

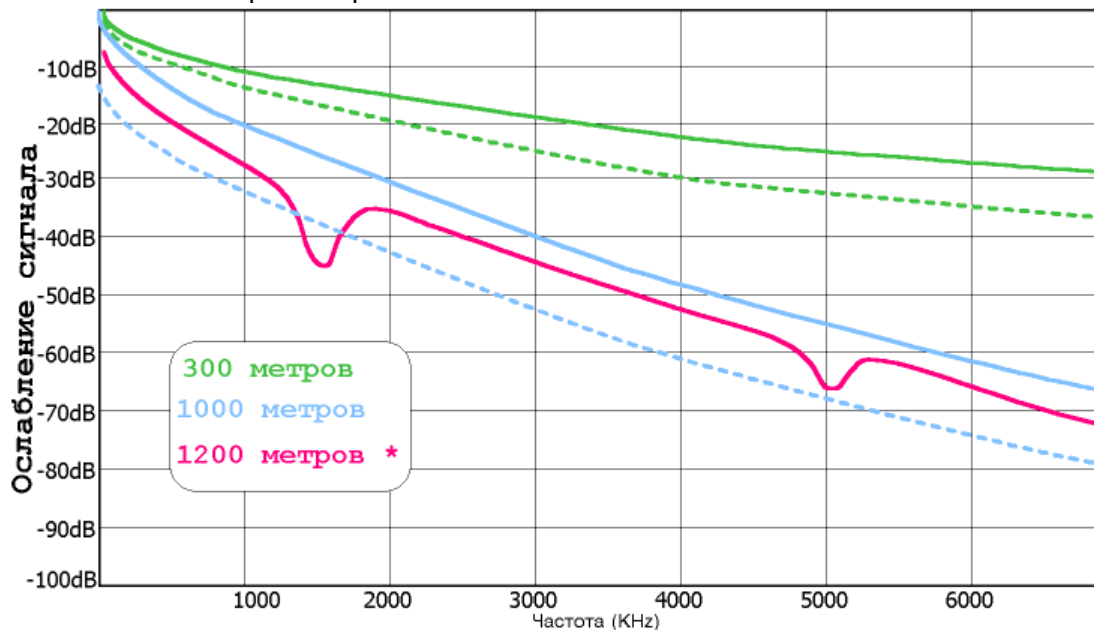
Алгоритмы модуляции технологий xDSL

Основные причины, которые ограничивают скорость и дальность передачи информационного сигнала

Основным принципом, на котором построено семейство технологий Digital Subscriber Line (DSL), является использование для передачи данных медных проводов, которые первоначально были предназначены для подключения абонентов к АТС – Plain Old Telephone Service (POTS). При передаче информации по коммуникациям POTS - медным проводам различной толщины - отсутствует основной фактор, который ограничивает скорость передачи данных в самой АТС – ограничение спектра информационного сигнала диапазоном 3-4 кГц. Все передачи подобного типа выполняются по схеме точка – точка, и в общем случае, между передатчиком и приемником сигнала находится только медный соединительный провод. Следовательно, по крайней мере, - теоретически, по такой линии можно передавать информацию с какой угодно большой скоростью. Однако реальные линии, с которыми приходится иметь дело xDSL – устройствам, существенно отличаются от этой упрощенной математической модели и имеют ряд особенностей, без учета которых невозможно построение современной высокопроизводительной системы передачи данных.

Ослабление (затухание) сигнала

Ослабление при передаче информационного сигнала вызвано наличием омического сопротивления линии. Чем меньше диаметр сечения провода и чем длиннее провод, который соединяет приемник сигнала с передатчиком, тем меньший уровень сигнала получит пользователь. Следовательно, сложнее будет распознать принятый сигнал на фоне шума, и возрастет уровень ошибок при передаче данных. Для характеристики качества принятого сигнала в системах передачи данных используют соотношение сигнал/шум Signal – Noise Ratio (SNR), которое вычисляется в децибелах (dB). Уровень сигналов принято указывать в виде отношения к милливатту, которое также вычисляется в децибелах (dBm). Помимо активной, сопротивление линии имеет также реактивные составляющие, следствием этого является частотная неравномерность ослабления сигнала.



Наиболее часто для передачи сигналов DSL используются линии с проводом, который имеет сечение 0.4 мм (26 AWG) и 0.5 мм (24 AWG). На приведенной выше диаграмме представлены зависимости величины затухания сигнала в линии от длины этой линии и частоты передаваемого сигнала. Сплошными линиями на этой диаграмме отображены зависимости, которые соответствуют сечению провода 0.5 мм (24 AWG). Пунктирные линии соответствуют сечению провода 0.4 мм (26 AWG). Красная линия на диаграмме отображает зависимость величины затухания сигнала в линии, которая имеет пассивное (несогласованное) ответвление (bridged tap) длина которого составляет 30 метров (100ft). При использовании двухпроводной соединительной линии передаваемый сигнал отражается от окончания несогласованного ответвления и поступает на приемник уже в качестве помехи. Наличие таких ответвлений у линии приводит к увеличению частотной неравномерности ослабления сигнала в линии.

Перекрестные помехи соседних каналов

Теоретически значение соотношения SNR можно увеличить, если поднять уровень передаваемого сигнала. Однако в этом случае возрастет и уровень помехи, которую данный сигнал будет оказывать на соседние каналы. Поэтому стандарты DSL четко определяют максимальный уровень сигнала, который

может передаваться в линию – обычно этот уровень соответствует значению -13.5 dBm. Помимо электрических наводок от внешних источников электромагнитного излучения (атмосферные разряды, коммутация силовых цепей и т.д.), наибольшее влияние на принимаемый сигнал оказывают как раз те помехи, которые вызваны высокоскоростной передачей данных по остальным парам многожильного кабеля. В терминологии DSL такие помехи называются NEXT (Near End Cross talk). Значение NEXT увеличивается при увеличении числа пар данного кабеля, которые используются для передачи данных и при увеличении частоты, с которой передаются эти данные. Обеспечение спектральной совместимости является одной из наиболее важных задач, которые решаются при разработке и реализации различных алгоритмов линейного кодирования передаваемых данных.

Совместное использование линии

Как было выше отмечено, технологии DSL используют для обеспечения передачи данных провода, которые предназначены для подключения абонентов к АТС. С точки зрения конечного пользователя, гораздо удобнее, если потребность высокоскоростной передачи данных не противоречит возможности пользоваться телефоном и не требует дополнительных затрат на его подключение. Поэтому обеспечение возможности совместного с POTS использования линии также является одной из важных задач, которые должны быть решены разработчиками DSL-систем передачи данных.

Способы решения проблем передачи данных по абонентской линии

В предыдущих параграфах были перечислены проблемы, которые должны быть решены для обеспечения эффективной и высокоскоростной передачи данных по медным проводам. Для того, чтобы быть привлекательной для потребителя, технология должна обеспечить как можно большую скорость передачи данных. Однако, повышение скорости, с которой передаются данные по медному проводу, приводит к ухудшению качества принимаемого сигнала и к возрастанию помех, которые данный информационный сигнал оказывает на соседние каналы. Для того чтобы обеспечить возможность решения этих совокупности этих проблем применяются специальные методы линейного кодирования (алгоритмы модуляции), использование которых позволяет передавать данные с достаточно высокими скоростями. При этом передаваемый в линию информационный сигнал имеет такие параметры, которые обеспечивают возможность достоверного приема и не оказывают катастрофического влияния на качество соседних информационных каналов.

Алгоритм модуляции 2B1Q

Описание алгоритма

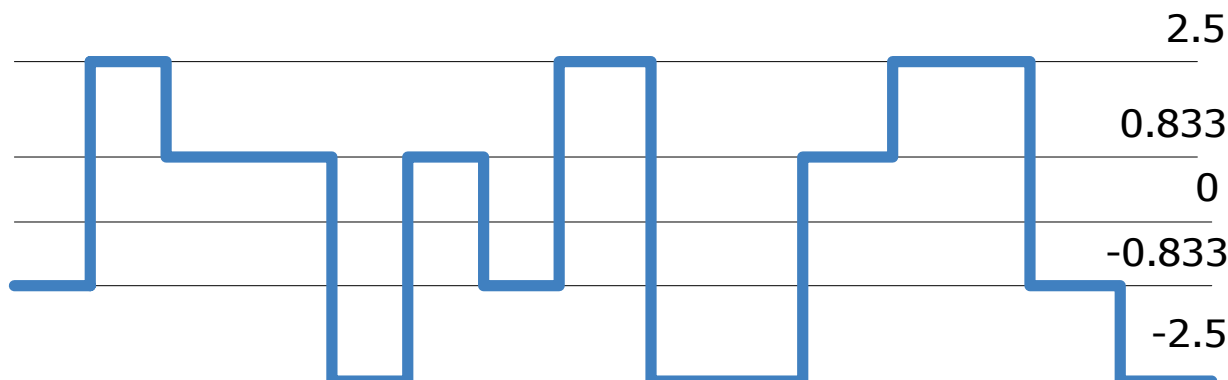
Алгоритм линейного кодирования **2B1Q** (2 Binary 1 Quandary) был первоначально предложен для использования в качестве протокола физического уровня в точке сопряжения U для BRI интерфейса сети ISDN. Алгоритм 2B1Q представляет собой один из вариантов реализации алгоритма амплитудно-импульсной модуляции с четырьмя уровнями выходного напряжения без возвращения к нулевому уровню (NRZ).

Кодовая группа	Кодовый символ	Кодовое напряжение
00	-3	-2,5В
01	-1	-0.833В
10	+3	2.5В
11	+1	0.833В

Для формирования линейного кода входной информационный поток делится на кодовые группы по два бита в каждой. В зависимости от комбинации значений битов кодовой группы ей ставится в соответствие один из четырёх кодовых символов, каждому из которых в свою очередь ставится в соответствие один из уровней кодового напряжения.

Таким образом, закодированный в соответствии с правилами алгоритма 2B1Q, сигнал представляет собой последовательность скачкообразно изменяющихся напряжений:

01	10	11	11	00	11	01	01	00	00	11	10	10	01	00
-1	+3	+1	+1	-3	+1	-1	+3	-3	-3	+1	+3	+3	-1	-3



Поскольку в данном случае двум битам немодулированного сигнала ставится в соответствие один кодовый символ, информационная скорость (data rate, скорость передачи данных) в два раза превышает символьную (symbol rate), это означает, что модуляционная схема 2B1Q обеспечивает постоянную величину спектральной эффективности модулированного сигнала $\theta = 2$ бита/Гц.

В отличие от некоторых других алгоритмов линейного кодирования (например, AMI) рассматриваемый алгоритм не обеспечивает поддержание баланса положительных и отрицательных импульсов выходного напряжения и, следовательно, входной код 2B1Q должен быть предварительно обработан специальными процедурами, которые должны обеспечить подавление постоянной составляющей (скремблирование). Системы передачи данных, которые используют этот алгоритм линейного кодирования, способны обеспечить скорость передачи данных от 64Кбит/сек до 2320 Кбит/сек. Нормативными документами не определена величина шага изменения информационной скорости, поэтому, в различных реализациях эта величина может принимать различные значения (от 8 до 64Кбит/сек).

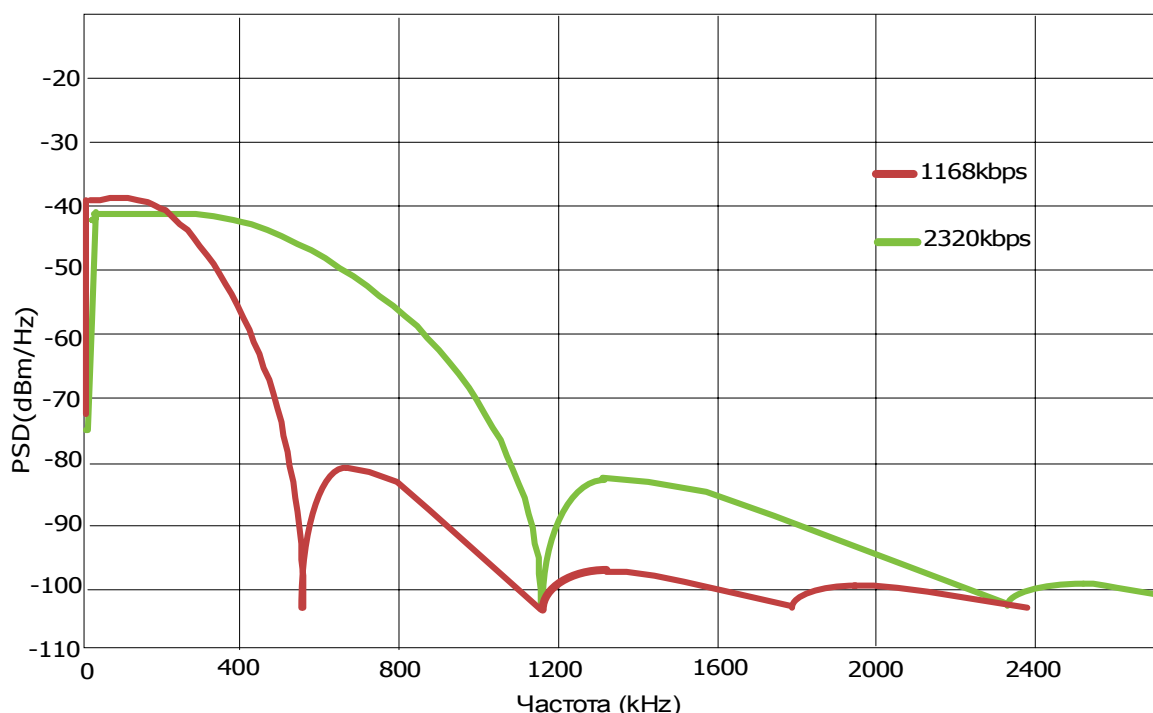
Характеристики алгоритма

Энергетический спектр сигнала

Огибающая линия спектра сигнала, который модулирован в соответствии с алгоритмом 2B1Q, может быть аппроксимирована функцией вида:

$$S(f) = A * \left[\frac{\sin(f/f_{sym})^2}{f/f_{sym}} \right]$$

В приведенной выше формуле f_{sym} соответствует конкретному значению символьной скорости, которая в данном случае в два раза меньше скорости передачи данных. Ниже приведены графики спектральных плотностей (Power Spectrum Density PSD) 2B1Q - модулированных сигналов, которые обеспечивают передачу данных со скоростями 1168 и 2320 Кбит/сек. Существенным является то, что частотный спектр 2B1Q- модулированных сигналов **не является ограниченным**, что вообще характерно для спектров импульсно - модулированных колебаний.



Мощность передаваемого в линию сигнала

Значение мощности 2B1Q - модулированного сигнала, измеренное в диапазоне от 0 Гц до F_{sym} при импедансе линии 135 Ом, должно удовлетворять соотношению:

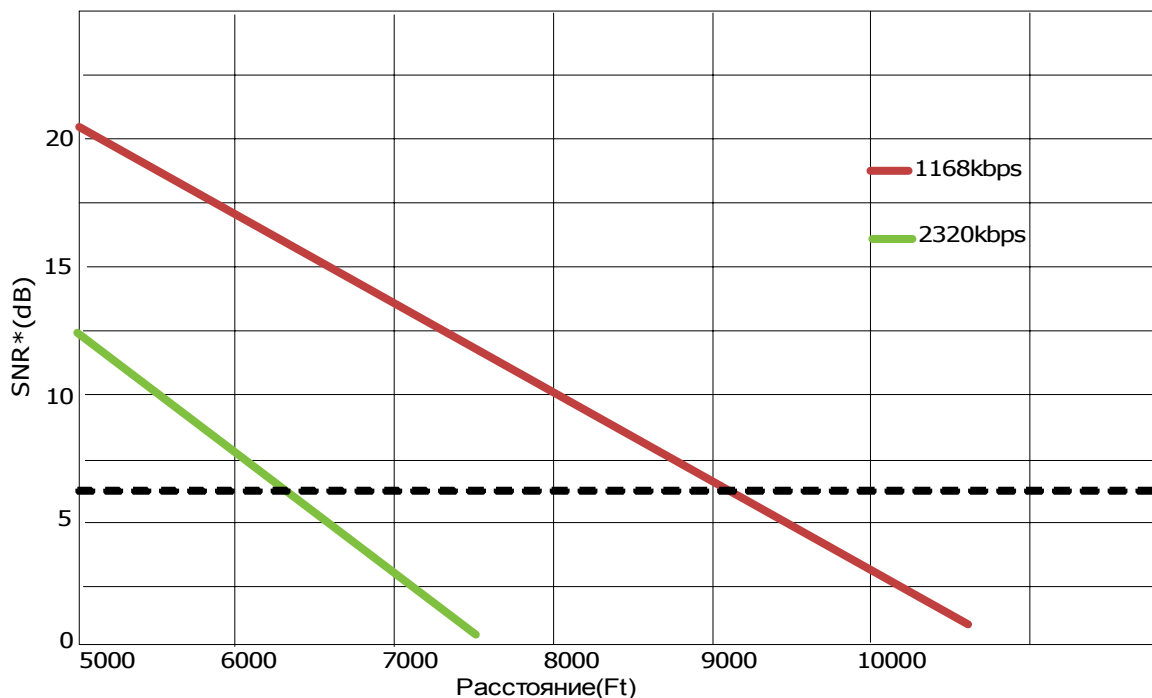
$$P = (13.5 \pm 0.5) \text{ dBm}$$

Требования к характеристикам линейных устройств

Значение величины затухания возвращаемого сигнала (Return Loss, RL), измеренного по отношению к 135 Ом в диапазоне от 0 Гц до F_{sym} , должно быть не менее 12 dB. (Этот параметр определяет значение допустимого воздействия передаваемого в линию сигнала на принимаемый сигнал.)

Соотношение сигнал/шум

На диаграмме представлена зависимость соотношения SNR(Signal-Noise Ratio)



от расстояния распространения 2B1Q-модулированных сигналов, которые обеспечивают передачу данных со скоростями 1168 и 2320 Кбит/сек.

Приведенные значения соотношения сигнал/шум были вычислены для линии с проводом 26-AWG (0.4мм) по отношению к пороговому значению SNR(21.3dB) и учитывают **только** помехи, которые вызваны воздействием передаваемого сигнала на принимаемый сигнал (near end cross talk noise - NEXT). Отмеченное на диаграмме пунктиром значение SNR* равное 6dB соответствует минимальному превышению соотношением SNR уровня 21.3dB, который гарантирует частоту появления ошибок (Bit Error Rate – BER) не более 10^{-7} .

Область применения алгоритма

Помимо своего основного применения в ISDN алгоритм линейного кодирования 2B1Q нашел достаточно широкое применение в устройствах xDSL с симметричными скоростями передачи данных HDSL и SDSL. Поскольку из-за особенностей спектра 2B1Q- модулированного сигнала передаваемый и принимаемый сигнал не могут быть разнесены в различные частотные области, реализации SDSL в данном случае должны использовать механизм подавления эха передаваемого сигнала в приемнике (echo-cancellation).

Достоинства и недостатки алгоритма 2B1Q

Несомненным достоинством данного алгоритма является простота и дешевизна его реализации. Немаловажным фактором является также наличие большого числа регламентирующих документов (в том числе спецификация ANSI T1.601-1999, ISDN Basic Access Interface for Use on Metallic Loops for Application at the Network Side of NT, Layer 1 Specification).

К недостаткам этого метода линейного кодирования следует отнести крайне невысокую спектральную эффективность и, следовательно, ограниченные возможности для передачи информационного сигнала по зашумленным линиям с большим затуханием. Возможности использования амплитудной модуляции вообще не очень высоки, так как в данном случае число уровней квантования растет со скоростью 2^N , где N – число передаваемых за период модулированного сигнала разрядов, что приводит к резкому уменьшению теоретически достижимого соотношения сигнал/шум. Кроме того, спектр амплитудно-импульсного модулированного сигнала, как было показано выше, является бесконечным и его максимум приходится на диапазон звуковых частот.

Несмотря на то, что перечисленные выше факторы, несомненно, будут ограничивать применение этого типа линейного кодирования в перспективных xDSL системах с интеграцией услуг, несомненные достоинства алгоритма 2B1Q позволят достаточно эффективно его применять для построения дешевых систем симметричного доступа.

Алгоритм модуляции QAM**Описание алгоритма**

Алгоритм квадратурной амплитудной модуляции (QAM, Quadrature Amplitude Modulation) представляет собой разновидность многопозиционной амплитудно-фазовой модуляции. Этот алгоритм широко используется при построении современных модемов ТЧ.

При использовании данного алгоритма передаваемый сигнал кодируется одновременными изменениями амплитуды синфазной (I) и квадратурной (Q) компонент несущего гармонического колебания (f_c), которые сдвинуты по фазе друг относительно друга на $\pi/2$ радиана. Результирующий сигнал Z формируется при суммировании этих колебаний. Таким образом, QAM -модулированный дискретный сигнал может быть представлен соотношением:

$$Z_m(t) = I_m * \cos(2\pi f_c t) + Q_m * \sin(2\pi f_c t), \text{ где:}$$

- t - изменяется в диапазоне $\{(m - 1) * \Delta t \dots m * \Delta t\}$
- m - порядковый номер дискрета времени
- Δt - шаг квантования входного сигнала по времени
- p - шаг квантования входного сигнала по амплитуде
- α_m и β_m модуляционные коэффициенты
- $I_m = \alpha_m * p$, $Q_m = \beta_m * p$

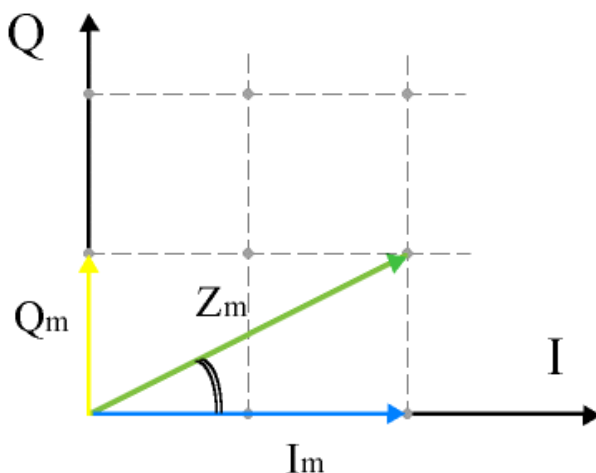
Этот же сигнал также может быть представлен в комплексном виде:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{I} + j * \mathbf{Q}, \text{ или}$$

$$Z_m = A_m * \exp(2\pi f_c t + \varphi_m), \text{ где:}$$

$A_m = \sqrt{Q_m^2 + I_m^2}$ - алгоритм изменения амплитуды модулированного сигнала

$\varphi_m = \arctg(Q_m/I_m)$ - алгоритм изменения фазы модулированного сигнала.



Таким образом, при использовании квадратурной амплитудной модуляции передаваемая информация кодируется одновременными изменениями амплитуды и фазы несущего колебания. На рисунке представлен принцип формирования результирующего колебания Z (вектор отмечен зеленым цветом) путем суммирования вектора квадратурной составляющей Q (отмечен зеленым цветом) с вектором синфазной составляющей I (на рисунке он отмечен синим цветом). Амплитуда вектора Z определяется соотношением A_m , а угол, который этот вектор образует с осью абсцисс, определяется соотношением φ_m .

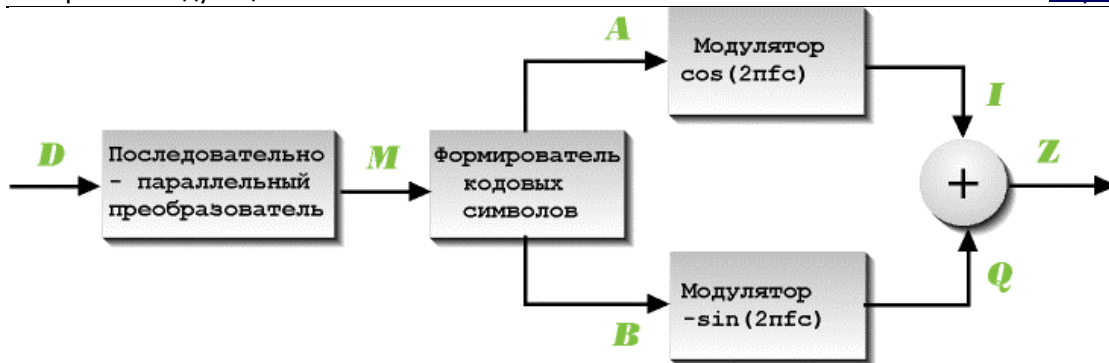
Для данного алгоритма существенно, что при модулировании синфазной и квадратурной составляющей несущего колебания используется одно и то же значение дискрета изменения амплитуды. Поэтому окончания векторов модулированного колебания образуют прямоугольную сетку на фазовой плоскости действительной - $\text{Re}\{Z\}$ и мнимой составляющей вектора модулированного сигнала - $\text{Im}\{Z\}$. Число узлов этой сетки определяется типом используемого алгоритма QAM. Схему расположения узлов на фазовой плоскости модулированного QAM колебания принято называть созвездием (constellation).

Для указания типа алгоритма QAM принята следующая схема обозначения:

QAM-<число >

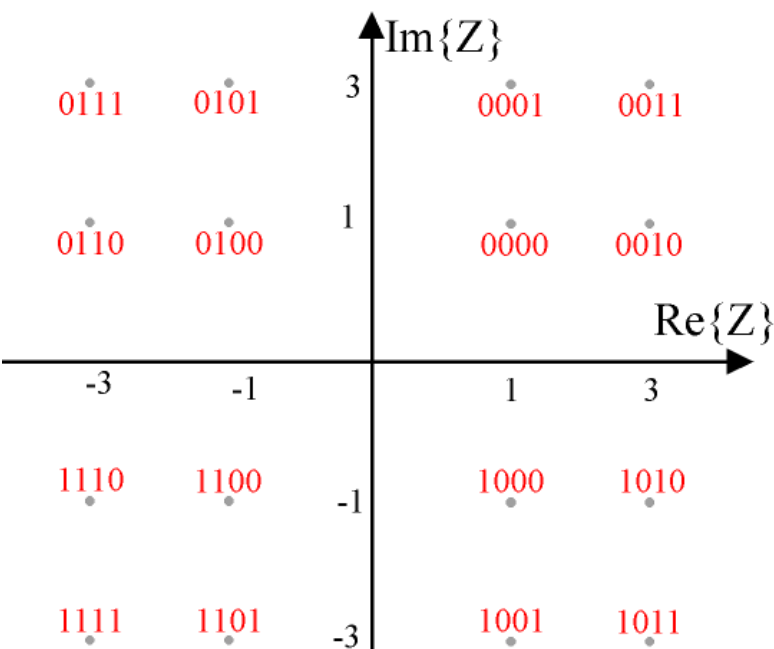
«число» обычно представляет собой значение вида 2^N и соответствует количеству узлов на фазовой сетке, а также максимальному количеству различных значений вектора модулированного сигнала. Следует отметить, что в данном случае значение N соответствует показателю спектральной эффективности используемого алгоритма.

На рисунке приведена упрощенная структурная схема формирователя QAM-модулированного сигнала. На первом этапе преобразования последовательность битов $\mathbf{D} \{d_0 d_1, \dots d_k\}$, которая поступает от источника сигнала, преобразуется в последовательность двумерных модуляционных символов $\mathbf{M} \{m_0 m_1, \dots m_j\}$. Число битов в этом символе равно значению N (для алгоритма QAM-16 $N = \log_2 16 = 4$).



Формирователь кодовых символов преобразует двумерный кодовый символ m_j в пару кодовых символов α_j и β_j . Для алгоритма QAM-16 допустимые значения α_j и β_j принадлежат множеству $\{1,3,-1,-3\}$ и определяют соответственно значения действительной и мнимой координаты вектора модулированного колебания. Сформированные значения $A \{\alpha_j\}$ и $B \{\beta_j\}$ используются для амплитудной модуляции синфазной I и квадратурной Q составляющих несущего колебания. На последнем этапе преобразования выполняется суммирование этих колебаний и формирование результирующего сигнала Z .

На приведенном ниже рисунке представлено расположение векторов модулированного колебания - созвездие для алгоритма QAM-16. Красным цветом отмечены значения модуляционных символов, которым соответствуют указанные точки на фазовой плоскости модулированного колебания $\{m_3, m_2, m_1, m_0\}$.



Для алгоритма QAM-16 пара $\{m_3, m_2\}$ определяет номер квадранта фазовой плоскости или знаки действительной и мнимой координаты вектора модулированного колебания:

- 00 $\text{Sign}(\text{Re}\{Z\})=1, \text{Sign}(\text{Im}\{Z\})=1$
- 10 $\text{Sign}(\text{Re}\{Z\})=1, \text{Sign}(\text{Im}\{Z\})=-1$
- 01 $\text{Sign}(\text{Re}\{Z\})=-1, \text{Sign}(\text{Im}\{Z\})=1$
- 11 $\text{Sign}(\text{Re}\{Z\})=-1, \text{Sign}(\text{Im}\{Z\})=-1$

Для этого алгоритма пара $\{m_1, m_0\}$ определяет значения амплитуды действительной и мнимой координаты вектора модулированного колебания соответственно. В таблице представлены значения кодовых символов α и β , которые соответствуют значениям младших разрядов модуляционного символа $\{m_1, m_0\}$.

m_1	m_0	α_j	β_j
0	0	1	1
0	1	1	3
1	0	3	1
1	1	3	3

Преобразование модуляционных символов в кодовые символы выполняется с применением алгоритмов Грея для помехоустойчивого кодирования данных. Так векторам модулированного колебания, которые находятся близко один от другого на фазовой плоскости, ставятся в соответствие значения кодовых символов, которые отличаются значениями только одного бита. В качестве примера могут быть рассмотрены два вектора $Z=1+j$ и $Z=1+3j$, которым соответствуют кодовые символы $\{0,0\}$ и $\{0,1\}$.

Характеристики алгоритма

В настоящее время наибольшее распространение получили несколько вариантов QAM: алгоритм модуляции QAM-4, который кодирует информационный сигнал изменением фазы несущего колебания с шагом $\pi/2$. Этот алгоритм модуляции имеет название QPSK (Quadrature Phase Shift Keying – Квадратурная фазовая манипуляция). Большое распространение получили также алгоритмы QAM-16, 32, 64, 128 и 256. Алгоритм квадратурной амплитудной модуляции, по сути, является разновидностью алгоритма гармонической амплитудной модуляции и поэтому обладает следующими важными свойствами:

- Ширина спектра QAM модулированного колебания не превышает ширину спектра модулирующего сигнала
- Положение спектра QAM модулированного колебания в частотной области определяется номиналом частоты несущего колебания

Эти полезные свойства данного алгоритма обеспечивают возможность построения на его основе высокоскоростных ADSL систем передачи данных по двухпроводной линии с частотным разделением принимаемого (downstream) и передаваемого (upstream) информационных потоков.

Конкретная реализация алгоритма QAM определяет значения следующих параметров:

- Размерность модуляционного символа (\log_2 количества точек созвездия) N [бит]
- Значение символьной скорости f_{Symbol} [Кбод/сек]
- Центральная частота (central rate f_c)

Значение информационной скорости V – скорости передачи данных для алгоритма QAM – определяется следующим соотношением:

$$V = N * f_{Symbol}$$

Проект стандарта T1.413 ANSI предписывает использование следующих значений символьных скоростей в ADSL – системах передачи данных:

DOWNSTREAM f_{Symbol}	UPSTREAM f_{Symbol}
136 кбод	85 кбод
170 кбод	136 кбод
340 кбод	
680 кбод	
952 кбод	
1088 кбод	

Таким образом, при использовании символьной скорости 136 Kbaud, алгоритм QAM-256 позволяет обеспечить передачу данных со скоростью 1088 Кбит/сек.

Центральная частота f_c для конкретной реализации алгоритма модуляции определяется соотношением

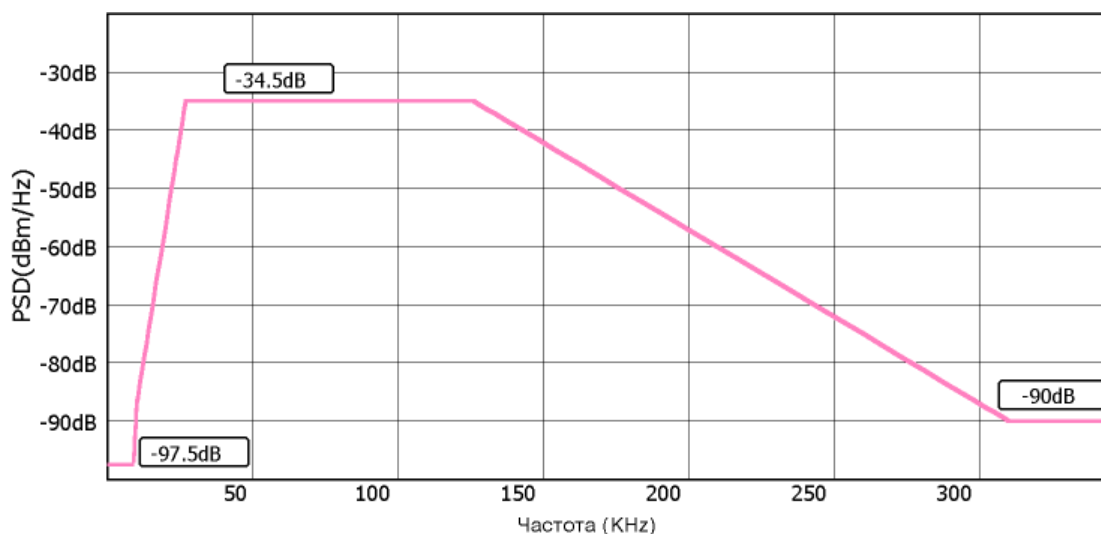
$$f_H + f_{symbol} / 2 \leq f_c \leq f_B - f_{symbol} / 2, \text{ где}$$

- f_H – нижняя граница спектра модулированного сигнала
- f_{symbol} – значение символьной скорости
- f_B – верхняя граница спектра модулированного сигнала

Энергетический спектр сигнала

Параметры огибающих линий (масок) энергетических спектров модулированных сигналов ADSL приведены в стандарте T1.413 ANSI. Использование этих масок обеспечивает необходимый уровень электромагнитной совместимости сигналов различной природы, которые передаются по различным парам в одном кабеле. Независимо от типа используемого алгоритма модуляции, энергетический спектр модулированного сигнала не должен выходить за пределы установленной маски.

На приводимом ниже рисунке представлено схематическое изображение маски для исходящего (UPSTREAM) потока ADSL.



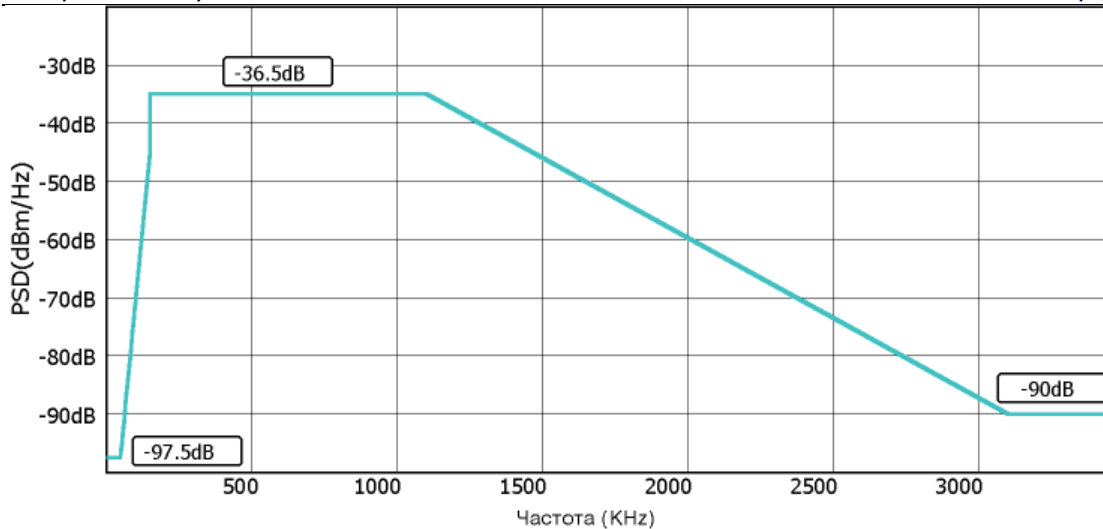
Характерные для данной маски частотные диапазоны приведены в таблице:

№	$f_{нач}$ (KHz)	$f_{кон}$ (KHz)	PSD (dB/Hz)
1	0	4	-97.5
2	25.875	138	-34.5
3	3093	4545	-90

Диапазон №1 не используется для передачи данных в технологии ADSL. В диапазоне №2 должна быть размещена основная часть спектра полезного сигнала. Диапазон №3 не используется для передачи исходящего потока данных ADSL и предназначен для

приема входящего потока.

Примерно такую же форму имеет маска для входящего (DOWNSTREAM) потока ADSL.

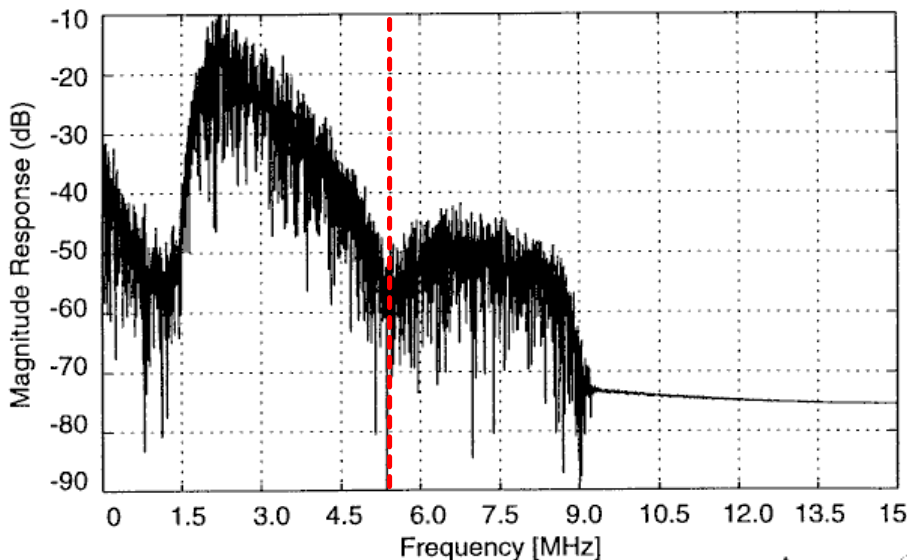


Характерные для маски входящего потока ADSL частотные диапазоны приведены в таблице:

№	$f_{нач}$ (KHz)	$f_{кон}$ (KHz)	PSD (dB/Hz)
1	0	4	-97.5
2	4	138	-92.5...-44.2
3	138	1104	-36.5

Диапазон №1 не используется для передачи данных в технологии ADSL. Диапазон №2 не используется для приема входящего потока данных ADSL и предназначен для передачи входящего потока. В диапазоне

№3 должна быть размещена основная часть спектра полезного сигнала.

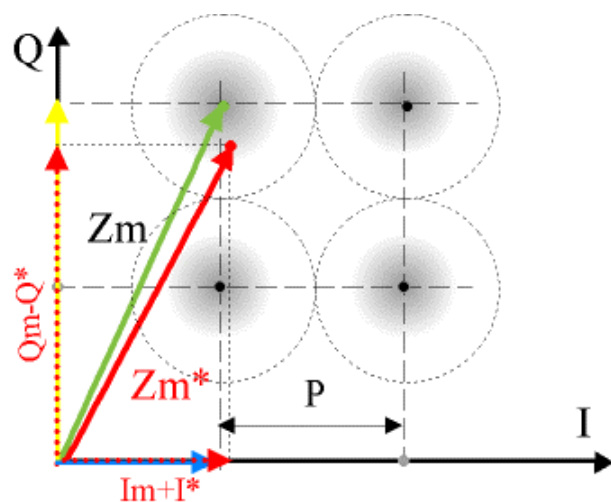


Алгоритм модуляции QAM может быть использован для формирования линейного сигнала VDSL- устройств. На приводимом ниже рисунке представлено схематическое изображение спектра сигнала QAM-16, который обеспечивает передачу данных со скоростью 26 Мбит/сек - (6.5 Мбод). Представленный график был получен на двухпроводной линии длиной 1300 метров (4000 ft). Эта линия

имела сечение 0.5 мм (26 AWG) и пассивное ответвление (bridge-tap) длиной около 10 метров (30 ft).

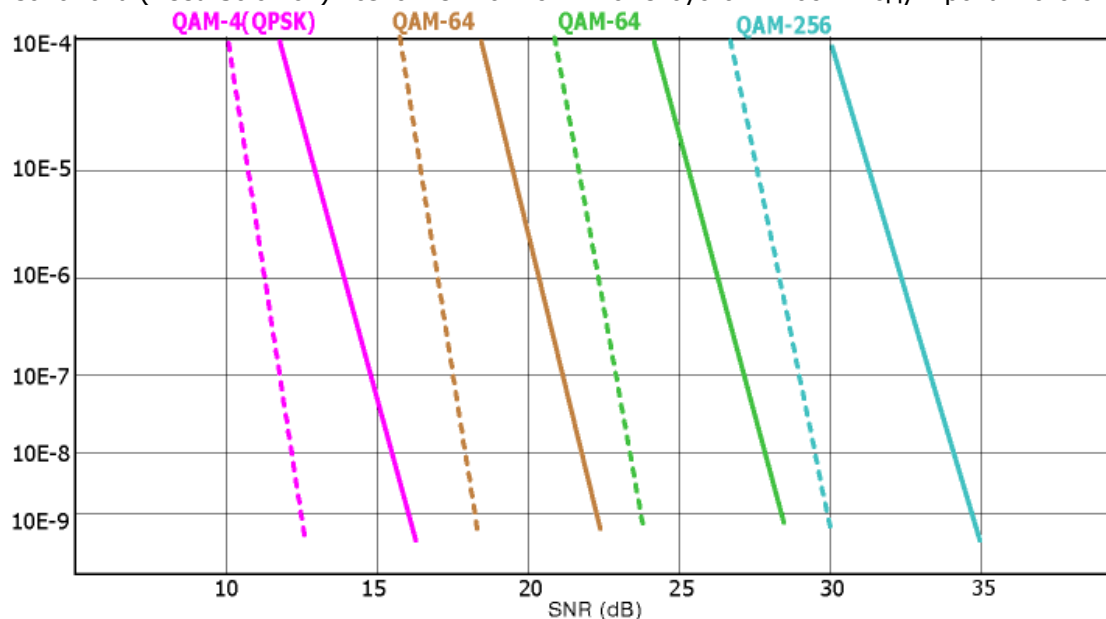
Наличие пассивных отводов на линии при использовании алгоритма модуляции QAM является одним из факторов, которые приводят к существенному уменьшению значения соотношения сигнал/шум (SNR) у принимаемого сигнала. На приведенной выше диаграмме красным пунктиром отмечено искажение спектра модулированного колебания - провал на частоте f_c (5.4 MHz), которое вызвано именно наличием пассивного ответвления на линии.

Помехоустойчивость алгоритма QAM обратно пропорциональна его спектральной эффективности. Воздействие помех приводит к возникновению неконтролируемых изменений амплитуды и фазы передаваемого по линии сигнала. При увеличении числа кодовых точек на фазовой плоскости расстояние между ними P уменьшается и, следовательно, возрастает вероятность ошибочного распознавания искаженного принятого вектора Z_m^* на приемной стороне. Предельный уровень допустимых амплитудных и фазовых искажений модулированного QAM сигнала представляет собой круг диаметром P . Центр этого круга совпадает с узлом квадратурной сетки на фазовой плоскости. Заштрихованные области на рисунке соответствуют координатам искаженного вектора



модулированного QAM - колебания при воздействии на полезный сигнал помехи, относительный уровень которой определяется соотношением $20\text{dB} \leq \text{SNR} \leq 30\text{dB}$.

На диаграмме, которая приведена ниже, сплошными линиями представлены зависимости ожидаемого значения BER (Bit Error Rate) от соотношения SNR для различных вариантов алгоритма QAM-модуляции. Использование дополнительного кодирования (пунктирные линии), например, по алгоритму Рида-Соломона (Reed-Solomon) позволяет повысить помехоустойчивость модулированного сигнала.



Достоинства алгоритма

Алгоритм квадратурной амплитудной модуляции является относительно простым для реализации и в то же время достаточно эффективным алгоритмом линейного кодирования xDSL сигналов. Современные реализации этого алгоритма обеспечивают достаточно высокие показатели спектральной эффективности. Как уже было отмечено выше, ограниченность спектра, относительно высокий уровень помехоустойчивости QAM-модулированного сигнала обеспечивают возможность построения на основе этой технологии высокоскоростных ADSL и VDSL систем передачи данных по двухпроводной линии с частотным разделением принимаемого и передаваемого информационных потоков.

Недостатки алгоритма

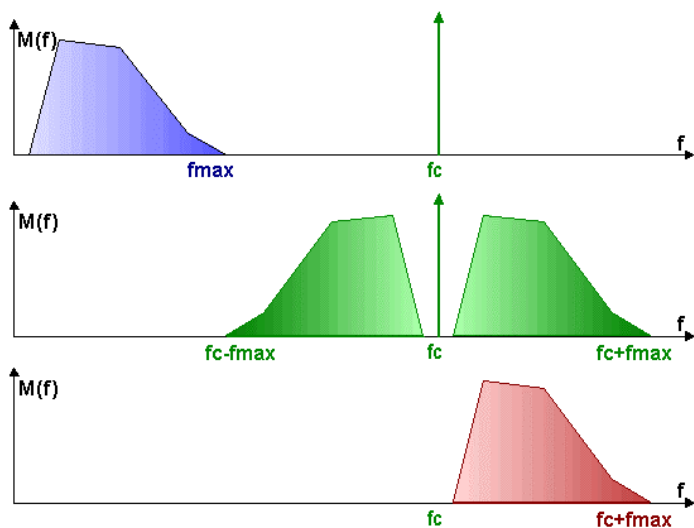
К недостаткам алгоритма можно отнести относительно невысокий уровень полезного сигнала в спектре модулированного колебания. Этот недостаток является общим для алгоритмов гармонической амплитудной модуляции и выражается в том, что максимальную амплитуду в спектре модулированного колебания имеет гармоника с частотой несущего колебания. Поэтому данный алгоритм в чистом виде достаточно редко используется на практике. Гораздо большее распространение получают алгоритмы, которые используют основные принципы QAM и в то же время свободны от его недостатков (например – алгоритм CAP).

Алгоритм модуляции CAP

Алгоритм амплитудно-фазовой модуляции с подавлением несущей carrier less amplitude modulation/phase modulation (CAP) является одним из наиболее широко используемых в настоящее время на DSL линиях алгоритмов модуляции. Этот алгоритм был разработан специалистами компании GlobeSpan Inc. в то время, когда эта компания была частью компании Paradyne в составе AT&T. В настоящее время патент на использование алгоритма амплитудно-фазовой модуляции с подавлением несущей для формирования линейного кода принадлежит компании GlobeSpan Inc. Алгоритм CAP представляет собой одну из разновидностей алгоритма QAM, его особенность заключается в специальной обработке модулированного информационного сигнала перед его отправкой в линию. В процессе этой обработки из спектра модулированного сигнала исключается составляющая, которая соответствует частоте несущего колебания QAM. После того, как приемник принимает переданный информационный сигнал, он сначала восстанавливает частоту несущего колебания, а после этого восстанавливает информационный сигнал. Такие манипуляции со спектром выполняются для того, чтобы уменьшить долю неинформативной составляющей в спектре передаваемого информационного сигнала. Это в свою очередь делается для того, чтобы обеспечить большую дальность распространения сигнала и уменьшить уровень перекрестных помех у сигналов, которые передаются одновременно в одном кабеле.

Описание алгоритма

На первый взгляд, название алгоритма звучит достаточно парадоксально и заставляет вспомнить сюжет русской народной сказки о каше из топора. Действительно, из модулированного сигнала предлагается исключить именно ту гармоническую составляющую, которая должна была использоваться для переноса полезного сигнала. Однако если более подробно рассмотреть схему формирования сигнала, станет понятно, что алгоритм CAP в части формирования линейного кода практически ничем не отличается от классических алгоритмов гармонической амплитудной модуляции.



Синим цветом на рисунке, который приведен выше, отмечен спектр передаваемого полезного сигнала. Максимальная частота этого сигнала имеет значение f_{\max} . Частота модулирующего колебания – носителя имеет значение f_c . После выполнения процедуры гармонической амплитудной модуляции спектр полезного сигнала переносится в область частоты f_c и приобретает зеркальные составляющие. На рисунке этот спектр помечен зеленым цветом. Для обеспечения восстановления переданного сигнала на приемном окончании достаточно передать только одну из зеркальных компонент спектра модулированного сигнала. Гармоника с частотой f_c также является компонентом спектра модулированного сигнала, однако при восстановлении сигнала и без неё тоже можно обойтись. Теоретически, амплитуда этой гармоники несет информацию об уровне постоянной составляющей передаваемого сигнала (составляющая спектра сигнала с частотой = 0). В силу этого данная гармоника не является в полной мере информативной, и её потеря не повлияет на качество восстановленного принятого сигнала. Хотя исключение гармоники f_c из передаваемого сигнала приводит к возникновению определенных трудностей при восстановлении принятого сигнала, эта процедура вполне оправдана, поскольку позволяет существенно уменьшить уровень неинформативного сигнала, который передается в линию. Красным цветом на приведенном выше рисунке показан спектр модулированного колебания, который сформирован в соответствии с принципами алгоритма CAP.

Таким образом, основные принципы формирования линейного кода алгоритма CAP соответствуют принципам формирования линейного кода QAM. Отличия указанных алгоритмов заключаются во включении дополнительных процедур, которые используются для формирования и восстановления спектра CAP - модулированного сигнала.

Одна из возможных функциональных схем формирования сигнала, модулированного в соответствии с принципами алгоритма CAP, представлена на рисунке, который приведен ниже.

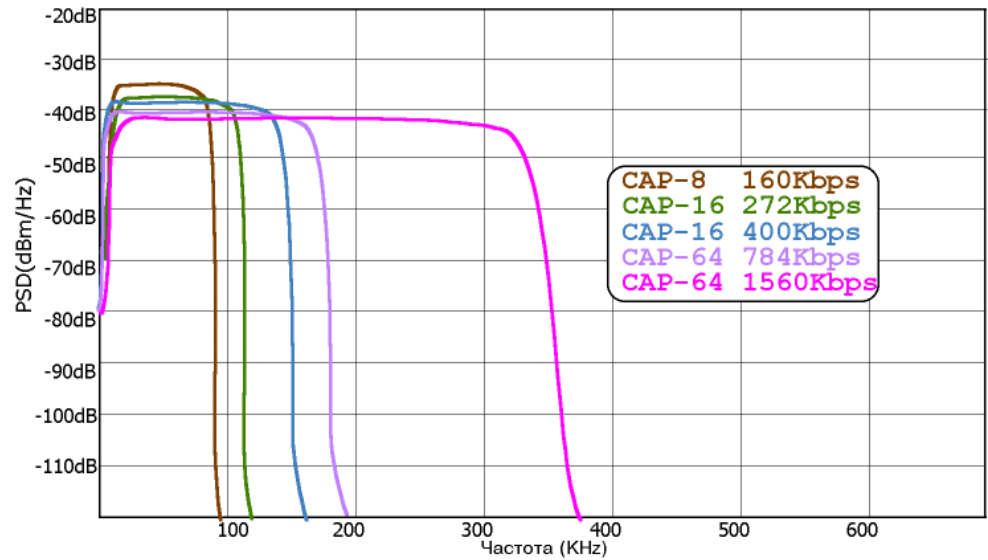
Одна из возможных функциональных схем формирования сигнала, модулированного в соответствии с принципами алгоритма CAP, представлена на рисунке, который приведен ниже.



В данном случае для подавления гармоники несущего колебания используются синфазный и квадратурный фильтры. Для адекватного восстановления сформированного таким образом сигнала на приемной стороне должны быть выполнены соответствующие процедуры по восстановлению несущего колебания. После восстановления несущей, приемник, который функционирует в соответствии с алгоритмом CAP, восстанавливает собственно переданный сигнал, используя при этом те же алгоритмы, что и приемник QAM – модулированного колебания. Поэтому, по крайней мере, теоретически, приемник CAP может взаимодействовать с передатчиком QAM.

Характеристики алгоритма

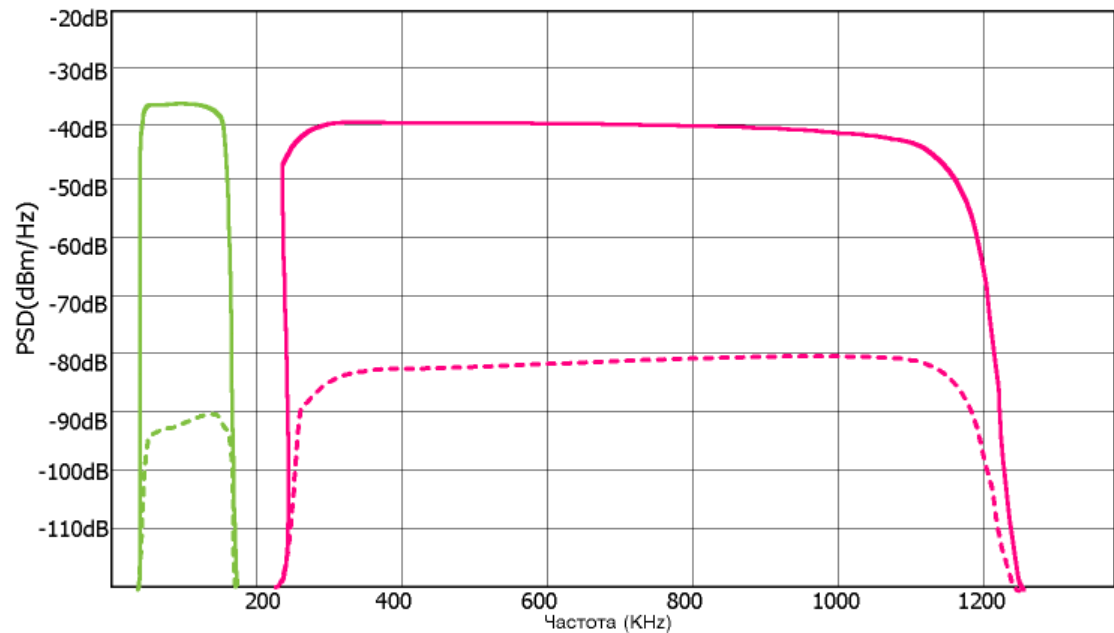
Алгоритм CAP может быть использован для формирования линейного кода в различных технологиях DSL. На приведенном ниже рисунке представлено схематическое изображение спектров CAP – модулированных MSDSL сигналов.



В данном случае применение алгоритма CAP целесообразно, поскольку при использовании пересекающихся частотных диапазонов передаваемого и принимаемого сигналов одним из основных факторов, который ограничивает дальность распространения сигнала в линии, является степень эффективности подавления в приемнике эха передаваемого сигнала (echo cancellation). Поскольку в общем случае, уровень

сигнала который передается в линию формирователями CAP, ниже (за счет подавления несущей), следовательно, меньше будет и уровень эха от передатчика.

С не меньшим успехом этот алгоритм может быть использован для формирования линейного кода в асимметричных высокоскоростных приемо-передающих системах технологий ADSL и VDSL. Для этих технологий существенным фактором является возможность частотного разделения информационных сигналов, которые одновременно принимаются и передаются по одной паре проводов. На приведенном ниже рисунке представлено схематическое изображение спектра CAP - модулированного RADSL сигнала.



Зеленым цветом на этом рисунке обозначен спектр передаваемого пользователем сигнала (Upstream). Красным цветом - спектр сигнала, который принимается пользователем (Downstream). Пунктирной линией на рисунке обозначены уровни перекрестных помех, которые вызваны передачей сигналов такого же типа по всем остальным 49 парам проводов данного кабеля и регистрируются на ближнем конце (NEXT).

Тип кода	SNR*(dB)
CAP-4	14.5
CAP-8	18.0
CAP-16	21.5
CAP-32	24.5
CAP-64	27.7
CAP-128	30.6
CAP-256	33.8

Приведенная справа таблица представляет зависимость относительного соотношения сигнал/шум SNR* от типа используемого алгоритма CAP. В соответствии с определением значение относительного соотношения SNR* соответствует уровню помехи, при которой BER у принимаемого сигнала не будет превышать значения 10^{-7} . Обращает на себя внимание тот факт, что, как и в случае QAM, помехоустойчивость алгоритма модуляции уменьшается при повышении его спектральной эффективности.

Достоинства алгоритма

Поскольку алгоритм амплитудно-фазовой модуляции с подавлением несущей является, по сути, алгоритмом типа QAM, ему свойственны все положительные качества, которые присущи этому классу алгоритмов – относительная простота реализации и высокая спектральная эффективность. Несомненным достоинством собственно алгоритма CAP является высокая энергетическая эффективность формируемого сигнала. Именно этот алгоритм теоретически способен обеспечить максимальные значения соотношения SNR и, следовательно, передачу сигнала на наибольшие расстояния. Все эти полезные качества алгоритма модуляции CAP позволяют применять его для построения эффективных и экономичных приемопередающих устройств широкого спектра технологий DSL – от SDSL до VDSL.

Недостатки алгоритма

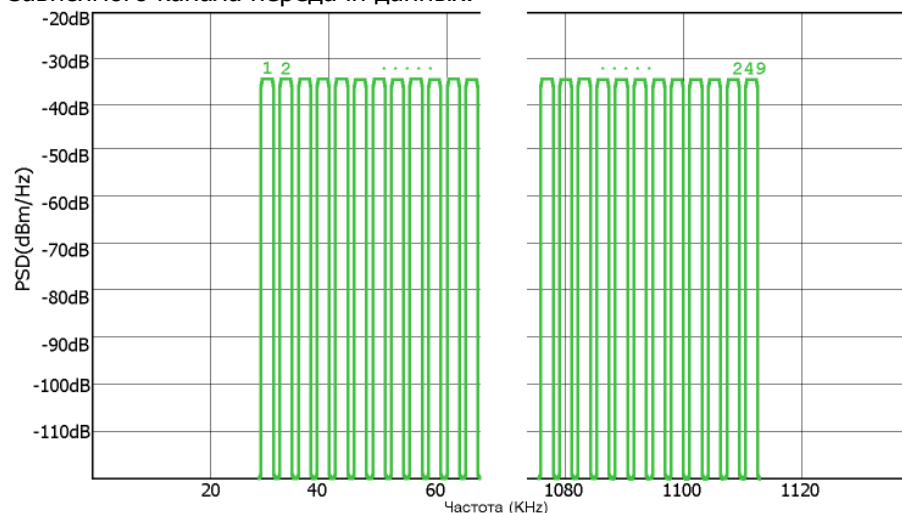
Основным недостатком этого метода является отсутствие стандартизирующего документа, который определяет процедуры, в соответствии с которыми выполняется преобразование сигнала. Отсутствие этого документа объясняется рядом политических и экономических причин. Одной из причин, которые приводят к сдерживанию внедрения этой технологии, является сильная поддержка альтернативной по отношению к CAP – технологии DMT, которую оказывает комитет T1E1 ANSI. Другой причиной является недостаточная гибкость лицензионной политики, которую проводит хозяин патента на CAP компания GlobeSpan. Эти причины, которые нельзя назвать техническими в то же время являются достаточно вескими, для того, чтобы сдерживать процессы внедрения алгоритма CAP в перспективные системы DSL.

Алгоритм модуляции DMT

Вопреки существующему мнению, многочастотный алгоритм discrete multi tone (DMT) не является принципиально новым. Основные положения этого алгоритма модуляции были сформулированы и запатентованы специалистами Amati Communications (в настоящий момент эта компания является частью Texas Instruments Internet Access group) ещё в начале 1990 годов. В 1993 году технология была выбрана ANSI в качестве алгоритма линейного кодирования для перспективных систем передачи данных. Сложность технической реализации данного алгоритма на первоначальном этапе развития DSL – технологий ограничивала область его возможного применения. Однако на настоящий момент алгоритм DMT имеет многочисленные технические реализации и является одним из основных алгоритмов модуляции наиболее перспективных технологий ADSL и VDSL.

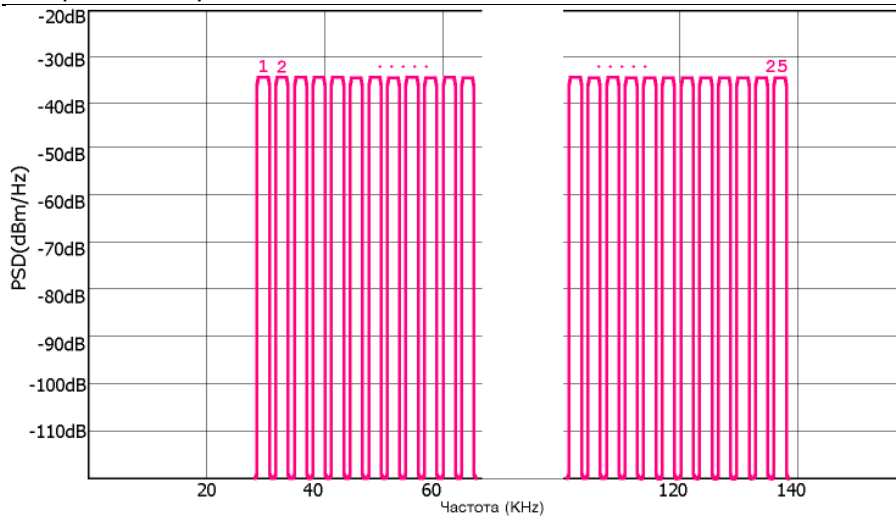
Описание алгоритма

Алгоритм DMT построен по принципиально иной, чем у представленных выше алгоритмов, схеме. В отличие от алгоритмов QAM, данный алгоритм использует не одну, а группу частот несущих колебаний. При использовании этого алгоритма модуляции весь расчетный частотный диапазон линии делится на несколько участков шириной по 4.3125 кГц. Каждый из этих участков используется для организации независимого канала передачи данных.

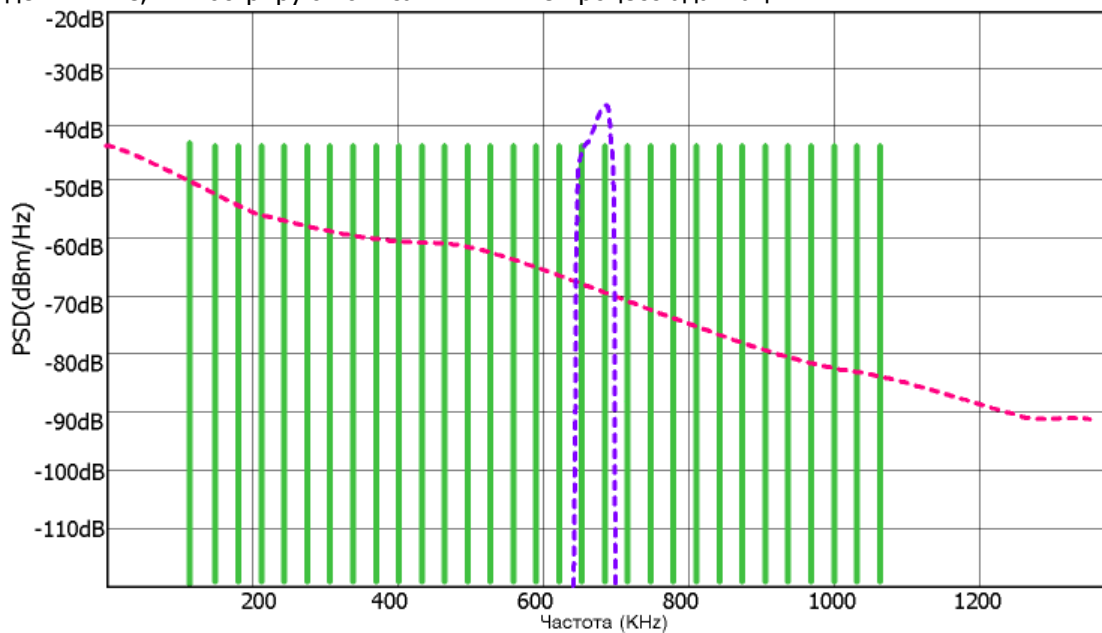


На приведенном слева рисунке представлен вариант частотной организации входящего потока стандарта G.DMT для варианта «echo cancellation». Для данного варианта в направлении абонента организуется 249 частотных каналов. Кроме того, для этого варианта характерно, что частотные диапазоны, которые используются для передачи данных входящего и исходящего информационных потоков перекрываются. На приведенном ниже рисунке

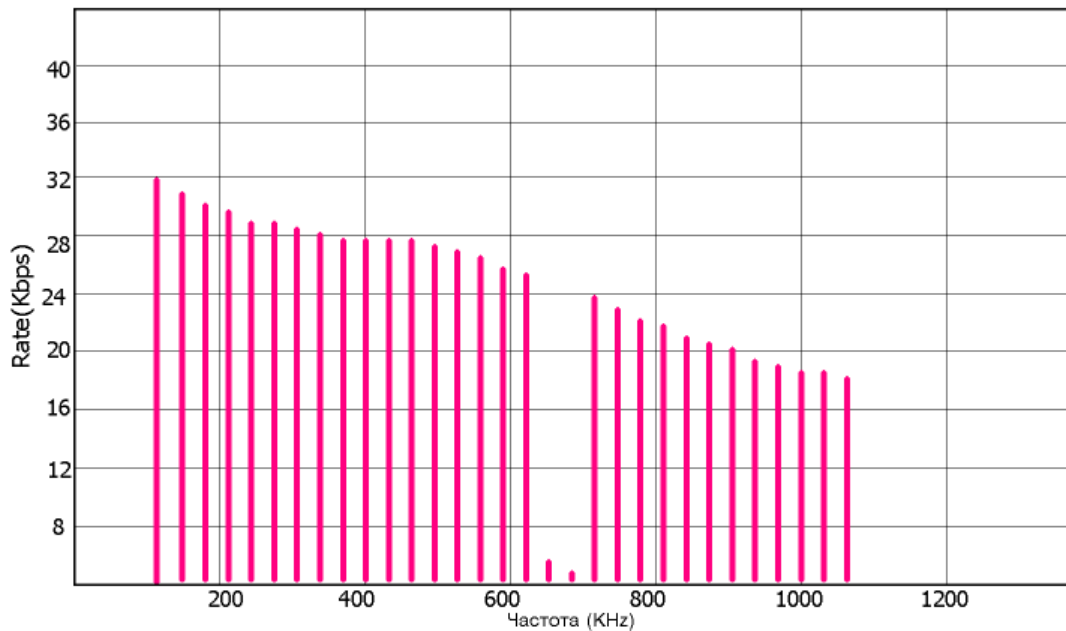
представлен вариант частотной организации входящего потока G.DMT.



На этапе проверки качества линии передатчик, исходя из уровня помех в частотном диапазоне участка, для каждого из этих каналов выбирает подходящую модуляционную схему. На чистых каналах с малым уровнем шумов могут быть использованы алгоритмы с большими значениями θ , например, QAM 64, в то время, как на более зашумленных участках могут быть использованы более простые алгоритмы модуляции, например QPSK. Очевидно, что использование такого принципа регулирования скорости передачи данных, позволяет наиболее точно согласовывать параметры модулированного сигнала с параметрами линии, по которой он будет передаваться. При передаче данных информация распределяется между независимыми каналами пропорционально их пропускной способности, приемник выполняет операцию демультимплексирования и восстанавливает исходный информационный поток. Рисунки, которые приведены ниже, иллюстрируют описанный выше процесс адаптации.



На представленном выше рисунке зеленым цветом обозначена неадаптированная частотная характеристика DMT – передатчика. Красным цветом выделена кривая зависимости затухания в линии от частоты передаваемого сигнала. Линией синего цвета обозначена частотная помеха, которая постоянно действует в сравнительно небольшом участке в пределах рабочего диапазона частот передатчика.



После выполнения операций согласования пропускной способности элементарных каналов с приведенными частотными характеристиками линии, зависимость скоростей передачи данных от частотного номера элементарного канала будет соответствовать кривым, которые приведены на предыдущем рисунке.

Достоинства алгоритма

Алгоритм модуляции DMT представляет собой дальнейшее развитие идеи, которая была положена в основу алгоритмов QAM. В силу этого, он, безусловно, способен обеспечить высокую скорость и надежность передачи данных. К дополнительным достоинствам этого алгоритма, безусловно, относятся возможность оперативной и точной адаптации приемо-передающих устройств к характеристикам линии и практически повсеместное признание этого алгоритма стандартизирующими организациями (в первую очередь – ANSI).

Недостатки алгоритма

Недостатками алгоритма модуляции DMT можно считать его громоздкость и недостаточную технологичность. Алгоритм DMT является наиболее сложным для аппаратной реализации среди всех алгоритмов, которые в настоящее время используются для формирования линейного кода устройств DSL. В то же время, дискуссии о том, насколько оправдана эта сложность и насколько способность к адаптации этого алгоритма соответствует характеристикам реальных линий, после утверждения DMT в качестве основного алгоритма линейного кодирования стандартов ANSI для ADSL и VDSL вряд ли целесообразны.

Алгоритм модуляции OFDM

Алгоритм orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) является упрощенным вариантом алгоритма DMT. В отличие от DMT, алгоритм OFDM использует единое значение спектральной эффективности θ для всех частотных каналов.

Описание алгоритма

Основные принципы и алгоритмы, в соответствии с которыми производится формирование линейного кода OFDM, соответствуют принципам DMT. Единственное, однако, существенное отличие этих двух алгоритмов заключается в способе управления пропускной способностью элементарных каналов. Значения пропускной способности элементарных частотных каналов, которые формируются алгоритмом DMT, могут отличаться в различных частотных диапазонах. Алгоритм OFDM использует одно значение пропускной способности и скорости передачи данных для элементарных каналов всего частотного диапазона.

Достоинства алгоритма

К достоинствам многочастотных алгоритмов относится обеспечение высоких скоростей передачи данных и способность нивелировать воздействие на сигнал помех, которые возникают в линии. Несомненным достоинством этих методов также является наличие для них стандартов ITU и ANSI. По сложности реализации, алгоритм OFDM занимает промежуточную позицию между алгоритмами CAP и DMT, что делает возможным его применение в мало серийных приложениях.

Недостатки алгоритма

Недостатком алгоритма OFDM можно считать невозможность избирательной адаптации пропускной способности элементарных каналов к частотным характеристикам линии. Элементарные частотные каналы

OFDM разделены должны быть разделены технологическими заградительными интервалами. Чем большее будет число элементарных частотных каналов, тем шире будет совокупная длина частотного интервала, который не может быть использован непосредственно для передачи данных. Следствием этого является невысокая эффективность использования полосы пропускания линии в данном случае.

Заключение

Разнообразие существующих в настоящее время алгоритмов модуляции, которые могут быть использованы для формирования линейного кода, предоставляет для разработчиков и специалистов по эксплуатации телекоммуникационного оборудования возможность выбора оптимального для конкретной реализации решения.

Положительные качества, которые свойственны решениям на базе 2B1Q, позволят в обозримом будущем достаточно эффективно использовать HDSL и SDSL - системы, которые построены на использовании этого алгоритма. В перспективных системах целесообразно применение решений, которые основаны на промышленных реализациях алгоритма QAM – CAP и DMT.

Список литературы

1. ANSI T1.601-1999, ISDN Basic Access Interface for Use on Metallic Loop for Application at the Network Side of NT, Layer 1 Specification
2. COMMITTEE T1 - TELECOMMUNICATIONS T1E1.4/2000-099 2B1Q Symmetric Digital Subscriber Line Specification
3. COMMITTEE T1 - TELECOMMUNICATIONS T1E1.4/99-261 regarding the Spectral Compatibility of 2B1Q SDSL
4. COMMITTEE T1 - TELECOMMUNICATIONS T1E1.4/98-294R2 Draft Technical Report for Single-Carrier Rate Adaptive Digital Subscriber Line (RADSL) - Revision 2
5. 1999 IEEE International Solid-State Circuits Conference Robindra B. Joshi,... Broadcom Corp. A 52 Mb/s Universal DSL Transceiver IC
6. Krista S. Jacobsen Texas Instruments White Paper: Providing the Right Solution for VDSL
7. International Engineering Consortium: GlobeSpan corp.: Spectral Compatibility of Digital Subscriber Line (DSL) Systems