

Павел Смирнов

Copyright © 1995

Рекомендация МСЭ-Т (МККТТ) V.34: Основные особенности

Несмотря на достижения в области высокоскоростных цифровых систем передачи (ЦСП), модемы для коммутируемых телефонных каналов сохраняют свою привлекательность. Это объясняется широким распространением и доступностью таких каналов, изначальным назначением которых была передача речи. Если в распоряжении абонента находится аналоговый канал, то только модем может решить его задачи по передаче данных.

В настоящее время приобрел актуальность такой модем, максимальная скорость которого достигала бы скорости первичного канала ЦСП (32, 40, 64 кбит/с) при работе по коммутируемым каналам. Это дало бы возможность сделать спектр скоростей передачи данных непрерывным, что, в свою очередь, облегчило бы взаимодействие аналоговых и цифровых сетей. Для решения проблемы создания такого высокоскоростного модема, начиная с 1990 года были образованы различные исследовательские группы под эгидой МККТТ, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), а также внутри ведущих компаний - разработчиков модемов, таких как: Motorola Inc., AT&T Bell Laboratories, Racal-Datcom и др. Эти работы и положили начало рекомендации МСЭ-Т (МККТТ) V.34.

Немного истории. Уже в 1991 году на страницах журналов [1] появилась аббревиатура "V.fast", обозначающая девиз разработки модема в рамках МККТТ сначала на скорость 24000, а потом и 28800 бит/с. Под лозунгом "V.fast" фирма Rockwell International Corp. начала производство наборов БИС для модемов, тиражируя еще несогласованные решения, но претендуя на роль законодателя стандарта де-факто, названного "V.FC". К тому времени заделы в области разработки высокоскоростных модемов ведущих компаний позволяли производить устройства со скоростями выше 14400 бит/с. Так появились модемы, которые помимо стандартных режимов имели возможность работать на скоростях 16800 и 19200 бит/с, используя фирменные протоколы (ZyXEL, U.S. Robotics).

Появление открытого стандарта фирмы AT&T Paradyne - V.32terbo [2] в мае 1993 года еще сильнее обострило положение, разделив всех заинтересованных лиц на два лагеря - сторонников V.32terbo и его противников. С одной стороны, благодаря несложной доработке модема по рекомендации V.32bis, его скорость возрастает до 19200 бит/с, что достигается увеличением числа сигнальных точек до 512, сохраняя неизменной символьную скорость и тип решетчатого кодера. С другой стороны, такой чисто количественный подход не несет в себе ничего прогрессивного и имеет лишь коммерческий смысл.

Вообще, борьба на рынке высокоскоростных модемов существенно затянула принятие рекомендации V.34. Чрезмерное увлечение этой борьбой породило неразбериху между международными рекомендациями и торговыми марками, неизменно начинающимися с префикса V. Фирмы-разработчики явно преуспели в стремлении сохранить know-how и одновременно навязать свои подходы. Характерно, что держателями патентов на различные технологии, вошедшие в рекомендацию V.34, являются 17 компаний.

И все же, в феврале 1994 года появилась предварительная рекомендация V.34, детальные спецификации были согласованы в начале июня, а на заседании исследовательской комиссии МСЭ-Т (МККТТ) 20 сентября того же года рекомендация была принята. Однако, все это лирика, которой и без того много в публикациях по околomodемной тематике. Перейдем к теме статьи и для начала дадим полное название рекомендации V.34 [3]: "Модем, обеспечивающий передачу данных со скоростями до 28800 бит/с для использования на коммутируемой сети общего пользования и на двухточечных двухпроводных выделенных каналах телефонного типа".

Интересно, что скорость 14400 бит/с до недавнего времени рассматривалась многими разработчиками модемов, как максимально-возможная при работе по каналу тональной частоты. Чем же объяснить такой головокружительный подъем по шкале скорости? Что стоит за этой рекомендацией, которая явилась квинтэссенцией напряженной работы многих ученых и инженеров? Какие концепции легли в ее основу? Попытаемся ответить на эти вопросы.

Ключевым моментом, позволившим увеличить скорость, является более полное использование той полосы частот, которую имеет аппаратура, входящая в состав коммутируемой сети. Так, рекомендация V.32 определяет использование фиксированной полосы частот шириной 2.4 кГц (600...3000 Гц), которая почти всегда уже фактической полосы пропускания современного каналобразующего оборудования. Современные ЦСП, использующие ИКМ со скоростью 64 кбит/с, имеют частоту дискретизации аналогового сигнала 8 кГц и полосу пропускания не менее 3.5 кГц. Даже когда сигнал проходит через канал, образованный как цифровой, так и аналоговой аппаратурой, пригодная для передачи данных полоса частот шире 3 кГц.

По этим причинам используемая модемом по рекомендации V.34 полоса частот должна быть адаптивно-меняющейся величиной. Рекомендацией предусматривается шесть символьных скоростей S, равных 2400, 2743, 2800, 3000, 3200 и 3429 символов/с (в рекомендации V.34 не упоминается единица измерения скорости модуляции "Бод", что связано со спецификой используемых сигналов, размерность которых больше двух) и ряд значений несущей частоты: 1600, 1646, 1680, 1800, 1829, 1867, 1920, 1959, 2000 Гц. Это дает модему возможность использовать имеющуюся полосу частот с максимальной

эффективностью. Вообще, идея адаптивной подстройки под конкретные характеристики канала, которая в предыдущих поколениях модемов реализуется лишь в приемной части модема, в данной рекомендации обрела глобальный характер. Даже сама скорость передачи данных R выбирается из множества допустимых, лежащих в диапазоне от 2400 до 28800 бит/с, кратных 2400 бит/с, и может меняться в ходе работы. При этом за один символьный интервал, длительность которого равна $1/S$, может передаваться от 1 до 9 бит. Наивысшая скорость - 28800 бит/с возможна только на символьных скоростях 3200 и 3429 символов/с, при этом ширина спектра линейного сигнала превышает полосу пропускания канала тональной частоты, которая как известно равна 3100 Гц. Поэтому способность модема работать на скорости 28800 бит/с через такой канал характеризует искусство его разработчиков.

Другим, не менее важным, моментом является система помехоустойчивого кодирования. Техника TCM (Trellis Coded Modulation - модуляция с решетчатым кодированием) значительно продвинулась вперед по сравнению с той, которая заложена в рекомендации V.32. В ней двухмерная сигнально-кодовая конструкция (СКК), представляющая собой 32-х точечную квадратурную амплитудную модуляцию с нелинейным сверточным кодом на 8 состояний, была значительным достижением для 1984 года. Но уже в публикациях 1987 года [4] описывались 2, 4, 8 и 16-мерные СКК, позволяющие получить энергетический выигрыш от кодирования от 4.01 до 6.05 дБ. Замечательные результаты научных исследований в области синтеза СКК, а также алгоритмов их приема позволили ввести в рекомендацию V.34 четырехмерную СКК со сверточным кодом на 16, 32 и 64 состояния. С увеличением числа состояний кодера растет свободное евклидово расстояние между соседними путями на решетчатой диаграмме, в результате чего улучшается помехоустойчивость всей системы сигналов. С другой стороны, эта тенденция ведет к усложнению декодера и увеличению задержки на принятие решения.

Всего в рекомендации представлено 50 различных сигнальных созвездий (проекций), которые и обеспечивают работу на всех скоростях.

Для примера, на рис. 1 представлены четыре проекции на плоскость СКК с различным числом сигнальных точек L , равным 24, 128, 256 и 960.

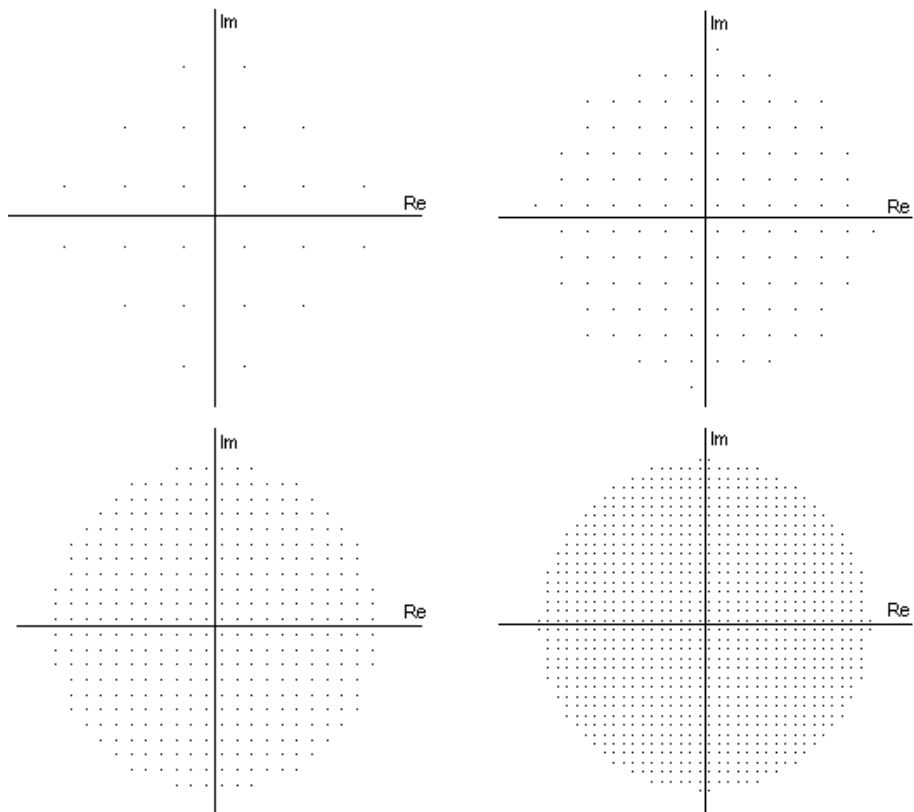


Рис.1 Проекции СКК, используемых в рекомендации V.34 при:

- R=9600 бит/с, S=2400 символов/с, тип СКК - минимальный;
- R=19200 бит/с, S=3000 символов/с, тип СКК - минимальный;
- R=24000 бит/с, S=3200 символов/с, тип СКК - минимальный;
- R=28800+200 бит/с, S=3200 символов/с, тип СКК - расширенный;

В четырехмерном пространстве каждая точка имеет четыре координаты, передается за два символьных интервала и при формировании ее позиционного номера используется один избыточный бит. Переход к четырехмерным СКК позволил существенно увеличить общее число сигнальных точек, что дало возможность поднять кодовую скорость (отношение числа информационных бит к общему числу бит) без ухудшения помехоустойчивости. Интересно, что количество сигнальных точек в четырехмерном пространстве может достигать величины порядка 10^{11} ($L = 960$) и тогда, например, чтобы передать все возможные сигнальные точки, модем должен круглосуточно работать около трех лет.

Впервые в схему передатчика модема введен генератор колец, способствующий синтезу выходного сигнала требуемой формы. Дело в том, что, несмотря на наличие скремблера на входе передатчика, используемые СКК формируют сигнал с большим пик-фактором (отношение пикового значения мощности к среднему). Следствием этого является статистическая зависимость между передаваемой информацией и уровнем сигнала на выходе, что ухудшает общие характеристики системы. Для решения этой задачи в рекомендации предложено специальное предкодирование (Shell Mapping), которое

обеспечивает информационную развязку для всех типов сигнальных созвездий. При таком предкодировании двумерное созвездие разбивается на концентрические кольца, содержащие равное число сигнальных точек, а специальные преобразования позволяют получить требуемый закон распределения для чередования колец.

Одной из интересных технологий, нашедших отражение в рекомендации V.34, является амплитудно-фазовая предкоррекция сигнала передатчика. В рекомендации V.32 для устранения межсимвольной интерференции предусматривался традиционный адаптивный корректор, так как СКК синтезировалась для идеального канала с аддитивным белым гауссовским шумом. Однако, этот тип корректора не оптимален, когда модем использует максимально-возможную полосу частот канала. В этом случае имеет место сильное затухание на краях полосы пропускания и линейный корректор сильно ухудшает соотношение сигнал/шум.

Считается, что в этом случае целесообразнее использовать нелинейный корректор с обратной связью по решению DFE (decision feedback equalizer), использующий результат декодирования. Но, к сожалению, DFE не может быть использован в соединении с решетчатым кодом из-за задержки на декодирование в приемнике. Тем не менее, предкоррекция на передаче может обеспечить такие же характеристики, что и идеальный DFE. Мягкая предкоррекция со спектральными предискажениями, которая введена в рекомендацию V.34, представляет собой решение, позволяющее получить выигрыш более 3.5 дБ в соотношении сигнал/шум по сравнению с линейной коррекцией. Предискажения на передаче вводятся при помощи цифрового фильтра третьего порядка с комплексными коэффициентами, которые пересылаются от удаленного модема на этапе вхождения в связь. Таким образом, сигнал передатчика имеет искажения, обратные тем, которые он приобретает при прохождении по каналу, и за счет этого существенно облегчается задача адаптивного корректора на приемной стороне.

Кроме того, в рекомендации заложена возможность выбора одного из 11 заранее оговоренных шаблонов для спектра сигнала передатчика. Эти шаблоны предполагают подъем высокочастотных составляющих спектра, что должно скомпенсировать искажения, вносимые абонентскими и соединительными линиями.

Другим немаловажным фактором, обеспечивающим устойчивую работу модема, в первую очередь по каналам с ИКМ, стало введение в передаваемый сигнал нелинейных предискажений. Это позволяет частично скомпенсировать остаточные специфические нелинейные искажения сигнала, вносимые аппаратурой ИКМ. Предискажения приводят к неоднородной трансформации сигнального пространства, увеличивая защищенность периферийных точек (рис. 2).

Интересной особенностью рекомендации является процедура адаптации к каналу связи после установления соединения. При этом передатчик модема дважды посылает в линию специальный зондирующий сигнал, который представляет собой последовательность из 21 гармонических колебаний разных частот в диапазоне от 150 до 3750 Гц. Приемник удаленного модема при помощи этого сигнала осуществляет расчет частотной характеристики канала связи, степени нелинейных искажений, сдвига частот и других характеристик канала. Далее, в соответствии с этим выбирается номинальная символьная скорость, значение несущей частоты, уровень передачи, номер шаблона и коэффициенты предкорректора, скорость передачи данных, число состояний решетчатого кодера, тип СКК, параметр нелинейного кодера и другая информация о желаемой конфигурации удаленного передатчика. Аналогичная процедура осуществляется и в противоположном направлении. Затем оба модема одновременно обмениваются этими установками, передавая их со скоростью 600 бит/с при помощи относительной фазовой модуляции в частотно-разделенных каналах на несущих 1200 и 2400 Гц. Эта информация защищена от ошибок циклическим кодом, аналогично тому, как это делается в рекомендации V.42.

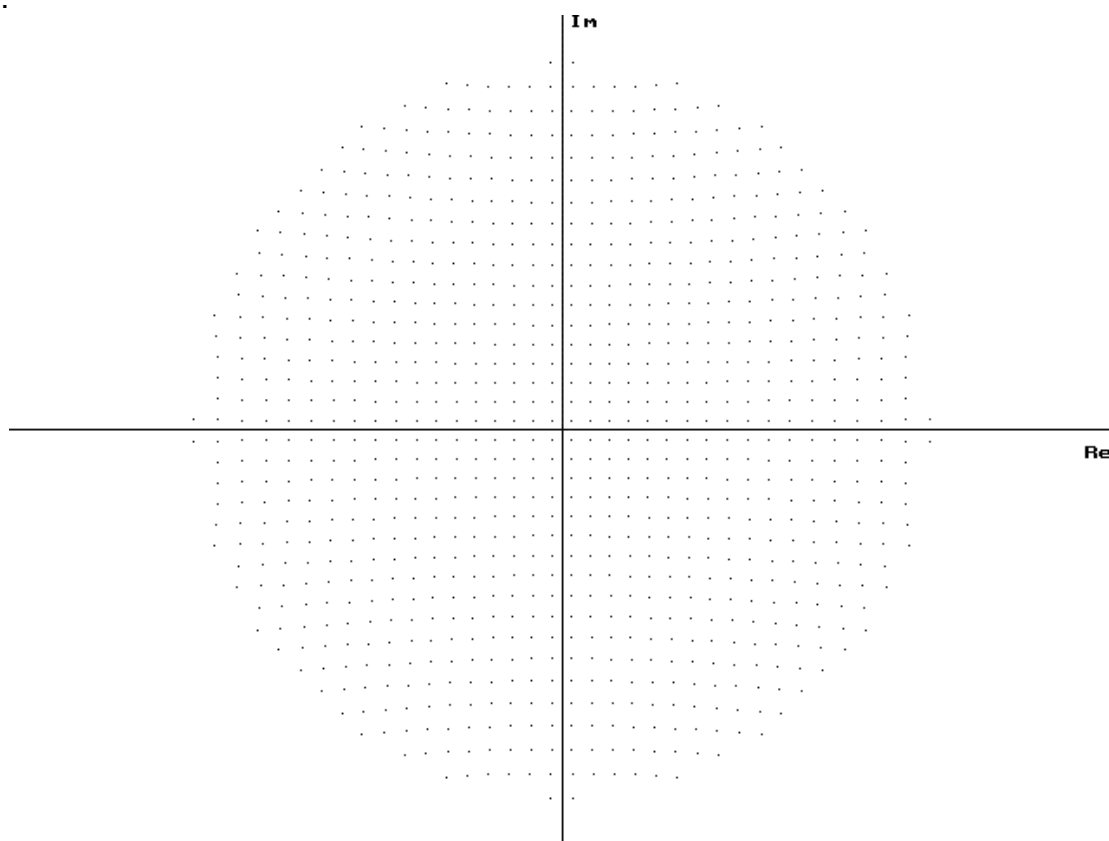


Рис.2 Проекция СКК при наличии нелинейных предискажений

Несколько слов о других особенностях V.34. Новинкой стало введение кадров - сигнальный кадр, кадр данных и суперкадр, образующих иерархическую структуру. Последний имеет фиксированную длительность - 280 мс, что и определяет длительность всего цикла. Как

следствие, в систему введены средства для поддержания синхронизации по кадрам. Серьезное внимание уделено процедуре вхождения в связь, которая состоит из четырех фаз. Первая фаза - установление соединения согласно рекомендациям V.25 и V.8, при которой модемы выбирают рекомендацию МСЭ-T серии V., реализованную в обоих модемах. Если оба модема поддерживают V.34, то они переходят ко второй фазе, в ходе которой производится опробование и классификация канала связи, о котором уже шла речь. Третья и четвертая фазы служат для обучения адаптивного корректора, эхо-компенсатора и других систем приемника модема. Отличительной чертой V.34 также является развитый сервис, который включает в себя такие возможности:

- асимметричная передача. При этом подразумевается, что два модема, работающие по V.34, могут иметь не только разные скорости передачи, но и разные несущие частоты, разные СКК и т.д.;
- полудуплексная работа. Такая возможность предполагает взаимодействие модемов без схем эхокомпенсации и, видимо, в будущем реализацию факсимильной передачи по рекомендации V.34;
- дополнительный канал. В рекомендации заложен параллельный канал со скоростью передачи 200 бит/с, который образован за счет временного уплотнения и является информационно-независимым от основного канала. Этот канал может быть использован как самим модемом для обмена служебной информацией, так и окончательным оборудованием данных, и тогда он будет называться вторичным каналом. Вторичный канал является асинхронным и, видимо, основным его назначением станет функция менеджмента сети.

Подводя итог, необходимо сказать, что доминирующим принципом V.34 по праву является системный подход к проблеме помехоустойчивости. Все перечисленные аспекты увязаны воедино и представляют собой симбиоз передовых технологий, органично вобравший в себя последние достижения теории и практики передачи данных. На рис. 3 показано место нескольких СКК из рекомендации V.34 на фоне теоретического предела Шеннона для канала с полосой 3100 Гц. Для сравнения точками показаны потенциальные характеристики помехоустойчивости СКК других рекомендаций МККТТ. Необходимо уточнить, что абсолютные значения соотношения сигнал/шум SNR (signal-to-noise ratio) носят оценочный характер и соответствуют вероятности ошибочного приема порядка $10^{**(-4)}$.

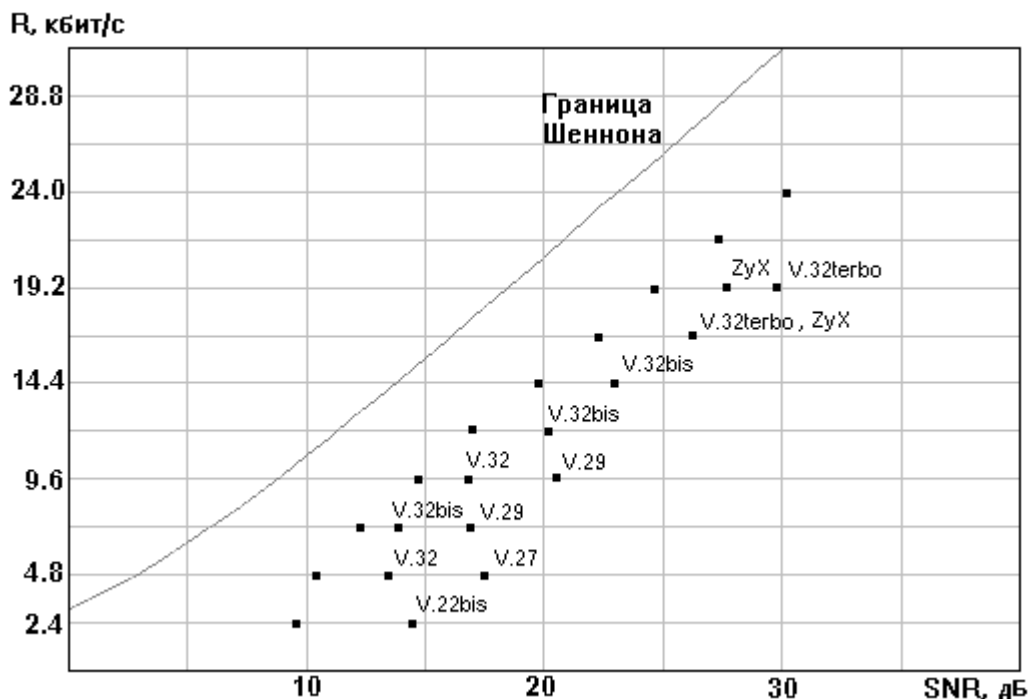


Рис.3 Необозначенные точки соответствуют рекомендации V.34 при $S=2743$ символов/с, число состояний сверточного кодера равно 16, тип СКК - минимальный.

В заключение, хотелось бы несколько слов сказать о конкретных реализациях V.34. Ресурсоемкие алгоритмы, лежащие в основе рекомендации, требуют большой вычислительной мощности. По самым скромным оценкам [5], производительность сигнального процессора в модеме, удовлетворяющего рекомендации V.34, должна быть порядка 40 MIPS, что достижимо, например, в двухпроцессорной системе на базе TMS320C5X с тактовой частотой 40 МГц. Управляющие функции могут быть возложены, например, на контроллеры типа M68302 или i386EX.

Поскольку к моменту принятия рекомендации для ведущих компаний акценты сместились в плоскость инженерных решений, то вопросы реализации факультативных функций часто определялись имеющейся аппаратной частью. Отсюда же берет начало и фривольная трактовка принципиальных положений рекомендации. Накладывает отпечаток и желание фирм-производителей дешевых модемов идти на поводу у пользователей ПК, которые глядят на модем через асинхронный последовательный порт и для них возможности V.34 в полном объеме так никогда и не будут доступны. Кроме того, выпячивание в рекламных целях модных сервисных функций, не имеющих отношения к рекомендации, таких как, защита от несанкционированного доступа, речевые функции и пр., порой проходит на фоне пренебрежения требованиями рекомендации. Достаточно сказать, что на момент публикации [5] ни один из 40 типов серийных модемов не соответствовал рекомендации полностью.

История развития техники передачи данных свидетельствует о том, что это нормальная ситуация, и в недалеком будущем вопросы соответствия и стыковки будут решены. Да и самой рекомендации V.34 предстоит длительный путь развития и совершенствования. Фирма AT&T Paradyne уже выпустила модем COMSHARE 3800Plus на скорость 33600 бит/с, обозначив этот режим, как V.34+, что свидетельствует о еще неисчерпанных возможностях рекомендации МСЭ-Т (МККТТ) V.34.

Литература

1. K.Krechmer. Renewed, Revitalized, Ready!, Data Communications International, June, 1991.
2. V.32 terbo. 19200 bit/s Full Duplex Modem for the General Switched Telephone Network Compatible with V.32 bis. Document Number: 3800-A2-GK21-00.
3. Draft Recommendation V.34. A Modem Operating at Data Signalling Rates of up to 28800 bit/s for Use on the General Switched Telephone Network and on Leased Point-to-Point 2-Wire Telephone-Type Circuits.
4. L.F.Wei. Trellis-Coded Modulation with Multidimensional Constellations, IEEE Trans., V.IT-33, N4, 1987.
5. K.M.Taylor. V.34 Modems: Watch the Fine Print, Data Communications International, Nov, 1994.