 с.
- 10 Песков, С. Н. Расчет вероятности ошибки в цифровых каналах связи / С. Н. Песков, А. Е. Ищенко [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.konturm.ru>. – Дата доступа: 22.12.2011.

Получено 15.11.2011

V. I. Kirillov, E. A. Kovriga. Analysis of the protection from internal noise of the cable networks of digital television.

The complex approach to consideration of a function scheme of a fiber-optical and hybrid fiber-coaxial network of cable digital television is carried out; the noise arising in links of the optical system is described; the resultant formulas for calculation of the relation of signal/noise and probability of errors for the all fiber-optical system are deduced. The method of calculating the noise in the coaxial tract, as well as the resulting signal/noise ratio at the output of the hybrid fiber-coaxial network is described. With the help of examples of systems with real parameters the changes in protection against noise, depending on the chosen network structure, are analyzed.