

УДК 681.3.06

ОРГАНИЗАЦИЯ ДУПЛЕКСНОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СО СКОРОСТЬЮ 1 Гбит/с ПО ВИТОЙ ПАРЕ

П.В. ТИШКОВ

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

Поступила в редакцию 14 июня 2006

Предложена методика организации адаптивного частотного плана (АЧП) для технологии xDSL. Проведен расчет предельной скорости передачи данных по четырем парам неэкранированной витой пары категории 5 (UTP cat5) на расстояние 305 м (одна бухта кабеля) на базе технологии VDSL 2+ при использовании фиксированного (ФЧП) и адаптивного частотных планов. Определен выигрыш от использования АЧП по отношению к ФЧП.

Ключевые слова: предельная пропускная способность, UTP cat5, фиксированный частотный план, адаптивный частотный план, технология VDSL 2+, метод модуляции TC-CAP, QAM.

Введение

В литературе широко обсуждается возможность организации сверхширокополосного канала при использовании технологий Multiple Input, Multiple Output (MIMO — многоканальный вход, многоканальный выход) и Dynamic Spectrum Management (DSM — динамическое управление спектром (сигнала)) на основе микросхем, реализующих VDSL со стоимостью 7–10 у.е./порт [1]. Если будет возможность организовать гигабитную скорость по кабелю UTP cat5 на расстояние до 300 м (самое распространенное расстояние между подсетями), то это позволит значительно (на порядок) удешевить технические решения, отказавшись от использования оптических технологий.

Целью работы является разработка метода организации адаптивного частотного плана; расчет предельной пропускной способности цифровой абонентской линии на основе UTP cat5.

Постановка задачи

Для решения поставленной задачи была разработана модель, где в качестве исходных данных используются:

1. Полоса передаваемых частот: $F_H \div F_B$.
2. Маска спектральной плотности мощности (СПМ) $H(f)$.
3. Метод организации дуплексной цифровой связи: частотное разделение направлений передачи [4].
4. Метод модуляции: DMT [1], TC-QAM-M [2, 3]. Также представляет интерес использование TC-CAP-M.
5. Уровень суммарной мощности передаваемого сигнала $p_{\text{сум}}$.
6. Допустимый коэффициент ошибки $K_{\text{ош max}}$.

7. Тип кабеля UTP cat5. В связи с производством данного кабеля в четырехпарном исполнении и нецелесообразностью организовывать другие системы передачи данных в этом же кабеле или оставлять пары неиспользованными задействуем для организации связи одновременно все 4 пары.

Для соблюдения требований и норм электромагнитной совместимости (не мешать параллельно работающим системам в этом же диапазоне частот) необходимо определить максимальный уровень СПМ — маску СПМ. В связи с отсутствием точной маски СПМ для VDSL 2+ были проанализированы маски других технологий xDSL и на их основе получена ориентировочная маска СПМ. На рис. 1 приводится маска ADSL2+ [5] (единственная маска из широкополосных технологий xDSL, имеющихся в распоряжении). Как видно, эта маска ограничивает полосу пропускания до 3 МГц. Учитывая возрастание электромагнитного излучения кабеля с увеличением частоты и п. 5 исходных данных, с одной стороны, и резкое возрастание затухания в кабеле с ростом частоты и расстояния, с другой, для дальнейших расчетов возьмем маску с уровнем сигнала в ключевых точках, представленных в табл. 1 при $p_{\text{сум}} \leq 20,4$ дБм [4]. Ее график представлен на рис. 1.

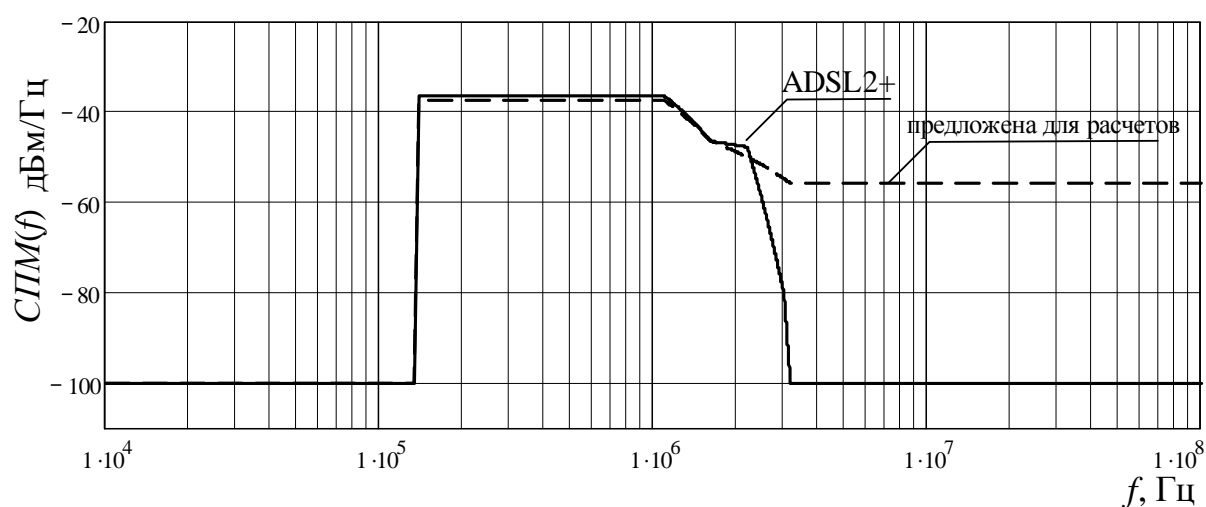


Рис. 1. Маска СПМ

Таблица 1. Маска спектральной плотности мощности

Частота, f кГц	$H(f)$
< 138	-100
138–1104	-37,5
1622	-46,5
≥ 3175	-56

Традиционно для передачи в технологиях xDSL используется так называемый фиксированный частотный план. Так для технологии ADSL DMT каждая из групп несущих частот модулируется цифровым сигналом с использованием QAM. При этом весь частотный диапазон линии, начиная с частоты $F_H=138$ 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. 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 [2, 3].

При использовании ФЧП DMT для организации дуплексного гигабитного канала характерно:

количество частотных каналов определяется как

$$N_K = \left\lceil \frac{F_B - F_H}{\Delta f_K} \right\rceil, \quad (1)$$

где $[x]$ — операция округления до меньшего целого;

в соответствии с п. 3 исходных данных каждый частотный канал можно использовать под передачу только в одном направлении (или "вверх" или "вниз").

Предлагается оценить предельную пропускную способность при использовании адаптивного частотного плана (АЧП). Алгоритм формирования АЧП следующий:

1. Передатчик передает в линию одновременно по 4 парам тестовый сигнал, занимающий 1-й канал в диапазоне частот $F_H \dots F_H + \Delta f$, где $\Delta f = 4$ кГц. На приемной стороне оценивается отношение сигнал-шум (ОСШ) и на его основе и с учетом $K_{\text{ош max}}$ принимается решение о максимальной скорости C_1 [бит/Гц] в данном канале (рис. 2,а).

2. Передатчик преаает в линию одновременно по 4 парам тестовый сигнал в полосе частот $F_H \dots F_H + \Delta f + \Delta f_K$ (рис. 2,б), что соответствует 2 частотным каналам. На приемной стороне аналогичным образом проводится оценка ОСШ и определяется C_2 . Если $C_2 \geq C_1$, то принимается решение о передаче полезного сигнала в полосе частот 2 каналов (рис. 2,в). В противном случае передача сигнала будет вестись отдельно в 1-м и отдельно во 2-м каналах (рис. 2,г).

3. На следующем этапе полоса частот верхнего по частоте тестового сигнала увеличивается на Δf_K (рис. 1,д,е) и аналогично п. 2 принимается решение о возможности (рис. 2,ж,и) или невозможности (рис. 1,з,к) использования расширенного по частоте канала.

Повторяем действия до F_B .

В результате для передачи информации организуется N_K каналов различных по полосе частот, обеспечивающих общую максимальную пропускную способность. Такой тест линии необходимо проводить периодически. Таким образом реализуется принцип DSM.

При этом необходимо отметить (для ФЧП и АЧП), что для установления симметрии в скоростях передачи в обоих направлениях количество и номера каналов, отдаваемых для каждого направления, адаптируются к условиям помехозащищенности.

Расчет максимальной скорости передачи V_{max} основывается на алгоритме, изложенном в [7].

Определим V_{max} следующим образом [3]:

$$V_{\text{max}} = 4 \sum_{i=1}^{N_K} \left(C_i \frac{\Delta f_i}{d} \eta_i \right), \quad (2)$$

где C_i (бит/Гц) — количество передаваемой информации в полосе 1 Гц в i -м канале; $d=2$ при использовании QAM и $d=1$ при использовании CAP; η — коэффициент, учитывающий наличие в составе сигнала бит, используемых для ТС-кодирования (служебных бит) и определяется как: $\eta_i = (X_i - 1) / X_i$, где X_i — параметр, связанный с использованием помехозащищенного кодирования (ТС-кодирования) и численно совпадающий с C_i . Множитель "4" появляется вследствие использования 4 пар кабеля.

Как известно, значение C_i не должно превышать величины, при которой коэффициент ошибки в i -м канале превышает допустимое значение:

$$K_{\text{ош}}(C_i, \gamma_i) \leq K_{\text{ош max}}, \quad (3)$$

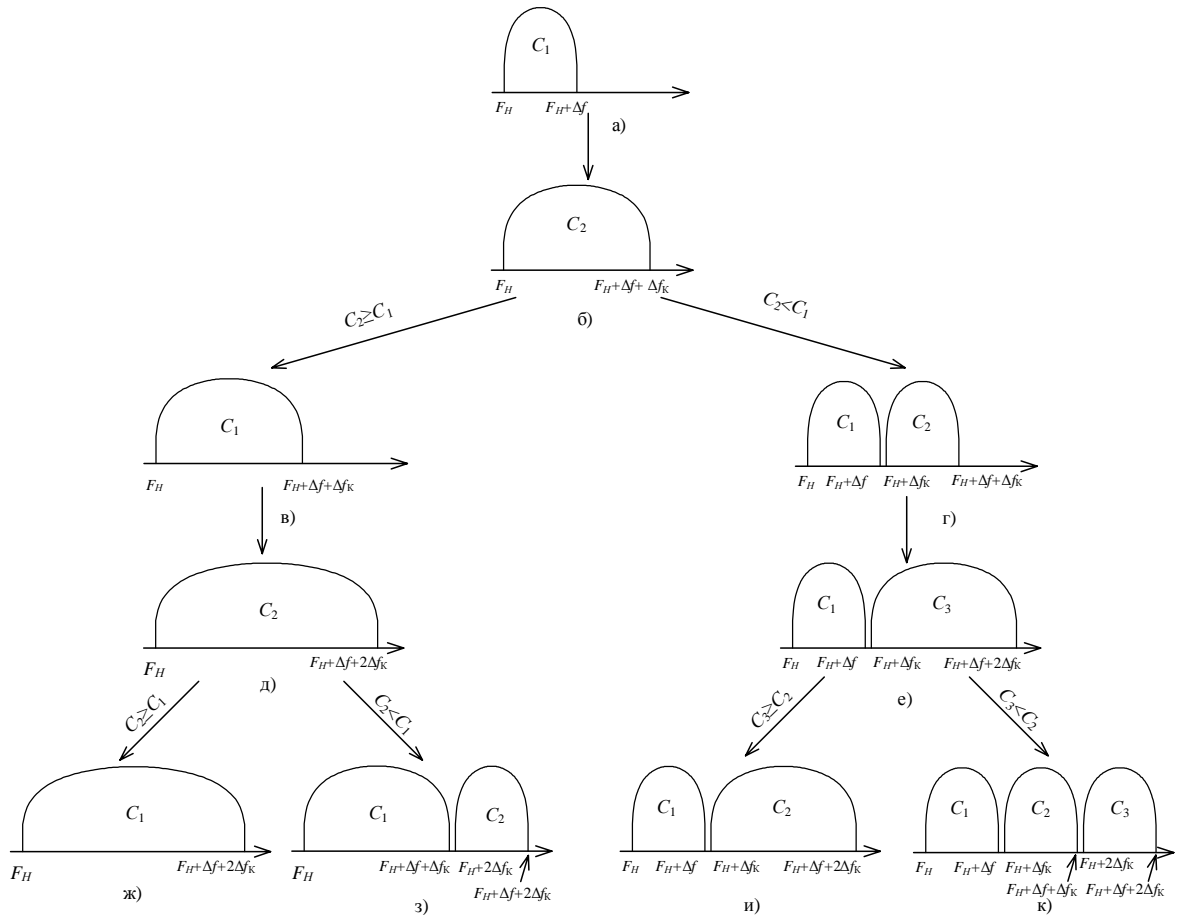


Рис. 2. Алгоритм организации АЧП

где $K_{\text{ош}}(C_i, \gamma_i)$ — функция, определяющая зависимость коэффициента ошибки в i -м канале от отношения сигнал–шум (ОСШ) в этом же канале γ_i при различных методах модуляции следующим образом [6, 7]:

$$K_{\text{ош}}(C_i, \gamma_i) = 1 - \left(1 - 2Q \left(\frac{\sqrt{4\gamma_i}}{\sqrt{(2^{C_i} - 1)^2}} \right) \right)^2 / C_i, \quad (4)$$

где $Q(z) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{\sqrt{2}} \right)$; $\operatorname{erfc}(x)$ — дополнительная функция ошибки.

ОСШ в i -м канале определим как

$$\gamma_i = \frac{P_{C_i}}{P_{\text{ш}_i}}, \quad (5)$$

где P_{C_i} и $P_{\text{ш}_i}$ — мощности полезного сигнала и шума в i -м канале в точке приема соответственно.

Мощность полезного сигнала в i -м канале в конце линии длиной l рассчитывается как [7]

$$P_{C_i}(l) = K_{M_i} \int_{f_{H_i}}^{f_{B_i}} G_i(f) 10^{-0,1\alpha(f)l} df, \quad (6)$$

где масштабирующий множитель K_{M_i} определяется как

$$K_{M_i} = 10^{0,1H \left(\frac{f_{B_i} + f_{H_i}}{2} \right) - 3}, \quad (7)$$

$G_i(f)$ — огибающая СПМ сигнала на входе линии в i -м канале для QAM, рассчитывается в соответствии с [7]:

$$G_{Ii}(f) = \begin{cases} \left(\frac{\sin \left(\frac{2\pi \left(f - \left(f_{B_i} + f_{H_i} / 2 \right) \right)}{f_{B_i} - f_{H_i}} \right)}{2\pi \left(f - \left(f_{B_i} + f_{H_i} / 2 \right) \right)} \right)^2, & f \in [f_{H_i}, f_{B_i}], \\ 0, & f \notin [f_{H_i}, f_{B_i}] \end{cases} \quad (8)$$

а для CAP как

$$G_{2i}(f) = \begin{cases} \left(\frac{\sin \left(\frac{\pi \left(f - f_{H_i} \right)}{f_{B_i} - f_{H_i}} \right)}{\pi \left(f - f_{H_i} \right)} \right)^2, & f \in [f_{H_i}, f_{B_i}], \\ 0, & f \notin [f_{H_i}, f_{B_i}] \end{cases} \quad (9)$$

Как было показано в [7], основными источниками шумов в xDSL системах являются переходные влияния на ближний конец (ПВБК), дальний конец (ПВДК) и тепловые шумы линии и приемного устройства. В связи с тем что для организации дуплексной цифровой связи используется частотное разделение каналов (п. 3 исходных данных), будут отсутствовать каналы, организованные для передачи данных с противоположных направлений, спектры которых перекрываются. И, как следствие, ПВБК будут отсутствовать. С учетом этого мощность шумов в i -м канале будет определяться как

$$P_{ш_i} = P_{ДК_i} + P_{ТШ_i}, \quad (10)$$

где $P_{ДК_i}$ и $P_{ТШ_i}$ — мощности помехи в i -м канале вследствие ПВДК и тепловых шумов соответственно. Эти составляющие можно рассчитать по следующим формулам [7]:

$$P_{ДК_i}(l) = K_{M_i} K_{ср}(C_i) \int_{f_{H_i}}^{f_{B_i}} G_i(f) 10^{-0,1A_{ДК}(f,l)} df, \quad (11)$$

где $A_{ДК}(f,l)$ — защищенность от ПВДК и определяется как [8, 9]

$$A_{ДК}(f,l) = A_{ДК}(f_1, l_1) - 10 \log \left(\frac{l}{l_1} \right) - 20 \log \left(\frac{f}{f_1} \right) + \alpha(f)(l + l_1), \quad (12)$$

где $A_{ДК}(f_1, l_1)$ — защищенность от ПВДК на частоте f_1 при длине линии l_1 ; $K_{ср}(C_i)$ — коэффициент усреднения мощности сигнала, равный [7]:

$$K_{ср}(C_i) = \frac{1}{3} \frac{2^{\lfloor C_i/2 \rfloor} + 1}{2^{\lfloor C_i/2 \rfloor} - 1}, \quad (13)$$

где $\lfloor x \rfloor$ — операция округления до наибольшего целого числа.

Мощность тепловых шумов линии равна:

$$P_{\text{ТШ}_i} = kT(f_{\text{В}_i} - f_{\text{Н}_i}), \quad (14)$$

где $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град; $T=290$ К.

Подставив формулы (6), (7), (10), (11), (14) в (5), получим общее выражение для определения ОСШ в i -м канале:

$$\gamma_i = \frac{\int_{f_{\text{Н}_i}}^{f_{\text{В}_i}} G_i(f) 10^{-0,1\alpha(f)l} df}{\frac{1}{3} \frac{2^{\lfloor c_i/2 \rfloor} + 1}{2^{\lfloor c_i/2 \rfloor - 1}} \int_{f_{\text{Н}_i}}^{f_{\text{В}_i}} G_i(f) 10^{-0,1A_{\text{ДК}}(f,l)} df + 2kT(f_{\text{В}_i} - f_{\text{Н}_i}) 10^{-0,1H \left(\frac{f_{\text{В}_i} + f_{\text{Н}_i}}{2} \right) + 3}}. \quad (15)$$

Формула (15) является универсальной и может использоваться для любого симметричного кабеля и любой маски СПМ.

Для дальнейших расчетов воспользуемся следующими параметрами UTP cat5.

Частотная характеристика затухания [10]:

$$\alpha(f) = 10^{-5} (k_1 \sqrt{f} + k_2 f 10^{-3} + k_3 \sqrt{f}), \quad (16)$$

где $k_1=1,967$; $k_2=0,023$; $k_3=0,05$; f в герцах. Данная формула работает при $f > 772$ кГц, но расчеты в [7] показали, что погрешность значений составляет $\pm 0,002$ дБ/м при $f > 80$ кГц, что не является критичным при оценочных расчетах.

Защищенность от ПВДК с учетом одновременного влияния от трех соседних пар определим по (12) при следующих значениях [11]: $f_1 = 1$ МГц, $l_1 = 100$ м $A_{\text{ДК}}(f_1, l_1) = 60,8$ дБ.

Частотные характеристики затухания и защищенности от ПВДК представлены на рис. 3.

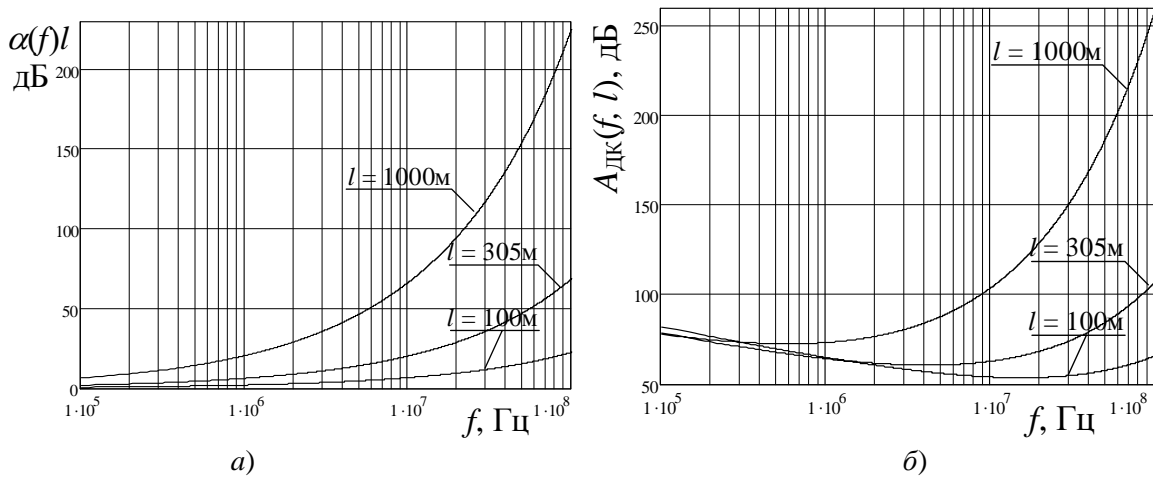


Рис. 3. Частотные характеристики затухания кабеля (а) и защищенности от ПВДК (б) UTP cat5

Для расчета V_{max} при ФЧП, как описывалось выше, определим границы частных каналов следующим образом:

$$f_{\text{Н}_i} = F_{\text{Н}} + \Delta f_{\text{к}}(i-1), \quad f_{\text{В}_i} = F_{\text{Н}} + f_{\text{Н}_i} + \Delta f, \quad i = 1 \dots N_{\text{к}}. \quad (17)$$

Границы частотных каналов $f_{\text{Н}_i}$ и $f_{\text{В}_i}$ для АЧП рассчитываются в соответствии и описанным выше алгоритмом.

Результаты расчета предельной пропускной способности V_{max} , полученные для ФЧП и АЧП при использовании QAM и CAP, длине линии связи $l=305$ м и следующих исходных данных: $F_{\text{Н}}=138$ кГц [1, 2]; $F_{\text{В}}=100$ МГц [1]; $K_{\text{ош max}}=10^{-7}$ сведены в табл. 2.

Графики изменения количества передаваемой информации в полосе 1 Гц C_i для каждого организованного канала в зависимости от вида модуляции, способа организации частотного плана и скорости передачи приведены на рис. 4. На рис. 5 представлены графики изменения C_i при использовании АЧП для QAM при разных длинах кабеля. Графики зависимости $V_{\max}(l)$ приведены на рис. 6. График выигрыша от применения АЧП по сравнению с ФЧП при разных длинах кабеля, определяемый как $V_{\max}^{\text{АЧП}}(l)/V_{\max}^{\text{ФЧП}}(l)$, представлен на рис. 7.

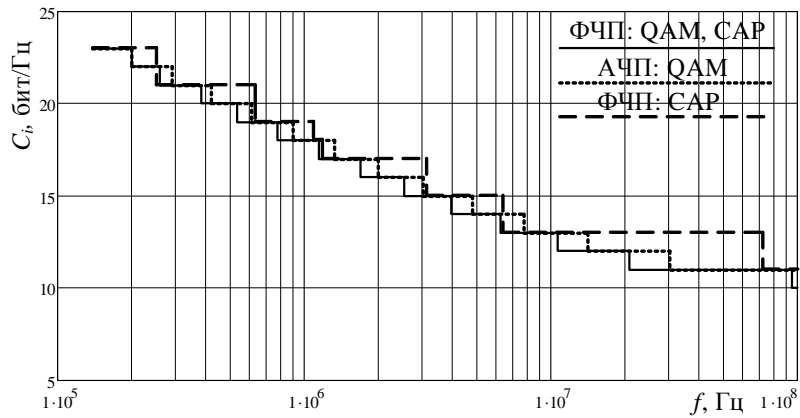


Рис. 4. Результаты расчетов C_i при $l=305$ м

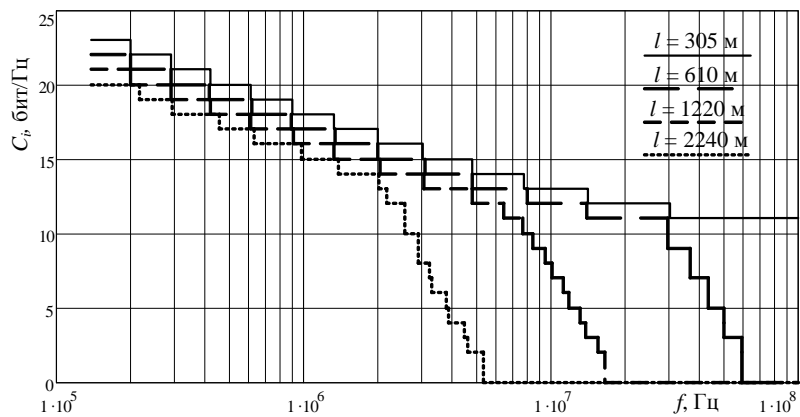


Рис. 5. Результаты расчетов C_i для АЧП при использовании QAM

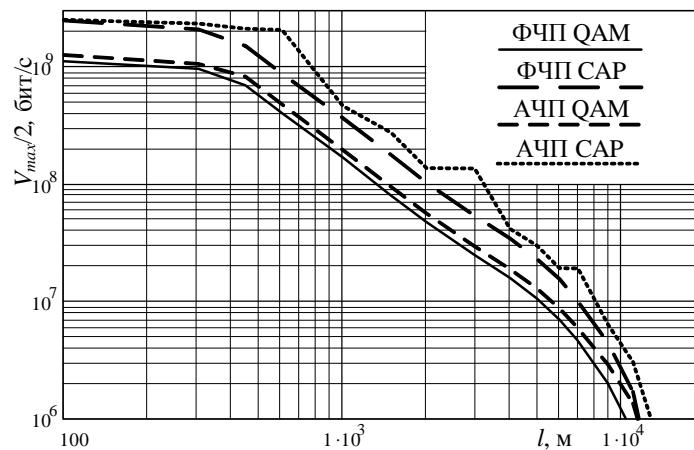


Рис. 6. Зависимость максимальной пропускной способности V_{\max} от длины линии связи

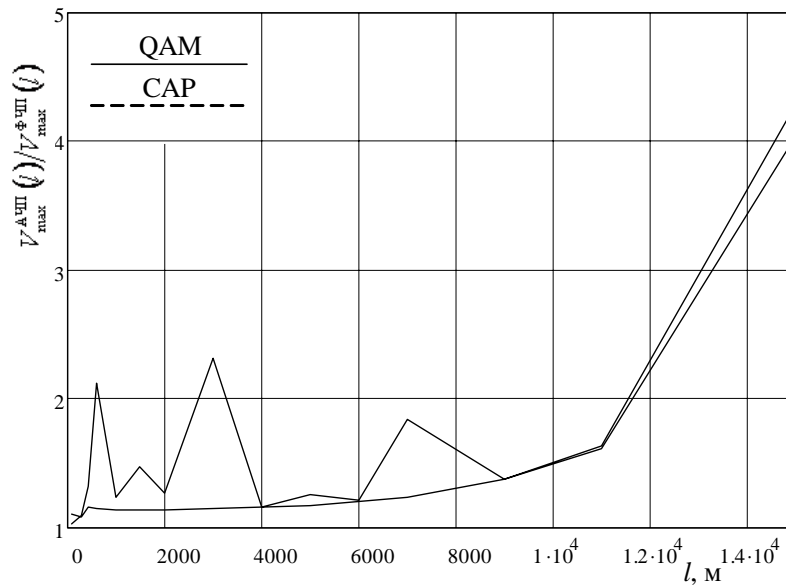


Рис. 7. Выигрыш от применения АЧП по сравнению с ФЧП при разных длинах кабеля

Таблица 2. Результаты расчета предельной скорости передачи данных при длине линии связи $l=305$ м

Тип частотного плана	Вид модуляции	$V_{\max} \cdot 10^9 / 2$, бит/с	$\rho_{\text{сум}}$, дБм
Фиксированный	QAM-N	0,97	20,042
	CAP-N	1,94	20,042
Адаптивный	QAM-N	1,063	20,4
	CAP-N	2,329	20,174

Выводы

1. Принципиально возможна передача информации со скоростью 1 Гбит/с по 4 парам UTP cat5 на расстояние свыше 300 м в полнодуплексном режиме при использовании ФЧП с применением CAP-модуляции и АЧП с применением как QAM, так и CAP.

2. При использовании ФЧП вид модуляции на значение C_i не влияет (рис. 4). Это можно объяснить малой шириной одного канала $\Delta f=4$ кГц, в пределах которого изменением параметров линии можно пренебречь. Поэтому условия распространения всех спектральных компонент одинаковы.

3. Использование АЧП при любом виде модуляции дает выигрыш в пропускной способности и составляет от 1,1 до 3,5–4 раз. Это связано с тем, что в условиях широкого частотного канала высокочастотные компоненты затухают в значительно большей степени (рис. 3), но из-за формы огибающей спектра (8) или (9) уменьшение их уровня в меньшей степени влияет на суммарную мощность сигнала. Причем с ростом длины линии выигрыш растет, что объясняется увеличением скорости изменения характеристик кабеля при увеличении его длины.

4. Анализ результатов моделирования (рис. 1 и 5) показал, что весь частотный диапазон можно разбить на 2 участка: низкочастотный (до 2 МГц) и высокочастотный (выше 2 МГц). Использование всего диапазона частот оправдано при длине кабельной линии до 2 км. При больших длинах кабеля целесообразно использовать только низкочастотный диапазон, что объясняется низким уровнем выходного сигнала в высокочастотном диапазоне в связи с резким увеличением затухания сигнала в кабеле на этих частотах и, как следствие, ростом уровня тепловых шумов в точке приема и доминированием тепловой шумовой составляющей, понизить которую невозможно.

5. Представляет интерес применение АЧП или ФЧП в широкополосном исполнении при использовании высокочастотных кабелей (типа КСПП 1×4×1,2). При их применении можно ожидать значительного увеличения или максимальной пропускной способности, или предельной длины линии связи.

6. Наряду с увеличением пропускной способности использование АЧП позволяет значительно уменьшить количество одновременно используемых несущих, что упрощает аппаратную реализацию, несколько усложняя программное обеспечение, отвечающее за инициализацию и тестирование системы.

THE ORGANIZATION OF THE DUPLEX DATA LINK WITH A SPEED 1 Gbit/s OVER TWISTED PAIR

P.V. TSISHKOU

Abstract

The technique of the organization of the adaptive frequency plan (AFP) for technology xDSL is offered. Calculation of top speed of data transfer over UTP is carried out. The gain from use AFP is determined.

Литература

1. *Башилов Г.* Медные залежи // Connect! Мир связи. 2005. № 7.
2. ITU-T Recommendation G.992.1. Asymmetric digital subscriber line transceivers.
3. *Тишков П.В.* // Доклады БГУИР. 2005. № 2 (10). С. 48–52.
4. ITU-T Recommendation G.993.1. Very high speed digital subscriber line foundation.
5. ITU-T Recommendation G.992.5. Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) transceivers – Extended bandwidth ADSL2 (ADSL2plus).
6. Цифровая связь: Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. М., 2000.
7. *Тишков П.В.* Исследование принципов построения корпоративных сетей связи: Дис. ... магистра техн. наук. Минск, 2004.
8. Линии связи: Учеб. для ВУЗов / И.И. Гроднев, С.М. Верник, Л.Н. Кочановский; Под ред. Л.Н. Кочановского. 6-е изд., перераб. и доп. М., 1995.
9. Городские телефонные кабели: Справочник / А.С. Брискер, А.Д. Руга, Д.Л. Шарле; Под ред. А.С. Брискера. 3-е изд., перераб. и доп. М., 1991.
10. www.madex.ru/htm/view_k_sks_09.phtml / Передача электрических сигналов по витым парам.
11. www.landata.ru/way/207557.html# / Витая пара UTP.