

УДК 621.317.31.6

РАСЧЕТ СКОРОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА SHDSL

А.В. Кочеров, главный метролог ООО «Аналитик-ТС»

Модель приемопередатчиков SHDSL. Приемопередатчики симметричных линий (SHDSL) осуществляют передачу цифрового потока с применением амплитудно-импульсной модуляции с решетчатым кодированием (Trellis Coded Pulse Amplitude Modulation). Такой способ модуляции обычно обозначается как 2^{K+1} – TСРАМ. Числовой показатель 2^{K+1} , где K – количество переносимых бит за такт передачи (кратность модуляции), часто называется уровнем модуляции. Он представляет собой количество равноотстоящих амплитуд импульса выходного напряжения передатчика. Дополнительный треллис-бит используется для повышения помехозащищенности.

Рекомендация G.991.2 от 02.2001 определяла только способ модуляции 16-ТСРАМ при максимальной скорости 2320 кбит/с в симметричном режиме. Версия Рекомендации G.991.2 от 12.2003 [1] помимо 16-ТСРАМ ввела способ 32-ТСРАМ, подняв максимальную скорость до 3840 и 5696 кбит/с соответственно. В 2007 г. анонсировано промышленное оборудование [2] с адаптивной схемой модуляции в диапазоне 4-, 8-, 16-, 32-, 64-, 128-ТСРАМ и максимальной скоростью передачи по одной паре до 15360 кбит/с.

Скорость передачи (Payload data rate) в кбит/с принимает дискретные значения $R_{SHDSL} = \cdot 64 + \cdot 8$ (k и i – целые) в диапазонах, представленных в табл. 1. Модуляция осуществляется с частотой передачи символов (тактовой частотой):

$$f_{sym} = \frac{R_{SHDSL} + 8}{K} \tag{1}$$

Частота f_{sym} определяет верхнюю границу используемой полосы частот:

$$F_1 = \frac{f_{sym}}{2} = \frac{R_{SHDSL} + 8}{2K} \tag{2}$$

Начало полосы частот SHDSL соответствует началу полосы пропускания типового согласующего трансформатора:

$$F_0 = 5 \text{ кГц} \tag{3}$$

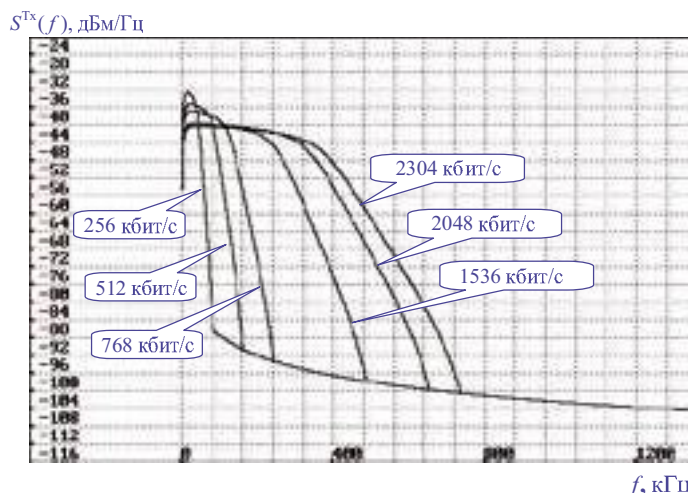
Номинальная спектральная плотность мощности (СПМ) сигнала передатчика (в милливаттах) в полосе передачи полезного сигнала ($F_0 \dots F_1$) и в переходной полосе сглаживающего низкочастотного фильтра – НЧФ (работа НЧФ начинается выше F_1) согласно п. В.4.1 [1] определяется формулой:

$$S^{Tx}(f) = 10^{-A_{SHDSL}^{Tx}/10} \frac{P_{SHDSL}}{135} \frac{1}{f_{sym}} \left(\frac{\sin(\pi f / f_{sym})}{\pi f / f_{sym}} \right)^2 \times \frac{1}{1 + (f / F_1)^{2 \times Order}} \frac{f^2}{f^2 - F_1^2} \tag{4}$$

где

$$P_{SHDSL} = \begin{cases} 7,86 & \text{для } R_{SHDSL} < 2048 \text{ кбит/с;} \\ 9,90 & \text{для } R_{SHDSL} \geq 2048 \text{ кбит/с} \end{cases}$$

– масштабный коэффициент; f – частота в кГц; $Order = 6$ – порядок сглаживающего НЧФ передатчика; A_{SHDSL}^{Tx} – величина возможного дополнительного затухания передатчика (функция Power Backoff).



Параметры SHDSL сведены в табл. 1. На рисунке представлены примеры протекания номинальной СПМ сигнала на выходе передатчика SHDSL 16-ТСРАМ в диапазоне скоростей передачи.

Таблица 1

Тип линии	4-ТСРАМ	8-ТСРАМ	16-ТСРАМ	32-ТСРАМ	64-ТСРАМ	128-ТСРАМ
Максимальная скорость R_{SHDSL}^{max} , кбит/с	2560	5120	7680	10240	12800	15360
Кратность модуляции K	1	2	3	4	5	6
Максимальная частота спектра SHDSL $F_1^{max} = (R_{SHDSL}^{max} + 8) / 2$, кГц				1280		
Минимальная скорость R_{SHDSL}^{min} , кбит/с				192		
Минимальная частота спектра SHDSL частот F_0 , кГц				5		
Максимальный уровень сигнала P_{sign}^{Tx} , дБм				14,5		
Запас помехозащищенности SNR Margin, дБ				$\Delta SNR = 3 \dots 18$; типичное значение $\Delta SNR = 6$		

Условие устойчивой работы SHDSL. Аналитическое условие устойчивой работы SHDSL в зависимости от скорости линии R_{SHDSL} и кратности модуляции K , определяющих верхнюю границу полосы частот F_1 , согласно (1) и (2) имеет вид:

$$SNR^{Tx} \geq \Delta SNR + 3 \tag{5}$$

где

$$SNR^{Tx} = 10 \lg \left(\frac{P_{sign}^{Tx}}{P_{noise}^{Tx}} \right) - \text{защищенность принимаемого сигнала, приведенная к выходу передатчика в дБ;}$$

ΔSNR — заданный запас помехозащищенности (SNR Margin) в дБ;

$\Delta SNR_0 = 9,75$ дБ — запас «неидеальности приемника»;

$$P_{sign}^{Tx} = \int_{F_0}^{F_1} S^{Tx}(f) df \quad (6)$$

— уровень передатчика в мВт, определяемый интегрированием СПМ сигнала передатчика;

$$P_{noise}^{Tx} = \int_{F_0}^{F_1} \frac{N(f)}{|W(f)|} df \quad (7)$$

— уровень помех в мВт, определяемый спектром помех на выходе линии связи $N(f)$ и приведенный к выходу передатчика взвешиванием по измеренному коэффициенту передачи линии $|W(f)|$.

Сформулированное условие работы SHDSL (5) непосредственно в Рекомендации G.991.2 [1] не содержится, но представленный в этом документе обширный материал по характеристикам испытательных линий и соответствующих им скоростей передачи может быть применен для подтверждения корректности (5).

● G.991.2 Annex B. Regional requirements — Region 2 (European networks):

— «Figure B.1/G.991.2 — Test Loop topology» определяет схемы испытательных линий; для верификации выбрана схема $L2$ — однородная пара с жилами толщиной 0,4 мм в сплошной полиэтиленовой изоляции (PE04);

— «Table B.1/G.991.2 — Values of the electrical length Y of the SHDSL noise test loops, when testing SHDSL at noise model A» и «Table B.2/G.991.2 — Values of the electrical length Y of the SHDSL noise test loops, when testing SHDSL at noise model B, C, or D» формулируют требования обеспечения гарантированной скорости $R_{SHDSL}^t(f_i, N_{Rx}(f_i))$ в зависимости от длины линии, характеризуемой затуханием $A_i(f_i)$ на измерительной частоте f_i при заданной условной длине линии $L2$, и спектральной модели помех на входе приемника $N_{Rx}(f_i)$;

— «Table B.12/G.991.2 — Symmetric PSD parameters» задает параметры, используемые в (4);

— «Figure B.8/G.991.2 — Nominal PSDs for 0dB power back-off» иллюстрирует номинальный спектр сигнала по (4).

● G.991.2 Appendix IV. Tabulation of Annex B noise profiles: «Table IV.1/G.991.2 — STU-C side/symmetric PSDs» определяют спектры помех для моделей А, С и D (объемный числовой материал спектров помех в настоящей статье не приводится).

Результаты расчета неизрасходованного запаса помехозащищенности SHDSL 16-ТСРАМ (при испытаниях на обеспечение гарантированной скорости на линии ТП-0,4) по (1) — (7) при отсутствии дополнительного затухания передатчика $A^{Tx} = 0$ дБ приведены в табл. 2. При $\Delta SNR_0 = 9,75$ дБ, $\Delta SNR = 6$ дБ и $K = 3$ (16-ТСРАМ) необходимый запас помехозащищенности составит

$$SNR^{min} = \Delta SNR_0 + \Delta SNR + 3K = 24,8 \text{ дБ,}$$

Таблица 2

Модель помех	Гарантированная скорость R_{SHDSL}^t , кбит/с	Контрольная частота f_i , кГц	Рабочее затухание $A_i(f_i)$, дБ	Эквивалентная длина		Запас помехозащищенности SNR , дБ	Неизрасходованный запас $SNR - 24,8$, дБ
				$L2$, м	Длина по [3] $L2_{Bris}$, км		
А	384	150	43,0	4106	3,874	25,1	0,3
	512	150	37,0	3535	3,333	26,4	1,6
	768	150	29,0	2773	2,613	27,8	3,0
	1024	150	25,5	2439	2,297	26,9	2,1
	1280	150	22,0	2105	1,982	27,2	2,4
	1536	150	19,0	1820	1,712	27,7	2,9
	2048	200	17,5	1558	1,509	26,7	1,9
	2304	200	15,5	1381	1,336	27,2	2,4
С	384	150	50,0	4773	4,505	25,1	0,3
	512	150	44,0	4202	3,964	26,3	1,5
	768	150	35,5	3392	3,198	27,8	3,0
	1024	150	32,0	3058	2,883	26,6	1,8
	1280	150	28,5	2725	2,568	26,7	1,9
	1536	150	25,5	2439	2,297	27,1	2,3
	2048	200	24,0	2135	2,069	26,0	1,2
	2304	200	21,5	1913	1,853	26,7	1,9
D	384	150	50,0	4773	4,505	23,0	-1,8
	512	150	44,0	4202	3,964	23,9	-0,9
	768	150	35,5	3392	3,198	26,8	2,0
	1024	150	32,0	3058	2,883	26,3	1,5
	1280	150	28,5	2725	2,568	27,1	2,3
	1536	150	25,5	2439	2,297	27,9	3,1
	2048	200	24,0	2135	2,069	27,0	2,2
	2304	200	21,5	1913	1,853	28,1	3,3

Таблица 3

Длина линии ТП-0,4 l, км	Скорость, кбит/с, и СПМ собств. помех приемника, дБм/Гц	Способ модуляции					
		4-ТСРАМ	8-ТСРАМ	16-ТСРАМ	32-ТСРАМ	64-ТСРАМ	128-ТСРАМ
0,3	кбит/с	—	—	—	—	—	15360
	дБм/Гц	—	—	—	—	—	−91
0,5	кбит/с	—	—	—	—	12800	—
	дБм/Гц	—	—	—	—	−91	—
1,0	кбит/с	—	—	—	10240	10880	11520
	дБм/Гц	—	—	—	−97	−101	−105
2,0	кбит/с	2560	5120	6912	7680	7680	7680
	дБм/Гц	−89	−101	−110	−115	−118	−121
3,0	кбит/с	1600	3520	4480	4480	4160	2240
	дБм/Гц	−96	−109	−117	−120	−121	−111
4,0	кбит/с	1024	1920	2560	2240	1024	—
	дБм/Гц	−102	−111	−118	−118	−111	—
5,0	кбит/с	640	1024	1024	832	—	—
	дБм/Гц	−107	−114	−116	−116	—	—
6,0	кбит/с	512	512	512	—	—	—
	дБм/Гц	−113	−114	−116	—	—	—

что практически полностью исчерпывает фактический запас SNR во всех 24 проанализированных случаях. Остаток запаса располагается в диапазоне $-1,8 \dots 3,3$ дБ со средним значением 1,7 дБ. Это можно рассматривать как доказательство верности модели SHDSL (1)–(7).

Собственные помехи приемника SHDSL. Спектральная плотность собственных помех на входе приемника SHDSL может быть определена с помощью модели линии по (1)–(7) для обработки экспериментальных данных, опубликованных в [2] и касающихся оборудования SHDSL, функционирующего в условиях отсутствия переходных и сторонних помех.

Испытания модемов FlexDSL Orion2+ проводились НТИЦ «Натекс» в 2007 г. с целью определения зависимости расстояния от скорости данных при различных показателях ТСРАМ-кодирования.

Результаты экспериментального исследования скоростных характеристик оборудования (скорость–дальность) и расчета эквивалентного уровня СПМ помех на входе приемника, учет которого обеспечит соответствие расчетной скорости экспериментально полученному значению при той же длине линии ТП-0,4, сведены в табл. 3.

Обработка экспериментальных данных показала наличие существенного разброса (от -121 до -89 дБм/Гц) уровня СПМ собственных помех приемника. Однако для традиционных (отрабатываемых производителями, как минимум, с 2003 г. — года выпуска последней официальной редакции Рекомендации G.991.2 [1]) режимов этот разброс существенно меньше. Так, при рассмотрении лишь способов модуляции 16- и 32-ТСРАМ, этот разброс составит от -120 до -115 дБм/Гц, что позволяет, проведя усреднение, учитывать собственные помехи на входе приемника SHDSL:

$$N_{RxSHDSL} = -117 \text{ дБм/Гц.} \quad (8)$$

Столь высокий уровень собственных помех, превышающий на 21 дБ уровень СПМ собственных помех ADSL

$N_{RxADSL} = -138$ дБм/Гц, свидетельствует о преимуществе пассивного частотного разделения направлений передачи над активным эхокомпенсационным при организации дуплексной связи по одной паре. Однако это преимущество утрачивается при строительстве сетей доступа, поскольку влияние переходных помех от соседних линий подавляет собственные шумы приемников обеих систем передачи.

Уровень СПМ собственных помех приемника ограничивает его чувствительность. Учет чувствительности легко производится путем определения СПМ помех $N(f)$ в выражении (7):

$$N(f) = N_{RxSHDSL} + N_{RxADSL} \quad (9)$$

где $N_{Rx}(f)$ — СПМ помех, измеренная на входе приемника SHDSL.

Таким образом, модель (1)–(9) цифровых линий пригодна для реализации средствами малопотребляющих контроллеров, встраиваемых в специализированные измерительные приборы, предназначенные для оперативного определения скоростного потенциала SHDSL в многопарных кабелях.

ЛИТЕРАТУРА

1. ITU-T G.991.2. Single-pair high-speed digital subscriber line (SHDSL) transceivers (приемопередатчики однопарной высокоскоростной цифровой абонентской линии SHDSL). — 12/2004.
2. Иванов С. Цифровизация отдаленных районов: решения компании «Натекс» // Первая миля. — 2007. — № 3. — С. 16–19.
3. Брискер А.С. и др. Городские телефонные кабели. Справочник. — М.: «Радио и связь», 1991.

Получено 15.05.08

