




Э.В. Семенов

УСТРОЙСТВА ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

**Тема 5. Особенности построения
устройств приема информации,
передаваемой в цифровой форме**

Особенности построения устройств приема информации, передаваемой в цифровой форме

- Влияние линейных искажений на качество передачи цифровых сигналов. Коррекция передаточных характеристик тракта
- Влияние нелинейных искажений на качество передачи цифровых сигналов. Специфика измерения нелинейности передачи цифровых сигналов
- Влияние специфической разновидности помех — джиттера

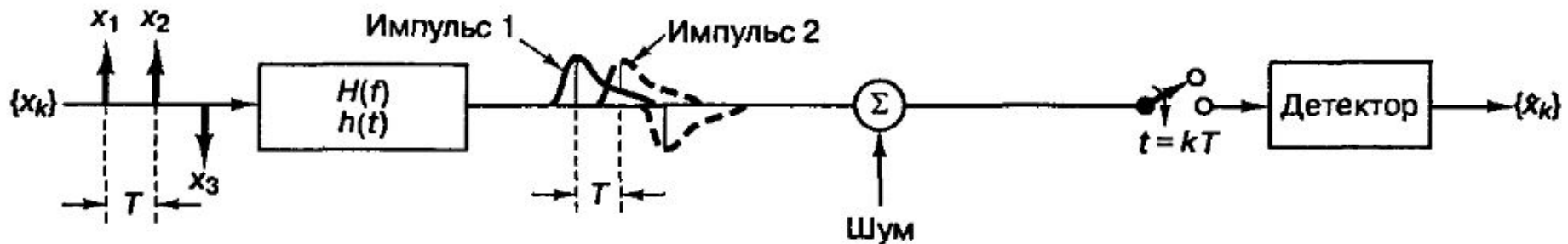


Влияние линейных искажений на качество передачи цифровых сигналов

Ограничение диапазона частот сверху

В любой системе имеет место естественное или преднамеренное ограничение диапазона частот сверху.

Это приводит к межсимвольной интерференции (МИ).

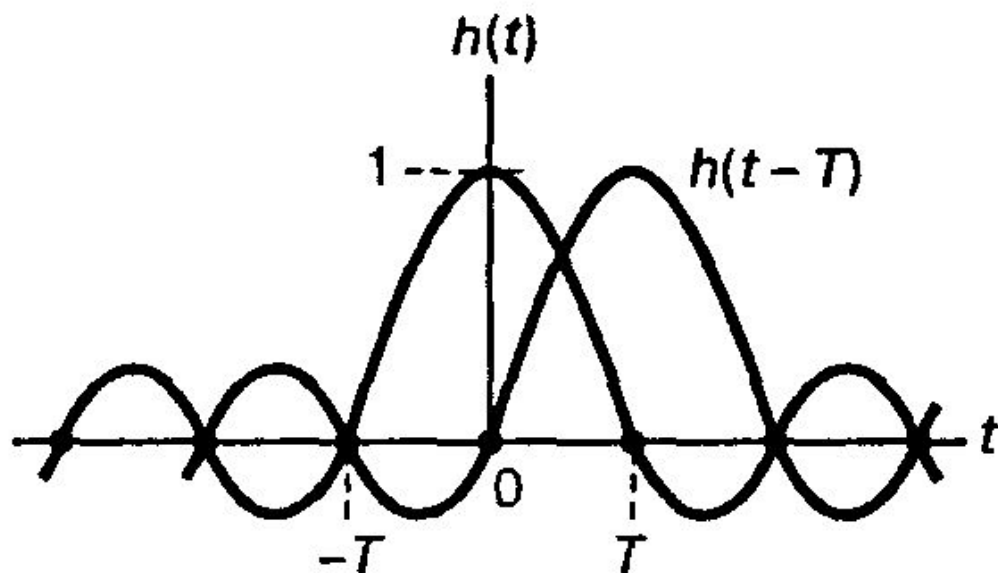


До какого предела можно уменьшать полосу пропускания канала, чтобы МИ не приводила к ошибкам?

По Найквисту наименьшая верхняя граничная частота полосы пропускания, при которой возможно отсутствие межсимвольной интерференции: $f_B = 1/(2T)$.

Синк – функция с длительными осцилляциями

МИ отсутствует, если передаточная функция системы прямоугольная, а импульсная характеристика имеет вид синка.



$$h(t) = \text{sinc}(\pi f_s t)$$

f_s – частота следования импульсов

Но длительные осцилляции у синка приводят к тому, что при наличии неравномерности АЧХ тракта или взятии отсчетов не в соответствующие моменты времени МИ появляется вновь. Поэтому хорошо иметь импульсную характеристику с меньшими осцилляциями (в частотной области этому соответствует сглаженный переход АЧХ в область задерживания).

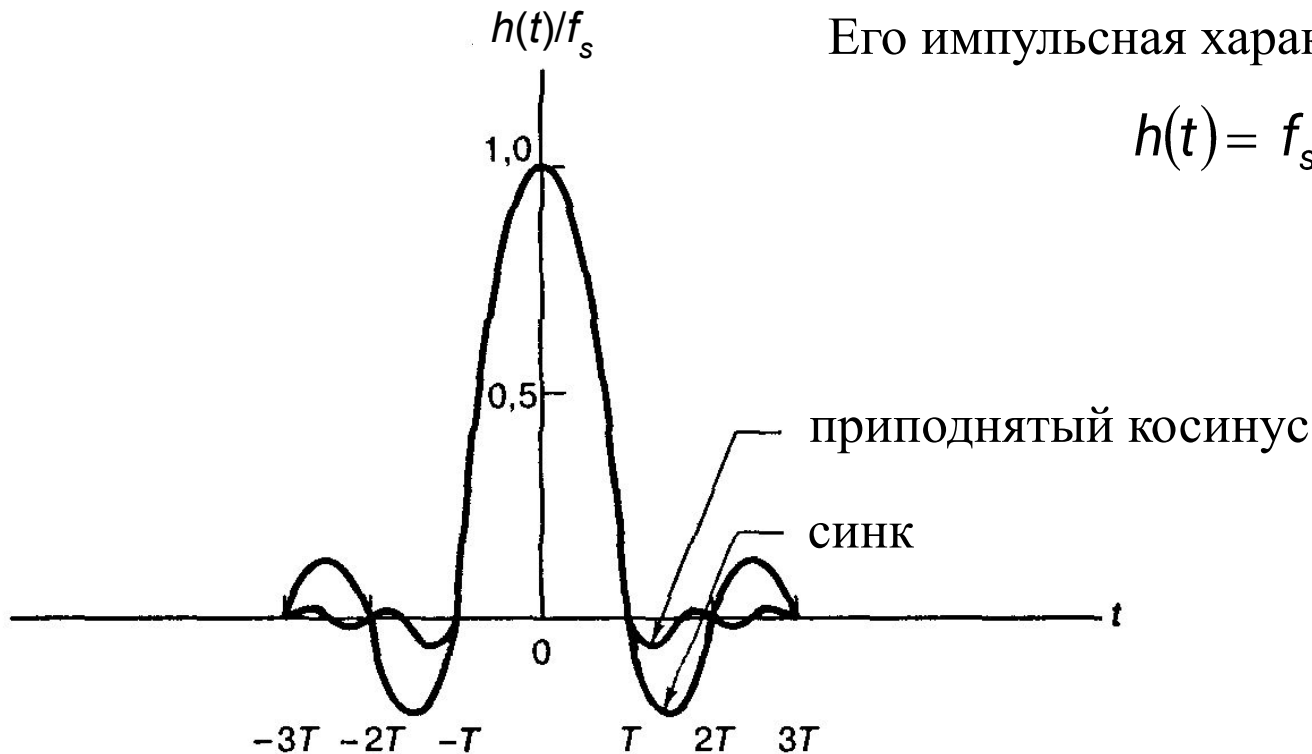
Фильтры Найквиста. Импульсы Найквиста

- МИ отсутствует также при любой другой форме импульсной характеристики тракта приема-передачи, если она имеет нули в моменты времени, отстоящие на тактовый интервал от момента передачи текущего символа.
- Такая импульсная характеристика получается в том случае, если синк умножить на любую другую функцию. Данные импульсы называются импульсами Найквиста. Ясно, что их существует бесконечное количество.
- Устройства, имеющие импульсную характеристику в виде импульса Найквиста, называются фильтрами Найквиста. Их также существует бесконечное количество.

Приподнятый косинус – функция с нулевой МИ и малыми оцилляциями

Если синк домножить на $f_s \frac{\cos(\pi f_s t)}{1 - (2 f_s t)^2}$, то получим разновидность

фильтра Найквиста, которая называется «приподнятый косинус». Здесь f_s – частота следования символов.



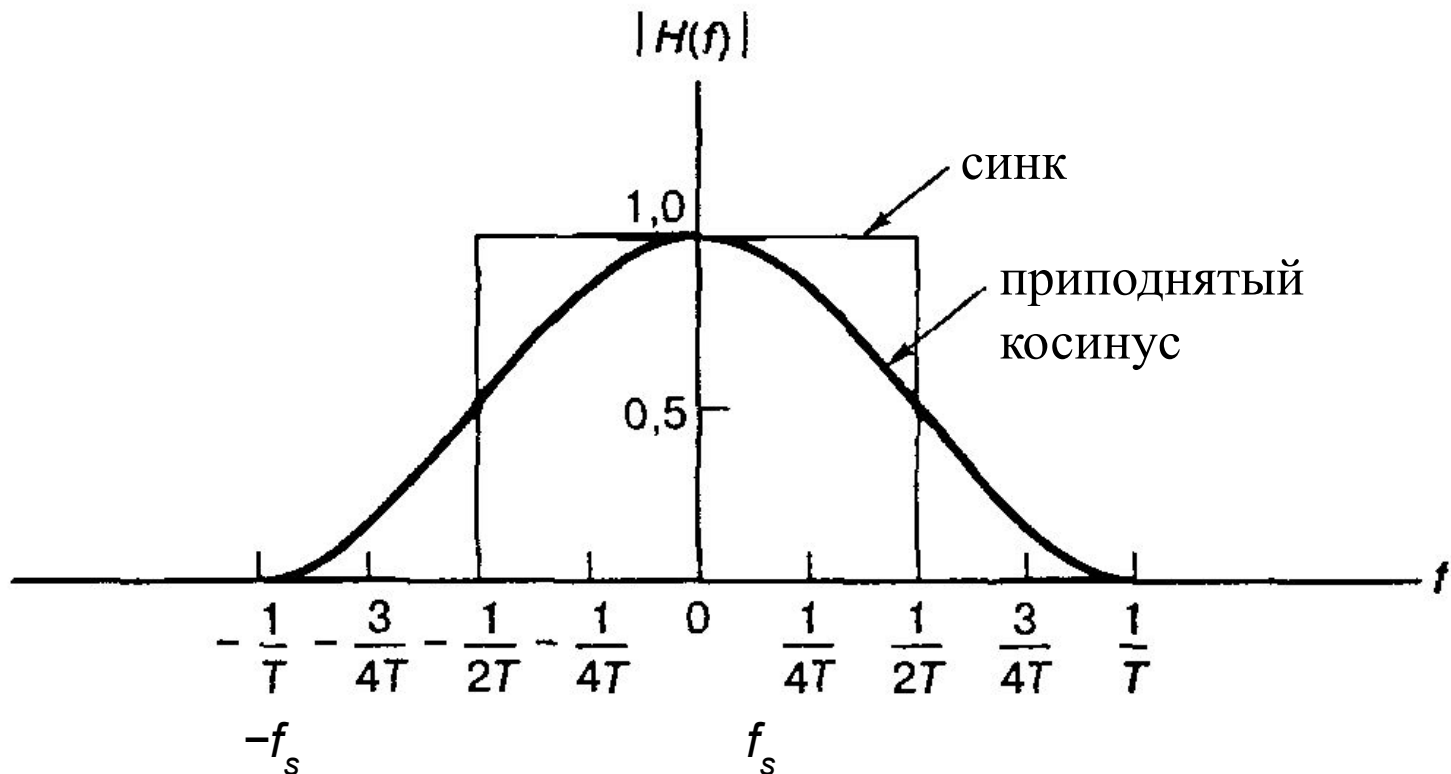
Его импульсная характеристика имеет вид

$$h(t) = f_s \frac{\cos(\pi f_s t)}{1 - (2 f_s t)^2} \operatorname{sinc}(\pi f_s t)$$

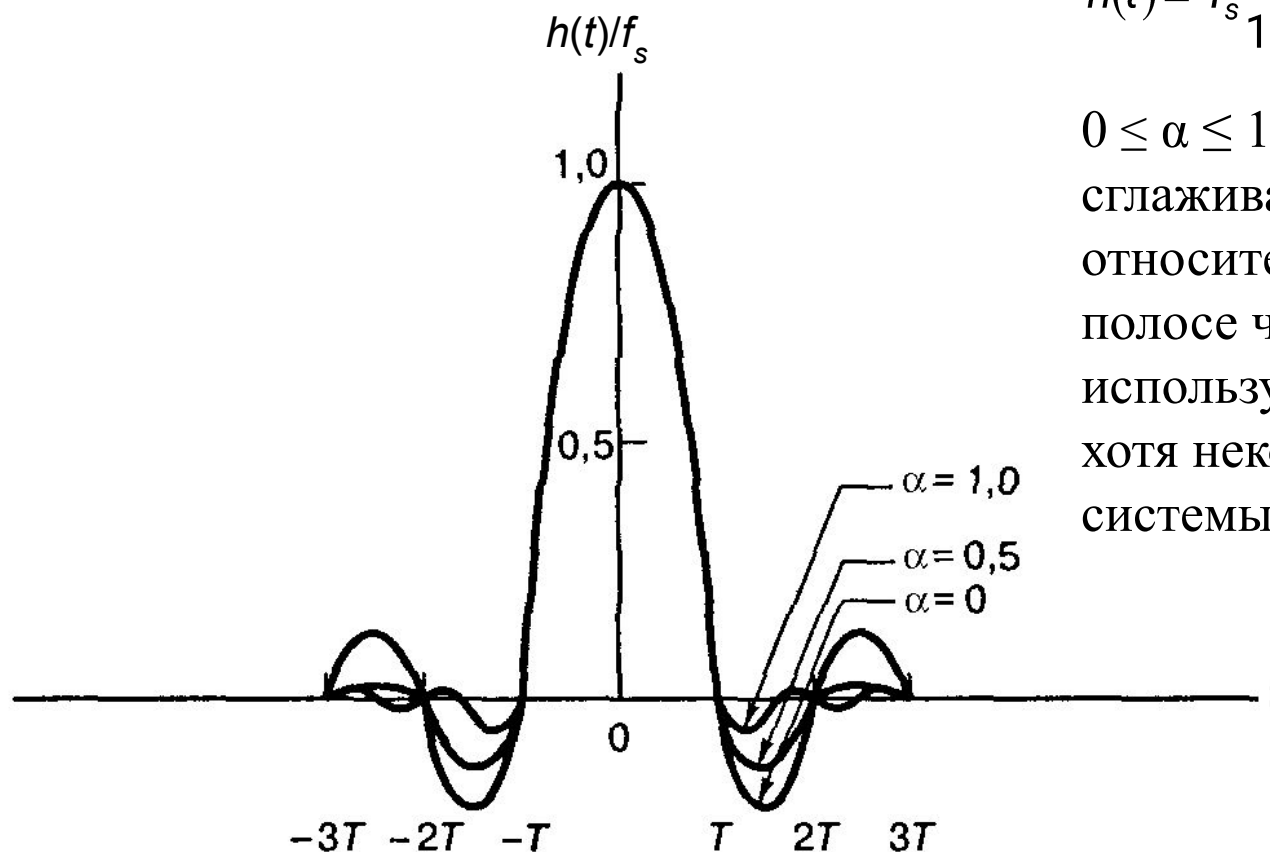
Передаточная функция приподнятого косинуса

$$H(f) = \begin{cases} \frac{1}{2} \cos\left(\pi \frac{f}{f_s}\right) + \frac{1}{2} & \text{для } f < f_s \\ 0 & \text{для } f > f_s \end{cases}$$

Замечание: фильтр фазолинеен.
Следовательно, нереализуем минимально-фазовыми цепями



Фильтры Найквиста с различной «гладкостью» АЧХ

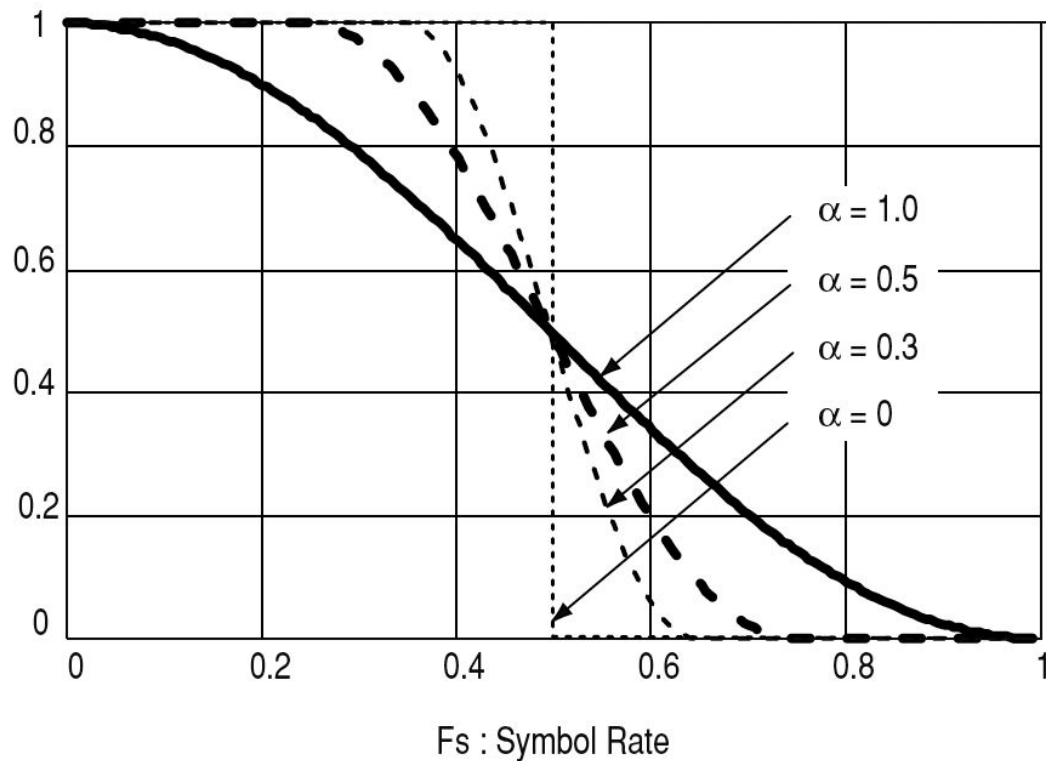


$$h(t) = f_s \frac{\cos(\alpha\pi f_s t)}{1 - (2\alpha f_s t)^2} \text{sinc}(\pi f_s t)$$

$0 \leq \alpha \leq 1$ – коэффициент сглаживания. Физически это относительный запас по полосе частот. Практически используется $0.35 \leq \alpha \leq 0.5$, хотя некоторые телевизионные системы используют $\alpha < 0.11$.

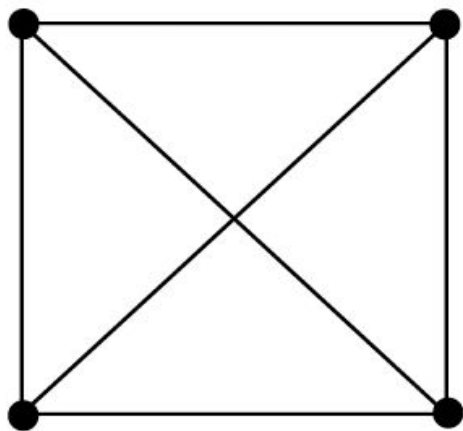
Фильтры Найквиста с различной «гладкостью» АЧХ

$$H(f) = \begin{cases} 1 & \text{для } f < (1-\alpha)f_s/2 \\ \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{f - (1-\alpha)f_s/2}{\alpha f_s}\right) & \text{для } (1-\alpha)f_s/2 < f < (1+\alpha)f_s/2 \\ 0 & \text{для } f > (1+\alpha)f_s/2 \end{cases}$$

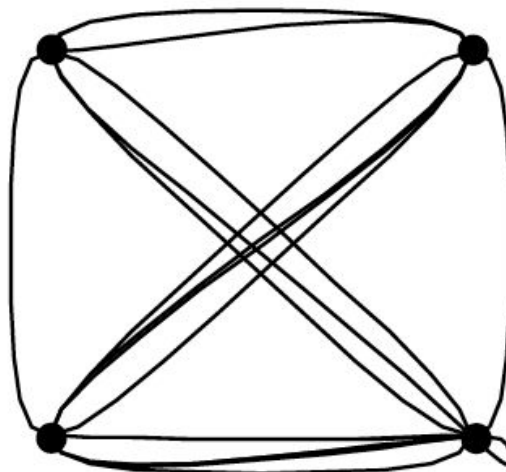


Результаты фильтрации фильтрами Найквиста с различными значениями коэффициента сглаживания

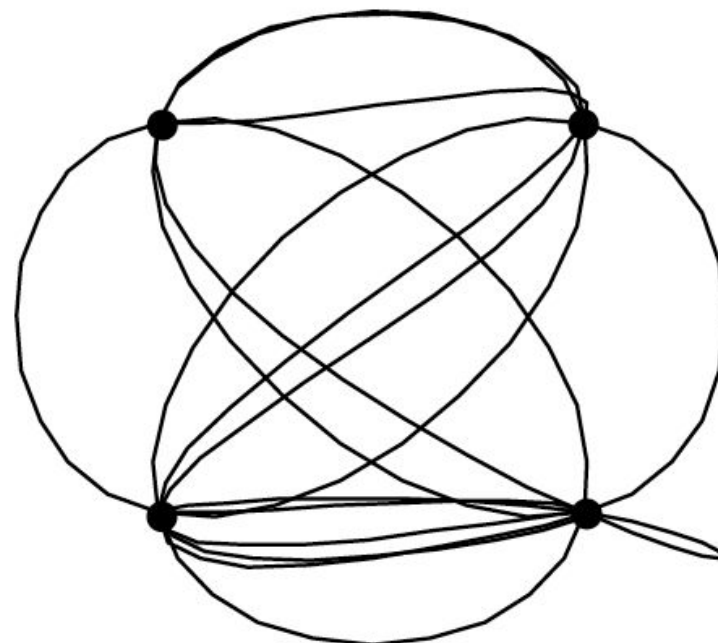
Диаграммы «созвездие» формата QPSK



Без фильтрации



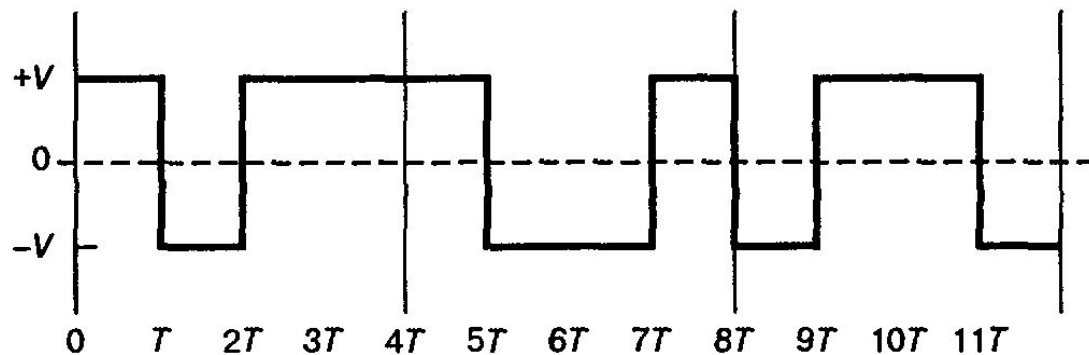
$\alpha = 0.75$



$\alpha = 0.375$

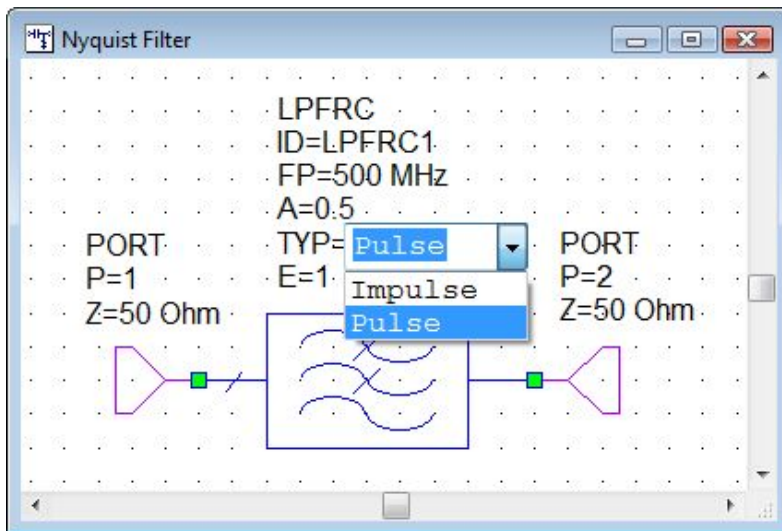
Коррекция при реализации приподнятого косинуса в системах с модуляцией NRZ (Non Return to Zero)

На вход компаратора в приемнике должны поступать сигналы, имеющие форму импульсов Найквиста. Такой сигнал получается, если на вход фильтра Найквиста подать дельта-функцию (сигнал с равномерным спектром). Бывает, что подлежащий передаче цифровой поток в передатчике формируется с кодом канала NRZ (Non Return to Zero, без возвращения к нулю).



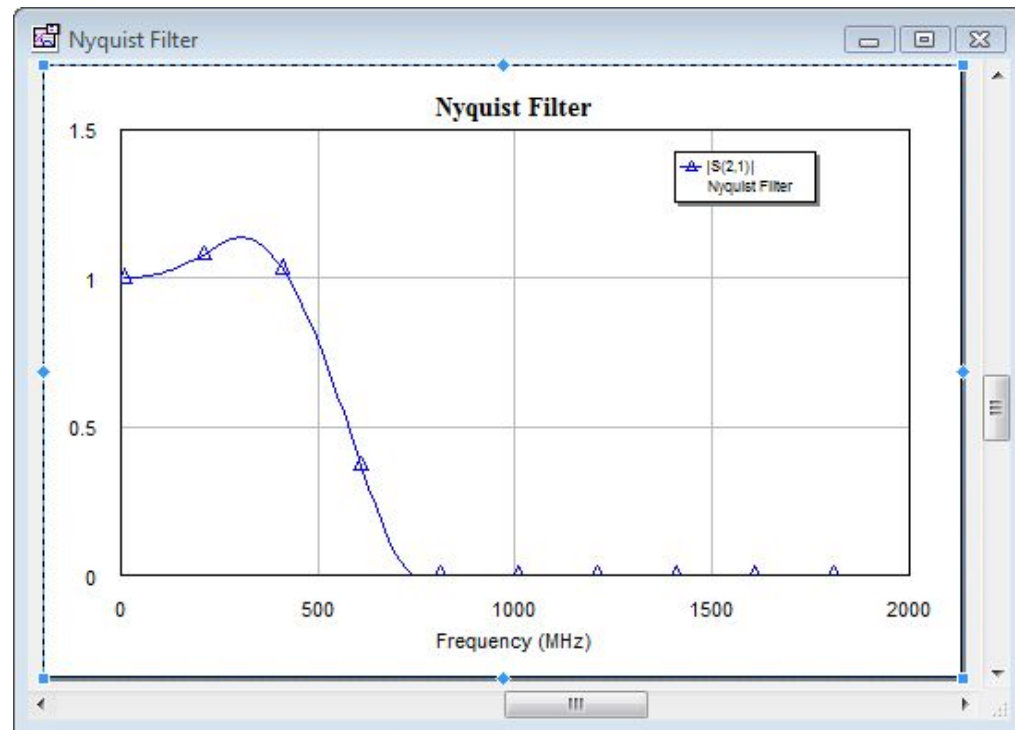
В такой системе символизирующие определенные бит видеоимпульс длительностью T имеет собственный спектр $X(f) = \sin(\pi f T) / (\pi f T)$. Чтобы в этом случае на выходе фильтра получить импульсы Найквиста, нужно домножить передаточную функцию фильтра Найквиста на обратную функцию $(\pi f T) / \sin(\pi f T)$.

Выбор типа входного сигнала для моделируемого фильтра Найквиста в системе Microwave Office



Impulse: входной сигнал – дельта функция

Pulse: входной сигнал – видеоимпульсы длительностью в тактовый интервал (код NRZ)



Распределение передаточной функции фильтра Найквиста между приемником и передатчиком

Передаточной функции фильтра Найквиста должна соответствовать сквозная передаточная функция тракта «передатчик – приемник»

$$H(f) = H_t(f)H_r(f). \quad (1)$$

Фильтрация в передатчике уменьшает излучение за пределами отведенной полосы частот и уменьшает помехи другим приемникам.

Фильтрация в приемнике уменьшает проникновение широкополосного шума на вход приемника и помехи от других передатчиков.

Известно, что наибольшее отношение сигнал/шум на выходе приемника получается в том случае, когда передаточная функция приемника $H_r(f)$ является комплексно сопряженной функцией по отношению к спектру входного сигнала приемника, который определяется передаточной функцией передатчика $H_t(f)$. Другими словами, должно выполняться условие $H_r(f) = H_t^*(f)$. С учетом того, что фильтр Найквиста имеет ФЧХ тождественно равную нулю $H(f) = H(f)$. Подставив последнюю формулу в (1) получим, что $H_r(f) = H_t^2(f)$. Отсюда следует, что передаточная функция передатчика должна быть $H_t(f) = \sqrt{H(f)}$. Такой же должна быть и передаточная функция приемника.

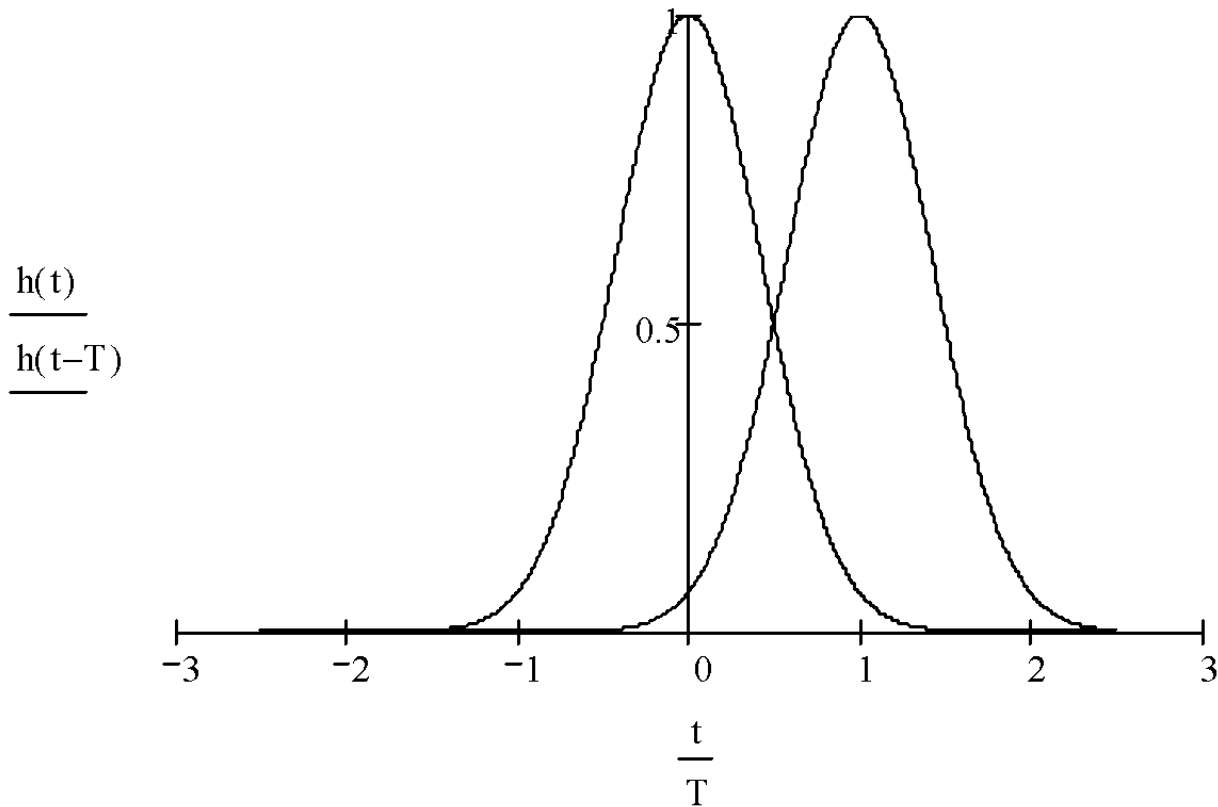
Фильтр Гаусса

В стандарте GSM вместо фильтра Найквиста используется фильтр Гаусса. Это связано с его преимуществами по мощности несущей, занимаемому диапазону и восстановлению тактового сигнала. Импульсная характеристика фильтра Гаусса описывается выражением:

$$h(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right]$$

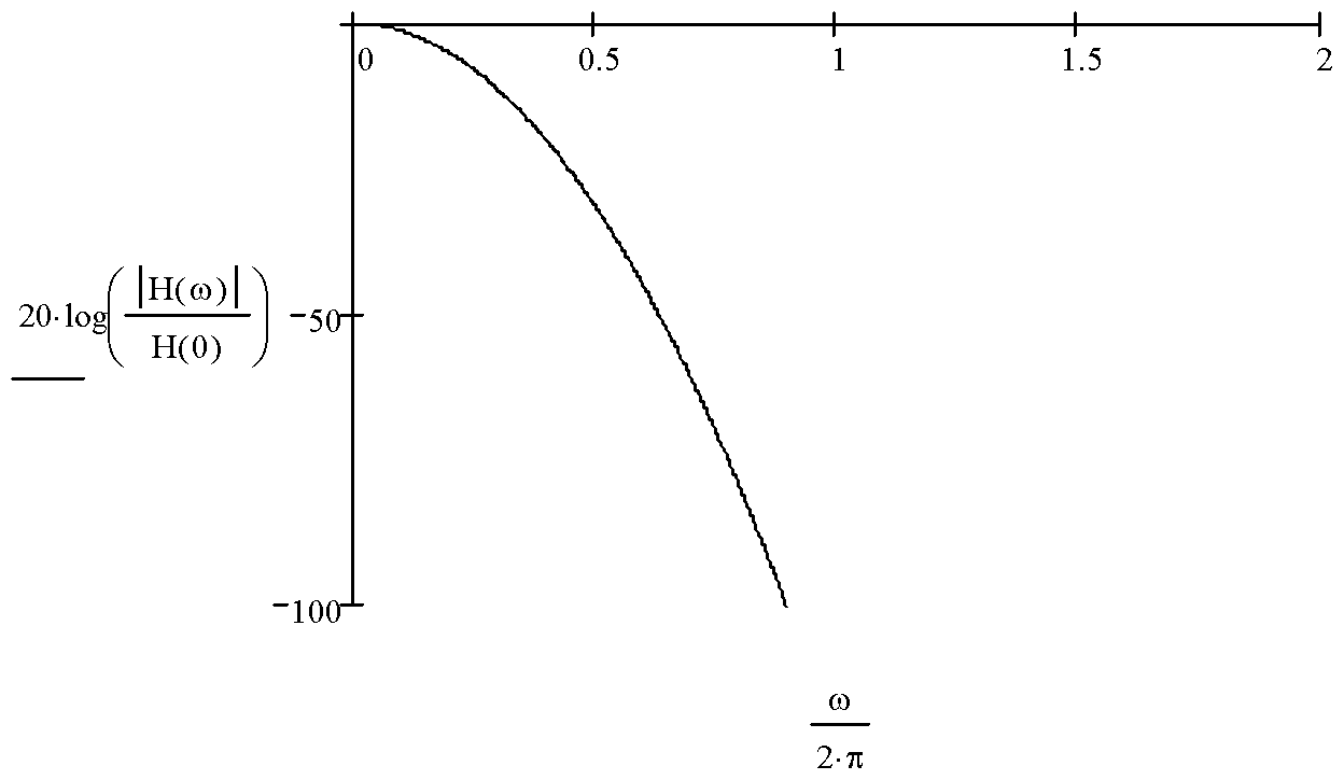
где τ – половина длительности импульса по уровню $1/e$. Недостаток фильтра Гаусса состоит в том, что его импульсная характеристика нигде не обращается в ноль. Т.е. ненулевая межсимвольная интерференция присутствует всегда, ее можно лишь уменьшить до приемлемой величины, уменьшая τ .

Импульсная характеристика фильтра Гаусса



Частотная характеристика фильтра Гаусса

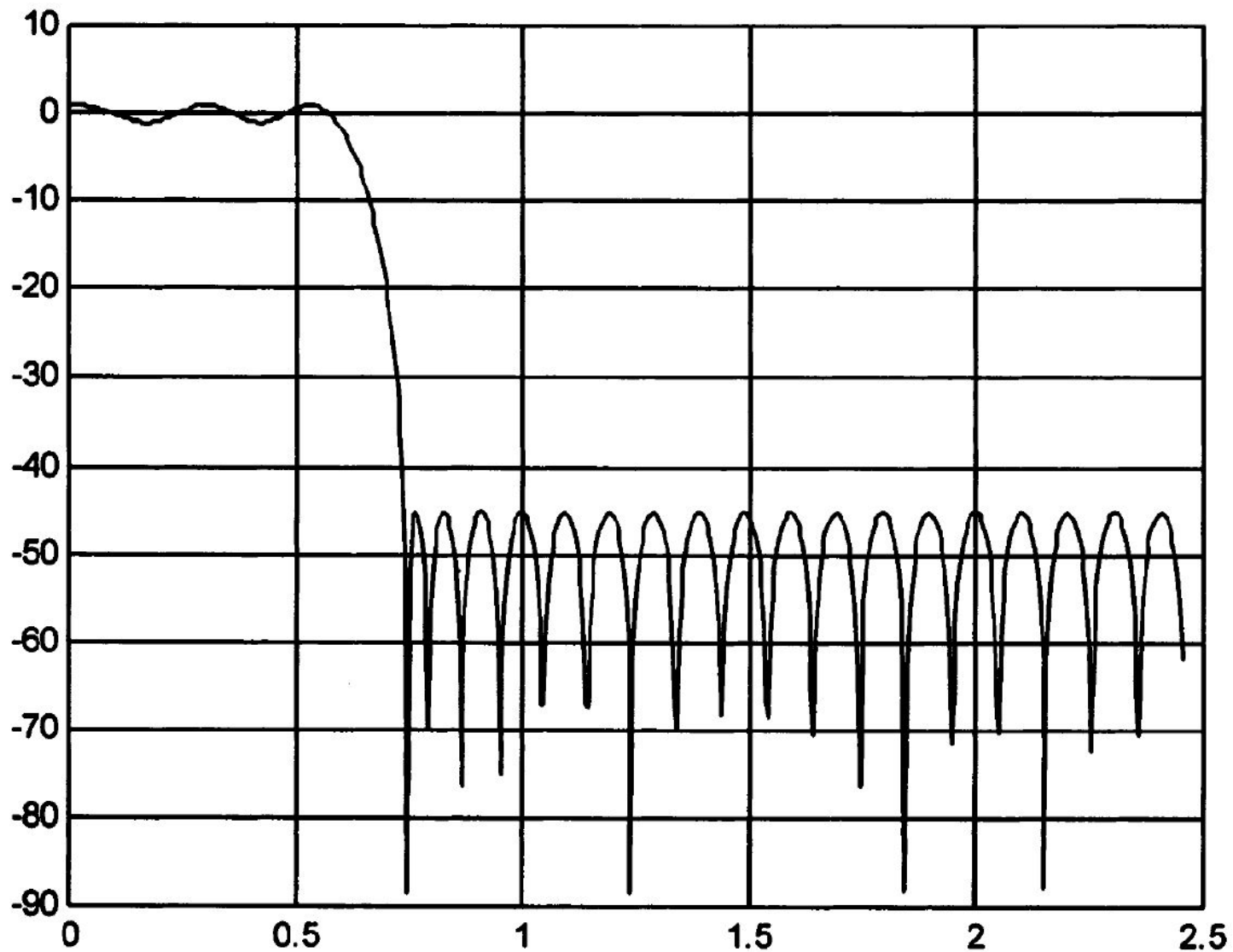
$$H(\omega) = \sqrt{\pi\tau} \exp\left[-\left(\frac{\tau\omega}{2}\right)^2\right]$$



Фильтр Чебышева

- В системе IS-95 CDMA для фильтрации низкочастотного цифрового сигнала используется цифровой фильтр Чебышева с конечной импульсной характеристикой (КИХ) (Finite Impulse Response – FIR).
- КИХ – означает, что импульсная характеристика длится конечное число отсчетов. «Чебышева» – означает, что колебания АЧХ в полосе пропускания и задерживания имеет чередующиеся максимумы и минимумы одинаковой величины.
- Фильтр имеет близкую к прямоугольной АЧХ с коэффициентом сглаживания всего 0.113. Это необходимо для уменьшения проникания сигнала в соседний канал, так как в этой системе расстояние между каналами 1.25 МГц, а частота следования символов 1.2288 МГц.
- Этот фильтр не обеспечивает нулевой межсимвольной интерференции. Однако межсимвольная интерференция в CDMA не так критична как в других форматах. Это связано с тем что для принятия решения о значении символа используется усреднение 64 фрагментов сигнала. Выделяемый символ при этом имеет одно и то же значение в каждой реализации, а интерферирующие с ним соседние – различные. Поэтому межсимвольная интерференция при усреднении минимизируется.

АЧХ фильтра Чебышева



Выбор типа фильтра в спектроанализаторе Agilent PSA E4440A

Agilent 09:52:34 May 26, 2005 Digital Modulation

Ch Freq 1.00000 GHz IF: Wide Completed
Modulation Analysis QPSK Averages: 10

Modulation Format QPSK

Modulation Format	QPSK	Average	On
Meas Filter	Root Nyquist	Avg Number	10
Ref Filter	Nyquist	Average Mode	Repeat
Alpha/BT	0.22	Trace Avg Type	RMS
Symbol Rate	3.840000 MHz	FFT Window Type	Flat Top
Meas Interval	256 symbols	Trig Source	Free Run
IF Band Width	15.36 MHz	Carrier Lock	Normal
IF Band Width Mode	Auto	Sync	None
EQ Filter	Off	Burst Search Th.	-20.00 dB
EQ Filter Length	5	Search Length	10.000000 ms
EQ Convergence	1.000000	Sync Word Length	10 symbols
EQ Hold	Off	Sync Offset	0 symbols
Sync Ptrn	0000		

Коррекция передаточной функции тракта приема-передачи

- Теоретически передаточная функция (ПФ) тракта приема-передачи должна соответствовать ПФ фильтра Найквиста.
- Реальная ПФ тракта всегда имеет большие или меньшие отличия от ПФ Найквиста. Они классифицируются на:
 - систематические (не изменяющиеся при эксплуатации системы);
 - случайные (изменяющиеся с течением времени).
- Систематические искажения могут быть связаны, в частности, с особенностями проекта в целом (в этом случае они будут характерными для всей серии). Например при использовании фильтров Гаусса или Чебышева ПФ системы принципиально отличается от ПФ Найквиста (что приводит к ненулевой межсимвольной интерференции). Систематические искажения могут отражать также особенности конкретного экземпляра приемного или передающего устройства.
- Случайные искажения связаны, в основном, с изменением состояния среды распространения сигнала и интерференционными эффектами в ней.
- Если существует систематическое или случайное отклонение ПФ тракта от ПФ фильтра Найквиста, то возникает межсимвольная интерференция.

Коррекция передаточной функции тракта приема-передачи

- Передаточная функция характеризует линейные свойства системы. Замечательным свойством линейных искажений (в отличие от нелинейных) является то, что их можно корректировать. Особенно эффективно это получается в цифровых системах по двум причинам:
 - «безболезненно» могут быть выделены интервалы времени для тестирования ПФ тракта с целью настройки корректора;
 - не обязательно получать строго определенную при проектировании импульсную характеристику Найквиста, достаточно лишь, чтобы она имела нули в позициях соседних символов.
- Корректоры, способные к автоматической подстройке под изменяющуюся передаточную функцию тракта называют адаптивными.

Классификация способов коррекции

- Оценка параметров цифровой последовательности с максимальным правдоподобием (maximum-likelihood sequence estimation – MLSE). При использовании этого способа компенсация искажений передаточной функции тракта непосредственно не производится, и искаженные межсимвольной интерференцией выборки не изменяются. Вместо этого приемник проектируется так, чтобы правильно детектировать искаженные выборки.
- Чаще применяется коррекция с помощью фильтров. В этом случае на вход детектора поступает последовательность выборок с устраненной корректором межсимвольной интерференцией.

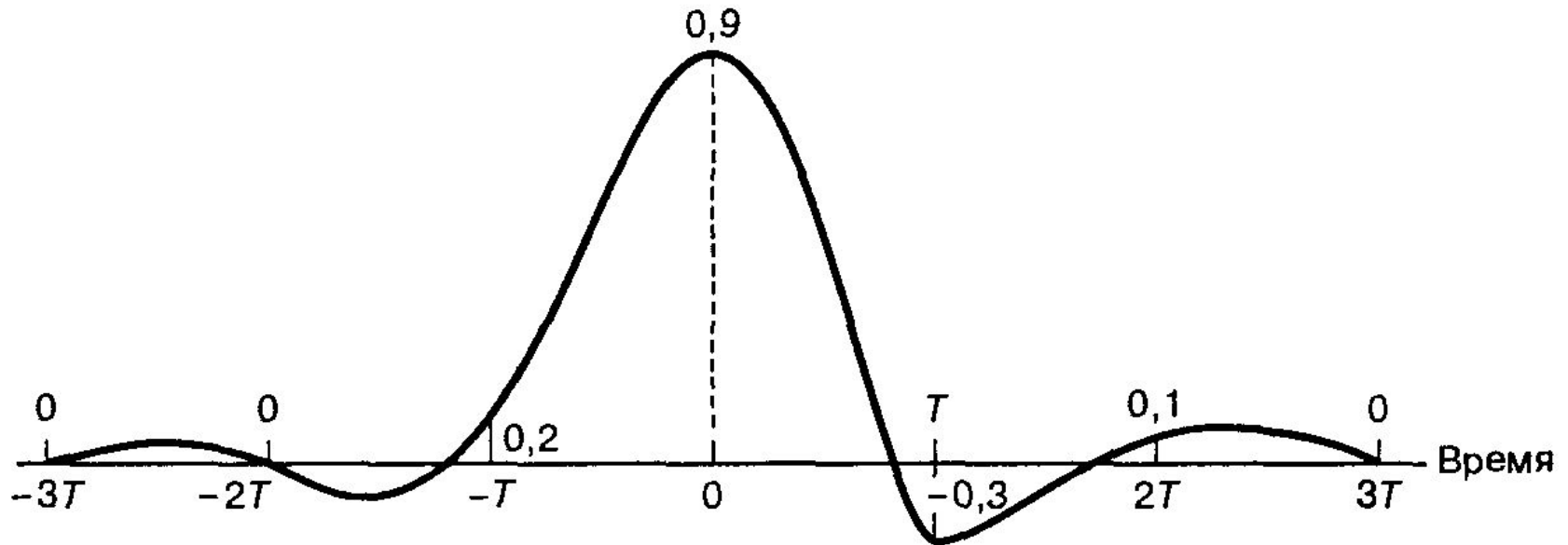
Классификация коррекции при помощи фильтров

- По наличию обратной связи в фильтре.
 - Трансверсальные фильтры.
 - Фильтры с обратной связью по решению.
- По соотношению частоты следования символов и используемой в фильтре частоты дискретизации сигнала.
 - Символьное разделение (указанные частоты равны).
 - Фракционное разделение (используемая фильтром частота больше частоты следования символов).

Трансверсальный корректор

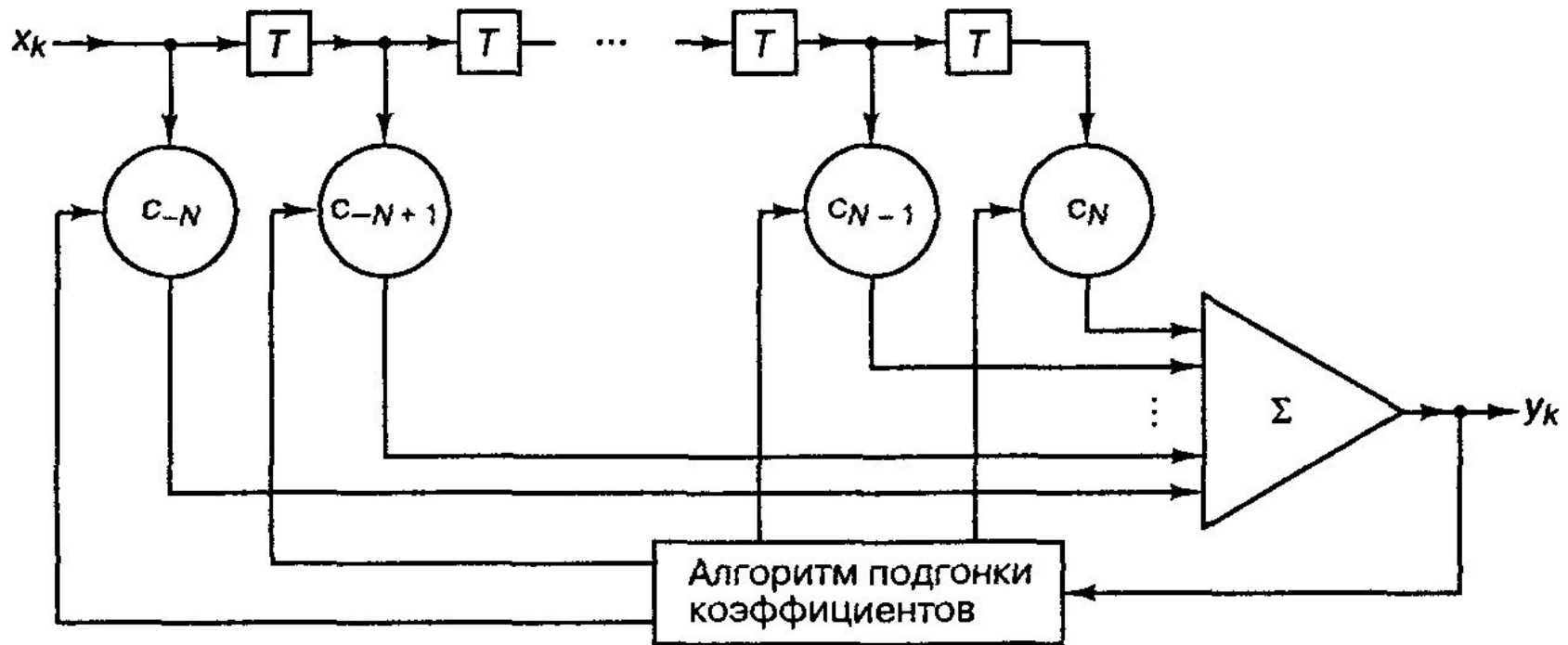
- Передаточная функция корректора должна быть обратна отклонению передаточной функции тракта от ПФ Найквиста. Поэтому это отклонение нужно оценить. Для этого на вход тракта подают тестовый сигнал со сплошным спектром. В простейшем случае это может быть короткий импульс. На практике используется псевдошумовой сигнал имеющий большую среднюю мощность и, следовательно, лучшее отношение сигнал шум.

Трансверсальный корректор. Пример искаженного сигнала



- Это искажение можно рассматривать как дополнительные импульсы определенной амплитуды, появляющиеся (с положительным или отрицательным знаком) в моменты взятия выборок.
- Для подавления межсимвольной интерференции корректор должен вырабатывать набор компенсирующих импульсов с теми же амплитудами, но противоположными знаками.

Трансверсальный корректор. Схема



- Состав: линия задержки с отводами и сумматор со взвешиванием.
- Принцип работы: выходной сигнал формируется как взвешенная сумма текущего и предыдущих значений принятого сигнала.
- Наибольшее значение имеет коэффициент при центральном отводе – он обозначает собственно полезный импульс. Остальные коэффициенты (до него и после) – формируют корректирующие импульсы.
- Длина импульсной характеристики конечна, но и межсимвольная интерференция уменьшается с удалением интерферирующего импульса.

Алгоритм отыскания коэффициентов фильтра

- Пусть нужно скомпенсировать N импульсов до и N после полезного. Тогда в фильтре будет $2N + 1$ отводов линии задержки. Выходной сигнал фильтра формируется как свертка входного сигнала с весовыми коэффициентами:

$$y_k = \sum_{n=-N}^N x_{k-n} c_n; \quad k = -2N, \dots, 2N$$

- Это выражение записывается в матричной форме: $\mathbf{y} = \mathbf{x} \mathbf{c}$, где

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_{-2N} \\ \boxtimes \\ y_0 \\ \boxtimes \\ y_{2N} \end{bmatrix} \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_{-N} \\ \boxtimes \\ c_0 \\ \boxtimes \\ c_N \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_{-N} & 0 & 0 & \boxtimes & 0 & 0 \\ x_{-N+1} & x_{-N} & 0 & \boxtimes & \boxtimes & \boxtimes \\ \boxtimes & & & \boxtimes & & \boxtimes \\ x_N & x_{N-1} & x_{N-2} & \boxtimes & x_{-N+1} & x_{-N} \\ \boxtimes & & & \boxtimes & & \boxtimes \\ 0 & 0 & 0 & \boxtimes & x_N & x_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & \boxtimes & 0 & x_N \end{bmatrix}$$

Алгоритм отыскания коэффициентов фильтра

- x известна по результатам измерений, y исходя из требования нулевой интерференции:

$$y = \begin{bmatrix} 0 \\ \boxtimes \\ 1 \\ \boxtimes \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Если бы x была квадратной, то достаточно было бы всего лишь обратить ее, чтобы найти коэффициенты фильтра: $c = x^{-1} y$. Однако x квадратной не является (система является переопределенной).
- В принципе решать такие уравнения можно детерминистским способом (методом обращения в нуль незначущих коэффициентов) или статистическим (методом решения с минимальной среднеквадратической ошибкой).

Метод обращения в нуль незначущих коэффициентов

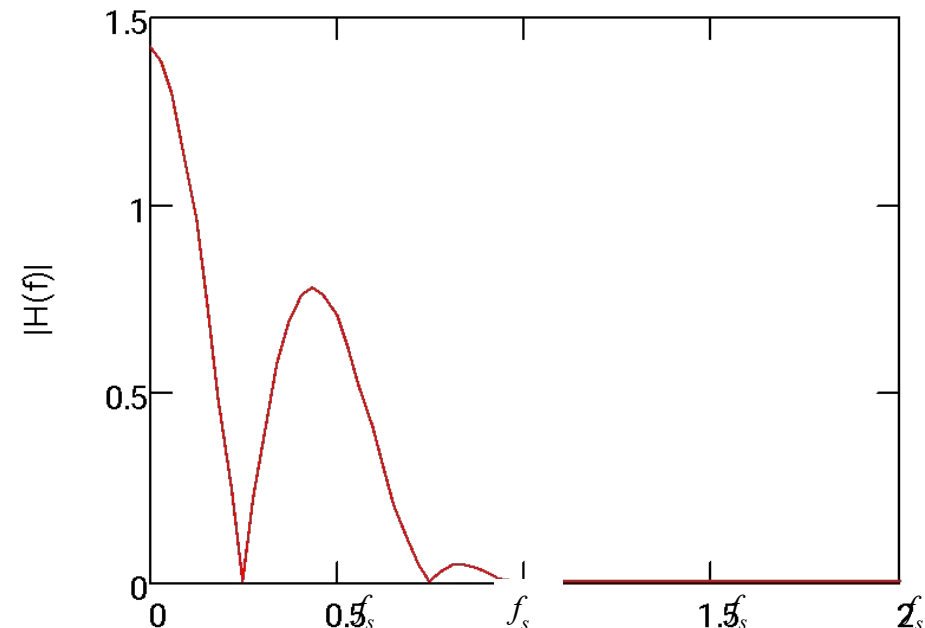
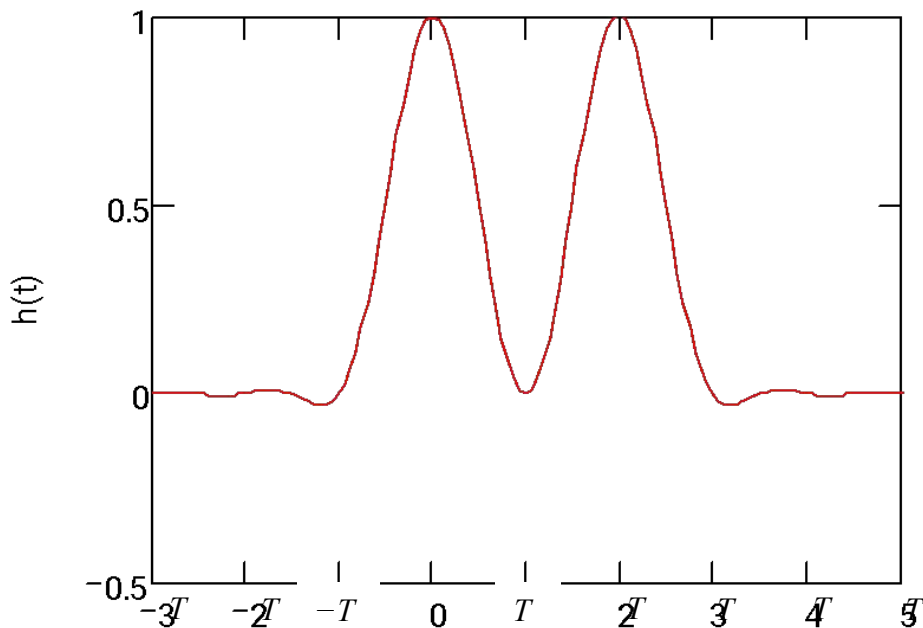
- В переопределенной системе число уравнений больше чем число искоемых неизвестных. Полученное решение может удовлетворять одним уравнениям, но не удовлетворять другим.
- Метод обращения в нуль незначущих коэффициентов исходит из того, что следует отбросить часть уравнений. Отбрасывать, конечно, следует те, коэффициенты в которых наиболее подвержены шумам, т. е. минимальны по величине. Такие уравнения находятся в крайних верхних и крайних нижних строках матрицы x . Чтобы сделать x квадратной размером $2N + 1$, отбрасывают N верхних строк и N нижних строк в ней. После этого решают систему уравнений, обращая матрицу.

Метод решения с минимальной средне-квадратической ошибкой (mean-square error – MSE)

- Одной из причин того, что в переопределенной системе не удовлетворяются все уравнения одновременно, являются шумы. При наличии шумов не следует пытаться точно удовлетворить зашумленным коэффициентам отдельных уравнений, лучше удовлетворить приблизительно, но всем имеющимся в распоряжении. Это позволяет получить более устойчивое к шумам решение. Другими словами, решая уравнение $y = x c$, нужно минимизировать невязку $y - x c$. Если минимизировать вектор невязки в среднеквадратическом смысле, то приходим к методу MSE.
- Можно показать, что такое решение будет получено в случае, если обе части уравнения $y = x c$ умножить на x^T : $x^T y = x^T x c$. Матрица $x^T x$ уже является квадратной и уравнение можно решать обратив ее: $(x^T x)^{-1} x^T y = c$.

Корректор с обратной связью по решению (decision feedback equalizer – DFE)

- Трансверсальный фильтр – линейное устройство. Линейное устройство может усилить спектральные составляющие в окрестности провалов в АЧХ, но оно не способно восстановить полностью подавленные составляющие спектра в окрестности нулей ПФ системы (если такие нули есть). Пример такой ситуации:



Корректор с обратной связью по решению

- Корректор с обратной связью по решению – это нелинейное устройство. Он использует предыдущее решение детектора для устранения интерференции импульсов, детектируемых в настоящий момент.

Корректор с обратной связью по решению. Схема

