

Влияние неоднородности обучающей выборки на характеристики многоканальных бортовых радиолокационных станций с пространственно-временной обработкой

Тихонов Р.С.

*Концерн «Радиоэлектронные технологии», улица Нижегородская, 32, Москва,
109029, Россия*

e-mail: tam@inbox.ru

Аннотация. В статье приведен анализ влияния неоднородности обучающей выборки, обусловленной отражениями от элементов поверхности, близких к альтиметровым, на характеристики многоканальных бортовых радиолокационных станций с пространственно-временной обработкой (ПрВО) при селекции воздушных объектов на догонных курсах. Установлено, что неоднородность обучающей выборки меньше всего сказывается на характеристиках квазиоптимального адаптивного алгоритма ПрВО, использующего априорную информацию о положении «блестящих точек» на подстилающей поверхности. Оценена вычислительная сложность алгоритма.

Ключевые слова: пространственно-временная обработка, бортовая радиолокационная станция, многоканальная фазированная антенная решетка, алгоритмы подавления помех от подстилающей поверхности.

Введение. Актуальной для бортовых радиолокационных станций (БРЛС) является задача обеспечения максимальной дальности обнаружения малоразмерных низколетящих объектов как на встречных, так и на догонных курсах. В настоящее время эта задача решается за счет специального выбора типа и параметров зондирующих сигналов: применения когерентных импульсных последовательностей с высокими частотами повторения импульсов при обнаружении цели на встречных курсах и средними частотами повторения (КНИ СЧП) на догонных курсах. Однако обеспечиваемая при этом дальность обнаружения объектов на догонных курсах в большинстве случаев оказывается недостаточной вследствие влияния помех, вызванных отражениями от подстилающей поверхности [1].

Существенное улучшение характеристик обнаружения низколетящих объектов на догонных курсах может быть обеспечено за счет использования алгоритмов пространственно-временной обработки (ПрВО), ориентированных на выделение полезного сигнала на фоне распределенных помех. Их применение стало возможным в связи с широким внедрением в перспективные БРЛС многоканальных фазированных антенных решеток (ФАР (АФАР)) и развитием техники цифровой обработки сигналов [2,3].

При использовании оптимальной ПрВО в БРЛС с многоканальной ФАР производится совместная обработка всех отсчетов, принятых на интервале T_H времени когерентного накопления сигнала в каждом из каналов ФАР [4]:

$$y_{ПрВО} = \mathbf{w}^* \mathbf{x},$$

где $y_{\text{ПрВО}}$ - выходной сигнал схемы ПрВО, \mathbf{w}^* - эрмитовосопряженный вектор весовых коэффициентов, \mathbf{x} - вектор входных отсчетов принятого сигнала, размерность которого равна NLM . Здесь M - число накапливаемых импульсов ($M = F_{\text{П}} T_{\text{Н}}$), $F_{\text{П}}$ - частота повторения импульсов в последовательности; N и L - число каналов ФАР в азимутальной и угломестной плоскостях соответственно (NL - общее число каналов). Набор весовых коэффициентов \mathbf{w} определяется как:

$$\mathbf{w} = \mu \mathbf{R}_{\text{пш}}^{-1} \mathbf{s},$$

где μ - постоянный коэффициент, не влияющий на отношение сигнал/(шум+помеха) на выходе устройства обработки; $\mathbf{R}_{\text{пш}}$ - ковариационная матрица помехи от подстилающей поверхности и собственных шумов приемных каналов ФАР или ее оценка; \mathbf{s} - опорный вектор, характеризующий ожидаемые параметры обнаруживаемой цели.

На практике необходимая для реализации ПрВО информация о ковариационной матрице помехи от подстилающей поверхности неизвестна, поэтому необходимо использовать адаптивные алгоритмы. При этом оценка ковариационной матрицы помех формируется по обучающей выборке с использованием соседних с анализируемым элементов разрешения БРЛС. Для обеспечения энергетического выигрыша, близкого к потенциальному, необходимо чтобы характеристики отражений от подстилающей поверхности в каждом из элементов разрешения, по которым формируется обучающая выборка, были близки. Неоднородность обучающей выборки возрастает, при использовании элементов

разрешения, содержащих отражения от элементов подстилающей поверхности, близких по дальности к альтиметровым [4,5].

Постановка задачи. Целью статьи является анализ возможностей пространственно-временной обработки радиолокационной информации в многоканальных БРЛС в условиях формирования обучающей выборки по элементам разрешения, близких к альтиметровым.

Описание алгоритмов. При реализации алгоритмов ПрВО в БРЛС переднего обзора возникают трудности, связанные с оценкой ковариационной матрицы помех от подстилающей поверхности в условиях ограниченной обучающей выборки. В связи с этим практический интерес представляют квазиоптимальные алгоритмы, позволяющие снизить размерность оцениваемой и обращаемой ковариационной матрицы помех с помощью ряда преобразований, предшествующих адаптивной ПрВО.

Существенного снижения размерности удастся достичь применением двумерного преобразования Фурье к входным данным. При этом в полученном множестве элементов из M частотных каналов в каждом из NL пространственных каналов (N - пространственных каналов в азимутальной плоскости и L - в угломестной) формируются M кластеров (по числу каналов скорости). Каждый из кластеров будет содержать $N'L'M'$ элементов: M' частотных каналов в каждом из $N'L'$ пространственных каналов (N' - пространственных каналов в азимутальной плоскости, L' - в угломестной), один из элементов согласован с ожидаемым сигналом цели, остальные $N'L'M'-1$ - вспомогательные. Формирование кластеров

позволяет перейти от оценки и обращения ковариационной матрицы помех размерности NLM к оценке и обращению M ковариационных матриц помех размерностью $N'L'M'$ [3,6].

Дальнейшее снижение размерности можно обеспечить с использованием априорной информации о пространственном расположении элементов подстилающей поверхности («блестящих точек») и доплеровском сдвиге частоты отраженного от них сигнала для различных элементов разрешения БРЛС при обработке сигнала в каждом из кластеров [7].

Выходной сигнал схемы обработки при применении квазиоптимальных алгоритмов ПрВО с формированием кластеров определяется как [6]:

$$y_T = \mathbf{w}_T^* \mathbf{T} \mathbf{x},$$

здесь \mathbf{T} - матрица преобразования, обеспечивающая формирование кластера; \mathbf{w}_T - вектор весовых коэффициентов, который вычисляется как:

$$\mathbf{w}_T = \mathbf{R}_{\text{пшт}}^{-1} \mathbf{s}_T,$$

где $\mathbf{s}_T = \mathbf{T} \mathbf{s}$, $\mathbf{R}_{\text{пшт}} = \mathbf{T} \mathbf{R}_{\text{пш}} \mathbf{T}^*$. Для схемы обработки, реализующей алгоритм с формированием кластеров и использованием априорной информации [7]:

$$y_{TA} = \mathbf{w}_{TA}^* \mathbf{A}^* \mathbf{T} \mathbf{x},$$

здесь \mathbf{A} - матрица преобразования, составленная из собственных векторов модельной ковариационной матрицы $\mathbf{R}_{\text{пш}}$, которым соответствуют собственные значения, близкие к уровню собственных шумов ("шумовые" собственные векторы):

$\lambda_i < \chi \sigma_{\text{ш}}^2$ (χ - некоторый порог, $\sigma_{\text{ш}}^2$ - дисперсия собственных шумов приемных

каналов ФАР). В основе расчета модельной ковариационной матрицы $\mathbf{R}_{ПА}$ для каждого из кластеров лежат данные о скорости носителя, высоте полета, параметрах зондирующего сигнала и параметрах БРЛС, позволяющие определить пространственные координаты блестящих точек для заданного элемента разрешения по углу места, азимуту и доплеровской частоте. При этом объем необходимой обучающей выборки определяется не размером кластера $N'L'M'$, а размерностью подпространства $\mathbf{U}_{ш}$ ($\dim(\mathbf{U}_{ш})$), образованного "шумовыми" собственными векторами, составляющими матрицу преобразований \mathbf{A} ($\dim(\mathbf{U}_{ш}) < N'L'M'$). Вектор весовых коэффициентов $\mathbf{w}_{ТА}$ в этом случае вычисляется как:

$$\mathbf{w}_{ТА} = \mathbf{R}_{ПШТА}^{-1} \mathbf{s}_{ТА},$$

где $\mathbf{s}_{ТА} = \mathbf{A}^* \mathbf{T} \mathbf{s}$, $\mathbf{R}_{ПШТА} = \mathbf{A}^* \mathbf{T} \mathbf{R}_{ПШ} \mathbf{T}^* \mathbf{A}$.

Для оценки эффективности ПрВО воспользуемся нормированной функцией $\xi(f_{ДЦ})$, характеризующей потери за счет отражений от подстилающей поверхности в отношении сигнал/(шум+помеха) на выходе устройства обработки в зависимости от доплеровского сдвига частоты сигнала цели $f_{ДЦ}$, которая для оптимальных алгоритмов имеет вид [4]:

$$\xi(f_{ДЦ}) = \frac{\mathbf{R}_{ш}(1,1)}{NLM \cdot \mathbf{R}_{ПШ}(1,1)} \frac{\mathbf{w}^* \mathbf{s} \mathbf{s}^* \mathbf{w}}{\mathbf{w}^* \mathbf{R}_{ПШ} \mathbf{w}} \frac{tr(\mathbf{R}_{ПШ})}{\mathbf{s}^* \mathbf{s}},$$

где $tr(\mathbf{R}_{ПШ})$ - операция вычисления следа матрицы $\mathbf{R}_{ПШ}$, $\mathbf{R}_{ш}$ - ковариационная матрица собственных шумов приемных каналов ФАР. Для ПрВО с формированием

кластеров без использования априорной информации данное выражение преобразуется:

$$\xi_T(f_{дц}) = \frac{\mathbf{R}_{ш}(1,1)}{NLM \cdot \mathbf{R}_{пш}(1,1)} \frac{\mathbf{w}_T^* \mathbf{s}_T \mathbf{s}_T^* \mathbf{w}_T}{\mathbf{w}_T^* \mathbf{R}_{пшт} \mathbf{w}_T} \frac{tr(\mathbf{R}_{пш})}{\mathbf{s}^* \mathbf{s}}.$$

Для алгоритма с формированием кластеров и использованием априорной информации функция $\xi(f_{дц})$ принимает вид:

$$\xi_{ТА}(f_{дц}) = \frac{\mathbf{R}_{ш}(1,1)}{NLM \cdot \mathbf{R}_{пш}(1,1)} \frac{\mathbf{w}_{ТА}^* \mathbf{s}_{ТА} \mathbf{s}_{ТА}^* \mathbf{w}_{ТА}}{\mathbf{w}_{ТА}^* \mathbf{R}_{пштА} \mathbf{w}_{ТА}} \frac{tr(\mathbf{R}_{пш})}{\mathbf{s}^* \mathbf{s}}.$$

Для сравнения характеристик БРЛС с алгоритмами ПрВО и БРЛС с последовательным формированием диаграммы направленности антенной решетки (ДНА) и доплеровской фильтрацией будем пользоваться соответствующей функцией энергетических потерь $\xi_{ид}(f_{дц})$:

$$\xi_{ид}(f_{дц}) = \frac{\mathbf{R}_{ш}(1,1)}{NLM \cdot \mathbf{R}_{п}(1,1)} \frac{\mathbf{w}_{ид}^* \mathbf{s}_{ид} \mathbf{s}_{ид}^* \mathbf{w}_{ид}}{\mathbf{w}_{ид}^* \mathbf{R}_{пшид} \mathbf{w}_{ид}} \frac{tr(\mathbf{R}_{пш})}{\mathbf{s}^* \mathbf{s}},$$

здесь $\mathbf{R}_{пшид} = \mathbf{T}_{ид} \mathbf{R}_{пшид} \mathbf{T}_{ид}^*$, $\mathbf{s}_{ид} = \mathbf{T}_{ид} \mathbf{s}$. Матрица преобразования $\mathbf{T}_{ид}$ описывает формирование ДНА и последующую временную обработку (доплеровскую фильтрацию).

Результаты моделирования. Вычисление функций $\xi(f_{дц})$ для различных алгоритмов ПрВО проводилось методом математического моделирования (см. рис. 1) при условии, что: носитель с БРЛС переднего обзора летит на высоте - $H_c = 1000 м$ со скоростью - $V_c = 200 м/с$; БРЛС оснащена ФАР с $N = 8$, $L = 8$ элементами; каждый элемент ФАР имеет приемный канал, где происходит усиление

и согласованная фильтрация сигнала на периоде T_{II} повторения. Предполагалось, что в БРЛС используются сигналы типа КНИ СЧП с $F_{II} = 30 \text{ кГц}$ и скважностью - 10, импульсы промодулированы по фазе кодом Баркера ($n=13$); время когерентного накопления - $T_H = 4 \text{ мс}$; элементы ФАР расположены регулярно на расстоянии $\lambda/2$, где $\lambda = 3 \text{ см}$ - длина волны несущего колебания, основной лепесток ДНА БРЛС ориентирован в направлении цели в азимутальной плоскости $\varphi_{Ц} = 0 \text{ град.}$ и под углом $\theta_{Ц} = -3,5 \text{ град.}$ относительно горизонтальной плоскости.

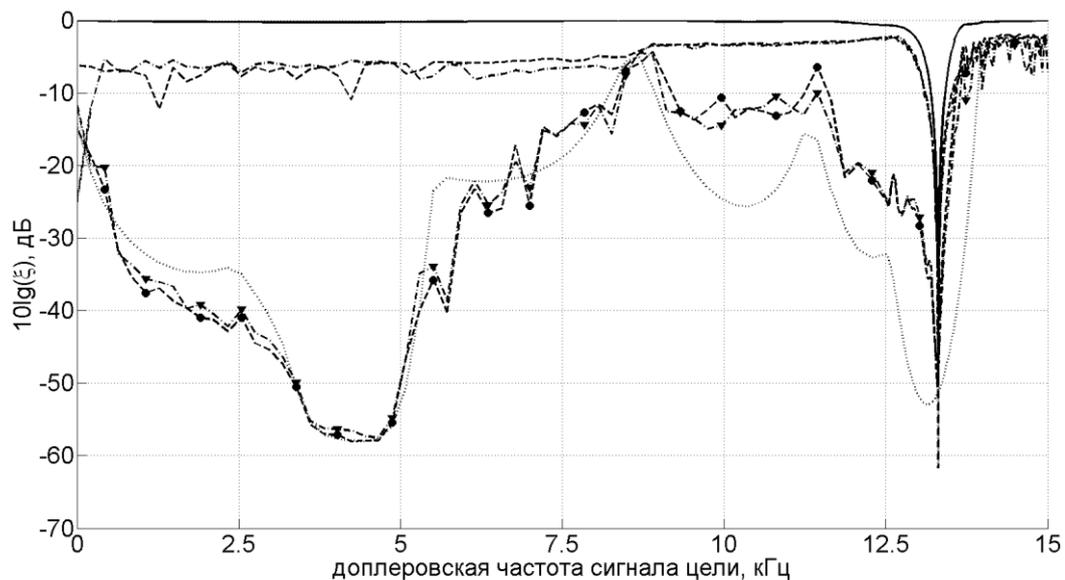


Рис. 1. Зависимости энергетических потерь от доплеровского сдвига частоты сигнала цели (размер обучающей выборки равен 10): $\xi(f_{ДЦ})$ - для известной ковариационной матрицы помех - сплошная линия; $\xi_{ТА}(f_{ДЦ})$ для $N'=3, L'=2, M'=3$, размер U_{III} равен 5 - штриховая линия; $\xi_{ТА}(f_{ДЦ})$ для $N'=3, L'=3, M'=3$, размер U_{III} равен 5 - штрихпунктирная линия; $\xi_T(f_{ДЦ})$ для $N'=3, L'=2, M'=3$ -

штриховая линия с круглым маркером; $\xi_T(f_{ДЦ})$ для $N'=3$, $L'=3$, $M'=3$ - штрихпунктирная линия с треугольным маркером; $\xi_{ИД}(f_{ДЦ})$ - пунктирная линия.

Характерный провал функции $\xi_{ИД}(f_{ДЦ})$ в области доплеровских частот, близких к 13 кГц, обусловлен отражениями от подстилающей поверхности, принимаемыми по главному лепестку ДНА, в то время как для доплеровских частот 3,5-5 кГц провал вызван отражениями, принимаемыми по боковым лепесткам ДНА. Отсутствие потерь в отношении сигнал/(шум+помеха) для $\xi(f_{ДЦ})$ за счет отражений, близких к альтиметровым, иллюстрирует потенциальное преимущество совместной пространственно-временной обработки по сравнению с традиционной обработкой. В то же время, из данных, приведенных на рис. 1, видно, что характеристики алгоритмов ПрВО с формированием кластеров без использования априорной информации практически совпадают с характеристиками неадаптивных алгоритмов с независимым формированием ДНА и доплеровской фильтрацией. Это объясняется недостаточным объемом обучающей выборки для формирования оценки ковариационной матрицы помехи от подстилающей поверхности и ее неоднородностью.

Наиболее эффективными в условиях отражений от подстилающей поверхности, близких к альтиметровым, являются алгоритмы ПрВО с формированием кластеров и использованием априорной информации о помехе от подстилающей поверхности. Влияние неоднородности обучающей выборки удастся снизить за счет априорной информации о пространственном положении «блестящих

точек» на подстилающей поверхности для различных элементов разрешения БРЛС. При этом проигрыш в отношении сигнал/(шум+помеха) при использовании данных алгоритмов составляет в среднем около 6-7 дБ по сравнению с оптимальными алгоритмами ПрВО.

Вычислительная сложность алгоритмов. Квазиоптимальный алгоритм ПрВО с формированием кластеров и использованием априорной информации предполагает проведение следующих основных вычислительных операций:

- двумерное преобразование Фурье вектора входных отсчетов (размерность вектора NLM);
- формирование M кластеров размерности $N'L'M'$;
- расчет собственных значений и собственных векторов модельной ковариационной матрицы $\mathbf{R}_{\Pi A}$ размерности $N'L'M'$ для каждого из образованных кластеров;
- вычисление проекции входного вектора в подпространство \mathbf{U}_{III} ;
- обращение ковариационной матрицы размерности $\dim(\mathbf{U}_{\text{III}})$ для нахождения вектора весовых коэффициентов \mathbf{w}_{TA} .

При этом вычислительная сложность алгоритма определяется в основном операцией расчета собственных значений и собственных векторов модельной ковариационной матрицы $\mathbf{R}_{\Pi A}$, составляя для одного канала дальности порядок $O(M(N'L'M')^3)$.

Таким образом, реализация данного алгоритма в реальном масштабе времени потребует бортового вычислителя мощностью порядка $5 \cdot 10^{11}$ операций умножения - сложения в секунду. Вместе с тем, поскольку обработка сигналов в каждом из кластеров может проводиться независимо, существует техническая возможность реализации предлагаемого алгоритма на существующей элементной базе. Например, одним из вариантов является построение соответствующего вычислителя с использованием программируемых логических интегральных схем, соединенных мультигигабитными линиями для скоростной передачи данных. Такая структура вычислителя позволит максимально распараллелить вычислительные процессы и является легко масштабируемой под конкретные параметры алгоритма.

Выводы. Приведенные результаты позволяют сделать следующие заключения:

1. Оптимальные алгоритмы пространственно-временной обработки обеспечивают существенный энергетический выигрыш при селекции воздушных объектов в бортовых радиолокационных станциях на фоне мешающих отражений от подстилающей поверхности, близких к альтиметровым, по сравнению с независимыми алгоритмами пространственной и временной (доплеровской) обработки.

2. Для уменьшения влияния неоднородности обучающей выборки на характеристики алгоритмов ПрВО целесообразны квазиоптимальные алгоритмы ПрВО с формированием кластеров на основе двумерного преобразования Фурье и

использованием априорной информации о пространственном положении «блестящих точек» на подстилающей поверхности для различных элементов разрешения БРЛС. Это позволяет получить выигрыш около 15-20 дБ в отношении сигнал/(шум+помеха) на выходе устройства обработки.

3. Оцененные вычислительные затраты на реализацию приведенных квазиоптимальных алгоритмов ПрВО позволяют говорить о возможности их исполнения в реальном масштабе времени на современной элементной базе.

Библиографический список

1. Дудник П.И., Кондратенко Г.С., Татарский Б.Г. и др. Авиационные радиолокационные комплексы и системы: учебник для слушателей и курсантов ВУЗов ВВС. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Жуковского, 2006. – 1112 с.

2. Верба В.С., Трофимов А.А., Чернышев М.И. Применение пространственно-временной обработки в самолетной РЛС дозора // Радиотехника. 2009. №8. С. 85-89.

3. Гандурин В.А., Трофимов А.А., Чернышев М.И. Структура и алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов в импульсно-доплеровской РЛС дозора, расположенной на самолете // Радиотехника. 2009. №8. С. 90-94.

4. R. Klemm, Principles of Space-Time Adaptive Processing (3rd Edition), The Institution of Engineering and Technology, 2006.

5. Applications of Space-Time Adaptive Processing, Edited by R. Klemm, The Institution of Electrical Engineers, London, 2004.

6. Ward J. Space-Time Adaptive Processing for Airborne Radar, MIT Technical Report, 1015, MIT Lincoln Laboratory, December 1994.

7. Тихонов Р.С. Алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов для бортовых радиолокационных станций переднего обзора // Радиотехника. 2014. №12. С. 64-69.