

к.т.н., доцент Запорожец О. В.,
к.т.н., ст. преп. Дегтярев А. В.
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
E-mail: oleg_zaporozhets@rambler.ru

КОРРЕКЦИЯ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА С ПОМОЩЬЮ ОБРАТНОГО АДАПТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматривается задача выравнивания частотной характеристики канала информационно-измерительной системы и уменьшения динамической погрешности измерения. Предложена структура адаптивной системы, выполняющей обратное моделирование с использованием адаптивного фильтра-компенсатора. Проведено имитационное моделирование на ЭВМ функционирования предложенной адаптивной системы, исследовано влияние вида входного калибровочного сигнала и внутренних шумов измерительного канала на качество выравнивания частотной характеристики.

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. При решении многих современных измерительных задач получить требуемую точность результатов удастся, лишь применяя более эффективные методы обработки данных [1, 2].

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 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 составных частей информационно-измерительной системы.

Обобщенная структурная схема канала измерительной системы представлена на рис. 1.

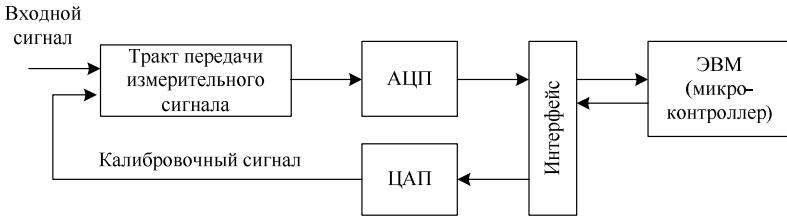


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема канала информационно-измерительной системы

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

$$H(e^{j\omega}) = \frac{b_0 + b_1 e^{-j\omega} + \dots + b_{N_B} e^{-j\omega N_B}}{1 + a_1 e^{-j\omega} + \dots + a_{N_A} e^{-j\omega N_A}} = |H(e^{j\omega})| e^{j \arg H(e^{j\omega})}, \quad (2)$$

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.

Одним из методов решения рассматриваемой задачи является обратное адаптивное моделирование [3]. 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. 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 $y(n)$ являлся наилучшим приближением сигнала $s(n)$ на входе измерительного канала.

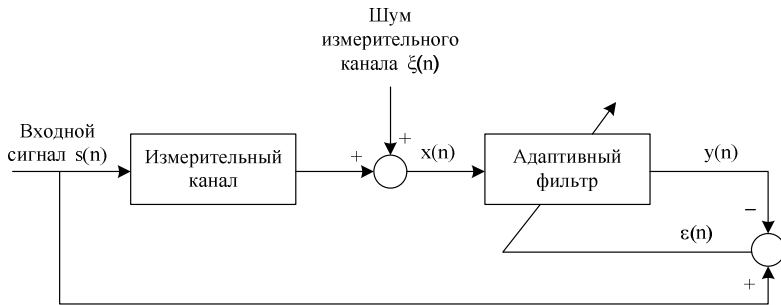


Рисунок 2 – Структура адаптивной системы выравнивания частотной характеристики канала информационно-измерительной системы

Адаптивный нерекурсивный фильтр описывается разностным уравнением вида

$$y(n) = w_0(n)x(n) + w_1(n)x(n-1) + w_2(n)x(n-2) + \dots + w_L(n)x(n-L) = W^T(n)X(n), \quad (3)$$

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

Введем критерий оптимальности

$$J_n = \sum_{i=1}^n (s(i) - y(i))^2 = \sum_{i=1}^n (s(i) - W^T(i)X(i))^2, \quad (4)$$

минимизация которого приводит к хорошо известному рекуррентному методу наименьших квадратов [4]

$$\begin{cases} W(n) = W(n-1) + \frac{P(n-1)(s(n) - y(n))}{1 + X^T(n)P(n-1)X(n)} X(n), \\ P(n) = P(n-1) - \frac{P(n-1)X(n)X^T(n)P(n-1)}{1 + X^T(n)P(n-1)X(n)}. \end{cases} \quad (5)$$

Преимущество процедуры (5) 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.

Для исследования свойств и характеристик адаптивных систем выравнивания частотной характеристики измерительного канала использовался метод имитационного моделирования на ЭВМ. 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.

Результаты моделирования представлены на рис. 4-6 и в табл. 1.

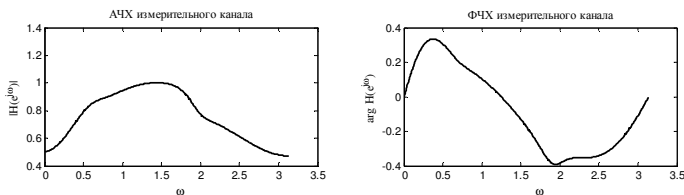


Рисунок 4 – Частотная характеристика измерительного канала до выравнивания

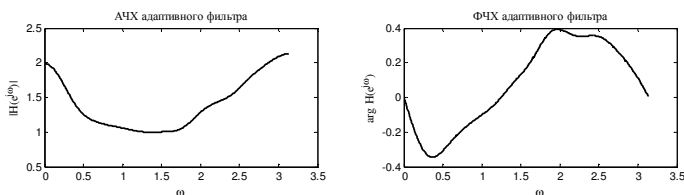


Рисунок 5 – Частотная характеристика адаптивного фильтра

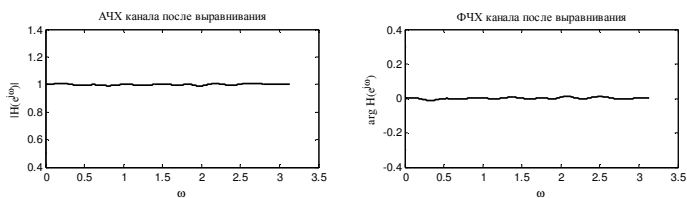



Рисунок 6 – Частотная характеристика измерительного канала после выравнивания

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

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-модулированный 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.

1. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. К.: Выща шк., 1983.
2. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М: Радио и связь, 1989.
4. Льюнг Л. Идентификация систем: Теория для пользователя. М: Наука, 1991.