

## ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОВОДНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ С РАЗЛИЧНЫМИ *xDSL* ТЕХНОЛОГИЯМИ

### Введение

Одним из основных направлений плана модернизации телекоммуникационных сетей общего пользования и ведомственных сетей связи является использование на существующих кабельных линиях связи (КЛС) *xDSL* технологий, которые позволяют существенно повысить скорость передачи информации в проводных каналах связи [1, 2].

В настоящее время наиболее распространенными и перспективными цифровыми технологиями передачи информации по кабельным каналам связи являются [3]:

- симметричные технологии *SHDSL* (модуляция *TC-PAM*);
- асимметричные технологии *ADSL* (модуляция *DMT*);
- сверхскоростная технология *VDSL* (модуляция *DMT, OFDM*).

Анализ технической литературы указывает на отсутствие обоснованных методов сравнительной оценки эффективности этих технологий и поэтому при выборе технологий для разработки и внедрения могут возникнуть проблемы, как у разработчика аппаратуры связи, так и оператора сети.

**Цель работы** – оценка предельной производительности проводных каналов связи на основе *xDSL* технологий и определение направлений развития современных цифровых систем передачи мультимедийной информации.

### Основная часть

Как известно, пропускная способность идеального канала связи (канала, в котором единственной причиной искажений является белый гауссовский шум  $P_{ш}$ ) с сигналами, у которых ограничена только средняя мощность  $P_c$ , определяется выражением Шеннона–Хартли [4]

$$C = \Delta f_c \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right) \text{ [бит/с]}. \quad (1)$$

В рассмотренной выше базовой формуле Шеннона (1) отношение сигнал/шум  $SNR = P/P_{ш}$  не зависит от частоты. Однако при передаче сигналов по реальным КЛС как сигнал, так и шум зависят от частоты. Поэтому при расчетах целесообразно перейти к частотно-зависимой версии формулы Шеннона [5].

Для анализа системы связи на основе проводных каналов рассмотрим модель канала, которая отображает наиболее важные характеристики среды передачи. Канал связи на основе КЛС можно представить в виде линейного фильтрового канала с аддитивным шумом [6].

На рис. 1 представлена модель такого канала связи с функцией передачи  $K(f, L)$  для КЛС длины  $L$ , где  $S_i(f)$ ,  $S_o(f)$  и  $N(f)$  – это спектральные плотности мощности *PSD* (*Power Spectral Densities*) соответственно входного сигнала, выходного сигнала и аддитивного шума, а  $SNR(f)$  – отношение сигнал/шум.

Известно [6], что при прохождении случайного сигнала через линейную систему спектральная плотность мощности выходного сигнала  $S_o(f)$  равна произведению спектральной плотности входного сигнала  $S_i(f)$  и квадрата модуля частотной характеристики системы.

$$S_o(f) = S_i(f) \cdot |K(f)|^2. \quad (2)$$

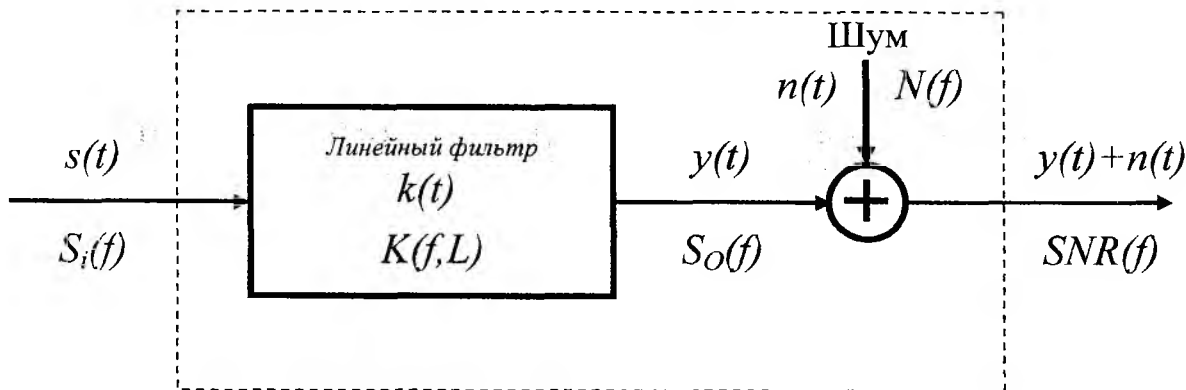


Рис. 1

Тогда отношение сигнал/шум  $SNR(f)$  на входе приемника при наличии в канале связи аддитивного шума  $N(f)$

$$SNR(f) = \frac{S_i(f) \cdot |K(f, L)|^2}{N(f)} \quad (3)$$

Используя принцип аппроксимации характеристики затухания канала и шумов путем разбиения общей полосы пропускания КЛС на  $N$  равных дискретных участков по частоте  $\Delta f$ , показанный на рис. 2, можно определить суммарную пропускную способность канала связи

$$C \approx \sum_{n=1}^N \Delta C_n \approx \sum_{n=1}^N \Delta f_n \cdot \log_2 [1 + SNR(f_n)] \text{ [бум/с]}, \quad (4)$$

где  $\Delta f_n = \frac{\Delta f_c}{N}$  – дискретная полоса пропускания;  $N$  – целое число.

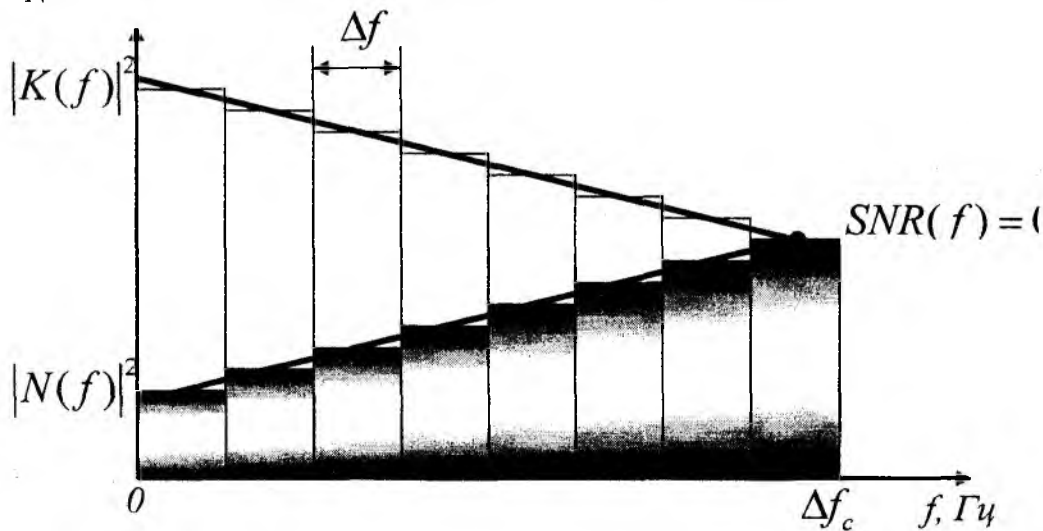


Рис. 2

Если уменьшать дискретную полосу пропускания  $\Delta f \rightarrow 0$ , то получим интегральное выражение формулы Шеннона для кабельного канала связи

$$C = \int_0^{\Delta f_c} \log_2 [1 + SNR(f)] df \text{ [бум/с]}, \quad (5)$$

где  $SNR(f)$  – отношение сигнал/шум, зависящее от частоты  $f$ .

При наличии в проводном канале связи только аддитивного белого гауссовского шума (*AWGN*) интегральное выражение формулы Шеннона приобретает вид

$$C = \int_0^{\Delta f_C} \log_2 \left[ 1 + \frac{S_i(f) \cdot |K_{КЛС}(f, L)|^2}{N_{AWGN}} \right] df \quad [\text{бит/с}], \quad (6)$$

где  $K_{КЛС}(f, L)$  – передаточная характеристики кабельного канала связи;  $N_{AWGN} = 4 \cdot kT_0 = -140 \text{ дБм/Гц} (10^{-17} \text{ Вт/Гц})$  – спектральная плотность мощности гауссовского белого шума (*AWGN*),  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Гц} \cdot \text{град}$  – постоянная Больцмана;  $T_0 = 270^\circ \text{ К}$  – температура линии связи по Кельвину.

Для моделирования передаточной характеристики  $|K_{КЛС}(f, L)|$  кабельного канала связи, являющейся функцией частоты  $f$  и длины линии связи  $L$ , можно воспользоваться известным выражением из рекомендаций *ETSI* [7]

$$|K_{КЛС}(f, L)| = e^{-k_p \cdot L \cdot \sqrt{f}}, \quad (7)$$

где  $f$  – частота сигнала [ $\text{Гц}$ ];  $L$  – длина кабельной линии связи [ $\text{км}$ ];  $k_p$  – коэффициент, зависящий от конструкции и диаметра жилы  $d$  кабеля.

В табл. 1 приведены значения конструктивного коэффициента  $k_p$  для разных типов кабеля.

Таблица 1

Тип кабеля	Обозначение кабеля ( <i>AWG</i> )	Диаметр жилы в $d$ , мм	Параметр $k_p$
<i>PE-04</i>	26	0,4	0,0213
<i>PE-05</i>	24	0,5	0,0150
<i>PE-06</i>	22	0,6	0,0116
<i>PE-09</i>	19	0,9	0,0085

На рис. 3 приведены частотные характеристики проводного канала связи для различных типов кабелей (1 –  $d=0,4$  мм, 2 –  $d=0,5$  мм, 3 –  $d=0,6$  мм, 4 –  $d=0,9$  мм), а на рис. 4 предельная пропускная способность канала связи для КЛС  $d=0,5$  мм в сравнении с требованиями к скорости передачи мультимедийной информации в зависимости от длины  $L$ .

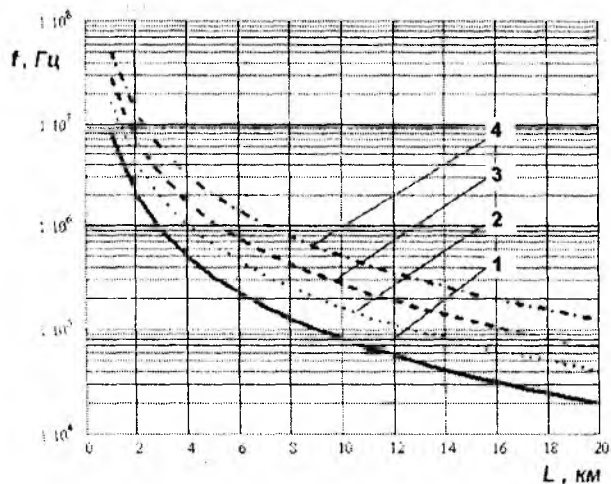


Рис. 3

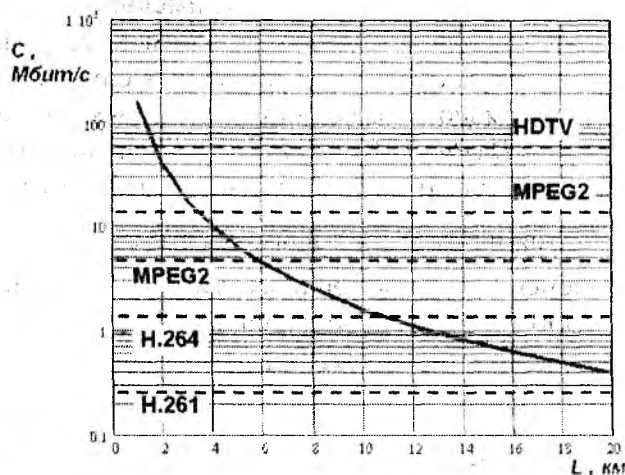


Рис. 4

Как показывают приведенные выше сопоставления, предельная пропускная способность канала на основе одной кабельной линии не обеспечивает передачу качественной мультимедийной информации на расстояния необходимые для развертывания ведомственных сетей

связи (5-10 км). Поэтому целесообразно перейти к использованию нескольких пар проводов для обеспечения заданных требований.

При этом предельная пропускная способность  $C_{MCC}$  такой многоканальной системы связи (MCC) без учета перекрестных помех и при одинаковых параметрах пар КЛС будет равна сумме пропускных способностей всех  $N$  отдельных каналов [8]:

$$C_{MCC} = \sum_{i=1}^N C_i = N \cdot C = N \cdot \Delta f \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right) \text{ [бум/с]}, \quad (8)$$

где  $N$  – количество каналов многоканальной системы связи.

На рис. 5 приведены зависимости пропускной способности многоканальной системы связи от длины КЛС и от количества пар проводов  $N$ .

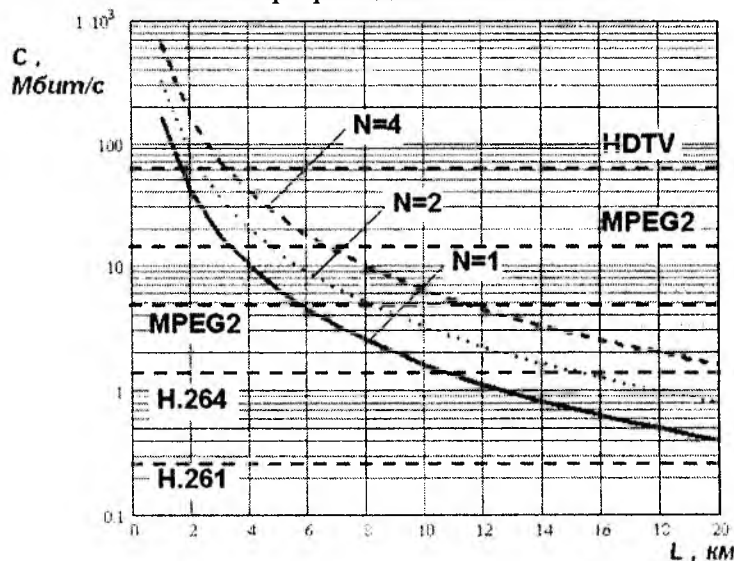


Рис. 5

Эффективность использования полосы пропускания проводного канала на основе существующих КЛС для каждой  $xDSL$  технологии определяется спектральными характеристиками передаваемых сигналов, видом модуляции и технологией передачи сигнала.

Симметричные  $xDSL$  технологии используют для передачи сигналов по КЛС многоуровневые линейные сигналы, имеющие компактный спектр, что важно для достижения максимальной дальности работы и помехоустойчивости системы связи [2].

Спектры сигналов современных симметричных систем ЦСПИ ( $HDSL$ ,  $SHDSL$ ,  $G.SHDSLbis$ ) не имеют явно выраженного энергетического максимума, а маска спектральной плотности мощности  $PSD$  ( $Power Spectral Density$ ) линейного сигнала зависит от типа линейного кода, скорости передачи информации  $R$  и определяется с учетом рекомендаций  $ITU-T$  [9]. Максимальная спектральная плотность мощности передачи составляет  $S_{SHDSL} = -40$  дБм/Гц и спектры сигналов современных симметричных  $xDSL$  технологий ( $HDSL$ ,  $SHDSL$ ,  $G.SHDSL$ ) не имеют явно выраженного энергетического максимума и поэтому критическим важным является минимальное значение  $SNR$  в полосе приема:

$$\Delta SNR_{DSL} = \min_M [SNR_{SHDSL}(f) - SNR_{MIN}] \text{ [дБ]}. \quad (9)$$

Работоспособность системы передачи будет обеспечена при выполнении условия  $\Delta SNR_{DSL} \geq 0$ . При этом требуемая защищенность  $SNR_{MIN}$  складывается из защищенности идеального приемника  $SNR_{MAR} = 10 \lg(2^M - 1)$  ( $margin$ ) [10], зависящей от кратности модуляции линейного сигнала  $M$ , и запаса неидеальности приемника  $SNR_{GAP}$

$$SNR_{MIN} = SNR_{MAR} + SNR_{GAP}, [\text{дБ}]. \quad (10)$$

Нужно отметить, что рекомендуемая для расчетов величина запаса неидеальности приемника  $SNR_{GAP} = 9,8 \text{ дБ}$  [10], обеспечивающая вероятность битовой ошибки  $BER = 10^{-7}$ , долгое время не меняется, что, с одной стороны, говорит о достаточно высоком уровне, достигнутом линейными интерфейсами систем связи, а с другой – о некотором технологическом пределе микросхемотехники приемо-передатчиков для *xDSL* технологий.

Исходя из приведенных выше запасов зависимость отношения сигнал/шум в дБ от частоты сигнала в канале связи на основе симметричных *xDSL* технологий может быть определена из выражения

$$SNR_{SHDSL}(f) = S_{SHDSL} + 20 \lg(|K(f, l)|) - SNR_{MAR} - SNR_{GAP} - N_{AWGN}, [\text{дБ}] \quad (11)$$

где  $SNR_{MAR1} = 8,5 \text{ дБ}$  для линейного кодирования *TC-PAM-16*;  $SNR_{MAR2} = 12 \text{ дБ}$  для линейного кодирования *TC-PAM-32*.

Оценка скоростного потенциала технологии проводилась с использованием математического пакета *MathCAD*. На рис. 6 представлены зависимости скорости передачи информации от длины линии связи для *SHDSL* технологий с кодированием *TC-PAM-16* и *TC-PAM-32* для КЛС типа ТПП-0,5.

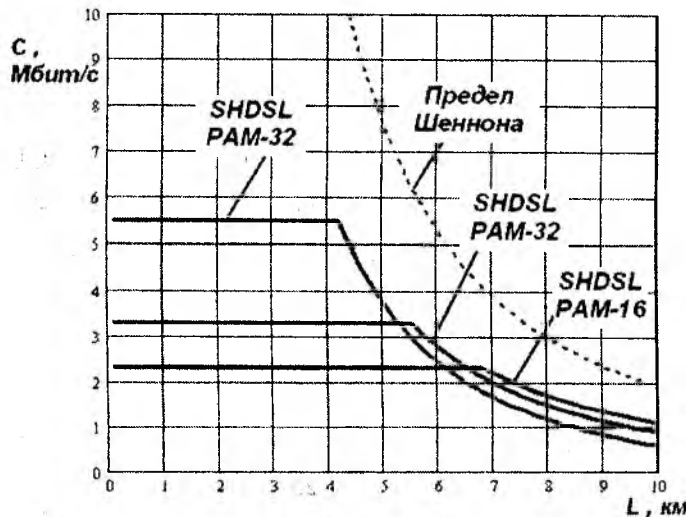


Рис. 6

Асимметричные технологии *ADSL* для передачи информации по каналу связи используют метод частотного разделения каналов на основе дискретной мультичастотной модуляции (*DMT*).

Частотный план распределения поднесущих частот (подканалов) для исходящего и входящего направления передачи технологий *ADSL* показан на рис. 7, а некоторые параметры технологии приведены в табл. 2 [11].

Используемая для *ADSL* частотная полоса разделена на две части: нисходящая линия (*DS-downstream*) – часть спектра, которая используется для передачи данных от сети в направлении конечного пользователя; восходящая линия (*US-upstream*) – часть спектра, которая используется для передачи данных в направлении от конечного пользователя к сети.

Каждая из этих частей полосы частот разделена на поднесущие (*subcarrier*). Полоса частот каждой поднесущей составляет  $4,3125 \text{ кГц}$  и служит для передачи определенного числа битов с помощью модуляции поднесущих частот многоуровневой квадратурной модуляции (*QAM*). На рис. 7 полоса частот до  $25 \text{ кГц}$  отведена для обеспечения работы обычного телефонного канала (*POTS - plain old telephony service*).

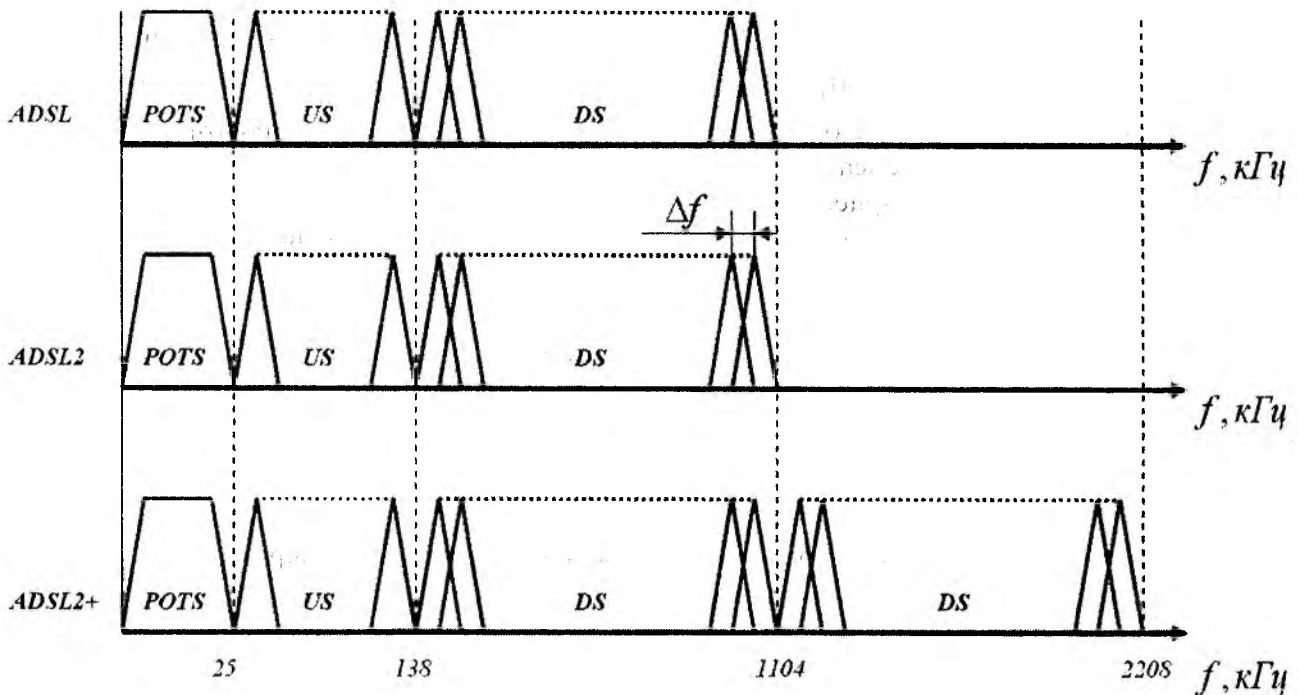


Рис. 7

Таблица 2

Параметр	Технология		
	ADSL	ADSL2	ADSL2+
Канальный интервал DMT $\Delta f$ , кГц	4,3125	4,3125	4,3125
Символьная скорость модуляции $f_{SYM}$ , Ксим/с	4,0	4,0	4,0
Максимальный уровень сигнала $P_{MAX}$ , дБм	+20,4	+20,4	+20,4
Нижняя полоса частот $\Delta f_H$ , кГц	25-138	25-138	25-138..276
Верхняя полоса частот $\Delta f_B$ , кГц	138-1104	138-1104	138-2208
Количество поднесущих частот $i$	256	256	512
Максимальная кратность QAM модуляции $\Gamma$	$\geq 8$	$\geq 12$	$\geq 12$
Максимальная скорость передачи $C_{MAX}$ , Кбит/с	$\leq 8000$	$\leq 12000$	$\leq 24000$

В процессе инициализации модемов и установления связи приемо-передатчики ADSL проводят тестирование линии связи для определения отношения сигнал/шум в каждом подканале для каждой поднесущей частоты и установки максимального значения уровня QAM-модуляции. Скорость передачи информации в  $i$  подканале  $V_i = f_{SYM} \cdot M_i$  зависит от защищенности  $SNR_i$  согласно формуле Шеннона для идеального приемника

$$V_i = f_{SYM} \cdot [\log_2 (1 + SNR_i)] = f_{SYM} \cdot \left[ \frac{\lg(10^{\frac{SNR_{i\text{дБ}}}{10}})}{\lg 2} \right], \quad (12)$$

где  $SNR_i = SNR(f_i) - SNR_{MAR} - SNR_{GAP}$  – отношение сигнал/шум в дБ на каждой поднесущей с учетом запаса помехозащищенности  $SNR_{MAR}$  для модуляции DMT.

Квадратные скобки в выражении (12) выделяют целую часть результата.

В табл. 3 приведены данные о допустимом минимальном значении  $SNR_{MIN}$  для разных видов модуляции  $QAM$ . Из табл. 3 видно, что увеличение затухания сигнала в каждом частотном подканале на каждые 3 дБ приводит к уменьшению кратности модуляции на 1 бит/символ, что эквивалентно снижению скорости передачи на 4 Кбит/с.

Кратность модуляции  $QAM$  может устанавливаться независимо для каждого частотного подканала.

Таблица 3

Количество бит на символ $r$	Размерность созвездия $2^r - QAM$	Отношение сигнал/шум для $BER 10^{-7}$ $SNR_{MIN}$ , дБ	Запас приемника $SNR_{GAP}$ , дБ
2	4 - $QAM$	15,5	9,76
3	8 - $QAM$	19,2	9,80
4	16 - $QAM$	22,5	9,88
5	32 - $QAM$	25,6	9,90
6	64 - $QAM$	28,7	9,92
7	128 - $QAM$	31,7	9,93
8	256 - $QAM$	34,8	9,94
9	512 - $QAM$	37,8	9,95
10	1024 - $QAM$	40,8	9,95
11	2048 - $QAM$	43,0	9,95
12	4096 - $QAM$	46,8	9,96
13	8198 - $QAM$	49,9	9,96
14	16384 - $QAM$	52,9	9,96
15	32768 - $QAM$	55,9	9,96

Суммарная скорость передачи канала связи на основе  $ADSL$  технологии определяется следующим выражением

$$V_{ADSL} = f_{SYM} \cdot \sum_{i_n} V_i \text{ [бит/с]}, \quad (13)$$

где  $i_n = \frac{f_H}{\Delta f}$  и  $i_B = \frac{f_B}{\Delta f}$  определяют количество каналов поднесущих частот для нисходящего ( $DS$ ) и восходящего потока ( $US$ ).

Максимальная скорость передачи канала связи на основе  $ADSL$  технологии может быть определена из выражения (13) при разной кратности модуляции  $QAM$  в каждом частотном канале и запасе защищенности, с учетом длины и типа КЛС.

При расчете необходимо учитывать, что максимальная спектральная плотность мощности передачи составляет  $S_{ADSL} = -40 \text{ дБм/Гц}$ . Неравномерность спектра сигнала по рекомендации [11] в полосе передачи составляет 11,3 дБ, что проявляется снижением спектральной плотности при переходе от частоты 1104 кГц к 2208 кГц (в области частот 26-1104 кГц спектральная плотность равномерна). Эту неравномерность спектра можно учесть введением дополнительного затухания сигнала в этом диапазоне частот.

На рис. 8 представлены зависимости скорости передачи нисходящего потока ( $DS$ ) информации от длины линии связи для  $ADSL$  технологий и КЛС типа ТПП-0,5.

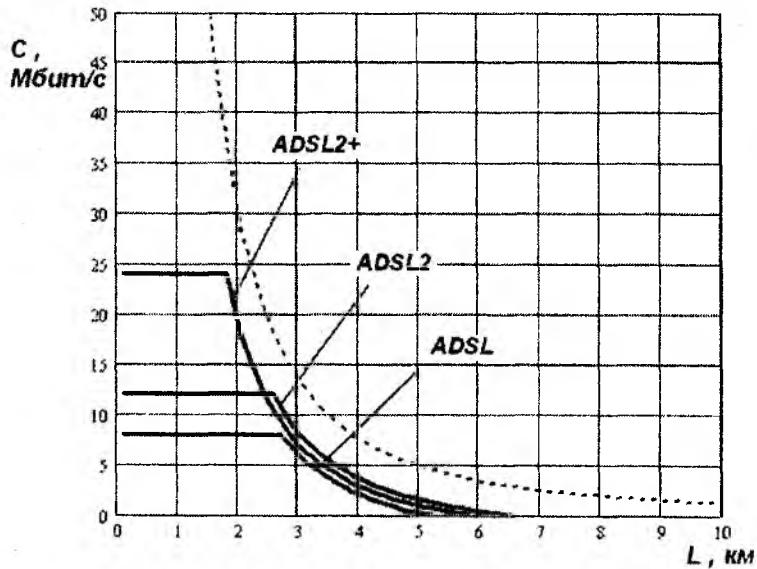


Рис. 8

Высокоскоростная технология *VDSL* для передачи информации по каналу связи использует один из двух методов передачи:

- QAM-модуляцию для нисходящего и восходящего потока;
- метод частотного разделения каналов на основе дискретной мультичастотной модуляции (*DMT*).

Частотный план распределения поднесущих частот (подканалов) для исходящего и входящего направления передачи технологий *VDSL* показан на рис. 9, а основные параметры технологии приведены в таблице 4 [12].

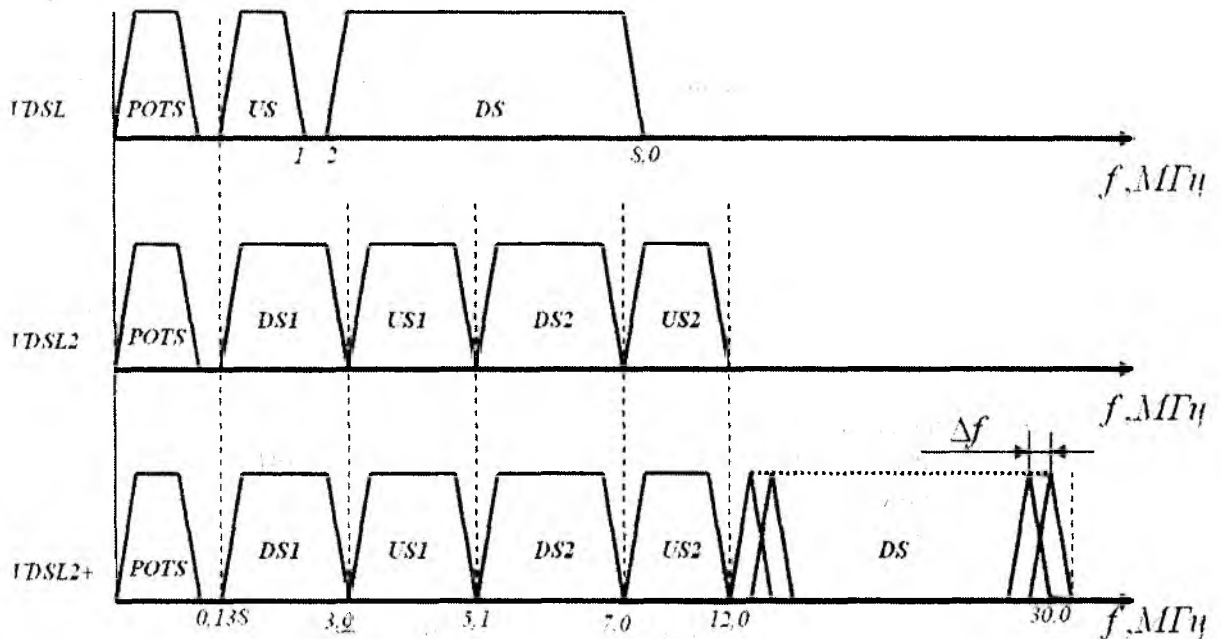


Рис. 9

Используемая для *VDSL* частотная полоса разделена на несколько частей: нисходящая линия (*DS-downstream*) – части спектра, которые используются для передачи данных от сети в направлении конечного пользователя; восходящая линия (*US-upstream*) – части спектра, которая используется для передачи данных в направлении от конечного пользователя к сети

Параметр	Технология		
	VDSL	VDSL2	VDSL2+
Канальный интервал DMT $\Delta f$ , кГц	-	4,3125	8,625
Символьная скорость модуляции $f_{SYM}$ , Ксим/с	-	4,0	8,0
Максимальный уровень сигнала $P_{MAX}$ , дБм	+20,5	+14,5	+20,5
Нижняя полоса частот $\Delta f_H$ , кГц	25-138	25-138	25-138..276
Верхняя полоса частот $\Delta f_B$ , кГц	138-1000	12000	30000
Количество поднесущих частот $i$	-	2048	4096
Тип модуляции	QAM	DMT	DMT
Максимальная кратность модуляции поднесущих частот QAM	-	$\geq 12$	$\geq 12$
Максимальная скорость передачи $C_{MAX}$ , Кбит/с	$\leq 26000$	$\leq 54000$	$\leq 100000$

Каждая из этих частей полосы частот разделена на поднесущие (*subcarrier*). Полоса частот каждой поднесущей составляет 4,3125 кГц (8,625 кГц для VDSL2) и служит для передачи определенного числа битов с помощью модуляции поднесущих частот многоуровневой квадратурной модуляции (QAM). На рис. 9 полоса частот до 25 кГц отведена для обеспечения работы обычного телефонного канала (POTS).

В процессе инициализации модемов и установления связи приемопередатчики VDSL проводят тестирование линии связи для определения отношения сигнал/шум в каждом подканале для каждой поднесущей частоты и установки максимального значения уровня QAM – модуляции. Максимальная скорость передачи канала связи на основе VDSL технологии может быть определена из выражения (13) для разной кратности QAM в каждом частотном канале и запаса защищенности, с учетом длины и типа КЛС. Максимальная спектральная плотность мощности передачи для VDSL2 увеличена и составляет  $S_{VDSL} = -55$  дБм/Гц.

На рис. 10 представлены зависимости скорости передачи нисходящего потока (DS) информации от длины линии связи для VDSL технологий и КЛС типа ТПП-0,5.

На рис. 11 представлены сравнительные зависимости максимальной скорости передачи информации от длины линии связи для различных xDSL технологий и КЛС типа ТПП-0,5.

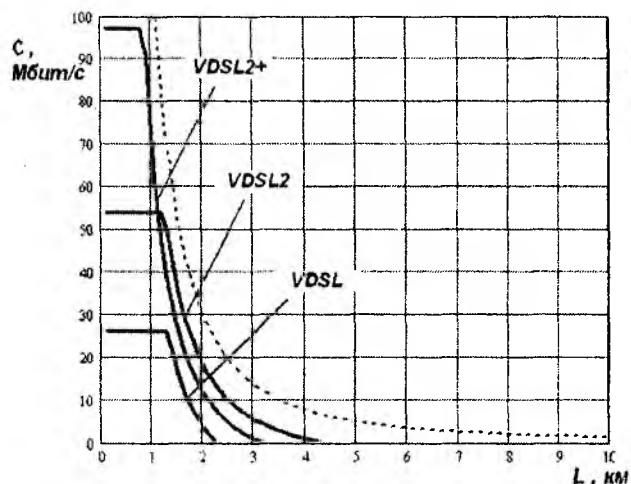


Рис. 10

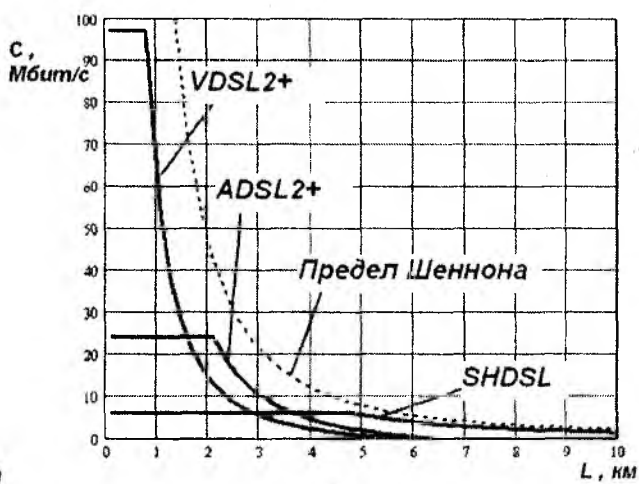


Рис. 11

## Заклучение

На основе анализа близости к пределу Шеннона производительности каналов связи с различными *xDSL* технологиями показано, что современные требования к скорости передачи мультимедийной информации на большие расстояния могут быть удовлетворены только путем перехода от построения одноканальных к построению многоканальных цифровых систем передачи информации. Такое решение позволяет более эффективно эксплуатировать существующую в Украине инфраструктуру кабельных линий связи за счет использования свободных выделенных пар проводов при применении многоканальных ЦСПИ.

Для обеспечения максимальной дальности работы системы связи целесообразно использовать симметричные *G.SHDSL* технологии, а для обеспечения максимальной производительности на короткие расстояния *VDSL* технологии. Важно также заметить, что именно стандарты этих технологий допускают работу по нескольким парам проводов КЛС. Поэтому реализация в многоканальных ЦСПИ на основе *xDSL* технологий функции мультиплексирования цифровых потоков позволит использовать на телекоммуникационной сети современные протоколы передачи мультимедийной информации.

**Список литературы:** 1. Шокало В.М. Результаты разработки проводных специальных систем передачи информации / В.М. Шокало., А.И. Цопа, В.В. Маслий // Междунар. науч. журнал «Компьютинг. Тернополь». 2008. Т. 7, Вып. № 1. С. 126-134. 2. Цопа А.И. Выбор линейных сигналов и анализ их спектральных характеристик в системах передачи информации с использованием *xDSL* технологий // Радиотехника. 2006. Вып. № 146. С. 66-74. 3. Парфенов Ю. А. Цифровые сети доступа: Медные кабели и оборудование / Ю.А. Парфенов, Д.Г. Мирошников. М.: Эко-Трендз, 2005. С. 288. 4. Shannon C. Communication in the Presence of Noise // Proceedings of the IEEE. 1988. Vol.86. №2.P. 447-457. 5. Williamson R. Assessment of the theoretical limits of copper in the last mile / R. Williamson, J. Klein, M. Reynolds and R. Jones // Final report. Sagentia, 2008. 6. Прокис Дж. Цифровая связь: Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. С. 800. 7. ETSI STC TM6. ACCESS TRANSMISSION SYSTEMS ON METALLIC CABLES. Cable reference models for simulating metallic access networks // Permanent Document TM6. 02/1997. 8. Кириллов В.И. Многоканальные системы передачи. М.: ООО «Новое знание», 2003. С. 751. 9. SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Digital sections and digital line system – Access networks. Single-pair high-speed digital subscriber line (*SHDSL*) transceivers // ITU-T Recommendation G.991.2 (*G.SHDSL.bis*), 10/2003. 10. Кочеров А.В. Ограничение скоростного потенциала асимметричной цифровой абонентской линии электрическими характеристиками медных кабелей // Электросвязь. 2004. № 11. С. 18-21. 11. SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Digital sections and digital line system – Access networks Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (*ADSL2*) // ITU-T Recommendation G.991.3. 01/2005. 12. SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Digital sections and digital line system – Access networks. Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (*VDSL2*) // ITU-T Recommendation G.993.2. 07/2007.

Харьковский национальный  
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 15.01.2010