

## МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХ

**Пиза Д. М.** – д-р техн. наук, профессор кафедры радиотехники и телекоммуникаций Национального университета «Запорожская политехника», г. Запорожье, Украина.

**Мороз Г. В.** – старший преподаватель кафедры радиотехники и телекоммуникаций Национального университета «Запорожская политехника», г. Запорожье, Украина.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** При защите РЛС от активных шумовых помех, действующих по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны, применяют пространственную фильтрацию сигналов путем использования разнесенного приема полезного сигнала и помех. При этом различие направлений воздействия помех и сигнала позволяет скомпенсировать помеху и обнаружить полезный сигнал. Однако, если источник помехи смещается в область главного луча, то пространственные отличия между полезным сигналом и помехой уменьшаются. Это приводит к существенному искажению диаграммы направленности основной антенны. В результате этого ухудшается точность измерения угловых координат целей, а также чувствительность приемного устройства РЛС. В статье предложен новый метод пространственно-поляризационной обработки радиолокационных сигналов, обеспечивающий компенсацию активных шумовых помех как с направлений боковых лепестков, так и с направления главного луча диаграммы направленности антенны.

**Цель** работы состоит в разработке метода совместной пространственно-поляризационной обработки радиолокационных сигналов при воздействии активных шумовых помех как по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны, так и по главному лучу.

**Метод** реализуется путем использования структурной адаптации устройства помехозащиты в зависимости от направления воздействия помехи. При этом управляющий сигнал для структурной адаптации формируется по текущему значению модуля весового коэффициента пространственного фильтра.

**Результаты.** Разработана совместная структурная схема пространственно-поляризационного фильтра, обеспечивающего компенсацию активных шумовых помех, действующих как по боковым лепесткам, так и по главному лучу диаграммы направленности антенны РЛС. Разработана математическая модель блока компенсации, реализующего структурную адаптацию пространственно-поляризационного фильтра. В условиях первого особого поляризационного базиса оценена эффективность подавления помех, действующих по главному лучу диаграммы направленности антенны.

**Выводы.** Научная новизна проведенного исследования состоит в разработке нового метода пространственно-поляризационной обработки радиолокационных сигналов в сложных условиях функционирования РЛС при массивном воздействии активных шумовых помех.

Практическая новизна состоит в разработке структурной схемы пространственно-поляризационного фильтра, обеспечивающего компенсацию помех, действующих как с направлений боковых лепестков, так и с направления главного луча диаграммы направленности антенны. Разработана математическая модель блока компенсации фильтра. Оценена эффективность подавления помех в условиях первого особого поляризационного базиса.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** активная шумовая помеха, пространственно-поляризационный фильтр, коэффициент подавления.

### АББРЕВИАТУРЫ

АК – автокомпенсатор;  
АШП – активная шумовая помеха;  
ДНА – диаграмма направленности антенны;  
БпЛА – беспилотный летающий аппарат;  
РЛС – радиолокационная станция.

### НОМЕНКЛАТУРА

$\dot{k}_{\text{опт}}$  – оптимальное комплексное значение весового коэффициента;  
 $|\dot{k}|$  – модульное значение весового коэффициента;  
 $K_{\text{п}}$  – коэффициент подавления помехи;  
 $\dot{U}_{\text{к}}$  – комплексное значение помехи на входе компенсационного канала автокомпенсатора;  
 $\dot{U}_0$  – комплексное значение помехи в основном канале;

$\dot{U}_{0\perp}$  – комплексное значение помехи в ортогональном канале блока компенсации 1;  
 $\dot{U}_{\text{к}1}, \dot{U}_{\text{к}2}, \dot{U}_{\text{к}3}$  – комплексные значения помех в компенсационных каналах;  
 $\dot{U}_{01}, \dot{U}_{\text{к}11}, \dot{U}_{\text{к}21}$  – комплексные значения помех на выходе первого каскада;  
 $\dot{U}_{01\perp}$  – комплексное значение помехи в ортогональном канале блока компенсации 4;  
 $\dot{U}_{02}, \dot{U}_{12}$  – комплексные значения помех на выходе второго каскада;  
 $\dot{U}_{02\perp}$  – комплексное значение помехи в ортогональном канале блока компенсации 6;  
 $\dot{U}_{03}$  – комплексное значение помехи на выходе третьего каскада;  
 $\sigma_0$  – среднее квадратическое значение помехи в основном канале;

$\sigma_k$  – среднеквадратическое значение помехи в компенсационном канале;

$\dot{\rho}$  – комплексное значение коэффициента межканальной корреляции помехи.

## ВВЕДЕНИЕ

Для защиты радиолокационных станций от воздействия активных шумовых помех могут быть использованы пространственные отличия в направлениях приема полезных сигналов и помех [1–3]. Пространственная фильтрация реализуется при воздействии АШП по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны РЛС. Однако, в реальных условиях при смещении помех на направление главного луча ДНА известные пространственные фильтры с параметрической адаптацией существенно ограничивают эффективность работы радиолокационной станции. Так, в монографии [4] показано, что при воздействии АШП по главному лучу ДНА в пространственном фильтре, предназначенном для компенсации помехи, действующей в направлении боковых лепестков, существенно искажается главный луч диаграммы направленности антенны РЛС. Это приводит к ухудшению точности измерения угловых координат целей, а также к ухудшению чувствительности приемного устройства РЛС. Последнее объясняется возрастанием весового коэффициента пространственного фильтра и, как следствие, к увеличению вклада уровня собственных шумов компенсационного канала на выходе пространственного фильтра.

Более того, в статье [5] показано, что при воздействии АШП в направлении максимума главного луча ДНА пространственные отличия в направлениях воздействия помехи и сигнала отсутствуют и пространственный фильтр, компенсируя помеху, одновременно подавляет и полезный сигнал.

В статье [6] показано, что структурная адаптация пространственного фильтра при воздействии АШП по главному лучу ДНА путем исключения возможности компенсации активной помехи, позволяет избежать ухудшения точности измерения угловых координат целей, а также ухудшения чувствительности приемного устройства РЛС. Однако, при этом отсутствие компенсации АШП, действующей по главному лучу, ограничивает возможности обнаружения полезных сигналов.

Таким образом, для эффективной работы РЛС в условиях динамичной обстановки, когда АШП может воздействовать как по боковым лепесткам ДНА, так и по главному лучу необходимо обеспечить пространственно-поляризационную адаптацию системы помехозащиты.

Цель работы состоит в повышении эффективности работы РЛС в условиях возможного воздействия АШП по главному лучу путем использования как пространственных, так и поляризационных отличий в структуре полезных сигналов и помех.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При защите РЛС от АШП, действующей по боковым лепесткам ДНА, используют пространственную фильтрацию, которая реализуется путем использования антенн, разнесенных в пространстве. В этом случае отличия в направлениях приема полезного сигнала и АШП позволяют сформировать оптимальный весовой коэффициент адаптивного пространственного фильтра для подавления помехи. При этом вследствие различных направлений воздействия сигнала, отраженного от цели, и АШП полезный сигнал на выходе адаптивного пространственного фильтра не компенсируется. По мере сближения направлений приема помехи и сигнала пространственные различия между ними уменьшаются, что приводит к искажению главного луча ДНА [4]. В случае совпадения направлений воздействия помехи и сигнала сформированный весовой коэффициент является оптимальным как для подавления АШП, так и для подавления полезного сигнала. При этом возникает эффект «ослепления» РЛС [5]. Следствием этого является невозможность обнаружения полезного сигнала на выходе пространственного фильтра даже в случае превышения его над уровнем АШП на входе системы помехозащиты.

Поэтому задачей настоящей работы является разработка и исследование нового метода пространственно-поляризационной обработки радиолокационных сигналов, обеспечивающего эффективную работу РЛС при воздействии АШП как с направления главного луча ДНА, так и с направлений боковых лепестков.

## 2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Известным методом повышения помехозащищенности РЛС в условиях воздействия активных шумовых помех по главному лучу диаграммы направленности антенны является использование поляризационных отличий в структуре полезных сигналов и помех [7–10]. Реализация метода осуществляется путем использования дуальнополяризованного приема АШП основным и компенсационным каналами. В качестве элемента адаптации поляризационных фильтров используют автокомпенсаторы помех.

В монографии [7] показано, что наибольшая эффективность поляризационной фильтрации радиолокационных сигналов достигается в первом особом поляризационном базисе, когда коэффициент корреляции принимаемых ортогонально-поляризованных компонент шумовой помехи становится максимальным.

В статье [10] в результате аналитического расчета коэффициента корреляции при произвольных поляризационных параметрах АШП установлено, что при рассогласовании поляризационного базиса относительно первого особого, коэффициент корреляции компонент помехи  $a$ , соответственно, и ее компенсация, существенно ухудшается, что в принципе можно уменьшить подстройкой поляризации РЛС [7].

В монографии [11] установлено, что дуальнополяризованные компоненты активных шумовых помех,

принятые по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны, слабокоррелированы по сравнению с помехами, принятыми по главному лучу. Это позволяет при структурной адаптации системы помехозащиты обеспечить эффективную компенсацию АШП, действующих как по боковым лепесткам ДНА, так и по главному лучу.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В современных условиях вероятность подавления радиолокационных средств по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны значительно возросла [11]. Это определяется возросшей вероятностью воздействия на РЛС БПЛА, оснащенных источниками АШП, действующими в ближней зоне обзора. Наличие большого количества источников АШП в зоне обзора РЛС вынуждает при проектировании радиолокационных средств использовать многоканальные устройства защиты с ортогонализацией помеховых сигналов в компенсационных каналах [2, 4].

Известная структурная схема многоканального адаптивного пространственного фильтра приведена на рис. 1 [12–14]. Преимуществом схемы является использование одноканальных автокомпенсаторов с прямым вычислением весовых коэффициентов, а также ортогонализация АШП, действующих в компенсационных каналах приема [2]. Это существенно повышает также быстродействие пространственного фильтра, что важно в реальных условиях функционирования РЛС [4].

В структурной схеме реализован случай, когда на РЛС по боковым лепесткам ДНА действуют три источника АШП, разнесенные в пространстве. Соответственно, при этом на структурную схему на вход основного канала поступают помеховые сигналы  $\dot{U}_0$ , а на входы компенсационных каналов поступают АШП от разнесенных в пространстве источников  $\dot{U}_{k1}$ ,  $\dot{U}_{k2}$  и  $\dot{U}_{k3}$ . Устройство содержит первый, второй и третий каскады обработки сигналов. Из рис. 1 следует, что в блоках 2, 3, 5 происходит ортогонализация действующих помех  $\dot{U}_{k1}$ ,  $\dot{U}_{k2}$  и  $\dot{U}_{k3}$ . В блоках 1, 4 и 6 выполняется последовательная компенсация помех  $\dot{U}_{k3}$ ,  $\dot{U}_{k21}$ ,  $\dot{U}_{k12}$ .

В качестве блоков декорреляции в структурной схеме используются одноканальные автокомпенсаторы с прямым вычислением весовых коэффициентов. Структурная схема такого автокомпенсатора приведена на рис. 2 [13, 14]. Структурная схема содержит умножители 1, 7, 9, блок комплексного сопряжения 2, интеграторы 3 и 6, линии задержки 4 и 8, делитель 5 и сумматор 10. Непосредственно из рис. 2 и 3 следует, что оптимальное значение весового коэффициента  $\dot{k}_{\text{опт}}$  для ортогонализации помех в компенсационных каналах приема и для полного подавления АШП в

блоках компенсации 1, 4 и 6 формируется на выходе делителя 5 по выражению:

$$\dot{k}_{\text{опт}} = \frac{\overline{\dot{U}_0 \dot{U}_k^*}}{\overline{\dot{U}_k \dot{U}_k^*}}. \quad (1)$$

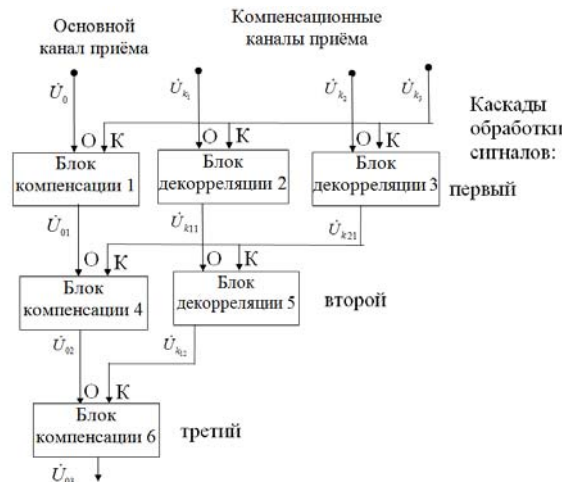


Рисунок 1 – Структурная схема многоканального пространственного фильтра

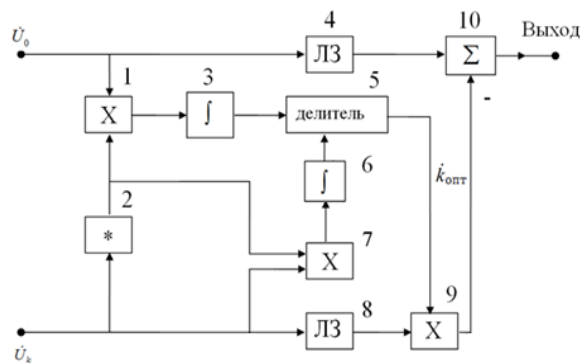


Рисунок 2 – Структурная схема блока ортогонализации

При этом усредненное значение корреляционного момента  $\overline{\dot{U}_0 \dot{U}_k^*}$  формируется на выходе интегратора 3, а дисперсия помехи  $\sigma_k^2 = \overline{\dot{U}_k \dot{U}_k^*}$ , которая действует в компенсационном канале, формируется на выходе интегратора 6. Мгновенные значения напряжений, действующих на выходах каждого блока компенсации и на его входе (см. рис. 1), связаны выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{01} &= \dot{U}_0 - \dot{k}_{\text{опт}1} \dot{U}_{k3}, & \dot{U}_{02} &= \dot{U}_{01} - \dot{k}_{\text{опт}4} \dot{U}_{k21}, \\ \dot{U}_{03} &= \dot{U}_{02} - \dot{k}_{\text{опт}6} \dot{U}_{k12}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\dot{k}_{\text{опт}1}$ ,  $\dot{k}_{\text{опт}4}$ ,  $\dot{k}_{\text{опт}6}$  – весовые коэффициенты блоков компенсации 1, 4, 6.

Выражение (1) можно представить в следующем виде:

$$\dot{k}_{\text{опт}} = \dot{\rho} \frac{\sigma_0 \sigma_k}{\sigma_k^2} = \dot{\rho} \frac{\sigma_0}{\sigma_k} \quad (3)$$

где  $\dot{\rho}$  – комплексное значение коэффициента межканальной корреляции АШП, а  $\sigma_0$  и  $\sigma_k$  – среднеквадратические значения помехи в основном и компенсационном каналах приема.

Из выражения (3) непосредственно следует, что модуль весового коэффициента  $|\dot{k}_{\text{опт}}|$  может быть признаком смещения источника АШП с направления боковых лепестков на направление главного луча ДНА. Это объясняется тем, что отношение  $\frac{\sigma_0}{\sigma_k}$  суще-

ственно возрастает при воздействии АШП по главному лучу. Для формирования такого признака в процессе синтеза структурной схемы в каждый автокомпенсатор, в котором компенсируются помехи, действующие в основном канале, дополнительно введена цепь, содержащая последовательно соединенные вычислитель модуля 12, формирователь порога 13 и коммутатор 11 (см. рис. 3). Такая цепь путем текущего анализа модуля весового коэффициента блока компенсации при воздействии АШП по главному лучу может подключить ко входу компенсационного канала дуальнополяризованный выход антенны и обеспечить компенсацию помехи, используя поляризационные отличия в структуре АШП и полезного сигнала.

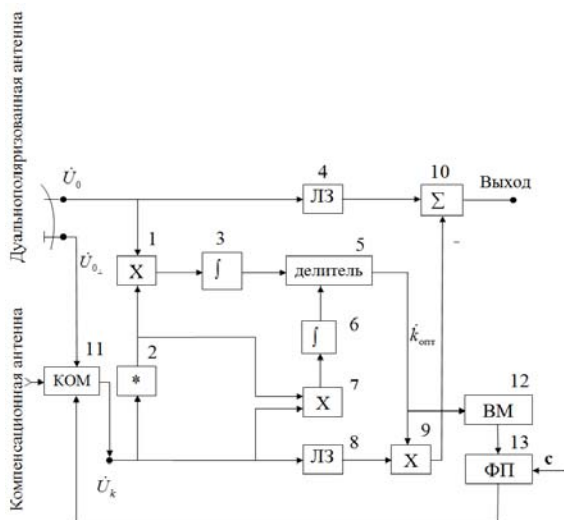


Рисунок 3 – Структурная схема блока компенсации

Рассмотрим алгоритм работы предложенного пространственно-поляризационного фильтра, представленного на рис. 4, при воздействии активных шумовых помех, действующих по боковым лепесткам ДНА. На входы первого каскада обработки сигналов, который содержит блок компенсации 1 и блоки декорреляции с номерами 2 и 3, к основному входу О блока компенсации 1 поступает помеха с основного канала

приема  $\dot{U}_0$ . К основным входам О блоков декорреляции с номерами 2 и 3 поступают помехи  $\dot{U}_{k1}$  и  $\dot{U}_{k2}$ . Помеха  $\dot{U}_{k3}$  поступает на компенсационные входы К блока компенсации 1 и блоков декорреляции с номерами 2 и 3. В соответствии с формулой (1) и структурной схемой рис. 2 или рис. 3 на выходах интеграторов 3 в блоке компенсации 1 и в блоках декорреляции с номерами 2 и 3 вычисляются корреляционные моменты  $\dot{U}_0 \dot{U}_{k3}^*$ ,  $\dot{U}_{k1} \dot{U}_{k3}^*$ ,  $\dot{U}_{k2} \dot{U}_{k3}^*$ , которые поступают на делители 5 в качестве числителя. В качестве знаменателя на нормирующие входы делителей 5 с выходов интеграторов 6 поступает дисперсия помехи, которая действует на входах К блока компенсации и блоков декорреляции. При этом в блоках декорреляции 2 и 3 ортогонализируется помеха  $\dot{U}_{k3}$ , а в блоке компенсации с номером 1, что соответствует структурной схеме, представленной на рис. 4, компенсируется помеха  $\dot{U}_{k3}$ , которая действует в основном канале приема.

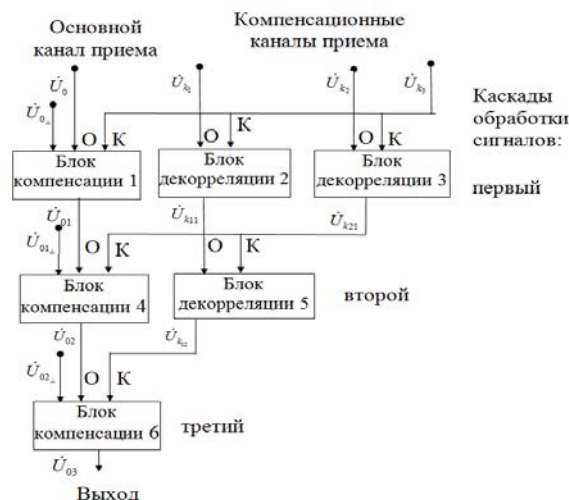


Рисунок 4 – Структурная схема пространственно-поляризационного фильтра

Если активная помеха действует по боковым лепесткам ДНА, то значение модуля весового коэффициента на выходе вычислителя модуля 12 (см. рис. 3) не превышает порог  $\epsilon$  в формирователе порога 13 и результат компенсации с выхода сумматора 10 поступает на выход блока компенсации с номером 1.

В случае, когда активная помеха смещается в пространстве и начинает действовать по главному лучу ДНА, модуль весового коэффициента  $|\dot{k}|$  превышает уровень порога  $\epsilon$  в формирователе порога 13 и коммутатор 11 подключает на компенсационный вход  $\dot{U}_k$  (см. рис. 3) блока компенсации с номером 1 помеху  $\dot{U}_{0\perp}$ , действующую в ортогональном канале дуальнополяризованной антенны. При этом для компенса-

ции АШП используются поляризационные отличия между полезным сигналом и помехой.

Если в процессе дальнейшего функционирования РЛС АШП смещается на направление боковых лепестков ДНА, то в следствие ограниченной корреляции ортогональных компонент помехи, поступающих с этих направлений [11] модуль весового коэффициента  $|k|$  существенно уменьшается. При этом порог  $\epsilon$  в формирователе порога 12 (см. рис. 3) не превышаетя и коммутатор 11 подключает к компенсационному входу  $\dot{U}_k$  помеху соответствующего компенсационного канала приема.

За счет использования априорной информации о текущем состоянии модулей весовых коэффициентов блоков компенсации предложенный метод обеспечивает пространственно-поляризационную обработку сигналов и реализует компенсацию помех, действующих как по боковым лепесткам, так и по главному лучу ДНА.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Математическая модель блока компенсации с пространственно-поляризационной адаптацией разработана в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 3. При этом в качестве основной использовалась дуальнополяризованная антенна с амплитудным распределением поля в раскрыве  $\sin x/x$  с уровнем первого бокового лепестка, равного 13,2 дБ. В качестве компенсационной использовалась слабонаправленная антенна, которая «накрывает» боковые лепестки основной антенны так, как это показано на рис. 5.

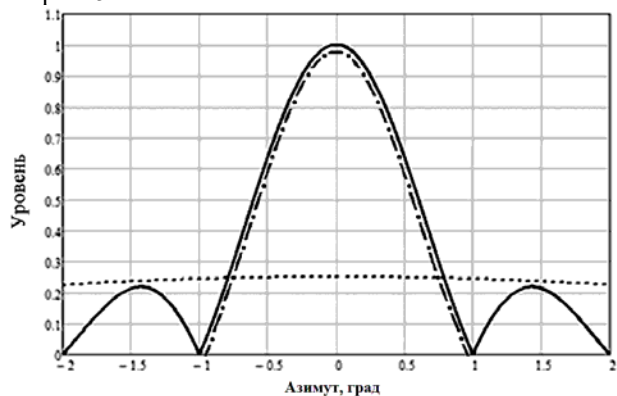


Рисунок 5 – Диаграммы направленности антенн: основной (сплошная линия), ортогональной (точка-пунктир), слабонаправленной (пунктирная)

Реализация предложенного алгоритма работы пространственно-поляризационного фильтра обеспечивалась с использованием пакета графического расширения SimuLink системы математического моделирования MatLab. Математическая модель представлена на рис. 6.

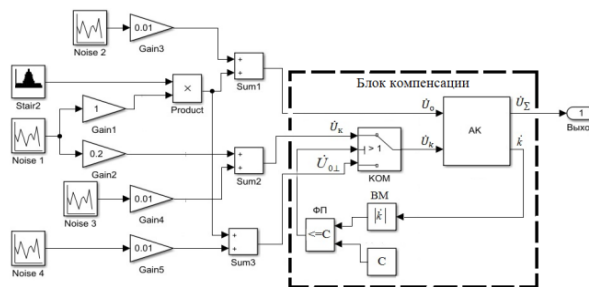


Рисунок 6 – Математическая модель блока компенсации пространственно-поляризационного фильтра

В модели гауссовские генераторы шума Noise 2, Noise 3 и Noise 4 через усилители Gain 3, Gain 4 и Gain 5 задают уровни собственных шумов в каналах  $\dot{U}_0$ ,  $\dot{U}_k$  и  $\dot{U}_{0\perp}$ . Блок Stair модулирует уровень АШП в основных каналах  $\dot{U}_0$  и  $\dot{U}_{0\perp}$  по закону  $\sin x/x$ , имитируя при этом эффект сканирования ДНА. Блок АК представляет собой модель автокомпенсатора с прямым вычислением весового коэффициента (см. рис. 2). Последовательно соединенные вычислитель модуля ВМ, формирователь порога ФП и коммутатор КОМ реализуют функцию структурной адаптации пространственно-поляризационного фильтра. Адаптация модели осуществляется при смещении АШП на направление главного луча коммутатором КОМ путем подключения ортогонального канала дуальнополяризованной антенны ко входу  $\dot{U}_k$  компенсационного канала АК вместо слабонаправленной антенны (см. рис. 3). При сканировании антенной системы, в зависимости от азимута  $\alpha$ , дисперсия АШП в основном и ортогональном каналах дуальнополяризованной антенны изменялась по закону  $\sin x/x$ . Это моделировалось последовательностью импульсов АШП длительностью 1,5 мкс. При этом максимальная дисперсия АШП составляла 40 дБ в максимуме главного луча и 26 дБ в максимумах первых боковых лепестков.

В оговоренных условиях функционирования блока компенсации осциллограмма помехи, действующей на входе основного канала, имела вид, представленный на рис. 7.

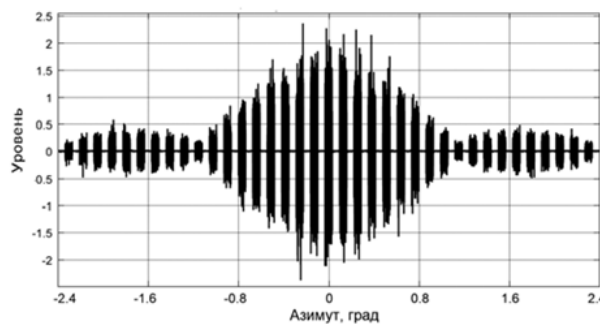


Рисунок 7 – Сигнал, действующий, на входе основного канала ПФ

При моделировании исследованы коэффициент подавления АШП  $K_{\Pi}$  и модуль весового коэффициента  $|k|$  блока компенсации в секторе азимутальных углов  $[-2,4^{\circ} \dots +2,4^{\circ}]$ . Эксперименты проведены в условиях первого особого поляризационного базиса, при котором модуль коэффициента корреляции  $|\rho|$  ортогональных компонент помехи достигает максимального значения [7]. Такие зависимости приведены на рис. 8 и 9, соответственно.

## 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Из рис. 8 следует, что коэффициент подавления помехи, действующей в максимумах первых боковых лепестков, достигает уровня 23 дБ. Это соответствует теоретическому пределу при действующей дисперсии АШП, равной 26 дБ. Из рис. 8 также следует, что максимальное значение коэффициента подавления помех в главном луче ДНА при пространственно-поляризационной обработке сигналов составляет 37 дБ, что также соответствует теоретическому пределу при дисперсии помехи, равной 40 дБ.

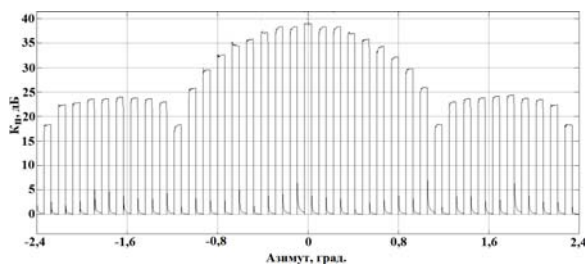


Рисунок 8 – Коэффициент подавления АШП при пространственно-поляризационной фильтрации

Из рис. 9 следует, что коммутация обработки помеховых сигналов с пространственной на поляризационную происходит в моменты смещения АШП с направления боковых лепестков на направление главного луча и наоборот на азимутах  $-1^{\circ}$  и  $+1^{\circ}$ . При этом значение модуля весового коэффициента пространственно-поляризационного фильтра как в области боковых лепестков, так и в направлении главного луча ДНА не превышает единичного уровня.

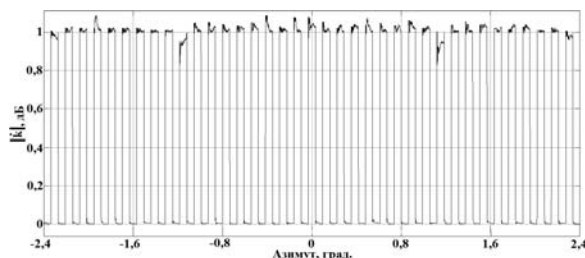


Рисунок 9 – Модуль весового коэффициента блока компенсации пространственно-поляризационного фильтра

На рис. 10, для подтверждения выше изложенного, приведен результат компенсации АШП пространственным фильтром при воздействии помехи в азимутальном секторе  $[-2,4^{\circ} \dots +2,4^{\circ}]$ , полученный в статье [6]. На рис. 10 представлен нескомпенсированный

остаток помехи на выходе пространственного фильтра. Из рис. 10 следует, что нескомпенсированный остаток АШП в области боковых лепестков ДНА равен 3 дБ, что определяется наличием собственных шумов каналов приема. Нескомпенсированный остаток помехи в максимуме главного луча ДНА возрастает до 15 дБ. Это обусловлено увеличением модуля весового коэффициента пространственного фильтра в максимуме главного луча до 5-ти единиц [6]. Вследствие этого, пропорционально возрастает вклад собственных шумов компенсационного канала, что приводит к возрастанию нескомпенсированного остатка на выходе пространственного фильтра и к ухудшению чувствительности приемного устройства РЛС. Кроме того, компенсация пространственным фильтром АШП, действующей в главном луче ДНА, искажает диаграмму направленности антенны [4], что ухудшает точность измерения угловых координат целей.

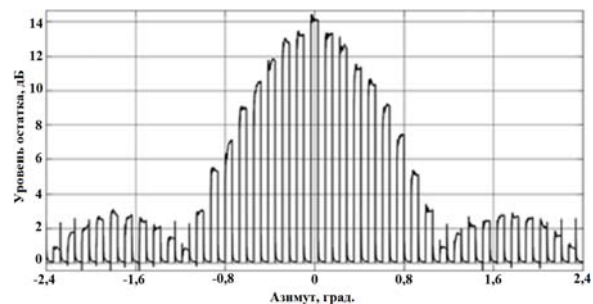


Рисунок 10 – Нескомпенсированный остаток АШП на выходе ПФ

Таким образом, совместное использование пространственных и поляризационных отличий в структуре полезных сигналов и помех в предлагаемом методе пространственно-поляризационной компенсации помех обеспечивает существенное повышение тактико-технических характеристик РЛС.

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Можно считать, что предложенный авторами метод пространственно-поляризационной компенсации помех обеспечивает более высокое качество обработки радиолокационной информации. Полученные результаты, изложенные в статье, подтвердили возможность за счет использования априорной информации о текущем состоянии весовых коэффициентов блоков компенсации пространственного фильтра обеспечить реализацию поляризационных отличий в структуре полезных сигналов и помех [7, 10]. Совместное использование пространственных и поляризационных отличий позволило обеспечить компенсацию активных шумовых помех, действующих как по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны, так и по главному лучу.

## ВЫВОДЫ

Научная новизна проведенного исследования состоит в разработке нового метода пространственно-поляризационной обработки радиолокационных сиг-

налов в складних умовах функціонування РЛС при масивному впливі активних шумових помах.

Практична новизна полягає в розробці структурної схеми просторово-поляризаційного фільтра, забезпечуючого компенсацію помах, дійсуючих як з напрямлений бокових лепестков, так і з напрямлений головного луча діаграми напрямленості антени. Розроблена математична модель блока компенсації фільтра. Оцінена ефективність подавлення помах в умовах першого особого поляризаційного базису.

#### ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Теоретичні основи радіолокації: 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.
2. Монзинго Р. А. Адаптивні антенні решітки. Введення в теорію / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер ; пер. с англ. под ред. В. А. Лесаченко. – М. : Радио и связь, 1986. – 448 с.
3. Радиоелектронные системы: Основы построения и теории. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.
4. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М. : Радио и связь, 1981. – 416 с.
5. Харламов А. В. Построение адаптивной пространственно-поляризаційної системи захити РЛС от активних шумових помах с произвольной пространственной структурой / А. В. Харламов // Системи обробки інформації. – 2010. – Вип. 2. – С. 182–187.
6. Пиза Д. М. Метод структурно-параметрической адаптации пространственного фильтра / Д. М. Пиза, Д. С. Се-

менов // Радиоелектроника, информатика, управление. – 2020. – № 3. – С. 22–30. DOI: /10.15588/1607-3274-2020-3-2.

7. Канарейкин Д. Б. Морская поляриметрия / Д. Б. Канарейкин, В. А. Потехин, И. Ф. Шишкин. – Л. : Судостроение, 1968. – 328 с.
8. Поздняк С. И. Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн. / С. И. Поздняк, В. А. Мелитицкий. – М. : Сов. радио, 1974. – 480 с.
9. Джули Д. Поляризаційне рознесення в радіолокації. / Д. Джули // ТИИЭР. – 1986. – Т. 74, № 2. – С. 6–34.
10. Пиза Д. М. Эффективность адаптивных поляризаційных фильтров при произвольных параметрах помах. / Д. М. Пиза // Проблемы управления и информатики. – 1998. – № 1. – С. 115–119.
11. Перунов Ю. М. Зарубежные радиоелектронные средства / Ю. М. Перунов, В. В. Мацукевич, А. А. Васильев; под ред. Ю. М. Перунова в 4-х книгах. кн. 2: Системы радиоелектронной борьбы. – М. : «Радиотехника», 2010. – 352 с.
12. Пиза Д. М. Усовершенствованный метод Грама-Шмидта для обработки радиолокационных сигналов. / Д. М. Пиза, С. Н. Романенко // Радиоелектроника, информатика, управление. – 2021. – № 4. – С. 26–33.
13. Adaptive cancellation arrangement: Patent 1 599 035 United Kingdom: IPC G01 S 7/36 13/52; index at acceptance H4D 259 265 36X 40X; filed 31 Mar. 1977; published 30 Sep. 1981, access mode: <http://www.directorypatent.com/GB/1599035-a.html>.
14. Багатоканальний пристрій адаптивної компенсації завад, діючих по бокових пелюстках діаграми спрямованості антени: пат. 141813 Україна: МПК G01S 7/36. № u201910675 заявл. 28.10.2019; опубл. 27.04.2020, Бюл. №8.

Статья поступила в редакцию 22.02.2022.  
После доработки 20.03.2022.

УДК 621.396.95

#### МЕТОД ПРОСТОРОВО-ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ЗАВАД

**Пиза Д. М.** – д-р техн. наук, професор кафедри радіотехніки та телекомунікацій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна.

**Мороз Г. В.** – старший викладач кафедри радіотехніки та телекомунікацій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна.

#### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** При захиті РЛС від активних шумових завад, діючих по бокових пелюстках діаграми спрямованості антени, використовують просторову фільтрацію сигналів шляхом застосування рознесенного прийому корисного сигналу і завад. При цьому різниця в напрямках прийому сигналу і завади дозволяє скомпенсувати заваду і забезпечити виявлення корисного сигналу. Однак, якщо джерело завади зміщується в область головного променя діаграми спрямованості основної антени, то просторові відмінності між корисним сигналом і завадою зменшуються. Це призводить до суттєвого спотворення діаграми спрямованості. В результаті цього погіршується точність вимірювання координат цілей, а також чутливість приймального пристрою РЛС. В статті запропоновано новий метод просторово-поляризаційної обробки радіолокаційних сигналів, який забезпечує компенсацію активних шумових завад як з напрямку бокових пелюстків, так і з напрямку головного променя.

**Ціль роботи** полягає у розробці методу сумісної просторово-поляризаційної обробки радіолокаційних сигналів в умовах дії активних шумових завад як по бокових пелюстках діаграми спрямованості антени, так і по головному променю.

**Метод** реалізується шляхом використання структурної адаптації пристрою завадозахити в залежності від напрямку дії завади. При цьому управляючий сигнал для структурної адаптації формується по величині поточного значення модуля вагово-го коефіцієнта просторового фільтра.

**Результати.** Розроблена сумісна структурна схема просторово-поляризаційного фільтра, який забезпечує компенсацію активних шумових завад, діючих як по бокових пелюстках, так і по головному променю діаграми спрямованості антени РЛС. Розроблена математична модель блока компенсації, який забезпечує структурну адаптацію просторово-поляризаційного фільтра. В умовах першого особливого поляризаційного базису оцінена ефективність подавлення завад, діючих по головному променю діаграми спрямованості антени.

**Висновки.** Наукова новизна проведеного дослідження полягає у розробці нового методу просторово-поляризаційної обробки радіолокаційних сигналів в складних умовах функціонування РЛС при масовій дії активних шумових завад.

© Пиза Д. М., Мороз Г. В., 2022  
DOI 10.15588/1607-3274-2022-2-3

Практична новизна полягає в розробці структурної схеми просторово-поляризаційного фільтра, який забезпечує компенсацію завад, діючих як з напрямів бокових пелюстків, так і з напрямку головного променя діаграми спрямованості антени. Розроблена математична модель блока компенсації фільтра. Оцінена ефективність подавлення завад в умовах першого особливого поляризаційного базиса.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** активна шумова завада, просторово-поляризаційний фільтр, коефіцієнт подавлення.

UDC 621.396.95

#### METHOD FOR SPATIAL POLARIZATION COMPENSATION OF JAMMING

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

**Moroz G. V.** – Senior Lecturer of the Department of Radio Engineering and Telecommunications of the National University “Zaporozhye Polytechnic”, Zaporozhye, Ukraine.

#### ABSTRACT

**Context.** To protect radars from active noise interference (jamming) acting along the side lobes of the antenna pattern, spatial signal filtering is used, which is realized by using diversity reception of the useful signal and interference. In this case, the difference in the directions of interference and signal makes it possible to compensate for interference and detect a useful signal. However, in the case where the source of interference is in the main lobe, the differences between the desired signal and the interference are reduced. This leads to significant distortion of the antenna main lobe pattern. As a result, the accuracy of angular coordinates measurement deteriorates, as well as the sensitivity of the receiving radar device. The article proposes a new method for spatial polarization processing of radar signals, which provides compensation for active noise interference both as from the directions of the side lobes and from the direction of the main beam of the antenna pattern.

**Objective.** The goal is to develop a method for spatial polarization processing of radar signals under the influence of active noise interference both along the side lobes of the antenna pattern and along the main lobe.

**Method.** The method is implemented by using structural adaptation of the noise protection device, depending on the direction of the interference. In this case, the control signal for structural adaptation is formed according to the magnitude of the current spatial filter weighting coefficient value.

**Results.** A block diagram of a spatial polarizing filter which provides compensation for active noise interference acting both on the side lobes and on the main lobe of the radar antenna pattern. The mathematical model of the compensation unit that implements the structural adaptation of the spatial polarization filter has been developed. Under the conditions of the first special polarization basis, the efficiency of noise suppression acting along the main lobe of the antenna pattern is estimated.

**Conclusions.** The scientific novelty of the research is the development of a new method of spatial polarization processing of radar signals under difficult conditions of radar operation under massive active noise interference.

The practical significance of the research is in the development of a block diagram of a spatial polarizing filter that provides compensation for interference both from the direction of the side lobes and from the direction of the main lobe of the antenna pattern. The mathematical model of the filter has been developed. The efficiency of noise suppression under the conditions of the first special polarization basis is estimated.

**KEYWORDS:** active noise interference, spatial polarization filter, cancellation ratio.

#### REFERENCES

1. Shirman Ja. D., Golikov V. N., Busygin I. N. i dr.; pod obshh. red. Shirmana Ja. D. Teoreticheskie osnovy radiolokacii, ucheb. posobie dlja vuzov. Moscow, Sov. radio, 1970, 560 p.
2. Monzingo R. A., Miller T. U.; per. s angl. pod red. Lesachenko V. A. Adaptivnye antennnye reshetki. Vvedenie v teoriju. Moscow, Radio i svjaz', 1986, 448 p.
3. Shirmana Ja. D. pod red. Radioelektronnye sistemy: Osnovy postroenija i teorija. Spravochnik. Izd. 2-e, pererab. i dop. Moscow, Radiotekhnika, 2007, 512 p.
4. Shirman Ja. D., Manzhos V. N. Teorija i tehnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomeh. Moscow, Radio i svjaz', 1981, 416 p.
5. Harlamov A. V. Postroenie adaptivnoj prostranstvenno-poljarizacionnoj sistemy zashhity RLS ot aktivnyh shumovyh pomeh s proizvol'noj prostranstvennoj strukturoj, *Sistemi obrobki informacii*, 2010, Vip. 2, pp. 182–187.
6. Piza D. M., Semenov D. S. Metod strukturno-parametricheskoj adaptacii prostranstvennogo fil'tra, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, No. 3, pp. 22–30. DOI: /10.15588/1607-3274-2020-3-2.
7. Kanarejkin D. B., Potehin V. A., Shishkin I. F. Morskaja poljarimetrija. Leningrad, Sudostroenie, 1968, 328 p.
8. Pozdnjak S. I., Melitickij V. A. Vvedenie v statisticheskiju teoriju poljarizacii radiovoln. Moscow, Sov. radio, 1974, 480 p.
9. Dzhuli D. Poljarizacionnoe raznesenie v radiolokacii, *TIIJeR*, 1986, Vol. 74, No. 2, pp. 6–34.
10. Piza D. M. Jefferktivnost' adaptivnyh poljarizacionnyh fil'trov pri proizvol'nyh parametrah pomeh, *Problemy upravlenija i informatiki*, 1998, No. 1, pp. 115–119.
11. Perunov Ju. M., Macukevich V. V., Vasil'ev A. A.; pod red. Perunova Ju. M. Zarubezhnye radiojelektronnye sredstvav 4-h knigah. kn.2, Sistemy radiojelektronnoj bor'by. Moscow, «Radiotekhnika», 2010, 352 p.
12. Piza D. M., Romanenko S. N. Uovershenstvovannyj metod Grama-Shmidta dlja obrabotki radiolokacionnyh signalov, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2021, No. 4, pp. 26–33.
13. Adaptive cancellation arrangement: Patent 1 599 035 United Kingdom: IPC G01 S 7/36 13/52; index at acceptance H4D 259 265 36X 40X; filed 31 Mar. 1977; published 30 Sep. 1981, access mode: <http://www.directorypatent.com/GB/1599035-a.html>.
14. Bagatokanal'nij pristrij adaptivnoi kompensacii zavod, dijuchih po bokovyh peljustkah diagrami sprjamovanosti anteni: pat. 141813 Ukraїna: MPK G01S 7/36. № u201910675 zajavl. 28.10.2019; opubl. 27.04.2020, Bjul. №8.