

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.391+621.395

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВОЙ
ИНФОРМАЦИИ ПО ОДНОЧЕТВЕРОЧНОМУ КАБЕЛЮ**В.И. КИРИЛЛОВ¹, А.И. БЕЛКО²¹*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь,*²*Могилевский филиал РУП "Белтелеком"**Поступила в редакцию 30 мая 2005*

Предложены новые варианты построения xDSL цифровых систем передачи, работающих по одночетверочным кабельным линиям связи. Для них разработаны методики расчета предельной длины участка регенерации и произведена сравнительная оценка их эффективности.

Ключевые слова: цифровая система передачи, одночетверочная кабельная линия связи, xDSL, фантомная цепь, длина участка регенерации.

Использование цифровых систем передачи (ЦСП) по технологии xDSL на отечественных медно-кабельных сетях связи имеет некоторые специфические особенности. Одна из них – это широкое применение этих систем на межстанционных соединительных линиях, связывающих узловые коммутаторы с оконечными автоматическими телефонными станциями. Как правило, на этих линиях используют так называемые одночетверочные симметричные кабели (например, типа КСПП-1х4), для уплотнения которых еще до недавнего времени применялись ЦСП типа ИКМ 15/30. Основной недостаток последних — ограниченная пропускная способность (до 2048 кбит/с) и небольшая длина участка регенерации (до 4,5–5 км для ИКМ-30), что требует организации на линии дополнительных необслуживаемых регенерационных пунктов (НРП). Это, очевидно, приводит к увеличению стоимости оборудования линейного тракта и эксплуатационных затрат.

Известные варианты ЦСП с xDSL технологией передачи в значительной степени позволяют решить перечисленные проблемы [1–3]. При этом, как показали авторы в предыдущих работах (см., например, [4–7]), имеется ряд альтернативных решений, которые отличаются структурой построения двух- и четырехпроводных ЦСП, выбором параметров передаваемых сигналов и позволяют обеспечить дополнительное повышение их эффективности: выигрыш в пропускной способности сети и/или предельной длине участка регенерации. В частности, среди предлагаемых и аналитически обоснованных вариантов можно отметить: 1) адаптивную компенсацию переходных влияний (ПВ) на ближний конец (БК) между парами кабеля четырехпроводных ЦСП; 2) использование частотного разделения между направлениями передачи; 3) использование по каждой паре однополосной дуплексной передачи разноскоростных сигналов.

Однако применительно к случаю работы подобных ЦСП по одночетверочному кабелю могут быть предложены и другие методы повышения их эффективности. В частности, одним из наиболее перспективных, на наш взгляд, направлений является использование для передачи цифрового сигнала фантомной цепи (ФЦ). Как показывают результаты экспериментального

исследования [8], параметры ФЦ позволяют обеспечить передачу цифрового сигнала со скоростью, сопоставимой со скоростью передачи по физической паре кабеля. При этом возможны следующие варианты использования ФЦ (ниже они будут описаны более детально): 1) ФЦ для однополосной дуплексной передачи цифровых сигналов с применением диффсистем и адаптивной эхокомпенсации (ЭК) (рис. 1); 2) ФЦ для двухполосной дуплексной передачи (рис. 2); 3) ФЦ для полудуплексной передачи (рис. 3).

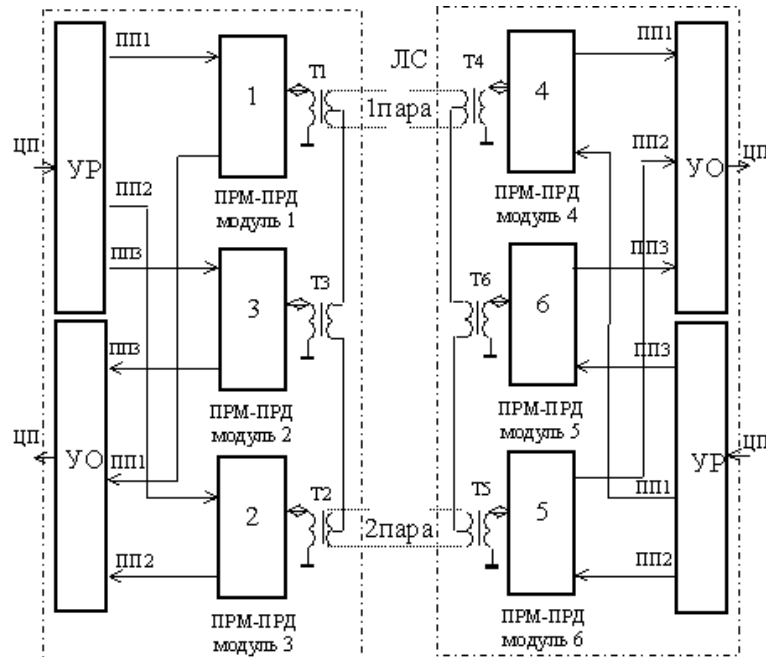


Рис. 1. Структура ЦСП с ФЦ для однополосной дуплексной передачи

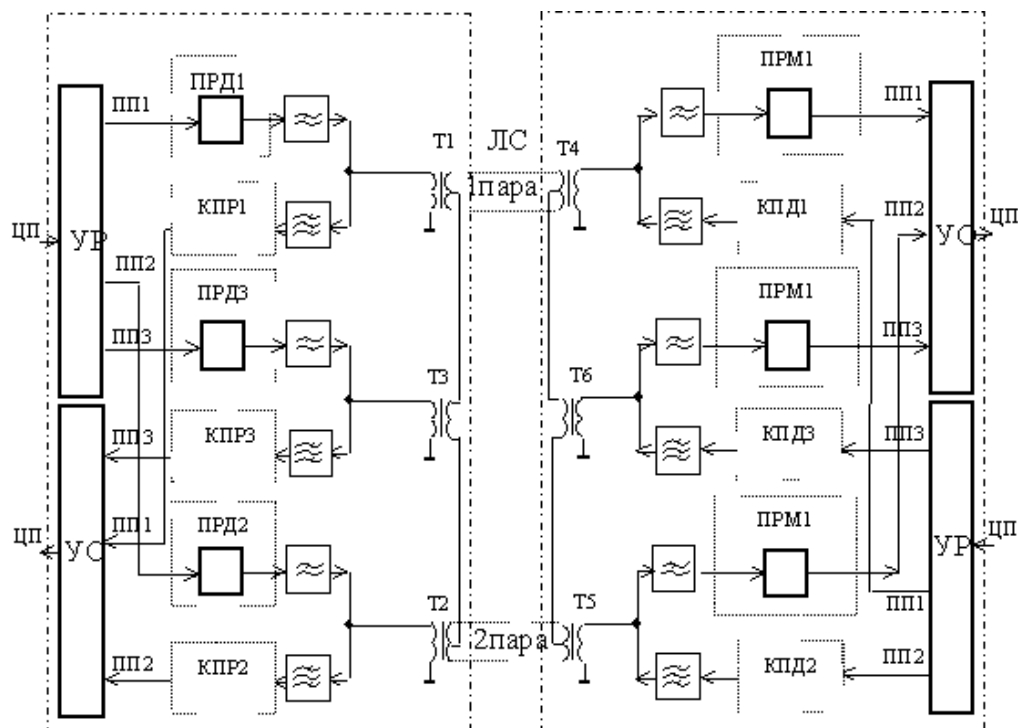
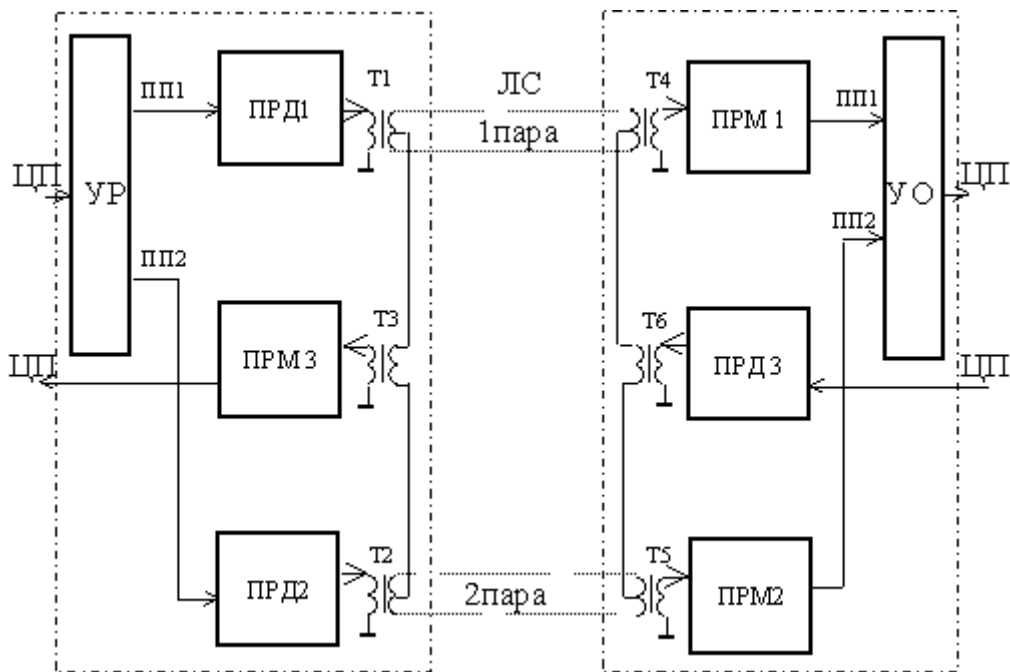


Рис. 2. Структура ЦСП с ФЦ для двухполосной дуплексной передачи



В связи с этим целью данной работы является разработка методик сравнительной оценки предлагаемых вариантов организации связи по одночетверочным медно-кабельным линиям с использованием ФЦ и ЦСП по технологии xDSL. Сравнительная оценка для различных вариантов передачи будет осуществляться по предельной длине участка регенерации, которая обеспечивается исследуемыми типами ЦСП при работе с одинаковыми скоростями передачи.

Предельная длина, как и в предыдущих случаях [1–7], будет определяться из условия равенства допустимой ($A_{3 \text{ доп}}$) и ожидаемой ($A_{3 \Sigma}$) помехозащищенности регенератора ЦСП от суммарной помехи, действующей на входе решающего устройства (РУ). Соответствующие соотношения для них в рассматриваемом случае имеют вид [9]

$$A_{3don} = 10,65 + 11,42 \lg(-\lg K_{ou1don} l_p) + 20 \lg[(Z-1)/2], \quad (1)$$

где $K_{\text{ош1доп}}$ — допустимый коэффициент ошибок для линии связи (ЛС) длиной 1 км, равный $2,5 \cdot 10^{-10}$ для сельских и городских первичных сетей связи [6]; l_p — предельная длина участка регенерации, в километрах; $Z=2^n$ — количество разрешенных амплитудных уровней линейного сигнала с многуровневой амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) или модулирующего сигнала для линейных сигналов с квадратурной модуляцией типа CAP(QAM); n — число двоичных разрядов цифрового потока, заменяемых одним символом линейного сигнала,

$$A_{3\Sigma} = -10 \lg \{ \text{dec}(-0,1A_{3\text{III}}) + M\text{dec}(-0,1A_{3\text{II}}) + N\text{dec}(-0,1A_{3\text{ID}}) \}. \quad (2)$$

Здесь $\text{dec}(x)=10^x$; $A_{\text{зш}}$ — защищенность регенератора от собственных шумов; $A_{\text{зб}}$ — защищенность от ПВ на БК; $A_{\text{зд}}$ — защищенность от ПВ на дальний конец (ДК); M, N — постоянные коэффициенты, принимающие для одночетверочного кабеля значение 0 или 1, которые определяют наличие или отсутствие соответствующего слагаемого в (2). Для рассматриваемых далее случаев работы различных вариантов построения четырехпроводных ЦСП по одночетверочному кабелю их величина будет оговариваться особо.

Для расчета значений помехозащищенности от каждой составляющей помехи воспользуемся результатами, полученными ранее в [1–7]. Так, защищенность от собственных шумов для ЦСП с АИМ линейными сигналами имеет вид:

$$A_{\text{ш}}^{(AHM)} = p_c - 10 \lg(D_{\text{шв}}) + 101,2 - 10 \lg(C_n) - 10 \lg(f_c) - a_{\text{nc}} + 20 \lg(a_{\text{nc}}) - 10 \lg(J_1), \text{ дБ}, \quad (3)$$

где p_c — уровень мощности линейного сигнала на выходе ЦСП, дБм; f_c — символьная частота, МГц; $a_{лс} = \alpha(f_c)l_p$ — затухание регенерационного участка длиной l_p на частоте $f_c = f_t/n$, f_t — тактовая частота исходного цифрового потока (ЦП), $\alpha(f_c)$ — затухание кабеля длиной 1 км на частоте f_c , дБ/км; $D_{шy}$ — коэффициент шума корректирующего усилителя (УК) ЦСП, пересчитанный на вход регенератора; C_n — постоянный коэффициент, значение которого определяется величиной Z линейного сигнала и составляет 0,733; 0,568; 0,5; 0,468 и 0,453 для $Z=4, 8, 16, 32$ и 64 соответственно; J_1 — поправочный коэффициент, расчетные значения которого в зависимости от $a_{лс}$ приведены в табл.1 [1,2,4,10].

Защищенность от собственных шумов для ЦСП с CAP(QAM) сигналами равна

$$A_{ши}^{(QAM)} = p_c - 10\lg(C_n) - 10\lg(D_{шy}) - 10\lg(f_c) - a_{лс} + 20\lg(a_{лс}) + 92,1 - 10\lg(W_1), \text{ дБ}, \quad (4)$$

где использованы те же обозначения, что и в (3), а W_1 — поправочный коэффициент, зависящий как от $a_{лс}$, так и коэффициента $b_i = f_{0i}/f_{ci}$, $i=1; 2$ ($f_{01}; f_{02}$ и $f_{c1}; f_{c2}$ — несущая и символьная частоты квадратурного сигнала каждого из направлений передачи соответственно). Значение $b_1=b_2$ соответствует однополосной дуплексной передаче однотипных QAM сигналов в каждом направлении. Для двухполосной дуплексной передачи однотипных QAM сигналов имеем $b_1 \geq 1$ и $b_2 \geq 3$.

Для случая двухполосной дуплексной передачи разнотипных сигналов, когда в низкочастотном (НЧ) направлении передается АИМ, а в высокочастотном (ВЧ) — QAM-линейный сигнал, значение b для ВЧ сигнала определяется условием: $b = 1 + 2n_2/n_1$, где n_1 и n_2 — количество двоичных разрядов исходного цифрового потока, передаваемых одним символом АИМ и QAM сигналов соответственно. Расчетные значения W_1 для разных b приведены в табл. 1 [3].

Далее определим защищенности от ПВ на БК и ДК. Так, для систем с АИМ линейными сигналами, когда по каждой паре одночетверочного кабеля передаются однотипные сигналы с одинаковой скоростью, соответствующие составляющие имеют вид:

ожидаемая защищенность от ПВ на БК:

$$A_{361}^{(АИМ)} = A_6(f_1) - 15\lg\{f_c/f_1\} - 10\lg\{C_n\} - 18,8 - a_{лс} + 20\lg\{0,23a_{лс}\} - 10\lg\{J_2\}, \text{ дБ}, \quad (5)$$

где $A_6(f_1)$ — переходное затухание (ПЗ) на БК на частоте f_1 , дБ (справочная величина); J_2 — поправочный коэффициент, значения которого определены в табл.1 [1,2]. Остальные величины пояснены в (3);

ожидаемая защищенность от ПВ на ДК:

$$A_{3дл}^{(АИМ)} = -10\lg\{C_n\} - 6 - 10\lg\left((f_c/f_1)^{1,5} J_3 \text{dec}[-0,14_6(f_1)] + (f_c/f_1)^4 (l_p/l_1) J_4 \text{dec}[-0,14_{3дл}(f_1, l_1)]\right), \text{ дБ}, \quad (6)$$

где $A_{3дл}(f_1, l_1)$ — защищенность пары кабеля от ПВ на ДК для участка длиной l_1 на частоте f_1 (справочная величина); J_3 и J_4 — постоянные поправочные коэффициенты, равные 0,003 и 0,024 соответственно.

Особенностью анализа четырехпроводных ЦСП, использующих передачу по каждой паре разнотипных АИМ линейных сигналов, является различие спектральных характеристик сигналов, передаваемых по влияющей паре кабеля (условно обозначим ее как "пара 1") и подверженной влиянию паре ("пара 2"). При этом соответствующие выражения для защищенностей от ПВ на БК и ДК имеют вид [4]:

ожидаемая защищенность от ПВ на БК для 2-й пары:

$$A_{362}^{(АИМ)} = p_{c2} - p_{c1} - 188 - 10\lg\{C_{n2}\} - 15\lg\{f_{c2}^2/f_{c1}f_1\} + A_6(f_1) - a_{лс2} + 20\lg\{a_{лс2}\} - 10\lg\{Q_2\}, \text{ дБ}, \quad (7)$$

где p_{c1} и p_{c2} — уровни мощности сигналов на выходе передатчиков ЦСП, работающих по 1-й и 2-й парам соответственно, дБм; C_{n1} и C_{n2} — коэффициенты, определяемые для линейных сигналов 1-й и 2-й пары соответственно (см. поясняющие подписи к (3)); f_{c1} и f_{c2} — символьные частоты сигналов 1-й и 2-й пары соответственно; $a_{лс2}$ — затухание регенерационного участка длиной l_p на символьной частоте f_{c2} линейного сигнала 2-й пары; Q_2 — поправочный коэффициент, зависящий от $a_{лс2}$ и f_{c2}/f_{c1} , значения которого приведены в табл.2;

ожидаемая защищенность от ПВ на ДК для 2-й пары:

$$A_{3д2}^{(АИМ)} = p_{c2} - p_{c1} - 6 - 10\lg\{C_{n2}\} - 10\lg\left\{\frac{f_{c2}^{5,5}}{f_{c1}^{1,5} f_1^4} \frac{l_p}{l_1} Q_4 \text{dec}[-0,1(A_{3д0}(f_1, l_1))] + \frac{f_{c2}^3}{f_{c1}^{1,5} f_1^{1,5}} Q_3 \text{dec}[-0,1(A_6(f_1))]\right\}, \text{ дБ.} \quad (8)$$

Здесь Q_3 и Q_4 — поправочные коэффициенты, значения которых в зависимости от отношения f_{c2}/f_{c1} приведены в табл. 3 [4] (при $f_{c2}=f_{c1}$ имеем $Q_3=J_3$ и $Q_4=J_4$).

При совместной работе на обеих парах однотипных ЦСП с квадратурными сигналами ожидаемые защищенности от ПВ на БК и ДК соответствуют выражениям [3]:

ожидаемая защищенность от ПВ на БК:

$$A_{3б}^{(QAM)} = A_6(f_1) - 15 \lg(f_c/f_1) - 10\lg(C_n) - 18,8 - (a_{лс} \sqrt{1+b}) + 20\lg(a_{лс}) - 10\lg(W_2), \text{ дБ,} \quad (9)$$

где W_2 — поправочный коэффициент, значения которого в зависимости от $a_{лс}$ и b приведены в табл.1 [3];

ожидаемая защищенность от ПВ на ДК:

$$A_{3д}^{(QAM)} = -10\lg(C_n) - 6 - 10\lg\left\{(f_c/f_1)^{1,5} W_3 \text{dec}[-0,1A_6(f_1)] + 4C_n(f_c/f_1)^4 (l_p/l_1) W_4 \text{dec}[-0,1A_{3д0}(f_1, l_1)]\right\}, \text{ дБ,} \quad (10)$$

где W_3 и W_4 — постоянные коэффициенты, значения которых в зависимости от b представлены в табл. 4 [3].

Таблица 1. Значения поправочных коэффициентов J_i и W_i

$a_{лс}, \text{ дБ}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
J_1	0,755	1,175	1,185	1,056	0,901	0,758	0,637	0,536	0,454	0,387
$W_1; b=1$	1,85	3,34	3,75	3,62	3,27	2,88	2,51	2,17	1,88	1,64
$W_1; b=3$	2,53	5,80	7,80	8,60	8,63	8,23	7,64	6,98	6,33	5,70
$W_1, n_1=6, n_2=4, b=7/3$	2,37	5,147	6,619	7,045	6,871	6,409	5,838	5,251	4,695	4,186
$W_1, n_1=5, n_2=2, b=9/5$	2,205	4,522	5,562	5,72	5,431	4,96	4,441	3,94	3,482	3,075
$W_1, n_1=6, n_2=2, b=5/3$	2,156	4,348	5,28	5,378	5,069	4,602	4,103	3,626	3,195	2,814
$W_1, n_1=4, n_2=3, b=5/2$	2,415	5,323	6,927	7,444	7,316	6,866	6,285	5,676	5,092	4,554
$W_1, n_1=6, n_2=3, b=11/5$	2,333	5,001	6,365	6,721	6,514	6,045	5,484	4,916	4,383	3,899
$W_1, n_1=5, n_2=4, b=13/5$	2,44	5,424	7,107	7,68	7,581	7,14	6,554	5,934	5,334	4,778
$W_1, n_1=6, n_2=5, b=8/3$	2,456	5,49	7,225	7,835	7,757	7,322	6,735	6,107	5,496	4,929
J_2	0,055	0,102	0,113	0,106	0,091	0,076	0,062	0,050	0,040	0,033
$W_2; b=1$	0,76	1,52	1,85	1,86	1,71	1,51	1,29	1,08	0,9	0,75
$W_2; b=3$	4,63	10,92	15,02	16,86	17,11	16,40	15,17	13,72	12,23	10,79
$W_2, n_1=6, n_2=4, b=7/3$	3,023	6,833	9,077	9,89	9,778	9,153	8,29	7,353	6,435	5,583
$W_2, n_1=5, n_2=2, b=9/5$	1,954	4,24	5,448	5,771	5,566	5,096	4,523	3,938	3,389	2,895
$W_2, n_1=6, n_2=2, b=5/3$	1,719	3,688	4,696	4,937	4,729	4,303	3,798	3,29	2,818	2,397
$W_2, n_1=4, n_2=3, b=5/2$	3,397	7,768	10,42	11,44	11,39	10,73	9,773	8,714	7,662	6,677
$W_2, n_1=6, n_2=3, b=11/5$	2,737	6,128	8,076	8,741	8,591	8,001	7,212	6,369	5,552	4,799
$W_2, n_1=5, n_2=4, b=13/5$	3,631	8,357	11,27	12,43	12,43	11,75	10,74	9,602	8,467	7,397
$W_2, n_1=6, n_2=5, b=8/3$	3,79	8,761	11,85	13,12	13,15	12,46	11,41	10,23	9,032	7,904

Таким образом, полагая, что выполняется условие равенства (1) и (2) и используя соответствующие выражения для составляющих суммарной помехи, действующих на входе РУ регенератора ЦСП, методом последовательных приближений можно определить предельную длину участка для различных типов четырехпроводных ЦСП, работающих по одночетверочным кабельным линиям с учетом соответствующих значений коэффициентов M и N в (2). В частности, для перечисленных выше ЦСП с усовершенствованным структурным построением используем следующие расчетные соотношения:

Таблица 2. Значения поправочного коэффициента Q_2

f_{c2}/f_{c1}	$a_{дс}, \text{дБ}$									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0,1	0,114	0,243	0,309	0,329	0,322	0,302	0,276	0,25	0,225	0,201
0,2	0,111	0,235	0,299	0,317	0,309	0,289	0,264	0,238	0,214	0,191
0,3	0,107	0,224	0,283	0,298	0,289	0,269	0,245	0,22	0,197	0,175
0,4	0,102	0,214	0,269	0,282	0,272	0,252	0,228	0,204	0,182	0,162
0,5	0,096	0,198	0,246	0,256	0,245	0,225	0,202	0,18	0,159	0,141
0,6	0,88	0,18	0,221	0,227	0,214	0,195	0,173	0,153	0,134	0,118
0,75	0,076	0,151	0,18	0,18	0,166	0,148	0,129	0,111	0,096	0,082
0,8	0,072	0,141	0,166	0,164	0,15	0,132	0,114	0,097	0,083	0,071
1,2	0,04	0,069	0,071	0,061	0,049	0,037	0,028	0,02	0,015	0,011
1,5	0,024	0,037	0,034	0,026	0,018	0,012	7,7e-3	4,9e-3	3,1e-3	1,9e-3
2	0,011	0,014	0,011	7,0e-3	4,0e-3	2,2e-3	1,2e-3	5,9e-4	3,0e-4	1,5e-4
3,0	3,1e-3	3,3e-3	2,1e-3	1,0e-3	4,7e-4	2,0e-4	8,2e-5	3,2e-5	2,3e-5	4,9e-6

Примечание: $e(X)=10^x$ Таблица 3. Значения поправочных коэффициентов Q_3, Q_4

f_{c2}/f_{c1}	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,75	0,8	1,2	1,5	2	3,0
Q_3	8,2e-3	8,0e-3	7,5e-3	7,2e-3	6,6e-3	5,9e-3	4,8e-3	4,4e-3	1,9e-3	8,5e-4	2,5e-4	3,3e-5
Q_4	0,044	0,043	0,041	0,04	0,038	0,035	0,031	0,03	0,018	0,012	6,4e-3	2,2e-3

Примечание: $e(X)=10^x$ Таблица 4. Значения поправочных коэффициентов W_3 и W_4

b	1	3	7/3	9/5	5/3	5/2	11/5	13/5	8/3
W_3	0,31	1,55	1,063	0,723	0,646	1,177	0,974	1,248	1,296
W_4	0,48	25,58	9,746	3,687	2,782	12,677	7,798	14,732	16,236

1) для ЦСП с АИМ линейным сигналом и адаптивной компенсацией (АК) ПВ на БК полагаем $M=0, N=1$ и учитываем только (3) и (6);

2) для ЦСП с частотным разделением между направлениями передачи полагаем $M=0, N=1$ и используем (4) и (10);

3) для ЦСП с однополосной дуплексной передачей по каждой паре разноскоростных АИМ сигналов полагаем $M=1, N=1$ и применяем (3), (7) и (8).

Более детально рассмотрим структурные построения четырехпроводных систем, в которых для передачи сигнала используется фантомная цепь (ФЦ).

Схема первого варианта построения ЦСП с ФЦ представлена на рис.1. Принцип ее работы заключается в следующем. В направлении А-Б исходный цифровой поток поступает на вход устройства разделения (УР), которое делит его на три равноскоростных подпотока (ПП1 – ПП3). Полученные подпотоки с выходов УР поступают соответственно на цифровые входы приемопередающих (ПРМ-ПРД) модулей 1, 2 и 3. Далее с линейных входов-выходов ПРМ-ПРД модулей 1 и 2 полученные сигналы через линейные трансформаторы Т1 и Т2 подаются на вход первой и второй кабельных пар линии связи (ЛС) соответственно, а с линейного входа-выхода ПРМ-ПРД модуля 3 через линейный трансформатор Т3 – в средние точки выходных обмоток линейных трансформаторов Т1 и Т2. С выхода первой и второй пар приходящие сигналы через линейные трансформаторы Т4 и Т5 поступают соответственно на линейные входы-выходы ПРМ-ПРД модулей 4 и 5, а со средних точек выходных обмоток трансформаторов Т4 и Т5 через Т6 – на линейный вход-выход ПРМ-ПРД модуля 6. На цифровых выходах ПРМ-ПРД модулей 4, 5 и 6 формируются три принятых ПП. Из последних в устройстве объединения (УО) формируется полный цифровый поток направления передачи А-Б.

Передача сигнала в обратном направлении Б-А осуществляется аналогично.

Предельная длина регенерационного участка для данной ЦСП будет определяться защищенностью ПРМ-ПРД модулей, работающих по отдельным парам кабеля [7], основными

составляющими которой являются помехи от ПВ на БК, ДК и собственные шумы. Расчет предельной длины участка регенерации производится из условия равенства (1) и (2). При этом в (2) значения $M=N=1$, а составляющие помех для двух возможных случаев определяются: а) при делении исходного цифрового потока на три равноскоростных ПП – по (3), (5) и (6); б) при делении исходного цифрового потока на три неравноскоростных ПП – по (3), (7) и (8). При расчетах необходимо учитывать соответствующие значения тактовых частот ПП_{*i*}, $i = 1...3$.

Схема второго варианта построения ЦСП с ФЦ представлена на рис.2. Принцип ее работы заключается в следующем. В направлении передачи А-Б полный цифровой поток поступает на вход УР, которое делит его на три ПП. Полученные ПП с выходов УР поступают соответственно на входы модулей передачи (ПРД) 1, 2, 3, которые выполняют те же функции, что и передающая часть модулей 1–6 на рис. 1. Каждый из них является цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) и формирует из цифрового подпотока Z -урневый ($Z=2^n$) АИМ сигнал с символьной частотой $f_{c1}=f_T/3n$. Полученные линейные сигналы далее через фильтры нижних частот (ФНЧ) поступают на первичные обмотки линейных трансформаторов Т1, Т2 и Т3. С выходных обмоток Т1 и Т2 сигналы поступают на входы первой и второй кабельных пар ЛС, а с выходной обмотки Т3 — в средние точки выходных обмоток Т1 и Т2. С выхода ЛС приходящие линейные сигналы через соответственно линейные трансформаторы Т4, Т5 и Т6 и ФНЧ поступают на входы модулей приема (ПРМ) 1, 2 и 3, которые выполняют те же функции, что и приемная часть модулей 1–6 на рис. 1. Каждый из этих модулей осуществляет усиление линейного сигнала, коррекцию неравномерности частотной характеристики затухания (ЧХЗ) кабельной линии связи в полосе частот, соответствующей полосе пропускания ФНЧ и их аналого-цифровое преобразование (АЦП) в соответствующий двоичный ПП. Последние с выходов модулей ПРМ поступают на входы УО, на выходе которого формируется полный принятый цифрорпоток направления А-Б.

В направлении передачи Б-А полный цифровой поток поступает на вход УР, которое делит его на три равноскоростных ПП. Полученные ПП с выходов УР поступают соответственно на входы модулей квадратурной передачи (КПД) 1, 2, 3, которые осуществляют формирование квадратурно-модулированных линейных сигналов с несущей частотой f_0 . При этом частота f_{c2} следования символов многоуровневого сигнала, модулирующего по амплитуде одну из квадратурных компонент линейного сигнала, связана с тактовой частотой исходного цифрового потока f_T соотношением: $f_{c2} \approx f_T/6m$, где m — количество разрядов исходного подпотока, используемых ЦАП квадратурного модулятора для формирования одиночного Z -урневого импульсного символа.

Полученные сигналы с выходов модулей КПД через полосовые фильтры (ПФ) поступают соответственно на первичные обмотки линейных трансформаторов Т4, Т5 и Т6. С выходных обмоток Т4 и Т5 сигналы, соответствующие первому и второму подпотокам, поступают на входы первой и второй пар кабельной ЛС, а линейный сигнал, соответствующий третьему подпотоку, с выходной обмотки линейного трансформатора Т6 поступает в средние точки выходных обмоток трансформаторов Т4 и Т5.

С выхода ЛС приходящие линейные сигналы через трансформаторы Т1, Т2, Т3 и соответствующие ПФ поступают на входы модулей квадратурного приема (КПР) 1, 2 и 3, которые формируют принятые ПП. Последние далее поступают на входы УО, на выходе которого формируется полный принятый цифровой поток направления Б-А.

Величина несущей частоты f_0 квадратурного модулятора КПД и полосы пропускания ФНЧ и ПФ выбирается таким образом, чтобы обеспечить частотное разделение между линейными сигналами направлений А-Б и Б-А при условии использования минимально возможной величины несущей частоты f_0 . Несущая частота f_0 выбирается из условия:

$$f_0 \geq (f_{c1} + f_{c2}) \approx f_T(1/6m + 1/3n). \quad (11)$$

Предельная длина регенерационного участка для данной ЦСП будет определяться защищенностью регенератора более высокочастотного направления Б-А [3,7], для которого основными составляющими помехи являются ПВ на ДК и собственные шумы. Расчет предельной длины участка регенерации производится из условия равенства (1) и (2). При этом в (2) полага-

ем $M=0$, $N=1$, а составляющие определяются по (4) и (10) с учетом соответствующих значений n и m для АИМ и САР(QAM) сигналов и условия (11).

Схема третьего варианта построения ЦСП с ФЦ представлена на рис. 3. Принцип ее работы заключается в следующем. В направлении передачи А-Б исходный цифровой поток поступает на вход УР, которое делит его на два равноскоростных ПП. Полученные ПП с выходов УР поступают соответственно на входы модулей ПРД 1 и 2, которые аналогичны по функциональному построению модулям ПРД 1–3 на рис. 2. Далее с линейных выходов этих модулей полученные сигналы через линейные трансформаторы Т1 и Т2 подаются на вход первой и второй кабельных пар ЛС соответственно. С выхода этих пар ЛС каждый из принимаемых линейных сигналов через линейные трансформаторы Т4 и Т5 поступает на входы модулей ПРМ 1 и 2 станции Б, которые аналогичны по функциональному построению модулям ПРМ 1-3 на рис. 2. На выходе ПРМ 1, 2 формируются принятые ПП, объединяемые далее в УО в полный цифровый поток направления А-Б.

В направлении передачи Б-А исходный цифровой поток поступает на вход модуля ПРД 3, который формирует линейный сигнал, поступающий через линейный трансформатор Т6 в средние точки выходных обмоток линейных трансформаторов Т4 и Т5 станции Б, являющиеся входом ФЦ. С выхода ФЦ (со средних точек выходных обмоток линейных трансформаторов Т1 и Т2 станции А) через Т3 принимаемый сигнал поступает на вход модуля ПРМ 3, на выходе которого формируется полный принятый цифровый поток направления Б-А.

Предельная длина регенерационного участка данной ЦСП [7] будет определяться защищенностью регенератора, работающего по ФЦ. В идеальном случае, когда обеспечено полное симметрирование линейных трансформаторов со средним отводом, основной составляющей помехи регенератора ПРМ 3 будут только собственные шумы. Расчет предельной длины участка регенерации производится из условия равенства (1) и (2). При этом в (2) значения $M=N=0$, а защищенность от собственных шумов определяется по (3) с учетом того, что ЧХЗ ФЦ практически совпадает с ЧХЗ одной пары кабеля, а волновое сопротивление ФЦ меньше волнового сопротивления пары приблизительно в 2,5 раза [8].

Для анализа эффективности различных вариантов построения четырехпроводных ЦСП производились численные расчеты обеспечиваемой ими предельной длины участка для скорости 2320 кбит/с при работе по одночетверочной линии, построенной на кабелях типа КСПП-1х4х0,9 и КСПП-1х4х0,9 (см. табл. 5).

Таблица 5. Технические характеристики одночетверочных кабелей связи

Тип кабеля	Затухание на частоте f_1 , дБ/км	ПЗ на БК на частоте f_1 , дБ	Защищенность от ПВ на ДК на частоте f_1 для кабеля длиной l_1 , дБ
КСПП-1х4х1,2	$\alpha=8$ дБ/км, $f_1=1024$ кГц	$A_6=56$ дБ, $f_1=512$ кГц	$A_{злд}=45$ дБ, $f_1=1024$ кГц, $l_1=0,75$ км
КСПП-1х4х0,9	$\alpha=4,5$ дБ/км, $f_1=1024$ кГц	$A_6=64$ дБ, $f_1=512$ кГц	$A_{злд}=45$ дБ, $f_1=1024$ кГц, $l_1=0,75$ км

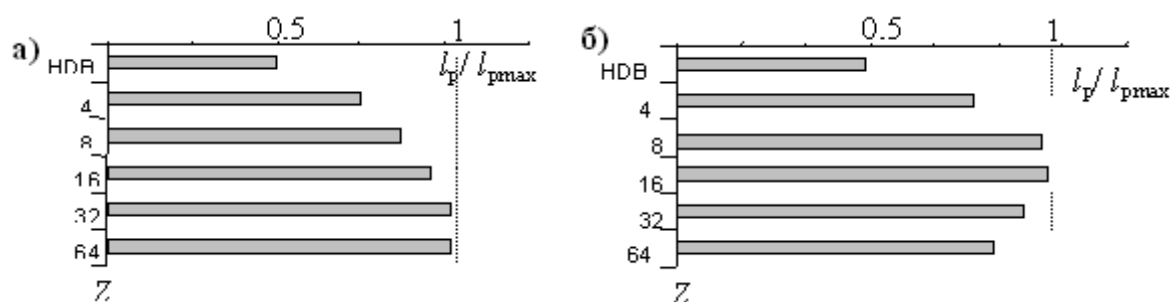


Рис. 4. Зависимость длины участка от числа уровней линейного сигнала: а) для САР(QAM) сигналов с двухполосной дуплексной передачей и АИМ сигналов с однополосной дуплексной передачей и адаптивной компенсацией ПВ на БК; б) для АИМ сигналов с однополосной дуплексной передачей

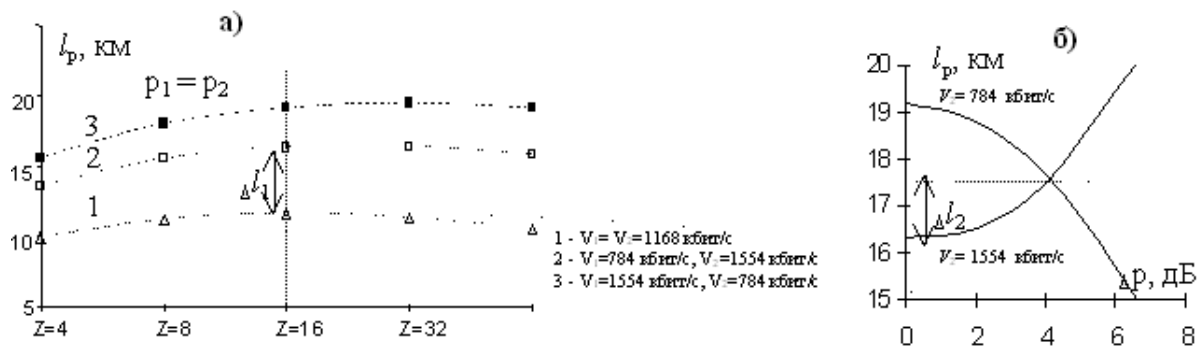


Рис. 5. Длина участка регенерации для ЦСП с разнораспределением при оптимальном делении подпотоков (соотношение скоростей передачи $V_1:V_2 \approx 2:1$): а) для передачи сигналов каждого подпотока с одинаковой мощностью ($p_1 = p_2$); б) для передачи сигналов с разным уровнем мощности ($p_1 - p_2 = \Delta p$, $p_2 + p_1 = \text{const}$)

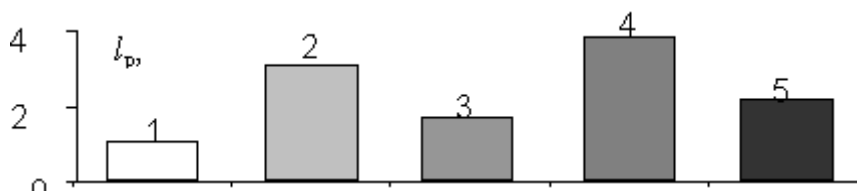


Рис. 6. Сравнение различных четырехпроводных ЦСП с однополосной передачей АИМ сигнала: 1 — типовой вариант (HDSL); 2 — с дополнительной адаптивной компенсацией ПВ на БК; 3 — ЦСП с ФЦ по рис. 1; 4 — ЦСП с ФЦ по рис. 1 и адаптивной компенсацией ПВ на БК; 5 — ЦСП с ФЦ и однополосной полудуплексной передачей (по рис. 3)

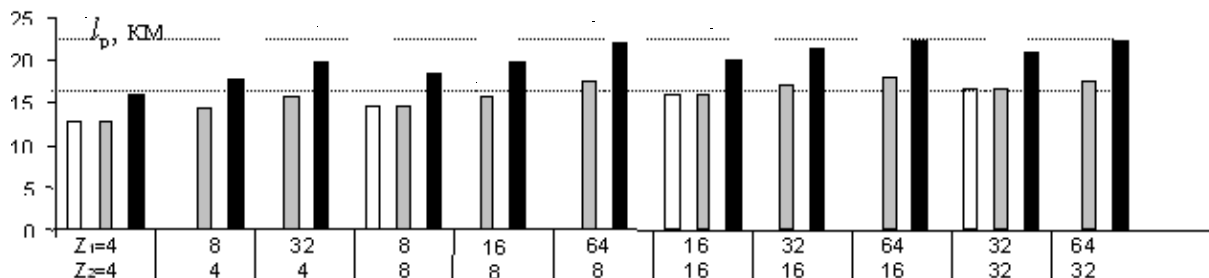


Рис. 7. Сравнение различных четырехпроводных ЦСП с двухполосной дуплексной передачей для различных Z -уровневых сигналов (Z_1 для НЧ и Z_2 — для ВЧ сигнала): $\square$ — для однотипных CAP(QAM) сигналов ($Z_1 = Z_2$); $\square$ — для разнотипных сигналов (НЧ — АИМ сигнал, ВЧ — CAP(QAM) сигнал); $\blacksquare$ — для ЦСП с ФЦ и разнотипными сигналами (НЧ — АИМ сигнал, ВЧ — CAP(QAM) сигнал, по рис. 2)

Результаты расчетов, представленные рис. 4–7, позволяют сделать следующие выводы.

1. Максимальная длина участка регенерации обеспечивается при оптимальном количестве уровней АИМ и CAP(QAM) линейных сигналов для различных вариантов построения сети: оно равно 32–64 для ВЧ направления с CAP(QAM) сигналом и двухполосной передачей и 8–16 для однополосной передачи АИМ сигнала (рис. 4);

2. Анализ особенностей совместной работы разнотипных ЦСП позволил определить дополнительные меры по увеличению предельной длины участка (см. рис. 5). Так, для системы типа HDSL (с однополосной дуплексной передачей и АИМ линейным сигналом) целесообразно использовать несимметричное деление исходного цифрового сигнала (оптимальное соотношение скоростей передачи по каждой паре $V_1:V_2 \approx 2:1$, $V_1 + V_2 = \text{const}$) и осуществлять передачу сигналов по каждой паре с разным уровнем мощности ($p_1 > p_2$, $p_1 + p_2 = \text{const}$). В совокупности, не усложняя структуру, это позволяет увеличить длину участка (см. $\Delta l_1 + \Delta l_2$ на рис. 5, а и б) до 60%.

Сопоставимые результаты можно получить при использовании данного решения для ФЦ с однополосной дуплексной передачей (рис. 1) для несимметричного деления цифротоков, передаваемых по физическим парам кабеля и ФЦ ($V_1:V_2:V_3 \approx 1:1:2$, $V_1+V_2+V_3=\text{const}$);

3. Адаптивная компенсация ПВ на БК для однополосного дуплексного варианта четырехпроводной ЦСП (типа HDSL) позволяет при незначительном усложнении ЦСП обеспечить 2–3-кратное увеличение длины участка в случае работы на кабеле одной системы (см. рис. 6).

4. Структуры ЦСП, использующих ФЦ, позволяют значительно увеличить длину участка по сравнению с традиционными системами типа HDSL. При этом наилучшие результаты у комбинированного варианта: ФЦ с однополосной дуплексной передачей совместно с адаптивной компенсацией ПВ на БК. ФЦ с полудуплексной передачей уступает этому варианту по длине участка, однако позволяет значительно упростить построение системы и алгоритмы обработки сигнала (рис. 6);

5. Варианты ЦСП с двухполосной дуплексной передачей незначительно уступают по длине участка однополосным вариантам, но значительно проще и надежнее, так как не требуют адаптивной компенсации. Среди них наилучшими являются ЦСП с ФЦ, использующие разные виды модуляции (АИМ и CAP(QAM)) в противоположных направлениях (рис. 2, рис. 7).

По предлагаемым структурам построения ЦСП (рис. 1 и 2) авторами получены патенты Российской Федерации на изобретение [11, 12].

A COMPARATIVE ESTIMATION OF THE DIGITAL DATA TRANSMISSION METHODS THROUGH ONE-QUADDED CABLE

V. I. KIRILLOV, A. I. BELKO

Abstract

The new variants of xDSL digital transmission systems construction operating on one-quadded cable lines are offered. For them the procedures of a limiting regeneration section length account are developed and the comparative estimation of their efficiency is made.

Литература

1. Кириллов В.И., Белко А.И. // Электросвязь. 2001. № 10. С. 20–23.
2. Кириллов В.И., Белко А.И. // Электросвязь. 2002. № 11. С. 15–18.
3. Кириллов В.И., Белко А.И. // Электросвязь. 2003. № 10. С. 32–36.
4. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. 2003. №6. С. 19–25.
5. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. 2000. №6. С. 23–28.
6. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. 2003. №4. С. 26–30.
7. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. 2003. №5. С. 39–44.
8. Кириллов В.И., Белко А.И., Малашкевич Д.Ф. // Веснік сувязі. 2003. №3. С. 56–58.
9. Кириллов В.И. Многоканальные системы передачи. М., 2002.
10. Кириллов В.И., Синица В.Н., Белко А.И., Жаденов О.А. // Электросвязь. 2005. № 2. С. 13–16.
11. Пат. RU 2259013 (РФ) С2 МПК⁷ Н04В 3/50 от 06.12.2002 / Кириллов В.И., Белко А.И., Соборова И.Г., Дубин В.А. Опубл. Бюл. № 23. 2005.
12. Пат. RU 2259014 (РФ) С2 МПК⁷ Н04В 3/50 от 21.03.2003 / Кириллов В.И., Белко А.И., Соборова И.Г. Опубл. Бюл. № 23. 2005.