

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ ДЛЯ АДАПТАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ФИЛЬТРА

**Пиза Д. М.** – д-р техн. наук, проректор по НИР и ВПР, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

**Романенко С. Н.** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Защиты информации, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

**Семенов Д. С.** – начальник отдела, Казенное предприятие «Научно-производственный комплекс «Искра», Запорожье, Украина.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Для обеспечения помехозащищенности современных радиолокационных станций используют двухэтапную пространственно-временную обработку сигналов. Однако, при одновременном воздействии активной шумовой и пассивной помехи последняя декоррелирует активную помеху. Это существенно ограничивает помехозащищенность когерентно-импульсных радиолокационных станций. Поэтому формирование классифицированной обучающей выборки, порожденной только активной шумовой помехой, является достаточно актуальной задачей.

**Целью** работы является исследование корреляционного метода формирования классифицированной обучающей выборки в реальном масштабе времени путем текущего анализа модуля межканального коэффициента корреляции по дальности в каждом периоде повторения сигналов радиолокационной станции.

**Метод** реализуется формированием интервальной синхронной оценки как модуля межканального коэффициента корреляции, так и весовых коэффициентов пространственного фильтра. При этом, интервал с максимальным значением модуля межканального коэффициента корреляции определяется как классифицированная обучающая выборка, а сформированный на этом интервале весовой коэффициент используется для адаптации весового коэффициента пространственного фильтра при компенсации активной шумовой помехи в следующем периоде повторения сигналов радиолокационной станции.

**Результаты.** Рассмотрены теоретические и практические аспекты формирования классифицированной обучающей выборки. Разработана структурная схема пространственного фильтра с корреляционным анализом текущего распределения пассивной помехи по дальности посредством оценки модуля межканального коэффициента корреляции сигналов, действующих в каналах пространственного фильтра. Разработана и протестирована математическая модель адаптивного пространственного фильтра. Подтверждена возможность работы пространственного фильтра с формированием классифицированной обучающей выборки в реальном масштабе времени.

**Выводы.** Научная новизна проведенного исследования состоит в дальнейшей разработке нового метода формирования классифицированной обучающей выборки для адаптации пространственного фильтра. Показано, что текущий анализ модуля межканального коэффициента корреляции позволяет в реальном масштабе времени определить интервал, на котором отсутствует пассивная помеха, и сформировать обучающую выборку для адаптации весовых коэффициентов пространственного фильтра.

Практическая значимость определяется разработкой структурной схемы пространственного адаптивного фильтра и полученными результатами моделирования, при этом адекватность модели подтверждена аналитическими расчетами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** адаптивная пространственная обработка, комбинированная помеха, классифицированная обучающая выборка, моделирование.

### АББРЕВИАТУРЫ

АШП – активная шумовая помеха;  
ДНА – диаграмма направленности антенны;  
КОВ – классифицированная обучающая выборка;  
ММКК – модуль межканального коэффициента корреляции;  
ПП – пассивная помеха;  
ПФ – пространственный фильтр;  
РЛС – радиолокационная станция;  
ФКОВ – формирователь классифицированной обучающей выборки.

### НОМЕНКЛАТУРА

$\dot{k}_i$  – комплексное значение весового коэффициента ПФ на  $i$ - том интервале дальности;  
 $\dot{k}_{\text{опт}}$  – оптимальное комплексное значение весового коэффициента ПФ;  
 $\dot{U}_0$  – комплексное значение АШП и ПП в основном канале;

$\dot{U}_K$  – комплексное значение АШП и ПП в компенсационном канале;  
 $\dot{U}_K^*$  – комплексно – сопряженное значение АШП и ПП в компенсационном канале;  
 $\dot{U}_{A0}$  – комплексное значение АШП в основном канале;  
 $\dot{U}_{AK}$  – комплексное значение АШП в компенсационном канале;  
 $\dot{U}_{AK}^*$  – комплексно-сопряженное значение АШП в компенсационном канале;  
 $\dot{U}_{P0}$  – комплексное значение ПП в основном канале;  
 $\dot{U}_{PK}$  – комплексное значение ПП в компенсационном канале;  
 $|\dot{\rho}|_i$  – модуль межканального нормированного коэффициента корреляции в  $i$ -ом интервале дальности;

$|\rho|_{\max}$  – максимальное значение модуля межканального коэффициента корреляции на интервале дальности.

### ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения эффективной работы радиолокационных станций в условиях воздействия комбинированных помех используют двухэтапную пространственно-временную обработку сигналов. Однако, на интервалах дальности, где на РЛС одновременно воздействует активная шумовая и пассивная помеха, последняя декоррелирует активную шумовую помеху [1]. Это ухудшает коэффициент подавления АШП пространственным фильтром. В [2, 3] также показано, что при одновременном воздействии пассивной помехи скорость адаптации пространственного фильтра существенно замедляется. В [4] отмечается, что в условиях воздействия комбинированных помех потери в выходном отношении сигнал/помеха + шум при пространственно-временной обработке сигналов достигают 10–30 дБ. Поэтому для уменьшения потерь при пространственно-временной обработке, для адаптации значений весовых коэффициентов пространственного фильтра, необходимо тем или иным образом сформировать классифицированную обучающую выборку, порожденную только АШП.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известен частотный метод формирования КОВ. Метод основан на использовании спектральных отличий в структуре АШП и ПП. В [5, 6] в результате имитационного моделирования показано, что использование режекторных фильтров в цепях формирования весовых коэффициентов, настроенных на подавление пассивных помех, обеспечивает формирование КОВ, порожденной только АШП. Недостатком метода является ухудшение компенсации прицельных по частоте АШП. Еще одним недостатком метода, ограничивающим его применение при защите РЛС от АШП, действующих в направлении боковых лепестков диаграммы направленности антенны, является разнос антенн основного и компенсационного каналов в пространстве [7]. Поэтому оценка возможности формирования КОВ корреляционным методом при согласованной фильтрации сигналов в реальном масштабе времени является достаточно актуальной задачей.

### 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для формирования классифицированной обучающей выборки в [8] предложено использовать временной интервал, расположенный в конце дальности действия РЛС. Предложенное техническое решение основывалось на предположении, что интенсивность пассивной помехи по мере увеличения дальности существенно уменьшается. Однако, при пространственно распределенных кучево-дождевых облачных системах, даже на предельной дальности действия РЛС, интенсивность пассивных помех может существенно

превышать уровень собственных шумов приемного устройства.

В [9] предложен метод формирования классифицированной обучающей выборки, использующий естественную нестационарность пассивных помех по дальности [10]. Предложенный метод основан на использовании апостериорной информации относительно распределения пассивной составляющей комбинированной помехи по дальности. Поскольку при одновременном воздействии активной шумовой и пассивной помехи последняя декоррелирует активную помеху, то в упомянутой работе предложено производить текущую оценку распределения модуля межканального коэффициента корреляции по дальности. При этом вследствие нестационарности ПП по дальности представлялось возможным выбрать временной интервал для формирования классифицированной обучающей выборки. Настоящая статья является продолжением работ, выполненных авторами ранее.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Структурная схема пространственного фильтра с прямым вычислением весовых коэффициентов и корреляционным анализом распределения модуля межканального коэффициента корреляции по дальности представлена на рис. 1, где  $\dot{U}_0$  и  $\dot{U}_k$  – комплексные значения АШП и ПП, которые действуют в основном и компенсационном каналах, к которым подключены остронаправленная антенна А1 и слабонаправленная антенна А2, соответственно.

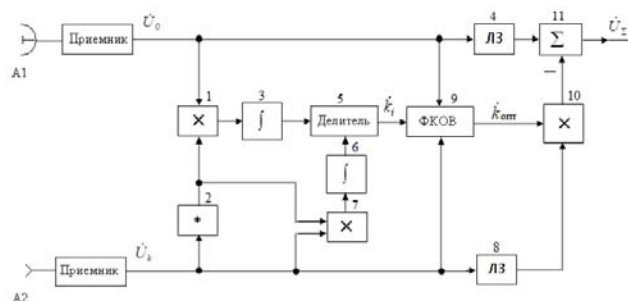


Рисунок 1 – Структурная схема пространственного фильтра

В представленной схеме блоки 1, 2, 3, 5, 6 и 7 предназначены для вычисления комплексного значения весового коэффициента ПФ  $k_i$  на интервалах дальности в каждом периоде повторения сигналов РЛС. В блоке формирования классифицированной обучающей выборки 9 производится выбор оптимального значения весового коэффициента, который соответствует максимальному значению модуля межканального коэффициента корреляции в пределах периода повторения на всех интервалах дальности.

Структурная схема ФКОВ представлена на рис. 2.

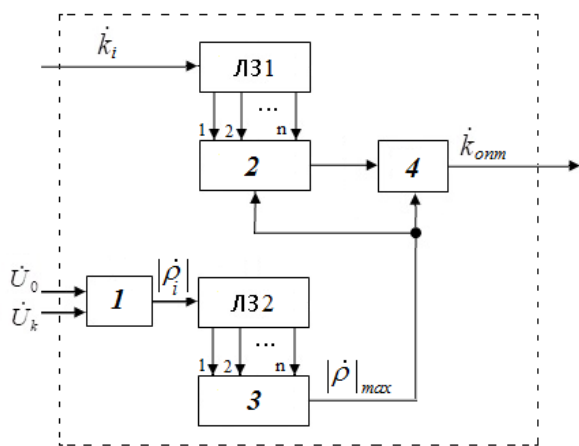


Рисунок 2 – Структурная схема ФКОВ

Здесь рассчитанные на интервалах дальности значения весовых коэффициентов  $\dot{k}_i$  последовательно поступают на вход многоотводной линии задержки ЛЗ1. Задержка между выходами ЛЗ1 равняется интервалу усреднения весовых коэффициентов. Вычисленные значения весовых коэффициентов с выходов ЛЗ1 поступают на входы  $n$ -канального коммутатора 2. Параллельно с вычислением весовых коэффициентов  $\dot{k}_i$  в блоке 1 выполняется расчет ММКК на тех же оценочных интервалах дальности. Полученные значения ММКК  $|\dot{\rho}_i|$  последовательно поступают на многоотводную линию задержки ЛЗ2. Задержка между отводами ЛЗ2 равняется интервалу усреднения оценки величины ММКК  $|\dot{\rho}|$ . С выводов линии задержки ЛЗ2 рассчитанные значения ММКК поступают на 1, 2, ...,  $n$  входы устройства выбора максимума 3, где анализируется  $n$  значений ММКК и формируется код позиционного номера входа, на котором реализуется максимальное значение  $|\dot{\rho}|_{\max}$ . Этот код поступает на управляющий вход коммутатора 2 и запоминающего устройства 4, в котором фиксируется оптимальное значение весового коэффициента  $\dot{k}_{\text{опт}}$ . Значение  $\dot{k}_{\text{опт}}$  поступает на вход комплексного умножителя 10 (см. рис. 1), где умножается на сигнал компенсационного канала  $\dot{U}_k$ . Результат умножения поступает на сумматор 11, в котором после сложения с сигналом основного канала  $\dot{U}_0$ , происходит компенсация АШП.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Моделирование пространственного фильтра, структурная схема которого представлена на рис. 1, осуществлялось с использованием пакета графического расширения SimuLink системы MATLAB. Моделирование проводилось при условиях, когда АШП действовала с направления боковых лепестков ДНА основного канала. При этом в направлении на АШП коэффициент усиления компенсационной антенны равнялся коэффициенту усиления по боковому лепестку основной антенны. ПП действовала с направлением главного лепестка ДНА основного канала. При этом коэффициент усиления основной антенны на 20 дБ превышал коэффициент усиления компенсационной антенны.

© Пиза Д. М., Романенко С. Н., Семенов Д. С., 2018  
 DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-4

стку основной антенны. ПП действовала с направлением главного лепестка ДНА основного канала. При этом коэффициент усиления основной антенны на 20 дБ превышал коэффициент усиления компенсационной антенны.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе исследований при оговоренных условиях моделирования для случая воздействия АШП по боковым лепесткам и воздействии пассивной помехи по главному лучу ДНА произведена оценка влияния пассивной помехи на компенсацию АШП. Моделирование проведено при различном отношении дисперсии активной шумовой помехи  $\sigma_{\text{АШП}}^2$  к дисперсии пассивной помехи  $\sigma_{\text{ПП}}^2$ . Результаты моделирования представлены на рис. 3. Из рис. 3 следует, что зависимость коэффициента подавления АШП от отношения дисперсий составляющих комбинированной помехи  $\sigma_{\text{АШП}}^2 / \sigma_{\text{ПП}}^2$  имеет нелинейный характер. Причем нелинейность полученной зависимости в большей степени происходит в области больших превышений пассивной помехи над активной. При моделировании для различных отношений дисперсий составляющих комбинированной помехи фиксировался ММКК  $|\dot{\rho}|_{\text{мод}}$  при формировании КОВ.

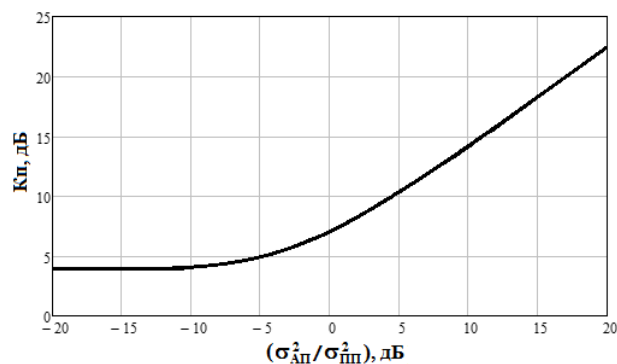


Рисунок 3 – Моделирование пространственного фильтра

Результаты моделирования сведены во вторую строку приведенной ниже таблицы.

При исследовании проводилась также проверка достоверности полученных результатов моделирования аналитическим методом. Известно [11], что в случае одного источника помехи ММКК вычисляется по следующему выражению:

$$|\dot{\rho}| = \frac{|\dot{U}_0 \dot{U}_K^*|}{\sqrt{|\dot{U}_0|^2 |\dot{U}_K|^2}} \quad (1)$$

В случае двух некоррелированных источников помех выражение (1) усложняется и принимает вид:

$$|\dot{\rho}| = \frac{|\dot{U}_{A0} \dot{U}_{AK}^* + \dot{U}_{П0} \dot{U}_{ПК}^*|}{\sqrt{(|\dot{U}_{A0}|^2 + |\dot{U}_{П0}|^2) \cdot (|\dot{U}_{AK}|^2 + |\dot{U}_{ПК}|^2)}} \quad (2)$$

где  $\dot{U}_{A0}$  и  $\dot{U}_{AK}$  – комплексные значения АШП, действующей в основном и в компенсационном канале;  $\dot{U}_{П0}$  и  $\dot{U}_{ПК}$  – комплексные значения ПП, действующие в тех же каналах. Результаты проведенных расчетов ММКК  $|\rho|_{ан}$  сведены в третью строку табл. 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования и расчета

Отношение $\sigma_{АШП}^2 / \sigma_{ПП}^2$ , дБ	20	10	0	-10	-20
$ \rho _{мод}$	0,996	0,960	0,770	0,573	0,770
$ \rho _{ан}$	0,996	0,963	0,774	0,575	0,774

Следует отметить, что значения  $|\rho|_{мод}$  брались в конце временного оценочного интервала дальности, когда автокомпенсатор уже выходит на устойчивый режим работы. Представленные в таблице результаты дают основание считать, что текущая оценка ММКК может обеспечить формирование обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов ПФ в реальном масштабе времени.

Анализ данных, представленных в таблице, показывает высокую точность совпадения результатов имитационного моделирования с результатами, полученными аналитическим методом. Это дает основание считать разработанную математическую модель адекватной структурной схеме адаптивного пространственного фильтра.

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Впервые установлено, что зависимость коэффициента подавления в области малых значений отношения  $\sigma_{АШП}^2 / \sigma_{ПП}^2$  имеет существенно нелинейный характер. Кроме того, из рис. 3 следует, что чем выше уровень пассивной помехи, тем меньше коэффициент подавления АШП. Этот результат совпадает с оценками, приведенными в работах Абрамовича Ю. И. [2, 3].

При проведении дальнейшей работы авторы статьи планируют исследовать динамические характеристики процесса компенсации АШП при воздействии многомодовой пассивной помехи, а также при наличии полезного сигнала.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана и протестирована модель адаптивного пространственного фильтра с формированием классифицированной обучающей выборки при подавлении АШП в каналах РЛС.

2. Текущий анализ модуля межканального коэффициента корреляции позволяет в реальном масштабе времени определить временной интервал дальности, на котором отсутствует пассивная помеха, и сформировать классифицированную обучающую выборку для

адаптации весовых коэффициентов пространственного фильтра.

3. Результаты моделирования с высокой точностью совпадают с данными теоретических расчетов, что дает основание считать разработанную математическую модель адекватной структурной схеме адаптивного пространственного фильтра.

## ЛИТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками / А. К. Журавлев, В. А. Хлебников, А. П. Родимов [и др.]. – Л. : Изд. Ленинградского университета, 1991. – 544с.
2. Абрамович Ю. И. Быстродействие поочередной настройки отдельных систем защиты от комбинированных помех / Ю. И. Абрамович, В. Г. Качур // Радиотехника и электроника, 1969. – Вып. 1. – С. 52–58.
3. Абрамович Ю. И. Предельная скорость сходимости процессов адаптивной настройки систем компенсации помех в условиях неклассифицированной обучающей выборки / Ю. И. Абрамович // Радиотехника и электроника. – 1982. – Вып. 8. – С. 1534–1538.
4. Григорьев В. В. Комбинированная обработка сигналов в системах радиосвязи / В. В. Григорьев. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2002. – 262 с.
5. Пиза Д. М. Метод компенсации активной составляющей комбинированной помехи в когерентно-импульсной РЛС / Д. М. Пиза, Е. А. Звягинцев, Г. В. Мороз // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2016. – № 6. – С. 23–29. DOI: 10.20535/S0021347016060030.
6. Пиза Д. М. Методы формирования классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов автокомпенсатора помех / Д. М. Пиза, Г. В. Мороз // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2018. – № 1. – С. 47–54 DOI: 10.20535/80021347016060030.
7. Монзинго Р. А. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер ; пер. с англ. под ред. В. А. Лексаченко. – М. : Радио и связь, 1986. – 445 с.
8. Адаптивные алгоритмы компенсации помех : учебно-методическое пособие / Д. Н. Ивлев, И. Я. Орлов, А. В. Сорокина, Е. С. Фитасов ; Мин-во образования и науки РФ, Нижнегородский гос. университет им. Н. И. Лобачевского. – Нижний Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2014. – 8 с.
9. Пиза Д. М. Метод формирования классификационной обучающей выборки для автокомпенсатора помех при время-пространственной фильтрации сигналов / Д. М. Пиза, В. Н. Лаврентьев, Д. С. Семенов // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2016. – № 3. – С. 18–22. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-3-2.
10. Атлас облаков / Федер. Служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Рос-гидромет), Гл. геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова; [Д. П. Беспалов и др.; ред.: Л. К. Сурыгина]. – Санкт-Петербург : Д'АРТ, 2011. – 248 с.
11. Ширман Я. Д. Разрешение и сжатие сигналов. – М. : Сов. радио, 1974. – 360 с.

Статья поступила в редакцию 28.08.2018.  
 После доработки 03.09.2018.

## КОРЕЛЯЦІЙНИЙ МЕТОД ФОРМУВАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ВИБІРКИ ДЛЯ АДАПТАЦІЇ ПРОСТОРОВОГО ФІЛЬТРА

**Піза Д. М.** – д-р техн. наук, проректор з НПр та ППР, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

**Романенко С. М.** – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри захисту інформації, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

**Семенов Д. С.** – начальник відділу, Казенне підприємство «Науково-виробничий комплекс «Іскра», Запоріжжя, Україна.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Для забезпечення заводо захищеності сучасних радіолокаційних станцій використовують двоетапну просторово-часову обробку сигналів. Однак, при одночасному впливі активної шумової та пасивної завади остання декорелює активну заваду. Це істотно обмежує заводо захищеність когерентно-імпульсних радіолокаційних станцій. Тому формування класифікованої навчальної вибірки, породженої тільки активною шумовою заводою, є досить актуальним завданням.

**Метою** роботи є дослідження кореляційного методу формування класифікованої навчальної вибірки в реальному масштабі часу шляхом поточного аналізу модуля міжканального коефіцієнта кореляції по дальності в кожному періоді повторення сигналів радіолокаційної станції.

**Метод** реалізується формуванням інтервальної синхронної оцінки як модуля міжканального коефіцієнта кореляції, так і вагових коефіцієнтів просторового фільтра. При цьому, інтервал з максимальним значенням модуля міжканального коефіцієнта кореляції визначається як класифікована навчальна вибірка, а сформований на цьому інтервалі ваговий коефіцієнт використовується для адаптації вагового коефіцієнта просторового фільтра при компенсації активної шумової завади в наступному періоді повторення сигналів радіолокаційної станції.

**Результати.** Розглянуто теоретичні та практичні аспекти формування класифікованої навчальної вибірки. Розроблено структурну схему просторового фільтра з кореляційним аналізом поточного розподілу пасивної завади по дальності за допомогою оцінки модуля міжканального коефіцієнта кореляції сигналів, що діють в каналах просторового фільтра. Розроблено і протестовано математичну модель адаптивного просторового фільтра. Підтверджено можливість роботи просторового фільтра з формуванням класифікованої навчальної вибірки в реальному масштабі часу.

**Висновки.** Наукова новизна проведеного дослідження полягає в подальшій розробці нового методу формування класифікованої навчальної вибірки для адаптації просторового фільтра. Показано, що поточний аналіз модуля міжканального коефіцієнта кореляції дозволяє в реальному масштабі часу визначити інтервал, на якому відсутня пасивна завада, і сформувати навчальну вибірку для адаптації вагових коефіцієнтів просторового фільтра. Практична значимість визначається розробкою структурної схеми просторового адаптивного фільтра і отриманими результатами моделювання, при цьому адекватність моделі підтверджена аналітичними розрахунками.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** адаптивна просторова обробка, комбінована завада, класифікована навчальна вибірка, моделювання.

UDC 621.396.95

## CORRELATION METHOD FOR FORMING THE TRAINING SAMPLE FOR ADAPTATION OF THE SPATIAL FILTER

**Piza D. M.** – Dr. Sc., Vice-Rector, Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine.

**Romanenko S. N.** – PhD, Associate Professor of the Department of Information Protection, Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine.

**Semenov D. S.** – Head of Department, State Enterprise “Scientific and Production Complex “Iskra”, Zaporozhye, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** To ensure noise immunity of modern radar stations, two-stage space-time signal processing is used. However, with simultaneous exposure to active and passive interference, the latter decorrelates the active interference. This significantly limits the noise immunity of coherent-impulse radar stations. Therefore, the formation of a classified training sample, generated only by active noise interference, is quite important task.

**Objective.** The aim of the work is to investigate the correlation method for the formation of a classified learning sample in real time by the current analysis of the interchannel correlation coefficient module over distance in each period of repeating the radar signal.

**The method** is realized by forming an interval synchronous evaluation of both the interchannel correlation coefficient modulus and the spatial filter weight coefficients. In this case, the interval with the maximum value of the interchannel correlation coefficient modulus is defined as the classified training sample, and the weight coefficient formed on this interval is used to adapt the spatial filter weight factor when the active noise interference is compensated in the next period of repeating the signals of the radar.

**Results.** The theoretical and practical aspects of the formation of the classified training sample are considered. It was developed a block diagram of the spatial filter with a correlation analysis of the current passive interference distribution over distance by estimating the interchannel correlation coefficient modulus of the signals acting in the channels of the spatial filter. A mathematical model of the adaptive spatial filter was developed and tested. The possibility of working a spatial filter with the formation of a classified training sample in real time has been confirmed.

**Conclusions.** The scientific novelty of the study is to further develop a new method for the formation of a classified training sample for the adaptation of a spatial filter. It is shown that the current analysis of the module of the interchannel correlation coefficient allows in real time to determine the interval on which there is no passive interference and to form a training sample for adaptation of the weight coefficients of the spatial filter.

Practical significance is determined by the development of the structural scheme of the spatial adaptive filter and the obtained simulation results, while the adequacy of the model is confirmed by analytical calculations.

**KEYWORDS:** adaptive spatial processing, combined interference, classified training sample, modeling.

#### REFERENCES

1. Zhuravlev A. K., Hlebnikov V. A., Rodimov A.P. i dr. *Adaptivnye radiotekhnicheskie sistemy s antennymi reshotkami*. Leningrad, Izd. Leningradskogo universiteta, 1991, 544 p.
2. Abramovich JU. I., Kachur V. G. *Bystrodeistvie poocherednoj nastrojki razdel'nyh sistem zashity ot kombinirovannyh pomeh*, *Radiotekhnika i elektronika*, 1969, Vyp. 1, pp. 52–58.
3. Abramovich JU. I. *Predel'naja skorost' shodimosti processov adaptivnoj nastrojki sistem kompensacii pomeh v uslovijah neklassificirovannoj obuchajushej vyborki*, *Radiotekhnika i elektronika*, 1982, Vyp. 8, pp. 1534–1538.
4. Grigor'ev V. V. *Kombinirovannaja obrabotka signalov v sistemah radiosvjazi*. Moscow, EKO-TRENDZ, 2002, 262 p.
5. Piza D. M., Zvjagincev E. A., Moroz G. V. *Metod kompensacii aktivnoj sostavljajushej kombinirovannoj pomehi v kogerentno-impul'snoj RLS*, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2016, No. 6, pp. 23–29. DOI: 10.20535/S0021347016060030.
6. Piza D. M., Moroz G. V. *Metody formirovanija klassificirovannoj obuchajushej vyborki dlja adaptacii vesovyh koeficientov avtokompensatora pomeh*, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2018, No. 1, pp. 47–54.
7. Monzingo R. A., Miller T. U. : per. s angl. pod red. Leksachenko V. A. *Adaptivnye antennye reshotki: vvedenie v teoriju*. Moscow, Radio i svjaz', 1986, 445 p.
8. Ivlev D. N., Orlov I. JA., Sorokina A. V., Fitasov E. S. *Adaptivnye algoritmy kompensacii pomeh: uchebno-metodicheskoe posobie* ; Min-vo obrazovanija I nauki RF, Nizhnenovgorodskij gos. universitet im. N. I. Lobachevskogo. Nizhnij Novgorod, NNGU im. N. I. Lobachevskogo, 2014, 8 p.
9. Piza D. M., Lavrent'ev V. N., Semenov D. S. *Metody formirovanija klassificirovannoj obuchajushej vyborki dlja avtokompensatora pomeh pri vremja-prostranstvennoj fil'tracii signalov*, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 3, pp. 18–22. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-3-2.
10. Bepalov D. P. i dr.; red. : Surygina L.K *Atlas oblakov / Fever. Sluzhba po gidrometeorologii i monitiringu okruzhashej sredy (Ros-gidromet), Gl. geofiz. observatorija im. A. I. Voejkova. Sankt-Peterburg, D'ART*, 2011, 248 p.
11. Shirman JA. D. *Razreshenie i szhatie signalov*. Moscow, Sov. radio, 1974, 360 p.