

УДК 681.513

О.В. Запорожец

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков*

## КОРРЕКЦИЯ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА

*Предложена структура адаптивной системы выравнивания частотной характеристики измерительного канала на базе цифрового фильтра-компенсатора, коэффициенты которого настраиваются в реальном времени с помощью рекуррентного метода наименьших квадратов. С помощью имитационного моделирования на ЭВМ исследовано влияние вида входного калибровочного сигнала и внутренних шумов измерительного канала на качество коррекции частотной характеристики.*

*адаптивный фильтр, измерительный канал, частотная характеристика, калибровка*

### Постановка задачи

Методы обработки экспериментальных данных играют существенную роль при решении различных технических задач, в том числе в измерительной практике. С усложнением измерений и повышением требований к точности измерений их роль становится все более важной. Во многих современных измерительных задачах получить требуемую точность результатов удается, лишь применяя более эффективные методы обработки данных.

При решении многих измерительных задач одним из факторов, оказывающих существенное влияние на погрешность измерения, является неравномерность коэффициента передачи измерительного тракта в рабочем диапазоне частот. Это приводит к появлению дополнительной систематической погрешности и искажению формы измеряемого сигнала. Одним из эффективных методов решения данной проблемы является использование адаптивного фильтра-компенсатора, осуществляющего выравнивание частотной характеристики измерительного канала. Рассматриваемая задача является особенно актуальной для средств измерения со встроенными микропроцессорами и информационно-измерительных систем, в которых преобладает цифровая обработка измерительной информации, что позволяет реализовать широкий спектр методов цифровой фильтрации сигналов.

Информационно-измерительная система представляет собой совокупность измерительных каналов, измерительных устройств и других технических средств, объединенных для создания и анализа сигналов цифровой измерительной информации о нескольких одно- или разнородных величинах и других видов информации. Измерительный канал – это совокупность средств измерительной техники, средств связи и других технических средств, предназначенных для создания сигнала измерительной информации об одной измеряемой величине. Измерительный канал является одной из основных функциональных

блоков информационно-измерительной системы.

Рассмотрим обобщенную структурную схему канала информационно-измерительной системы, которая представлена на рис. 1.

Входной измерительный сигнал от первичного измерительного преобразователя (датчика) проходит через аналоговый тракт передачи, который обычно включает такие функциональные блоки, как входное устройство, устройство выбора предела измерения, ряд каскадов усиления и функциональных преобразователей.

Аналого-цифровой преобразователь служит для преобразования электрического информационного параметра аналогового сигнала (чаще всего напряжения) в двоичный цифровой код. Современные АЦП выполнены, как правило, в виде специализированных интегральных микросхем, которые отличаются методом преобразования, разрядностью и быстродействием.

Перед проведением измерений осуществляется процедура калибровки с целью минимизации систематических погрешностей измерения. В этом режиме на вход измерительного канала подается образцовый калибровочный сигнал, сформированный цифро-аналоговым преобразователем. Форма и параметры этого сигнала определяются последовательностью цифровых кодов, поступающей на вход ЦАП из управляющего устройства.

Для согласования измерительного канала с центральным устройством управления и обработки информационно-измерительной системы, в качестве которого выступает ЭВМ или микроконтроллер, используется интерфейс, позволяющий обеспечить информационную, электрическую и конструктивную совместимость измерительной части и управляющего устройства. Для информационно-измерительных систем характерно широкое использование стандартных интерфейсов (ISA, PCI, RS-232, USB, IEEE 488 и др.), что дает возможность существенно упростить решение задачи сопряжения устройств системы между собой.

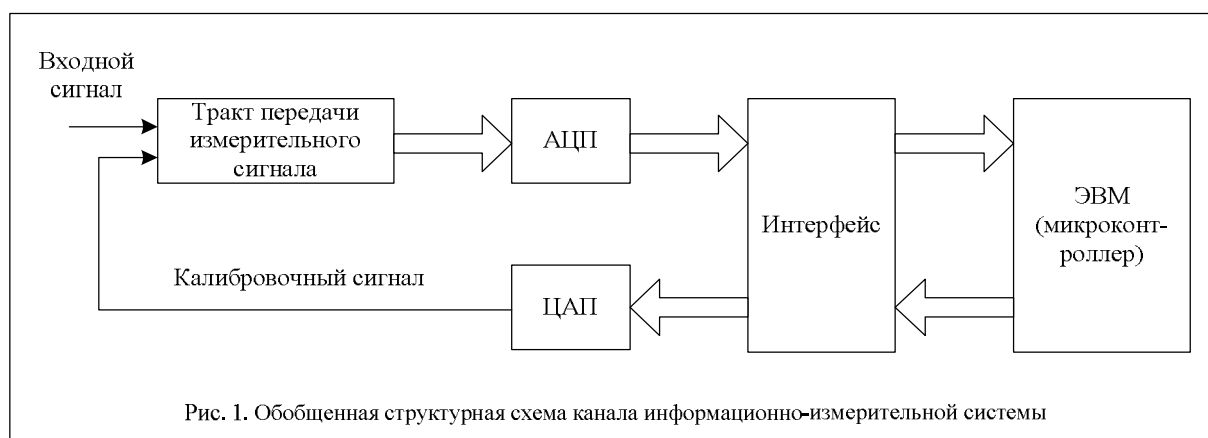


Рис. 1. Обобщенная структурная схема канала информационно-измерительной системы

С точки зрения преобразования измерительного сигнала канал информационно-измерительной системы представляет собой динамическую систему, для описания которой необходимо использовать адекватную математическую модель. Для рассматриваемой задачи предположим, что измерительный канал относится к классу линейных систем и описывается передаточной функцией общего вида

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{N_B} z^{-N_B}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{N_A} z^{-N_A}}. \quad (1)$$

В частотной области поведение системы (1) описывается комплексной частотной характеристикой

$$H(e^{j\omega}) = \frac{b_0 + b_1 e^{-j\omega} + \dots + b_{N_B} e^{-j\omega N_B}}{1 + a_1 e^{-j\omega} + \dots + a_{N_A} e^{-j\omega N_A}} = |H(e^{j\omega})| e^{j \arg H(e^{j\omega})},$$

модуль которой известен как АЧХ, а аргумент как ФЧХ. Поскольку в подавляющем большинстве случаев информативным параметром является амплитуда сигнала, то к АЧХ выдвигается требование равномерности в рабочем диапазоне частот измеряемых сигналов. Гораздо реже требования выдвигаются и к ФЧХ, обычно это требование линейности, которое встречается в задачах обработки речи.

Однако практика показывает, что даже в полосе пропускания канала АЧХ не бывает идеально равномерной, что приводит к появлению частотной или динамической погрешности, которая обусловлена отклонением реального значения коэффициента передачи от его номинального значения. Задача состоит в том, чтобы обеспечить постоянное значение коэффициента передачи измерительного канала во всем рабочем диапазоне частот и минимизировать погрешность, обусловленную неравномерностью частотной характеристики.

Таким образом, в качестве математической модели канала информационно-измерительной системы мы будем использовать линейный динамический объект, описываемый передаточной функцией общего вида (1) и имеющий произвольную форму частотной характеристики.

### Выравнивание частотной характеристики измерительного канала с помощью обратного адаптивного моделирования

Одним из методов решения рассматриваемой задачи является обратное адаптивное моделирование [1]. Обратная модель некоторой системы с неизвестной передаточной функцией представляет собой систему с передаточной функцией, которая в некотором смысле является наилучшим приближением функции, обратной неизвестной передаточной функции.

На рис. 2 представлена структурная схема адаптивной системы выравнивания частотной характеристики измерительного канала.

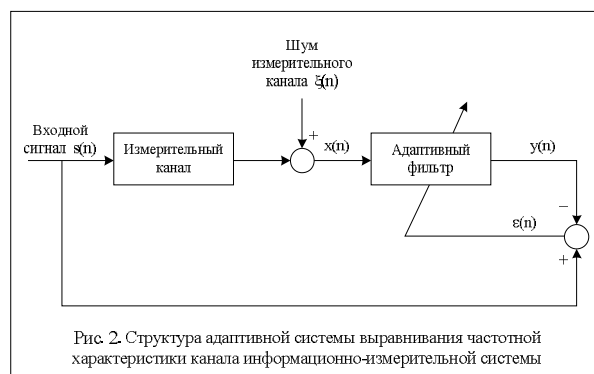


Рис. 2. Структура адаптивной системы выравнивания частотной характеристики канала информационно-измерительной системы

Внутренний шум измерительного канала представляется аддитивным шумом  $\zeta(n)$  на его выходе. Выходной зашумленный сигнал измерительного канала  $x(n)$  подается на вход адаптивного фильтра. В результате процесса адаптации коэффициенты адаптивного фильтра, являющегося в данном случае обратной моделью измерительного канала, настраиваются таким образом, чтобы его выходной сигнал  $u(n)$  являлся наилучшим приближением сигнала  $s(n)$  на входе измерительного канала.

Адаптивный нерекурсивный фильтр, структура которого приведена на рис. 3, описывается разностным уравнением вида

$$u(n) = w_0(n)x(n) + w_1(n)x(n-1) + w_2(n)x(n-2) + \dots + w_L(n)x(n-L) = W^T(n)X(n),$$

где  $x(n)$ ,  $y(n)$  – входной и выходной сигналы фильтра соответственно;  $n = 0, 1, 2, \dots$  – дискретное время;  $W(n) = (w_0(n), w_1(n), w_2(n), \dots, w_L(n))^T$  – вектор настраиваемых параметров, а вектор фазовых переменных –  $X(n) = (x(n), x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-L))^T$ .

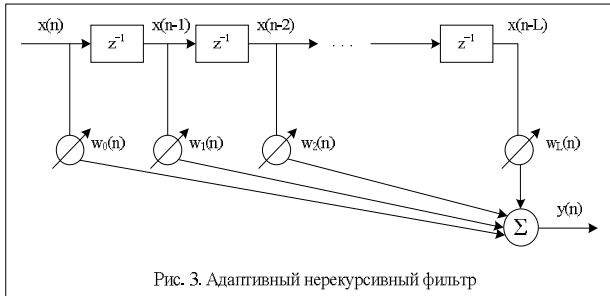


Рис. 3. Адаптивный нерекурсивный фильтр

Введем критерий оптимальности

$$J_n = \sum_{i=1}^n (s(i) - y(i))^2 = \sum_{i=1}^n (s(i) - W^T(i)X(i))^2,$$

минимизация которого приводит к хорошо известному рекуррентному методу наименьших квадратов [2]

$$\begin{cases} W(n) = W(n-1) + \frac{P(n-1)(s(n) - y(n))}{1 + X^T(n)P(n-1)X(n)} X(n); \\ P(n) = P(n-1) - \frac{P(n-1)X(n)X^T(n)P(n-1)}{1 + X^T(n)P(n-1)X(n)}. \end{cases} \quad (2)$$

Преимущество процедуры (2) состоит в том, что она ведет активное накопление информации и подстраивает коэффициенты адаптивного фильтра на каждом такте времени, не требует хранения в памяти всей предыстории процесса, обеспечивает довольно быструю сходимость оценок и хорошо работает в условиях помех.

Следует отметить несколько факторов, ограничивающих возможность построения обратной модели с малым значением среднеквадратической ошибки.

Во-первых, наличие шума измерительного канала  $\xi(n)$  приводит к возникновению шума на выходе адаптивного обратного фильтра. При наличии шума передаточная функция адаптивного фильтра в установившемся режиме в общем случае не является обратной к передаточной функции канала измерительной системы.

Во-вторых, адаптивный нерекурсивный фильтр обладает конечной импульсной характеристикой. В этом случае возможна только приближенная реализация импульсной характеристики обратной модели для системы с бесконечной импульсной характеристикой. Улучшить качество адаптации в этом случае можно путем увеличения числа коэффициентов фильтра-компенсатора.

В-третьих, на качество адаптации значительное влияние оказывает входное воздействие. Чем богаче спектр входного сигнала, тем быстрее идет настройка коэффициентов адаптивного фильтра.

## Исследование влияния вида входного сигнала и собственных шумов канала на качество адаптивного выравнивания частотной характеристики

Для исследования свойств и характеристик адаптивных систем выравнивания частотной характеристики измерительного канала использовался метод имитационного моделирования на ЭВМ. С этой целью была разработана программа на языке MATLAB, использующая функции проектирования адаптивных фильтров библиотеки Filter Design Toolbox [3].

Канал информационно-измерительной системы моделировался рекурсивным фильтром 7-го порядка; в качестве адаптивного фильтра-компенсатора, реализующего обратную модель измерительного канала, использовался нерекурсивный фильтр 15-го порядка. Для настройки коэффициентов адаптивного фильтра использовался рекуррентный метод наименьших квадратов.

В процессе моделирования исследовалось влияние вида входного сигнала и собственных шумов измерительного канала на качество адаптивного выравнивания частотной характеристики. В качестве входного калибровочного сигнала использовались следующие виды сигналов:

- 1) периодическая последовательность прямоугольных импульсов (меандр);
- 2) периодическая последовательность треугольных импульсов (пилообразный сигнал);
- 3) случайный сигнал (белый гауссовский шум с нулевым средним значением);
- 4) частотно-модулированный гармонический сигнал с линейным законом изменения частоты (ЛЧМ-сигнал).

Для каждого вида входного сигнала проводилось два эксперимента:

- 1) моделирование работы системы без учета собственных шумов измерительного канала;
- 2) моделирование работы системы с учетом собственных шумов измерительного канала.

Приведенный к выходу аддитивный шум моделировался гауссовским случайным процессом с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением 0,01.

Для оценивания качества адаптивного выравнивания частотной характеристики использовались два показателя: максимальное отклонение полученной частотной характеристики от идеальной и среднеквадратическое отклонение полученной частотной характеристики от идеальной. Результаты моделирования представлены на рис. 4 – 6 и в табл. 1.

## Выводы

Анализ результатов моделирования, представленных в табл. 1, позволяет сделать вывод о том, что для адаптивного выравнивания частотной характеристики измерительного канала более предпочтительными являются случайный и частотно-модули-

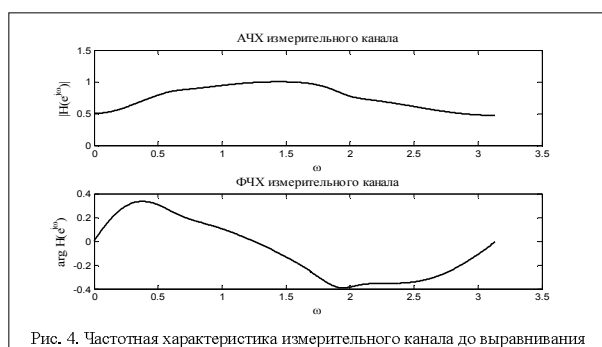


Рис. 4. Частотная характеристика измерительного канала до выравнивания

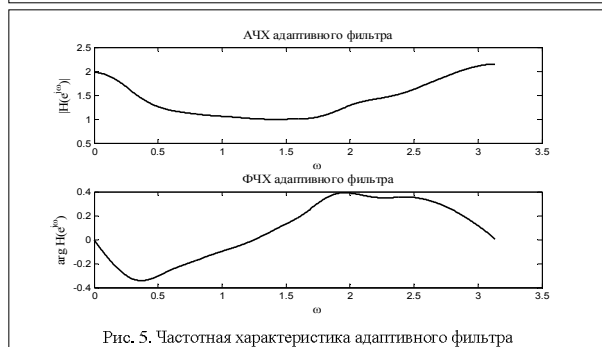


Рис. 5. Частотная характеристика адаптивного фильтра

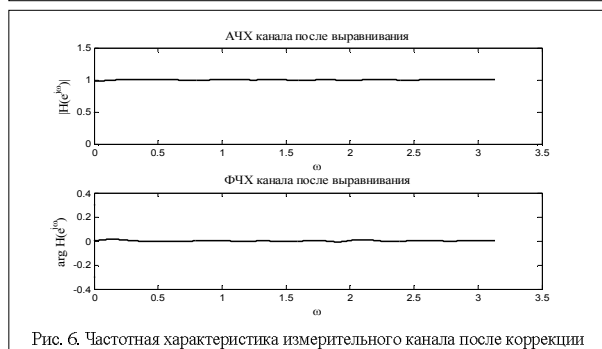




Рис. 6. Частотная характеристика измерительного канала после коррекции

рованный калибровочные сигналы, поскольку они обеспечивают лучшее качество выравнивания по сравнению с периодическими сигналами. Кроме того, для случайного и ЛЧМ-сигнала действие помех приводит лишь к незначительному увеличению максимальной и среднеквадратической погрешностей, в то

время как для импульсных сигналов эти погрешности возрастают в несколько раз.

Таблица 1

Результаты моделирования

Вид входного калибровочного сигнала	Максимальное отклонение частотной характеристики от номинальной		Среднеквадратическое отклонение частотной характеристики от номинальной	
	адаптация без учета собственных шумов	адаптация с учетом собственных шумов	адаптация без учета собственных шумов	адаптация с учетом собственных шумов
1. Прямоугольные импульсы 	0,0133	0,0609	0,0054	0,0141
2. Пилообразный сигнал 	0,0128	0,0403	0,0053	0,0143
3. Случайный сигнал (белый гауссовский шум)	0,0091	0,0107	0,0032	0,0038
4. Частотно-модулированный сигнал	0,0080	0,0110	0,0031	0,0044

В целом результаты имитационного моделирования полностью подтверждают работоспособность рассмотренной адаптивной системы выравнивания частотной характеристики и согласуются с теоретическими выкладками. Использование предлагаемого адаптивного корректора позволит существенно уменьшить систематическую погрешность измерений, вызванную неравномерностью частотной характеристики измерительного канала.

### Список литературы

1. Уидроу Б., Стернз С. Адаптивная обработка сигналов. – М: Радио и связь, 1989. – 440 с.
2. Льюнг Л. Идентификация систем: Теория для пользователя. – М: Наука, 1991. – 431 с.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – С.-Пб: Питер, 2006. – 751 с.

Поступила в редколлегию 29.10.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.В. Руженцев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.