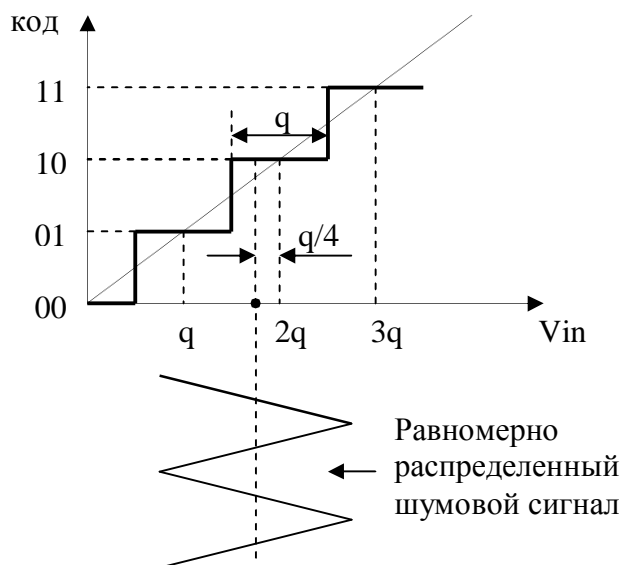


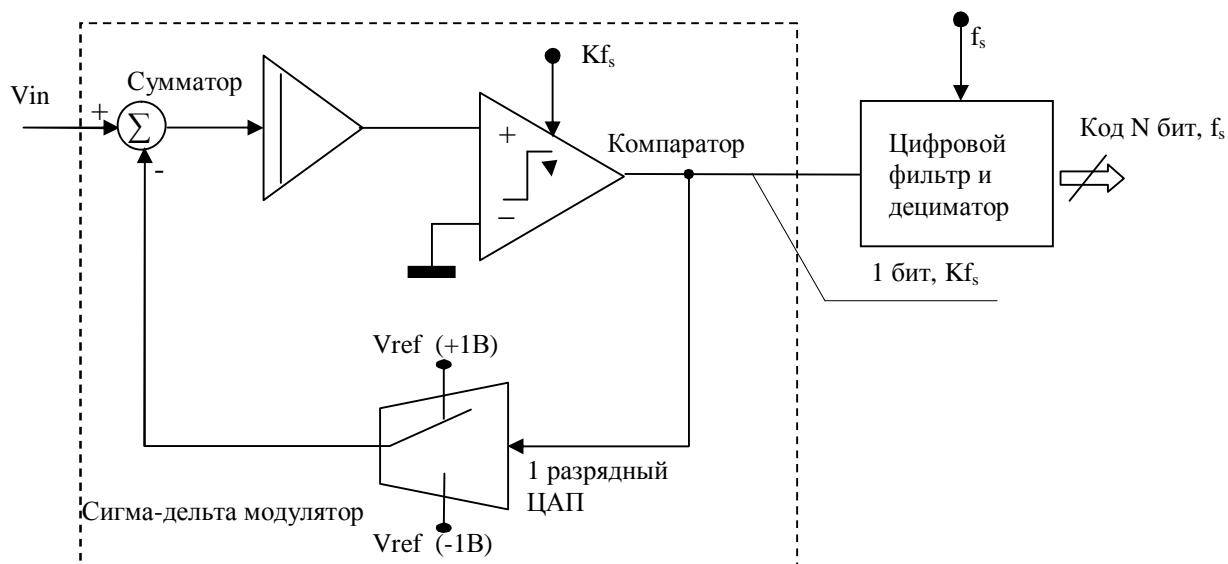
СИГМА-ДЕЛЬТА АЦП

Последние годы сигма-дельта архитектура становится более и более популярной для реализации АЦП высокого разрешения, особенно в СБИС обработки сигналов, где объединяются АЦП, ЦАП и цифровые сигнальные процессоры. Своим названием они обязаны наличием двух блоков: «сигма» - интегратора, «дельта» - дифференциального усилителя. Основным принципом, заложенным в этих преобразователях, позволяющим увеличить разрешающую способность, является усреднение результатов измерения. Пояснить это можно на методе Гетти, когда, как показано на рисунке, на входной сигнал АЦП накладывается равномерно распределенный шумовой сигнал размахом больше $q - 1$ МЗР. При выполнении большого числа преобразований с последующим усреднением получается дробное значение МЗР ($q/4$ на рисунке). В результате получается, что результат преобразования равен $2q - q/4$, а не $2q$.



Второй важный принцип – это автоматический перенос спектра шума квантования в более высокочастотную область при дискретизации низкочастотного сигнала.

Структурная схема сигма-дельта АЦП первого порядка приведена на рисунке ниже.



Структурная схема сигма-дельта АЦП первого порядка

Концептуально, сигма-дельта архитектура более цифровая, чем аналоговая. Принцип действия АЦП состоит в том, что в аналоговую схему с ООС и высоким коэффициентом усиле-

ния включен 1-разрядный ЦАП, который стремится свести к нулю значение напряжения на входе интегратора. ЦАП представляет собой ключ, который подключается к положительному V_{ref} (+1В) или отрицательному V_{ref} (-1В) источнику опорного напряжения в зависимости от полярности входного сигнала. Этот сигнал с частотой Kf_s , где f_s – частота преобразования АЦП формируется компаратором – одноразрядным АЦП. Принцип действия поясняется таблицей на примере преобразования входного сигнала V_{in} , равного 0,6В.

Тактовый период	Выходное напряжение, В			
	Сумматор	Интегратор	Компаратор	ЦАП
1	0,6	0,6	1	1
2	-0,4	0,2	1	1
3	-0,4	-0,2	-1	-1
4	1,6	1,4	1	1
5	-0,4	1,0	1	1
6	-0,4	0,6	1	1
7	-0,4	0,2	1	1
8	-0,4	-0,2	-1	-1

В исходном состоянии на выходе ЦАП устанавливается напряжение 0В. Затем устройство проходит показанную в таблице последовательность состояний. В тактовые периоды 2 и 7 состояния идентичны, следовательно, цикл работы занимает 5 тактов. Усреднение выходного сигнала компаратора за цикл преобразования дает величину входного сигнала 0,6В:

$$(+1-1+1+1+1):5=0,6$$

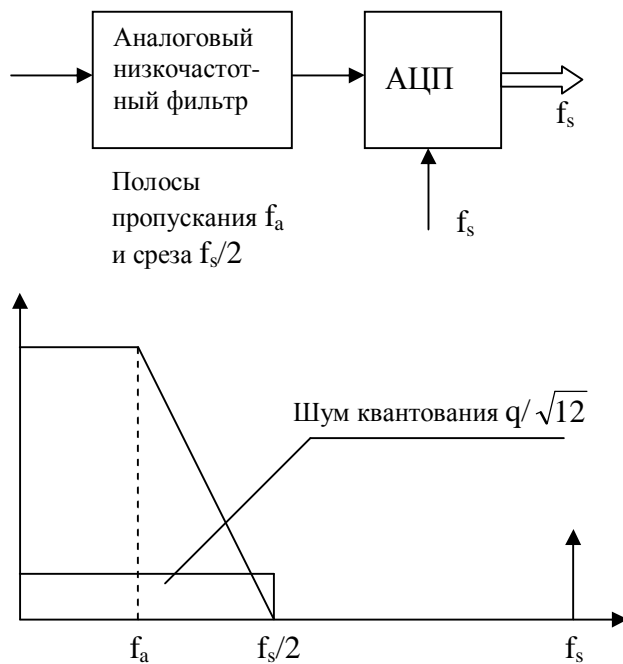
Для работы преобразователя необходимо, чтобы входной сигнал за время преобразования мог считаться постоянным, т.е. частота выборки Kf_s должна быть намного больше частоты входного сигнала. При этом условии поток битов с частотой Kf_s может преобразовываться в N-разрядные результаты преобразования с частотой f_s с помощью цифрового фильтра и дециматора.

Ключевые методы, используемые в сигма-дельта АЦП и необходимые для понимания их работы:

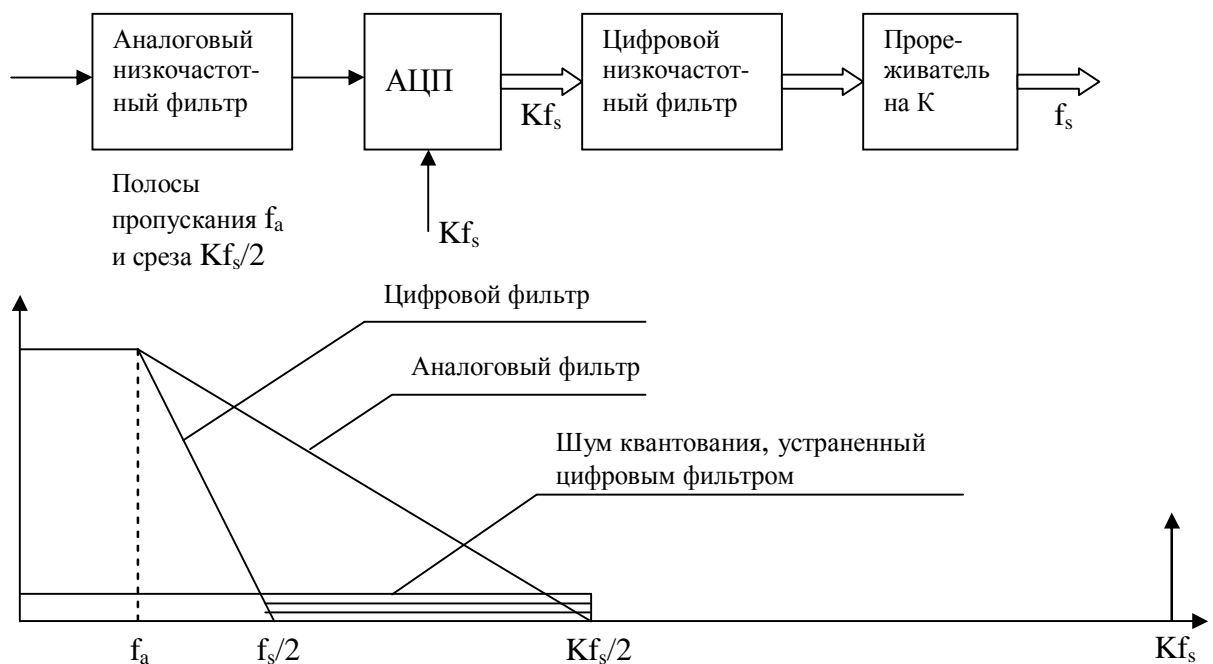
- излишние выборки (oversampling);
- формирование шума;
- цифровая фильтрация;
- прореживание.

Излишние выборки

Ее концепцию можно понять из следующих рисунков, первый из которых иллюстрирует выборки Найквиста с низкочастотным фильтром, а второй – излишние выборки (по Найквисту) с аналоговой и цифровой фильтрацией. Шум квантования в полосе Найквиста имеет значение $q/\sqrt{12}$. Во втором случае этот шум лежит в основном между частотами $f_s/2$ и $Kf_s/2$ и устраняется с выхода цифровым фильтром. Это имеет эффект увеличения отношения сигнал/шум (SNR) на величину $10\log_{10}(K)$, где K – отношение перевыборок (целое число). Использование этого подхода напрямую для увеличения разрешения не всегда оправдано (для увеличения SNR на 6дБ - 1 бит $K=4$), но если использовать отношение перевыборок в разумных пределах и не везде одинаковое по частоте, то возможно сформировать частотный спектр шума квантования так, что основной шум будет лежать в между частотами $f_s/2$ и $Kf_s/2$ и только малая часть останется в полосе до $f_s/2$. Именно это обеспечивает сигма-дельта модулятор в сигма-дельта АЦП.



Выборки Найквиста с низкочастотным фильтром

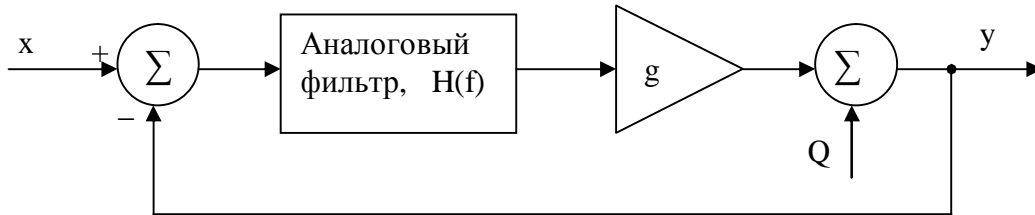


Излишие по Найквисту выборки с аналоговой и цифровой фильтрацией

Формирование шума

Первая часть схемы сигма-дельта АЦП первого порядка является сигма-дельта модулятором, который преобразует входной сигнал в непрерывную последовательность 1 и 0 с частотой выборки Kf_s . В частотной области интегратор может быть представлен в виде фильтра, амплитуда которого обратно пропорциональна частоте на входе. Строблируемый компаратор преобразует входной сигнал в высокочастотный переменный сигнал, варьируемый около среднего значения входного сигнала. Действующий шум квантования в области низких частот

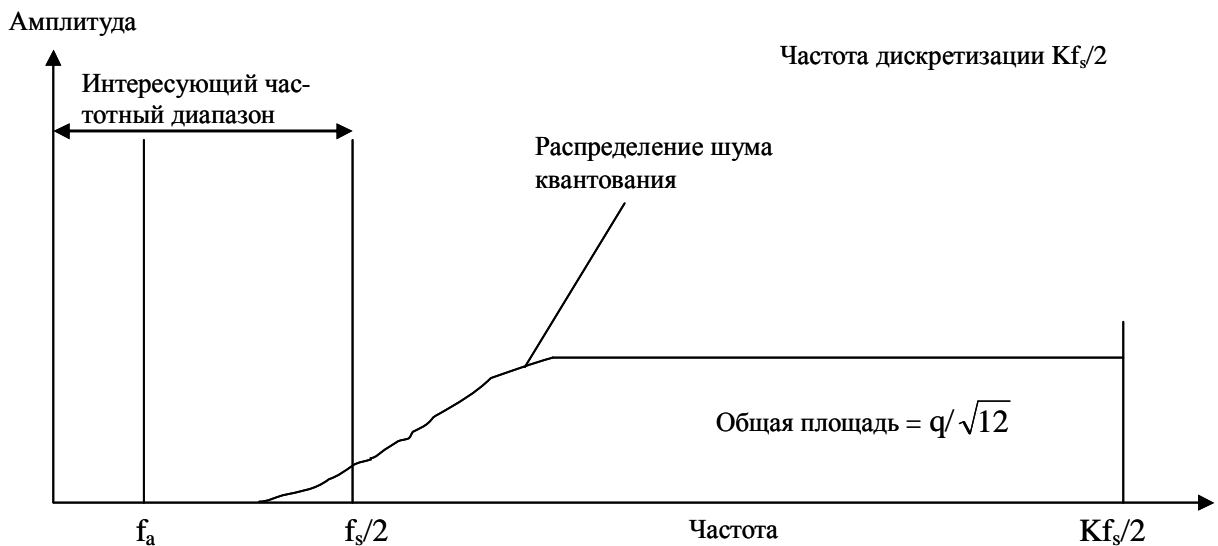
существенно сокращается (интегратор выглядит как высокочастотный фильтр для шума квантования). Точный частотный спектр результирующего шума зависит от частоты выборки, постоянной времени интегратора и значения напряжения ООС. Анализ сигма-дельта архитектуры в частотной области можно провести, используя линейную модель модулятора.



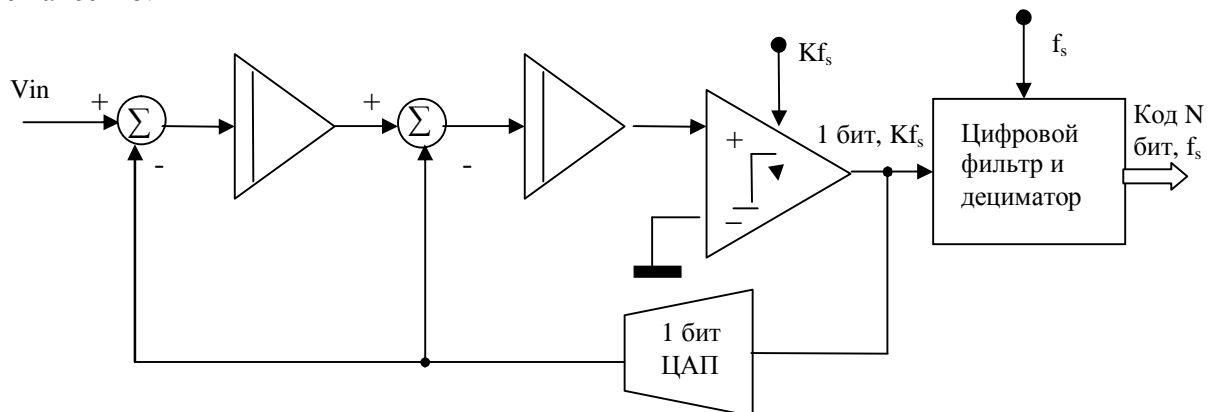
Линейная модель сигма-дельта модулятора в частотной области.

Интегратор представлен как аналоговый фильтр с заданной переходной характеристикой $H(f)$: амплитуда выходного сигнала обратно пропорциональна входной частоте. Дискриминатор представлен в виде каскада усиления перед сумматором шума квантования. При усилении $g = 1$ можно получить алгебраическое выражение в виде $y = x / (f + 1) + Qf / (f + 1)$.

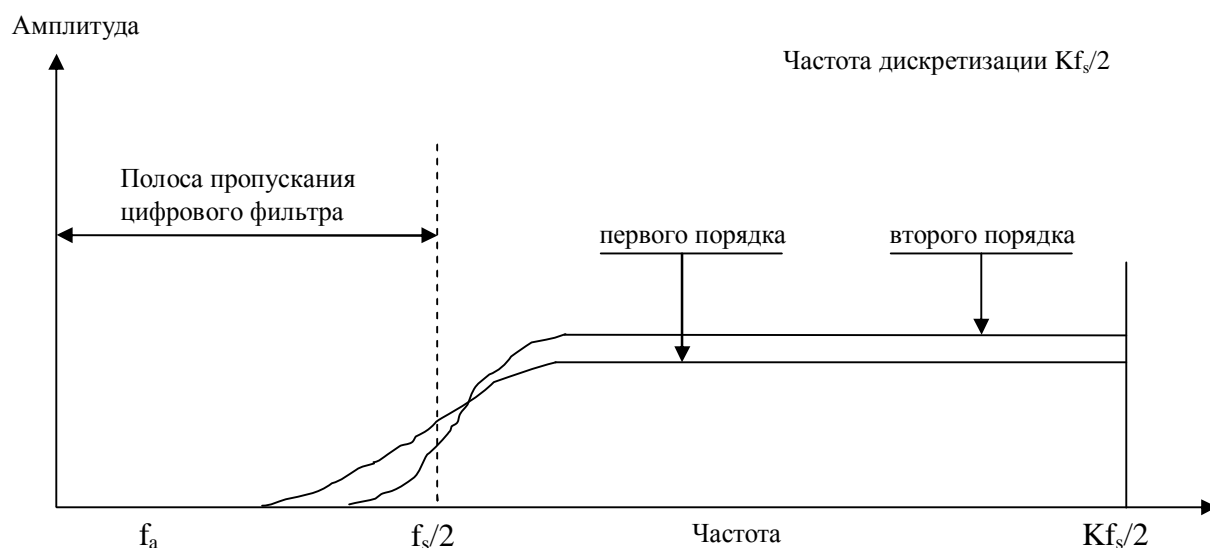
При $f \rightarrow 0$, $y \rightarrow x$, т.е. выходной сигнал не имеет компоненты шума, ПРИ $f \rightarrow \infty$, $y \rightarrow Q$ – выходной сигнал содержит только шум квантования. По сути аналоговый фильтр действует как низкочастотный на входной сигнал и как высокочастотный на шумовую компоненту. Поэтому аналоговый фильтр модулятора может быть представлен как шумоформирующий фильтр с амплитудно-частотной характеристикой, представленной на рисунке.



Как в аналоговой фильтрации, высший порядок сигма-дельта модулятора обеспечивает лучшее качество.

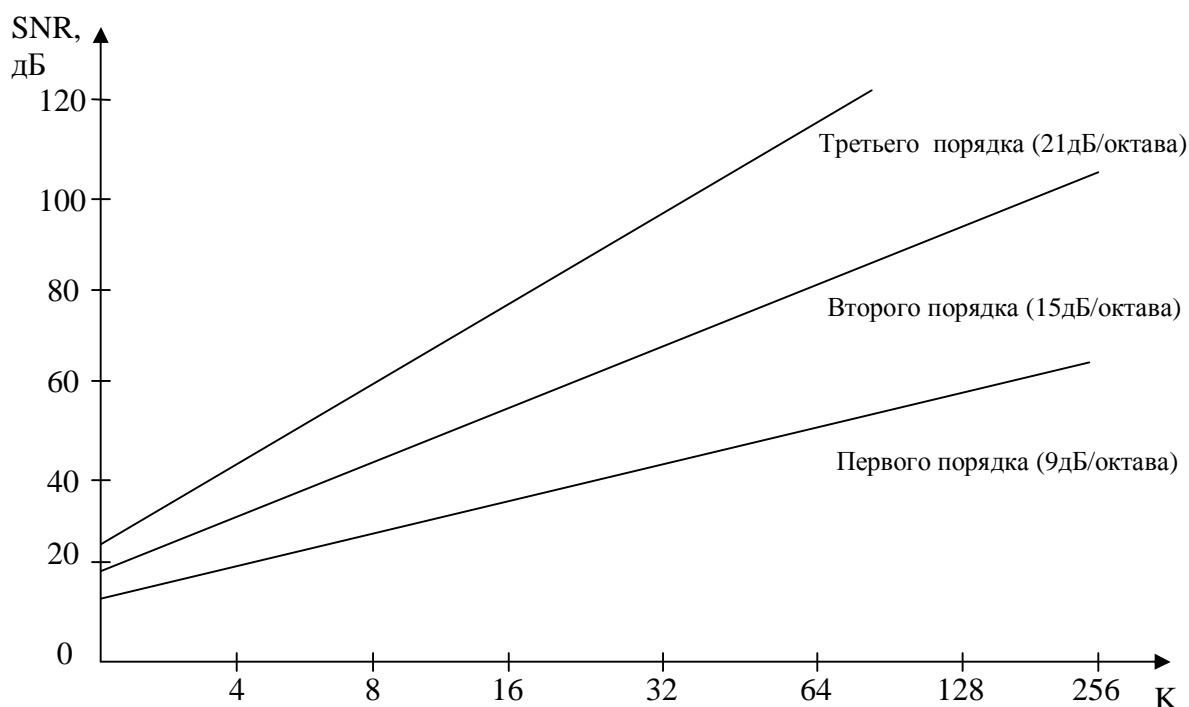


Структурная схема сигма-дельта АЦП второго порядка



Функции распределения шума в сигма-дельта АЦП первого и второго порядка

На следующем рисунке показана зависимость отношения сигнал/шум (SNR) как функция коэффициента перевыборки K для первого, второго и третьего порядка ООС в сигма-дельта АЦП.

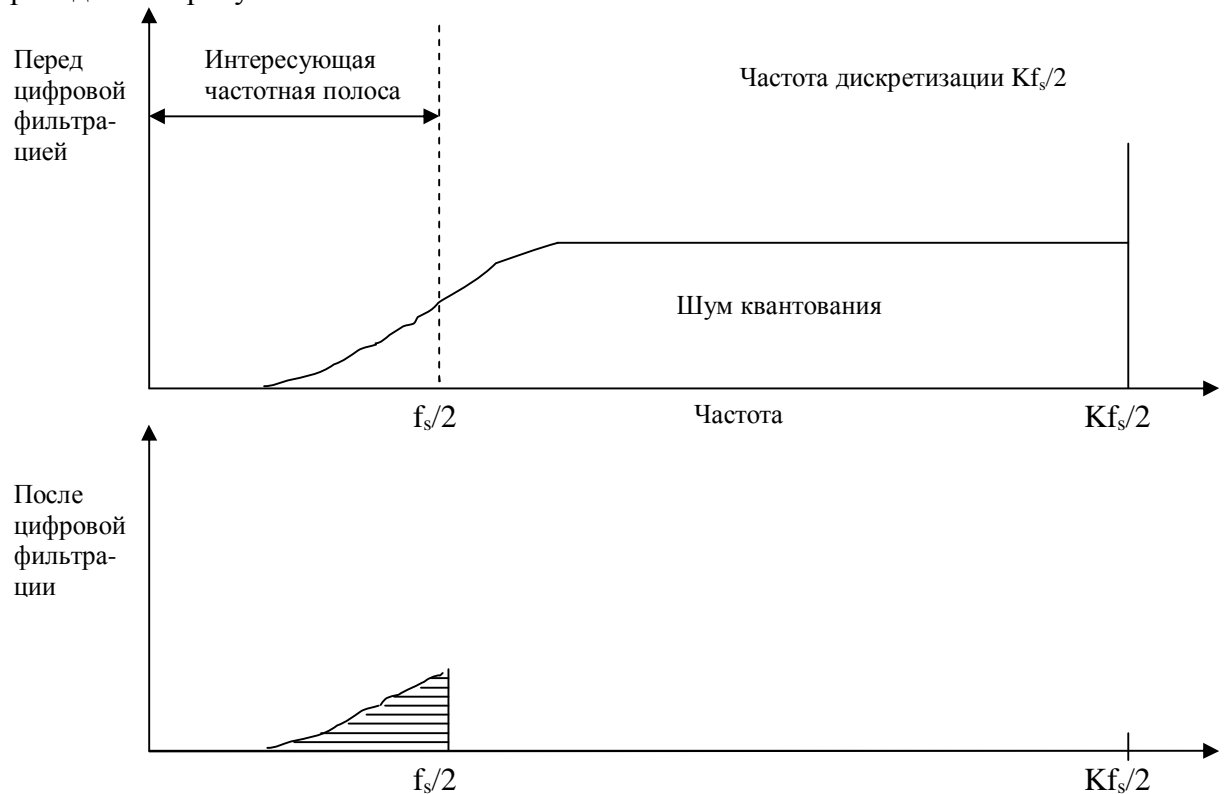


Приведенные кривые могут использоваться для определения достижимого разрешения АЦП. Например, при $K=64$ идеальный АЦП второго порядка обеспечивает отношение сигнал/шум приблизительно 80 дБ или 13 разрядов. Цифровой фильтр может дать и больше бит в результате, но дополнительные биты будут похоронены в шуме и не дадут полезной информации. Простые линейные модели могут использоваться с осторожностью (свыше второго порядка не покрываются линейной моделью), а техническое исполнение АЦП должно быть прецизионным.

Цифровая фильтрация и прореживание

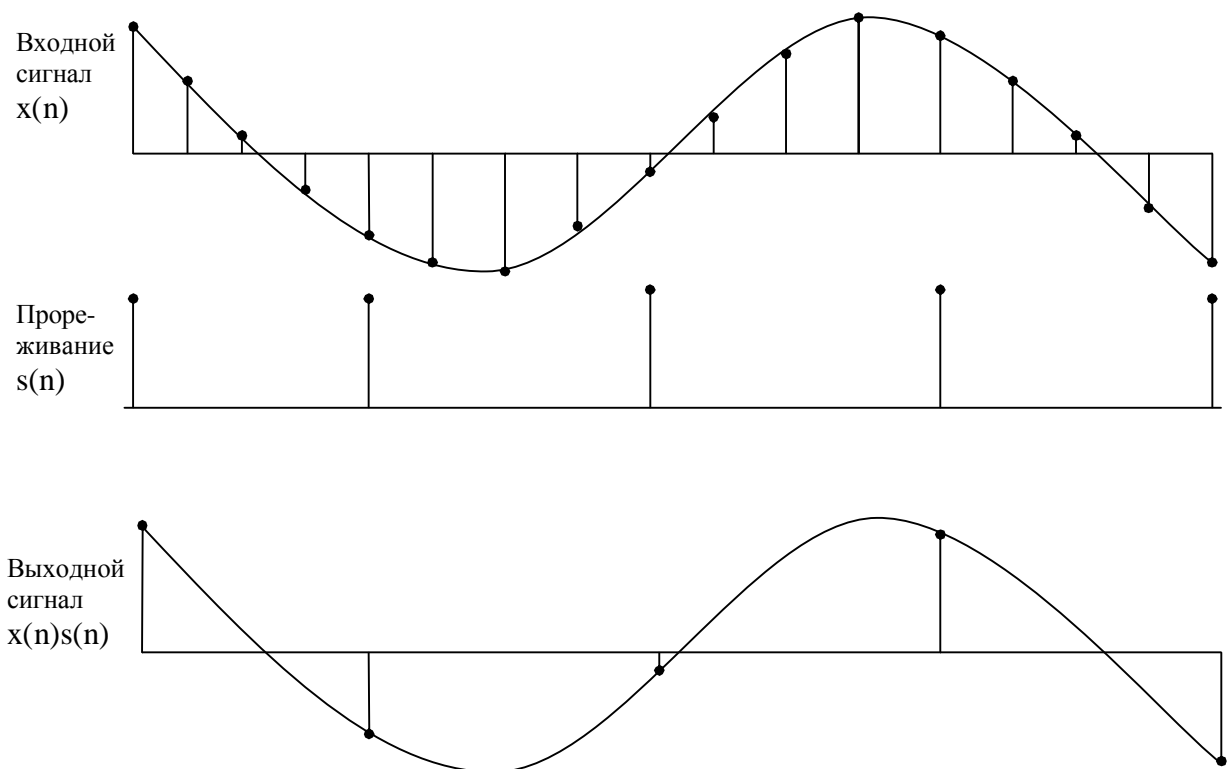
После того, как шум квантования сформирован и перенесен модулятором за пределы интересующей частотной области, в сигма-дельта АЦП применяется техника цифровой фильтра-

ции для устранения основной составляющей шума квантования. Эта процедура поясняется нижеприведенным рисунком.



Кроме устранения высокочастотной составляющей шума квантования цифровой фильтр должен действовать как фильтр, устраняющий эффект наложения (antialiasing filter).

Для окончательного сокращения частоты поступления отфильтрованных данных используется процесс прореживания (decimation). Прореживание квантованного во времени сигнала поясняется рисунком ниже, где частота выборки входного сигнала $x(n)$ сокращается в 4 раза. Прореживание может рассматриваться также как метод компрессии информации о сигнале.



Прореживание квантованного во времени сигнала.

В сигма-дельта АЦП часто объединяют функции прореживания и цифровой фильтрации. При корректном подходе это позволяет увеличить эффективность обработки данных.

Применение для фильтрации сигнала в сигма-дельта АЦП импульсных фильтров с конечным откликом проще, чем с бесконечным, и позволяет инкорпорировать процесс прореживания, однако требует использования большого количества коэффициентов. Фильтрация с бесконечным откликом обеспечивает большую эффективность, но не может быть объединена с процессом прореживания. В ряде сигма-дельта АЦП используются одновременно фильтры с конечным откликом с прореживанием и бесконечным откликом.

Рассматривая сигма-дельта АЦП мы полагали, что шум квантования, формируемый модулятором, случайный и не коррелирует с входным сигналом. К сожалению, это совершенно не так, особенно для модуляторов первого порядка. Существующая корреляция приводит к появлению нежелательных спектральных линий (тонов) в интересующей полосе пропускания. Поэтому практически все сигма-дельта АЦП содержат как минимум модуляторы второго порядка. Модуляторы больше второго порядка увеличивают динамический диапазон и разрешение, минимизируют паразитные линии в спектре, но вызывают трудности при их анализе и требуют применения нелинейных методов стабилизации тракта преобразования. Альтернативой этому может быть применение каскадируемых модуляторов с обратной связью первого порядка или использование многоразрядной сигма-дельта архитектуры, в которой вместо одноразрядных АЦП (компаратора) и ЦАП используются многоразрядные.