

УДК 621.396.96

А.В. Харланов

Академия военно-морских сил имени П.С. Нахимова, Севастополь

ПОСТРОЕНИЕ АДАПТИВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ РЛС ОТ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Статья содержит решение задачи синтеза алгоритмов пространственно-поляризационной обработки сигналов в многоканальных радиолокационных станциях. Эффективность функционирования алгоритма обоснована аналитическими расчетами.

Ключевые слова: пространственная обработка сигналов, поляризационная обработка сигналов, параметр обнаружения.

Введение

Постановка проблемы. В рамках проблемы усовершенствования существующих и разработки новых образцов вооружения и военной техники существенное значение отводится задачам повышения помехозащищенности корабельного радиолокационного вооружения. От их решения зависит не только необходимая точность выдачи целеуказания на применение оружия, но и сам факт обнаружения цели.

Решение перечисленных задач тесно связано с вопросами защиты радиолокационных станций от активных шумовых помех. Помехозащищенность РЛС обеспечивается использованием расхождений по физическим параметрам полезного сигнала, помех и внутреннего шума. Для эффективного решения задачи обеспечения заданного уровня помехозащищенности необходима комбинация методов обработки сигналов.

В статье рассматривается вариант построения адаптивной комбинированной пространственно-поляризационной системы защиты РЛС и проанализирована эффективность ее функционирования в оптимальных условиях.

Анализ литературы. Адаптивное диаграммообразование в антенных решетках обеспечивает оптимизацию уровня мощности зондирования и времени "контакта" с целью (необходимого для подавления помеховых отражений), [2] повышает стойкость к противорадиолокационным действиям.

Формирователь диаграмм устанавливает "нули" в области боковых лепестков и на краях главного, в то время как в традиционных радарх для достижения того же эффекта необходимо иметь вспомогательные антенны ("подавители" боковых лепестков), применение которых неэффективно при числе постановщиков активных помех свыше четырех [5].

В работах [1, 2, 3, 4] указывается, что совместное применение комбинированной адаптивной про-

странственно-поляризационной обработки сигналов дает ряд преимуществ, связанных с возможностью подавления помех на всем пространственном спектре. Объединение методов обработки возможно на основе трех основных направлений:

- полная схема с параллельной обработкой (реализация этого метода дает наибольшую (теоретически достижимую) эффективность обработки сигнала в стационарных условиях);

- независимая адаптация компонент системы с последовательным выполнением операций обработки сигналов (реализация этого метода дает приемлемое время адаптации);

- комбинированная обработка с зависимой адаптацией компонент (как компромисс позволяющий обеспечить потенциальное качество обработка близкое к системам с полной обработкой, а время адаптации – близкое к системам с независимой обработкой).

При полной обработке невозможно из-за больших размерностей фильтров реализовать приемлемое время адаптации к сигнально-помеховой обстановки, а при схеме с независимой адаптацией – возникают недопустимые потери качества обработки сигнала. Отсюда видно, что целесообразно строить комбинированную систему обработки сигналов по третьему варианту [2].

Целью статьи является разработка варианта построения комбинированной пространственно-поляризационной системы защиты РЛС, анализ алгоритма ее функционирования и выбор направлений ее усовершенствования.

Основная часть

Наличие задач обеспечения помехозащищенности корабельного радиолокационного вооружения обуславливается увеличением количества функционирующих радиоэлектронных средств в зоне наблюдения РЛС надводных кораблей, наличием в ней

естественных и искусственных источников помех, увеличивающейся ролью сил и средств радиоэлектронного подавления, направленных на умышленное затруднение процесса поиска целей.

Особенности современных условий функционирования корабельных РЛС приводят к высокой динамике изменения сигнально-помеховой обстановки и непредсказуемости параметров помех. Это говорит о необходимости настройки параметров средств обработки сигналов в каждом конкретном случае. Такая настройка возможна в рамках реализации направления адаптивной обработки сигналов. С адаптивной обработкой сигналов связывают возможность реализации потенциальных характеристик радиоэлектронных систем, в условиях динамично изменяющейся и постоянно усложняющейся сигнально-помеховой обстановки.

Интерес к адаптивной обработке сигналов существенно повышается в связи с возможностями по подавлению мешающих сигналов без априорных сведений об их параметрах [2, 3].

В настоящее время помехозащищенность РЛС обеспечивается использованием разнообразных методов обработки сигналов на фоне помех: пространственная, поляризационная, временная (частотная) корреляционная. Каждый из этих способов имеет как свои положительные стороны, так и недостатки.

Рассмотрим достоинства и недостатки основных методов адаптивной обработки сигналов.

Применение пространственной обработки сигналов обеспечивает высокую эффективность подавления помех, пространственное положение которых отлично от расположения полезного сигнала. Положительные стороны этого метода обработки [2]:

- не приводит к усложнению электромагнитной обстановки;
- может применяться совместно с другими методами обработки;
- подавление помех осуществляется без априорной информации об их параметрах.

К основному недостатку данного метода можно отнести невозможность подавления помех, входящих с направлений, близких к направлениям прихода полезного сигнала (случай самоприкрытия средствами радиолокационного подавления объекта наблюдения).

Введение схем, реализующих поляризационную обработку сигналов, в состав РЛС позволяет выделить полезный сигнал на фоне помех в случае совпадения пространственных координат сигнала и помех, то есть исключить эффект «ослепления» антенной решетки [1, 2].

Недостатки данного метода связаны с невозможностью:

- подавления помех с поляризацией, совпадающих с поляризацией полезного сигнала;

- подавления более одной помехи биортогональным поляризационным автокомпенсатором, что связано с наличием одной степени свободы антенной системы.

Критериями эффективности при синтезе алгоритмов формирования весовых коэффициентов адаптивной обработки могут быть: минимум среднеквадратической ошибки (когда известна структура сигнала, но неизвестно направление), максимум отношения сигнал-помеха (когда известно направление прихода сигнала), минимум напряжения (мощности) помехи на выходе (когда сведения о сигнале недостаточно известны) [1, 2, 3].

В работах [8, 9] проведен синтез поляризационного (ПлАК) и пространственного автокомпенсатора (ПрАК), проведен анализ их функционирования в оптимальных условиях. При проведении расчетов был применен критерий эффективности минимума напряжения (мощности) помехи на выходе автокомпенсатора. Результаты исследований приведены на рис. 1, 2. Расчеты проводились для линейно-поляризованных помех с углами поляризационного отношения $\gamma=45^\circ$ (рис. 1, а) и $\gamma_1=15^\circ$, $\gamma_2=75^\circ$ (рис. 1, б). Точка А – случай совпадения параметров поляризации помехи и полезного сигнала. Q – область значений γ , при которых ПлАК сохраняет свою работоспособность. Мощность помех принималась равной 30 Дб относительно мощности внутреннего шума.

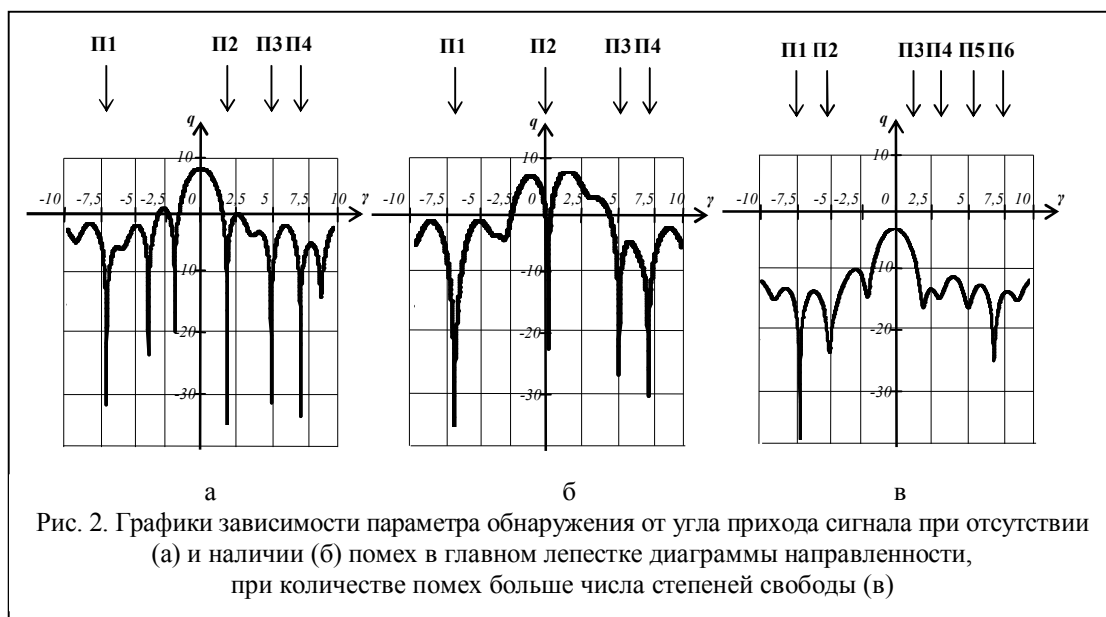
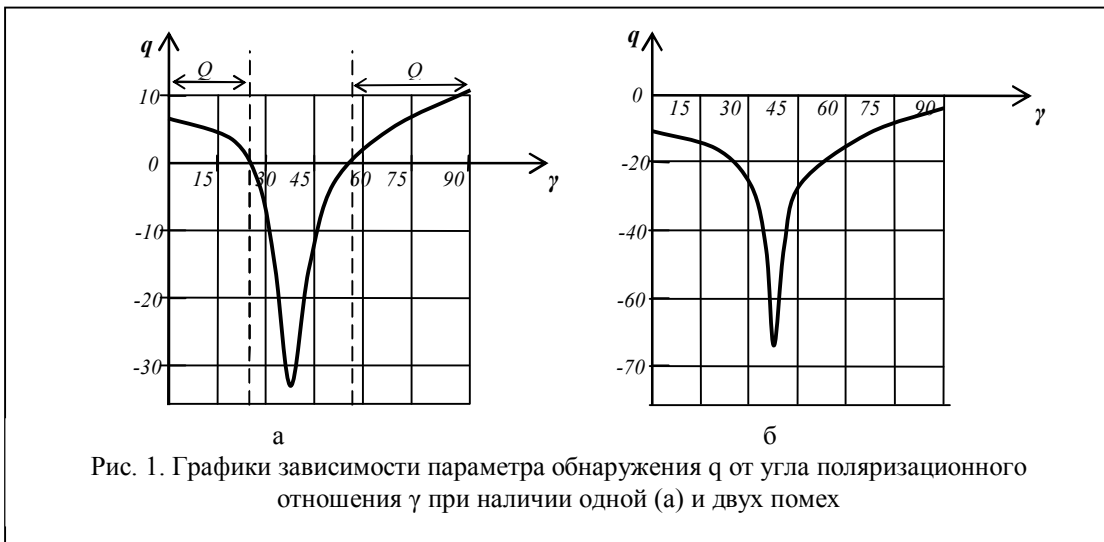
Из рис. 2 видно, что ПрАК при наличии помехи в главном лепестке вместе с помехой подавляет полезный сигнал (рис. 2, б).

Работоспособность как ПлАК (рис. 1, б) так и ПрАК (рис. 2, в) ограничивается числом степеней свободы адаптивной антенной решетки.

Как мы видим, приведенные расчеты полностью подтверждают предыдущие тезисы о положительных свойствах и недостатках пространственной и поляризационной видов обработки.

В [2] приведены варианты возможных структурных схем комбинированной пространственно – поляризационной системы обработки. Они разнятся порядком выполнения поляризационной и пространственной обработок. Там же доказано, что экономически целесообразным по затратам на реализацию диаграммы образующей схемы является вариант, когда вначале происходит обработка сигнала пространственными методами, а после – поляризационными.

Рассмотрим адаптивный комбинированный пространственно-поляризационный автокомпенсатор (ПрПлАК) (рис. 3), состоящий из двух одинаковых по составу ПрАК. Разница между ними состоит в том, что у первого ПрАК антенные элементы настроены на прием вертикально поляризованных волн, а второго – горизонтально.



Каждый из ПрАК имеет на входе один антенный элемент основного канала приема (U_0) и шесть антенных элементов дополнительных (компенсационных) каналов приема ($U_1 - U_6$). В структуру ПрАК входят устройство формирования направлений исключений (УФНИ) (постоянных коэффициентов α_{ij} , где i – номер направления исключения, j – антенный элемент дополнительного канала приема), сумматор, устройство формирования весовых коэффициентов $W_1 - W_3$ (УФВК), сумматор, в котором складываются напряжения с выходов основного и компенсационных каналов. Выходные напряжения с ПрАК1 и ПрАК2 являются входными напряжениями для ПЛАК. Структурно он состоит из устройства формирования весового коэффициента (W), и сумматора, в котором складываются напряжения с выходов ПрАК с вертикально поляризованными антенными элементами и V .

Подробно схемы составных модулей ПрПЛАК (ПрАК и ПЛАК), расчет алгоритма их функциониро-

вания и анализ работы в разных условия сигнально-помеховой обстановки рассмотрены в работах [8, 9].

Особенностью рассматриваемого ПрПЛАК является оптимальное структурное разделение подавления помех, приходящих по боковым лепесткам диаграммы направленности – пространственным автокомпенсатором, а помех, приходящих в области главного лепестка ДН – поляризационным. Этот эффект достигается введением в схему ПрПЛАК устройства формирования направлений исключений. В нем постоянные коэффициенты α_{ij} настроены таким образом, что в фиксированных направлениях соответствующих главному лучу диаграммы направленности антенн основных каналов пространственных автокомпенсаторов происходит формирование нулевых напряжений.

Это условие настройки исключает возможность адаптации весовых векторов ПрАК1, ПрАК2 к помеховым колебаниям, действующих в направлении главного луча.

Вследствие рассмотренного, помехи, направление которых совпадает с направлением прихода полезного сигнала, без искажений проходят на

вход ПЛАК, где на основе различий в поляризационных параметрах полезного сигнала и помех происходит их компенсация последних.

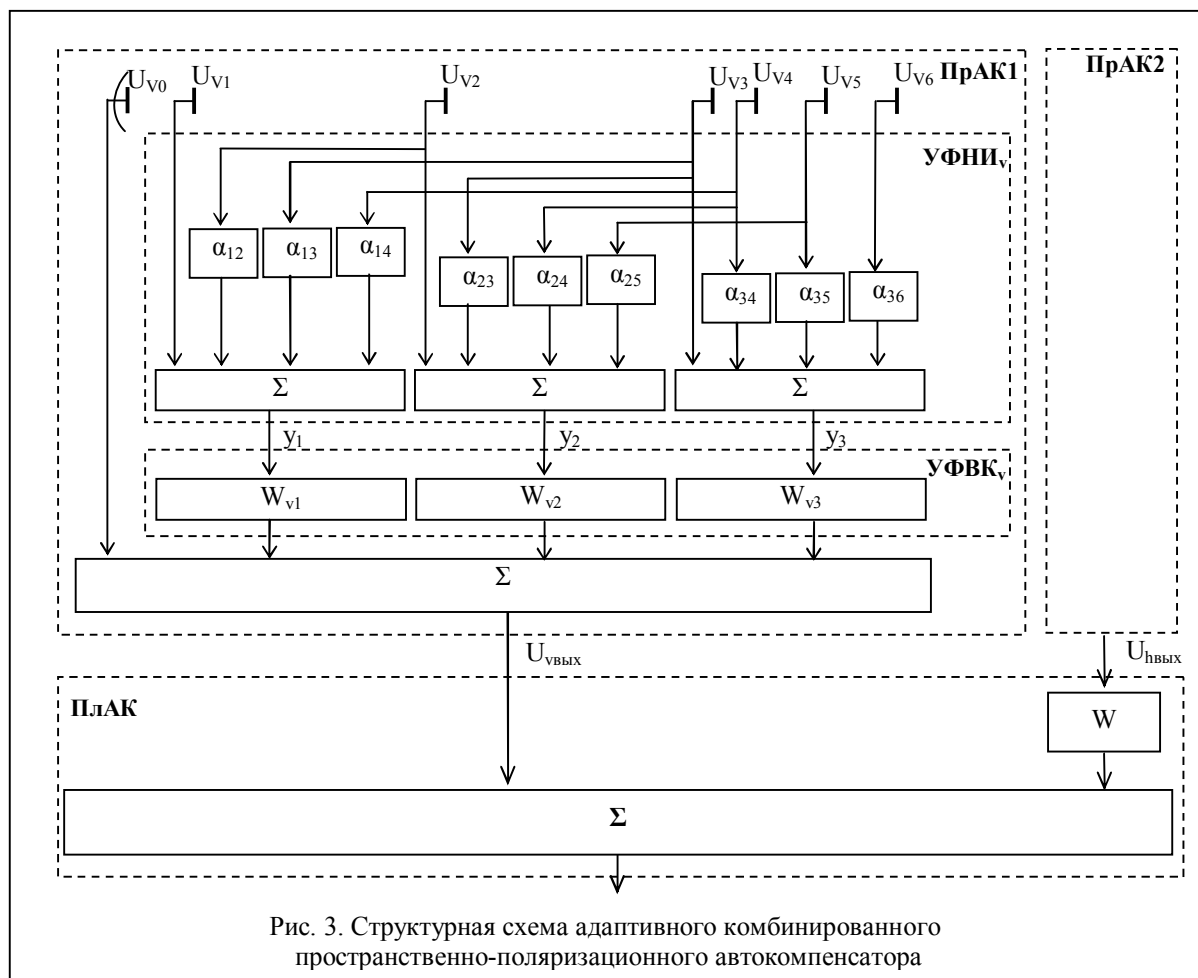


Рис. 3. Структурная схема адаптивного комбинированного пространственно-поляризационного автокомпенсатора

Анализ функционирования автокомпенсатора будем осуществлять при следующих начальных условиях и допущениях:

- ПраК1 и ПраК2 имеют один основной и шесть дополнительных каналов приема;
- В УФНИ_v и УФНИ_h синтезируются три направления исключения 0°; 0,2°; -0,2°;
- напряжения внутреннего шума АК в основных и компенсационных каналах не коррелированы и имеют одинаковое значение дисперсий в каналах приема равную P_ш;
- напряжения внутренних шумов АК U_{ш1} – U_{ш6} и помех U_{п1} – U_{п6} в основном и компенсационных каналах не коррелированы между собой;
- входной элемент основного канала приема представляет собой остронаправленную антенну;
- помехи, действующие на вход комбинированного автокомпенсатора узкополосные, стационарные во времени, в пространстве и полностью поляризованные.

Напряжение с выходов ПраК1, ПраК2 представлено выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{\Sigma v} &= \dot{u}_{0v} + W_v^T \cdot \bar{y}_v; \\ \dot{u}_{\Sigma h} &= \dot{u}_{0h} + W_h^T \cdot \bar{y}_h, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{u}_{\Sigma v}, \dot{u}_{\Sigma h}$ – напряжения на выходах ПраК1, ПраК2; $\dot{u}_{v0}, \dot{u}_{h0}$ – напряжения в основных каналах приема; $W_v^T = [\dot{W}_{v1} \dots \dot{W}_{v3}]$, $W_h^T = [\dot{W}_{h1} \dots \dot{W}_{h3}]$ – комплексный вектор весовых коэффициентов; $\bar{y}_v = \begin{bmatrix} \dot{y}_{v1} \\ \dot{y}_{v2} \\ \dot{y}_{v3} \end{bmatrix}$, $\bar{y}_h = \begin{bmatrix} \dot{y}_{h1} \\ \dot{y}_{h2} \\ \dot{y}_{h3} \end{bmatrix}$ – вектор напряжений с выхода УФНИ.

Вектор $\bar{y}_v = QU_v$, $\bar{y}_h = QU_h$, где Q – матрица постоянных коэффициентов α_{ij} –

$$\begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{1,2} & -\alpha_{1,3} & -\alpha_{1,4} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\alpha_{2,3} & -\alpha_{2,4} & -\alpha_{2,5} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\alpha_{3,4} & -\alpha_{3,5} & -\alpha_{3,6} \end{bmatrix}.$$

Для обоих каналов элементы матрицы Q имеют одинаковое значение. U_v, U_h вектор входных напряжений $U_{v0}, U_{v1} \dots U_{v6}$, поступающих на вход дополнительных (компенсационных) каналов приёма ПрАК1, ПрАК2. Исходя из [8, 9]:

$$U_{v0} = \dot{U} \sin(\gamma) F(\Theta) e^{j\varphi_v} e^{j\omega_0 \cdot t};$$

$$U_{vi} = \dot{U} \sin(\gamma) f e^{j\varphi_v} e^{j(\omega_0 \cdot t + i\Delta\phi)},$$

где $\dot{U} = U(t)e^{j\varphi_0}$ – комплексная амплитуда; γ – угол поляризационного отношения (принимая, что закон изменения $U(t)$ для всех каналов одинаковый); φ_v – фаза в вертикальном канале, обусловленная видом поляризации; ω_0 – круговая частота электромагнитного колебания; φ_0 – его начальная фаза; $F(\Theta)$ – функция диаграммы направленности антенного элемента основного канала приема ПрАК1; f – коэффициент направленного действия антенных элементов дополнительных (компенсационных) каналов приёма; $\Delta\phi$ – сдвиг фазы между дополнительными каналами приёма, обусловленный разном фазовых центров приемной антенны.

$$U_{v0} = U(t)e^{j\varphi_0} \sin(\gamma) F(\Theta) e^{j\varphi_v} e^{j\omega_0 \cdot t};$$

$$U_{v1} = U(t)e^{j\varphi_0} \sin(\gamma) f e^{j\varphi_v} e^{j(\omega_0 \cdot t + \Delta\phi)};$$

.....

$$U_{v6} = U(t)e^{j\varphi_0} \sin(\gamma) f e^{j\varphi_v} e^{j(\omega_0 \cdot t + 6\Delta\phi)}.$$

Входные напряжения $U_{h0}, U_{h1} \dots U_{h6}$ рассчитываются аналогично:

$$U_{h0} = U(t)e^{j\varphi_0} \cos(\gamma) F(\Theta) e^{j\varphi_h} e^{j\omega_0 \cdot t};$$

$$U_{h1} = U(t)e^{j\varphi_0} \cos(\gamma) f e^{j\varphi_h} e^{j(\omega_0 \cdot t + \Delta\phi)};$$

.....

$$U_{h6} = U(t)e^{j\varphi_0} \cos(\gamma) f e^{j\varphi_h} e^{j(\omega_0 \cdot t + 6\Delta\phi)}.$$

Как известно эффективность системы обнаружения определяется параметром обнаружения $Q_{\text{ПлВых}}$ [1, 2, 6, 7]:

$$Q_{\text{ПлВых}} = \frac{P_{\text{СВых}}}{P_{(\text{p+sh})\text{Вых}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{СВых}}, P_{(\text{p+sh})\text{Вых}}$ – мощности сигнала и смеси помехи с внутренним шумом на выходе АК соответственно.

Учитывая [7], значение параметра обнаружения $Q_{\text{ПлАК}}$ имеет вид:

$$Q_{\text{ПлВых}} = \frac{P_{s1} + \text{Re}(W^* R_{s1,2}) + W^* P_{s2} W}{P_{(\text{p+sh})1} + \text{Re}(W^* R_{(\text{p+sh})1,2}) + W^* P_{(\text{p+sh})2} W}, \quad (3)$$

где P_{s1}, P_{s2} – мощности сигнала на выходе ПрАК1 и ПрАК2; $P_{(\text{p+sh})1}, P_{(\text{p+sh})2}$ – мощности смеси помехи и внутреннего шума на выходе ПрАК1 и ПрАК2. Согласно [7] значение P_{s1} имеет вид:

$$P_{s1} = P_{c0} + 2 \cdot \text{Re}(W_v^T \cdot \alpha_{c1}) + W_v^T \cdot A_{c1} \cdot W_v, \quad (4)$$

где α_{c1} – вектор корреляционных функций между напряжениями в основном и дополнительных каналах приёма ПрАК1; A_{c1} – корреляционная матрица между напряжениями в дополнительных каналах приёма ПрАК1.

$P_{s2}, P_{(\text{p+sh})1}, P_{(\text{p+sh})2}$ рассчитываются аналогично. Значение $R_{s1,2}, R_{(\text{p+sh})1,2}$ – корреляционной функции между напряжениями сигнала и смеси помехи с внутренним шумом ПрАК1 и ПрАК2 в дополнительных каналах приема определяется выражением $R_{s1,2} = U_{s1} U_{s2}^*, R_{(\text{p+sh})1,2} = U_{(\text{p+sh})1} U_{(\text{p+sh})2}^*$ и рассчитывается исходя из выражений (1). Вследствие громоздкости вычислений полностью расчёт приводить в статье не целесообразно.

В отличие от известных вариантов построения [6, 7], в предложенном комбинированном автокомпенсаторе используется несимметричное включение каналов приема пространственных автокомпенсаторов, а в процедуре формирования искусственных «нулей» характеристики направленности адаптивных фильтров пространственной обработки сигналов исключен из матричного преобразования основной канал приема.

Результаты расчета работы адаптивного комбинированного пространственно-поляризационного автокомпенсатора защиты РЛС от активных шумовых помех при наличии одной из помех в главной лепестке диаграммы направленности приведены на рис. 4, 5. Мы видим, что адаптивный комбинированный пространственно-поляризационный автокомпенсатор:

- позволяет подавлять помехи, направление прихода которых совпадает с направлением прихода полезного сигнала (что невозможно получить в пространственном автокомпенсаторе, рис. 4 и 2, б);

- в отличие от поляризационного автокомпенсатора (рис. 5 и 1, б) число подавляемых помех комбинированным автокомпенсатором больше одной.

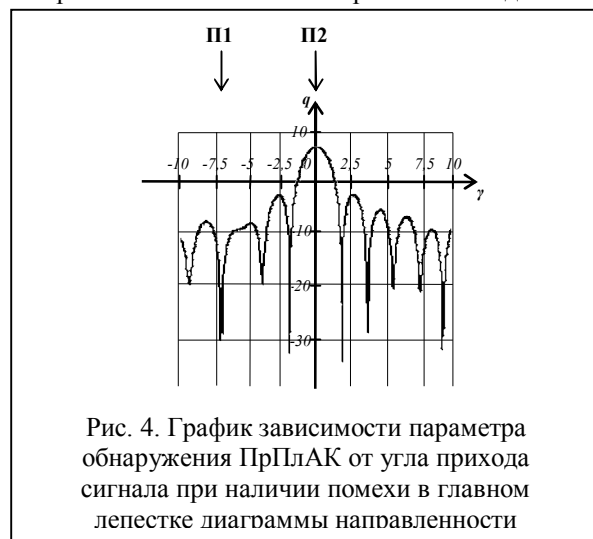


Рис. 4. График зависимости параметра обнаружения ПрПлАК от угла прихода сигнала при наличии помехи в главной лепестке диаграммы направленности

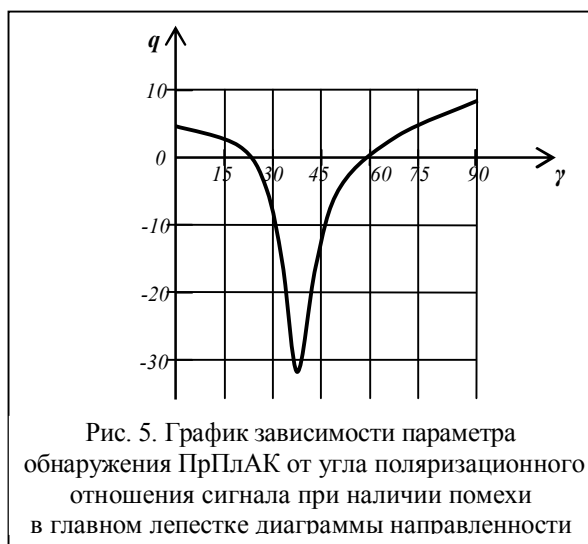


Рис. 5. График зависимости параметра обнаружения ПрПЛАК от угла поляризационного отношения сигнала при наличии помехи в главном лепестке диаграммы направленности

Выводы

1. Таким образом, решить задачу помехозащищенности для произвольных условий сигнально-помеховой обстановки можно только комбинируя известные методы обработки сигналов.

2. Дальнейшие исследования необходимо направить по следующим направлениям:

- адаптация разработанного алгоритма к воздействию широкополосных, нестационарных во времени и в пространстве помех;

- замена в предложенной схеме биортогонального поляризационного автокомпенсатора на триортогональный – инвариантный к направлению прихода сигнала;

- разработка алгоритма синтеза главного лепестка диаграммы направленности антенной системы;

- исследование динамических характеристик адаптивного алгоритма пространственно-поляризационной обработки сигналов;

- исследование воздействия частично-поляризованных и неполяризованных шумовых помех на эффективность функционирования ПрПЛАК и осу-

ществление синтеза алгоритмов, инвариантных к указанным воздействиям.

Список литературы

1. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Ю.И. Лосев, А.Г. Бердников, Е.Ш. Гоїхман, Б.Д. Мизов; под ред. Ю.И. Лосева. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.

2. Григорьев В.А. Комбинированная обработка сигналов в системах радиосвязи / В.А. Григорьев. – М.: Эко-Трендз, 2002. – 264 с.

3. Монзинго Р.А. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию; пер. с англ. / Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.

4. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

5. Слюсар В. Цифровые антенные решетки – будущее радиолокации / В. Слюсар // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 3/2001. – С. 42-46.

6. Поповнин Ю.М. Комплексне використання просторових та поляризаційних параметрів для адаптивної селекції радіолокаційного сигналу на фоні точкових гауссових завад / Ю.М. Поповнин // Збірник наукових праць Севастопольського ВМІ ім. П.С. Нахімова. – Севастополь, 2004. – Вип. 2(5). – С. 105-110.

7. Скачков В.В. Адаптивный алгоритм компенсации гауссовой шумовой помехи с произвольным пространственным спектром мощности / В.В. Скачков, Ю.М. Поповнин // Научно-технический сборник. – 1997. – №3. – ч.1. – С. 74-80.

8. Харланов А.В. Поляризационные характеристики радиоволны и их использование в адаптивной фильтрации сигналов / А.В. Харланов // Збірник наукових праць Севастопольського ВМІ ім. П.С. Нахімова. – Севастополь, 2007. – Вип. 1(12). – С. 91-101.

9. Харланов А.В. Анализ функционирования пространственного автокомпенсатора в различной сигнально-помеховой обстановке / А.В. Харланов // Збірник наукових праць Севастопольського ВМІ ім. П.С. Нахімова. – Севастополь, 2009. – Вип. 1(14). – С. 91-101.

Поступила в редколлегию 15.03.2010

Рецензент: д-р техн. наук, доцент Д.Б. Кучер, Академия военно-морских сил имени П.С. Нахимова, Севастополь.

ПОБУДОВА АДАПТИВНОЇ ПРОСТОРОВО-ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ РЛС ВІД АКТИВНИХ ШУМОВИХ ЗАВАД З ДОВІЛЬНОЮ ПРОСТОРОВОЮ СТРУКТУРОЮ

О.В. Харланов

Стаття містить рішення задачі синтезу алгоритмів просторово-поляризаційної обробки сигналів у багатоканальних радіолокаційних станціях. Ефективність функціонування алгоритмів обґрунтована аналітичними розрахунками.

Ключові слова: просторова обробка сигналів, поляризаційна обробка сигналів, параметр виявлення.

THE SCHEME OF ADAPTIVE SPACE-POLAR RADIO-LOCATION STATIONS PROTECTION SYSTEM FROM THE ACTIVE NOISE INTERFERENCE WITH ARBITRARY SPACE STRUCTURE

A.V. Harlanov

The article contains the solution of the task the algorithm synthesis of space-polarization signal processing in multichannel radio-location stations solving. The efficiency of the algorithm functioning is based on analytic calculation.

Keywords: spatial signal processing, polarization signal processing, parameter of discovery.