

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.376.52

Нгуен
Динь Ван

Эффективность подавления нестационарных активных шумовых помех

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-39 80 01 “Радиосистемы и радиотехнологий”

Научный руководитель
ДАВЫДЕНКО Игорь Николаевич
Доцент кафедры ИРТ БГУИР
Кандидат технических наук, доцент

Минск 2022

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокация – область радиоэлектроники, обеспечивающая получение информации о целях путем приема и анализа радиоволн. Целями в зависимости от области применения радиолокации могут быть: самолеты, самолеты-снаряды, мины, головки баллистических ракет, танки, корабли и др. Радиолокационную информацию о целях составляет совокупность сведений о них, получаемых средствами радиолокации. Технические средства получения радиолокационной информации называют РЛС или радиолокаторами.

Актуальной задачей радиолокации является защита от воздействия мешающих излучений. Мешающие излучения могут проникать через боковые лепестки диаграммы направленности антенны радиолокатора. Они могут быть преднамеренными и непреднамеренными. По типу сигналов мешающие излучения могут быть непрерывными и импульсными. Защита от мешающих излучений может быть осуществлена снижением уровня боковых лепестков диаграммы направленности антенны, перестройкой рабочей частоты радиолокатора, увеличением мощности излучения передатчика. Основным способом защиты от мешающих излучений является применение автокомпенсаторов (АК).

На сегодняшний день активные шумовые помехи (АШП) являются нестационарными по времени и по пространству. Временная нестационарность рассматривается в виде импульсной модуляции амплитуды и пространственная в виде сканирования приемной диаграммы направленности. В этой работе анализируются математические модели нестационарной АШП и автокомпенсатора мешающих помех (АКМП). Рассматриваются алгоритмы работы одноканального автокомпенсатора и эффективности подавления нестационарных АШП для этих алгоритмов. Производится имитационное моделирование работы автокомпенсатора и разрабатываются предложения по его практическому использованию.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Защита от активных шумовых помех является важной задачей современной радиолокации. Обычно эта задача решается использованием автокомпенсаторов активных шумовых помех. Однако активные шумовые помехи могут носить нестационарный характер как по времени (прерывистые помехи), так и по пространству (сканирование приемной диаграммы направленности). В этих случаях эффективность подавления шумовой помехи будет снижаться. Поэтому анализ эффективности подавления нестационарных шумовых помех для различных алгоритмов работы автокомпенсаторов помех является актуальной задачей.

Степень разработанности проблемы

Анализ эффективности подавления автокомпенсатором стационарных активных шумовых помех достаточно хорошо разработан. При этом выделяют потенциальную эффективность подавления помех и эффективность подавления помех, обусловленную ошибками самонастройки. При подавлении нестационарных активных шумовых помех эффективность подавления помех снижается за счет повышения ошибок самонастройки: появляются ошибки переходного процесса и динамические ошибки, обусловленные перемещением приемной диаграммы направленности. Причем эти ошибки проявляются различным образом в различных алгоритмах работы автокомпенсатора: градиентных алгоритмов типа LMS, алгоритмов непосредственного обращения матрицы SMI, рекурсивных алгоритмов типа RLS. Однако анализ ошибок самонастройки автокомпенсаторов в условиях воздействия нестационарных помех еще слабо разработан. Есть ограниченные результаты по анализу ошибок в условиях воздействия пространственно нестационарных помех для классического алгоритма LMS. Практически отсутствуют результаты по подавлению активных помех с временной нестационарностью. Отсутствует анализ эффективности при совместном воздействии временной и пространственной нестационарности. Это затрудняет выбор алгоритмов работы автокомпенсатора из уже известных групп алгоритмов LMS, SMI, RLS и их модификаций

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является исследование эффективности подавления нестационарных АШП известными алгоритмами подавления.

Для достижения поставленной цели необходимо было выполнить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель нестационарной АШП.
2. Произвести обзор алгоритмов работы одноканального авторкомпенсаторов активных шумовых помех.

3. Исследование эффективности подавления автокомпенсаторами нестационарных активных шумовых помех.

4. Моделирование алгоритмов работы одноканального авторкомпенсаторов активных шумовых помех в среде MATLAB.

Объект исследования

Авторкомпенсаторы нестационарных активных шумовых помех.

Предмет исследования

Эффективности подавления нестационарных АШП известными алгоритмами подавления.

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли результаты известных исследований белорусских и зарубежных специалистов в области подавления АШП в системе радиолокации.

Все расчеты и полученные результаты подтверждались экспериментальными данными с помощью собранного опытного образца системы.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна

1. Известные алгоритмы подавления активных шумовых помех представлены как модификации некоторого обобщенного LMS алгоритма.

2. Представлены результаты анализа эффективности одноканальных автокомпенсаторов активных шумовых помех при подавлении нестационарных шумовых помех.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Математическая модель нестационарной активной шумовой помехи.

2. Алгоритмы работы обобщенного одноканального автокомпенсатора активной шумовой помехи.

3. Математические модели одноканальных автокомпенсаторов помех для различных алгоритмов работы.

4. Эффективность подавления нестационарных шумовых помех одноканальными автокомпенсаторами.

Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 75-ой и 76-ой всероссийской конференции "Радиоэлектронные

устройства и системы для инфокоммуникационных технологий" посвящённая "Дню Радио" , 24-ой международной конференции "Цифровая обработка сигналов и её применение" и Республиканской научно-технической конференции "Информационные радиосистемы и радиотехнологии".

Публикации

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 6 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций. Общий объем публикаций 30 страниц.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четыре главы с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе рассматриваются обзор литературы по активным шумовым помехам и принципам работы автокомпенсаторов.

Во второй главе проведены математические модели нестационарных АШП и алгоритмы их формирования.

В третьей главе проведены алгоритмы работы автокомпенсаторов шумовых помех и их математические модели.

В четвертой главе проведен анализ эффективности подавления нестационарных активных шумовых помех.

Общий объем диссертационной работы составляет 75 страниц. Из них 55 страниц основного текста, 35 иллюстраций, 2 таблицы, библиографический список из 33 наименований, список собственных публикаций соискателя из 6 наименований, 1 приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводятся обоснование актуальности работы, основные задачи в системе радиолокации и основные виды нестационарных активных помех.

Первая глава носит обзорный характер. В ней даны понятия помехи в системе радиолокации, распространенные способы защиты от мешающих помех и принцип работы и технические способы реализации АКМП.

Автокомпенсатор мешающих помех (АКМП) представляет собой следящий измеритель весового коэффициента ω , принцип работы которого заключается в интегрировании (сглаживании) сигнала ошибки измерения. Автокомпенсатор предназначен для подавления активных шумовых помех, принимаемых по боковым лепесткам диаграммы направленности основной антенны.

Обобщенная структурная схема АКМП представлена на рисунке 1.

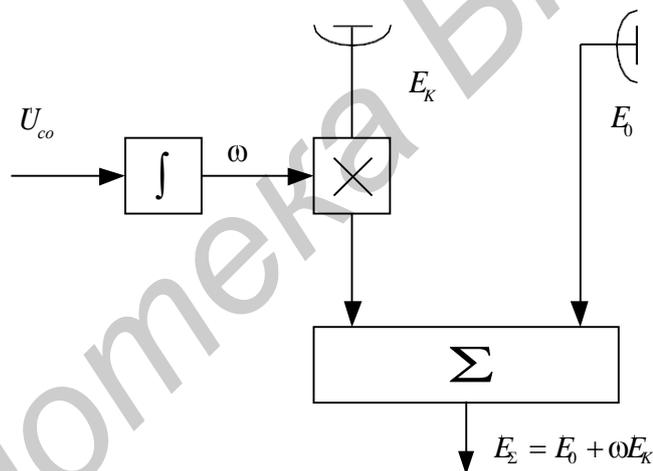


Рисунок 1 – Автокомпенсатор мешающих помех

В качестве критерия работы АКМП используется критерий минимума мощности выходного сигнала:

$$F^{AKMP}(\omega) = P_{\text{вых}}(\omega) = |E_{\Sigma}|^2 = E_{\Sigma} \cdot E_{\Sigma}^* \quad (1.2)$$

Графики, поясняющие принцип работы следящего измерителя весового коэффициента АКМП, приведены на рисунке 2 ($P_{\text{вых}}$ – мощность выходного сигнала автокомпенсатора; $P_{\text{мин}}$ – минимальная мощность выходного сигнала автокомпенсатора при оптимальном значении весового коэффициента $\omega_{\text{опт}}$)

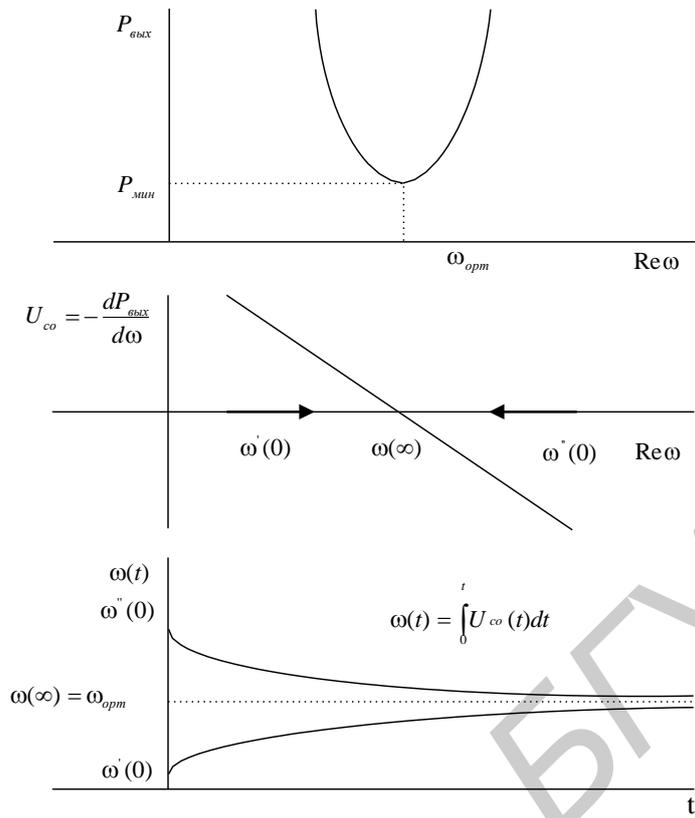


Рисунок 2 – Принцип работы следящего измерителя весового коэффициента

- Возможные структуры автокомпенсаторов можно рассматривать схемы:
- на радио-, промежуточной и видеочастоте
 - гетеродинные и квадратурные
 - одноканальные и многоканальные
 - аналоговые и цифровые

Вторая глава посвящена основным видам нестационарных активных шумовых помех. Временная нестационарность рассматривается в виде импульсной модуляции амплитуды и пространственная в виде сканирования приемной диаграммы направленности.

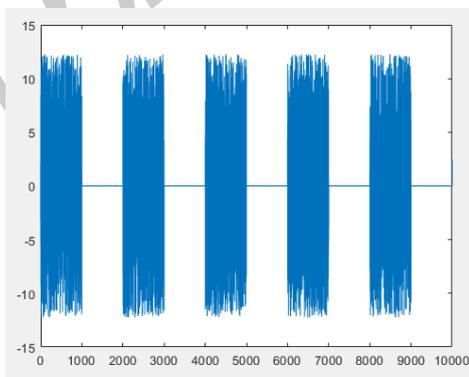


Рисунок 3 – Нестационарная активная шумовая помеха по времени

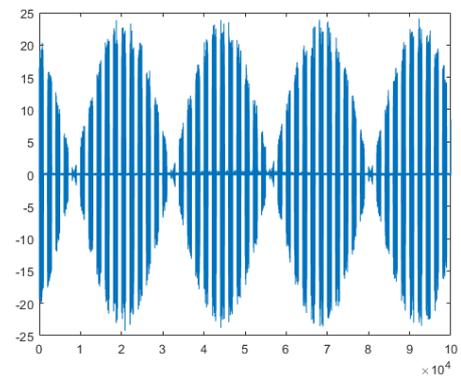


Рисунок 4 – Пространственно временная нестационарная активная шумовая помеха

Третья глава посвящена алгоритмы работы и математические модели одноканального автокомпенсатора мешающих помех.

Алгоритмы адаптивной пространственной обработки сигналов делятся на три большие группы, сильно отличающиеся формами записи и свойствами:

- алгоритмы, реализующие градиентный метод (*LMS*-алгоритм и его модификации);
- алгоритмы непосредственного обращения матрицы (*SMI*-алгоритмы);
- алгоритмы рекурсивных наименьших квадратов (*RLS*-алгоритмы).

Отличия в форме записи алгоритмов затрудняет сравнительный анализ их свойств и характеристик. В этой работе алгоритмы работы одноканального цифрового автокомпенсатора помех представлены как разновидности некоторого обобщенного *LMS*-алгоритма.

Эквивалентная форма записи алгоритмов имеет вид:

$$W(n) = W(n-1) - U_{\infty}(n) = W(n-1) - \mu(n) f(E_K(k)) E_K^*(n) E_{\Sigma}(n). \quad (2)$$

Эквивалентная структурная схема обобщенного одноканального автокомпенсатора, соответствующая выражению (2), приведена на рисунке 5.

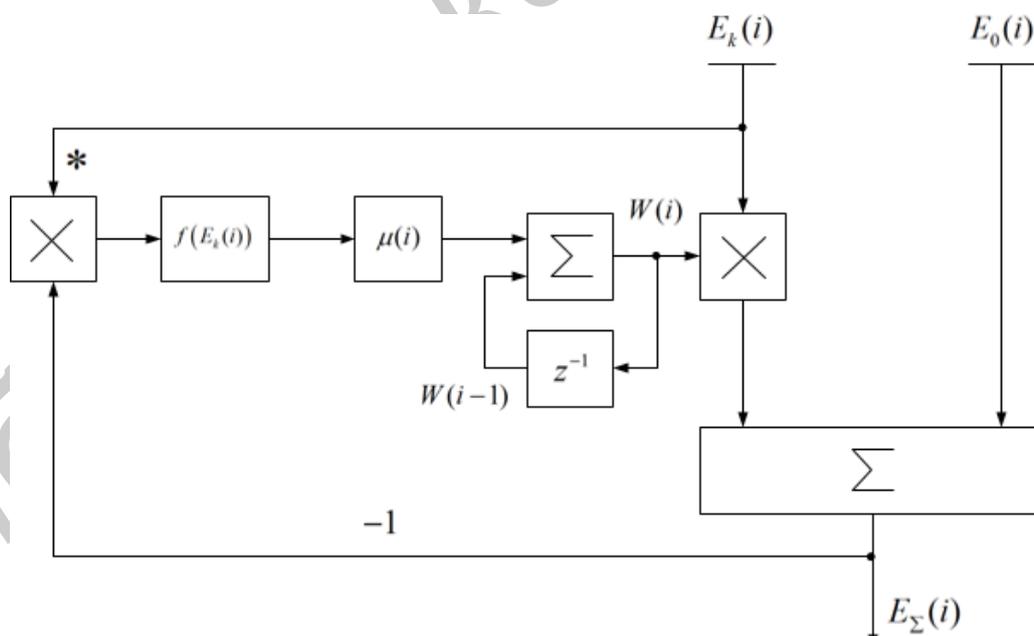


Рисунок 5 – Эквивалентная структурная схема обобщенного одноканального автокомпенсатора

Таблица, в которой представлены все алгоритмы работы одноканального автокомпенсатора и его параметры, имеет следующий вид.

Таблица 1–Алгоритмы работы одноканального автокомпенсатора и его параметры

Алгоритм	$\mu(n)$	$f(E_K(k))$	$U_{co}(n)$
<i>LMS</i>	μ	K_{Π}	$\mu K_{\Pi} E_K^*(n) E_{\Sigma}(n)$
<i>NLMS</i>	μ	$\frac{1}{ E_K(n) ^2}$	$\mu \frac{1}{ E_K(n) ^2} E_K^*(n) E_{\Sigma}(n)$
<i>LMS-Newton</i>	μ	$\frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n E_K(k) ^2}$	$\mu \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n E_K(k) ^2} E_K^*(n) E_{\Sigma}(n)$
<i>SMI</i>	$\frac{1}{n}$	$\frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n E_K(k) ^2}$	$\frac{1}{n \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n E_K(k) ^2} E_K^*(n) E_{\Sigma}(n)$
<i>RLS</i>	$\frac{1-\lambda}{1-\lambda^n}$	$\frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n E_K(k) ^2}$	$\frac{1}{\sum_{k=1}^n \lambda^{n-k} E_K(k) ^2} E_K^*(n) E_{\Sigma}(n)$

Дискретная система измерения весового коэффициента представлена на рисунке 6

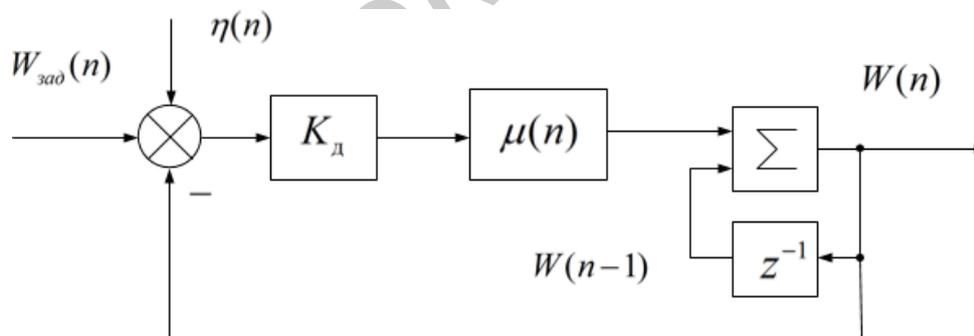


Рисунок 6 – Дискретная система слеящего измерителя весового коэффициента со случайной ошибкой на входе дискриминатора

Таблица, в которой представлены все математические модели одноканального автокомпенсатора и его параметры, имеет следующий вид.

Таблица 2 –Математические модели одноканального автокомпенсатора и его параметры

Алгоритм	$\mu(n)$	K_{Π}	$\overline{U_{co}(n)}$
<i>LMS</i>	μ	$2K_{\Pi} \sigma_k^2$	$K_{\Pi} \mu(n) (W_{зад} - W(n) + \eta(n))$
<i>NLMS</i>	μ	K_{Π}	$K_{\Pi} \mu(n) (W_{зад} - W(n) + \eta(n))$

LMS-Newton	μ	1	$K_d \mu(n) (W_{зад} - W(n) + \eta(n))$
SMI	$\frac{1}{n}$	1	$K_d \mu(n) (W_{зад} - W(n) + \eta(n))$
RLS	$\frac{1-\lambda}{1-\lambda^n}$	1	$K_d \mu(n) (W_{зад} - W(n) + \eta(n))$

Пространственная нестационарность рассматривается в виде сканирования диаграммы направленности приемной антенны. В этом случае динамическая ошибка увеличивается за счет скорости изменения задающего воздействия. Для минимизации влияния динамических ошибок самонастройки автокомпенсатора в РЛС могут использоваться системы самонастройки со вторым порядком астатизма.

$$\begin{cases} \frac{dW}{dt} = K_{11} (W_{зад}(t) - W(t) + \eta(t)) + V_W(t) \\ \frac{dV^W}{dt} = K_{12} (W_{зад}(t) - W(t) + \eta(t)) \end{cases} \quad (3)$$

В соответствии с приведенными уравнениями эквивалентная структурная схема измерителя весового коэффициента автокомпенсатора примет следующий вид:

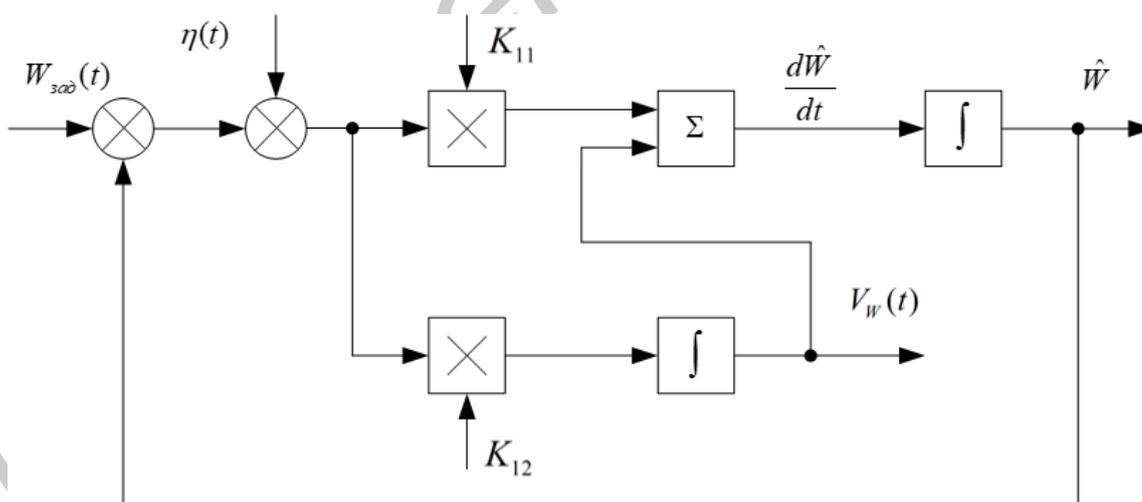


Рисунок 7 – Эквивалентная структурная схема измерителя весового коэффициента автокомпенсатора

В четвертой главе представлены эффективность одноканального автокомпенсатора мешающих помех и результаты компьютерного моделирования в среде MATLAB. Выражение для эффективности автокомпенсатора имеет следующий вид:

$$v_{ми} = \frac{|E_0|^2}{|E_0 + WE_k|^2} = \frac{1}{1 - r^2 + |\Delta W|^2 \frac{\sigma_k^2}{\sigma_0^2}} \approx \frac{1}{1 - r^2 + \left| \frac{\Delta W}{W_{опт}} \right|^2} \quad (4)$$

Потенциальная эффективность автокомпенсатора имеет место при отсутствии ошибок самонастройки весового коэффициента и описывается известным выражением [4.11]:

$$v_{ми.макс} = \frac{1}{1 - r^2}. \quad (5)$$

Потенциальная эффективность зависит только от модуля коэффициента межканальной корреляции сигнала помехи. Чем ближе коэффициент межканальной корреляции к 1, тем выше эффективность компенсации. Коэффициент межканальной корреляции обусловлен следующими факторами:

- межканальной временной задержкой сигнала;
- неидентичностью частотных характеристик каналов приема;
- влиянием пространственно-некоррелированного фона.

В реальных условиях эффективность автокомпенсатора будет снижаться из-за влияния ошибок самонастройки весового коэффициента в соответствии с выражением:

$$v_{ми} = \frac{1}{1 - r^2 + \frac{|\Delta W|^2}{|W_{опт}|^2}}$$

или

$$\frac{1}{v_{ми}} = \frac{1}{v_{ми\ пот}} + \frac{1}{v_{\Delta W}} \quad (6)$$

где $v_{\Delta W} = \frac{|W_{опт}|^2}{|\Delta W|^2}$ – частная эффективность автокомпенсации, обусловленная ошибками самонастройки весового коэффициента.

Частную эффективность автокомпенсации, обусловленную ошибками самонастройки, можно записать в следующем виде:

$$v_{\Delta W} = \frac{|W_{опт}|^2}{|\Delta W|^2} = \frac{1}{v_{пер}} + \frac{1}{v_{дин}} + \frac{1}{v_{фл}} \quad (7)$$

где $V_{\text{пер}}$, $V_{\text{дин}}$, $V_{\text{фл}}$ – частные эффективности автокомпенсации, обусловленные ошибками переходного режима, динамическими и флуктуационными ошибками, соответственно.

Можно выделить ошибки переходного режима, флуктуационные ошибки и динамические ошибки. Динамические ошибки обусловлены изменением задающего воздействия автокомпенсатора и его ограниченным быстродействием. Флуктуационные ошибки обусловлены возмущающим воздействием остатков компенсации помехи. Ошибки переходного процесса обусловлены начальными условиями и ограниченным быстродействием автокомпенсатора.

Результаты моделирования эффективности подавления временных нестационарных активных шумовых помех представлены на рисунках 8,9 и 10 в виде зависимости выходной мощности автокомпенсатора (дБ) от номера итерации и весовой коэффициент автокомпенсатора от номера итерации.

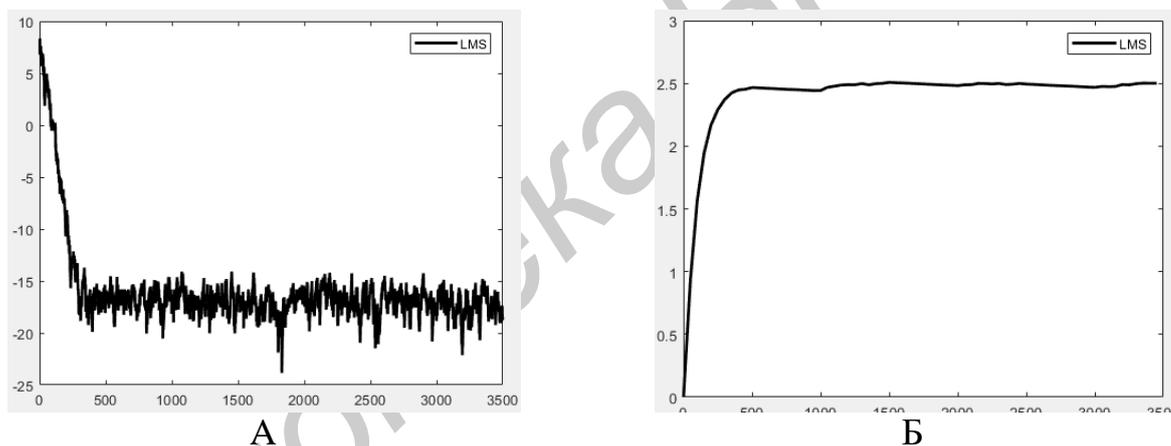


Рисунок 8 – Выходной мощности автокомпенсатора (А) и весовой коэффициент от номера итерации для алгоритмов *LMS*(Б)

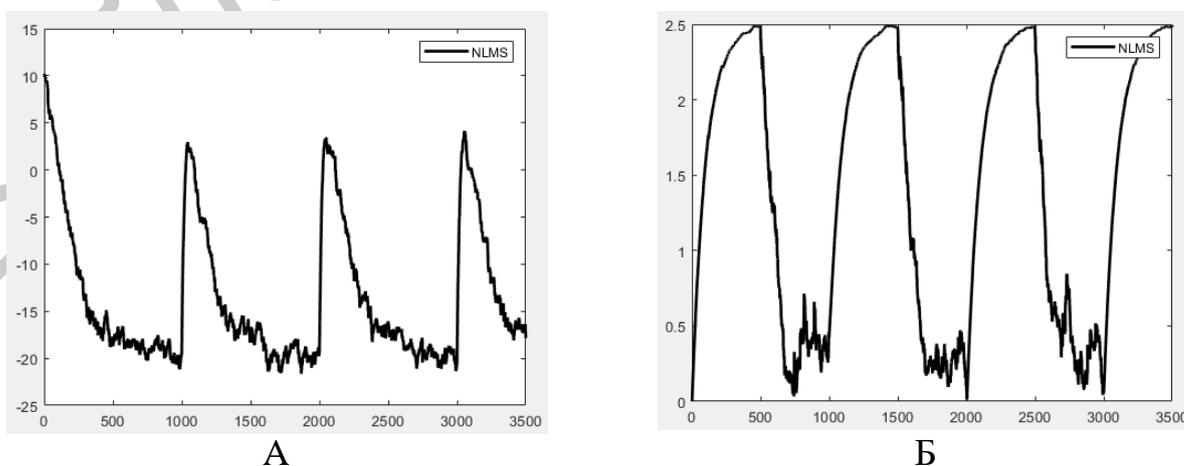
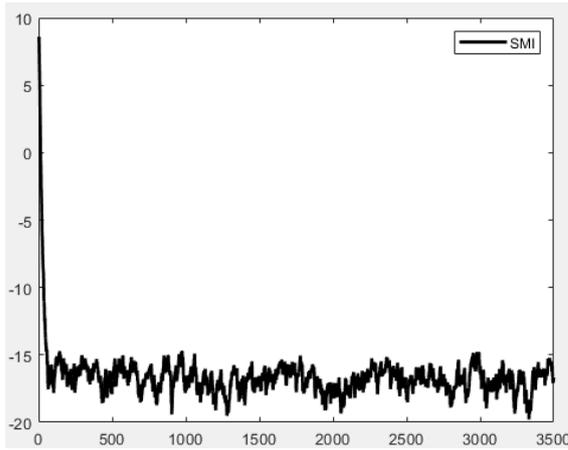
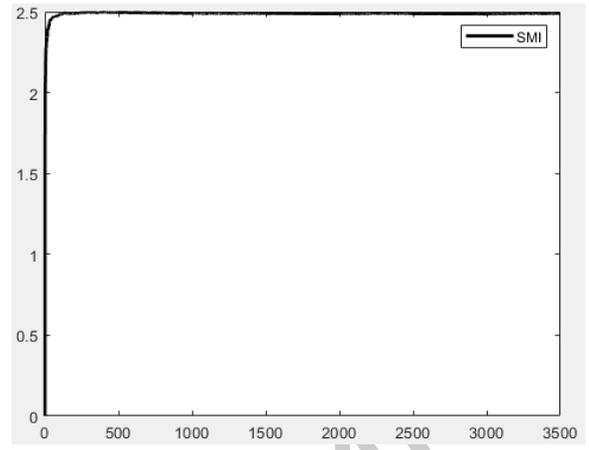


Рисунок 9 – Выходной мощности автокомпенсатора (А) и весовой коэффициент от номера итерации для алгоритмов *NLMS*(Б)



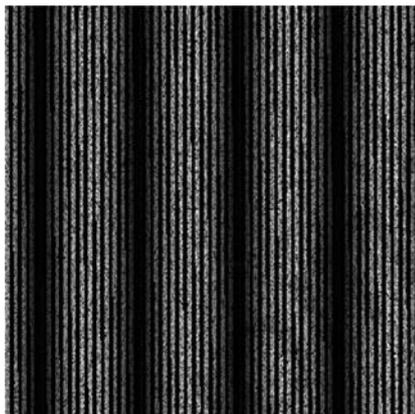
А



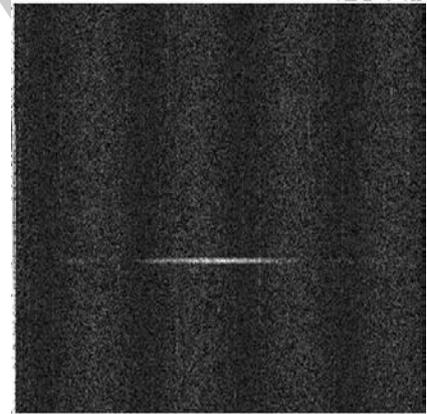
Б

Рисунок 10 – Выходной мощности автокомпенсатора (А) и весовой коэффициент от номера итерации для алгоритмов *SMI*(Б)

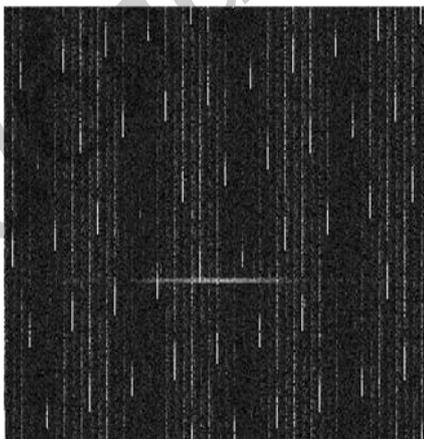
Результаты моделирования эффективности подавления пространственно временных нестационарных активных шумовых помех представлены на рисунке 11



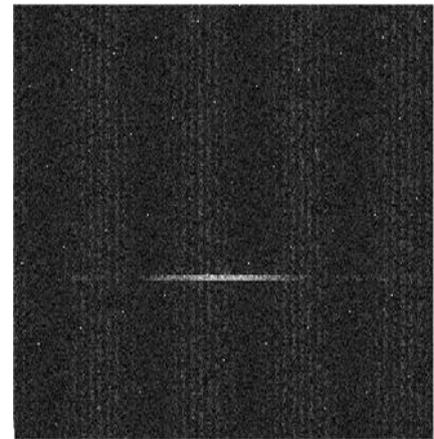
А



Б



В



Г

Рисунок 11 – Индикатора азимута и дальность при выключении АК (А), алгоритме *LMS*(Б), алгоритме *NLMS*(В) и алгоритме *RLS*(Г)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ эффективности подавления нестационарных активных шумовых помех показал что, Алгоритмы *LMS* и *RLS* дают хорошие эффективности подавления нестационарных активных шумовых помех. Алгоритм *NLMS* дает эффективности подавления нестационарных активных шумовых помех хуже, чем для алгоритмов *LMS* и *RLS*. Снижение эффективности алгоритма компенсации *NLMS* при подавлении нестационарной помехи связано с тем, что при кратковременном пропадании помехи происходит расстройка весовых коэффициентов за счет воздействия внутренних шумов каналов приема и при возобновлении действия помехи необходима повторная настройка весовых коэффициентов автокомпенсатора. Для алгоритма *LMS* быстроедействие автокомпенсатора зависит от мощности входного сигнала и сформированный за время действия мощной помехи весовой коэффициент практически не изменяется за время приема слабых по сравнению с помехой внутренних шумов каналов приема

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1. Нгуен Д. В. Сравнительный анализ эффективности одноканальных автокомпенсаторов непрерывных шумовых помех / С. М. Костромицкий, Д. В. Нгуен, И. Н. Давыденко // Базис, 2020. – №2(8). – С. 50-57.

2. Нгуен Д. В. Сравнительный анализ эффективности градиентных алгоритмов работы одноканального компенсатора непрерывной шумовой помехи/ С. М. Костромицкий, Д. В. Нгуен, И. Н. Давыденко /В сборнике: Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий - РЭУС-2020. Москва, 2020. С. 36-40.

3. Нгуен Д. В. Анализ эффективности подавления прерывистых активных шумовых помех / Нгуен Д. В. , Давыденко И. Н. // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: материалы Республиканской научно-практической конференции, Минск, 28-29 октября 2020 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. - Минск: БГУИР, 2020. - С. 269-273.

4. Нгуен Д. В. Эффективность алгоритмов *LMS* и *NLMS* при подавлении прерывистых шумовых помех / Д. В. Нгуен, И. Н. Давыденко /В сборнике: Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий - РЭУС-2021. Москва, 2021. С. 29-32.

5. Нгуен Д. В. Эквивалентная форма записи алгоритмов работы одноканального автокомпенсатора помех / Нгуен Д. В. , Давыденко И. Н./ В сборнике: ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ.

DSPA - 2022. Доклады на 24-ой Международной конференции. Москва, 2022. С. 311-316.

6. Нгуен Д. В. Анализ эффективности подавления нестационарных активных шумовых помех/ Д. В. Нгуен, И. Н. Давыденко // 58-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов / Радиотехника и Электроника / апрель, май 2020 года / сборник тезисов докладов / Минск БГУИР 2022. 169 с.

Библиотека БГУИР