

FSK: сигналы и их демодуляция

FSK модуляция (частотная манипуляция, Frequency Shift Keying) является наиболее распространенным видом цифровой модуляции радиочастотных сигналов и нашла широкое применение в связи и телефонии. Эта статья представляет собой руководство по FSK модуляции во всем ее многообразии. Будут рассмотрены как схемы модуляции, так и схемы демодуляции.

Двоичная FSK

Двоичная FSK (обычно называемая просто FSK) представляет собой способ модуляции, обычно используемой для передачи цифровой информации между цифровыми устройствами, такими как телетайпы или компьютеры. Данные передаются путем сдвига частоты непрерывно передаваемой несущей попеременно на одну из двух дискретных частот. Одна из этих частот определена как частота «mark», а другая – как частота «space». Mark и space соответствуют двоичной единице и нулю соответственно. Есть соглашение, что mark соответствует большей частоте несущей. Рис. 1 показывает зависимость между двоичными данными и передаваемым сигналом.

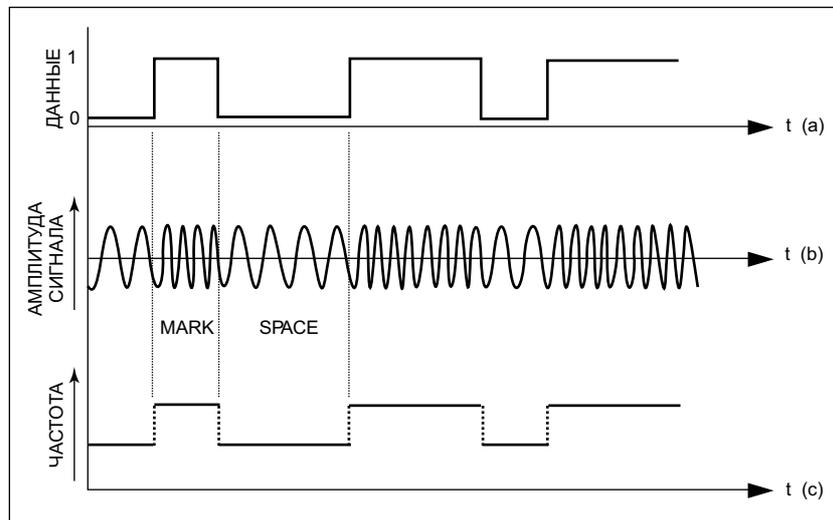


Рис. 1. FSK модуляция. Двоичные данные (а), несущая, модулированная частотно для получения FSK сигнала (b), которая имеет определенную частотную зависимость (с).

Основные параметры, описывающие FSK сигнал, показаны на рис.2. Минимальная длительность условия mark или space называется длиной элемента. Типичное значение длины элемента лежит между 5 и 22 мс, однако, может использоваться длина элемента меньшая, чем 1 мкс, или большая, чем 1 с. Используемая полоса частот должна «умещаться» в телефонном канале, а условия распространения сигнала в ВЧ каналах обычно требует длину элемента, большую 0.5 мс. Альтернативный способ определения длины элемента использует понятие скорости передачи. Скорость передачи в бодах равна обратной величине от длины элемента в секундах. Например, если длина элемента составляет 20 мс (0.02 с), это эквивалентно скорости 50 бод.

Частотные измерения FSK сигнала обычно основываются на понятиях сдвига и центральной частоты. Сдвиг представляет собой разницу между частотами mark и space. Сдвиг обычно лежит в интервале от 50 до 1000 Гц. Центральная частота представляет собой среднюю частоту между частотами mark и space. Иногда используется термин «девиация», применяемый для частотной модуляции. Девиация равна абсолютному значению разницы между центральной частотой и частотой mark или space. Девиация также численно равна половине сдвига.

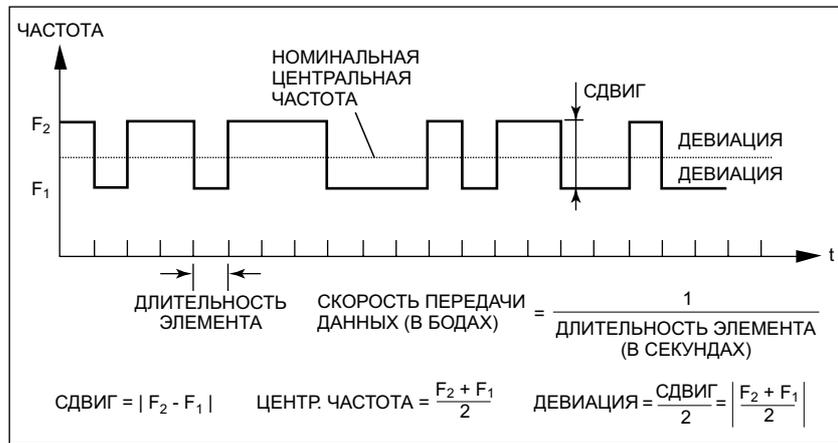


Рис. 2. Параметры FSK сигнала.

FSK может передаваться когерентно и некогерентно. Когерентность подразумевает, что фаза каждой посылки mark или space является неизменной по отношению к некоторому эталону. Это соответствует генерации FSK сигнала путем переключения между двумя генераторами, работающими на частотах mark и space. Несмотря на то, что этот метод иногда используется, существует ограничение: чтобы переход от mark к space и обратно происходил без разрыва фазы, значения сдвига и скорости передачи должны быть связаны между собой. Синхронный FSK сигнал, который имеет сдвиг в герцах, кратный скорости передачи в бодах, является наиболее распространенным случаем когерентной FSK. Когерентная FSK имеет лучшие характеристики с точки зрения вероятности ошибки, однако, некогерентная FSK является более простой в реализации и используется в большинстве случаев. Некогерентная FSK не имеет определенной фазовой зависимости между последовательными посылками, в основном фаза меняется случайным образом.

Для передачи данных с помощью FSK имеется много разных способов кодирования. Они могут быть классифицированы в две основные группы: синхронные и асинхронные. Для синхронных посылок переходы mark-space и space-mark синхронизированы с тактовой частотой. Асинхронные сигналы не требуют наличия тактовой частоты, однако, взамен они полагаются на определенные последовательности бит для управления временной диаграммой при декодировании. На рис. 3 приведено сравнение синхронной и асинхронной передачи.

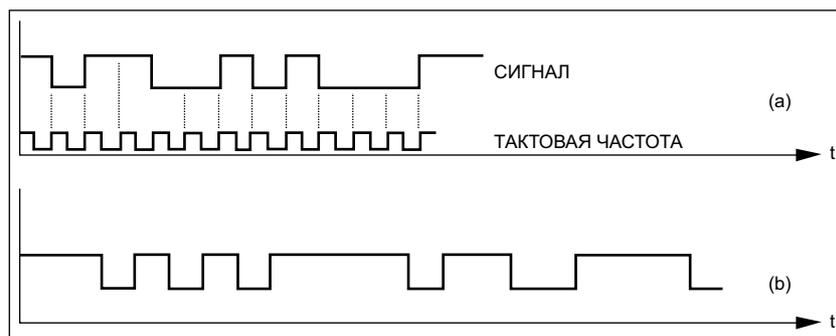


Рис. 3. Синхронная (а) и асинхронная (б) передача.

Наиболее общая асинхронная система кодирования представляет собой 5-битный код Бодо со стартовым элементом (release) в начале и стоповым элементом (latch) в конце. Изначально разработанный для использования с механическими телетайпами, система «заперта» («latched»), пока не поступит «отпирающий» («release») элемент, который разрешает интерпретацию принтером следующих 5-ти элементов как информационных бит. Двоичные значения этих 5-ти бит соответствуют определенному символу. На рис.4 показаны последовательности, соответствующие символам «С» и «W» соответственно. Непосредственно за 5-м информационным битом следует стоп, или элемент «latch», длительность которого составляет как минимум 1.42 длительности элемента. Этот бит останавливает дешифратор принтера до тех пор, пока элементом «release» не начнется следующая посылка. Длительность элемента «latch» между символами может быть очень

длинной, специально для случая ручной генерации символов, когда оператор производит набор намного медленнее, чем система способна передавать символы. Нецелочисленная минимальная длительность элемента «latch» в 1.42 длительности элемента и случайная природа ручной генерации символов подчеркивает асинхронный тип этой схемы.

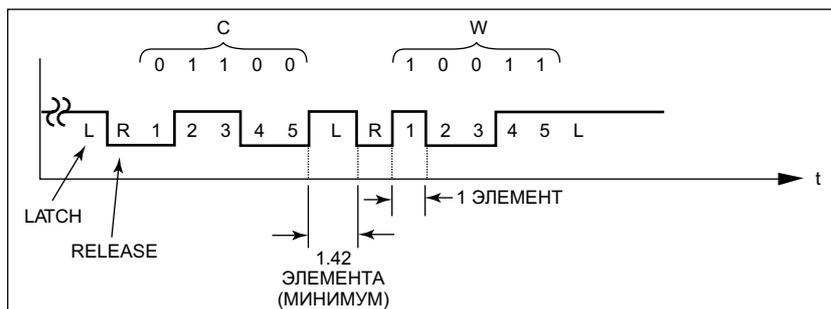


Рис. 4. Типичная старт-стоповая система с кодом Бодо.

Распространенные синхронные системы используют ARQ кодирование Мура. Код Мура имеет 7 бит на символ и содержит стартовые и стоповые элементы. Синхронизация бит поддерживается благодаря использованию тактовой частоты, которая соответствует скорости передачи принимаемого сигнала. Синхронизация символов поддерживается путем передачи «пустых» символов между символами данных.

Частотное уплотнение (Frequency Division Multiplex, FDM)

Несколько FSK сигналов могут быть переданы одновременно в выделенной частотной полосе путем определения разных центральных частот для всех FSK сигналов. Этот метод одновременной передачи называется FDM. В радиодиапазоне несколько аудио FSK сигналов часто объединяются для передачи SSB передатчиком. Эту форму FDM часто называют телеграфией со звуковой несущей (Voice Frequency Telegraph, VFT). Для минимизации занимаемой полосы частот индивидуальные FSK каналы обычно имеют незначительный сдвиг в пределах от 50 до 200 Гц. Типичная FDM система показана на рис. 5. ВЧ радиосистема обычно передает 16 тональных каналов, однако возможна передача 24-х и более частотных каналов на 3-кГц боковой полосе.

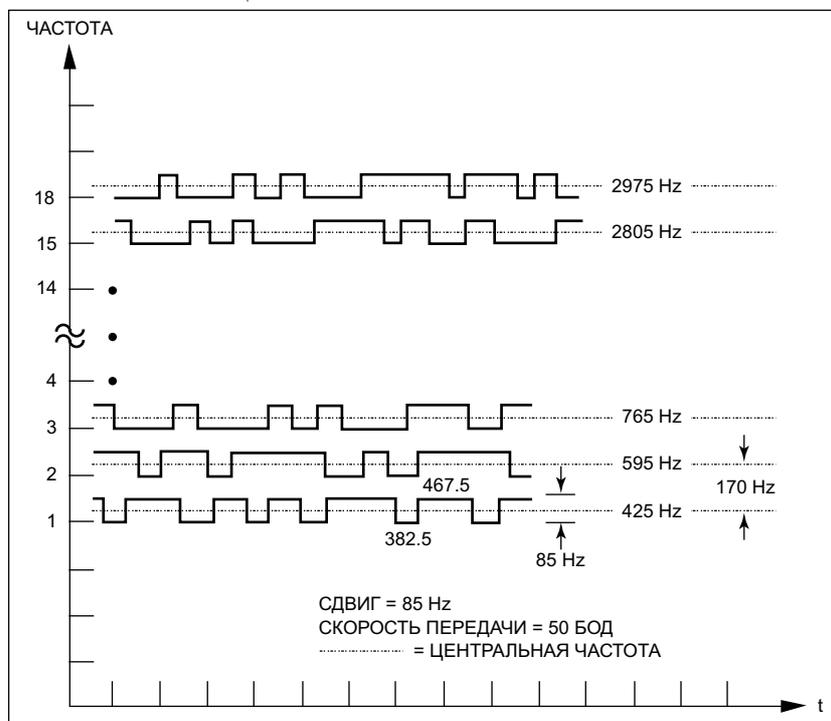


Рис. 5. Типичный 16-канальный FDM (VFT) FSK сигнал.

ВЧ радиосистема обладает многолучевым затуханием сигнала. Относительно узкополосная природа этого явления затухания приводит к тому, что в любой момент времени оно влияет только на один из двух тональных каналов. Как защита от затухания, общей практикой является передача дублирующих данных в тональных каналах той же FDM

группы. Если дублирующие каналы разнесены примерно на 1 кГц, затухание в одном канале является относительно некоррелированным с затуханием в дублирующем канале. В результате, возможно получить значительное улучшение характеристик системы в плане чувствительности к многолучевому затуханию. В 16-канальной ВЧ схеме канал 1 дублирован каналом 9, канал 2 – каналом 10 и т.д. Недостатком такой схемы является то, что половина каналов передается только для дублирования. Альтернативным подходом к решению проблемы является использование «перемежающейся» FDM.

Перемежающаяся FDM имеет преимущества в результате того, что длительность сигналов mark является комплементарной относительно длительности сигналов space. Это означает, что прием только частоты mark или только частоты space достаточен для восстановления переданных данных. Если частоты mark и space разнесены примерно на 1 кГц, они могут быть продетектированы отдельно. При объединении далеко разнесенных пар частот mark и space в одной боковой полосе FDM одна пара может перемежаться с другими парами. Эта схема проиллюстрирована на рис. 6. Путем перемежения пар частот FSK удастся получить хорошую устойчивость к многолучевому затуханию без жертвования эффективностью использования выделенной полосы частот. Несмотря на преимущества перемежения, эта схема является менее популярной по сравнению с простым дублированием, так как она требует более сложного демодулятора.

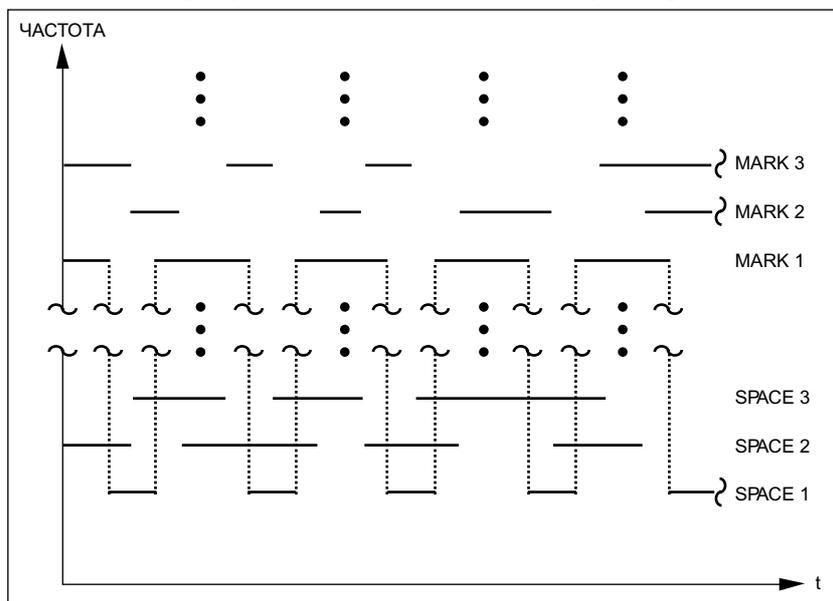


Рис. 6. Перемежающийся FDM FSK сигнал.

Двойная частотная манипуляция (Double Frequency Shift Keying, DFSK)

DFSK, иногда называемая DFS или «twinplex», является схемой передачи двух независимых потоков двоичных данных путем сдвига частоты одиночной несущей на одну из четырех дискретных частот.

Входные биты		Состояние выхода
X	Y	
0	0	A
0	1	B
1	0	C
1	1	D

Рис. 7. Кодовая таблица «один из четырех» для двух двоичных бит.

На рис. 7 показана кодовая таблица для преобразования двух двоичных бит в одно из четырех выходных состояний. Например, если бит X и бит Y равны 1 и 0 соответственно, будет выходное состояние C. Если каждое из четырех выходных состояний (от A до D) поставить в соответствие с определенной частотой FSK, станет возможным передать любое

состояние двух бит как один элемент. На рис. 8 показан типичный DFSK сигнал. Так как два двоичных канала являются независимыми, они могут содержать любые значения для синхронных или асинхронных сигналов. Можно иметь телетайп в одном канале и код Морзе – в другом. Битовая синхронизация между каналами не требуется.

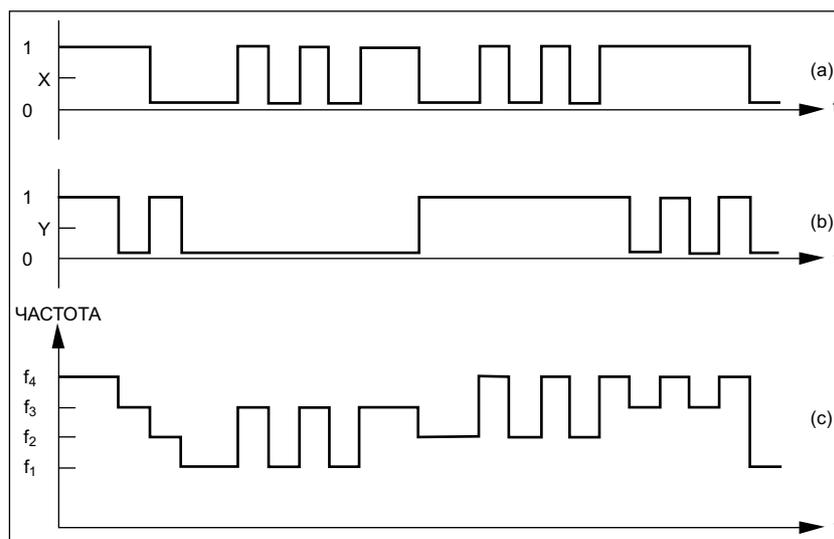


Рис. 8. DFSK сигнал. Цифровые каналы X (a) и Y (b) группируются в одиночный DFSK.

В примерах на рис. 7 и 8 выходные состояния от А до D представлены частотами от f_1 до f_4 соответственно. Существует 24 различных способа (4 факториал перестановок), которыми 4 состояния могут быть поставлены в соответствие 4-м частотам. Поскольку в DFSK сигнале передается только одна частота в один момент времени, мощность передатчика используется намного эффективнее, чем при FDM передаче, которая предъявляет дополнительные требования к линейности для исключения появления интермодуляционных составляющих.

Демодуляция FSK

Методы демодуляции FSK могут быть разделены на две основных категории: демодуляция на основе частотного детектора и демодуляция на основе фильтров. Ранние разработки FSK демодуляторов основывались на частотном детекторе, поэтому данная категория будет рассмотрена первой.

Демодуляторы на основе частотного детектора

Демодуляторы на основе частотного детектора обрабатывают FSK сигнал как обычный ЧМ сигнал с двоичной модуляцией. На рис. 9 показана блок-схема такого демодулятора. Вначале сигнал подвергается фильтрации для подавления внеполосных помех, затем сигнал ограничивается для устранения паразитной амплитудной модуляции. Ограниченный сигнал частотно детектируется для получения положительного выходного напряжения для частоты mark и отрицательного – для частоты space. Протектированный сигнал подвергается низкочастотной фильтрации для подавления шумовых компонент на частотах выше скорости передачи данных, и, наконец, схема ограничителя (компаратор) преобразует положительное напряжение в уровень логической единицы, а отрицательное – в уровень логического нуля.

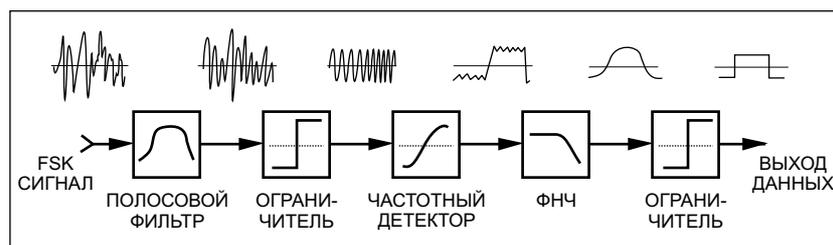


Рис. 9. FSK демодулятор на основе частотного детектора.

Данный тип демодулятора является очень популярным ввиду относительной простоты и не критичности в настройке. Демодуляторы на основе PLL являются более современными, однако, их характеристики являются очень близкими к характеристикам обычных частотных детекторов. Для небольшого класса сигналов, специально приспособленных к PLL демодуляции, такие демодуляторы имеют лучшие параметры по сравнению с обычными частотными детекторами. Демодуляторы на основе частотного детектора несколько усложняются при работе с FDM, а для работы с перемежающимися FDM сигналами вообще не подходят. Они также обычно не используются с DFSK сигналами.

Частотные детекторы не являются оптимальными в том смысле, что обеспечивают худшие параметры при детектировании сигнала, чем это теоретически возможно. Для того чтобы убедиться в этом, нужно рассмотреть спектр типичного FSK сигнала. Как показано на рис. 10, практически вся энергия посылок mark и space сосредоточена в полосе, ширина которой равна удвоенной скорости передачи, центрированной относительно частоты mark и space соответственно. На рис. 11 показан спектр при наличии помех. Сигнал помехи с частотой f_A подавляется, так как он не попадает в полосу пропускания входного фильтра частотного детектора. Сигнал помехи с частотой f_B подавляется благодаря действию ограничителя, в результате доминирует сигнал с максимальным уровнем (эффект «захвата» частотного детектора). Однако сигнал помехи с частотой f_C имеет высокий уровень и лежит в полосе пропускания входного фильтра, в результате он делает полностью невозможной демодуляцию полезного сигнала. В случае селективного затухания, как показано на рис. 12, несмотря на то, что сигнал space имеет больший уровень, чем внутриполосная помеха, амплитуда сигнала mark, ослабленная в результате селективного затухания, меньше амплитуды внутриполосной помехи. Поэтому во время передачи сигнала mark демодуляция будет полностью нарушена. Намного труднее показать графически эффект действия широкополосной шумовой помехи. Когда огибающая шума достигает значения амплитуды FSK сигнала, демодуляция нарушается.

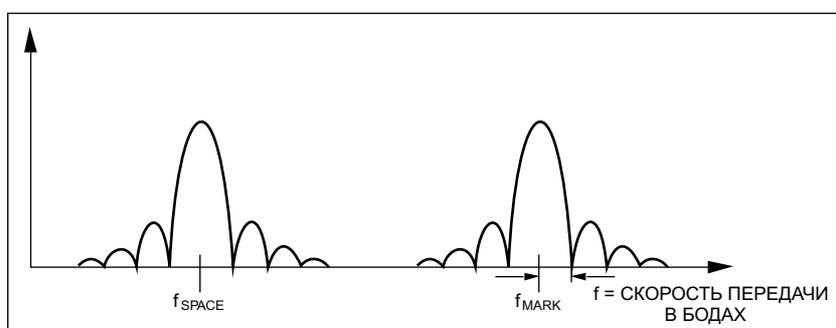


Рис. 10. Упрощенный спектр типичного двоичного FSK сигнала.

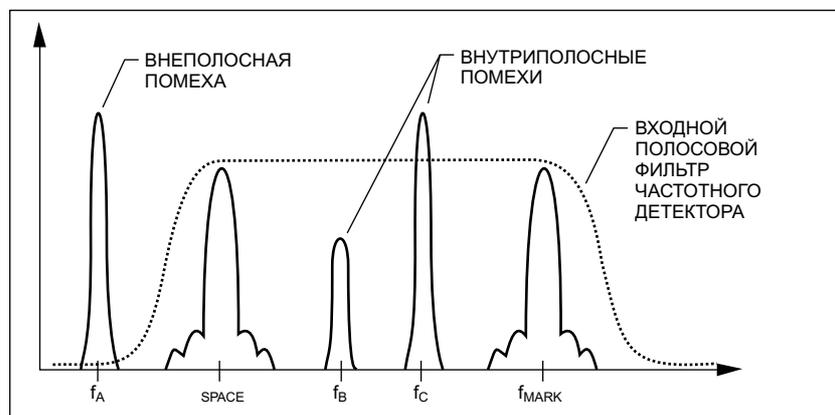


Рис. 11. Спектр FSK сигнала с внутриполосными и внеполосными помехами.

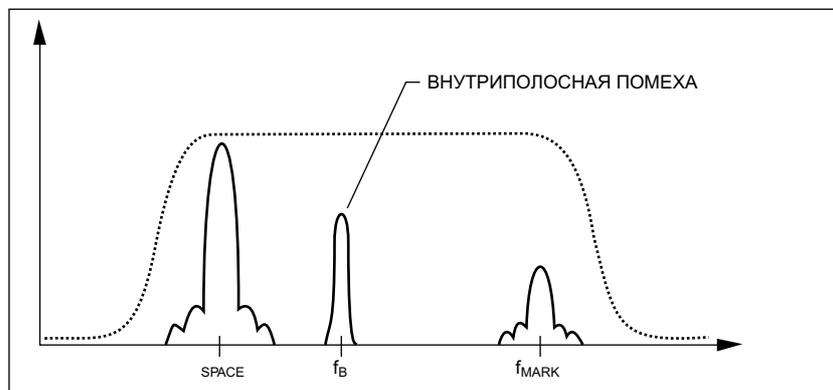


Рис. 12. Спектр FSK сигнала с внутриполосной помехой и селективным затуханием .

Сравнение спектра FSK сигнала со спектром сигнала помехи, к которому чувствителен частотный детектор, приводит к выводу, что характеристики частотного детектора значительно ухудшены из-за относительно широкой полосы пропускания. В полосу пропускания включена значительная часть спектра, которая не содержит энергии полезного сигнала, что, очевидно, не является оптимальным при демодуляции FSK.

В этом месте может возникнуть вопрос: «Какой же метод демодуляции является оптимальным?» Используя теорию детектирования сигналов, можно показать, что детектор на основе полосовых фильтров обеспечивает лучшие характеристики.

Демодуляция FSK на основе фильтров

Демодуляция FSK на основе фильтров является попыткой оптимально согласовать параметры FSK сигнала со структурой демодулятора для минимизации уровня ошибок демодуляции. Упрощенный спектр для демодулятора на основе фильтров показан на рис. 13. Правильный выбор характеристик фильтров зависит не только от параметров сигнала, но и от характера помех. Классический демодулятор на основе полосовых фильтров является оптимальным для когерентной FSK в условиях помех в виде белого гауссовского шума. Другие виды демодуляторов на основе фильтров используются для некогерентной FSK и/или нестационарного шума.

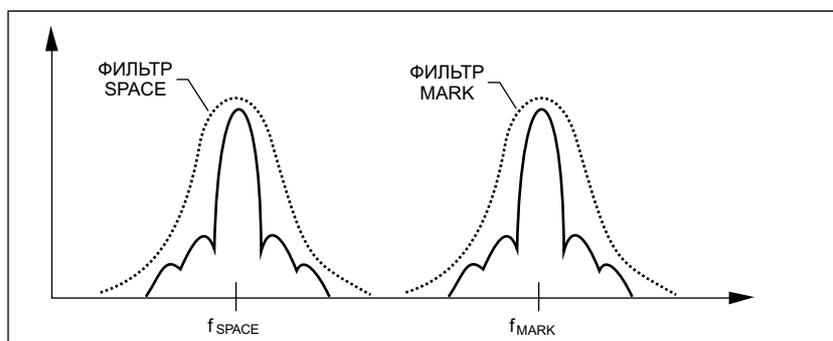


Рис. 13. Упрощенный спектр FSK сигнала при демодуляции с помощью фильтров.

Блок-схема простейшего демодулятора на основе полосовых фильтров для когерентной FSK показана на рис. 14.

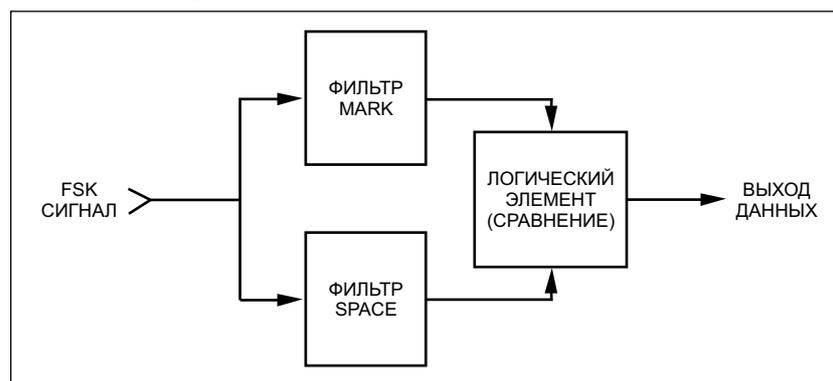


Рис. 14. FSK демодулятор на основе фильтров.

В этом демодуляторе выходные сигналы фильтров сравниваются, и если уровень сигнала на выходе фильтра mark больше, чем на выходе фильтра space, принимается решение, что передается сигнал mark. Аналогично детектируется сигнал space. Демодулятор на основе полосовых фильтров является оптимальным, так как характеристики фильтров согласованы с характеристиками передаваемого сигнала. В результате ослабление полезного сигнала будет минимальным при максимальном ослаблении шумов. Для белого шума оптимальный фильтр имеет импульсную характеристику, равную обращенному во времени элементу входного сигнала. Поскольку некогерентная FSK является намного более распространенной по сравнению с когерентной FSK, требуется, чтобы демодулятор был нечувствительным к фазе.

Оптимальная демодуляция некогерентной FSK может быть осуществлена путем выделения огибающих выходных сигналов фильтров. Демодулятор этого типа показан на рис. 15. Выходы фильтров сигналов mark и space поступают на детекторы огибающей, а затем сравниваются для обнаружения сигнала с большим уровнем. Заметьте, что информация о фазе при этом не требуется. С «правильной» формой АЧХ фильтров характеристики этого типа демодуляторов приближаются к теоретически оптимальным для некогерентной FSK. «Правильной» АЧХ фильтров для условий помех в виде белого шума является та, которая имеет форму, соответствующую спектру передаваемого сигнала (рис. 10). Для «прямоугольной» FSK модуляции эта форма соответствует полосовому фильтру с АЧХ в виде функции sinc, центрированной по частоте сигнала mark или space. К сожалению, предположение о помехах, как о белом шуме, не верно в большинстве реальных случаев.

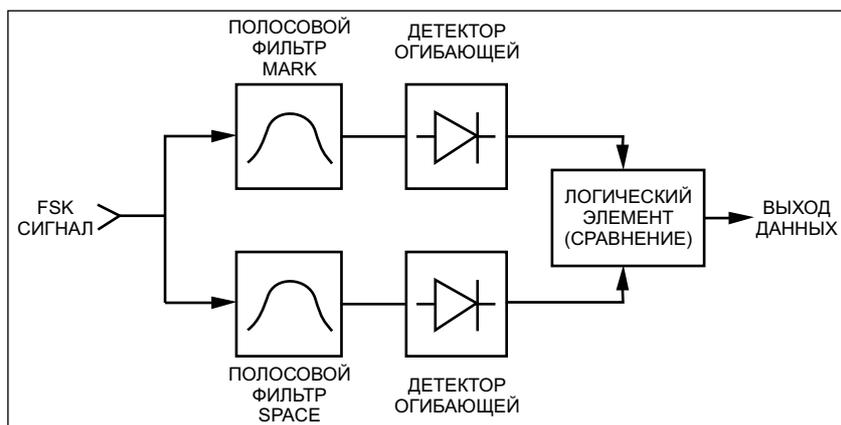


Рис. 15. Некогерентная FSK демодуляция с помощью фильтров и детекторов огибающей.

Для общего случая некогерентной FSK в условиях помех, отличных от белого шума, проблема выбора характеристик фильтров становится значительно более сложной. Двумя наиболее часто встречающимися видами помех, отличных от белого шума, являются помехи по соседнему каналу и СВ-помехи. В результате непредсказуемой природы этих видов помех, желательно создать фильтр, который одинаково хорошо работал бы с помехами в виде белого шума и отличными от белого шума. Для минимизации вклада помех, отличных от белого шума, желательно использовать полосовой фильтр с относительно крутыми склонами АЧХ без боковых полос, в отличие от фильтра с характеристикой sinc. Это желательно еще и потому, что такой фильтр хорошо работает и в условиях белого шума.

Для каждой формы АЧХ фильтра существует оптимальная полоса пропускания. Обычно, если полоса пропускания слишком широкая, будет восприниматься излишняя энергия шумовых помех. Если же полоса пропускания слишком узкая, последовательные элементы передаваемого сигнала будут искажать друг друга. Это называется межсимвольными помехами. В узкополосных фильтрах это вызвано «звоном», или неспособностью демпфирования энергии предыдущего элемента перед приемом последующего.

Для определения характеристик фильтра удобно использовать термин полосы пропускания по уровню -3 дБ. Оптимальная полоса пропускания по уровню -3 дБ напрямую

зависит от скорости передачи информации или от обратной длительности элемента. Если мы рассматриваем фильтры с нормализованной полосой пропускания, полученной умножением полосы пропускания по уровню -3 дБ (В) на длину элемента (Т), мы можем изобразить одиночную кривую качества фильтра для каждой формы АЧХ, не зависящую от скорости передачи данных. На рис. 16 показаны зависимости нормализованной полосы пропускания от отношения сигнал/шум для постоянной вероятности ошибки в условиях белого шума. Оптимальная нормализованная полоса пропускания для каждого фильтра находится в точке минимума отношения сигнал/шум. Слева от этого минимума доминируют межсимвольные помехи. Справа – избыточная энергия белого шума.

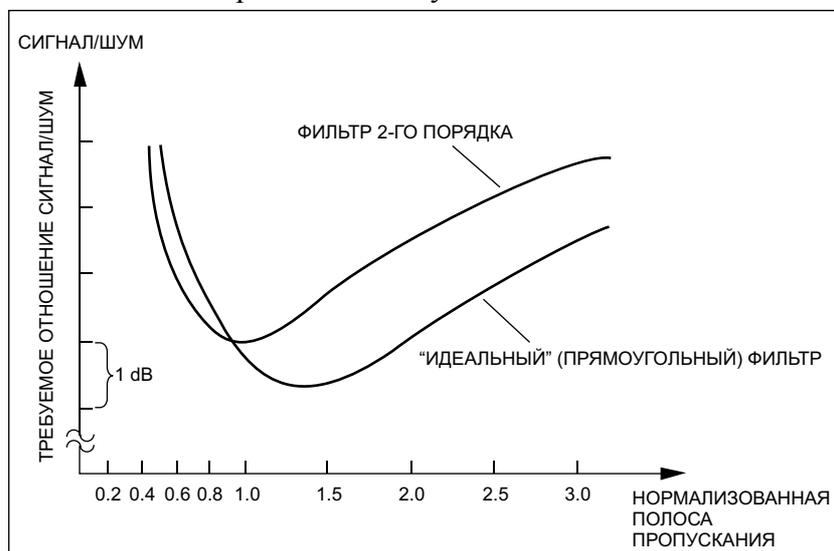


Рис. 16. Кривые систематической ошибки для двух типов FSK фильтров.

Выбрав фильтр, который одновременно имеет хорошие характеристики на белом шуме и крутые склоны АЧХ, можно получить отличное качество демодуляции некогерентной FSK в условиях помех в виде белого и отличного от белого шума. Полоса пропускания фильтра и центральная частота могут варьироваться в широких пределах для наилучшего согласования с параметрами передаваемого сигнала: скоростью передачи и сдвигом частоты.

Выбор порога компаратора

Порог компаратора на рис. 15 может задаваться несколькими разными способами. В простейшем случае можно принять решение о передаваемом сигнале mark, если выходной сигнал детектора mark превышает «шумовой» выходной уровень детектора space. При одинаковых уровнях передаваемых сигналов и при отсутствии селективного затухания этот метод является теоретически оптимальным методом принятия решения. Кривая ошибок для этого случая для двоичной некогерентной FSK в условиях белого шума показана на рис. 17. Если же FSK сигнал подвержен селективному затуханию (релеевская статистика амплитуд), то характеристики демодулятора существенно ухудшаются.

Если сигналы mark и space разделены по частоте, то они могут подвергаться независимым затуханиям. Можно просуммировать выходные сигналы mark и space с нужными знаками, чтобы получить разностный сигнал. На рис. 18а показан суммарный выходной сигнал для попеременной передачи mark и space. Огибающие на выходах детекторов mark и space изменяются при затухании сигналов. После суммирования сигналов компаратор сравнивает разностный сигнал с опорным напряжением, которое представляет собой порог. Если сумма превышает этот порог, детектируется mark, иначе – space. Если сигналы mark и space имеют одинаковые амплитуды, оптимальное значение порога равно нулю. Однако из-за селективного затухания появляется необходимость динамически изменять порог для достижения оптимальной демодуляции. Эффект селективного затухания при фиксированном и переменном пороге продемонстрирован на рис. 18b и с.

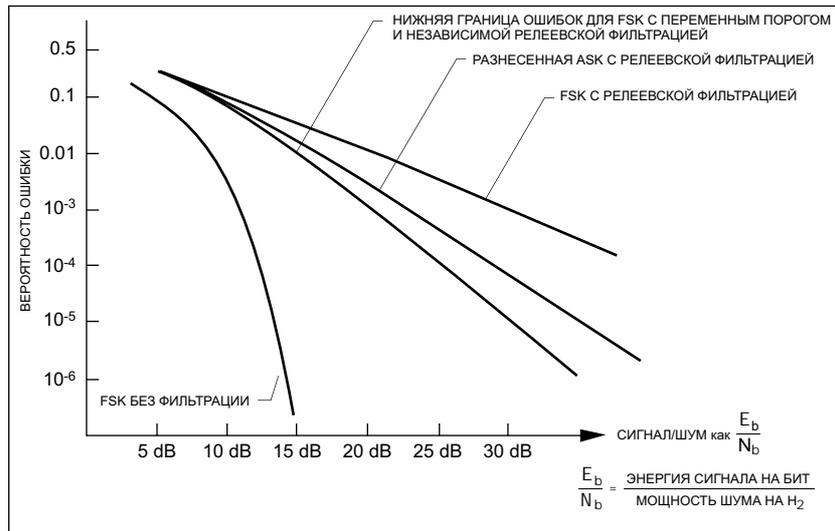


Рис. 17. Кривые систематической ошибки для разных FSK фильтров.

Характеристики детектора с переменным порогом можно сравнить с разновидностью демодуляции двух независимо затухающих сигналов с амплитудной манипуляцией (Amplitude Shift Keying, ASK). Естественно, благодаря дифференциальной природе сигналов mark и space, параметры с точки зрения вероятности ошибки будут лучше, чем для ASK. Характеристики ошибок для ASK и их нижние границы для FSK с переменным порогом показаны на рис. 17. Для получения наилучших характеристик, параметры схемы детектора с переменным порогом должны быть оптимизированы по отношению к характеристикам сигнала.

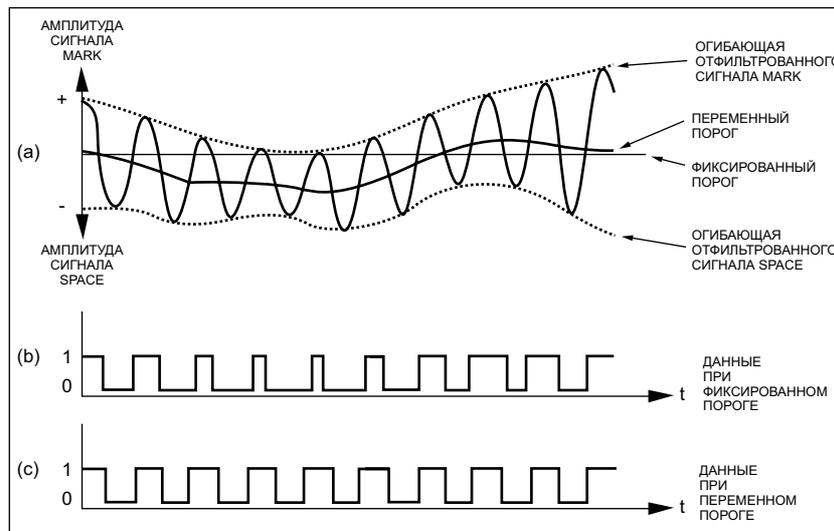


Рис. 18. FSK с независимой фильтрацией при фиксированном и переменном пороге. Из разности выходных сигналов (а) детекторов mark и space получают искаженные данные (b) при фиксированном пороге, и неискаженные данные (c) при переменном пороге.

Заключение

FSK сигналы имеют много различных форм в зависимости от приложений, для которых они предназначены. По мере совершенствования электроники и теории детектирования сигналов становится ясно, какие FSK демодуляторы требуются для оптимальной демодуляции различных форматов сигналов.

Bob Watson
Watkins-Johnson Company
www.wj.com

перевод Ридико Л. И.
wubblick@yahoo.com