

**Министерство образования Республики Беларусь**

Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Кафедра электронных вычислительных средств

УДК

Егоров  
Андрей Викторович

Система адаптивной фильтрации сигналов в трактах РЛС

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-40 80 01 – Элементы и устройства вычислитель-  
ной техники и систем управления

Научный руководитель  
А.Л. Матюшков, кандидат тех-  
нических наук, доцент  
кафедры ИРТ БГУИР

Минск, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.....	4
1 КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.....	5
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	9
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ.....	10

Библиотека БГУИР

## ВВЕДЕНИЕ

Адаптивный фильтр — это фильтр с изменяемыми в процессе работы параметрами, набор которых во многом зависит от критерия работы адаптивного фильтра. Этим критерием часто является достижение минимума некоторой целевой функции, как правило, квадратичной функции ошибки между так называемым требуемым и выходным сигналами адаптивного фильтра. Достижение минимума целевой функции означает, что выходной сигнал адаптивного фильтра «близок» к требуемому сигналу, т.е. повторяет по форме этот сигнал.

Особенно актуальны алгоритмы адаптивной фильтрации в радиолокации. В радиолокации обычно используются отраженные от цели сигналы.

Обнаружение отраженного сигнала, как правило, осуществляется на фоне шумов и помех. Помехи по своей природе классифицируются как мешающие отражения или как мешающие излучения. Помехи нарушают нормальное функционирование РЛС или могут полностью подавить их. В связи с этим разработка и применение алгоритмов адаптивной фильтрации в радиолокации является необходимостью.

В рамках данной магистерской диссертации рассматривается способ применения адаптивной фильтрации для создания ААР. А именно будет изучена и реализована адаптивная пространственная фильтрация мешающих излучений, воздействующих на РЛС по боковым лепесткам диаграммы направленности. В основе автокомпенсации мешающих излучений лежат пространственные различия полезного сигнала и помехи, т.к. полезный сигнал принимается по основному лепестку диаграммы направленности антенны, а помеховый — по боковым лепесткам этой же антенны.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Сегодня антенные решетки все чаще используются в качестве антенн современных радиосистем различного назначения. Такие антенны не только обеспечивают немеханическое управление положением основного луча диаграммы направленности (ДН), но и позволяют менять форму ДН путем взвешивания принимаемых сигналов с помощью комплексных весовых коэффициентов. Последнее свойство лежит в основе работы адаптивных антенных решеток (ААР). Такая решетка представляет собой пространственный фильтр, а ее ДН – амплитудно-угловую характеристику, в которой можно формировать провалы в направлениях на источники помех. Так как современные радиолокационные станции (РЛС) работают в условиях постоянной помехово-шумовой обстановки, ААР способны значительно повысить их эффективность.

Поэтому целью данной магистерской диссертации выбрана тема «Система адаптивной фильтрации сигналов в трактах РЛС». Согласно техническому заданию, необходимо разработать блок автоматической компенсации мешающих излучений для системы с одним вспомогательным каналом.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Изучить принципы функционирования ААР и проанализировать существующие алгоритмы и способы реализации автокомпенсатора.
2. Провести анализ приведенной информации и разработать алгоритм и структурную схему функционирования блока АКМИ.
3. Реализовать блок АКМИ на ПЛИС.
4. Провести анализ полученных результатов.

## 1 КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Классическая адаптивная антенная решетка с двумя антенными элементами показана на рисунке 1. В адаптивной антенной решетке выделяют основную антенну  $a_1$ , выход которой содержит полезный сигнал и помеху, и дополнительную –  $a_2$  (компенсационную) антенну, которая, как правило, не должна содержать полезного сигнала. Такое условие является идеальным для работы ААР, но на практике выполняется редко. Компенсационные антенны имеют ДН, перекрывающий уровень боковых лепестков основной антенны. Адаптивные антенные решетки также известны как антенные компенсаторы помех, или компенсаторы боковых лепестков.

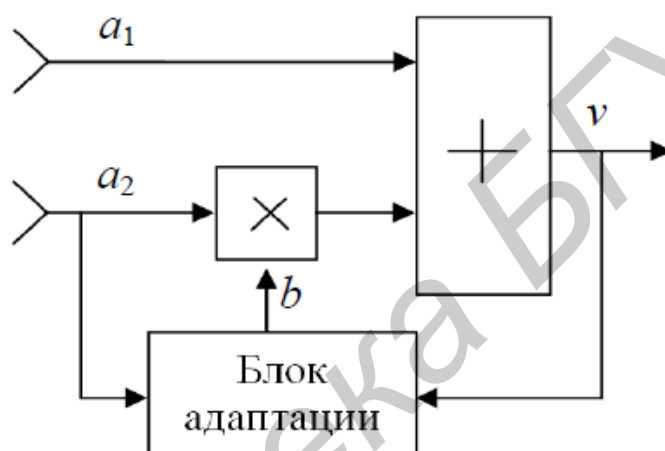


Рисунок 1 – Адаптивная антенная решетка (компенсатор боковых лепестков)

В ААР сигнал основного канала подается на сумматор с единичным весом, а сигнал компенсационного канала взвешивают, исходя из помеховой обстановки. При этом цель подстройки весового коэффициента  $w$  – обеспечение минимальной мощности шума  $D_v$  (мощности помехи) на выходе [1]. Выражение для  $w$  можно найти из условия  $D_v(w) = \min$ :

$$w = V^{-1}P \quad (1)$$

где  $V = M\{a_2 a_2^*\}$  – обратная суммарная матрица помех;

$P = M\{a_2 a_1^*\}$  – мощность сигнала на выходе компенсатора.

ААР состоит из основной антенны с узконаправленной ДН и одной или нескольких компенсационных антенн. Компенсационные антенны имеют ДН, перекрывающую уровень боковых лепестков основного канала рисунок 2.

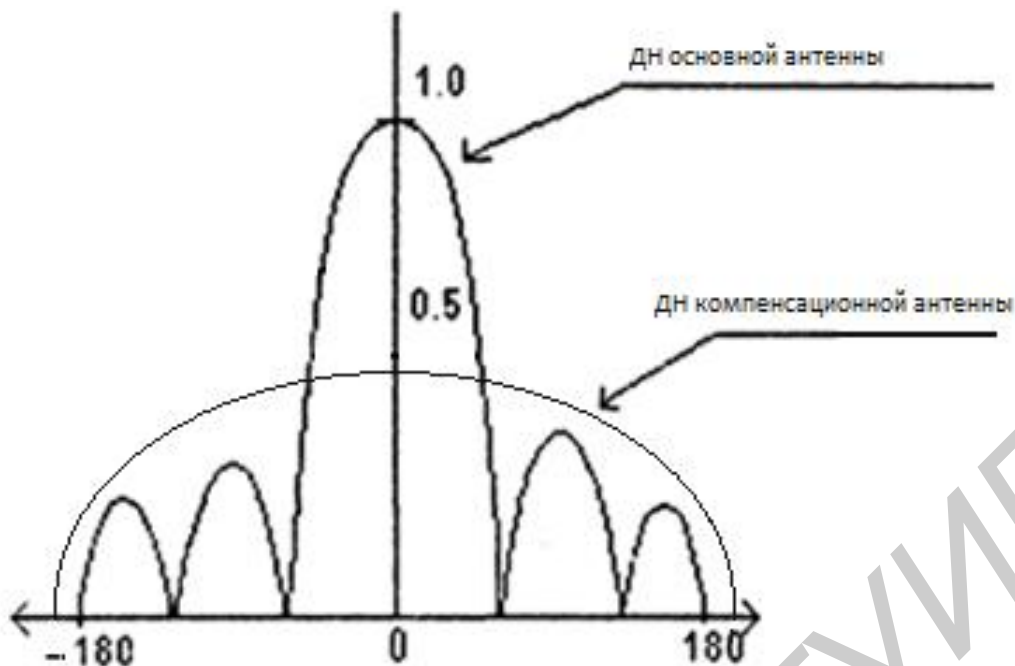


Рисунок 2 – Форма ДН основной и компенсационной антенн

Суть работы автокомпенсатора состоит в декорреляции выходного сигнала с основной антенны, принятой не по основному лепестку, от сигналов принятых компенсационной антенной. Сигналы в компенсационном канале будут коррелированы с помеховыми сигналами в основном канале.

Декорреляция осуществляется при помощи весовой обработки сигналов из дополнительных каналов с их последующим вычитанием из сигналов основного канала:

$$\dot{E}_{\Sigma} = \dot{E}_0 - \dot{w}_1 \dot{E}_{k1} - \dots - \dot{w}_N \dot{E}_N. \quad (2)$$

Выражение (3.1) выражает амплитуду остаточной части помехи на выходе АКМИ ( $\dot{E}_{\Sigma}$ ), для одной компенсационной антенны (3.1) примет вид:

$$\dot{E}_{\Sigma} = \dot{E}_0 - \dot{w}_1 \dot{E}_{k1}. \quad (3)$$

Выразим взаимокорреляционную функцию сигналов из основного и компенсационного каналов как :

$$\dot{R}_{OK} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\dot{E}_0[i] \dot{E}_{k1}^*[i]); \quad (4)$$

Мощность помех как:

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\dot{E}_k[i])^2; \quad (5)$$

Оптимальный весовой вектор как:

$$w_{\text{опт}} = \dot{R}_{\text{OK}}(\sigma_k^2)^{-1}; \quad (6)$$

Подставив выражение (3.5) в (3.2) мы получим (3.6) - решение задачи адаптивной фильтрации:

$$\dot{E}_{\Sigma} = \dot{E}_0 - \dot{R}_{\text{OK}}(\sigma_k^2)^{-1} \dot{E}_{k1}; \quad (7)$$

Структурная схема реализуемого блока представлена на рисунке 3

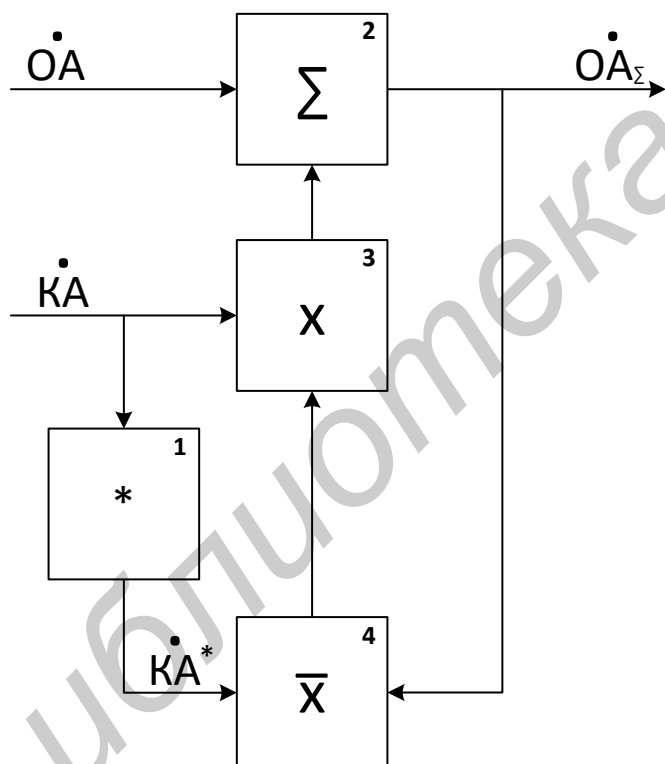


Рисунок 3 – Структурная схема ААР

Работоспособность и эффективность проектируемого блока АКМИ была подтверждена компьютерным моделированием трехлучевой ААР с числом элементов  $N = 8$ . Основные лучи трех решеток были ориентированы в направлениях:  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  на источники сигналов. Источник АШП (активной шумовой помехи) моделировался как белый шум и находился в направлении  $-20^\circ$ .

Отношение сигнал-шум на входе канала ПБЛ бралось равным – 20Дб, а в информационных каналах 30Дб. Шум в каналах имитировался как белый шум.

Результаты представлены на рисунке 4

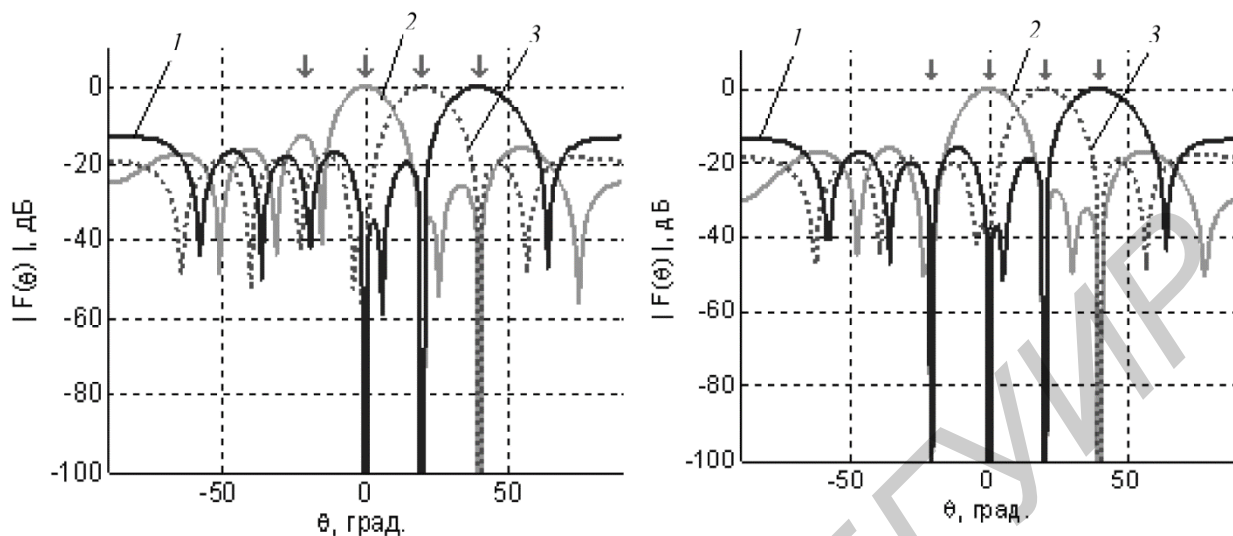


Рисунок 4 – Результаты проверки подавления блока АКМИ

Из анализа рисунка 4 следует, что некоррелированная помеха во лучах подавляется примерно одинаково, так как в установившемся режиме адаптивного процесса достигаются схожие значения ДН в направлении этой помехи. Длительность переходного процесса зависит от начального уровня бокового лепестка ДН в направлении помехи.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной магистерской диссертации разрабатывался блок автоматической компенсации мешающих излучений для РЛС.

Для проверки актуальности и эффективной реализации поставленной задачи был произведен обзор и глубокий анализ существующих алгоритмов и способов реализации адаптивной фильтрации в трактах РЛС. Было обнаружено, что существует большое количество математических описаний различных алгоритмов адаптивной фильтрации сигналов. Однако в связи с активным развитием технологий и появлением ПЛИС и SoC систем, только относительно недавно многие алгоритмы получили возможность их практической реализации. В связи с этим такие решения отсутствуют в открытом доступе и являются собственностью фирм их разработавших.

Таким образом практическая реализация различных адаптивных фильтров для РЛС является актуальной задачей.

Для реализации был выбран градиентный алгоритм (LMS). Выбор обуславливается тем, что данный алгоритм является простейшим с точки зрения вычислений и аппаратных затрат. При этом он имеет характеристик и эффективность, удовлетворяющие ТЗ.

Основной составляющей частью реализованного блока является корреляционный фильтр, который при относительной простоте является перспективным элементом и рассматривается в различных научных работах.

После проведения тестирования можно утверждать, что разработанная система в полной мере удовлетворяет требованиям технического задания. Обеспечивается хороший уровень подавления активной шумовой помехи, принятой по боковым лепесткам ДН.

На полученных результатах данная работа не будет прекращена. В будущем планируются дальнейшее усовершенствование и модернизация реализованного блока АКМИ.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

- [1] Егоров, А.В. Адаптивная фильтрация при обработке сигналов в трактах РЛС / А.В. Егоров, Я.Д. Конопелько // 56-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»: материалы конференции по направлению: встраиваемые вычислительные системы реального времени, 21-24 апреля 2020/ Минск – 2020.
- [2] Конопелько, Я.Д. Формирование диаграммы направленности цифровой фазированной антенной решетки/ Я.Д. Конопелько, А.В. Егоров // 56-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»: материалы конференции по направлению: встраиваемые вычислительные системы реального времени, 21-24 апреля 2020/ Минск – 2020.