

Коварство простых методов оценки скоростного потенциала ADSL

Кочеров А.В., Главный метролог ООО «Аналитик-ТС» www.analytic.ru
+7(495)775-60-11, andrey@analytic.ru

Тарасов Н.И., Ведущий научный сотрудник лаборатории ЦСП Одесского НИИС, к.т.н.
+38(0482)22-19-71, tarasov@oniis.odessa.ua

Вариант статьи опубликован в журнале «Сетевые решения», Минск №4, 2006

В статье описаны эксплуатационные преимущества цифровых асимметричных абонентских линий (ADSL), основанных на применении приемопередатчиков, поддерживающих технологию с разделением используемой полосы частот на множество подканалов (DMT).

Дан анализ методов оценки скоростного потенциала ADSL по сопротивлению шлейфа и с применением технологии SELT.

Построены характеристики с учетом различных типов моделей помех на окончаниях пары.

Определены источники ошибки определения скорости и диапазоны измерения скорости.

Эксплуатационные преимущества xDSL на основе DMT

ADSL-технология является в настоящее время наиболее приспособленной для организации цифровых абонентских линий по следующим причинам.

Соотношение скоростей передачи в направлениях запрос-ответ асимметрично и перераспределено в пользу нисходящего потока (downstream), что соответствует обычной тактике использования абонентской линии и позволяет частично или полностью разделить полосы частот сигналов приема и передачи данных. Полоса частот без существенной потери скорости нисходящего потока может быть разделена без перекрытия спектров нисходящего и восходящего потоков (non-overlapped spectrum operation). Такой режим передачи используется в большинстве практических случаев, что позволяет:

- не производить эхокомпенсацию в оконечном ADSL-оборудовании и поэтому оператору нет нужды заботиться об отсутствии неоднородностей в линии;
- кроме того, как правило, не имеет значения переходное затухание на ближнем конце (NEXT) как на станционной, так и на абонентской стороне¹.

Примененный принцип переноса цифрового потока множеством частотных подканалов (DMT), в каждом из которых осуществляется передача с символьной скоростью 4 кбод (при многократно более широких используемых полосах частот² от 112 до 2070 кГц), обеспечивает следующие свойства:

- низкая символьная скорость позволяет не учитывать неравномерный и колебательный характер протекания частотных характеристик времени прохождения (ГВП) и затухания³;
- есть возможность выбрать в каждом частотном подканале то значение скорости, которое может быть обеспечено именно в этой узкой (4,3125 кГц) элементарной полосе, то есть скорость подканала автоматически назначается в зависимости от величины измеренной защищенности с учетом установленного порога адаптации;
- операция определения защищенности в каждом подканале производится приемопередатчиками при установлении соединения;
- при измерении защищенности учитывается как зависимость уровня сигнала от затухания в кабеле, так и результирующий уровень помех от всех воздействующих источников.

Указанные свойства ADSL (как технологии, использующей механизмы DMT и частотного разделения направлений передачи), позволяют существенно упростить задачу оценки скоростного

¹ Столь сильное заявление справедливо, конечно, только в том случае, когда уплотнение многопарного кабеля осуществляется с применением исключительно ADSL-оборудования.

² Для G.992.x upstream полоса частот 26...138 кГц. Полосы для downstream non-overlapped 138...1104 кГц (G.992.1, G.992.3) и 138...2208 кГц (G.992.5).

³ Причиной колебательного характера АЧХ и ГВП является наличие неоднородностей в кабельной линии (отводы, "замокания", использование кабеля, составленного из участков с разными волновыми сопротивлениями, "разбитость" пары).

потенциала ADSL, поскольку неоднородности в кабельных линиях и переходное затухание на ближнем конце можно не учитывать.

В этой связи рассмотрим два подхода к проблеме инструментальной оценки скорости ADSL, реализуемые как с применением простейших и широко распространенных средств, так и использованием современных технологий.

Оценка скоростного потенциала ADSL по сопротивлению шлейфа и емкости пары

Полагая, что условия работы приемопередатчиков зависят от затухания, попытаемся дать простой метод оценки скоростного потенциала линии по измеренному сопротивлению шлейфа, так как сопротивление шлейфа $R_{ш}$ для исправной пары определяет частотную характеристику затухания: $A(f) = R_{ш} / (2 \times R_{ж}) \times \alpha(f)$, где $R_{ж}$ – сопротивление жилы, $\alpha(f)$ – коэффициент затухания.

Вопрос исправности пары (близости низкочастотных параметров пары к номинальным характеристикам кабеля) здесь ставится в том смысле, что некоторые неисправности могут существенно сказаться на искажении модели восстановления затухания по данным сопротивления шлейфа. Контроль исправности пары (с точки зрения корректности восстановления затухания линии по сопротивлению шлейфа) может быть осуществлен по соотношению измеренных значений сопротивления шлейфа и емкости пары $K = R_{ш}/C$, отклонение δK которого от номинала $K_n = (2 \times R_{ж})/C_p$ не должно превышать заданных пределов.

При определении погрешности восстановления затухания по измеренному значению сопротивления шлейфа должны быть учтены следующие условия⁴:

- номинальная емкость кабелей рассматриваемых типов (см. Табл.1) согласно [1] равна 45 нФ/км, но через 15 лет эксплуатации, как следует из [2], может возрасти до 60 нФ/км ($\delta C_p = +33\%$), что приведет к превышению фактического значения затухания над расчетным не менее чем на⁵ $\delta A = (\sqrt{(1 + \delta C_p / 100\%)} - 1) \times 100\% = +15\%$; столь значительная величина методической погрешности позволяет пренебречь погрешностями измерения⁶ сопротивления и емкости [3];
- восстановление затухания по сопротивлению шлейфа достоверно при условии нахождения соотношения $K = R_{ш}/C$ в диапазоне допустимых значений $0,75 \times K_n \dots 1,07 \times K_n$, вне которого пара должна быть признана неисправной⁷.

Отклонение фактического соотношения $R_{ш}/C$ от номинального, определяемого типом кабеля и сечением жилы, может помочь выявить следующие неисправности пары⁸:

- наличие неоднородных вставок (соотношение $R_{ш}/C$ существенно зависит от диаметра жилы, причем области допустимых значений, определяемые введенными выше допусками, для указанных в Табл.1 диаметров не перекрываются; по этой причине пара, составленная из исправных участков с разными диаметрами жил будет иметь соотношение $R_{ш}/C$, отличное от нормативного);
- "замокание" кабеля, "разбитость" пары и наличие отводов (эти неисправности изменяют емкость пары, что также отражается на соотношении $R_{ш}/C$).

⁴ Возможны и иные методы определения диапазона допустимых значений соотношения $R_{ш}/C$, свидетельствующего о исправности пары. Причем информативность соотношения $R_{ш}/C$ будет тем выше, чем более точно будет известна и учтена номинальная емкость кабеля.

⁵ Упрощенные формулы (см. Таблицу 4.8 в [1]) позволяют считать, что коэффициент затухания пропорционален $\sqrt{C_p}$.

⁶ Погрешности измерения сопротивления и емкости согласно требований, изложенных в РД 45.255-2002 [3], должны составлять 1% и 1,5%, что соответствует фактическому уровню современных кабельных приборов.

⁷ Диапазон допустимых значений получен следующим образом. При увеличении емкости на 33% коэффициент уменьшится до $K_n \times 1/1,33 = 0,75 \times K_n$. При увеличении сопротивления на 7% (ОСТ 45.82-96 [2] определяет максимальное значение сопротивления шлейфа равным 192 Ом/км для пар с сечением проводников 0,5 мм, что на 7% превышает номинальное $2 \times 90 = 180$ Ом/км значение) коэффициент равен $1,07 \times K_n$.

⁸ Следует еще раз заметить, что описанные неисправности как таковые не влияют на работоспособность ADSL (см. выше), а сказываются на искажении модели восстановления затухания по данным сопротивления шлейфа. Кроме контроля по $R_{ш}/C$ необходим, конечно, контроль сопротивления изоляции, омической и емкостной асимметрии, например, согласно требованиям ОСТ 45.82-96 [2].

Параметры кабелей типа ТП				
D, мм	0,32	0,40	0,50	0,64
$\alpha(300\text{кГц})$, дБ/км	17,6	12,9	9,9	7,23
Rж, Ом/км	216	139	90	55
Cp, нФ/км	45	45	45	45
$K_H=2R_{ж}/C_p$, Ом/нФ	9,60	6,18	4,00	2,44
Диапазон допустимых значений $K=R_{ш}/C$, Ом/нФ	7,2...10,3	4,6...6,6	3,0...4,3	1,8...2,6

Сведения о зависимости скорости нисходящего и восходящего потоков асимметричных цифровых линий (ADSL) от типа и длины кабеля связи (то есть от затухания) и наличия спектра помех на его окончаниях содержатся в тексте рекомендаций ITU-T G.992.x [4]...[8]:

- для G.992.1 и G.992.2 характеристики помехозащищенности определены непосредственно;
- для G.992.3 указано, что защищенность соответствует стандарту ETSI TS 101 388;
- для G.992.4 и G.992.5 означено, что характеристики помехозащищенности изучаются и будут приведены в дальнейших выпусках.

Скоростной потенциал оконечного оборудования в G.992.x задан для типовых тест-линий, соответствующих G.996.1 [9], характеризуемых затуханием на частоте 300 кГц и спектральными моделями помех (см. Рис.1) в точках подключения приемопередатчиков:

- AWGN-140 – равномерный белый шум (Additive White Gaussian Noise) - соответствует идеальному случаю⁹; суммарный уровень в полосе 1...1500 кГц равен минус 78,2 дБм;
- ETSI A – учтены переходы от ISDN и ДВ-СВ-радиостанций; уровень минус 49,4 дБм для полосы 1...1500 кГц;
- ETSI B – модель помех, характерных для переходов от HDSL-систем при переходном затухании между парами на частоте 300 кГц около 56...60 дБ; уровень в полосе 1...1500 кГц составляет минус 43,0 дБм.

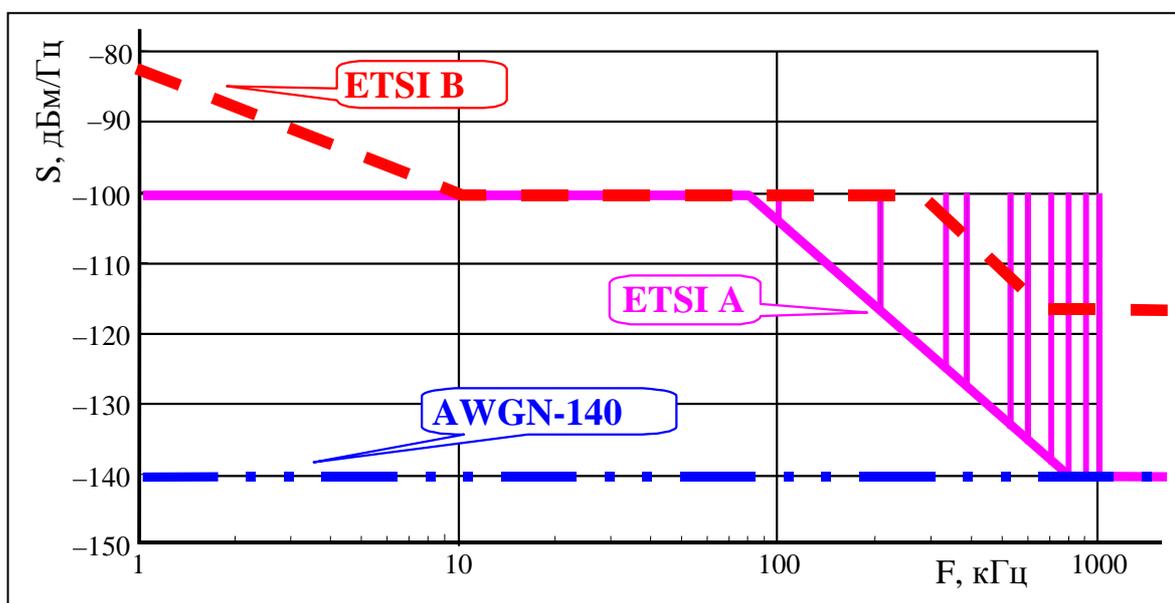


Рисунок 1

Частотная характеристика затухания, спектр помех и ограничение динамического диапазона приемника лимитируют скорость передачи сигнала, что отражено в рекомендациях ITU-T (например, в таблицах Table G.1/G.992.1 и Table E.1/G.992.2 для non-overlapped ADSL). Следовательно, все приемопередатчики, объявленные производителем как соответствующие рекомендациям G.992.x, должны удовлетворять требованиям Табл.2.

⁹ Несмотря на свою идеальность такой спектр помех наблюдается на реальных кабелях вне промышленных центров.

Помехозащищенность ADSL в соответствии с G.992.1 и G.992.2			
Скорость нисходящего потока ADSL, Мбит/с	Затухание на частоте 300 кГц A(300 кГц), дБ		Модель шума
	G.992.1	G.992.2	
4,0	40	-	ETSI A
2,0	30	-	ETSI B
	50	-	ETSI A
1,5	60	60	AWGN-140
0,5	60	60	ETSI A

Воспользовавшись алгоритмом расчета скорости (см. [10] и Табл.3) и построив скоростные характеристики для различных типов помех, можно указать область неоднозначности определения скорости по сопротивлению шлейфа.

Таблица 3

Расчет скорости ADSL, ADSL2, ADSL2+ (ITU-T G.992.x Non-overlapped spectrum)		
	Upstream	Downstream
Скорость V , кбит/с складывается из скоростей в элементарных частотных подканалах.	$V = f_t \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} K(f_i)$ $f_{\min} \dots f_{\max} = 26 \dots 134$ кГц	$V = f_t \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} K(f_i)$ $f_{\min} \dots f_{\max} = 138 \dots 1104$ кГц - ADSL, ADSL2 $f_{\min} \dots f_{\max} = 138 \dots 2208$ кГц - ADSL2+
Количество бит на символ, передаваемое в одном подканале за один такт (кратность модуляции), определяется частотной характеристикой помехозащищенности $R(f_i)$, дБ и заданным запасом помехозащищенности ΔR_m , дБ	$f_t = 4$ кбод - частота посылки символов (тактовая частота) $K(f_i) = [0,33(R(f_i) - \Delta R_m - \Delta R_0)]$ - кратность модуляции $K(f_i) \leq K_{\max}$ $K_{\max} = 6 \dots 15$ - ограничение кратности модуляции $\Delta R_m = 6 \dots 15$ дБ - заданный запас помехозащищенности цифровой линии $\Delta R_0 = 10$ дБ - запас неидеальности приемника $f_i - f_{i-1} = 4,3125$ кГц - ширина полосы элементарного подканала $f_{\min} \dots f_{\max}$ - полоса передачи	$R(f) = S_{in}(f) - S_{noise}(f)$, дБ - частотная характеристика защищенности $S_{noise}(f)$, дБм/Гц - спектр помех от всех источников на входе приемника $S_{in}(f) = S_{out}(f) - A(f)$, дБм/Гц - спектр полезного сигнала на входе приемника $S_{out}(f)$, дБм/Гц - спектр сигнала передатчика $A(f)$, дБ - АЧХ кабеля

Так для кабеля типа ГП с диаметром жил $D=0,4$ мм при его уплотнении по технологиям ADSL [4] и ADSL2 [6] на Рис.2 приведены зависимости скорости от затухания, сопротивления шлейфа и длины кабеля. Расчет проведен для трех шумовых моделей; дополнительно указаны контрольные точки, соответствующие требованиям G.992.1 и G.992.2 (см. Табл.2).

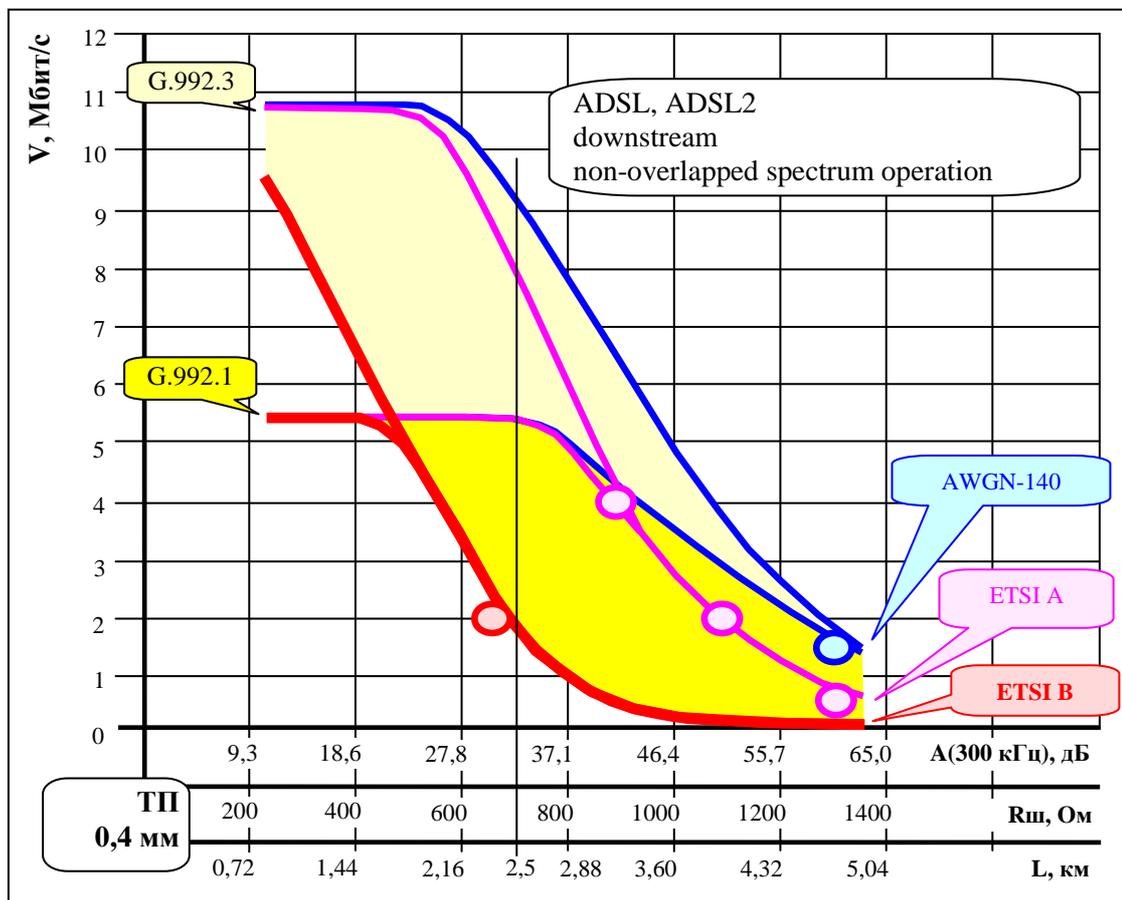


Рисунок 2

Если исходить из того, что удовлетворительные результаты измерений должны гарантировать устойчивую работу цифровой линии, то для выполнения практических работ представляется необходимым в качестве нормы выбрать кривую, соответствующую шумовой модели ETSI B (см. Рис.1), что обеспечивает учет переходных помех от параллельно работающих HDSL-линий, то есть наихудший из рассмотренных случаев.

Достоинствами метода контроля линии по сопротивлению шлейфа являются:

- упрощение измерительной процедуры - проверка выполняется только с одного (обычно стационарного) окончания линии;
- использование сравнительно недорогих кабельных приборов.

Недостатки метода контроля линии по сопротивлению шлейфа вызваны отсутствием информации о протекании частотной характеристики затухания и спектральном распределении помех, что может привести к:

- увеличению доли выбраковки пар по соотношению $R_{ш}/C$, которые по характеристике защищенности могли бы быть пригодными для использования;
- увеличению доли пар, которые используются с неоправданно высоким запасом по скоростному потенциалу; например, для ADSL2 G.992.3 при длине линии 2,5 км планируемая скорость не должна превышать 1,8 Мбит/с, но в отсутствие помех может более чем 5-тикратно увеличиваться, достигая 9,2 Мбит/с (см. Рис.2);
- признанию годными к переносу цифрового потока на заданной скорости пар, наличие неконтролируемых помех на окончаниях которых приведет к нестабильной работе или к полной потере работоспособности цифровой линии на необходимой скорости.

Можно было бы дополнить описанный метод традиционным определением помехозащищенности путем сопоставления уровня гармонического измерительного сигнала на характерной частоте и суммарного уровня помех в используемой приемопередатчиками полосе частот. Но такая модернизация, требуя применения дополнительных измерительных средств, не обеспечит повышение точности оценки скорости потому, что спектр ADSL-передатчика практически

плоский, а это не позволяет указать корректный метод определения опорной частоты, кроме того неравномерность рабочего затухания в полосе частот ADSL может достигать 50 дБ.

Таким образом, отсутствие учета неравномерности спектра помех при оценке скорости лишь по сопротивлению шлейфа способно вызвать весьма значительные ошибки определения скоростного потенциала, что иллюстрируют Рис.2 и Табл.4.

Таблица 4

Неопределенность оценки скоростного потенциала линии длиной 2,5 км (ТП 0,4 мм) по сопротивлению шлейфа в зависимости от неконтролируемой помеховой обстановки		
Модель помех	Скорость, Мбит/с	
	ADSL G.992.1	ADSL2 G.992.3
AWGN-140 (нет помех)	5,4	9,2
ETSI A (переходы от ISDN BRI)	5,4	8,0
ETSI B (переходы от HDSL)	1,8	1,8

Оценка скоростного потенциала ADSL современными средствами измерений по технологии SELT

В том случае, когда оператор уже располагает современными средствами измерений (xDSL-анализаторы) или планирует их приобретение, то для обеспечения оперативности выполнение измерений хотелось бы производить с одного конца линии и единственным прибором. И при этом измерительный прибор желательно размещать на стационарной стороне, обходясь без визита к абоненту. Производители xDSL-анализаторов идут навстречу потребителю и предлагают измерительную технологию, получившую название SELT (Single-End Line Testing).

Технология SELT [11], оперируя на стационарном окончании линии (на удаленном конце – режим холостого хода - XX), позволяет измерить емкость пары, уровень и спектр продольных и поперечных помех на стационарном окончании пары, переходное затухание, импеданс и затухание асимметрии пары, построить рефлектограмму для локализации дефектов пары и даже определить возможную скорость передачи нисходящего потока ADSL.

Последняя возможность основана на следующем эффекте:

- рефлектометр посылает сигнал, который полностью отражается от XX на удаленном конце и возвращается на вход прибора с задержкой, которая пропорциональна длине линии;
- исходный и отраженный сигналы разделены во времени, что позволяет легко определить их спектры (преобразование Фурье), разность которых составит частотную характеристику затухания двойного прохода; делением этой характеристики (в дБ) пополам может быть получена АЧХ пары $A(f)$;
- зная исходный спектр сигнала $S_{out}(f)$, АЧХ $A(f)$ и спектр помех на окончании кабеля $S_{noise}(f)$, к которому подключен прибор, определяется частотная характеристика защищенности $R(f)$, интегрированием которой в соответствующей полосе частот нетрудно получить скоростной потенциал линии.

Недостатков у такого измерительного режима как минимум два - методический и метрологический.

Недостаток метода. При установке прибора на стационарной стороне он может измерить спектр помех только на доступной ему стороне; то есть применительно к ADSL может быть оценен скоростной потенциал потока upstream; для оценки скорости downstream следует переносить прибор к абоненту.

Метрологический недостаток более серьезен. Так как измеряется затухание двойного прохода и из него вычисляется АЧХ рабочего затухания, то измерительный диапазон прибора (в дБ) сокращается ровно вдвое. Диапазон измерения рабочего затухания по негармоническому сигналу может достигать 70 дБ, поэтому при измерении АЧХ кабеля по данным затухания двойного прохода измерительный диапазон будет ограничен величиной 35 дБ. Цифровая линия ADSL2+ использует (правда с кратностью модуляции, уменьшающейся до $K=1$) те области частот, в которых затухание достигает 70 дБ. То есть прибор, который оценивает скоростной потенциал ADSL, должен обладать

как минимум таким же диапазоном. Это приводит к необходимости измерять затухание отраженного сигнала в диапазоне до 140 дБ, каковой показатель пока не достигнут.

При наличии измерительного диапазона лишь до 35 дБ с целью получения данных о протекании АЧХ на более высоких частотах (с затуханием до 70 дБ) следует применять экстраполяцию, причем экстраполируется не сама кривая, а оценивается длина линии по достоверным данным АЧХ на низких частотах и затем восстанавливается АЧХ в необходимом диапазоне частот с учетом справочных данных кабеля. Оценить погрешность такого экстраполяционного подхода затруднительно, но то, что в качестве результата измерений предлагается использовать результат экстраполяции представляется очевидным недостатком метода¹⁰.

Если же учитывать только данные в рамках диапазона непосредственного измерения АЧХ по отражению, то будет существенно ограничен диапазон измерения скоростного потенциала. Табл.5 демонстрирует существенные ограничения применения технологии SELT для оценки скоростного потенциала (расстаться с такой возможностью грустно (идея, действительно, эффективная), но необходимо).

Таблица 5

Ограничение диапазона измерений скоростного потенциала по методу SELT		
Цифровая линия ADSL2+ G.992.5 на кабеле ТП 0,4 мм	Downstream	Upstream
Расположение xDSL-анализатора	На абонентской стороне	На станционной стороне
Полоса частот спектра линейного сигнала, кГц	138...2208	26...138
Коэффициент затухания на максимальной частоте спектра [1], дБ/км	31,4	10,9
Максимальная длина линии, км	35/31,4= 1,1	35/10,9=3,2
Диапазон измерения скорости при модели помех не хуже ETSI B, кбит/с	Номинальный	32...29000
	Из-за ограничения по измеряемому затуханию	16500...29000
		580...1000

Достоверная оценка скоростного потенциала ADSL

Надежная оценка скоростного потенциала ADSL может быть обеспечена выполнением измерительных процедур, определенных в [10] и Табл.3:

- непосредственное измерение частотной характеристики защищенности в полосе приемопередатчика;
- вычисление элементарных скоростей в каждом частотном подканале;
- интегрирование элементарных скоростей для расчета скоростного потенциала линии.

Это достигается только применением двух современных xDSL-анализаторов, установленных на станционной и абонентской сторонах линии. При этом для удобства оператора анализаторы должны обеспечивать режимы генератора и измерителя, функции управления и обмена результатами измерений.

В то же время простой метод оценки скоростного потенциала линии по сопротивлению шлейфа целесообразно использовать на этапе планирования развития сетей xDSL-доступа, а также в тех случаях, когда оператор, предоставляющий ADSL-услуги, не располагает современными средствами измерений. Использование современных средств измерений по технологии SELT для оценки скорости ADSL возможно, но может осуществляться лишь на коротких линиях.

¹⁰ Помнится еще не так давно, экстраполируя абсолютно достоверные данные прямых наблюдений, приходили к выводу о катастрофическом обмелении Каспийского моря, и на этом основании пытались убедить себя в том, что жизненно необходимо строительство циклопической системы каналов.

Литература

1. А.С.Брискер и др. Городские телефонные кабели. Справочник. Москва, Радио и связь. 1991
2. ОСТ 45.82-96 Сеть телефонная городская. Линии абонентские кабельные с металлическими жилами. Нормы эксплуатационные. Госкомсвязи России
3. РД 45.255-2002 Средства измерений электросвязи. Измерители параметров металлических кабелей. Технические требования. Минсвязи России
4. ITU-T G.992.1 Asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers. 06/1999
5. ITU-T G.992.2 Splitterless asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers. 06/1999
6. ITU-T G.992.3 Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (ADSL2). 07/2002
7. ITU-T G.992.4 Splitterless asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (splitterless ADSL2). 07/2002
8. ITU-T G.992.5 Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) transceivers – Extended bandwidth ADSL2 (ADSL2+). 05/2003
9. ITU-T G.996.1 Test procedures for digital subscriber line (DSL) transceivers. 02/2001
10. А.Кочеров Ограничение скоростного потенциала асимметричной цифровой абонентской линии электрическими характеристиками медных кабелей. Электросвязь. Москва, 11/2004
11. И.Бакланов SELT в большом городе: проблемы массовой ADSL-изации. Connect! Москва, 04/2006