

УДК 621.396.06

С.Н. Роденко, С.И. Хмелевский, Р.А. Карнаух

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, г. Харьков*

## АНАЛИЗ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АДАПТИВНОЙ БАЗОВО-КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

*Проведено исследование алгоритма пространственной обработки, реализующего двухмерный спектральный анализ, базирующегося на принципах аппаратного «сверхразрешения» по алгоритму Кейпона.*

*адаптивная антенная решетка, базово-корреляционная система, постановщик помех*

### Введение

В известной литературе [2, 4] были рассмотрены вопросы учета симметричности каналов приема на формирование пространственной корреляционной матрицы сигналов и помех применительно как к одномерному спектральному анализу, так и двумерному (когда пространственная обработка осуществляется на выходе плоской адаптивной антенной решетке (ААР) с получением оценки координат источника сигнала в плоскостях азимута и угла места). В тоже время, большое число работ посвящено адаптивной апертурной и взаимно-корреляционной межэпертурной обработке в разнесенных системах локации [6, 8, 10]. Вопросу корреляционного обнаружения при пассивной локации постановщиков помех посвящено большое число работ [5, 8, 10]. В достаточной мере проанализированы потенциальные точности определения координат помехоносителей в базово-корреляционных системах угломерными, угломерно-разностно-дальномерными и разностно-дальномерными методами [1]. Показано, что одной из основных операций при оптимальном обнаружении полезных сигналов, на фоне мешающих является компенсация помеховых колебаний [10]. Для эффек-

тивной компенсации помеховых колебаний необходимо использовать все имеющиеся различия по информативным параметрам принимаемых сигналов.

Повышение качества пространственной селекции сигналов, в частности, сигналов источников активных шумовых помех, в первую очередь связано с более полным использованием сигнальной информации, которая содержится в элементах раскрыва апертуры, а также – с уменьшением потерь в отношении сигнал/помеха+шум в трактах обработки.

Поэтому **целью статьи** является рассмотрение возможности (в рамках задачи объединения информации от разнесенных локационных датчиков) введения информации о взаимном запаздывании сигналов на разнесенных апертурах в весовой вектор ААР, реализующий оптимальный в смысле минимума дисперсии помех алгоритм обработки.

В связи с тем, что алгоритмы пространственной обработки в ААР, основанные на непосредственном обращении корреляционной матрицы помех (КМП), сопряжены с высоким объемом вычислений и, в случае большой размерности степеней свободы ААР, зачастую технически трудно реализуемы, широко распространение получили градиентные алгоритмы, основанные на рекуррентном приближении оценок

элементов КМП установившимся значениям. Алгоритмы, основанные на непосредственном обращении КМП (SMI – sample matrix inversion) [3, 9] получили распространение в ААР, состоящих из небольшого числа каналов и сосредоточенных в пределах интервала корреляции сигнала.

Исходя из условий, что изначально неизвестно число внешних источников излучения, а также необходимо сокращать время обзора пространства пассивной базово-корреляционной системы (БКС) формирование выходной статистики должно осуществляться на основе адаптивных методов пеленгации с параллельным обзором пространства без предварительной оценки количества мешающих источников.

Повышение вычислительных возможностей средств обработки обуславливает интерес к использованию SMI в ААР с большим числом каналов, в частности, разнесенных на большое число длин волн, которые можно рассматривать как единую разреженную антенную решетку (АР).

Обработка в соответствии с SMI направлена на достижение быстрой сходимости решений интегрально-матричных уравнений вида

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \dot{\Phi}(t, s) \dot{R}(s, \alpha) ds = \dot{X}(t, \alpha) \quad (1)$$

при малом числе выборок, а также на реализацию быстрой спектральной оценки координат целей постановщиков активных помех (ПАП) в условиях робастности к количеству, направлению и интенсивности источников шумовых сигналов. Наиболее известные из них алгоритм Кейпона, метод теплового шума и метод Борджотти-Лагунаса. Все они основаны на отыскании обратных корреляционных матриц (ОКМ) различных размеров степени  $n$ .

Реальные методы оценивания ОКМ помех при использовании приемных трактов, построенных на существующей элементной базе, делают неэффективными использование методов пеленгации на основе высоких степеней ОКМ. В этом случае наиболее эффективным и технически реализуемым является адаптивный алгоритм Кейпона, который обеспечивает построение параллельного информационного конвейера.

### Основной материал

Сформулируем задачу пространственной селекции целей источников излучения применительно к пассивной двухпозиционной системе. Рассмотрим базово-корреляционную систему, включающую в себя две приемные позиции, разнесенные на базу  $b$ , в пределах апертуры ААР каждой из которой осуществляется оптимальная обработка сигналов выбранного ПАП в соответствии с минимизацией дисперсии сигналов мешающих ПАП (рис. 1). Необходимо определить механизм отыскания весового вектора, конкретизировав его для случая, когда фазовые соотношения сигналов ПАП в пределах одной апертуры используются при формировании весового вектора в обеих ААР.

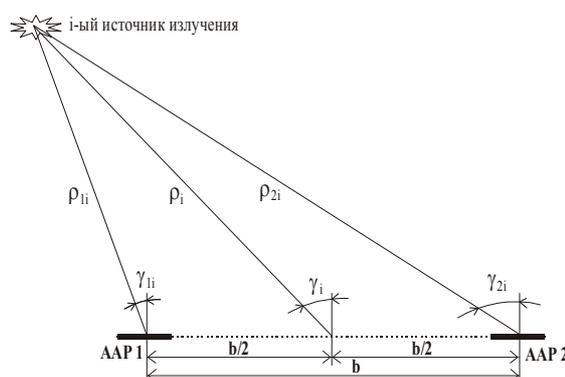


Рис. 1. Графическое представление разнесенных ААР в качестве единой разрывной апертуры

Прием сигналов в первой и во второй позициях осуществляется с помощью линейных антенных решеток с числом приемных элементов  $M_1$  и  $M_2$  соответственно. В зоне обзора БКС присутствуют  $N$  источников излучения. Излучение каждого  $i$ -го,  $i = \overline{1, N}$  источника представляет собой стохастический сигнал, временные характеристики которого описываются одной и той же, с точностью до масштабирующего множителя, корреляционной функцией. Пренебрегая здесь запаздыванием комплексной огибающей как в пределах раскрытия каждой из антенных решеток, так и в пределах раскрытия совокупной антенной решетки, суммарный сигнал от  $N$  внешних источников представим в виде комбинации сигналов ААР1 и ААР2.

Подобный подход может быть последовательно применен к любому из известных алгоритмов оптимальной пространственной обработки. Следовательно, прагматически синтез алгоритмов пространственной обработки для многопозиционных (МП) РЛС может быть сведен, по сути, к переобозначениям в выражениях, приведенных для одной ФАР. Так, для известного [9] алгоритма Кейпона имеем:

$$Y_{\Sigma}(t) = \frac{1}{X^{*T}(\Theta, r) \Phi_{nc}^{-1} X(\Theta, r)} \quad (2)$$

Кроме того, обзор по разности хода источников излучения осуществляется в матричном корреляторе времени запаздывания сигналов между позициями [7].

Здесь (как и для других алгоритмов оптимальной пространственной обработки в МП РЛС) спектральная оценка оказывается функцией двух переменных – углового направления и дальности. Вычисления проведены с числом дискрет по углу и дальности равным 1024. Для удобства анализа исходные данные, оценки точности и разрешающей способности сведены в табл. 1.

При этом в качестве оценок точности по координатам  $(\Delta r, \Delta \gamma)$  принимались разности между истинными координатами источника излучения и соответствующими координатами середины пеленгационной характеристики, определенными в заданной области пространства. Разрешающая способность по координатам  $(\delta r / \delta \gamma)$  определялась по нулям пеленгационной характеристики. На рис. 2 – 6 для наиболее харак-

терных случаев представлены результаты аналитических расчетов, анализ которых показывает, что

1) структура откликов носит чрезвычайно изрезанный многопиковый характер. При этом, когда объединяется информация различных пунктов

приема на уровне сигналов (активной РЛС рассматривается как единая ФАР), задача борьбы с ложными пересечениями снимается, так как уровень сигналов от истинных целей существенно выше сигналов из других точек пространства;

Таблица 1

Разрешающая способность и ошибки измерения координат источника шумовых помех с использованием алгоритма Кейпона при разнесении адаптивных антенн с числом элементов в решетках  $M_1$  и  $M_2$

Номер рисунка	Координаты геометрического центра		База, м	Пространственный разнос		Количество элементов решеток		$\frac{\lambda}{(M_1 + M_2)d}$	Разрешающая способность алгоритма Кейпона		Ошибки оценки координат	
	$\rho$ , км	$\gamma$ , гр		$\rho$ , км	$\gamma$ , гр	$M_1$	$M_2$		$\delta_\rho$ , км	$\delta_\gamma$ , гр	$\Delta_\rho$ , км	$\Delta_\gamma$ , гр
2	50	0	6000	0	2	15	1	3,8	0,204	0,263	0,001	0,0012
3	50	0	6000	0	0,1	15	1	3,8	1,488	—	0,102	0,0037
4	50	0	6000	0	2	7	7	8,2	2,657	0,992	0,546	0,0111
5	50	45	6000	0	2	15	1	3,8	3,954	0,495	0,402	0,0065
6	50	20	6000	10	4	15	1	3,8	2,186	0,509	0,121	0,0065

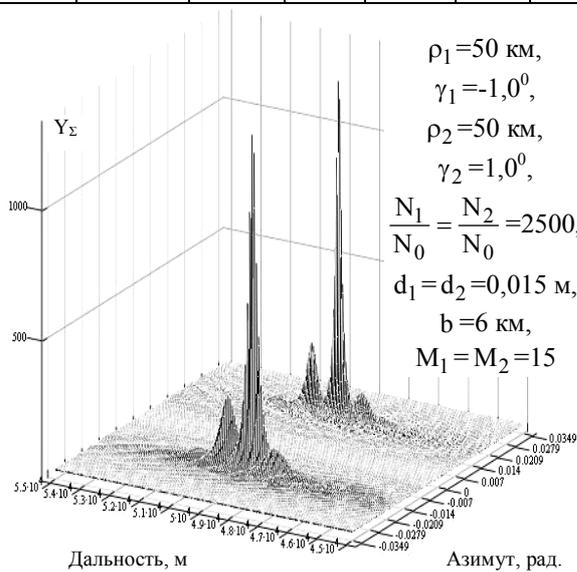


Рис. 2. Влияние размера базы на вид отклика по дальности/  $b = 6$  км

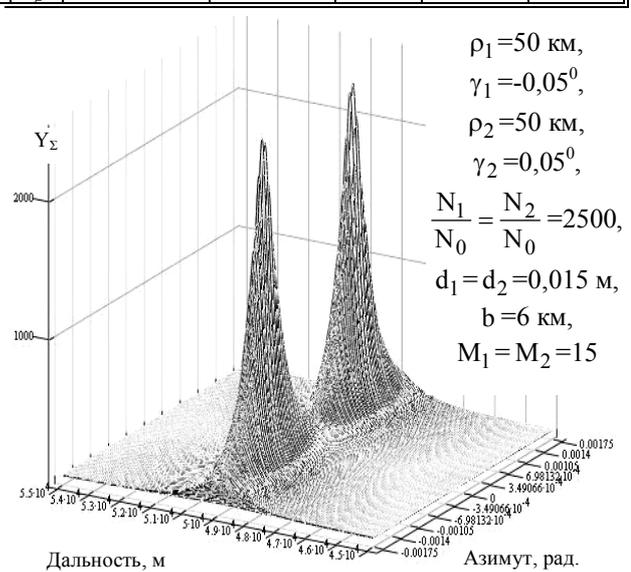


Рис. 3. Влияние размера базы на вид отклика в целом/  $b = 6$  км

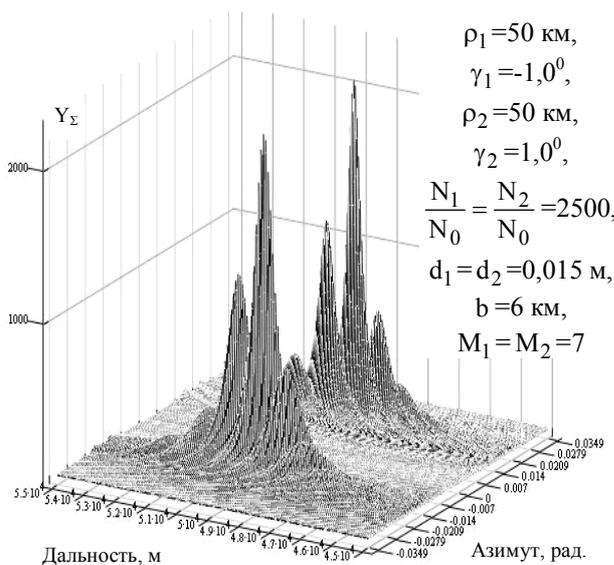


Рис. 4. Влияние числа элементов АР на вид отклика в целом/  $b = 6$  км

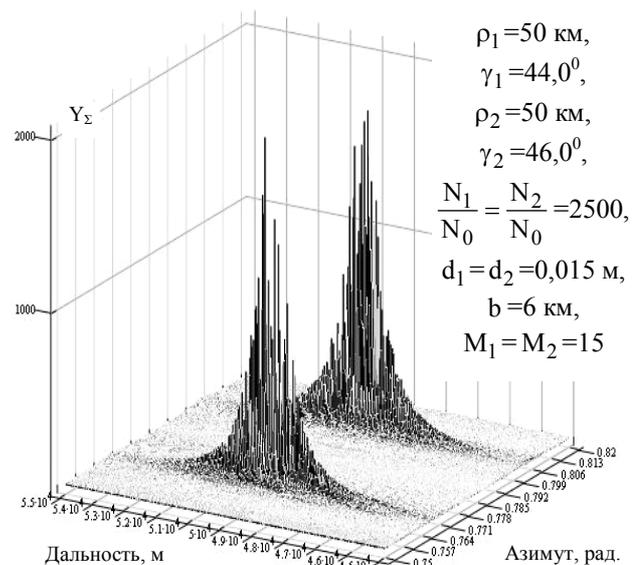


Рис. 5. Влияние смещения по углу на вид отклика при совместном оценивании дальности и азимута ПАП/  $b = 6$  км

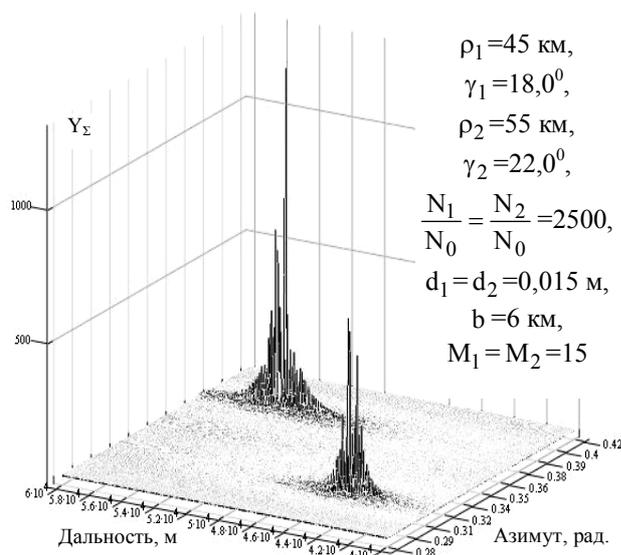


Рис. 6. Влияние разноса по дальности и углу на вид отклика/  $b = 6$  км

2) протяженность откликов зависит от количества элементов антенных решеток, величины базы, а также отношения спектральных плотностей мощности внешних помех и внутренних шумов; с увеличением количества элементов антенных решеток, величины базы и отношения спектральной плотности мощности внешних помех, и внутренних шумов в пределах радиуса пространственной когерентности сигнала, отклики становятся менее протяженными (рис. 2 – 4);

3) положение вычисленных локальных максимумов демонстрирует хорошее согласие с истинным положением цели, как по углу, так и по дальности (рис. 2 – 6, столбцы 12, 13 табл. 1);

4) собственно разрешающая способность оказывается более чем десятикратно большей по углам, чем Рэлеевская разрешающая способность, обусловленная решеткой из  $M_1 + M_2$  элементов (столбцы 9, 11 табл. 1); важно также отметить, что повышенные характеристики углового разрешения достигаются в том числе и за счет разноса приемных апертур в пространстве и превышают характеристики аналогичных алгоритмов, реализуемых на одной апертуре (рис. 3).

Таким образом, использование двухмерного спектрального анализа для формирования двухпараметрической пеленгационной характеристики в плоскости угла и дальности позволяет получить точности (столбцы 9, 10 табл. 1), обеспечивающие информационный обмен.

## Выводы

В целом, для реализации процедур алгоритмического «сверхразрешения» по алгоритму Кейпона

необходимо разделять обработку на первичную и вторичную. Тогда последовательность обзора сводится к комбинированному алгоритму следующего вида:

1) с помощью обычных методов пассивной локации, например, угломерно-разностно-дальномерного метода, выбираются точки «кандидаты» на обнаружение, заведомо включающие в себя как истинные цели, так и ложные пересечения;

2) произвести отождествление целей на единой апертуре их РЛС и «выбрать» измеренное для разнесенных подапертур время задержки комплексной огибающей сигналов;

3) используя уже алгоритмы «сверхразрешения» просмотреть интересующие области для принятия окончательного решения о количественном составе цели и произвести измерение координат.

## Список литературы

1. Алмазов В.Б. Методы пассивной локации. – Х.: ВИРТА, 1974. – 86 с.
2. Буняк Ю.А. Двумерный спектральный анализ по методу максимального правдоподобия на основе линейной симметрии корреляционной матрицы // Радиоэлектроника. – 1996. – № 4, т. 39. – С. 19-28.
3. Гершман А.Б. Робастные адаптивные антенные решетки // Антенны. – 2000. – № 2. – С. 5-16.
4. Зарицкий В.И., Кокин В.Н., Леховицкий Д.И. Рекуррентные алгоритмы адаптивной обработки при центральной симметрии каналов приема // Изв. ВУЗов. Сер. Радиофизика. – 1985. – № 7. – С. 863-871.
5. Караваев В.В., Сазонов В.В. Статистическая теория пассивной локации. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.
6. Коваль Д.В., Коваль В.М., Коваленко М.В. Спільне використання кореляційної та адаптивної просторової обробки сигналів для підвищення ефективності кутового спектрального оцінювання // Збірник наукових праць ЖВІРЕ. Інформаційні системи. – 2001. – № 4. – С. 105-114.
7. Sedyshev Yu.N., Sedyshev P.Yu., Rodenko S.N. Focusing of the spatially separated adaptive antenna arrays on multiply radiation sources by method of correlation identification of the bearings // IVth International Conference on Antenna Theory and Techniques, 9-12 September, 2003, Sevastopol, Ukraine.
8. Седишев Ю.Н., Седишев П.Ю., Тютюнник В.А. Принципы адаптации в многопозиционных системах активно-пассивной радиолокации. // МФФ-2005. Сборник научных трудов. – Харьков: АНПРЕ, ХНУРЕ. – 2005. – С. 34-43.
9. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
10. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.

Поступила в редколлегию 18.12.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.И. Замятин, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.