

на правах рукописи

МАЛЯВИН ИГОРЬ ПАВЛОВИЧ

УДК 621.396.96: 621.391.26

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА ОТ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ  
НЕСТАЦИОНАРНЫХ АКТИВНЫХ ПОМЕХ

05.12.13 – Устройства радиотехники и средств связи

05.12.04 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕЗЮМЕ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

15 2010

Работа выполнена в Специальном проектно-конструкторском бюро "Дискрет" Одесского государственного политехнического университета.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Абрамович Юрий Иосифович.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, зав. кафедрой радиотехнических систем политехнического университета Баранов Порфирий Владимирович;
- кандидат технических наук, нач. сектора СКБ "Молния" Цыганов Олег Васильевич.

Ведущая организация - Украинский радиотехнический институт (г. Николаев).

Защита диссертации состоится 14 апреля 1994 г. на заседании специализированного совета Д 068.19.01 в Одесском государственном политехническом университете по адресу: 270044, г. Одесса, пр. Шевченко, 1, конференцзал ДК ОПУ, в 14.00

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан 11 марта 1994 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
Д 068.19.01

Д.С. Ямпольский

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00801541 (J)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Работа различных радиотехнических средств коротковолнового (КВ) диапазона (3...30 МГц) регламентирована Международными соглашениями, определяющими их частоты излучения. В связи с этим функционирование загоризонтных радиолокационных систем (ЗГ РЛС) возможно в ограниченных частотных поддиапазонах, которые, как правило, заполнены другими пользователями (средства связи, любительские радиостанции и т.п.), осложняющими работу РЛС как непреднамеренные активные помехи (АП). Для обеспечения наилучших условий работы необходимо в качестве рабочего использовать частотный канал с оптимальными характеристиками распространения сигнала на трассе возвратно-наклонного зондирования (ВЗ) "ЗГ РЛС - контролируемый сектор дальности". Если такой частотный канал занят другим пользователем, то для компенсации этой АП целесообразно применение адаптивных методов пространственной фильтрации, т.к. большинство рассматриваемых АП широкополосны и непрерывны во времени.

Однако в литературе отсутствуют достоверные данные о возможностях практического использования методов адаптивной пространственной компенсации АП, существенно нестационарных в КВ диапазоне, об их влиянии на последующую временную обработку смеси полезных сигналов и мощных пассивных помех (ПП), создаваемых подстилающей поверхностью.

Таким образом, актуальность темы обусловлена необходимостью детального исследования эффективности адаптивной пространственной компенсации реальных непреднамеренных АП с целью существенного повышения эффективности создаваемых ЗГ РЛС.

**Цель работы.** Разработка и исследование эффективности адаптивных алгоритмов и устройств пространственной компенсации реальных непреднамеренных АП с учетом их существенной нестационарности, а также исследование эффективности совместной пространственной и временной обработок сигналов на фоне нестационарных АП в современных ЗГ РЛС.

### Задачи исследований:

1. Провести экспериментальный анализ эффективности известных методов адаптивной пространственной обработки при компенсации реальных АП КВ диапазона, на основании которого вскрыть противоречие, возникающее при их использовании в ЗГ РЛС.

2. Уточнить математические модели пространственно-временных характеристик (ПВХ) АП и ПП, адекватные экспериментальным данным.

3. На основании уточненных моделей ПВХ АП и ПП, и экспериментальных результатов разработать новые алгоритмы адаптивной простран-

венной фильтрации, лишённые вскрытых недостатков известных методов.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались теория вероятности и математическая статистика, теория матриц, моделирование на ЭВМ и непосредственное экспериментальное исследование эффективности известных и разработанных алгоритмов.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Доказана пространственная (азимутальная) нестационарность большинства ( $\approx 90\%$ ) сигналов АП, приходящих по ионосферному каналу пространства, на интервалах наблюдения, соизмеримых с временем когерентной временной обработки полезных сигналов и ПП; определен интервал пространственной стационарности таких помех, в течение которого гарантируется заданная эффективность компенсации.
2. На основании полученных экспериментальных результатов выявлено противоречие, возникающее при использовании известных методов адаптивной пространственной обработки при компенсации реальных сигналов АП КВ диапазона, суть которого состоит в том, что применение на всем интервале временной обработки ПП и полезных сигналов единственного пространственного фильтра с предварительным обучением, гарантирующего сохранение спектральных характеристик ПП, не позволяет в подавляющем большинстве случаев ( $\approx 90\%$ ) максимизировать отношение "сигнал/активная помеха+шум" ( $s/ap+\mu$ ), а адаптивная перенастройка пространственного фильтра в каждом периоде повторения, гарантирующая максимальный выигрыш в отношении " $s/ap+\mu$ ", декоррелирует ПП, что делает невозможным обнаружение слабого полезного сигнала.
3. На основании полученных экспериментальных результатов разработан алгоритм пространственной компенсации нестационарных помех, названный "интегральным", учитывающий флуктуации АП во всех периодах повторения и гарантирующий сохранение спектральных характеристик ПП.
4. На основании предложенных моделей ПЕХ ПП, состоятельность которых обоснована представленными результатами обработки реальных сигналов ПП, разработан метод нестационарной пространственной фильтрации, максимизирующий отношение " $s/ap+\mu$ " в текущем периоде повторения при дополнительных стохастических ограничениях, используемых для стабилизации авторегрессионной (АР) модели ПП.
5. Разработан метод нестационарной пространственной фильтрации со стабилизацией доплеровского спектра ПП, обеспечивающий эффективность "интегральной" адаптивной пространственной обработки на коротких интервалах времени (несколько сек), при сохранении уровня боковых лепестков доплеровского спектра ПП на длительных интервалах когерент-

ой временной обработки (десятки сек).

Практическая ценность результатов диссертационной работы состоит в том, что разработаны рабочие адаптивные алгоритмы и структуры устройств пространственной компенсации нестационарных (на интервале когерентной временной обработки) АП, внедренные и принятые к внедрению Заказчиком для действующей и проектируемых ЗГ РЛС.

Внедрение результатов работы проводилось в рамках НИР, ОКР и экспериментальных работ, выполненных в 1986–1992 г.г. в СПКБ "Дискрет" Одесского политехнического института по заказам предприятия НИИДАР в интересах Изделий ГП-120М, 29-Б6, 5П-21:

1. Разработан, испытан и введен в состав Изделия ГП-120М алгоритм компенсации непреднамеренных АП (КНАП), реализующий "интегральный" метод. Экспериментально подтверждена расчетная эффективность компенсации нестационарных АП в рекомендовавших частотных каналах, составляющая в заданном диапазоне 11–22 МГц величину 6–8 дБ. Решение о включении блока КНАП в состав Изделия и протокол государственных испытаний подписаны Главным конструктором Изделия.

2. Разработаны и приняты Заказчиком адаптивные алгоритмы пространственной обработки по теме 29Б-6 – "интегральный" метод, и по теме 5П-21 – алгоритм с дополнительными линейными ограничениями со стабилизацией доплеровского спектра пассивной помехи.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всесоюзных и Республиканских научно-технических конференциях и семинарах: "Координационный семинар по вопросам адаптивной обработки сигналов", Одесса, 1987 г.; "Теория и техника пространственно-временной обработки сигналов", Свердловск, 1989 г.; "Вероятностные модели и обработка случайных сигналов и полей", Черкассы, 1991 г.; "Методы обработки многомерных сигналов в измерительных системах", Одесса (ОПИ), 1991 г.; "Проблемы повышения эффективности вооружения и военной техники Войск ПВО и способов их боевого применения", Одесса, 1991 г.

Публикации. По теме диссертации опубликованы работы [1–7].

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы из 173 наименований. Содержит 227 страниц, включая 144 страницы основного текста, 18 страниц таблиц, 39 страниц графиков и 18 страниц списка литературы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа эффективности известных методов адаптивной пространственной обработки при компенсации реальных непредна-

меренных АП КВ диапазона и результаты исследований ПБХ этих помех.

2. Алгоритмы компенсации нестационарных АП КВ диапазона:

- "интегральный", учитывающий флуктуации АП во всех периодах повторения ( $T_{II}$ ) и сохраняющий спектральные характеристики ПП;
- со стабилизацией ПБХ ПП, максимизирующий отношение "с/ап+ш" в текущем  $T_{II}$  при высоком качестве стабилизации спектра флуктуаций ПП;
- со стабилизацией доплеровского спектра ПП, обеспечивающий эффективность "интегральной" адаптивной пространственной обработки на коротких интервалах времени (несколько сек), при сохранении спектра ПП на длительных интервалах временной обработки (десятки сек).

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулированы цель и основные положения диссертации.

В первом разделе проведен обзор литературных источников, из которого следует, что в известных публикациях отсутствуют сведения об использовании известных методов пространственной компенсации реальных АП КВ диапазона, а также о влиянии этих методов на последующую временную обработку смеси полезных сигналов и пассивных помех, создаваемых подстилающей поверхностью. На основании проведенного обзора сформулированы цель и основные задачи исследований.

Во втором разделе рассмотрены модели ПБХ АП и ПП.

1. Одной из основных особенностей ЗГ РЛС является то, что в качестве приемной антенной системы используются крупноапертурные (сотни - тысячи метров) фазированные антенные решетки (ФАР), обеспечивающие высокое азимутальное разрешение. Наличие таких ФАР позволяет применять методы адаптивной пространственной компенсации АП, основанные на оценивании пространственных корреляционных матриц (ПКМ) источников помех. Необходимость проведения экспериментальных исследований обусловлена отсутствием в литературе данных о характеристиках ПКМ помеховых источников в раскрытые приемных ФАР.

В результате проведенных экспериментов установлено (п.2.1), что в большинстве случаев ( $\sim 90\%$ ) ранг ПКМ ( $r_{R_{АП}}$ ), сформированной при воздействии на приемную ФАР сигнала единственного источника АП, приходящего по ионосферному каналу распространения, выше ранга ПКМ, сформированной при воздействии тестового сигнала, распространяющегося поверхностной волной ( $r_{R_{\tau}}$ ), что, при отсутствии достаточного количества степеней свободы компенсирующего фильтра, приводит к снижению эффективности пространственной компенсации таких АП.

2. В качестве ПП рассмотрены отражения излучаемого сигнала от

морской поверхности как более общий случай отражения от подстилающей поверхности, характеризующиеся высокой межпериодной корреляцией.

В литературе приведены типичные доплеровские спектры сигналов, отраженных от морской поверхности, всегда содержащие два ярко выраженных пика, симметричных относительно нулевой частоты - т.н. пики "первого порядка". На основании известных из литературы данных, представленных результатов математического моделирования и экспериментальных исследований сигналов реальных ПП, в п. 2.2 сделан вывод о том, что в большинстве случаев для задач адаптивной пространственной компенсации нестационарных АП с последующим обнаружением полезных сигналов, отраженных от низкоскоростных целей, на фоне мощных ПП, сигнал самой ПП можно аппроксимировать во временной области процессом авторегрессии (АВР) второго порядка, а в пространственной - АВР-процессом первого порядка.

В третьем разделе: 1. Предложен алгоритм оценки стационарности АП, основанный на анализе соотношения выборочных значений мощности АП на непересекающихся временных интервалах; найдены статистические характеристики сформулированного критерия задачи проверки гипотез и оценки вероятности правильной классификации стационарных помех.

В системах, использующих для подавления нестационарных АП методы адаптивной фильтрации, возникает задача определения момента разладки, отстоящего от периода обучения на некоторый интервал, через который адаптивный фильтр уже не обеспечивает исходную эффективность. В диссертации рассмотрен тест проверки текущего коэффициента подавления помехи  $\eta$  фильтром  $\hat{W}$ , сформированным на интервале обучения:

$$\hat{\eta} = \frac{\hat{S}^* \cdot \hat{R}_1^{-1} \cdot \hat{S}}{\hat{S}^* \cdot \hat{R}_1^{-1} \cdot \hat{R}_2 \cdot \hat{R}_1^{-1} \cdot \hat{S}} = \frac{\hat{W}^* \cdot \hat{S}}{\hat{W}^* \cdot \hat{R}_2 \cdot \hat{W}} = \frac{\hat{W}^* \cdot \hat{R}_1 \cdot \hat{W}}{\hat{W}^* \cdot \hat{R}_2 \cdot \hat{W}} \quad (\hat{R}_1, \hat{R}_2 - \text{оценки ПКМ АП на интервалах } T_1 \text{ и } T_2)$$

$\hat{W} = \hat{R}^{-1} \hat{S}$ ,  $\hat{S}$  - фазор ПС,  $*$  - комплексное сопряжение и транспонирование.

В отличие от известных тестов о принадлежности выборочных ПКМ  $\hat{R}_1$  и  $\hat{R}_2$  семейству с неизменной матрицей  $R_1$ , предлагаемый тест выделяет только существенные для изменения отношения "сигнал/помеха" деформации ПКМ. Сопоставление алгоритма с одним из известных методов, основанным на анализе максимального собственного числа матрицы  $\hat{R}_1^{-1/2} \cdot \hat{R}_2 \cdot \hat{R}_1^{-1/2}$ , показало высокую эффективность предлагаемого метода.

2. Представлены результаты исследований эффективности обработки реальных АП КВ диапазона при использовании алгоритма, минимизирующего мощность действующих помех на выходе защищаемого канала.

Исследования, проводившиеся на аппаратно-программном комплексе (АПК) - количество приемных каналов  $N=12$ , эффективность пространст

венной компенсации широкополосных тестовых сигналов 30 дБ (п.3.2) - ставили перед собой задачи: 1) выявление особенностей и определение эффективности пространственной компенсации АП, источниками которых на трассах ионосферного распространения служили сигналы вещательных и реперных станций; 2) определение интервала пространственной стационарности таких АП, в течение которого гарантируется определенная эффективность подавления этой помехи уже сформированным фильтром.

На основании проведенных экспериментальных исследований (п.3.3) установлено, что в большинстве случаев в спектре собственных чисел (ССЧ) ПКМ АП, сигналы которых приходят по ионосферному каналу распространения, появляются дополнительные собственные числа. В качестве типичного примера в таблице приведены ССЧ  $\lambda_i$  (нормированные к старшему  $\lambda_1$ ) ПКМ, сформированных при действии на ФАР АПК широкополосного тестового сигнала, приходящего поверхностной волной (верхняя строка) и сигнала вещательной радиостанции, расположенной на удалении  $\approx 3500$  км (нижняя). Если для тестового сигнала отношение  $\lambda_2/\lambda_1 = -15$  дБ, (что хуже установленного потенциала из-за неидентичности частотных характеристик приемных каналов), то для сигнала вещательной станции это отношение составило всего "-7 дБ".

$\lambda_i$ , дБ	2	3	4	5	6	7	8	9
Тестовый	-15.	-19.	-22.	-26.	-28.	-30.	-30.	-30.
Вещательный	-7.	-11.	-14.	-19.	-23.	-26.	-28.	-30.

Методика исследований при решении второй задачи состояла в следующем. С использованием записанных в начальный момент времени выборок АП производилась адаптивная настройка пространственного фильтра, который затем применялся к реализации помехи от того же источника в момент времени, отстоящий от начального на заданный интервал.

Установлено, что для большинства ( $\approx 90\%$ ) АП, сигналы которых приходят на приемную АР по ионосферному каналу, время стационарности, гарантирующее их компенсацию на уровне 20-23 дБ, не превышает 100 мсек, что по сути, для данного класса РЛС означает необходимость перенастройки пространственного фильтра в каждом периоде повторения.

3. Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности совместной пространственной и временной обработок сигналов на фоне нестационарных АП.

Установлено (п.3.4), что в большинстве случаев адаптивная перенастройка пространственного фильтра в каждом периоде повторения с одной стороны максимизирует отношение "с/ап+ш", а с другой - декор-

релирует ПП. На рис. 1 приведены типичные результаты временной обработки (доплеровский спектр) реальной ПП в 20 периодах повторения на интервале 10 сек - типичный временной интервал когерентного накопления полезных сигналов и ПП в ЗГ РЛС - при перенастройке адаптивного фильтра в каждом из них в соответствии с изменениями углового спектра АП, создаваемой вещательной станцией (удаление 3500 км), при этом в выборке, содержащей пассивную помеху, активная помеха отсутствовала (кривая 1). Кривая 2 - исходный неискаженный доплеровский спектр ПП. Спектры рассчитаны методом взвешенного (весовая функция "-40 дБ") дискретного преобразования Фурье (ВДПФ).

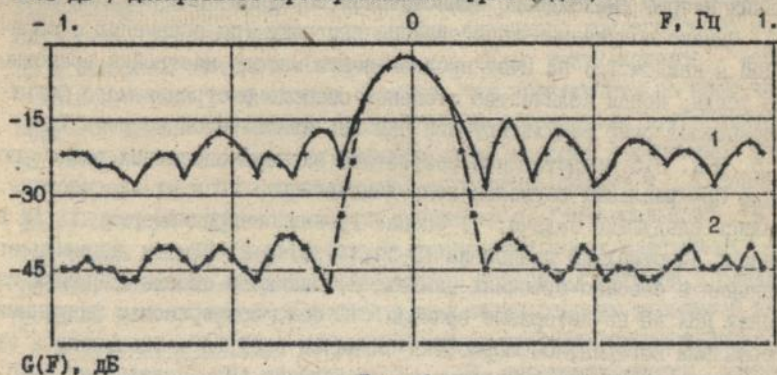


Рис. 1

Из результатов исследований пространственно-корреляционных характеристик (ПКХ) реальных ПП (п.3.4) следует, что при характерном широком пространственном спектре ПП в канале обнаружения формируется не только главным "стабилизированным" пиком, но и боковыми лепестками диаграммы направленности (ДН) ФАР в достаточно широком угловом секторе. При этом флуктуации ДН, вызванные перенастройкой пространственного фильтра в соответствии с текущими изменениями амплитудно-фазового распределения (АФР) АП, немедленно ухудшают коррелированность ПП в соседних периодах повторения ( $T_{\Pi}$ ).

4. На основании анализа результатов экспериментальных исследований характеристик стационарности АП, в п.3.4 предложен метод и устройство решения задачи совместной пространственной и временной обработок, в котором единственный на весь интервал когерентного накопления ( $T_{\text{КН}}$ ) пространственный фильтр формируется по результирующей, накопленной за весь  $T_{\text{КН}}$ , ПКМ АП, построенной по выборкам последней, взятых из каждого  $T_{\Pi}$ :

$$\hat{R}_{\text{АП}} = \frac{1}{KV} \sum_{K=1}^T \sum_{l=1}^V X_{lK} \cdot X_{lK}^* \quad (1)$$

где  $KV = T \cdot V$  ( $V$  - объем обучения),  $X_{tR}$  -  $N$ -мерный вектор  $t$ -ой выборки АП в  $R$ -ом  $T_{II}$ , количество которых  $T$ .

Затем через такой фильтр, названный "интегральным", пропускаются хранящиеся в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) выборки смеси АП, ШП и полезного сигнала. Дальнейшая обработка производится в соответствии со штатными алгоритмами обнаружения полезного сигнала на фоне ШП. Хотя в этом случае наблюдаются некоторые потери ( $\approx 5-6$  дБ) по сравнению с обработкой в каждом  $T_{II}$ , такой метод гарантирует сохранение спектральных характеристик ШП, и требует меньших вычислительных затрат (нахождение единственной обратной ПКМ АП для всего  $T_{KH}$ ). Однако полученные качественные выигрыши (по сравнению с обработкой в каждом  $T_{II}$ ) за счет предлагаемого метода настройки возможны лишь тогда, когда количество степеней свободы настраиваемого фильтра превышает ранг результирующей ПКМ АП, накопленной за весь  $T_{KH}$ .

5. В п. 3.5 представлены результаты экспериментальных работ по оценке ПБХ реальных сигналов непреднамеренных АП и их диагностике. Решались следующие задачи: 1) оценка уровня непреднамеренных АП в заданных участках КВ диапазона (9-11, 14-16, 18-21 МГц) и динамики его изменения в сезонно-суточных циклах; 2) оценка и анализ динамики изменения ПБХ АП на интервале времени  $10$  сек, соизмеримом с типичными интервалами когерентной обработки сигналов в ЗР РЛС. Оценивалась эффективность обработки (коэффициент подавления АП  $\eta$ ) следующих адаптивных пространственных фильтров ( $W$ ): с предварительным обучением при компенсации АП на интервале настройки фильтра (в дальнейшем -  $W_{MГН}$ ,  $\eta_{MГН}$ ); с предварительным обучением при компенсации результирующей ПКМ АП, накопленной за весь период временной обработки в соответствии с (1) -  $W_{\Sigma}$ ,  $\eta_{\Sigma}$ ; "интегрального" фильтра, сформированного по результирующей ПКМ АП, при ее же компенсации -  $W_{инт}$ ,  $\eta_{инт}$ .

В результате проведенных экспериментов множество анализируемых помеховых каналов можно условно классифицировать следующим образом: - каналы, непригодные для пространственной обработки: эффективность внутрипериодной адаптивной обработки  $\eta_{MГН}$  крайне низкая (1-2 дБ). Относительное количество таких частотных каналов составило  $\approx 10\%$ ; - каналы, в которых значение  $\eta_{MГН}$  - высокое,  $\eta_{\Sigma}$  - низкое, а  $\eta_{инт}$  незначительно (5-6 дБ) уступает  $\eta_{MГН}$ . В таких каналах, относительное число которых - 35%, эффективно использование "интегральных", в соответствии с (1), методов оценки ПКМ АП в стробах обучения, принадлежащих всему  $T_{KH}$ :

- каналы, в которых наряду с высоким значением  $\eta_{MГН}$  достаточно вы-

сокие коэффициенты  $\eta_{\Sigma}$  и  $\eta_{\text{ИНТ}}$ . Такие каналы, характеризующиеся стационарностью пространственных характеристик АП на интервале  $T_{\text{КН}}$ , пригодны для использования совместно со "стационарными" (с предварительным обучением) методами адаптивной пространственной фильтрации. Относительное число таких частотных каналов составило  $\approx 10\%$ . - каналы, в которых подавление АП фильтром  $W_{\text{МГН}}$  оказывается достаточно эффективным, но подавление фильтрами  $W_{\Sigma}$  и  $W_{\text{ИНТ}}$  мало. Такие каналы можно использовать в ЗГ РЛС, если реализовать в составе ее средств методы быстрой (внутрипериодной) адаптивной пространственной обработки, обеспечивающие сохранение исходного доплеровского спектра ПП и полезных сигналов. Относительное число таких каналов -  $\approx 45\%$ .

Из полученных результатов следует, что практически во всем анализируемом диапазоне частот (9-21 МГц), в любое время суток существуют частотные каналы, относительное число которых достаточно велико (45%), в которых внутрипериодная обработка (фильтр  $W_{\text{МГН}}$ ) реализует более высокую эффективность по сравнению с "интегральной" ( $W_{\text{ИНТ}}$ ). Тем самым доказана необходимость разработки новых адаптивных алгоритмов, лишенных вскрытых недостатков известных методов. Следующие разделы диссертационной работы посвящены решению указанной задачи.

В четвертом разделе разработан метод пространственной фильтрации нестационарных на интервале  $T_{\text{КН}}$  АП, максимизирующий отношение "с/ап+ш" в текущем  $T_{\text{П}}$ , и обеспечивающий стабилизацию АВР-характеристик пространственно распределенных ПП за счет дополнительных стохастических линейных ограничений, налагаемых на вектор пространственного фильтра, число которых определяется порядком АВР-модели ПП.

1. Проведен анализ потенциальной эффективности стабилизированной нестационарной пространственной фильтрации. Для  $N$ -мерного вектора  $X_t$  - комплексной огибающей сигнала ПП на выходе ФАР - используется выбранная в п.2.2 АВР-модель 
$$X_t = - \sum_{i=1}^{k=2} A_i \cdot X_{t-i} + T_{\text{П}}^+ \xi_{\text{кт}} \quad (2),$$
 где  $A_i$  -  $[N \times N]$  матрицы - решения многомерного аналога уравнения Кла-Уолкера,  $\xi_{\text{кт}}$  - случайный вектор ошибок предсказания.

Рассмотрен широко распространенный на практике случай, когда вид ДН ФАР влияет только на мощность принимаемых сигналов ПП, оставляя практически неизменным вид доплеровского спектра. Таким свойством обладают рассматриваемые ПП, спектр межпериодной фликтуации которых в каждом элементе разрешения не зависит от угловой координаты. Получившиеся в этом случае диагональными матрицы  $A_i$  заменены скалярами  $b_i$  (п.4.1). Показано, что если для произвольного вектора простран-

отвенного фильтра  $W_t$ , осуществляющего компенсацию АП в  $t$ -ом периоде повторения, выполнены те же условия, что и для некоторого стационарного фильтра  $W_0$ :  $W_t^* \cdot X_{t-t} = W_0^* \cdot X_{t-t} = z_{t-t}$ ,  $t = \overline{1, K}$ . (3); то для указанного фильтра  $W_t$  выходная ПП статистически не отличима от ПП на выходе стационарного фильтра  $W_0$  и описывается АВР-уравнением,

совпадающим с исходным  $z_t = - \sum_{i=1}^K b_i \cdot z_{t-i} + \varepsilon_t$ .  $\varepsilon_t = W_t^* \cdot \xi_{Kt}$ . (4). Для

полезного сигнала с ожидаемым вектором  $S_0$  АФР на входе фильтра стационарность обеспечивается линейным ограничением:  $W_t^* \cdot S_0 = W_0^* \cdot S_0$ .

Решение задачи имеет вид  $W_t = R_{\text{ап}}^{-1}(t) \cdot T_t \cdot (T_t^* \cdot R_{\text{ап}}^{-1}(t) \cdot T_t)^{-1} \cdot Z_t^*$ , (5)

где  $T_t = \{S_0, X_{t-1}, \dots, X_{t-K}\}$ ,  $Z_t = \{W_0^* \cdot S_0, z_{t-1}, \dots, z_{t-K}\}$  причем последовательность величин  $\varepsilon_t$ , в силу независимости векторов  $\xi_t$  и  $\xi_{t+1}$

представляет собой белый шум с переменной дисперсией  $\sigma_t^2 = W_t^* R_{\text{пр}} W_t / \rho_0$ .  $R_{\text{пр}}$  - положительно определенная ПКМ ПП,  $R_{\text{ап}}(t)$  - ПКМ АП в  $t$ -ом  $T_{\Pi}$ .  $\rho_0 = E_1^T \cdot R_{\text{вр}}^{-1} \cdot E_1$ .  $R_{\text{вр}}$  - временная корреляционная матрица флуктуаций ПП.

В практически важных ситуациях, когда ПКМ ПП хорошо обусловлена и нестационарность вектора  $W_t$  определяется лишь деформацией во времени ПКМ АП, вариации мощности ошибок предсказания ПП ( $\sigma_t^2$ ) невелики.

Результаты математического моделирования (п.4.2) свидетельствуют о высокой потенциальной эффективности предложенного метода - потери в эффективности компенсации АП по сравнению с оптимальной обработкой в каждом периоде в типичных случаях не превышают 1 дБ, при этом потери в эффективности временной обработки ПП не превышают 1-2 дБ.

2. Проведен анализ эффективности адаптивного алгоритма компенсации нестационарных АП со стабилизацией АВР-характеристик ПП, основанного на априорном пространственно-временном различии АП и ПП.

Непосредственно использовать фильтр (5) невозможно в силу того, что при комбинированном воздействии помех предполагается одновременное присутствие как АП, так и ПП в исследуемых элементах разрешения.

В п.4.3 для модели классифицированной обучающей выборки, когда ПП, на фоне которой необходимо обнаружить полезный сигнал, локализована в пространстве и занимает ограниченную часть  $T_{\Pi}$ , при этом в  $T_{\Pi}$  можно указать интервал обучения, в котором присутствует лишь сигнал АП, а полезный сигнал и сигнал ПП отсутствуют, и пренебрегая дрейфом источников АП в пределах одного  $T$ , предложены стохастические линейные ограничения, налагаемые на изменяющийся во времени вектор пространственного фильтра  $W_f(t)$ , определяемый для произвольного  $t$ -ого  $T_{\Pi}$  из условия  $\min \left\{ \hat{W}_f^*(t) \cdot \left[ \sum_{l=0}^K \hat{R}_{\text{ап}}(t-l) \right] \cdot \hat{W}_f(t) \right\}$ , при огра-

нениях:  $\hat{W}_j^*(t) \cdot S_0 = 1$ ,  $\hat{W}_j^*(t) \cdot Y_{t-t,j} = \hat{W}_j^*(t-1) \cdot Y_{t-1,j}$  ( $t=1, K, j=1, J$ ), где  $K=2$ ,  $Y_{t,j}$  — анализируемые  $N$ -мерные выборки смеси АП, ПП и, возможно, полезного сигнала в  $j$ -м элементе разрешения  $t$ -го  $T_{II}$ .

Решение, получаемое аналогично (5), требует обращения в каждом  $T_{II}$  новой "скользящей" по текущим трем  $(K+1)$  периодам выборочной ПКУ АП и формирования в каждом элементе анализируемого разрешения  $J$  "своего" пространственного фильтра. Результаты экспериментальных исследований (п.4.4) показали высокую эффективность компенсации реальных АП при хорошем качестве стабилизации спектра флюктуаций ПП.

В пятом разделе для проектируемого Изделия предложен алгоритм и устройство нестационарной пространственной фильтрации, обеспечивающий эффективность "интегральной" (в соответствии с (1) обработки на интервалах времени 5-10 сек, при сохранении уровня боковых лепестков спектра ПП на длительном интервале когерентного накопления ( $T_{KH} = 60$  сек) и приемлемых вычислительных и аппаратурных затратах.

В соответствии с полученными экспериментальными результатами, наибольшей эффективностью пространственной обработки нестационарных АП обладает адаптивный алгоритм со стабилизацией АФР-характеристик ПП (раздел 4). Однако его использование в Изделии сопряжено с чрезмерными затратами, обусловленными вычислением в каждом  $T_{II}$  на интервале  $T_{KH}$  пространственного фильтра для каждого контролируемого канала дальности. С другой стороны, интервал  $T_{KH} = 60$  сек снижает эффективность "интегрального" единственного на весь  $T_{KH}$  адаптивного пространственного фильтра до эффективности обработки с предварительным обучением. Предложен новый алгоритм, являющийся компромиссным с точки зрения как его потенциальной эффективности, так требованиям, предъявляемым к аппаратурным (вычислительным) (ВС) средствам.

Весь  $T_{KH}$  разбивается на одинаковые (т.н. элементарные) стробы длительностью  $t_s$ , определяемой рабочим поддиапазоном частот тракта обнаружения. В пределах каждого строба формируется свой матричный пространственный фильтр индивидуально для каждого контролируемого канала дальности, по обучающим выборкам, содержащим сигналы только АП. Решается задача поиска такого  $N$ -мерного вектора пространственного фильтра  $\{W_{lk}\}$ , который для каждого  $l$ -го элементарного строба пространственной обработки обеспечивал в  $l$ -м угловом направлении и  $k$ -м канале дальности  $\max q = |\{W_{lk}\} \cdot S_l|^2 / (\{W_{lk}\} \cdot R_{ап} \cdot \{W_{lk}\})$ , при

$$\begin{cases} t_{lR}^{*} \cdot S_l = t_{-1} W_{lR}^{*} \cdot S_l = t_{-1} f_{lR1} \\ t_{lR}^{*} \cdot t_{-1} z_R^{(-)} = t_{-1} W_{lR}^{*} \cdot t_{-1} z_R^{(-)} = t_{-1} f_{lR2} \\ t_{lR}^{*} \cdot t_{-1} z_R^{(+)} = t_{-1} W_{lR}^{*} \cdot t_{-1} z_R^{(+)} = t_{-1} f_{lR3} \end{cases} \quad \text{где}$$

$q$  - отношение с/ш;  $R_{\text{ant}}^{-1}$  ( $N \times N$ ) ПММ АП для  $l$ -го строба пространственной обработки;  $S_l$  - фазор  $l$ -го луча приемной ДН;  $t_{-1} z_R^{(\pm)}$  - пространственные векторы отсчетов доплеровского спектра в  $k$ -м канале дальности, соответствующие частотам отрицательной и положительной составляющих "первого порядка" доплеровского спектра флюктуаций III (п.2.2), рассчитанным по выборкам  $(l-1)$ -го строба обработки.

Решение указанной задачи следует в виде (п.5.1):

$$t_{lR}^{*} = R_{\text{ant}}^{-1} \cdot t_{-1} C_{lR} \cdot [t_{-1} C_{lR}^{*} R_{\text{ant}}^{-1} \cdot t_{-1} C_{lR}]^{-1} \cdot t_{-1} F_{lR}^{*} \quad \text{где}$$

$$t_{lR}^{*} = [S_l, t_{-1} z_R^{(-)}, t_{-1} z_R^{(+)}] \quad N \times 3\text{-мерная матрица ограничений};$$

$$t_{lR}^{*} = [t_{-1} f_{lR1}, t_{-1} f_{lR2}, t_{-1} f_{lR3}] \quad 3\text{-мерный вектор ограничений}.$$

В п.5.2 определена минимальная длительность элементарного строба обработки:  $t_{c, \Gamma \Pi} \approx [0, 102 \cdot (F_p)^{0,6}]^{-1}$ , ( $F_p$  - рабочая частота в МГц).

В п.5.3 приведена структурная схема устройства, реализующего предлагаемый адаптивный алгоритм.

Основные особенности, отличающие предлагаемый метод от исходного (раздел 4) состоит в подходе к формулировке ограничений при решении задачи поиска вектора адаптивного пространственного фильтра. Вместо требования идентичности реакции предыдущего и последующего фильтров на одни и те же  $N$ -мерные пространственные выборки III во всем диапазоне доплеровских частот, указанные ограничения фиксируют значение отклика лишь двух частотных составляющих доплеровского спектра сигналов на выходе адаптивного фильтра. Представленные в п.5.4 результаты математического моделирования и экспериментальных исследований подтверждают справедливость предложенного подхода и свидетельствуют о высокой эффективности компенсации реальных АП предлагаемым алгоритмом при хорошем качестве стабилизации спектра флюктуаций III.

В п.5.5 приведены расчеты требуемой разрядности вычислений и определены требования к производительности средств, реализующих алгоритм: 20 млн. опер./сек (МЭлоп) при объеме ОЗУ 2,4 МБ. Применение же алгоритма, предложенного в разделе 4, требует для его реализации в проектируемом Изделии высокой производительности ВС - 400 МЭлоп.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Доказана взаимная нестационарность большинства ( $\approx 90\%$ ) сиг-

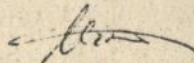
- налов АП, приходящих по ионосферному каналу распространения, на интервалах наблюдения, соизмеримых с временем когерентной временной обработки сигналов в ЗГ РЛС. Для таких пространственно нестационарных АП определен интервал - 100 мсек - в течение которого гарантируется их средняя компенсация на уровне  $\sim 20-23$  дБ, что по сути определяет необходимую частоту перенастройки пространственного фильтра.
2. Вскрыто противоречие, возникающее при использовании известных методов адаптивной пространственной обработки при компенсации реальных сигналов АП КВ диапазона, состоящее в том, что применение на типичном для ЗГ РЛС интервале когерентной обработки полезных сигналов и ПП (10 сек) единственного пространственного фильтра с предварительным обучением не позволяет в большинстве случаев ( $\sim 90\%$ ) максимизировать отношение "с/ап+ш", а адаптивная перенастройка пространственного фильтра в каждом периоде повторения (через 100 мсек), гарантирующая максимальный выигрыш в отношении "с/ап+ш", декоррелирует ПП, что делает практически невозможным обнаружение полезного сигнала.
3. Предложен "интегральный" метод решения задачи совместной пространственной и временной обработок, использование которого на типичных временных интервалах когерентной обработки позволяет в значительном количестве случаев ( $\sim 35\%$ ) удовлетворительно компенсировать нестационарную АП - средние выигрыши составляют 12-15 дБ, средние потери по сравнению с обработкой в каждом  $T_{\Pi}$  не превышают 6 дБ.
4. На основании предложенного алгоритма оценки стационарности АП в системах адаптивной фильтрации проведены экспериментальные работы по оценке ПЕХ сигналов АП КВ диапазона и их диагностике. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование такой диагностики в системах, обладающих средствами адаптивной пространственной обработки.
5. Разработан алгоритм стабилизации спектральных характеристик пространственно распределенной ПП, АВР-модель которой выбрана в разделе 2, при пространственной фильтрации АП, нестационарных на интервале когерентного накопления. Стабилизация достигается за счет дополнительных стохастических линейных ограничений, налагаемых на вектор пространственного фильтра, число которых определяется порядком АВР-модели ПП. Показано, что если размерность настраиваемого пространственного фильтра существенно превосходит порядок АВР-модели ПП, эффективность адаптивной пространственной компенсации нестационарной АП лишь незначительно ( $\sim 1-2$  дБ) уступает потенциальной.
6. Для проектируемого Изделия предложен алгоритм нестационарной пространственной фильтрации, обеспечивающий эффективность "интег-

ральной" адаптивной пространственной фильтрации в интервале времени 5-10 сек при сохранении уровня помех на всем интервале когерентного накопления ( $T_{\text{кн}} = 60$  сек) и приемлемых вычислительных (аппаратурных) затратах.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Абрамович Ю.И., Михайлюков В.Н., Малявин И.П. Проверка стационарности помех в системах адаптивной фильтрации. // Радиотехника и электроника, 1991, т.36, N 5, с. 909-919.
2. Абрамович Ю.И., Михайлюков В.Н., Малявин И.П. Стабилизация авто-регрессионных характеристик пространственно распределенных пассивных помех при нестационарной пространственной фильтрации. // Радиотехника и электроника, 1991, т.36, N 3, с. 490-500.
3. Абрамович Ю.И., Данилов Б.Г., Малявин И.П. Исследование эффективности оптимизации коммутационных антенных решеток в изменяющихся помеховых условиях. // Деп. в НИИЭИР, РТ N18, 1987, ВИМИ, N 3-8086.
4. Малявин И.П., Михайлюков В.Н. Эффективность адаптивной обработки в антенных решетках при неравноточных измерениях в каналах приема. / Деп. в НИИЭИР, РТ N10, 1989, ВИМИ, N 3-8676.
5. Абрамович Ю.И., Михайлюков В.Н., Малявин И.П. Стабилизация спектра ПП при пространственной фильтрации нестационарных АП. / Тез. докл. II Всесоюзная научно-техн. конференция "Теория и техника пространственно-временной обработки сигналов", Свердловск, 1989 г., с. 8.
6. Абрамович Ю.И., Михайлюков В.Н., Малявин И.П. Стабилизация авто-регрессионных характеристик ПП при пространственной компенсации нестационарных АП. Тез. докл. / Республ. школа-семинар "Вероятностные модели и обработка случайных сигналов и полей", Черкассы, 1991 г., с.25.
7. Малявин И.П. Метод стабилизации спектра ПП при нестационарной пространственной компенсации. Тез. докл. // 7-ой научно-техн. семинар "Проблемы повышения эффективности вооружения и военной техники Войск ПВО и способов их боевого применения", Одесса, 1991 г., с.34.

Соискатель



И.П.Малявин

ОПУ д.к. 62-100 2.03.44.