

МЕТОД СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ФИЛЬТРА

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

Семенов Д. С. – главный конструктор обзорных радаров Центра Исследований и Конструирования Казенного предприятия «Научно-производственный комплекс «Искра», г. Запорожье, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. При защите радиолокационных станций от активных шумовых помех, действующих по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны, используют пространственную фильтрацию, 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.

Цель работы состоит в повышении эффективности функционирования радиолокационной станции в условиях возможного воздействия помехи по главному лучу диаграммы направленности основной антенны как при перемещении источника активной помехи в пространстве, так и при сканировании антенной системы.

Метод реализуется путем использования как параметрической адаптации известных пространственных фильтров, так и структурной адаптации системы помехозащиты. Структура обработки радиолокационных сигналов изменяется путем текущей оценки направления воздействия помехи. При этом управляющий сигнал для структурной адаптации формируется по текущему значению модуля весового коэффициента пространственного фильтра.

Результаты. Разработана структурная схема пространственного фильтра со структурно-параметрической адаптацией весовых коэффициентов, обеспечивающая эффективную работу радиолокационной станции в условиях воздействия активной помехи, действующей как по боковым лепесткам диаграммы направленности, так и по главному лучу. Разработана и протестирована математическая модель пространственного фильтра со структурно-параметрической адаптацией. В результате проведенного моделирования подтверждены возможности повышения точности измерения угловых координат и чувствительности приемного устройства радиолокационной станции.

Выводы. Научная новизна проведенного исследования состоит в разработке нового метода структурно-параметрической адаптации пространственного фильтра, обеспечивающего эффективную работу радиолокационной станции при воздействии активной шумовой помехи как с направления боковых лепестков, так и с направления главного луча диаграммы направленности основной антенны.

Практическая значимость работы определяется разработкой структурной схемы пространственного фильтра со структурно-параметрической адаптацией, разработкой математической модели и ее тестированием.

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

АББРЕВИАТУРЫ

АК – автокомпенсатор помех;
АШП – активная шумовая помеха;
ВК – весовой коэффициент;
ДНОА – диаграмма направленности основной антенны;
КОВ – классифицированная обучающая выборка;
ММКК – модуль межканального коэффициента корреляции;
ПВО – пространственно-временная обработка;
ПП – пассивная помеха;
ПФ – пространственный фильтр;
ФКОВ – формирователь классифицированной обучающей выборки.

НОМЕНКЛАТУРА

\dot{k} – комплексное значение весового коэффициента;
 \dot{i} – текущий интервал дальности;

m – количество отчетов в интервале дальности;
 n – количество интервалов дальности;
 r – текущий дискрет в интервале дальности;
 \dot{U}_0 – комплексное значение помехи в основном канале;
 \dot{U}_k – комплексное значение помехи в компенсационном канале;
 \dot{U}_k^* – комплексно-сопряженное значение помехи в компенсационном канале;
 $|\dot{\rho}|$ – модуль межканального коэффициента корреляции;
 σ_0, σ_k – среднеквадратические значения АШП в каналах ПФ;
 K_b – модуль ВК;
 K_n – коэффициент подавления АШП.

ВВЕДЕНИЕ

Для защиты радиолокационных средств от воздействия активных шумовых помех могут быть использованы как пространственные, так и поляризационные отличия в структуре полезных и помеховых сигналов [1–3]. Пространственную фильтрацию сигналов используют при воздействии АШП, действующих по боковым лепесткам диаграммы направленности основной антенны [4]. Поляризационную фильтрацию преимущественно используют при защите радиолокационных сигналов от помех, действующих в направлении главного луча ДНОА [5]. В качестве элемента адаптации пространственного или поляризационного фильтров используют различного вида автокомпенсаторы помех или адаптивные антенные решетки.

В реальных условиях работы на РЛС могут одновременно воздействовать как АШП, так и пассивные помехи. АШП создается расположенными в дальней зоне антенны РЛС точечными по дальности и по угловым координатам источниками шумовых излучений. Пассивная помеха возникает вследствие переотражений зондирующего сигнала от местных предметов, гидрометеоров, дипольных помех. ПП декоррелирует АШП в приемных каналах РЛС, поэтому на интервалах дальности, где одновременно воздействуют обе составляющие комбинированной помехи, компенсация АШП существенно ухудшается. Поэтому в современных адаптивных ПФ используют естественную нестационарность ПП и тем или иным методом формируют КОВ, порожденную только АШП [6–9], для адаптации ВК.

Однако, в реальных условиях при воздействии АШП по главному лучу ДНОА известные ПФ с параметрической адаптацией существенно ограничивают эффективность работы РЛС. Так, в монографии [10] показано, что при воздействии АШП по главному лучу диаграммы направленности основной антенны в ПФ, предназначенном для компенсации помехи, действующей в направлении боковых лепестков, существенно искажается главный луч. 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 уровня собственных шумов компенсационного канала на выходе пространственного фильтра.

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

Цель работы состоит в повышении эффективности работы РЛС в условиях возможного воздействия АШП по главному лучу ДНОА как при перемещении постановщика АШП, так и при сканировании антенны РЛС.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При защите РЛС от АШП, действующей по боковым лепесткам, используют пространственную фильтрацию, которая реализуется путем использования антенн, разнесенных в пространстве. В этом случае различия направлений 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 ПФ не компенсируется. По мере сближения направлений приема помехи и сигнала пространственные различия между ними уменьшаются, что приводит к искажению главного луча ДНОА [10]. В случае совпадения направлений помехи и сигнала сформированный весовой коэффициент является оптимальным как для подавления АШП, так и для подавления полезного сигнала. При этом возникает эффект «ослепления» РЛС [9]. Следствием этого является невозможность обнаружения полезного сигнала на выходе ПФ даже в случае превышения его над уровнем АШП на входе системы помехозащиты.

Поэтому задачей настоящей работы является разработка и исследование нового метода структурно-параметрической адаптации пространственных фильтров, обеспечивающих эффективную работу РЛС при воздействии АШП как с направления главного луча ДНОА [11–12], так и с направлений боковых лепестков.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Повышению эффективности пространственной 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 [13].

Известна оптимальная классическая структура ПВО радиолокационных сигналов в виде линий задержки с отводами в каждом парциальном канале фазированной антенной решетки и весовых сумматоров [3, 7]. 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, 14].

Существенное упрощение обработки сигналов и уменьшение времени адаптации ВК ПФ можно получить путем использования раздельной ПВО. При этом для уменьшения влияния пассивной помехи на про-

цесс адаптации ВК ПФ необходимо тем или иным методом сформировать КОВ.

Существует много различных методов формирования КОВ, которые используют временные, частотные и корреляционные различия в структуре активных и пассивных помех [15]. Одним из новых перспективных методов формирования КОВ можно считать корреляционный метод [16], 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 [16, 17] интервал дальности с максимальным значением ММКК, который соответствует отсутствию пассивной помехи, используется для формирования КОВ при адаптации весовых коэффициентов пространственного фильтра.

Общим недостатком известных методов построения ПФ с параметрической адаптацией весовых коэффициентов при смещении источника АШП на направление главного луча ДНОА является ухудшение точности измерения угловых координат целей, чувствительности приемного устройства [10], а также «ослепление» РЛС в случае совпадения направления воздействия сигнала и АШП в максимуме главного луча ДНОА [9].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Известная схема ПФ [18] с параметрической адаптацией, прямым вычислением ВК [19] и текущим анализом распределения ММКК по дальности [16] приведена на рис. 1.

В представленной схеме блоки 1, 2, 3, 5, 6 и 7 предназначены для вычисления комплексного значения весового коэффициента пространственного фильтра \dot{k}_i на n интервалах дальности

$$\dot{k}_i = \frac{\overline{(\dot{U}_0 \dot{U}_k^*)_i}}{(\dot{U}_k \dot{U}_k^*)_i}, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

При этом на каждом i -том из n интервалов дальности, содержащем m отсчетов, в соответствии с выражением (1), на выходе делителя 5 формируется оценка усредненного значения \dot{k}_i на основании вычисленных значений корреляционного момента $\overline{\dot{U}_0 \dot{U}_k^*}$ и дисперсии $\overline{\dot{U}_k \dot{U}_k^*}$. Причем, в структурной схеме, представленной на рис. 1, усреднение корреляционного момента, а также дисперсии помехи, действующей в компенсационном канале на каждом i -том интервале дальности обеспечивается интеграторами 3 и 6, соответственно. С учетом того, что операция интегрирования при цифровой реализации осуществляется с использованием накапливающих сумматоров, то выражение (1) может быть записано в следующем виде:

$$\dot{k}_i = \frac{\sum_{r=1}^m (\dot{U}_0 \cdot \dot{U}_k^*)_{ir}}{\sum_{r=1}^m (\dot{U}_k \cdot \dot{U}_k^*)_{ir}}. \quad (2)$$

Здесь индекс r «скользит» по значениям от 1 до m , поскольку в каждом из n интервалов дальности содержится m дискретных значений сигналов \dot{U}_{0i} и \dot{U}_{ki} . А индекс i соответствует номеру рассматриваемого интервала дальности. Вычисленные текущие значения \dot{k}_i запоминаются в ФКОВ.

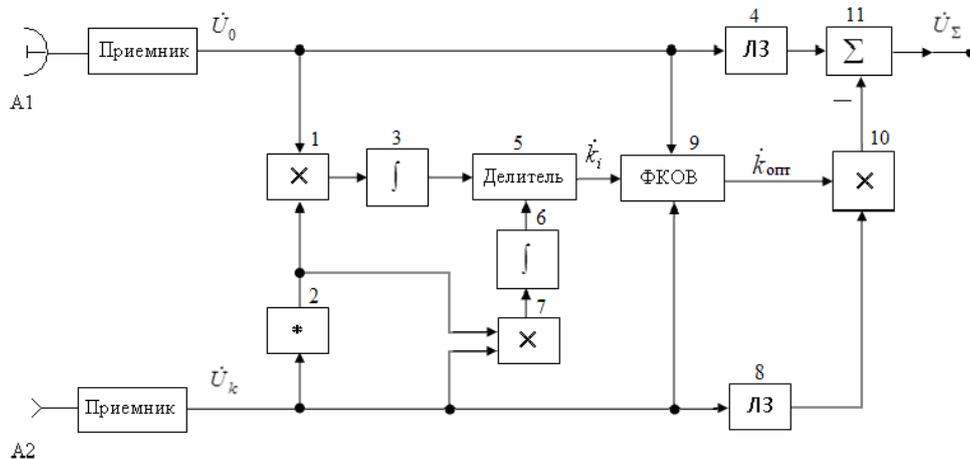


Рисунок 1 – Структурная схема ПФ с параметрической адаптацией

В блоке ФКОВ 9 производится выбор оптимального значения весового коэффициента \dot{k}_{omn} , который соответствует максимальному значению модуля межканального коэффициента корреляции в пределах периода повторения на всех интервалах дальности.

Оценка распределения пассивной помехи по дальности формируется путем текущего вычисления усредненных по m отсчетам значений ММКК $|\dot{\rho}_i|$ на тех же n интервалах, что и \dot{k}_i [15, 16], в соответствии с выражением:

$$|\dot{\rho}_i| = \frac{|\sum_{r=1}^m (U_0 \cdot U_k^*)_{ir}|}{\sqrt{\sum_{r=1}^m |(U_0)_{ir}|^2} \cdot \sqrt{\sum_{r=1}^m |(U_k)_{ir}|^2}}. \quad (3)$$

Значение \dot{k}_{omn} поступает на вход комплексного умножителя 10, где умножается на сигнал компенсационного канала \dot{U}_k , задержанный на период зондирования в линии задержки ЛЗ 8. Результат умножения поступает на сумматор 11, в котором после сложения с сигналом основного канала \dot{U}_0 , задержанным на период зондирования в линии задержки ЛЗ 4, происходит компенсация активной шумовой помехи. Более подробно структурная схема, представленная на рис. 1, описана в [16].

Отмеченные недостатки известных методов построения ПФ с параметрической адаптацией в процессе проведенных исследований были преодолены путем использования структурно-параметрической адаптации ПФ. Авторами в процессе выполнения проекта предложено два варианта структурно-параметрической адаптации ПФ [11, 12], которые исключают возможность ухудшения точности измерения координат и чувствительности РЛС при воздействии АШП в направлении главного луча ДНОА. На рис. 2 представлен один из вариантов реализации ПФ со структурно-параметрической адаптацией.

Поставленная задача реализуется тем, что в известную схему ПФ дополнительно введены коммутатор 12, первый сигнальный вход которого подключен к основному входу сумматора 11, а также последовательно соединенные вычислитель модуля 14, подключенный к выходу ФКОВ, и формирователь порога 13, выход которого подсоединен к управляющему входу коммутатора 12. Второй сигнальный вход коммутатора 12 подключен к выходу сумматора 11.

Алгоритм работы пространственного фильтра со структурно-параметрической адаптацией состоит в следующем. Выражение (1) может быть представлено в следующем виде:

$$\dot{k}_i = \dot{\rho}_i \left(\frac{\sigma_0 \sigma_k}{\sigma_k^2} \right) = \dot{\rho}_i \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_k} \right), \quad (4)$$

где $\dot{\rho}_i$ – комплексный нормированный коэффициент корреляции АШП; σ_0 и σ_k – среднеквадратические значения АШП в основном и в компенсационном канале ПФ. С выражения (4) непосредственно следует, что модуль весового коэффициента $|\dot{k}_{omn}|$, сформированный в схеме, представленной на рис. 2, может служить признаком смещения источника АШП с направления боковых лепестков на направление главного луча ДНОА и обеспечить формирование управляющего сигнала для структурной адаптации ПФ.

Если активная помеха действует по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны, то значение модуля ВК на выходе вычислителя модуля 14 не превышает порог ϵ в формирователе порога 13 и результат компенсации с выхода сумматора 11 через коммутатор 12 поступает на выход ПФ. В случае, когда в результате сканирования антенной системы АШП смещается и начинает действовать по главному лучу ДНОА, модуль ВК превышает уровень порога ϵ и коммутатор 12 подключает на выход ПФ сигнал,

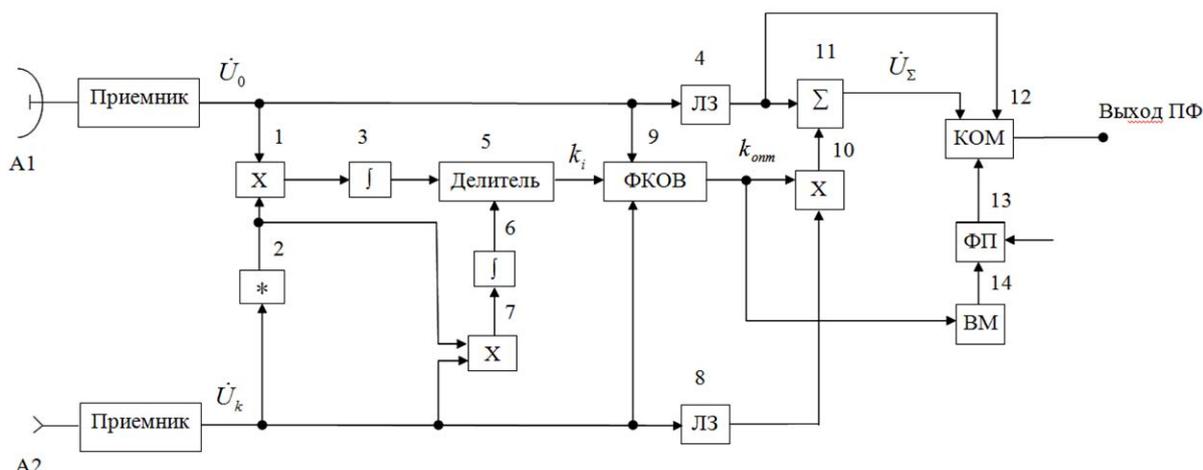


Рисунок 2 – Структурная схема ПФ с структурно-параметрической адаптацией

действующий на основном входе сумматора 11. При этом структура обработки радиолокационных сигналов изменяется, что исключает возможность ухудшения точности измерения угловых координат и чувствительности РЛС. При этом на входы АК поступает АШП и он продолжает формировать весовые коэффициенты. Это позволяет отслеживать момент, когда АШП начинает действовать по боковым лепесткам ДНОА. Если ситуация изменяется и АШП начинает действовать с направления боковых лепестков, то порог ϵ в формирователе порога 13 не превышает (вследствие уменьшения уровня помехи в основном канале) и выход ПФ снова подключается к выходу сумматора 11 и процесс компенсации АШП продолжается.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Математическая модель ПФ со структурно-параметрической адаптацией разработана в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 2. При создании математической модели ПФ в качестве основной антенны использована антенна с амплитудным распределением поля в раскрытие $\sin x/x$ с уровнем первого бокового лепестка, равного 13 дБ. В качестве компенсационной антенны использована слабонаправленная антенна, которая накрывает боковые лепестки основной антенны, как это показано на рис. 3.

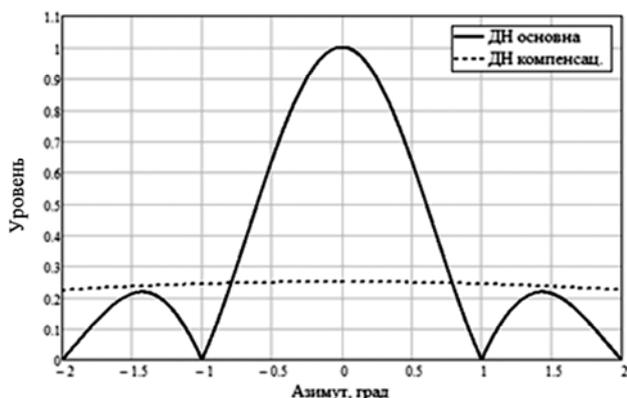


Рисунок 3 – Диаграмма направленности основной (сплошная линия) и компенсационной (пунктирная линия) антенн

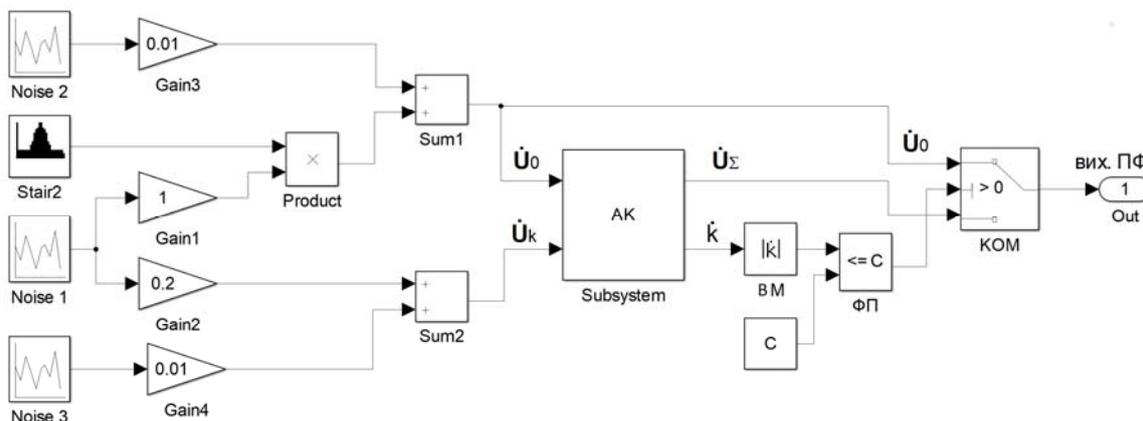


Рисунок 4 – Математическая модель ПФ со структурно-параметрической адаптацией

Реализация предложенного алгоритма работы ПФ со структурно-параметрической адаптацией и его исследование обеспечивалось с использованием пакета графического расширения SimuLink системы математического моделирования MatLab. Работа выполнялась в два этапа.

Вначале на основе разработанной структурной схемы, представленной на рис. 2, разрабатывалась математическая модель ПФ, которая представлена на рис. 4.

В модели гауссовские генераторы шума Noise2 и Noise3 через усилители Gain3 и Gain4 задают уровни собственных некоррелированных шумов в каналах приема ПФ. Блок Stair моделирует уровень АШП в основном канале ПФ по закону $\sin x/x$, имитируя эффект сканирования ДНОА. Блок АК представляет собой автокомпенсатор помех с прямым вычислением ВК [19]. Остальные элементы модели: вычислитель модуля ВМ, формирователь порога ФП и коммутатор КОМ реализуют функцию управления при структурной адаптации ПФ.

На втором этапе была сформирована конкретная помеховая обстановка для проведения исследований. При сканировании антенной системы, в зависимости от азимута α , дисперсия АШП в основном луче и в первых боковых лепестках ДНОА изменялась по закону $\sin x/x$. Это моделировалось последовательно импульсов АШП с длительностью 1,5 мкс. При этом максимальная дисперсия АШП составляла 40 дБ в максимуме главного луча ДНОА. Дисперсия АШП в компенсационном канале равнялась 25 дБ в диапазоне азимутальных углов $[-2^\circ, +2^\circ]$.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В процессе моделирования исследована как известная схема ПФ с параметрической адаптацией (рис. 1), так и предложенная авторами и запатентованная схема со структурно-параметрической адаптацией (рис. 2). В принятых условиях моделирования при исследовании, в зависимости от азимута действия АШП, получены результаты, которые представлены на рис. 5–8, полученные при параметрической адаптации ПФ.

На рис. 5 представлен сигнал, действующий на входе основного канала ПФ. Сигнал имитирует процесс сканирования антенной системы РЛС в диапазоне азимутального сектора углов относительно азимута главного луча ДНОА, который составляет $[-2,4^\circ \dots +2,4^\circ]$.

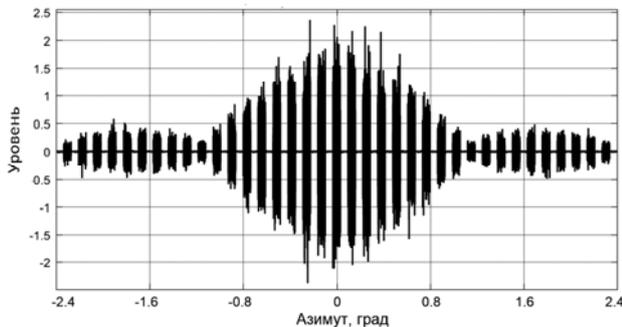


Рисунок 5 – Сигнал, действующий, на входе основного канала ПФ

Анализ функционирования ПФ с параметрической адаптацией позволяет сделать вывод, что коэффициент подавления K_n АШП, которая действует с направления главного луча, ограничивается на уровне 26 дБ (см рис. 6) при ее максимальном уровне, равном 40 дБ. Это обусловлено увеличением модуля ВК ПФ при действии АШП по главному лучу ДНОА. Из рис. 6 также следует, что максимальный коэффициент подавления K_n АШП, действующей по боковым лепесткам, равняется 23 дБ, что соответствует теоретическому пределу.

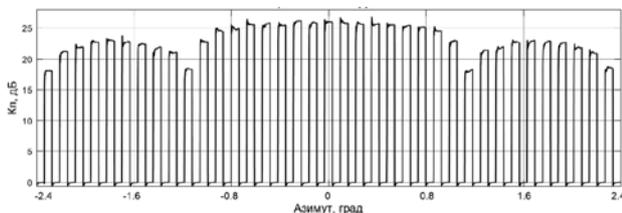


Рисунок 6 – Коэффициент подавления АШП при параметрической адаптации ПФ

Из рис. 7 видно, что при действии АШП с направления боковых лепестков ($\alpha = -1,6^\circ$, или $\alpha = +1,6^\circ$), модуль ВК равен единице. Когда АШП действует по главному лучу с направления $\alpha = 0^\circ$, то ВК увеличивается до 5-ти единиц. При этом уровень собственных шумов компенсационного канала на выходе сумматора АК существенно увеличивается. Следствием этого является ухудшение чувствительности приемного устройства РЛС. Это непосредственно следует из рис. 8, на котором показано увеличение некомпенсированного остатка АШП на выходе ПФ.

Анализ рис. 9, на котором приведен коэффициент подавления АШП в режиме работы ПФ со структурно-параметрической адаптацией, дает основание считать, что изменение структуры обработки радиолокационных сигналов исключает возможность ухудшения чувстви-

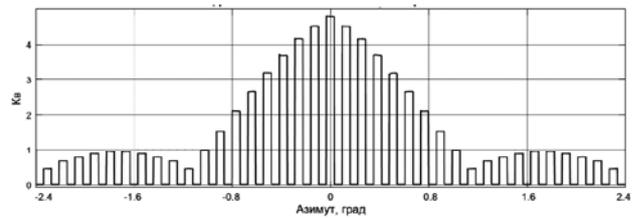


Рисунок 7 – Модуль ВК АШП при параметрической адаптации ПФ

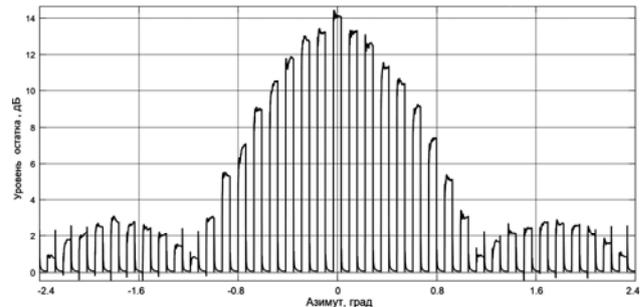


Рисунок 8 – Нескомпенсированный остаток АШП на выходе ПФ

тельности РЛС и точности измерения угловых координат целей. Действительно, поскольку при воздействии АШП по главному лучу ДНОА выход пространственного фильтра подключен к основному входу сумматора, то компенсация АШП не происходит, что обеспечивает нормальное функционирование РЛС.

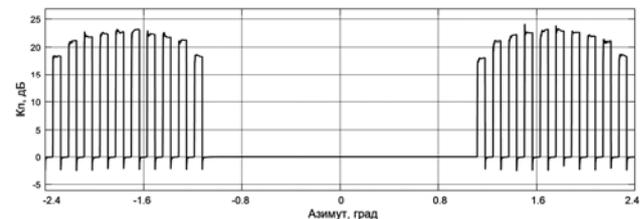


Рисунок 9 – Коэффициент подавления АШП при структурно-параметрической адаптации ПФ

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Можно считать, что предложенный авторами метод структурно-параметрической адаптации пространственных фильтров [11–12] обеспечивает более высокое качество обработки радиолокационной информации. Полученные результаты определенным образом подтверждают мнение, изложенное в работе [9], относительно «ослепления» РЛС при отсутствии пространственных отличий между направлениями воздействия полезного сигнала и АШП. Это объясняется общим «провалом» в ДНОА, что не позволяет вести обнаружение полезного сигнала даже при некотором несовпадении направлений воздействия сигнала и АШП в пределах главного луча ДНОА. Однако, в дальнейшем представляется целесообразным оценить величину потерь в обнаружении полезного сигнала при несовпадении направлений воздействия сигнала и АШП в пределах главного луча ДНОА. Такие исследования авторы планируют провести в дальнейшем.

ВЫВОДЫ

Предложен новый метод структурно-параметрической адаптации пространственных фильтров, обеспечивающих эффективную работу РЛС как при воздействии АШП с направления боковых лепестков, так и с направления главного луча ДНОА. 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 и чувствительности приемного устройства РЛС в условиях воздействия АШП по главному лучу ДНОА.

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.

ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Монзинго Р. А. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер ; пер. с англ. под ред. В. А. Лесаченко. – М. : Радио и связь, 1986. – 448 с.
4. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. [Текст] / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.
5. Спосіб захисту радіолокаторів від комбінованих завад, 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.
6. Григорьев В.В. Комбинированная обработка сигналов в системах радиосвязи / В. В. Григорьев. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2002. – 262 с.
7. 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.
8. Пиза Д. М. Оценка эффективности дискретных алгоритмов адаптации весовых коэффициентов при пространственно-временной обработке радиолокационных сигна-

- лов. / Д. М. Пиза, Д. С. Семенов, С. В. Морщавка // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2019. – № 1. – С. 8–15. DOI: 10.20535/S0021347019010023.
9. Харламов А.В. Построение адаптивной пространственно-поляризационной системы защиты РЛС от активных шумовых помех с произвольной пространственной структурой / А. В. Харламов // Системы обработки інформації. – 2010. – Вып. 2. – С. 182–187.
10. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех [Текст]/ Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М. : Радио и связь, 1981. – 416 с.
11. Спосіб захисту імпульсної радіолокаційної станції від активної складової комбінованої завади, діючої по бокових пелюстках діаграми спрямованості антени: пат. 139442 Україна: МПК G01S 7/36. № u201905456 заявл. 21.05.2019; опубл. 10.01.2020, Бюл. №1.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Пиза Д. М. Методы формирования классифицированной обучающей выборки для коэффициентов автокомпенсатора / Д. М. Пиза, Г. В. Мороз // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2018. – № 1, Т. 61. – С. 47–54.
16. 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.
17. Спосіб захисту когерентно-імпульсних радіолокаційних станцій від комбінованих завад: пат. 78120 Україна: МПК G01S 7/36. № u201210218 заявл. 28.08.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. №5.
18. Пиза Д. М., Романенко С.Н., Семенов Д.С. Повышение эффективности пространственно-временной обработки радиолокационных сигналов в условиях воздействия комбинированных помех/ Д. М. Пиза, С. Н. Романенко, Д. С. Семенов // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2020. – № 5, Т. 63. – С. 300–309.
19. 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>.
Статья поступила в редакцию 25.08.2020.
После доработки 10.09.2020.

МЕТОД СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОЇ АДАПТАЦІЇ ПРОСТОРОВОГО ФІЛЬТРА

Піза Д. М. – д-р техн. наук, професор кафедри «Радіотехніка та телекомунікації» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна.

Семенов Д. С. – головний конструктор оглядових радарів Центру Досліджень і Конструювання Казенного підприємства «Науково-виробничий комплекс «Іскра», м. Запоріжжя Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. При захисті радіолокаційних станцій від активних шумових завад, діючих по бокових пелюстках діаграми спрямованості антени, використовують просторову фільтрацію, яка реалізується шляхом використання антен, рознесених в просторі. В цьому випадку відмінність напрямів прийому корисного сигналу і завади, дозволяє сформувати оптимальне значення вагових коефіцієнтів адаптивних просторових фільтрів для компенсації завади. Однак, якщо джерело завади зміщується на напрям 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 виміру кутових координат, а також чутливість приймального пристрою.

Мета роботи полягає в підвищенні ефективності функціонування радіолокаційної станції в умовах можливої дії завади по головному променю діаграми спрямованості основної антени як при переміщенні джерела завади в просторі, так і при скануванні антенної системи.

Метод реалізується шляхом використання як параметричної адаптації відомих просторових фільтрів, так і структурної адаптації системи завадозахисту. Структура обробки радіолокаційних сигналів змінюється шляхом поточної оцінки напрямку дії завади. При цьому управляючий сигнал для структурної адаптації формується по поточному значенню модуля вагового коефіцієнта просторового фільтра.

Результати. Розроблена структурна схема просторового фільтра з структурно-параметричною адаптацією вагових коефіцієнтів, яка забезпечує ефективну роботу радіолокаційної станції в умовах дії активної завади, діючої як по бокових пелюстках діаграми спрямованості, так і по головному променю. Розроблена і протестована математична модель просторового фільтра з структурно-параметричною адаптацією. В результаті проведеного моделювання підтвержені можливості підвищення точності виміру кутових координат та чутливості приймального пристрою радіолокаційної станції.

Висновки. Наукова новизна проведеного дослідження полягає в розробці нового методу структурно-параметричної адаптації просторового фільтра, який забезпечує ефективну роботу радіолокаційної станції при дії активної шумової завади як з напрямку бокових пелюстків, так і з напрямку головного променя діаграми спрямованості основної антени.

Практична значимість роботи визначається розробкою структурної схеми просторового фільтра з структурно-параметричною адаптацією, розробкою математичної моделі та її тестуванням.

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

UDC 621.396.95

METHOD FOR STRUCTURAL-PARAMETRIC ADAPTATION OF A SPATIAL FILTER

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

Semenov D. S. – Chief designer of surveillance radars of Scientific and Technical Department SE “Scientific and Production Complex “Iskra”, Zaporizhzhia, Ukraine.

ABSTRACT

Context. To protect radars from active noise interference (jamming) acting along the side lobes of the antenna pattern, spatial filtering is used, which is realized by using antennas that are placed apart in space. In this case, the difference in the directions of the useful signal reception and the interference reception makes it possible to form the optimal value of the weighting coefficients of the adaptive spatial filters for interference suppression. 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 device.

Objective. The goal is to increase the radar operation efficiency under conditions of possible interference along the main lobe of the antenna pattern, both when the source of active interference moves in space, and when scanning the antenna system.

Method. The method is implemented by using both parametric adaptation of known spatial filters and structural adaptation of the interference protection system. The structure of the radar signal processing system is changed by the "on the fly" assessment of the interference direction. 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 filter with structural-parametric adaptation of weight coefficients has been developed, which ensures efficient operation of a radar under conditions of active interference acting both along the side lobes of the antenna pattern and along the main lobe. The mathematical model of a spatial filter with structural-parametric adaptation has been developed. As a result of the simulation, the possibilities of increasing the accuracy of measuring the angular coordinates and the sensitivity of the receiving device of the radar been confirmed.

Conclusions. The scientific novelty of the research is the development of a new method of structural-parametric adaptation of the spatial filter. Such method provide the efficient radar operation under conditions of active noise interference both from the direction of the side lobes and from the direction of the main lobe of the antenna pattern.

The practical significance of the research is in the development of a block diagram of a spatial filter with structural-parametric adaptation, the development of a mathematical model and its testing.

KEYWORDS: active noise interference, spatial filter, structural-parametric adaptation, cancellation ratio.

REFERENCES

1. Shirman Ya. D., Golikov V. N., Busyigin I. N. i dr.; pod obsch. red. Shirmana Ya. D. Teoreticheskie osnovy radiolokatsii : ucheb. posobie dlya vuzov. Moscow, Sov. radio, 1970, 560 p.
2. Zhuravlev A. K., Hlebnikov V. A., Rodimov A. P. Adaptivnyie radiotekhnicheskie sistemy s antennyimi reshetkami. Leningrad, Izd. Leningradskogo universiteta, 1991, 544 p.
3. Monzingo R. A., Miller T. U. Adaptivnyie antennyie reshetki. Vvedenie v teoriyu./per. s angl. pod red. Lesachenko V. A. Moscow, Radio i svyaz, 1986, 448 p.
4. Radioelektronnyie sistemy: Osnovy postroeniya i teoriya. Spravochnik. Izd. 2-e, pererab. i dop. [Tekst] / Pod red. Ya. D. Shirmana. Moscow, Radiotekhnika, 2007, 512 p.
5. Sposib zahistu radlolokatoriv vid kombinovanih zavud, diyuchih po golovnomu promenyu dlagrami spryamovanosti anteni: pat. 91114 Ukrayina: MPK G01S 7/36. # u201314941 zayavl. 20.12.2013; opubl. 25.06.2014, Byul. №12.
6. Grigorev V. V. Kombinirovannaya obrabotka signalov v sistemah radiosvyazi. Moscow, EKO-TRENDZ, 2002, 262 p.
7. Ryabuha V. P., Rachkov D. S., Semenyaka A. V., Katyushin E. A. Otsenka intervala fiksatsii prostranstvennogo vesovogo vektora pri posledovatelnoy prostranstvenno-vremennoy obrabotke signalov na fone kombinirovannyh pomех, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Radioelektronika*, 2012, № 10, pp. 13–25.
8. Piza D. M., Semenov D. S., Morschavka S. V. Otsenka effektivnosti diskretnykh algoritmov adaptatsii vesovykh koeffitsientov pri prostranstvenno-vremennoy obrabotke radiolokatsionnykh signalov, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Radioelektronika*, 2019, No. 1, pp. 8–15. DOI: 10.20535/S0021347019010023.
9. Harlamov A.V. Postroenie adaptivnoy prostranstvenno-polyarizatsionnoy sistemyi zaschityi RLS ot aktivnykh shumovykh pomех s proizvolnoy prostranstvennoy strukturoy. Sistemi obrobki informatsiyi, 2010, Vyp. 2. pp. 182–187.
10. Shirman Ya. D., Manzhos V. N. Teoriya i tehnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomех [Tekst], Moscow, Radio i svyaz, 1981, 416 p.
11. Sposib zahistu impulsnoyi radiolokatsiynoyi stantsiyi vid aktivnoyi skladovoyi kombinovanoi zavadi, diyuchoyi po bokovykh pelyustkah diagrami spryamovanosti anteni: pat. 139442 Ukrayina: MPK G01S 7/36. № u201905456 zayavl. 21.05.2019; opubl. 10.01.2020, Byul. №1.
12. Bagatokanalniy pristryi adaptivnoyi kompensatsiyi zavud, diyuchih po bokovykh pelyustkah dlagrami spryamovanosti anteni: pat. 141813 Ukrayina: MPK G01S 7/36. № u201910675 zayavl. 28.10.2019; opubl. 27.04.2020, Byul. №8.
13. Lehovitskiy D. I. Adaptivnyie reshetochnyie filtryi dlya sistem prostranstvenno-vremennoy obrabotki nestatsionnykh gaussovykh protsessov, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Radioelektronika*, 2018, № 11, pp. 607–642. DOI: 10.20535/S0021347018110018.
14. Abramovich Yu. I., Kachur V. G. Byistrodeystvie poocherednoy adaptivnoy nastroyki razdelnykh sistem zaschityi ot kombinirovannyh pomех, *Radiotekhnika i elektronika*, 1989, № 1, pp. 52–58.
15. Piza, D. M., Moroz G. V. Metodyi formirovaniya klassifitsirovannoy obuchayushey vyiborki dlya koeffitsientov avtokompensatora, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Radioelektronika*, 2018, № 1, Vol. 61, pp. 47–54.
16. Piza D. M., Romanenko S. N., Semenov D. S. Korrelyatsionniy metod formirovaniya obuchayushey vyiborki dlya adaptatsii prostranstvennogo filtra, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, No. 3, pp. 34–39. DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-4.
17. Sposib zahistu kogerentno-impulsnykh radlolokatsiynih stantsiy vid kombinovanih zavud: pat. 78120 Ukrayina: MPK G01S 7/36. № u201210218 zayavl. 28.08.2012; opubl. 11.03.2013, Byul. №5.
18. Piza D. M., Romanenko S. N., Semenov D. S. Povyishenie effektivnosti prostranstvenno-vremennoy obrabotki radiolokatsionnykh signalov v usloviyah vozdeystviya kombinirovannyh pomех, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Radioelektronika*, 2020. No. 5, Vol. 63, pp. 300–309.
19. 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>