

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ГРАМА-ШМИДТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

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

Романенко С. Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Защиты информации Национального университета «Запорожская политехника», г. Запорожье, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. При защите радиолокационных станций от активных шумовых помех, действующих по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны, используют пространственную фильтрацию сигналов, которая реализуется путем использования антенн, разнесенных в пространстве. В этом случае различие направлений приема полезного сигнала и помехи позволяет сформировать оптимальное значение весовых коэффициентов адаптивных пространственных фильтров для подавления помехи. Однако, если источник помехи смещается в область главного луча, то пространственные различия между полезным сигналом и помехой уменьшаются. Это приводит к существенному искажению диаграммы направленности основной антенны. В результате этого ухудшается точность измерения угловых координат, а также чувствительность приемного устройства РЛС. В статье предложен структурно-параметрический метод адаптации пространственного фильтра, обеспечивающий эффективную работу РЛС при воздействии АШП как с направления боковых лепестков, так и с направления главного луча.

Цель. Повышение эффективности работы РЛС при смещении источника АШП с направления боковых лепестков ДНА на направление главного луча.

Метод. Предложенный метод позволяет за счет структурной адаптации многоканального пространственного фильтра исключить искажение главного луча диаграммы направленности антенны РЛС и обеспечить ее работу в условиях возможного воздействия помехи по главному лучу. Структурная адаптация пространственного фильтра реализуется путем текущего анализа весовых коэффициентов блоков компенсации.

Результаты. Усовершенствовано структурную схему многоканального пространственного фильтра по методу Грама-Шмидта со структурно-параметрической адаптацией, а также структурную схему блока компенсации. В результате проведенного моделирования подтверждена возможность исключения искажений диаграммы направленности основной антенны РЛС в условиях возможного воздействия АШП по главному лучу диаграммы направленности РЛС.

Выводы. Научная новизна работы состоит в усовершенствовании алгоритма обработки сигналов при пространственной фильтрации как при воздействии АШП с направления боковых лепестков, так и при смещении источника помехи на направление главного луча диаграммы направленности антенны РЛС.

Практическая новизна работы состоит в разработке структурной схемы и математической модели усовершенствованного пространственного фильтра со структурно-параметрической адаптацией.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: структурно-параметрическая адаптация, активная шумовая помеха, пространственный фильтр, коэффициент подавления.

АББРЕВИАТУРЫ

АШП – активная шумовая помеха;
ДНА – диаграмма направленности антенны;
БпЛА – беспилотный летающий аппарат;
ВМ – вычислитель модуля;
КОМ – коммутатор;
ЛЗ – линия задержки;
РЛС – радиолокационная станция;
ФП – формирователь порога.

НОМЕНКЛАТУРА

$\dot{k}_{\text{опт}}$ – оптимальное значение весового коэффициента;
 \dot{U}_0 – комплексное значение помех в основном канале;
 $\dot{U}_{k1}, \dot{U}_{k2}, \dot{U}_{k3}$ – комплексные значения помех в компенсационных каналах приема;

$\dot{U}_{01}, \dot{U}_{k11}, \dot{U}_{k21}$ – комплексные значения помех на выходе первого каскада;

$\dot{U}_{02}, \dot{U}_{k12}$ – комплексное значение помех на выходе второго каскада;

\dot{U}_{03} – комплексное значение помехи на выходе третьего каскада;

α – азимут помехи;

σ_0 – среднееквадратическое значение помехи в основном канале приема;

σ_k – среднееквадратическое значение помехи в компенсационном канале;

$\dot{\rho}$ – комплексное значение коэффициента межканальной корреляции АШП;

K_b – модуль весового коэффициента;

K_n – коэффициент подавления АШП.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных требований, предъявляемых к РЛС, является ее помехозащищенность. Это характерно для широкого класса радиолокационных средств как военного, так и гражданского назначения [1]. В условиях воздействия активных шумовых помех возможность обнаружения полезных сигналов существенно снижается [2, 4]. В современных условиях вероятность подавления радиолокационных средств по боковым лепесткам диаграмм направленности антенны (ДНА) значительно возросла. Это определяется двумя факторами. Во-первых, это определяется возросшей вероятностью воздействия на РЛС БпЛА, оснащенных источниками АШП, действующими в ближней зоне [1, 2]. Вторая причина возросшей вероятности подавления РЛС объясняется существенным повышением интенсивности активных помех, формируемых современными средствами радиопротиводействия. Это обеспечивается внедрением в постановщики помех фазированных антенных решеток с когерентным сложением помеховых сигналов, а также реализацией режима «помеха в кадре» [2].

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для повышения эффективности РЛС в условиях воздействия АШП по главному лучу ДНА используют поляризационные отличия в структуре полезного сигнала и помехи, что реализуется использованием дуальнополяризованных антенн. При воздействии АШП по боковым лепесткам используют пространственные отличия в направлениях воздействия полезных сигналов и АШП. Это обеспечивается использованием распределенного в пространстве приема сигналов как основной антенной РЛС, так и антеннами компенсационных каналов приема. В этом случае весовые коэффициенты адаптивного пространственного фильтра, как правило, не превышают единичного уровня. При этом диаграммы направленности компенсационных каналов «накрывают» боковые лепестки основной антенны, что позволяет компенсировать АШП, воздействующие с направлений боковых лепестков. Однако, в случае, когда пространственные отличия уменьшаются и источник шумовой помехи начинает действовать по главному лучу ДНА, то, вследствие увеличения весовых коэффициентов пространственного фильтра при компенсации помехи, происходит искажение главного луча. При этом ухудшается точность измерения угловых координат целей, а также чувствительность приемного устройства РЛС.

Цель работы – повышение эффективности работы РЛС при смещении источника АШП с направления боковых лепестков ДНА на направление главного луча.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Известны многоканальные автокомпенсаторы помех с корреляционной обратной связью, которые обеспечивают защиту РЛС при воздействии нескольких источников АШП, разнесенных в пространстве [1]. Основным недостатком таких устройств является низкое быстродействие при формировании весовых коэффициентов [3–5]. Это обусловлено двумя причинами, в частности: использованием многих контуров обратной связи, которые тормозят процесс адаптации, а также взаимной корреляцией помех в компенсационных каналах РЛС. Еще одним недостатком является уменьшение быстродействия таких устройств при существенном разбросе собственных значений корреляционной матрицы помех.

Известны также многоканальные системы помехозащиты, построенные по методу Грама-Шмидта, использующие автокомпенсаторы без корреляционных обратных связей [5]. Такие устройства с прямым вычислением весовых коэффициентов позволяют обеспечить ортогонализацию АШП в компенсационных каналах приема и существенно повысить быстродействие формирования весовых коэффициентов пространственного фильтра. Недостатком таких пространственных фильтров является ухудшение точности измерения угловых координат целей, а также чувствительности основного канала РЛС при смещении источника помехи с направления боковых лепестков ДНА на направление главного луча. Это обусловлено искажением главного луча ДНА при компенсации АШП, действующей по главному лучу [6, 7]. В статье [8] также отмечается, что в случае совпадения направлений воздействия полезного сигнала и АШП возникает эффект «ослепления» РЛС. Видимо, это можно объяснить тем, что в этом случае, формируемые пространственным фильтром весовые коэффициенты при компенсации АШП одновременно компенсируют и полезный сигнал.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Известная структурная схема ортогонализации АШП по методу Грама-Шмидта приведена на рис. 1 [5, 9]. 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 декорреляции. 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} .

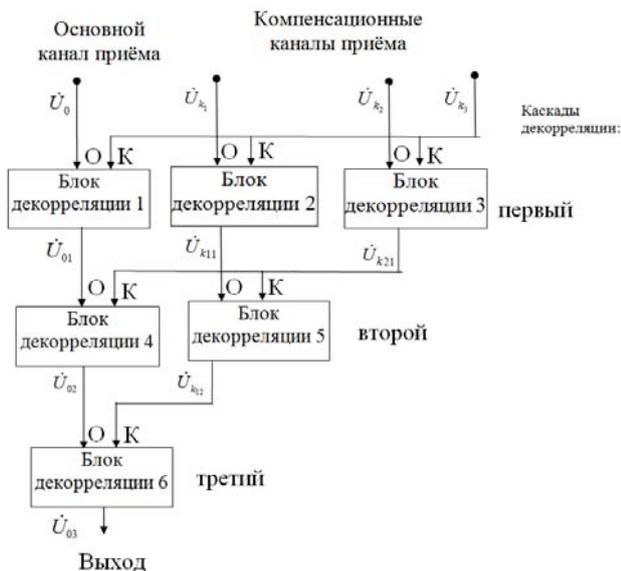


Рисунок 1 – Структурная схема ортогонализации АШП по методу Грама-Шмидта

В качестве блоков декорреляции в структурной схеме используются одноканальные автокомпенсаторы с прямым вычислением весовых коэффициентов. Структурная схема такого автокомпенсатора приведена на рис. 2 [5, 10]. 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 следует, что оптимальное значение весового коэффициента $\dot{k}_{\text{опт}}$ для полного подавления АШП в блоках компенсации 1, 4 и 6 формируется на выходе делителя 5 по выражению:

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

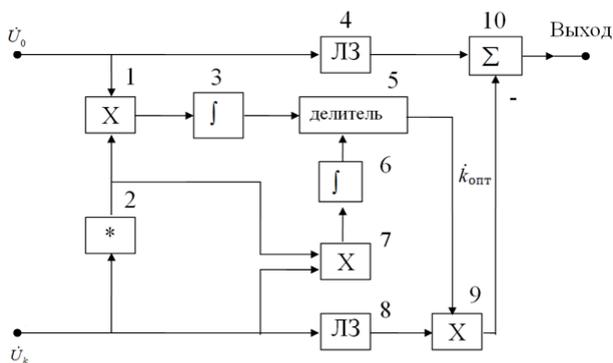


Рисунок 2 – Структурная схема блока ортогонализации

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 действу-

ет 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:

$$\dot{U}_{01} = \dot{U}_0 - \dot{k}_{\text{опт}1} \dot{U}_{k3}, \quad \dot{U}_{02} = \dot{U}_{01} - \dot{k}_{\text{опт}4} \dot{U}_{k21}, \quad (2)$$

$$\dot{U}_{03} = \dot{U}_{02} - \dot{k}_{\text{опт}6} \dot{U}_{k12},$$

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 σ_0 и σ_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. Для формирования такого признака в процессе синтеза структурной схемы при усовершенствовании метода Грама-Шмидта в каждый автокомпенсатор, в котором компенсируются помехи, действующие в основном канале, дополнительно введена цепь, содержащая последовательно соединенные вычислитель модуля 13, формирователь порога 12 и коммутатор 11 (см. рис. 3). Такая цепь может обеспечить структурную адаптацию многоканального пространственного фильтра при смещении источников АШП с направления боковых лепестков ДНА на направление главного луча и исключить его искажение. При этом блок компенсации помех в отличие от блока ортогонализации (см. рис. 2) имеет вид, представленный на рис. 3.

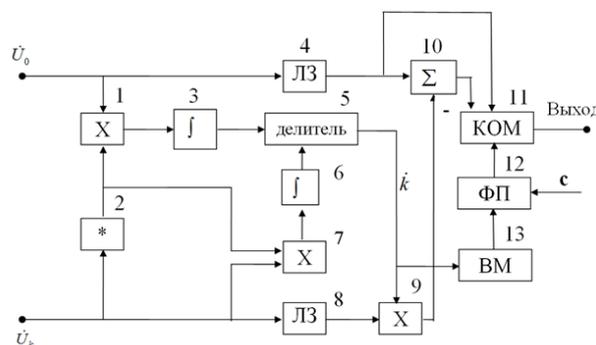


Рисунок 3 – Структурная схема блока компенсации

Рассмотрим алгоритм работы на примере первого каскада обработки сигналов усовершенствованного

многоканального просторового фільтра со структурно-параметричної адаптацією [10], представлений на рис. 4.

На входи першого каскаду обробки сигналів, який містить блок компенсації 1 і блоки декореляції 2 і 3, к основному входу О блока компенсації 1 поступають помехи з основного каналу прийому \dot{U}_0 . К основним входам О блоків декореляції з номерами 2 і 3 поступають помехи \dot{U}_{k1} і \dot{U}_{k2} , відповідно. Помеха \dot{U}_{k3} поступає на компенсаційні входи К блока компенсації 1 і блоків декореляції з номерами 2 і 3. В відповідності з формулою (1) і структурними схемами рис. 2 або рис. 3 на виходах інтеграторів 3 в блока компенсації 1 і в блоках декореляції з номерами 2 і 3 вичисляються кореляційні моменти $\overline{\dot{U}_0 \dot{U}_{k3}^*}$, $\overline{\dot{U}_{k1} \dot{U}_{k3}^*}$ і $\overline{\dot{U}_{k2} \dot{U}_{k3}^*}$, які поступають на делітеля 5 в якості числителя. В якості знаменателя з виходів інтеграторів 6 поступає дисперсія помехи, яка діє на входах К блока компенсації і блоків декореляції. При цьому в блоках декореляції 2 і 3 декорелюється помеха \dot{U}_{k3} , а в блока компенсації з номером 1, що відповідає структурній схемі, представленій на рис. 4, компенсується помеха \dot{U}_{k3} , яка діє в основному каналу прийому. Якщо активна помеха діє по боковим лепесткам ДНА, то значення модуля вагового коефіцієнта на виході вичислителя модуля 13 (см. рис. 3) не перевищує поріг ϵ в формувателі поріг 12 і результат компенсації з виходу сумматора 10 через комутатор 11 поступає на вихід блока компенсації з номером 1.

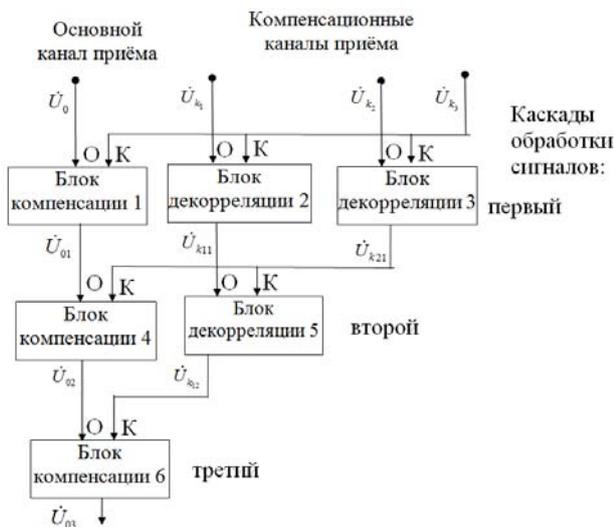


Рисунок 4 – Усовершенствованный многоканальный пространственный фильтр со структурно-параметрической адаптацией

В случае, когда при смещении источника помехи в пространстве или в результате сканирования антенны, АШП смещается и начинает действовать по главному

лучу ДНА, то уровень помехи в основном канале увеличивается, в соответствии с выражением (3), и модуль вагового коэффициента превышает порог ϵ в формувателе поріг 12. Коммутатор 11 підключає на вихід блока компенсації з номером 1 помеху, діючу на основному вході сумматора 10. При цьому помеха на виході блока компенсації 1 не компенсується і $\dot{U}_{01} = \dot{U}_0$. В цьому випадку АШП продовжує поступати на основний і компенсаційні входи блока компенсації 1, вагові коефіцієнти автокомпенсатора формуються і ланка структурної адаптації відслідковує момент, коли помеха знову зміститься на напрямлення бокових лепестків ДНА. Після зміщення головного луча ДНА з напрямлення на джерело АШП модуль вагового коефіцієнта на виході вичислителя модуля 13 не перевищує рівень поріг ϵ і процес компенсації помехи, діючої по боковим лепесткам, продовжується. При цьому коммутатор 11 підключає вихід сумматора 10 к виходу блока компенсації з номером 1. В блоках декореляції з номерами 2 і 3, які відповідають структурній схемі, приведеної на рис. 4, ортогоналізуються помехи \dot{U}_{k1} і \dot{U}_{k2} відносно помехи \dot{U}_{k3} . В результаті цього кореляційні моменти $\overline{\dot{U}_0 \dot{U}_{k3}^*}$ і $\overline{\dot{U}_{k1} \dot{U}_{k3}^*}$ рівняються нулю. Друга цифра в індексах помех на виходах каскадів визначає номер каскаду обробки помехи, в якому вона розв'язана.

Для дослідження ефективності запропонованого методу обробки радіолокаційних сигналів розроблено математичні моделі, що відповідають структурним схемам блоків компенсації і ортогоналізації, представленим на рис. 2 і 3. При створенні моделей просторового фільтра в якості основної антени використана антена з амплітудним розподілом $\frac{\sin x}{x}$ з рівнем першого бокового лепестка, рівним 13 дБ. В якості компенсаційної антени використана слабонаправлена антена, яка «накриває» бокові лепестки основної антени.

Реалізація запропонованого алгоритму роботи просторового фільтра і його дослідження забезпечувалося використанням пакету графічного розширення SimuLink системи математичного моделювання MatLab. Була сформована конкретна помехова обстановка для проведення досліджень просторового фільтра як з параметричної, так і со структурно-параметричної адаптацією. При скануванні антенної системи, в залежності від азимута α , дисперсія АШП в основному каналі змінювалась по закону $\frac{\sin x}{x}$. Це моделювалось послідовно-

стю імпульсів АШП тривалістю 1,5 мкс. При цьому максимальна відносна дисперсія АШП складала 40дБ в максимумі головного луча ДНА.

Дисперсия АШП в компенсационном канале равнялась 25 дБ в максимумах боковых лепестков.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе моделирования исследована как известная схема блока компенсации пространственного фильтра с параметрической адаптацией (рис. 2), так и предложенная авторами и запатентованная схема со структурно-параметрической адаптацией (рис. 3). В принятых условиях моделирования при исследовании, в зависимости от азимута действия АШП, получены результаты, которые представлены на рис. 5–9, полученные при параметрической адаптации пространственного фильтра.

На рис. 5 представлена АШП, действующая на входе основного канала пространственного фильтра. Сигнал имитирует процесс сканирования антенной системы РЛС в диапазоне азимутального сектора углов $[-2,4^\circ \dots +2,4^\circ]$, относительно азимута главного луча ДНА, равного нулю.

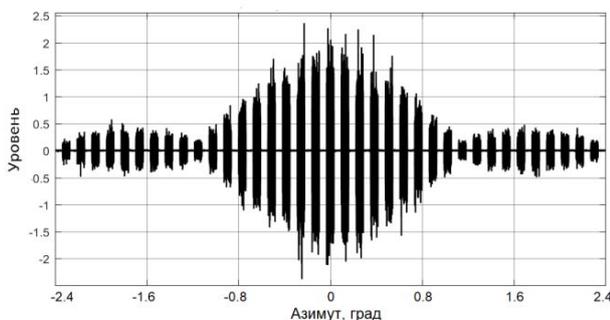


Рисунок 5 – Сигнал, действующий, на входе основного канала пространственного фильтра

На рис. 6 приведена осциллограмма коэффициента подавления АШП, действующей на выходе пространственного фильтра с параметрической адаптацией. Анализ рис. 6 позволяет сделать вывод, что коэффициент подавления K_n АШП, которая действует с направления главного луча, ограничивается на уровне 26 дБ при ее максимальном уровне, равном 40 дБ. Это ограничение обусловлено увеличением модуля весового коэффициента пространственного фильтра и соответствующим увеличением собственных шумов компенсационного канала на входе сумматора 10 (см. рис. 2), что ухудшает чувствительность приемного устройства РЛС. Из рис. 6 также следует, что максимальный коэффициент подавления K_n АШП, действующей по боковым лепесткам, равняется 23 дБ, что соответствует теоретическому пределу при ее максимальном уровне, равном 25 дБ.

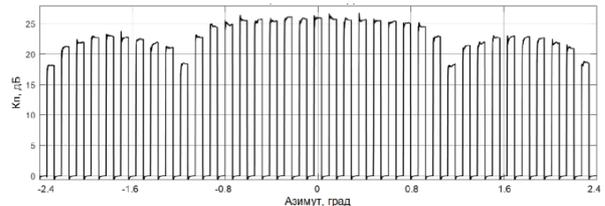


Рисунок 6 – Коэффициент подавления АШП при параметрической адаптации пространственного фильтра

На рис. 7 представлена осциллограмма модуля весового коэффициента пространственного фильтра в процессе сканирования антенны. Из рис. 7 видно, что при действии АШП с направления боковых лепестков: ($\alpha = -1,6^\circ$, или $\alpha = +1,6^\circ$), максимальное значение модуля весового коэффициента равно единице. Когда АШП действует по главному лучу с направления $\alpha = 0^\circ$, то весовой коэффициент увеличивается до 5-ти единиц. При этом уровень собственных шумов компенсационного канала на выходе сумматора 10 существенно увеличивается. Следствием этого является ухудшение чувствительности приемного устройства РЛС. Это также следует из рис. 8, на котором показано увеличение некомпенсированного остатка АШП на выходе пространственного фильтра.

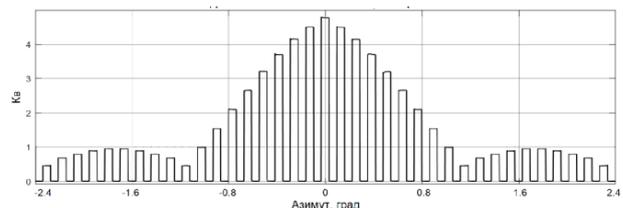


Рисунок 7 – Модуль весового коэффициента блока компенсации при параметрической адаптации пространственного фильтра

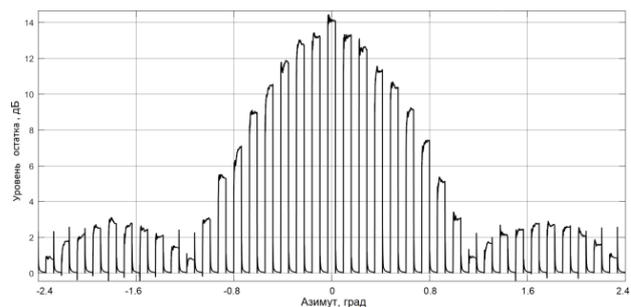


Рисунок 8 – Некомпенсированный остаток АШП на выходе пространственного фильтра

В результате исследований установлено, что использование структурно-параметрической обработки радиолокационных сигналов исключает возможность ухудшения чувствительности РЛС и точности измерения угловых координат целей. Действительно, поскольку при воздействии АШП по главному лучу ДНА выход пространственного фильтра подключается к основному входу сумматора блока компенсации, то компенсация АШП не происходит и ДНА РЛС в

области главного луча не искажается, что обеспечивает нормальное функционирование РЛС.

5 ОБСУЖДЕНИЕ

Можно считать, что предложенный авторами метод структурно-параметрической адаптации пространственных фильтров [10] обеспечивает более высокое качество обработки радиолокационной информации. Полученные результаты определенным образом подтверждают мнение, изложенное в работе [8], относительно «ослепления» РЛС при отсутствии пространственных отличий между направлениями воздействия полезного сигнала и АШП. Это объясняется общим «провалом» в ДНА, что не позволяет вести обнаружение полезного сигнала даже при некотором несовпадении направлений воздействия сигнала и АШП в пределах главного луча ДНА. Однако, в дальнейшем представляется целесообразным оценить величину потерь в обнаружении полезного сигнала при несовпадении направлений воздействия сигнала и АШП в пределах главного луча ДНА. Такие исследования авторы планируют провести в дальнейшем.

ВЫВОДЫ

Усовершенствован метод адаптации многоканальных пространственных фильтров, обеспечивающих эффективную работу РЛС как при воздействии АШП с направления боковых лепестков, так и при ее смещении на направление главного луча ДНА. Разработана структурная схема пространственного фильтра со структурно-параметрической адаптацией весовых коэффициентов. Создана математическая модель и проведено ее тестирование. Подтверждены возможности повышения точности измерения угловых координат, а также чувствительности приемного устройства РЛС в условиях возможного воздействия АШП по главному лучу ДНА.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы Национального университета «Запорожская политехника» «Разработка и усовершенствование методов обработки радиолокационных сигналов в условиях воздействия комбинированных помех» (номер регистрации 01170000614) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Украины.

Конфликта интересов при выполнении работы нет.

УДК 621.396.95

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ГРАМА-ШМІДТА ДЛЯ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

Піза Д. М. – д-р техн. наук, професор кафедри Радіотехніки та телекомунікацій, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна.

Романенко С. М. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедри Захисту інформації, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. При захисті радіолокаційних станцій від активних шумових завад, діючих по бокових пелюстках діаграми спрямованості антени, використовують просторову фільтрацію сигналів, яка реалізується шляхом застосування антен,

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Радиозлектронные системы: Основы построения и теории. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.
2. Перунов Ю.М. Зарубежные радиозлектронные средства / Ю. М. Перунов, В. В. Мацукевич, А. А. Васильев ; под ред. Ю. М. Перунова; в 4-х книгах. кн.2: Системы радиозлектронной борьбы. – М. : «Радиотехника», 2010. – 352 с.
3. Леховицкий Д.И., Рябуха В.П., Семеняка А.В., Атаманский Д.В., Катюшин Е.А. Защита когерентно-импульсных РЛС от комбинированных помех. 1. Разновидности систем ПВОС и их предельные возможности / [Д. И. Леховицкий, В. П. Рябуха, А. В. Семеняка и др.] // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2019. – №7. – С. 380–412.
4. Пиза Д. М. Повышение эффективности пространственно-временной обработки радиолокационных сигналов в условиях воздействия комбинированных помех / Д. М. Пиза, Д. С. Семенов // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 63, №5. – С. 300–309. DOI: 10.20535/S0021347020050040
5. 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>.
6. 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.
7. Пиза Д. М. Метод структурно-параметрической адаптации пространственного фильтра / Д. М. Пиза, Д. С. Семенов // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2020. – №3. – С. 22–30. DOI: /10.15588/1607-3274-2020-3-2.
8. Харламов А. В. Построение адаптивной пространственно-поляризационной системы защиты РЛС от активных шумовых помех с произвольной пространственной структурой / А. В. Харламов // Системы обработки информации. – 2010. – Вып. 2. – С. 182–187.
9. Монзинго Р. А. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию ; пер. с англ. / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер ; под ред. В.А. Лесаченко. – М. : Радио и связь, 1986. – 448 с.
10. Пат. 141813 Україна, МПК G01 7/36, H04B 15/00. Багатоканальний пристрій адаптивної компенсації завад, діючих по бокових пелюстках діаграми спрямованості антени / Піза Д. М., Семенов Д. С.; заявник і патентовласник НУ «Запорізька політехніка». – № U201910675; Заявл. 01.11.2019; Опубл. 27.04.2020, Бюл. № 8.

Статья поступила в редакцию 17.09.2021.
После доработки 02.11.2021.

рознесених в просторі. В цьому випадку при різних напрямках прийому корисного сигналу і завади вдається сформувати оптимальні значення вагових коефіцієнтів адаптивних просторових фільтрів для подавлення АШЗ. Однак, якщо джерело завади зміщується в область головного променя, то просторові відмінності між корисним сигналом і завадою зменшуються. Це приводить до суттєвого спотворення діаграми спрямованості основної антени. В результаті цього погіршується точність вимірювання кутових координат, а також чутливість приймального пристрою РЛС. В статті запропоновано структурно-параметричний метод адаптації просторового фільтра, який забезпечує ефективну роботу РЛС при дії АШЗ як з напрямку бокових пелюстків, так і з напрямку головного променя.

Ціль. Підвищення ефективності роботи РЛС при зміщенні джерела АШЗ з напрямку бокових пелюстків ДСА на напрям головного променя.

Метод. Запропонований метод дозволяє за рахунок структурної адаптації багатоканального просторового фільтра виключити спотворення головного променя ДСА РЛС і забезпечити її роботу в умовах можливої дії завади по головному променю. Структурна адаптація просторового фільтра реалізується шляхом поточного аналізу вагових коефіцієнтів блоків компенсації.

Результати. Розроблено структурну схему багатоканального просторового фільтра за методом Грама-Шмідта зі структурно-параметричною адаптацією, а також структурну схему блока компенсації. В результаті проведеного моделювання підтверджена можливість виключення спотворення діаграми спрямованості основної антени РЛС в умовах можливої дії АШЗ по головному променю.

Висновки. Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні алгоритму обробки сигналів при просторовій фільтрації сигналів як при дії АШЗ з напрямку бокових пелюстків, так і при зміщенні джерела завади на напрям головного променя діаграми спрямованості антени РЛС. Практична новизна роботи полягає в розробці структурної схеми і математичної моделі удосконаленого просторового фільтра з структурно-параметричною адаптацією.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: структурно-параметрична адаптація, активна шумова завада, просторовий фільтр, коефіцієнт подавлення завади.

UDC 621.396.95

ADVANCED GRAM-SCHMIDT METHOD FOR RADAR SIGNAL PROCESSING

Piza D. M. – Dr. Sc., Professor of the Department of Radio Engineering and Telecommunications of the National University “Zaporozhье Polytechnic”, Zaporozhье, Ukraine.

Romanenko S. N. – PhD, Associate Professor of the Department of Information Security of the National University “Zaporozhье Polytechnic”, Zaporozhье, Ukraine.

ABSTRACT

Context. When protecting radar stations from active noise interference acting along the side lobes of the antenna directional pattern, spatial filtering of signals is used, which is realized by using antennas that are spaced apart in space. In this case, the difference in the directions of reception of the useful signal and the interference makes it possible to form the optimal value of the weighting coefficients of the adaptive spatial filters to suppress the interference. However, if the interfering source moves into the main beam region, then the spatial differences between the wanted signal and the interference are reduced. This leads to significant distortion of the main antenna radiation pattern. As a result, the accuracy of measuring the angular coordinates deteriorates, as well as the sensitivity of the radar receiver. The article proposes a structural-parametric method for adapting a spatial filter, which ensures effective operation of the radar when exposed to the active noise interference both from the direction of the side lobes and from the direction of the main beam.

Goal. Improving the efficiency of the radar when the active noise interference source is shifted from the direction to the side lobes to the direction of the main beam.

Method. The proposed method makes it possible, due to the structural adaptation of the multichannel spatial filter, to exclude the distortion of the main beam of the radiation pattern of the radar antenna and to ensure its operation under conditions of possible interference from the main beam. Structural adaptation of the spatial filter is realized by the current analysis of the weighting coefficients of the compensation blocks.

Results. The structural diagram of the multichannel spatial filter by the Gram-Schmidt method with structural-parametric adaptation, as well as the structural diagram of the compensation block, has been improved. As a result of the simulation, the possibility of eliminating distortions of the radiation pattern of the main antenna of the radar in conditions of the possible impact of the active noise interference along the main beam of the radiation pattern of the radar has been confirmed.

Conclusions. The scientific novelty of the work consists in the improvement of the signal-processing algorithm at spatial filtering both when exposed to the active noise interference from the direction of the side lobes, and when the interference source is shifted to the direction of the main beam of radar.

The practical novelty of the work lies in the development of a structural diagram and a mathematical model of an improved spatial filter with structural-parametric adaptation.

KEYWORDS: structural-parametric adaptation, active noise interference, spatial filter, suppression coefficient.

REFERENCES

1. Radioelektronnye sistemy: Osnovy postroeniya i teoriya. Spravochnik. Izd. 2-e, pererab. i dop. Pod red. Ya. D. Shirmana. Moscow, Radiotekhnika, 2007, 512 p.
2. Perunov Yu. M., Macukevich V. V., Vasil'ev A. A. pod red. Yu. M. Perunova Zarubezhnye radioelektronnye sredstva, v 4-h knigah. kn.2: Sistemy radioelektronnoj bor'by. Moscow, "Radiotekhnika", 2010, 352 p.
3. Lekhovichij D. I., Ryabuha V. P., Semenyaka A. V., Atamanskij D. V., Katyushin E. A. Zashchita kogerentno-impul'snyh RLS ot kombinirovannyh pomekh. 1. Raznovidnosti sistem PVOS i ih predel'nye vozmozhnosti, *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*, 2019, No. 7, pp. 380–412.
4. Piza D. M., Semenov D. S. Povyshenie effektivnosti prostranstvenno-vremennoj obrabotki radiolokacionnyh signalov v usloviyah vozdejstviya kombinirovannyh pomekh, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2020, Vol. 63, No. 5, pp. 300–309. DOI: 10.20535/S0021347020050040
5. 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>.
6. Shirman Ya. D., Manzhos V. N. Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomekh. Moscow, Radio i svyaz', 1981, 416 p.
7. 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.
8. Harlamov A. V. Postroenie adaptivnoj prostranstvenno-polyarizacionnoj sistemy zashchity RLS ot aktivnyh shumovyh pomekh s proizvol'noj prostranstvennoj strukturoj. Sistemi obrobki informacii, 2010, Vyp. 2, pp.182–187.
9. Monzingo R. A., Miller T. U. per. s angl. pod red. V. A. Lesachenko Adaptivnye antennye reshetki. Vvedenie v teoriyu. Moscow, Radio i svyaz', 1986, 448 p.
10. Piza D. M., Semenov D. S. Pat. 141813 Ukraïna, MPK G01 7/36, N04V 15/00. Bagatokanal'nij pristirij adaptivnoï kompensacii zavud, diyuchih po bokovih pelyustkah diagrami spryamovanosti anteni; zayavnik i patentovlasnik NU "Zaporiz'ka politekhnika", № U201910675, Zayavl. 01.11.2019; Opubl. 27.04.2020, Byul. № 8.