

УДК 621.391.82

## ЦИФРОВОЙ АВТОКОМПЕНСАТОР ПОМЕХ С КОРРЕКЦИЕЙ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЕМНЫХ КАНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ЭКВАЛАЙЗЕРА

В.В. ПЕТРОВ, Е.В. КЕРЕСЕЛИДЗЕ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова  
Долгобродская, 23, Минск, 220070, Беларусь*

*Поступила в редакцию 1 сентября 2010*

Предложен способ компенсации мешающих излучений с помощью цифрового автокомпенсатора помех на основе адаптивного фильтра с применением эквалайзера для коррекции частотных характеристик приемных каналов.

*Ключевые слова:* автокомпенсатор помех, адаптивный фильтр, эквалайзер, коррекция частотных характеристик, подавление мешающих излучений.

### Введение

В процессе использования современных радиолокационных систем (РЛС) часто возникает ситуация, когда приемная антенна РЛС принимает полезный сигнал по главному лепестку своей диаграммы направленности антенны, а активную помеху – по боковому лепестку. В этой ситуации активную шумовую помеху (АШП) можно выделить с помощью дополнительной слабонаправленной антенны, а затем вычесть из смеси полезного сигнала и помехи, принимаемой основной антенной. Активная помеха и полезный сигнал, как правило, некоррелированы между собой и для подавления АШП обычно используются автокомпенсаторы с корреляционной обратной связью.

Основными причинами снижения коэффициента подавления помех являются:

- уровень внутреннего шума;
- межканальная временная задержка распространения по раскрытию антенной решетки;
- неидентичность частотных характеристик каналов приема;
- неидентичность поляризационных характеристик антенны;
- нелинейные искажения в трактах обработки [1].

На практике для повышения эффективности подавления помех путем коррекции неидентичности частотных характеристик приемных каналов используются малопараметрические корректоры и корректоры, основанные на трансверсальных фильтрах [1, 2]. Однако использование адаптивного трансверсального фильтра для компенсации помех в условиях неидентичных каналов может потребовать значительного числа каналов самонастройки [3].

В данной статье исследуется вариант применения автокомпенсатора помех на основе рекурсивного метода наименьших квадратов (РНК) с применением эквалайзера для подстройки частотных характеристик на основе РНК.

### Теоретический анализ

В основе схемы автокомпенсации помех лежит принцип шумоподавления с помощью адаптивного фильтра. Входной информацией адаптивного фильтра является сигнал дополнительного канала  $x[k]$ , а в качестве образцового сигнала используется сигнал основного канала

$d[k]$ . Поскольку с входным сигналом фильтра коррелирована лишь помеховая составляющая сигнала в основном канале, в установившемся режиме на выходе фильтра будет получаться оценка помехи  $y[k]$ , присутствующей в образцовом сигнале. Сигнал  $e[k]$ , рассчитываемый как разность между сигналом в основном канале и выходным сигналом адаптивного фильтра  $y[k]$ , будет в этом случае представлять собой очищенный от помехи полезный сигнал.

В ходе работы адаптивный фильтр минимизирует ошибку воспроизведения образцового сигнала. С этой целью устройство адаптации после обработки каждого отсчета анализирует сигнал ошибки и дополнительные данные, поступающие из фильтра, а затем использует результаты этого анализа для подстройки параметров (коэффициентов) фильтра (рис. 1, а).

Для коррекции неидентичности частотных характеристик целесообразно использовать эквалайзер на основе адаптивных фильтров. Входной настроечный сигнал, формируемый генератором настроечного сигнала, и поступающий в радиоприемное устройство, является общим сигналом для основного и дополнительного каналов. В случае полной идентичности частотных характеристик приемных каналов сигналы в основном и дополнительном каналах после прохождения приемного тракта будут одинаковыми. В процессе адаптации временные и частотные характеристики фильтра будут изменяться таким образом, чтобы минимизировать разность между сигналом в основном канале и сигналом в дополнительном канале, тем самым устраняя внесенные системой искажения (рис. 1, б).

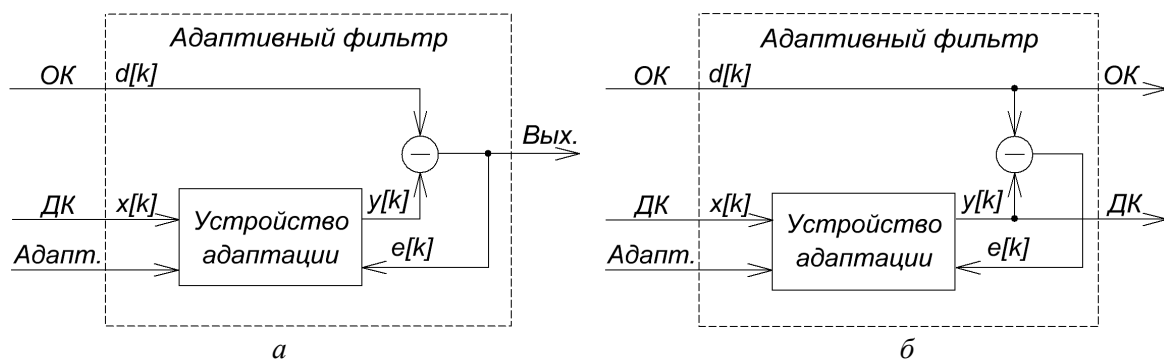


Рис. 1. Структуры на основе адаптивных фильтров:  
а – автокомпенсатора помех; б – эквалайзера

Достоинствами рекурсивного метода наименьших квадратов являются [4]:

- высокая скорость сходимости;
- алгоритм РНК может применяться как для фильтрации стационарных сигналов, так и нестационарных.

В соответствии с алгоритмом РНК:

При поступлении новых входных данных  $\mathbf{u}(k)$  производится фильтрация сигнала с использованием коэффициентов фильтра  $\mathbf{w}(k-1)$  на предыдущем шаге и вычисление величины ошибки воспроизведения образцового сигнала:

$$y_k = \mathbf{w}^H(k-1) \mathbf{u}_k,$$

$$e_k = d_k - y_k,$$

где  $\mathbf{w}^H(k-1)$  – эрмитово сопряженный вектор-столбец коэффициентов фильтра на предыдущем шаге.

Рассчитывается вектор-столбец *коэффициентов усиления* (следует отметить, что знаменатель дроби является скаляром, а не матрицей):

$$\mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{P}(k-1) \mathbf{u}_k}{\lambda + \mathbf{u}_k^H \mathbf{P}(k-1) \mathbf{u}_k},$$

где  $\mathbf{u}_k^H$  – эрмитово сопряженный вектор-столбец входных данных;  $\lambda$  – коэффициент забывания.

Производится обновление оценки обратной корреляционной матрицы входных данных:

$$\mathbf{P} k = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{P} k-1 - \mathbf{K} k \mathbf{u}^H k \mathbf{P} k-1].$$

Наконец, производится обновление коэффициентов фильтра:

$$\mathbf{w} k = \mathbf{w} k-1 + \mathbf{K}^H k e k,$$

где  $\mathbf{K}^H k$  – эрмитово сопряженный вектор столбец коэффициентов усиления на текущем шаге.

Начальное значение вектора  $\mathbf{w}$  обычно принимается нулевым, а в качестве исходной оценки матрицы  $\mathbf{P}$  используется диагональная матрица вида  $C\mathbf{I}/\sigma_x^2$ , где  $C \gg 1$ ,  $\mathbf{I}$  – единичная диагональная матрица,  $\sigma_x^2$  – средний квадрат входного сигнала фильтра.

Структурная схема цифрового автокомпенсатора помех на основе адаптивного фильтра с применением эквалайзера для коррекции частотных характеристик приемных каналов приведена на рис. 2.

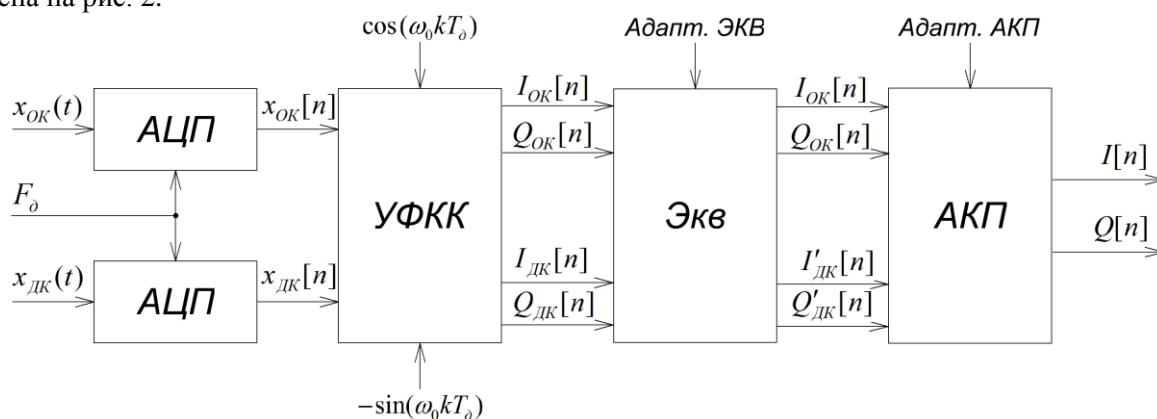


Рис. 2. Структурная схема цифрового автокомпенсатора помех

В соответствии со схемой, аналоговые сигналы приемных каналов поступают на входы аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и далее на устройство формирования квадратурных каналов (УФКК), которое выделяет синфазные и квадратурные составляющие сигналов в основном и дополнительном каналах.

По команде с системы управления РЛС к входам приемных каналов подключается генератор настроечного сигнала (ГНС), который формирует последовательность прямоугольных радиоимпульсов. Длительность радиоимпульсов выбирается такой, чтобы эффективная ширина спектра настроечного сигнала была больше полосы пропускания приемного тракта. В течение интервала настройки эквалайзер осуществляет подстройку частотных характеристик дополнительного канала к ЧХ основного канала. После подключения антенной системы эквалайзер играет роль цифрового фильтра.

### Разработка компьютерной модели системы для исследования автокомпенсаторов

Для определения эффективности применения цифрового автокомпенсатора помех целесообразно исследовать и сравнить три типа автокомпенсаторов помех:

- автокомпенсатор на основе корреляционной обратной связи (КОС) без коррекции частотных характеристик;
- автокомпенсатор на основе КОС с применением эквалайзера;
- автокомпенсатор на основе рекурсивного метода наименьших квадратов с применением эквалайзера.

Для сравнения эффективности подавления помех различными автокомпенсаторами необходимо исследовать зависимость коэффициента подавления помех каждого из автокомпенсаторов при расстройке ЧХ полосового фильтра по центральной частоте, а также при расстройке ЧХ по полосе пропускания. В качестве модели приемного канала целесообразно исполь-

зывать полосовой фильтр Бесселя высокого порядка, амплитудно-частотная характеристика которого по форме близка к гауссовой кривой, зависимость группового времени задержки от частоты является максимально гладкой на центральной частоте и групповая задержка меняется незначительно в полосе пропускания [5].

Структурная схема системы, позволяющей исследовать три типа автокомпенсаторов помех, приведена на рис. 3. Для исследования моделей автокомпенсаторов была использован пакет MatLAB и система моделирования Simulink.

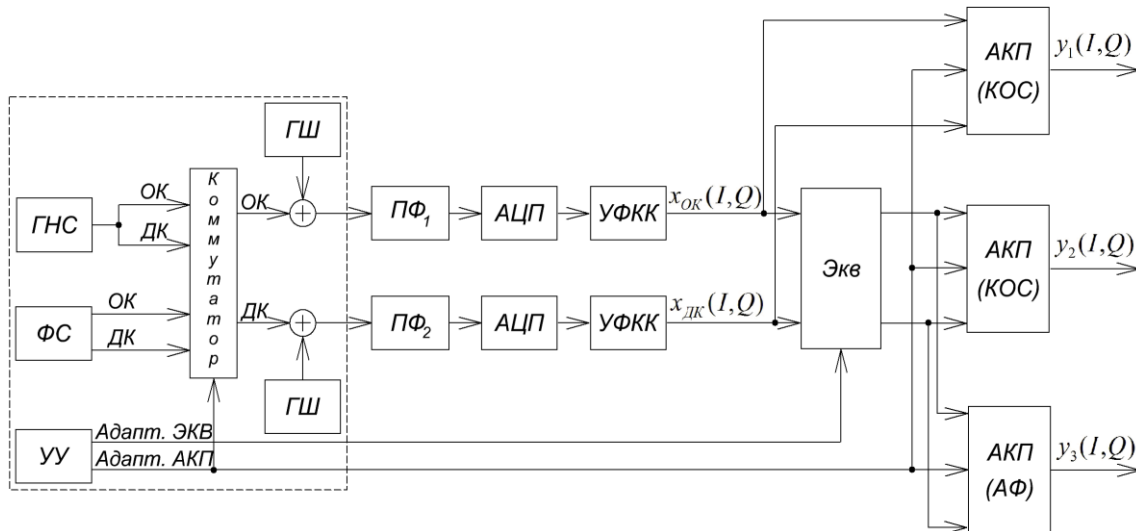


Рис. 3. Структурная схема системы для исследования автокомпенсаторов помех

В качестве ПФ приемной системы использовался фильтр Бесселя 8-го порядка с центральной частотой 27 МГц и шириной полосы 1 МГц (–3 дБ), 3 МГц (–30 дБ).

Основные параметры при моделировании:

- отношение сигнал/шум в ОК – 15 дБ;
- отношение сигнал/шум в ДК – 0 дБ;
- отношение помеха/шум в ОК – 40 дБ;
- отношение помеха/шум в ДК – 50 дБ.
- частота дискретизации – 12 МГц;
- длительность адаптации эквалайзера – 3 мс;
- порядок адаптивного фильтра в эквалайзере – 12;
- порядок адаптивного фильтра в автокомпенсаторе – 4;
- период повторения настроечных сигналов – 5 мкс;
- длительность настроечного сигнала – 0,5 мкс.

Шумовая помеха и внутренние шумы приемника моделировались в виде гауссовского экспоненциально коррелированного случайного процесса на промежуточной частоте  $f_{ПЧ} = 27$  МГц.

Коэффициент подавления помехи  $\eta$  оценивается как отношение мощности помехи на выходе устройства формирования квадратурных каналов основного приемного канала к мощности помехи на выходе автокомпенсатора в установившемся режиме

$$\eta = 10 \lg(P_{\text{вх}} / P_{\text{вых}}).$$

Расстройка полосового фильтра в дополнительном канале по центральной частоте определяется в процентах в виде приведенной к центральной частоте:

$$\Delta f, \% = (\Delta f / f_{\text{ПЧ}}) \cdot 100\%.$$

Разброс частотных характеристик полосового фильтра в дополнительном канале по полосе пропускания оценивается в процентах от ширины пропускания

$$\Delta F, \% = (\Delta F / \Delta F_{\text{ПФ}}) \cdot 100\%.$$

## Результаты и их обсуждение

В результате моделирования получены зависимости эффективности подавления помех от расстройки полосового фильтра по центральной частоте и от разброса частотных характеристик по полосе пропускания дополнительного канала для трех типов автокомпенсаторов помех в установившемся режиме (рис. 4). Как видно из рисунков, применение эквалайзера в составе автокомпенсатора позволяет повысить эффективность подавления помех при неидентичности частотных характеристик основного и дополнительного каналов. Эффективность применения АКП на основе РНК в установившемся режиме оказывается практически такой же, как и при применении АКП на основе корреляционной обратной связи.

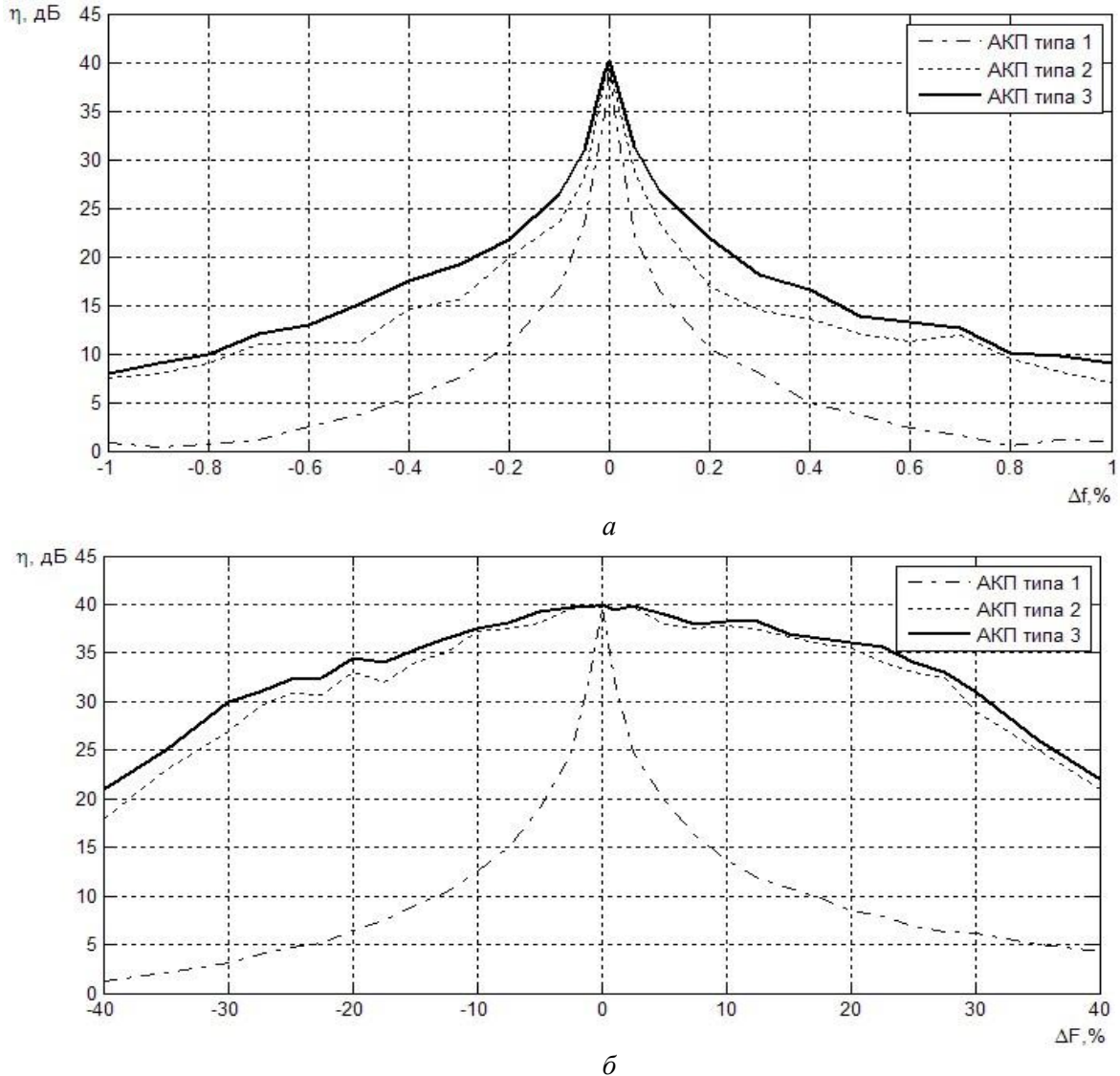


Рис. 4. Зависимость коэффициента подавления помех:  
 $a$  – от расстройки по центральной частоте дополнительного канала;  
 $b$  – от разброса по полосе пропускания дополнительного канала

Недостатком АКП на основе РНК является его повышенная вычислительная сложность по сравнению с АКП на основе КОС.

## Заключение

По результатам моделирования можно сделать вывод, что применение эквалайзера для коррекции частотных характеристик приемных каналов позволяет повысить эффективность компенсации помех и снизить требования к идентичности частотных характеристик каналов по центральной частоте и по полосе пропускания.

# THE DIGITAL SIDELobe CANCELLER WITH CORRECTION OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF RECEPTION CHANNELS BY MEANS OF AN EQUALIZER

V.V. PETROV, E.V. KERESLIDZE

## Abstract

The method of noise suppression using a digital sidelobe canceller on basis of adaptive filtering with the application of equalizer for controlling frequency gain of receiver is proposed.

## Литература

1. *Перов А.И., Харисов В.Н.* ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М., 2005.
2. *Агишев А.Г., Давыденко И.Н.* // Докл. БГУИР. 2003. № 3. С. 33–36.
3. *Монзинго П.А., Миллер Г.У.* Адаптивные антенные решётки: введение в теорию. М., 1986.
4. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. СПб., 2006.
5. *Айфичер Э.С., Джервис Б.У.* Цифровая обработка сигналов: практический подход. М., 2006.