УДК 551.581.1
А.С. Лимонов, *к.т.н.,* **Д.И. Вельмискин**, *к.т.н.*, **Е.А. Дяченко,** *инж.*
Одесский государственный экологический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СОГЛАСОВАННЫХ ФИЛЬТРОВ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В статье исследуется возможность цифровой реализации согласованных фильтров.
Ключевые слова: *согласованный фильтр, оптимальный, реакция, характеристики, обнаружитель сигналов, амплитудный корректор.*

Введение. Цифровая реализация согласованных фильтров в известной литературе рассмотрена недостаточно, в частности их амплитудная коррекция.

Материалы и метод исследования: исследуется цифровая реализация согласованного фильтра.

Цель статьи: исследовать возможность получения цифровых характеристик согласованного фильтра с амплитудной коррекцией.

Изложение основного материала. ***Цифровые согласованные фильтры*** [1,2,3]**.** Основным назначением любого приемника является выделение (обнаружение) полезного сигнала $x(nT)$ или его параметров из действующей на входе приемника аддитивной смеси $\tilde{x}(nT)$ сигнала и помехи (шума) $\xi(nT)$

$$x(nT) = \tilde{x}(nT) + \xi(nT) \tag{1}$$

В этой связи среди прочих задач можно выделить следующие:

1. Обнаружение полезного сигнала. Содержание этой задачи состоит в том, чтобы определить, имеется ли в действующем на входе приемника колебании полезный сигнал или оно образовано только помехой (шумом). Приемник в результате решения этой задачи должен дать ответ типа "да" или "нет".

2. Воспроизведение формы (параметров) передаваемого сигнала. По сути, это идентификация сигнала, форма (или структура) которого приемнику известна. Идентификация означает восстановление переданного сигнала по принятому сигналу. В силу не идеальности канала связи прием полезных сигналов происходит при априорной недостаточности сведений о свойствах помех, форма принимаемого сигнала оказывается искаженной, поэтому ее воспроизведение осуществляется с некоторой ошибкой. Воспроизведение формы (параметров) сигнала оправдано в тех случаях, когда имеет значение вид функциональной зависимости сигнала от времени. В результате решения этой задачи приемник выдает сигнал определенной формы или наиболее вероятные значения параметров сигнала.

3. Установление наличия сигнала известной формы среди одновременно действующих на входе приемника сигналов при условии, что относительно каждого из них известны некоторые априорные сведения. Такие задачи характерны для систем подвижной радиосвязи, передачи широкополосных сигналов и в радиолокации, когда важно лишь установить наличие или отсутствие сигнала определенной формы. В этом случае достаточно получить лишь признак того, сигнал какой формы был передан, и по этому признаку извлечь соответствующий ему сигнал из памяти приемника. Иначе говоря, приемник дает ответ типа "да/нет" по каждому из сигналов, которые могут действовать на входе приемника.

Для решения указанных задач строят оптимальные приемники, в состав которых входят линейные фильтры. Выбор критерия оптимальности определяется решаемой задачей. Из многочисленного списка критериев (среднего риска, идеального наблюдателя, максимального правдоподобия и проч.) наибольшее распространение получил энергетический критерий максимума отношения мощностей сигнала $P(\omega)$ и помехи (шума) $W_n(\omega)$ на выходе линейного фильтра. Это отношение сокращенно называют сигнал/шум (С/Ш) и обозначают

$$\frac{C}{Ш} = \frac{P(\omega)}{W_n(\omega)} \tag{2}$$

Отношение (2) имеет разное содержание, зависящее от решаемой задачи. Поэтому всегда следует определять не только то, что понимается под сигналом, но и какими свойствами обладает шум.

Связь между характеристиками сигнала и согласованного с ним фильтра. Отношение сигнал/шум (2) определяется в известный момент времени $t_0 = n_0 T$ возможного максимума (пика) сигнала $y(nT)$

$$\max|y(nT)| = |y(n_0 T)|$$

как отношение этого максимума к среднеквадратичному (эффективному) $\sqrt{N}$ значению шума

$$\frac{C}{Ш} = \frac{|y(n_0 T)|}{\sqrt{N}}, \tag{3}$$

где T — период дискретизации.

Оптимальный по критерию максимума отношения *С/Ш* (3) линейный фильтр называется согласованным (СФ) с сигналом.

Постановка задачи. Определение СФ и выражение (3) говорят о том, что согласованный с сигналом фильтр позволяет получить в момент $t_0 = n_0 T$ наибольшее отношение мгновенного значения сигнала $|y(n_0 T)|$ на выходе фильтра к среднему квадратичному значению шума (помехи), т. е. согласованный фильтр максимизирует отношение *С/Ш*.

Поставим **задачу** определить связь между характеристиками фильтра и сигнала, с которым фильтр согласован. Решение будем искать при следующих условиях:

- на входе фильтра действует аддитивная смесь сигнала и помехи (1);
- фильтр является линейным с постоянными параметрами;
- сигнал полностью известен и является детерминированной (или квазидетерминированной) функцией времени;
- шум представляет собой стационарный случайный процесс с заданными характеристиками: законом распределения плотности вероятности и энергетическим спектром $W_n(\omega)$;
- здесь рассматривается наиболее простой случай, когда на входе фильтра действует белый шум, имеющий равномерный энергетический спектр $W_n(\omega) = W_0$ и обладающий нулевым средним; получаемые результаты могут быть распространены и на случай небелого шума.

Согласованный фильтр, являясь линейным, полностью описывается импульсной $h_{сф}(nT)$ и частотной $H_{сф}(e^{j\omega T})$ характеристиками, которые связаны между собой преобразованием Фурье:

$$h_{сф}(nT) = \frac{T}{2\pi}\int_{-\pi/T}^{\pi/T} H_{сф}(e^{j\omega T})d\omega. \tag{4}$$

Таким образом, задача сводится к получению импульсной и частотной характеристик согласованного фильтра, для чего необходимо:

- вычислить по формуле свертки реакцию $y(nT)$ на входной сигнал $x(nT)$ и записать результат для $n = n_0$;

- вычислить среднеквадратичное значение шума $\sqrt{N}$ на выходе фильтра и записать отношение (3);

- найти частотную характеристику $H_{сф}(e^{j\omega T})$;

- определить ИХ $h_{сф}(nT)$ подстановкой в (4) ЧХ $H_{сф}(e^{j\omega T})$.

Реакция согласованного фильтра. Реакция $y(nT)$ произвольного линейного фильтра, в том числе и согласованного, на входной сигнал $x(nT)$ в соответствии имеет вид

$$y(nT) = \sum_{m=0}^{\infty} x(mT)h_{сф}\left[(n-m)T\right]. \tag{5}$$

С другой стороны, если известно фурье-изображение $Y(e^{j\omega T})$ реакции $y(nT)$, она может быть получена с помощью обратного преобразования Фурье

$$y(nT) = \frac{T}{2\pi}\int_{-\pi/T}^{\pi/T} Y(e^{j\omega T})e^{j\omega T}d\omega. \tag{6}$$

Для определения $Y(e^{j\omega T})$ воспользуемся преобразованием Фурье свертки (5)

$$Y(e^{j\omega T}) = X(e^{j\omega T})H_{сф}(e^{j\omega T})$$

Следовательно, сигнал на выходе фильтра можно записать как

$$y(nT) = \frac{T}{2\pi}\int_{-\pi/T}^{\pi/T} X(e^{j\omega T})H_{сф}(e^{j\omega T})e^{j\omega nT}d\omega. \tag{7}$$

Представим спектр входного сигнала $x(nT)$ через его спектр амплитуд $X(e^{j\omega T})$ и спектр фаз $\varphi_x(\omega)$:

$$X(e^{j\omega T}) = \left|X(e^{j\omega T})\right|e^{j\arg X(e^{j\omega T})} = \left|X(e^{j\omega T})\right|e^{j\varphi_x(\omega)}$$

а частотную характеристику фильтра — через АЧХ $A(\omega)$ и ФЧХ $\varphi_{сф}(\omega)$:

$$H_{сф}(e^{j\omega T}) = \left|H_{сф}(e^{j\omega T})\right| e^{j\arg H_{сф}(e^{j\omega T})} = A_{сф}(\omega)e^{j\varphi_{сф}(\omega)}.$$

Тогда (7) примет вид

$$y(nT) = \frac{T}{2\pi}\int_{-\pi/T}^{\pi/T}\left|X(e^{j\omega T})\right| e^{j\varphi_X(\omega)} A_{сф}(\omega)e^{j\varphi_{сф}(\omega)} e^{j\omega nT} d\omega. \quad (8)$$

Предположим, что реакция $y(nT)$ достигает своего максимума в некоторый, пока еще не известный, момент $t_0 = n_0 T$. Для этого момента времени из (8) получаем

$$y(n_0 T) = \frac{T}{2\pi}\int_{-\pi/T}^{\pi/T}\left|X(e^{j\omega T})\right| A_{сф}(\omega)e^{j\left[\varphi_X(\omega)+\varphi_{сф}(\omega)+\omega n_0 T\right]} d\omega. \quad (9)$$

Отношение сигнал/шум на выходе СФ. Энергия шума N на выходе произвольного линейного фильтра согласно равенству Парсеваля имеет вид

$$N = \frac{T}{2\pi}\int_{-\pi/T}^{\pi/T} W_n(\omega)A^2(\omega)d\omega,$$

где: $W_n(\omega)$ - энергетический спектр шума, действующего на входе фильтра; $A(\omega)$ - АЧХ произвольного линейного фильтра, в том числе и согласованного.

Поскольку по условиям задачи предполагается белый шум, имеющий равномерный энергетический спектр $W_n(\omega) = W_0 = const,$ энергия шума определится из выражения

$$N = \frac{T}{2\pi}W_0\int_{-\pi/T}^{\pi/T} A^2(\omega)d\omega,$$

а среднеквадратичное (эффективное) значение шума равно корню квадратному из N

$$\sqrt{N} = \left\{\frac{T}{2\pi}W_0\int_{-\pi/T}^{\pi/T} A^2(\omega)d\omega\right\}^{1/2}.$$

Зная $\sqrt{N}$ и $\left|y(n_0 T)\right|$, получаем отношение *С/Ш* на выходе согласованного фильтра:

$$\frac{\left|y(n_0 T)\right|}{\sqrt{N}} = \frac{\left|\frac{T}{2\pi}\int_{-\pi/T}^{\pi/T}\left|X(e^{j\omega T})\right| A_{сф}(\omega)e^{j\left[\varphi_X(\omega)+\varphi_{сф}(\omega)+j\omega n_0 T\right]} d\omega\right|}{\left\{\frac{T}{2\pi}W_0\int_{-\pi/T}^{\pi/T} A_{сф}^2(\omega)d\omega\right\}^{1/2}}. \quad (10)$$

Частотные характеристики согласованного фильтра. Прежде всего, определим условия, при которых выражение (10) достигает максимума. С этой целью воспользуемся неравенством Шварца и применим его к интегралу в (7):

$$\left|\int_{-\pi/T}^{\pi/T}\left|X(e^{j\omega T})\right|H_{сф}(e^{j\omega T})d\omega\right|^2 \leq \int_{-\pi/T}^{\pi/T}\left|X(e^{j\omega T})\right|^2 d\omega \int_{-\pi/T}^{\pi/T}\left|H_{сф}(e^{j\omega T})\right|^2 d\omega.$$

которое, в силу равенства

$$\left|H_{сф}(e^{j\omega T})\right| = A_{сф}(\omega),$$

можно записать в тождественной форме

$$\left|\int_{-\pi/T}^{\pi/T}\left|X(e^{j\omega T})\right|H_{сф}(e^{j\omega T})d\omega\right|^2 \leq \int_{-\pi/T}^{\pi/T}\left|X(e^{j\omega T})\right|^2 d\omega \int_{-\pi/T}^{\pi/T} A^2_{сф}(\omega)d\omega.$$

Теперь из отношения (10) получаем неравенство

$$\frac{\left|y(n_0T)\right|}{\sqrt{N}} = \frac{\left|\frac{T}{2\pi}\int_{-\pi/T}^{\pi/T}\left|X(e^{j\omega T})\right|A_{сф}(\omega)e^{j\left[\varphi_X(\omega)+\varphi_{сф}(\omega)+\omega n_0 T\right]}d\omega\right|}{\left\{\frac{T}{2\pi}W_0\int_{-\pi/T}^{\pi/T}A^2_{сф}(\omega)d\omega\right\}^{1/2}} \leq$$

$$\leq \frac{\frac{T}{2\pi}\left\{\int_{-\pi/T}^{\pi/T}\left|X(e^{j\omega T})\right|^2 d\omega\right\}^{1/2}\left\{\int_{-\pi/T}^{\pi/T}A_{сф}(\omega)d\omega\right\}^{1/2}}{\left\{\frac{T}{2\pi}W_0\int_{-\pi/T}^{\pi/T}A^2_{сф}(\omega)d\omega\right\}^{1/2}} \qquad (11)$$

и после сокращения сомножителей, содержащих $A_{сф}(\omega)$, имеем

$$\frac{\left|y(n_0T)\right|}{\sqrt{N}} \leq \sqrt{\frac{T}{2\pi W_0}}\left\{\int_{-\pi/T}^{\pi/T}\left|X(e^{j\omega T})\right|^2 d\omega\right\}^{1/2}. \qquad (12)$$

Из полученных выражений следует, что отношение сигнал/шум на выходе фильтра достигает максимума, когда неравенство обращается в равенство

$$\frac{\left|y(n_0T)\right|}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{T}{2\pi W_0}} \left\{ \int_{-\pi/T}^{\pi/T} \left| X(e^{j\omega T}) \right|^2 d\omega \right\}^{1/2}, \tag{13}$$

причем исследуемое отношение, с одной стороны, не зависит от $A_{сф}(\omega)$, а с другой — полностью определяется модулем $\left|X(e^{j\omega T})\right|$.

Однако согласованный фильтр как линейная система характеризуется своими частотными характеристиками $A_{сф}(\omega)$ и $\varphi_{сф}(\omega)$, которые необходимо найти. Для этого определим условия, при которых (10) достигает максимума:

- первое условие следует из числителей (10) и (11) - сумма аргументов должна равняться нулю

$$\varphi_x(\omega) + \varphi_{сф}(\omega) + \omega n_0 T = 0,$$

а потому ФЧХ согласованного фильтра должна иметь вид

$$\varphi_{сф}(\omega) = -\left[\varphi_x(\omega) + \omega n_0 T\right]; \tag{14}$$

это говорит о том, что ФЧХ согласованного фильтра равна взятой с обратным знаком сумме спектра фаз входного сигнала и линейно зависимого от частоты слагаемого;

- второе условие следует из (13) — АЧХ согласованного фильтра должна быть пропорциональна спектру амплитуд сигнала

$$A_{сф}(\omega) = k\left|X(e^{j\omega T})\right|, \tag{15}$$

где $k = const$ - коэффициент пропорциональности.

Теперь на основании условий (14) и (15) можно записать частотную характеристику согласованного фильтра:

$$H_{сф}(e^{j\omega T}) A_{сф}(\omega) e^{j\varphi сф(\omega)} = k\left|X(e^{j\omega T})\right| e^{-j\varphi_x(\omega)} e^{-j\omega n_0 T}.$$

Но поскольку функция

$$\left|X(e^{j\omega T})\right| e^{-j\varphi_x(\omega)} = X(e^{-j\omega T}) = X^*(e^{j\omega T}).$$

является комплексно-сопряженной по отношению к функции $X(e^{j\omega T})$, получаем окончательное выражение для частотной характеристики фильтра, согласованного с сигналом $x(nT)$, имеющим спектр $X(e^{j\omega T})$,

$$H_{сф}(e^{j\omega T}) = kX^*(e^{j\omega T}) e^{-j\omega n_0 T}, \tag{16}$$

или в нормированных частотах

$$H_{сф}(e^{j\hat{\omega}}) = kX^*(e^{j\hat{\omega}})e^{-j\hat{\omega}n_0T}. \quad (17)$$

Импульсная характеристика согласованного фильтра. По известной частотной характеристике (16) нетрудно найти импульсную характеристику СФ (4)

$$h_{сф}(nT) = \frac{T}{2\pi}\int_{-\pi/T}^{\pi/T} H_{сф}(e^{j\omega T})e^{j\omega nT} = k\frac{T}{2\pi}\int_{-\pi/T}^{\pi/T} X^*(e^{j\omega T})e^{j\omega(n-n_0)T}d\omega. \quad (18)$$

Учитывая соотношение

$$X^*(e^{j\omega T}) = X(e^{-j\omega T})$$

и вводя новую переменную $\psi = -\omega$, приведем равенство (18) к более удобному для анализа виду:

$$h_{сф}(nT) = -k\frac{T}{2\pi}\int_{-\pi/T}^{\pi/T} X(e^{j\psi T})e^{j\psi(n-n_0)T}d\psi = k\frac{T}{2\pi}\int_{-\pi/T}^{\pi/T} X(e^{j\psi T})e^{j\psi(n-n_0)T}d\psi.$$

Но поскольку подынтегральное выражение содержит преобразование Фурье $kX(e^{j\psi T})e^{j\psi n_0T}$ последовательности (функции)

$$kx\left[(n_0 - n)T\right]$$

то импульсная характеристика согласованного с сигналом $x(n)$ фильтра равна этой последовательности:

$$h_{сф}(nT) = kx\left[(n_0 - n)T\right], \quad (19)$$

или в нормированном времени

$$h_{сф}(n) = kx(n_0 - n). \quad (20)$$

Поставленная задача решена.

Свойства импульсной характеристики СФ. Рассмотрим свойства согласованного с сигналом $x(nT)$ фильтра и физический смысл полученных соотношений во временной и частотной областях.

Из определения импульсной характеристики следует, что при $n < 0$ она должна быть равна нулю

$$h_{сф}(n)\Big|_{n<0} = 0.$$

Это требование помогает выяснить смысл задержки в (19), а именно: если длительность сигнала (или его отрезка) равна $n_c T$, то:

- во-первых, ИХ (19) должна отвечать условию

$$h_{сф}(nT) = kx\left[\left(n_0 - n\right)\right]T\Big|_{n_0 < n_c} = 0.$$

и потому представлять собою отсчета сигнала (или его отрезка), взятые в обратном порядке;

- во-вторых, лишь при $n_0 > n_c$ вся энергия сигнала может быть использована для формирования его максимума;

- в-третьих, максимум формируется в момент $n_0 T$;

- в-четвертых, увеличение n_0 свыше n_c не влияет на значение максимума, но только сдвигает его вправо.

Все сказанное означает, что и длительность n_c сигнала $x(n)$, и длительность n_0 ИХ согласованного с сигналом фильтра должны быть конечными и равными друг другу:

$$n_0 = n_c.$$

Отсюда следует второе, наиболее часто используемое определение согласованного фильтра: фильтром, согласованным с сигналом $x(nT)$ длительностью $n_0 T$, называется фильтр с конечной импульсной характеристикой $h_{сф}(nT)$ вида

$$h_{сф}(nT) = kx\left[(n_0 - n)T\right],$$

отсчеты которой равны отсчетам сигнала, взятым в обратном порядке.

Запишем передаточную функцию согласованного фильтра с точностью до коэффициента k, приняв его равным единице. По определению передаточной функции имеем

$$H_{сф}(z) = \sum_{n=0}^{n_0} h_{сф}(n) = \sum_{n=0}^{n_0} x(n_0 - n) z^{-n};$$

произведя замену переменных $n_0 - n = m$, $n = n_0 - m$, получим

$$H_{сф}(z) = \sum_{m=0}^{n_0} x(m) z^{-n_0} z^{m} = z^{-n_0} \sum_{m=0}^{n_0} x(z^{-1})^{-m},$$

или

$$H_{сф}(z) = z^{-n_0} X\left(z^{-1}\right).$$

Свойства ФЧХ согласованного фильтра. Обратимся к выражению (14)

$$\arg H_{сф}(e^{j\omega T})\varphi_{сф}(\omega) = -\left[\varphi_x(\omega) + \omega_{n_0} T\right] = -\varphi_x(\omega) + \omega_{n_0} T.$$

Первое слагаемое, равное $-\varphi_x(\omega)$, компенсирует спектр фаз $\varphi_x(\omega)$ сигнала, поэтому при отсутствии второго слагаемого $-\omega_{n0}T$ все составляющие выходного сигнала имели бы нулевые начальные фазы в момент $n_0 = 0$ и максимум сигнала пришелся бы именно на момент $n_0 = 0$, что физически не реализуемо; линейная же часть ФЧХ обеспечивает сдвиг момента образования максимума сигнала из точки $nT = 0$ ($n = 0$)в точку n_0T , и такой фильтр физически возможен.

Свойства АЧХ согласованного фильтра. Выражение (15) устанавливает, что АЧХ согласованного фильтра должна по своей форме совпадать со спектром амплитуд сигнала, т. е.

$$A_{сф}(\omega) = k\left|X(e^{j\omega T})\right| = k\left|X^*(e^{j\omega T})\right|.$$

Физически это означает, что фильтр пропускает спектральные составляющие сигнала и шума неравномерно: в частотных областях, где значения АЧХ малы $A_{сф}(\omega) \ll 1$, составляющие получают большее ослабление. Однако в силу того, что АЧХ по форме совпадает со спектром амплитуд сигнала (рис. 1), ослабление сигнала выражено в меньшей степени, поскольку в указанных областях расположены спектральные составляющие сигнала, вклад которых в величину максимума незначителен; мощность же белого шума в этих областях $W_{вых} = (\omega)A^2_{сф}(\omega)W_0$ снижается весьма существенно.

Спектр амплитуд сигнала <=> АЧХ согласованного фильтра

Рис. 1- Спектр амплитуд сигнала и АЧХ согласованного фильтра.

Это приводит к ослаблению шума относительно сигнала, вследствие чего максимизируется отношение *С/Ш* на выходе фильтра.

Решающая схема обнаружителя сигналов. Изученные выше свойства СФ позволяют на основе согласованных фильтров построить обнаружитель одного из группы возможных сигналов, поступающего на вход приемника вместе с помехой (шумом).

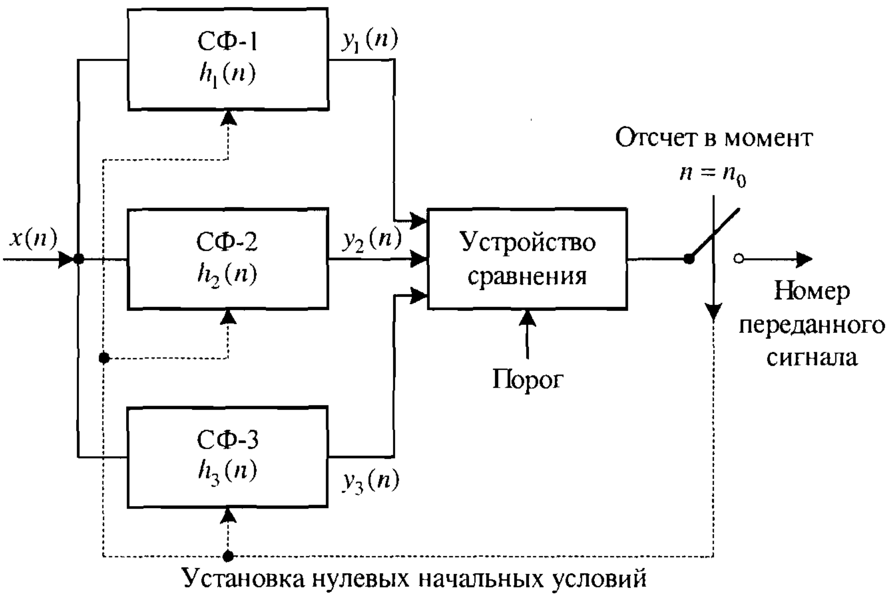


Рис. 2 - Решающая схема обнаружителя сигналов с согласованными фильтрами.

Структурная схема обнаружителя сигналов, построенная на базе согласованных фильтров, изображена на рис. 2. Входной сигнал $x(n)$ поступает одновременно на три параллельно соединенных фильтра, каждый из которых согласован с формой своего сигнала. Выходы фильтров подключены к устройству сравнения, параметром которого является порог $d_{порог}$ - минимально допустимая величина сигнала $y(n)$, при которой сигнал считается принятым (в противном случае предполагается, что на входе фильтра действует помеха). Мгновенные значения сигналов $|y_i(n_0)|$ выходах фильтров сравниваются в момент $n_0 = 0$ окончания сигнала $x(n)$, Если реакция i-го согласованного фильтра максимальна и соответствует условию

$$|y_i(n_0)| > d_{порог} = const,$$

переданным считается сигнал $x_i(n)$, с которым согласован этот фильтр. Выходы остальных фильтров воспринимаются как помеха, или шум. Существенным в работе обнаружителя является обязательная установка нулевых начальных условий в СФ в момент $x_i(n)$.

$$|y_i(n_0)| = \max\{|y_1(n_0)|, |y_2(n_0)|, |y_3(n_0)|\}$$

Амплитудные корректоры. Амплитудными корректорами (АК) называют фильтры, предназначенные для выравнивания АЧХ (или характеристики ослабления $a(f)$ системы (например, канала связи) в пределах ее рабочей полосы до установленных норм.

Амплитудные корректоры подключаются каскадно с корректируемым частотным трактом и устанавливаются либо перед трактом (рис. 3, *а*), либо после него (рис. 3, *б*).

Форма АЧХ амплитудных корректоров ничем не ограничивается, поэтому в АЧХ корректоров не выделяют полосы пропускания, задерживания и переходные полосы (рис. 4). Реализация таких требований наиболее удобна в виде КИХ-системы с линейной ФЧХ, поэтому обычно амплитудные корректоры синтезируют как оптимальные (по Чебышеву) фильтры с произвольной АЧХ.

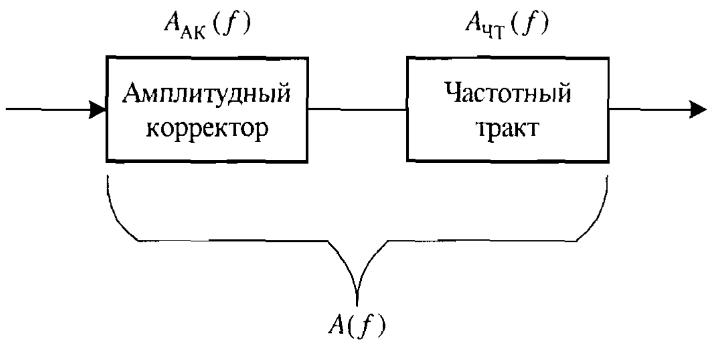
На рис. 3, *а* показан пример частотной характеристики некоторого частотного тракта $A_{ЧТ}(f)$, настолько искаженной в полосе пропускания, что вследствие нарушений начальных соотношений между амплитудами частотных составляющих сигнала возникают недопустимые изменения его формы при прохождении через такой тракт.

Для устранения обнаруженных искажений ЧХ частотного тракта необходимо последовательно с ним включить амплитудный корректор (см. рис. 3),условиях АЧХ всей системы $A(f)$ будет равна произведению частотных характеристик тракта и корректора

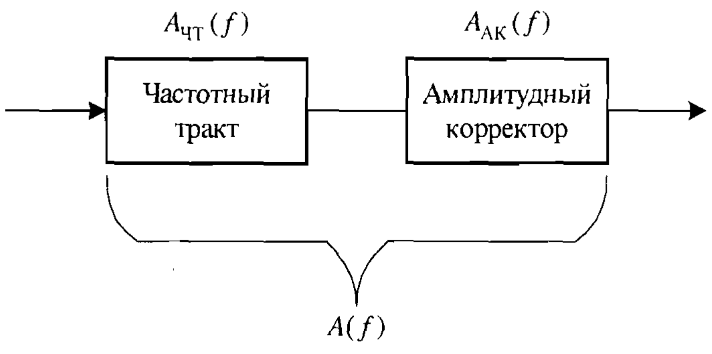
$$A(f) = A_{ЧТ}(f) \cdot A_{Кор}(f),$$

а характеристика ослабления представится суммой характеристик ослабления частотного тракта и корректора

$$a(f) = a_{ЧТ}(f) \cdot a_{Кор}(f)$$



а



б

Рис. 3 - Варианты размещения АК: перед частотным трактом (*а*), после частотного тракта (*б*).

Полученная АЧХ изображена на рис. 4, *е*.

Из сказанного следует, что АЧХ корректора $A_{Кор}(f)$:

- определяется в каждой точке интервала $\left[0, f_Д/2\right]$;

- назначается равной единице $A_{Кор}(f)=1$ во всех частотных областях, не требующих коррекции;

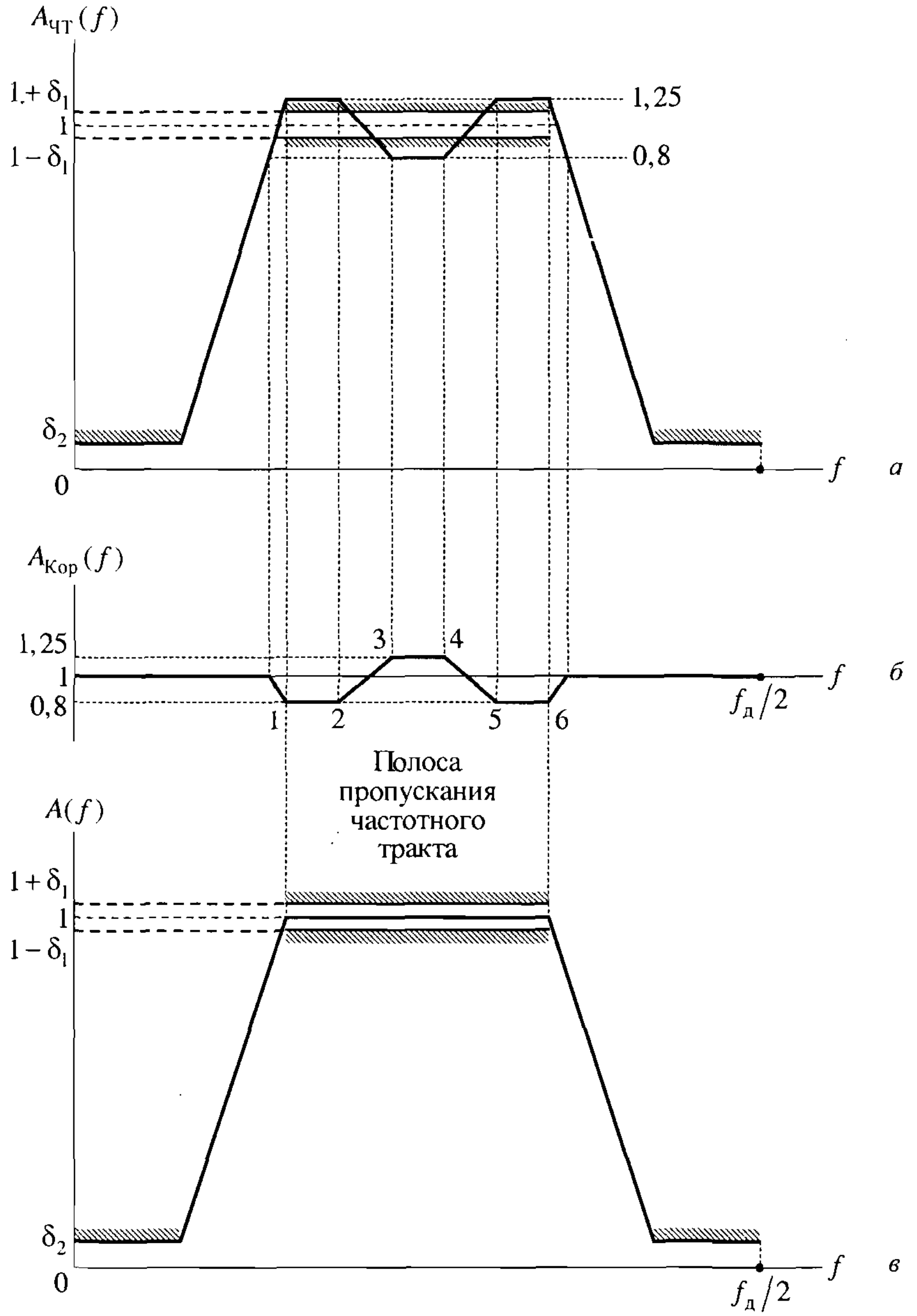


Рис. 4 - Амплитудно-частотные характеристики: тракта (*а*), корректора (*б*), всей системы после коррекции (*в*).

- задается ломаной линией в частотных областях, требующих коррекции, причем в характерных i-х точках должна иметь значение, обратное значению ЧХ тракта

$$A_{iКор} = 1/A_{iЧТ}$$

На рис. 4, *б* это точки с номерами $i = 1, 2, ..., 6$; например, в точках 1 и 4

$$A_{1Кор} = 1/1,25 = 0,8; \quad A_{4Кор} = 1/0,8 = 1,25.$$

Нетрудно распространить изложенное на характеристику ослабления корректора:

- в частотных областях, где не требуется коррекции,

$$a_{Кор}(f) = 0$$

- в точках частотной области, где коррекция необходима,

$$a_{iКор} = -a_{iЧТ}.$$

Заключение. Исследования показали что цифровая реализация согласованных фильтров позволяет обеспечить оптимальный процесс обнаружения сигналов с использованием амплитудных корректоров.

Список литературы

1. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – М.: Радиосвязь, 1994. – 295с.

2. *Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н.* Цифровая обработка сигналов: Учебное пособие для вузов. – М.: Радиосвязь, 1990.– 302с.

3. *Parks T. W., Burrus C.S.* Digital Filter Design. – New York: John Wiley& Sons, Inc., 1987. – 680 p.

Дослідження цифрових узгоджених фільтрів в системах моніторингу навколишнього середовища

О.С. Лімонов, Д.І. Вельміскін, К.О. Дяченко.

В статті досліджується можливість цифрової реалізації погоджених фільтрів.

Ключові слова: *погоджений фільтр, оптимальний, реакція, характеристики, визначник сигналів, амплітудний коректор.*

Digital matched filters investigation for system of informant monitoring. **A.C. Limonov, D.I..Velmiskin, E.A. Diachenco.**

In the article Digital matched filters investigation are prevented.

Key words: *matched filter, optimal, reaction, characteristics, signal detector, amplitude corrector.*