

# РАДИОЭЛЕКТРОНИКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

# РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

# RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.396.95

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ АКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ПОМЕХИ

**Пиза Д. М.** – д-р техн. наук, профессор кафедры радиотехники, национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина.

**Романенко С. Н.** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры защиты информации, национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина.

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

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** При одновременном воздействии активной шумовой и пассивной помехи последняя декоррелирует активную составляющую комбинированной помехи, что существенно ограничивает ее компенсацию. Кроме того, при воздействии активной помехи по боковым лепесткам диаграммы направленности при сканировании разнесенной в пространстве антенной системы возникают межканальные задержки помеховых сигналов, что также приводит к ухудшению компенсации.

**Цель.** Повышение эффективности компенсации активной составляющей комбинированной помехи, действующей по боковым лепесткам диаграммы направленности, при одновременном воздействии пассивной помехи.

**Метод.** Усовершенствованный алгоритм обработки радиолокационных сигналов с прямым вычислением весового коэффициента адаптивного пространственного фильтра и согласованной фильтрацией сигналов основного и компенсационного каналов. При этом влияние пассивной помехи на процесс адаптации весовых коэффициентов пространственного фильтра устраняется использованием режекторных фильтров.

**Результаты.** Разработана структурная схема усовершенствованного пространственного фильтра. Создана математическая модель. В процессе имитационного моделирования установлено, что предложенный алгоритм обработки радиолокационных сигналов в секторе боковых лепестков диаграммы направленности антенны  $[3^\circ-30^\circ]$  относительно главного луча обеспечил выигрыш в компенсации активной шумовой помехи, который составил от 6,0 до 6,4 дБ по сравнению с известной схемой адаптивного пространственного фильтра.

**Выводы.** Научная новизна работы состоит в усовершенствовании алгоритма обработки радиолокационных сигналов путем прямого вычисления весового коэффициента пространственного фильтра с использованием режекторных фильтров и согласованной фильтрации сигналов основного и компенсационного каналов.

Практическая новизна состоит в создании структурной схемы и математической модели усовершенствованного адаптивного пространственного фильтра. Результаты имитационного моделирования подтвердили достаточно высокую эффективность предложенного алгоритма обработки радиолокационного сигнала. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании или модернизации РЛС различного назначения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** активная помеха, пространственный фильтр, коэффициент подавления.

### АББРЕВИАТУРЫ

АС – антенная система;  
АШП – активная шумовая помеха;  
ДНА – диаграмма направленности антенны;  
ВК – весовой коэффициент;  
КОВ – классифицированная обучающая выборка;

ММКК – модуль межканального коэффициента корреляции;  
ПВО – пространственно-временная обработка;  
ПФ – пространственный фильтр;  
РЛС – радиолокационная станция;  
РФ – режекторный фильтр;  
СФ – согласованный фильтр.

## НОМЕНКЛАТУРА

$\dot{k}$  – комплексное значение ВК ПФ;

$K_{\Pi}$  – коэффициент подавления;

$F_{\text{в}}$  – верхняя частота спектра АШП;

$F_{\text{н}}$  – нижняя частота спектра АШП;

$\Delta F$  – полоса режекции пассивной помехи;

$\dot{U}_0$  – комплексное значение помеховых сигналов в основном канале;

$\dot{U}_K$  – комплексное значение помеховых сигналов в компенсационном канале;

$\dot{U}_K^*$  – комплексно – сопряженное значение помеховых сигналов в компенсационном канале;

$|\dot{U}_K|^2$  – дисперсия АШП, действующей в компенсационном канале;

$\dot{U}_{\Sigma}$  – комплексное значение помеховых сигналов на выходе ПФ;

$\theta$  – угол визирования;

$\mu$  – скалярная величина, определяющая глубину корреляционной обратной связи.

## ВВЕДЕНИЕ

В реальных условиях работы помехозащищенность когерентно-импульсных РЛС при одновременном воздействии активных шумовых и пассивных помех существенно ухудшается [1–3]. Известно [4], что фильтрация полезных сигналов при воздействии активных шумовых помех по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны реализуется путем использования пространственных отличий в направлениях воздействия сигнала и помехи. Поляризационная фильтрация обеспечивает выделение полезных сигналов на фоне активных помех, которые не совпадают по поляризации с полезным сигналом и может быть использована для компенсации активных помех, действующих по главному лучу диаграммы направленности антенны.

При комбинированном воздействии АШП и перетражений от пассивных отражателей пространственно-распределенный характер пассивной помехи разрушает пространственную корреляцию активной составляющей комбинированной помехи [5]. На участках дальности в угловых направлениях, где пассивная составляющая комбинированной помехи является преобладающей, компенсация активной помехи может оказаться вообще проблематичной [6]. Кроме того, наличие пассивной помехи приводит к существенному затягиванию переходных процессов при адаптации пространственных или поляризационных фильтров [7, 8].

Таким образом, для эффективной компенсации активной составляющей комбинированной помехи необходимо сформировать КОВ, порожденную только активной шумовой помехой. Формирование обучающей выборки может быть обеспечено использованием

существующих частотных отличий в структуре активной и пассивной помехи по методу, предложенному в [9] и частично исследованному в [10].

**Цель работы** состоит в повышении эффективности компенсации активной составляющей комбинированной помехи, действующей по боковым лепесткам ДНА, при одновременном воздействии пассивных помех.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В [9] предложен частотный метод формирования КОВ при адаптации ВК поляризационного фильтра для защиты РЛС от активной составляющей комбинированной помехи, действующей по главному лучу ДНА. Метод реализуется путем использования отличий в ширине спектра пассивной и активной шумовой помехи. Активная шумовая помеха, как правило, имеет более широкий спектр, чем пассивная помеха [11, 12]. Это позволяет сформировать КОВ путем режекции более узкополосной пассивной помехи в цепях формирования ВК адаптивного поляризационного фильтра. Проведенные экспериментальные исследования с использованием отечественной РЛС З6Дб [13] показали достаточно высокую эффективность компенсации активной шумовой помехи, действующей по главному лучу ДНА, при использовании режекторных фильтров, обеспечивающих подавление сигналов пассивных помех в цепях корреляционной обратной связи до уровня минус 30 дБ. Это обеспечивалось тем, что при поляризационной фильтрации фазовые центры основной и компенсационной антенн совмещены, что исключает межканальную задержку помеховых сигналов при сканировании антенной системы.

При защите РЛС от АШП, действующей по боковым лепесткам, используют пространственную фильтрацию, которая реализуется путем использования антенн, разнесенных в пространстве. При сканировании такой АС возникают межканальные задержки помеховых сигналов, обусловленные разносом антенн в пространстве, которые приводят к ухудшению компенсации АШП. При этом, как показано в [14], чем больше ширина спектра компенсируемой АШП, тем больше потери в компенсации АШП. Поэтому задачей настоящей работы, является уменьшение потерь в компенсации активной составляющей комбинированной помехи, действующей по боковым лепесткам ДНА при формировании КОВ частотным методом.

## 2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Повышению эффективности пространственно-временной обработки радиолокационных сигналов в условиях воздействия комбинированных помех посвящено ряд публикаций. Наиболее перспективными в этом отношении являются адаптивные системы, способные без априорной информации о помеховой обстановке автоматически подавлять сигналы помех, улучшая прием полезного сигнала [15].

Известна оптимальная классическая структура ПВО радиолокационных сигналов в виде линий за-

держки с отводами в каждом парциальном канале фазированной антенной решетки и весовых сумматоров [14, 16]. Она позволяет путем совместной обработки сформировать необходимую пространственно-частотную характеристику, которая позволяет обеспечить одновременное подавление составляющих комбинированной помехи. Однако, при большом количестве пространственных каналов, что необходимо для обеспечения точности измерения угловых координат радиолокационных целей, такая структура оказывается неприемлемой вследствие сложности реализации и малой скорости адаптации [7, 16].

Существенное упрощение обработки сигналов и уменьшение времени адаптации ВК ПФ можно получить путем использования раздельной ПВО. При этом для уменьшения влияния пассивной помехи на процесс адаптации ВК ПФ необходимо тем или иным методом сформировать КОВ.

В [17] в качестве строба для формирования КОВ используется временной интервал в конце дальности действия РЛС в предположении, что интенсивностью переотраженных сигналов от гидрометеоров можно пренебречь. Однако, в эксперименте, проведенном в полигонных условиях, установлено, что при пространственно-распределенных кучево-дождевых облачных системах типа Сб интенсивность пассивных помех даже на предельной дальности действия РЛС в нижнем угломестном канале РЛС может существенно превышать уровень собственного шума приемного устройства [13], а также уровень активной составляющей комбинированной помехи.

В [18, 19] предложен метод формирования КОВ, основанный на использовании апостериорной информации относительно распределения пассивной помехи по дальности. В предложенном методе, с учетом явления декорреляции активной помехи пассивной составляющей комбинированной помехи, оценка отсутствия/наличия пассивной помехи на интервалах дальности проводится путем дискретного текущего анализа величины ММКК. Пространственные фильтры при использовании пространственно-временной обработки в импульсных РЛС адаптируются по комплексным амплитудам входных сигналов, расположенным в «скользящем» окне ограниченной длительности. Если предположить, что в пределах периода повторения зондирующих сигналов активная шумовая помеха имеет стационарный характер, то, учитывая нестационарность пассивной помехи по дальности, в «скользящем» окне может находиться либо только активная помеха, либо смесь активной и пассивной помехи. В предложенном методе [18, 19] интервал дальности с максимальным значением ММКК, который соответствует отсутствию пассивной помехи, используется для формирования КОВ при адаптации весовых коэффициентов пространственного фильтра.

Общим недостатком рассмотренных методов формирования КОВ является дискретный режим работы ПФ. При сканировании АС или при перемещении источника АШП в пространстве на интервалах пауз в

адаптации ПФ возникают межканальные фазовые рассогласования, что снижает эффективность компенсации АШП [20].

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Известная структурная схема пространственного фильтра, содержащая основную антенну  $A_1$ , компенсационную антенну  $A_2$  и автокомпенсатор помех с корреляционной обратной связью представлена на рис. 1 [10].

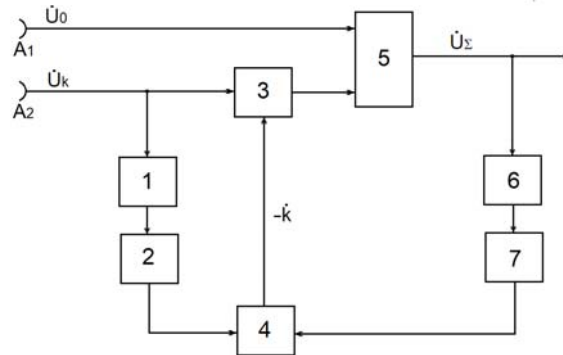


Рисунок 1 – Структурная схема пространственного фильтра с корреляционной обратной связью

В состав автокомпенсатора входят устройство комплексного сопряжения сигналов 1, первый режекторный фильтр 2, комплексный умножитель 3, формирователь ВК 4, сумматор 5, умножитель 6 и второй режекторный фильтр 7.

Выходной сигнал автокомпенсатора  $\dot{U}_\Sigma$  определяется разностью между амплитудой сигнала основного канала  $\dot{U}_0$  и взвешенным весовым коэффициентом  $\dot{k}$  значением сигнала компенсационного канала  $\dot{U}_k$ :

$$\dot{U}_\Sigma = \dot{U}_0 - \dot{k}\dot{U}_k. \quad (1)$$

Весовой коэффициент на выходе формирователя ВК4, вычисляется по известному выражению [4]

$$\dot{k} = \overline{\mu \dot{U}_\Sigma \dot{U}_k^*}. \quad (2)$$

Режекторные фильтры 2 и 7 обеспечивают формирование КОВ путем подавления пассивной помехи в цепях адаптации весового коэффициента и имеют амплитудно-частотные характеристики с полосой режекции  $\Delta F$ , как показано на рис. 2. Полоса режекции  $\Delta F$  определяется шириной спектра пассивной помехи с учетом возможного доплеровского сдвига частоты. Полоса пропускания режекторных фильтров формирует спектр АШП, поступающей на формирователь ВК. Нижняя частота  $F_H$  и верхняя частота  $F_B$  на рис. 2 определяются шириной спектра АШП, поступающей на входы автокомпенсатора помех.

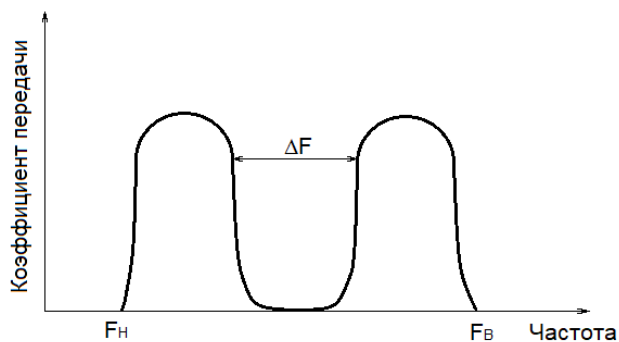


Рисунок 2 – Амплитудно-частотная характеристика режекторного фильтра

Преимуществом структурной схемы, приведенной на рис. 1, является непрерывный режим адаптации ВК ПФ, что исключает потери в коэффициенте подавления АШП, присущие дискретным режимам адаптации [20].

Недостаток состоит в широкой полосе компенсации АШП (по сравнению с полезным сигналом), поступающей на входы сумматора 5. В случае защиты РЛС от воздействия АШП, действующей по боковым лепесткам ДНА, это приводит к уменьшению коэффициента подавления [14]. Повышение эффективности подавления АШП в структурной схеме, представленной на рис. 1, не может быть достигнуто путем использования согласованных с полезным сигналом полосовых фильтров на входах сумматора 5. Это обусловлено разнополосностью фильтров, через которые АШП поступает на входы формирователя ВК 4, что приводит к ее декорреляции.

Авторами статьи предложен новый вариант построения пространственного фильтра, структурная схема которого представлена на рис. 3.

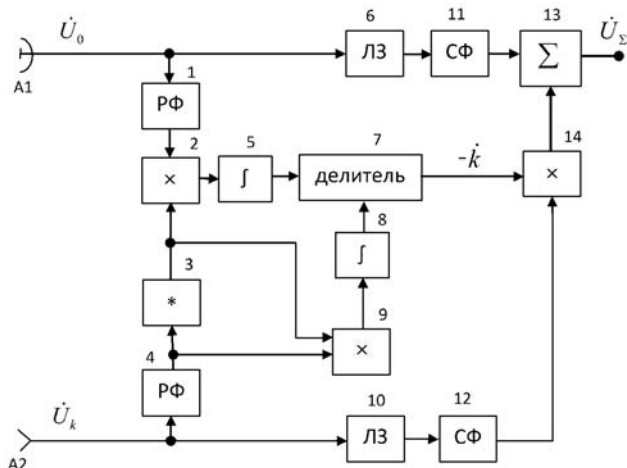


Рисунок 3 – Структурная схема пространственного фильтра с прямым вычислением ВК

Схема содержит основную антенну  $A_1$ , компенсационную антенну  $A_2$  и автокомпенсатор помех с прямым вычислением ВК. В соответствии с представленной схемой вычисление ВК выполняется делителем 7

после режекции пассивной помехи фильтрами РФ 1 и РФ 4 по выражению:

$$\dot{k} = \frac{\overline{\dot{U}_0 \dot{U}_k^*}}{|\dot{U}_k|^2} \quad (3)$$

Введенные в схему согласованные с полезным сигналом СФ 11 и СФ 12 уменьшают ширину спектра компенсируемой в сумматоре 13 АШП, что, в соответствии с [14], может повысить эффективность работы ПФ.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для оценки эффективности подавления АШП предложенной схемой ПФ с прямым вычислением ВК и формированием КОВ частотным методом исследования проведены путем имитационного моделирования. При этом определялись:

- потери в компенсации АШП в известной схеме ПФ без СФ в каналах ПФ, обусловленные межканальными задержками при сканировании АС, разнесенной в пространстве;
- выигрыш предложенной структурной схемы ПФ с прямым вычислением ВК с теми же межканальными задержками, который обеспечивается уменьшением ширины спектра АШП путем использования СФ в основном и компенсационном каналах на входах сумматора автокомпенсатора.

Моделирование пространственного фильтра проводилось при условиях, когда АШП при сканировании АС действовала с различных направлений боковых лепестков ДНА основного канала. С целью исключения влияния меняющегося коэффициента усиления в области боковых лепестков основной антенны на оценку зависимости коэффициента подавления АШП от межканальной задержки при моделировании принято, что диаграммы направленности основной и компенсационной антенны в секторе боковых лепестков  $[3^\circ, 30^\circ]$  одинаковы. Межканальная задержка АШП  $\tau$  моделировалась в соответствии с выражением:

$$\tau = \frac{d}{c} \cdot \sin \theta, \quad (4)$$

где  $d$  – расстояние между фазовыми центрами антенн,  $d=2$  м (как в РЛС 36Д6);  $c$  – скорость света;  $\theta$  – угол между направлением на источник АШП и перпендикуляром к линии, соединяющей фазовые центры антенн.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе исследования при оговоренных условиях имитационное моделирование проведено при превышении дисперсии АШП в основном и компенсационном канале на 40 дБ над дисперсией собственных шумов. В качестве АШП в каналах ПФ использованы коррелированные шумы с гауссовским распре-

делением мгновенных амплитуд. Собственные шумы каналов моделировались некоррелированными гауссовскими шумовыми процессами. Смесь собственных шумов и АШП с шириной спектра 4 МГц и центральной частотой, равной 30 МГц, после аналого-цифрового преобразования и формирования квадратур поступала в основной и компенсационный каналы автокомпенсатора помех. При этом амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики каналов предполагались идентичными. Спектры сформированных сигналов показаны на рис. 4 и 5. На рис. 4 представлен спектр сигнала, поступающего на основной вход автокомпенсатора. Спектр сигнала на выходе ПФ представлен на рис. 5.

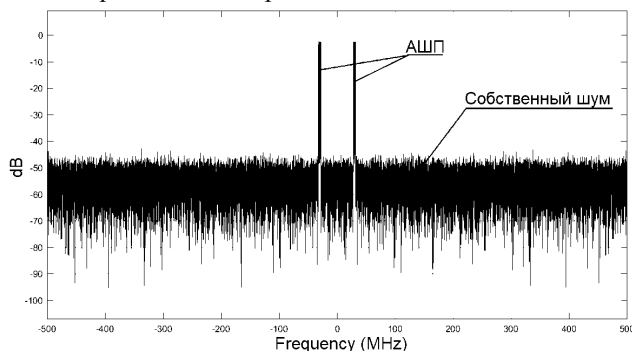


Рисунок 4 – Спектр сигнала на входе автокомпенсатора

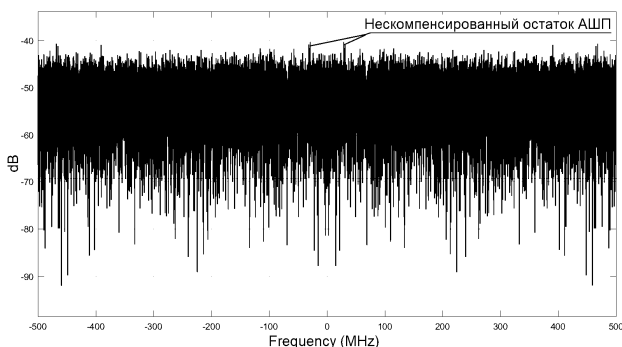


Рисунок 5 – Спектр сигнала на выходе ПФ

В результате имитационного моделирования получены следующие результаты:

- зависимость коэффициента подавления  $K_{\Pi}$  АШП известной схемы ПФ без СФ в каналах от угла визирования  $\theta$  при сканировании АС в интервале углов  $[3^{\circ}-30^{\circ}]$  приведена во втором столбце табл. 1 и для наглядности на рис. 6 сплошной линией;

- зависимость коэффициента подавления  $K_{\Pi}$  АШП предложенной схемы ПФ от угла визирования  $\theta$  при использовании СФ с полосой пропускания, равной 1 МГц, приведена в третьем столбце табл. 1 и на рис. 6 штрих-пунктирной линией;

- зависимость коэффициента подавления  $K_{\Pi}$  АШП от угла визирования  $\theta$  предложенной схемы ПФ при использовании СФ с полосой пропускания, равной 3 МГц, приведена в четвертом столбце табл. 1 и на рис. 6 пунктирной линией.

Таблица 1 – Результаты моделирования

| $\theta^{\circ}$ | НЕТ СФ<br>РФ=1,5 МГц | СФ=1 МГц<br>РФ=1,5 МГц | СФ=3 МГц<br>РФ=1,5 МГц |
|------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| 1                | 2                    | 3                      | 4                      |
| 3°               | 22,9                 | 29,1                   | 24,6                   |
| 8°               | 15,3                 | 21,7                   | 16,6                   |
| 10°              | 13,2                 | 19,4                   | 14,8                   |
| 30°              | 4,5                  | 10,5                   | 5,9                    |

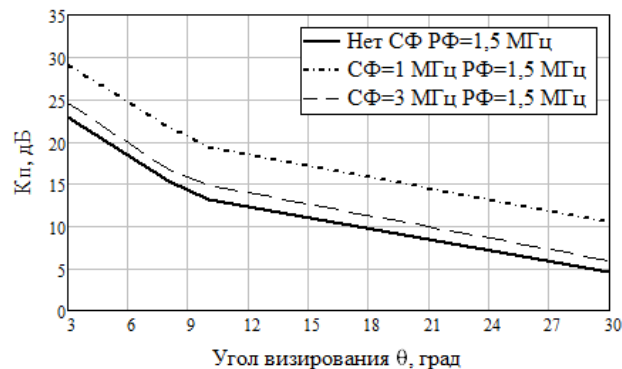


Рисунок 6 – Графическое представление результатов моделирования

Из анализа полученных результатов следует, что при использовании СФ с полосой пропускания, равной 1 МГц, реализуется максимальный выигрыш в коэффициенте подавления АШП, который в секторе боковых лепестков ДНА  $[3^{\circ}-30^{\circ}]$  составляет от 6,0 до 6,4 дБ (сравниваются столбцы табл. 1 второй и третий). При использовании СФ с полосой пропускания, равной 3 МГц, выигрыш в коэффициенте подавления меньше и составляет от 1,3 до 1,7 дБ (сравниваются столбцы табл. 1 второй и четвертый). Последнее объясняется большей шириной спектра АШП, компенсируемой в сумматоре 13 ПФ.

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Предложен новый метод обработки радиолокационных сигналов. Метод за счет прямого вычисления ВК ПФ и согласованной фильтрации сигналов основного и компенсационного каналов позволил повысить эффективность подавления активной составляющей комбинированной помехи, действующей по боковым лепесткам ДНА. Повышение эффективности компенсации АШП подтверждено результатами имитационного моделирования. Полученные результаты коррелируются с результатами аналитических расчетов, проведенных американскими учеными Р. А. Монзинго и Т. У. Миллером.

## ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная научная задача дальнейшего повышения эффективности обработки радиолокационных сигналов в условиях воздействия активной составляющей комбинированной помехи, действующей по боковым лепесткам ДНА.

Научная новизна работы состоит в усовершенствовании алгоритма обработки радиолокационных сигналов путем прямого вычисления ВК ПФ с ис-

пользованием режекторных фильтров и согласованной фильтрации сигналов основного и компенсационного каналов.

Практическая новизна состоит в создании структурной схемы и математической модели усовершенствованного адаптивного пространственного фильтра. Результаты имитационного моделирования подтвердили достаточно высокую эффективность предложенного алгоритма обработки радиолокационного сигнала. Так, с учетом параметров РЛС 36Дб, в секторе боковых лепестков ДНА [3°–30°] выигрыш в коэффициенте подавления составил от 6,0 до 6,4 дБ. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании или модернизации РЛС различного назначения.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы национального университета «Запорожская политехника» «Повышение эффективности когерентно-импульсных радиолокационных станций в сложных условиях функционирования» (номер госрегистрации 0117U000614) при финансовой поддержке МОНУ.

### ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Falk K. Method and Radar System for Pepetition Jammer and Clutter Supression, U.S. Patent 9.170.321, 601 7/36, Oct 27, 2015 (filed Nov. 19, 2010).
2. 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: <http://dx.doi.org/10.20535/S0021347016060030>.
3. Уидроу Б. и др. Адаптивные антенные системы / Уидроу Б. и др. // ТИИЭР. – 1967. – Т. 55, № 12. – С. 78–95.
4. Теоретические основы радиолокации : учеб. пособие для вузов / Я. Д. Ширман, В. Н. Голиков, И. Н. Бусыгин и др. ; под общ. ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970. – 560 с.
5. Журавлев А. К. Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками / А. К. Журавлев, В. А. Хлебников, А. П. Родимов. – Ленинград : Изд. Ленинградского университета, 1991. – 544 с.
6. Surendra Khadka CP, Anuradha Dr. M. S Study of the Effect of Barrage and Deception Jamming Radar System along with their Mitigation Technique // International Journal of Science and Research (USR). – 2015. – 4(9). – P. 98–101.
7. Абрамович Ю. И. Быстродействие поочередной адаптивной настройки отдельных систем защиты от комбинированных помех / Ю. И. Абрамович, В. Г. Качур // Радиотехника и электроника. – 1989. – № 1. – С. 52–58.
8. Андреев В. Г. Адаптивная обработка сигналов на фоне комбинированных помех / В. Г. Андреев, Т. Ф. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2015. – № 2. – С. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.20535/S0021347015020053>.
9. Спосіб захисту радіолокаторів від комбінованих завод, діючих по головному променю діаграми спрямованості антени: пат. 91114 Україна: МПК G01S 7/36. № u201314941 заявл. 20.12.2013; опубл. 25.06.2014, Бюл. №12.
10. Estimation of losses in jammers compensation at the training sample formation by the frequency method / [D. M. Piza, S. N. Romanenko, G. V. Moroz, D. S. Semenov] // Information and Telecommunication Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. – 2019. – Volume 9, Number 2. – P. 5–9.
11. Перунов Ю. М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Ю. М. Перунов, К. И. Фомичев, Л. М. Юдин. – М. : Радиотехника, 2003. – 416 с.
12. Перунов Ю. М. Зарубежные радиоэлектронные средства. Кн. 2. Системы радиоэлектронной борьбы / Ю. М. Перунов В. В. Мацукевич, А. А. Васильев. – М. : Радиотехника, 2010. – 352 с.
13. 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.
14. Монзинго Р. А. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию ; пер. с англ. под ред. В. А. Лексаченко / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер. – М. : Радио и связь, 1986. – 445 с.
15. Леховицкий Д. И. Адаптивные решеточные фильтры для систем пространственно-временной обработки нестационарных гауссовых процессов / Д. И. Леховицкий // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2018. – № 11. – С. 607–642. DOI: 10.20535/S0021347018110018.
16. Оценка интервала фиксации пространственного весового вектора при последовательной пространственно-временной обработке сигналов на фоне комбинированных помех / [В. П. Рябуха, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка, Е. А. Катюшин] // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2012. – № 10. – С. 13–25.
17. Адаптивные алгоритмы компенсации помех / [Д. Н. Ивлев, И. Я. Орлов, А. В. Сорокина, Е. С. Фитасов] : учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород : ННГУ им. И. И. Лобачевского, 2014. – 88 с.
18. Пиза Д. М. Корреляционный метод формирования обучающей выборки для адаптации пространственного фильтра. / Д. М. Пиза, С. Н. Романенко, Д. С. Семенов // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2018. – № 3. – С. 34–39. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-3-4.
19. Спосіб захисту когерентно-імпульсних радіолокаційних станцій від комбінованих завод: пат. 78120 Україна: МПК G01S 7/36. № u201210218 заявл. 28.08.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. №5.
20. Пиза Д. М. Оценка эффективности дискретных алгоритмов адаптации весовых коэффициентов при пространственно-временной обработке радиолокационных сигналов / Д. М. Пиза, Д. С. Семенов, С. В. Морщавка // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2019. – №1. – С. 8–15.

Статья поступила в редакцию 12.06.2019.  
После доработки 27.09.2019.

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ АКТИВНОЇ СКЛАДОВОЇ КОМБІНОВАНОЇ ЗАВАДИ

**Піза Д. М.** – д-р техн. наук, професор кафедри радіотехніки, національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

**Романенко С. М.** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедри захисту інформації, національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

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

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** При одночасному впливі активної шумової та пасивної завади остання декорелює активну складову комбінованої завади, що істотно обмежує її компенсацію. Крім того, при впливі активної завади по бічних пелюстках діаграми спрямованості при скануванні рознесеної в просторі антенної системи виникають міжканалні затримки завадових сигналів, що також призводить до погіршення компенсації.

**Мета.** Підвищення ефективності компенсації активної складової комбінованої завади, що діє по бічних пелюстках діаграми спрямованості, при одночасному впливі пасивної завади.

**Метод.** Вдосконалений алгоритм обробки радіолокаційних сигналів з прямим обчисленням вагового коефіцієнта адаптивного просторового фільтра і узгодженої фільтрацією сигналів основного і компенсаційного каналів. При цьому вплив пасивної завади на процес адаптації вагових коефіцієнтів просторового фільтра усувається використанням режекторних фільтрів.

**Результати.** Розроблено структурну схему вдосконаленого просторового фільтра. Створено математичну модель. В процесі імітаційного моделювання встановлено, що запропонований алгоритм обробки радіолокаційних сигналів в секторі бічних пелюсток діаграми спрямованості антени  $[3^\circ-30^\circ]$  відносно головного променя забезпечив виграш в компенсації активної шумової завади, який склав від 6,0 до 6,4 дБ в порівнянні з відомою схемою адаптивного просторового фільтра.

**Висновки.** Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні алгоритму обробки радіолокаційних сигналів шляхом прямого обчислення вагового коефіцієнта просторового фільтра з використанням режекторних фільтрів і узгодженої фільтрації сигналів основного і компенсаційного каналів. Практична новизна полягає в створенні структурної схеми і математичної моделі вдосконаленого адаптивного просторового фільтра. Результати імітаційного моделювання підтвердили досить високу ефективність запропонованого алгоритму обробки радіолокаційного сигналу. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні або модернізації РЛС різного призначення.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** активна завада, просторовий фільтр, коефіцієнт придушення.

UDC 621.396.95

## INCREASE OF EFFICIENCY OF COMPENSATION OF THE ACTIVE COMPONENT OF COMBINED INTERFERENCE

**Piza D. M.** – Dr. Sc., Professor, Department of Radio Engineering, National University “Zaporizhzhia polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine.

**Romanenko S. N.** – PhD, Associate Professor of department of Information Defense, National University “Zaporizhzhia polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine.

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

### ABSTRACT

**Context.** Under simultaneous actions of the active noise and passive interference, the latter de-correlates the active component of the combined interference, which significantly limits its compensation. In addition, when the active interference acts on the side lobes of the antenna pattern when scanning a spaced-apart antenna system, inter-channel delays of interfering signals occur, which also leads to the degradation of compensation.

**Objective.** Improving the efficiency of compensation of the active component of the combined interference acting on the side lobes of the radiation pattern under simultaneous effect of the passive interference.

**Method.** An improved algorithm for processing radar signals with direct calculation of the weight factor of the adaptive spatial filter and matched filtering of the signals of the main and compensation channels. The effect of passive interference on the process of adapting the weight factor of the spatial filter is eliminated using notch filters.

**Results.** A block diagram of an improved spatial filter has been developed. A mathematical model has been created. In the process of simulation, it was found that the proposed algorithm for processing radar signals in the side-lobe sector of the antenna pattern  $[3^\circ-30^\circ]$  relative to the main beam provided a gain in the compensation of active noise interference of about 6.0 to 6.4 dB as compared to the known adaptive spatial filter circuit.

**Conclusions.** The scientific novelty of the work is in improving of the algorithm for processing radar signals by parallel calculation of the weight factor of the spatial filter using notch filters and matched filtering of the signals of the main and compensation channels.

The practical novelty consists of creating a structural scheme and a mathematical model of an improved adaptive spatial filter. The simulation results confirmed the relatively high efficiency of the proposed radar signal-processing algorithm. The results obtained can be used in the design or modernization of radars for various purposes.

**KEYWORDS:** active interference, spatial filter, suppression ratio.

## REFERENCES

1. K. Falk Method and Radar System for Peptition Jammer and Clutter Supression, U.S. Patent 9.170.321, 601 7/36, Oct 27, 2015 (filed Nov. 19, 2010).
2. Piza D. M., Zvjagincev E. A., Moroz G. V. Metod kompensacii aktivnoj sostavljajushhej kombinirovannoj pomehi v kogerentno-impul'snoj RLS. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2016, No. 6, pp. 23–29, DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/S0021347016060030>.
3. Uidrou B. i dr. Adaptivnye antennnye sistemy. *TIJeR*, 1967, Vol. 55, No. 12, pp. 78–95.
4. Shirman Ja. D., Golikov V. N., Busygin I. N. i dr.; pod obshh. red. Ja. D. Shirmana. *Teoreticheskie osnovy radiolokacii, ucheb. posobie dlja vuzov*. Moscow, Sov. radio, 1970, 560 p.
5. Zhuravlev A. K., Hlebnikov V. A., Rodimov A. P. Adaptivnye radiotekhnicheskie sistemy s antennymi reshetkami. Leningrad, Izd. Leningradskogo universiteta, 1991, 544 p.
6. Study of the Effect of Barrage and Deception Jamming Radar System along with their Mitigation Technique. CP Surendra Khadka, Dr. M. S Anuradha, *International Journal of Science and Research (USR)*, 2015, 4(9), pp. 98–101.
7. Abramovich Ju. I., Kachur V. G. Bystrodejstvie poocherednoj adaptivnoj nastrojki razdel'nyh sistem zashhity ot kombinirovannyh pomeh. *Radiotekhnika i jelektronika*, 1989, No. 1, pp. 52–58.
8. Andreev V. G., Nguen T. F. Adaptivnaja obrabotka signalov na fone kombinirovannyh pomeh. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2015, No. 2, pp. 48–53, DOI: <https://doi.org/10.20535/S0021347015020053>.
9. Sposib zahistu radiolokatoriv vid kombinovanih zavvad, dijuchih po golovnomu promenju diagrami sprjamovanosti anteni: pat. 91114 Ukraïna: MPK G01S 7/36. № u201314941 zajavl. 20.12.2013; opubl. 25.06.2014, Bjul. № 12.
10. Piza D. M., Romanenko S. N., Moroz G. V., Semenov D. S. Estimation of losses in jammers compensation at the training sample formation by the frequency method. *Information and Telecommunication Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*, 2019, Vol. 9, No. 2, pp. 5–9.
11. Perunov Ju. M., Fomichev K. I., Judin L. M. Radioelektronnoe podavlenie informacionnyh kanalov sistem upravlenija oruzhijem. Moscow, Radiotekhnika, 2003, 416 p.
12. Perunov Ju. M., Macukevich V. V., Vasil'ev A. A. Zarubezhnye radioelektronnye sredstva. Kn.2. *Sistemy radioelektronnoj bor'by*. Moscow, Radiotekhnika, 2010, 352 p.
13. Piza D. M., Moroz G. V. Metody formirovanija klassificirovannoj obuchajushhej vyborki dlja adaptacii vesovyh koeficientov avtokompensatora pomeh, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2018, No. 1, pp. 47–54. DOI: 10.20535/80021347016060030.
14. Monzingo R. A., Miller T. U. Adaptivnye antennnye reshetki. *Vvedenie v teoriju*, per. s angl. pod red. V. A. Leksachenko. Moscow, Radio i svjaz', 1986, 445 p.
15. Lehovickij D. I. Adaptivnye reshetochnye fil'try dlja sistem prostranstvenno-vremennoj obrabotki nestacionarnykh gaussovykh processov, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2018, No. 11, pp. 607–642. DOI: 10.20535/S0021347018110018.
16. Rjabuha V. P., Rachkov D. S., Semenjak A. V., Katjushin E.A. Ocenka intervala fiksacii prostranstvennogo vesovogo vektora pri posledovatel'noj prostranstvenno-vremennoj obrabotke signalov na fone kombinirovannyh pomeh, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2012, No. 10, pp. 13–25.
17. Ivlev D. N., Orlov I. Ja., Sorokina A. V., Fitasov E. S. Adaptivnye algoritmy kompensacii pomeh, *Uchebno-metodicheskoe posobie*, Nizhnij Novgorod, NNGU im. I. I. Lobachevskogo, 2014, 88 p.
18. Piza D. M., Romanenko S. N., Semenov D. S. Korreljacionnyj metod formirovanija obuchajushhej vyborki dlja adaptacii prostranstvennogo fil'tra, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, No. 3, pp. 34–39. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-3-4.
19. Sposib zahystu kogerentno-impul'snyh radiolokacijnyh stancij vid kombinovanyh zavvad: pat. 78120 Ukraïna: MPK G01S 7/36. № u201210218 zajavl. 28.08.2012; opubl. 11.03.2013, Bjul. №5.
20. Piza D. M., Semenov D. S., Morshhavka S. V. Ocenka jeffektivnosti diskretnykh algoritmov adaptacii vesovyh koeficientov pri prostranstvenno-vremennoj obrabotke radiolokacijnyh signalov, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2019, No. 1, pp. 8–15.