

УДК 681.3.06

РАСЧЕТ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЦИФРОВОЙ АБОНЕНТСКОЙ ЛИНИИ ADSL DMT

П.В. ТИШКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П.Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 19 января 2005

Предложена методика расчета пропускной способности цифровой абонентской линии, работающей по технологии ADSL DMT, с учетом условий распространения сигнала и вида модуляции.

Проведен расчет предельной пропускной способности абонентского участка на основе симметричного кабеля AWG 24 диаметром 0,5 мм в зависимости от длины линии связи.

Ключевые слова: предельная пропускная способность, технология ADSL DMT, метод модуляции TC-CAP, QAM.

Введение

В настоящее время на абонентском участке активно внедряются технологии xDSL (Digital Subscriber Lines — цифровые абонентские линии), позволяющие максимально использовать его пропускную способность. Наиболее приемлемой для индивидуального пользователя и в связи с этим имеющей максимальные перспективы является технология ADSL (Asymmetric DSL — асимметричная DSL).

Данная технология использует TC-CAP (Trellis Coded Carrierless Amplitude and Phase Modulation) модуляцию цифрового сигнала. Известно, что при применении данного вида модуляции достигается наибольшая длина регенерационного участка (ДРУ) абонентской линии. Однако основными сдерживающими факторами по применению этого метода модуляции являются отсутствие стандартизирующего документа, определяющего процедуры, в соответствии с которыми выполняется преобразование сигнала, и недостаточная гибкость лицензионной политики, которую проводит хозяин патента на CAP модуляцию — компания GlobeSpan. Взамен TC-CAP используется альтернативный метод — ADSL DMT (Discrete Multi Tone) на основе квадратурно-амплитудной (QAM — Quadrature Amplitude Modulation) модуляции с TC кодированием, что позволяет обеспечить высокую скорость и надежность передачи данных, возможность оперативной и точной адаптации приемопередающих устройств к характеристикам линии.

Цель работы — разработка методики расчета предельной пропускной способности цифровой абонентской линии, работающей по технологии ADSL DMT.

При использовании DMT [1] каждая из групп несущих частот модулируется цифровым сигналом с применением QAM. При этом весь частотный диапазон линии, начиная с частоты $f_1=138$ кГц, разбивается на независимые каналы шириной $\Delta f=4$ кГц с разносом между несущими $\Delta f_k=4,3125$ кГц. Для передачи данных в направлении абонента ("вниз") организуется до 249 частотных каналов, а от абонента ("вверх") до 25, причем мощность передаваемого

в линию сигнала не должна превышать $p_{\Sigma}=(13,5\pm 0,5)$ дБм. Для организации дуплексной связи используется асимметричная передача данных по одной паре симметричного кабеля в перекрывающихся частотных диапазонах с эхокомпенсацией. На этапе проверки качества линии в передающем устройстве исходя из уровня помех в частотном диапазоне каждого канала выбирается подходящая модуляционная схема QAM – M (M – число позиций). В каналах в зависимости от уровня шумов могут быть использованы методы модуляции и кодирования с различными значениями символьной скорости и, соответственно, M . При передаче данных информация распределяется между каналами пропорционально их пропускной способности. На приемной стороне выполняются операции объединения и восстановления исходного информационного цифрового потока.

Структурная схема системы связи, работающей на абонентской линии, представлена на рис. 1.

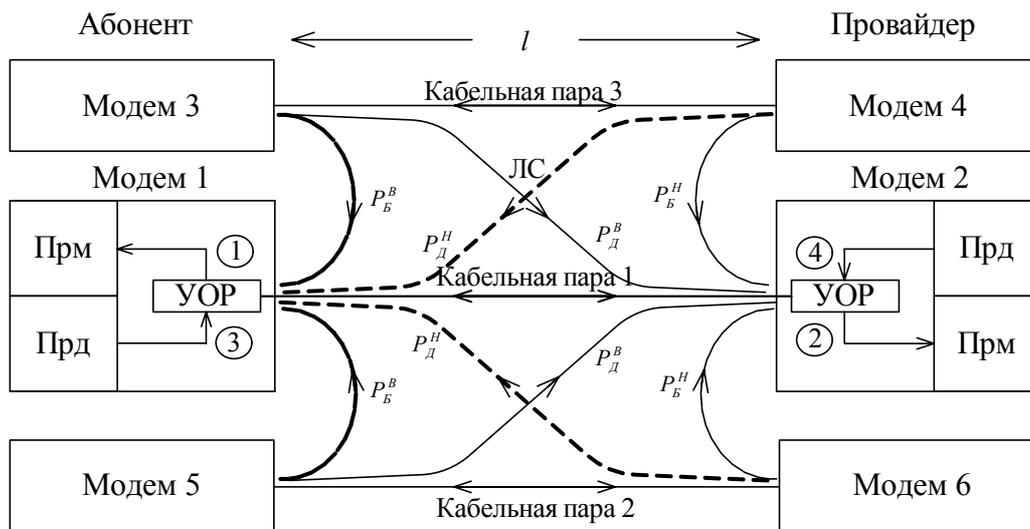


Рис. 1. Структурная схема организации связи по технологии ADSL DMT

Оконечное оборудование (модем) состоит из приемника (Прм), передатчика (Прд) и устройства объединения – разделения (УОР). Кабельная пара 1 входит в кабельную систему с другими N_{Π} кабельными парами с аналогичными параметрами.

Поскольку весь спектр разбит на N_B частотных каналов вверх и N_n вниз, расчет пропускной способности сводится к определению максимальной битовой скорости C_i в каждом i -м канале, при которой обеспечивается значение коэффициента ошибки (K_i) не выше максимально допустимого (K_{\max}):

$$K_{\max} \geq K_i. \quad (1)$$

Вероятность ошибки для QAM — M при использовании ТС кодирования определяется следующим образом [2]:

$$P_b(\gamma) = 1 - \left(1 - 2Q \left(\sqrt{\gamma \frac{4}{(\sqrt{M} - 1)^2}} \right) \right)^2 / \log_2(M), \quad (2)$$

где $Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right)$; $\operatorname{erfc}(x)$ — дополнительная функция ошибки; γ — значение отношения сигнал/шум (ОСШ) в точке регенерации сигнала, раз.

ОСШ в i -м канале на входе регенератора (точки 1 и 2 на рис. 1) в общем случае определяется как отношение мощностей сигнала в i -м канале $P_{C_{\Delta\delta} i}$ к мощности шумов и помех, действующих в полосе частот i -го канала $P_{\Phi_{\Delta\delta} i}$:

$$\hat{N}\tilde{\Phi}_i = P_{C_{\Delta\delta} i} / P_{\Phi_{\Delta\delta} i}. \quad (3)$$

Мощность сигнала на входе регенератора $P_{C_{\Delta\delta}}$ однозначно определяется мощностью полезного сигнала на выходе передающего устройства (Прд) предыдущего регенератора $P_{C_{\Delta\delta\delta}}$ (точки 3 и 4 на рис. 1) и параметрами кабельной линии. Мощность сигнала $P_{C_{\Delta\delta\delta}}$ связана с односторонней спектральной плотностью мощности модулированного сигнала $G_C(f)$ соотношением

$$P_C = \int_0^{\infty} G_C(f) df. \quad (4)$$

При модуляции DMT спектральную плотность мощности сигнала $G_{C_{\Delta\delta\delta} i}(f)$ в i -м канале определим как

$$G_{C_{\Delta\delta\delta} i}(f) = G_o(f - f_i) G_{ii\delta i}, \quad (5)$$

где $G_o(f) = \left(\sin\left(\frac{\pi(f - \Delta f/2)}{\Delta f/2}\right) / \frac{\pi(f - \Delta f/2)}{\Delta f/2} \right)^2$ — огибающая спектральной плотности

мощности при модуляции треугольными импульсами [3]; $G_{ii\delta i} = \frac{10^{0.1P_{\Sigma}-3}}{N} \int_0^{\Delta f} G_o(f) df$ — весовой коэффициент, где N — N_b или N_n ; $f_i = f_1 + \Delta f_k(i-1)$ — нижняя граничная частота i -го канала.

Затухание в линии зависит как от ее протяженности, так и от диапазона частот, в котором передается сигнал, и описывается частотно-зависимым километрическим затуханием $\alpha(f)$ [дБ/км], которое, в свою очередь, зависит от марки используемого кабеля. Затухание линии $a(l, f)$ [дБ] длиной l прямо пропорционально длине линии и равно [4]

$$a(l, f) = \alpha(f)l. \quad (6)$$

С учетом (4)–(6) мощность полезного сигнала $P_{N_{\Delta\delta} i}(l)$ в i -м канале на входе регенератора равна:

$$P_{N_{\Delta\delta} i}(l) = \int_{f_i}^{f_i+\Delta f} G_{C_{\Delta\delta\delta} i}(f, l) df = \int_{f_i}^{f_i+\Delta f} G_{C_{\Delta\delta\delta} i}(f) 10^{-0.1\alpha(f)l} df. \quad (7)$$

При расчете мощности шумов на входе регенератора необходимо учесть тепловые шумы линии и регенератора, переходные влияния (ПВ) на дальний конец (ДК) и ПВ на ближний конец (БК) от N_{Π} параллельно работающих однотипных систем.

Переходные влияния показаны на рис. 1 пунктирными линиями. Как видно, на входе приемника абонента будут одновременно действовать ПВ ДК с направления "вниз" P_A^i от каналов $1 \dots N_n$ и ПВ БК с направления "вверх" P_A^i от каналов $1 \dots N_b$ параллельных систем связи с полным частотным перекрытием соответствующих каналов. На входе приемника станции со-

ответственно будут одновременно действовать ПВ ДК с направления "вверх" P_D^B и ПВ БК с направления "вниз" от каналов $1 \dots N_B$ (сплошные линии). Необходимо рассчитать мощность помехи в i -м канале на входе каждого приемника с учетом количества параллельно работающих систем N_{Π} .

В общем случае мощности переходных помех на ближний и дальний конец определяются соответственно как

$$P_{\bar{A}} = \int_0^{\infty} G_{\bar{A}} df = \int_0^{\infty} \frac{G_{C_{1A0}}(f)}{10^{0,1A_{\bar{A}}(f)}} df, \quad P_{\bar{A}}(l) = \int_0^{\infty} G_{\bar{A}} df = \int_0^{\infty} \frac{G_{C_{1A0}}(f)}{10^{0,1A_{\bar{A}}(f,l)}} df, \quad (8)$$

где $A_{\bar{A}}(f)$, $A_{\bar{A}}(f, l)$ — переходные затухания на ближний и дальний конец данной кабельной системы; $G_{C_{1A0}}(f)$ — спектральная плотность мощности сигнала, передаваемого по симметричному кабелю, оказывающему влияние. С учетом того что параллельно работающие системы передачи (1–2, 3–4 и 5–6 на рис. 1) однотипны, то $G_{C_{1A0}}(f)$ можно определить как

$$G_{C_{1A0}}(f) = \hat{E}_{\bar{n}D}(M) \cdot G_{C_{\bar{A}0}}(f), \quad (9)$$

где $K_{\bar{n}D}(M) = \frac{1}{3} \frac{M/2 + 1}{M/2 - 1}$ — коэффициент, позволяющий рассчитать среднее значение мощности QAM – M сигнала с учетом того, что вероятности принятия того или иного значения на сигнальной плоскости одинаковы.

При определении $P_{\phi_{A0}}$ на основе экспериментальных данных были получены аппроксимационные выражения для расчета переходных затуханий на БК $A_{\bar{A}}(f)$ и ДК $A_{\bar{A}}(f, l)$ в зависимости от частоты и протяженности участка.

Мощность тепловых шумов линии и собственных шумов регенератора в точке принятия решения равна:

$$P_{\phi_{\bar{o}}} = kT\Delta f 10^{0,1K_{\phi}}, \quad (10)$$

где $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град — постоянная Больцмана; T — температура линии в градусах Кельвина; K_{ϕ} — коэффициент шума усилителя приемника регенератора, равный 1,3 дБ.

В рамках описанной модели были получены выражения для расчета $\hat{I}\tilde{N}\bar{\Theta}_i^i(l, M)$, $\hat{I}\tilde{N}\bar{\Theta}_i^i(l, M)$ в i -м канале с учетом переходных влияний от N_{Π} параллельно работающих систем передачи, тепловых и собственных шумов, параметров и протяженности линии связи, используемой на абонентском участке, на основании которых была рассчитана максимальная символьная скорость в канале $C_i = \log_2(M)$, при которой обеспечивается выполнение условия (1).

Максимальная пропускная способность V_{\max} на участке определяется как

$$V_{\max} = \sum_i C_i \frac{\Delta f}{2}, \quad (11)$$

где $i=1 \dots N_B$ для направлений "вверх" и $i=1 \dots N_H$ для направлений "вниз".

График значений C_i при $l=1,5$ км и $K_{O_{\max}}=10^{-7}$ приведен на рис. 2, а зависимость суммарной пропускной способности каналов V_{\max}^i и V_{\max}^A от длины линии при количестве влияющих линий $N_{\Pi}=1, 2, 3$ — на рис. 3.

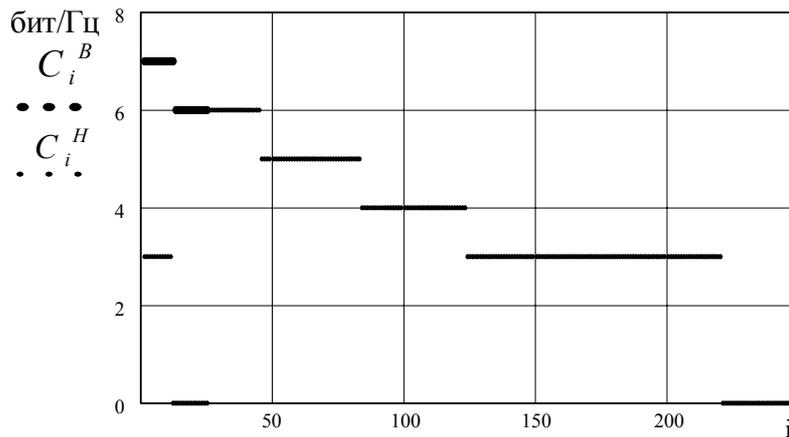


Рис. 2. График значений C_i при $l=1,5$ км и $K_{\text{Оmax}}=10^{-7}$

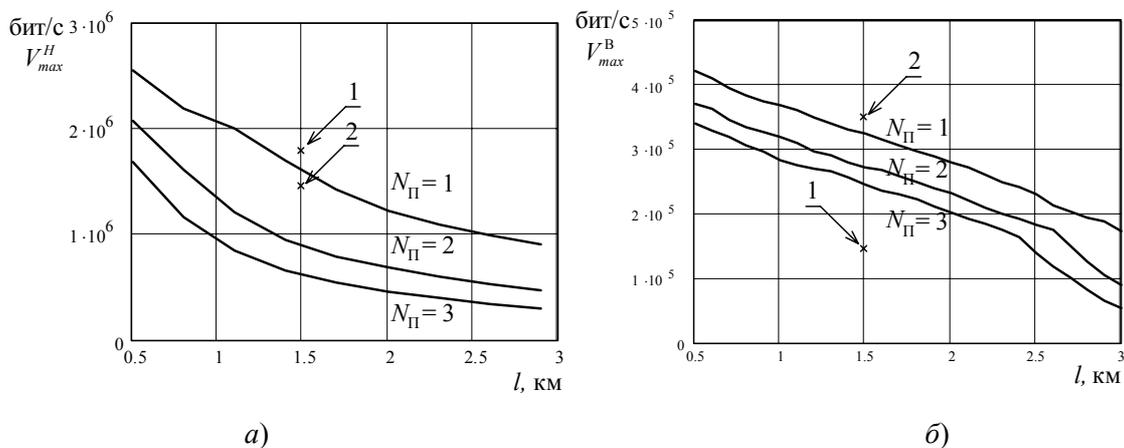


Рис. 3. Зависимость суммарной пропускной способности каналов V_{max}^H (а) и V_{max}^B (б) от длины линии при количестве параллельных линий $N_{\text{П}}=1, 2, 3$

Выводы

1. Как видно из рис. 2, в направлении "вниз" имеются "проблемные" каналы (в данном примере каналы с 10 по 25), в которых передавать данные нецелесообразно из-за большого значения ПВ и, соответственно, большого коэффициента ошибок.

2. В зависимости от того, в каком направлении требуется увеличивать пропускную способность канала, данные в направлении "вверх" либо "вниз" в "проблемных" каналах можно не передавать. В первом случае это вызовет увеличение пропускной способности "вниз" на 20% и снижение пропускной способности в направлении "вверх" на 50% (точки 1 на рис. 3, а, б), во втором случае — снижение на 20% в направлении "вниз" и увеличение на 10% пропускной способности в направлении "вверх" (точки 2 на рис. 3, а, б).

3. Увеличение на единицу параллельно работающих систем приводит к уменьшению пропускной способности в направлении "вниз" приблизительно на 30% и на 10% в направлении "вверх".

4. Приведенная методика позволяет рассчитать предельную пропускную способность абонентской линии с произвольными параметрами, работающей по технологии ADSL DMT.

5. По результатам расчетов возможна оптимизация пропускной способности цифровой абонентской линии в зависимости от потребностей пользователя.

CALCULATION OF ADSL DMT DIGITAL CUSTOMER LOOP CAPACITY

P.V. TSISHKOU

Abstract

The design procedure of bandwidth of the digital subscriber line working on technology ADSL DMT in view of conditions of distribution of a signal and a kind of modulation is offered. Calculation of limiting bandwidth of a user's site is lead on the basis of symmetric cable AWG 24 in diameter of 0.5 mm depending on length of the communication line, optimization of bandwidth of a subscriber section in length of 1.5 kms.

Литература

1. ITU-T Recommendation G.992.1. Asymmetric digital subscriber line transceivers.
2. *Тышков П.В.* Исследование принципов построения корпоративных сетей связи: Дис. ... магистра техн. наук: 45.01.01. Мн., 2004.
3. ITU-T Recommendation G.991.1 High bit rate Digital Subscriber Line transceivers.
4. *Линии связи: Учебник для вузов / И.И. Гроднев, С.М. Верник, Л.Н. Кочановский; Под ред. Л.Н. Кочановского.* 6-е изд., перераб. и доп. М., 1995.