

С. И. Нефедов, И. В. Крючков,
М. И. Нониашвили, Г. А. Лесников,
Н. А. Соловьев

ОБЗОР ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ (STAP) В РАДАРАХ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ (КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ)

Рассмотрены основные методы пространственно-временной адаптивной обработки сигналов (STAP). Приведен простейший пример STAP и общий подход к решению поставленной задачи, основанный на оценке ковариационной матрицы помехи. Представлен алгоритм обращения ковариационной матрицы помехи наиболее эффективный для STAP. Дан обзор пост-доплеровских алгоритмов STAP, а также методов, основанных на пространственно-частотно-временном анализе сигналов.

E-mail: kolyaland@mail.ru

Ключевые слова: *space-time adaptive signal processing (STAP), synthetic aperture radar (SAR), interference covariance matrix, пространственно-временная адаптивная обработка сигнала, синтез апертуры, ковариационная матрица помехи.*

Целью пространственно-временной адаптивной обработки сигналов STAP является выделение движущихся объектов на фоне подстилающей поверхности. Наиболее успешное применение эти алгоритмы получили для обработки сигналов радиолокационных станций (РЛС), работающих в режиме синтеза апертуры.

Данная задача имеет огромную актуальность для радаров с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования, так как пространственно-временная обработка позволяет получать качественные радиоизображения подстилающей поверхности и выделять движущиеся цели, которые сами являлись бы помехой при использовании традиционных методов обработки.

Радар с синтезированной апертурой представляет собой РЛС, у которой приемной антенной является цифровая фазированная антенная решетка (ФАР), т. е. имеется возможность получения сигнала от каждого элемента решетки отдельно. Здесь важно отметить, что антенная решетка располагается вдоль траектории полета РСА. При этом основными характеристиками ФАР является число элементов N и межэлементное расстояние d . Сам РСА летит относительно подстилающей поверхности со скоростью v .

Движущаяся цель представляет собой точечный отражатель, перемещающийся относительно РЛС с некоторой скоростью. Также следует отметить, что за время обработки цель не покидает элемент разрешения по продольной и поперечной координатам.

Активная помеха представляет собой точечный источник шума, и, что важно отметить, данный сигнал не имеет корреляции по времени, но имеет пространственную корреляцию, т. е. между сигналами от элементов ФАР.

Пассивная помеха представляет собой отражения от подстилающей поверхности. Она имеет как временную, так и пространственную корреляцию (рис. 1) [1].

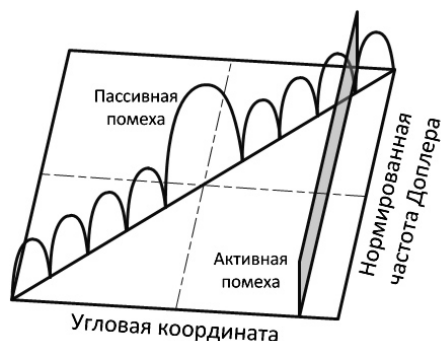


Рис. 1. Виды сигналов в пространственно-частотной области

Отраженный сигнал удобно представить в виде массива, так как данные поступают по пространственной и временной координатам. Временную координату целесообразно разделить на время от импульса к импульсу — время запаздывания (быстрое время) и на номер излучаемого импульса (медленное время).

Исходя из этого, входные данные будут представлять собой куб: N пространственных каналов на M принятых импульсов и на K элементов разрешения по дальности. Число импульсов M определяется временем когерентного накопления сигнала от цели.

Для понимания сути пространственно-временной обработки имеет смысл рассмотреть простейший случай [2]. Для его реализации необходима антенна с двумя (или более) фазовыми центрами, расположенными вдоль оси полета спутника. При этом частота повторения импульсов подбирается так, что за период спутник пролетает расстояние между фазовыми центрами антенны.

Таким образом, любые два последовательных импульса, поступающих от двух разных частей антенны, кажется, что происходят из одного фазового центра, фиксированного в пространстве. Компенсатор вычитает второе отражение, полученное задней антенной, из первого отражения, полученного ведущей антенной (рис. 2). Это приво-

дит к компенсации сигнала, отраженного от подстилающей поверхности.

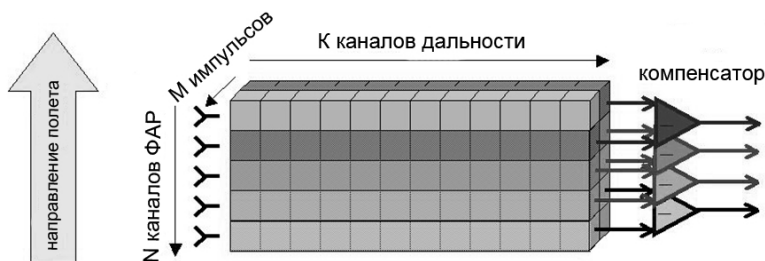


Рис. 2. Структурная схема простейшей пространственно-временной адаптивной обработки

Как известно, задача оптимальной обработки сигнала на фоне коррелированной помехи уже решена [3]. Для ее решения необходима ковариационная матрица помехи. Теоретический расчет этой матрицы практически невыполним, поэтому в РСА эту матрицу оценивают на основе принятого сигнала и обработку называют адаптивной. Сутью алгоритмов STAP является способ оценки этой матрицы.

Важной характеристикой ковариационной матрицы является размерность подпространства пассивной помехи, которая показывает сложность обработки (чем она меньше, тем обработка проще) и указывает, какое количество данных необходимо для оценки матрицы.

Для ФАР бокового обзора в работе [4] показано, что

$$R \approx \text{int} \{ N + (M - 1) \gamma \}, \quad (1)$$

где γ — соотношение между нормированной доплеровской частотой и пространственной частотой,

$$\gamma = \frac{2vT}{d}, \quad (2)$$

N — число каналов ФАР; M — число когерентно накапливаемых импульсов; v — скорость платформы; T — период повторения импульсов; d — расстояние между каналами ФАР; int — функция взятия целой части числа.

Ковариационная матрица S не должна оцениваться на основе данных, содержащих цель. В самом простом случае матрица может быть оценена следующим образом: выбирается срез куба данных по некоторому каналу дальности (рис. 3). Пусть в полученной матрице данные пространственных каналов ФАР расположены по строкам, соответственно данные медленного времени — по столбцам. Создается вектор y размером $N \times M$, сформированный из столбцов матрицы, как показано на рис. 3.

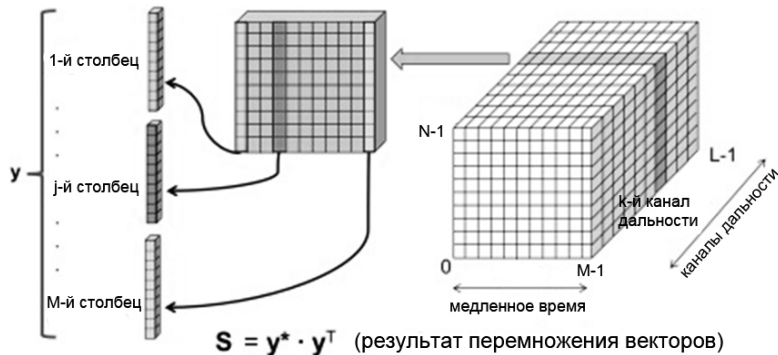


Рис. 3. Вычисление ковариационной матрицы помехи

Тогда ковариационная матрица помехи

$$S = y^* y^T, \quad (3)$$

где «*» — обозначает комплексное сопряжение.

Оптимальный алгоритм строится аналогично задаче обнаружения полностью известного сигнала с неизвестной постоянной начальной фазой по критерию Неймана — Пирсона для некоррелированной помехи. В случае коррелированной помехи плотность вероятности имеет вид

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m |S|}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} n^T S^{-1} n\right]. \quad (4)$$

Здесь m — размер выборки; $|S|$ — детерминант матрицы S ; n — вектор помехи.

Выражение (4) представляет собой общий случай многомерного нормального распределения вероятностей для величин с нулевым математическим ожиданием [1].

Как следует из формулы (4), для построения оптимального алгоритма обнаружения необходимо знать матрицу, обратную ковариационной матрице помехи.

Для инвертирования матрицы S целесообразно воспользоваться QR -разложением [1]. Этот метод заключается в представлении ковариационной матрицы в виде произведения унитарной (или ортогональной матрицы) и верхнетреугольной матрицы:

$$S = QR, \quad (5)$$

где Q — унитарная матрица; R — верхнетреугольная матрица.

Матрицы Q и R можно вычислить из S , используя один из нескольких методов, таких как: метод Грамм-Шмидта, трансформация

Хаусхолдера или вращение Гивенса. Далее алгоритм инвертирования матрицы R не представляет сложности.

Как показывает практика, более совершенный подход к формированию ковариационной матрицы помехи заключается в переходе из временной области в частотную. Данные методы обработки называются пост-доплеровскими [2].

Пост-доплеровские пространственно-временные адаптивные методы обработки предназначены для дальностно-доплеровской области, т. е. после того, как доплеровский фильтр был применен. Это обусловлено тем, что отражения от пассивной помехи занимают всего несколько элементов разрешения по частоте [4], в то же время присутствуют во всех импульсах, как это показано на рис. 4. Этот факт существенно упрощает процесс фильтрации, что выражается в меньшем количестве данных, необходимых для оценки ковариационной матрицы помехи, а также в меньшем объеме вычислений.

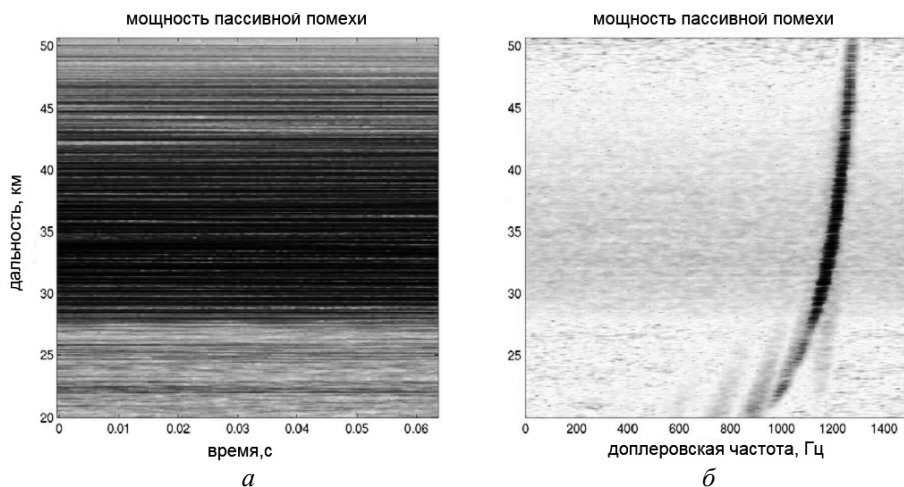


Рис. 4. Распределение пассивной помехи (а) по времени и по частоте (б)

Самая простая пост-доплеровская STAP — метод адаптивного формирования диаграммы, который также называют частотно-зависимая пространственная обработка. В этом методе $N \times M$ — размерная пространственно-временная задача фильтрации делится на M отдельных N -размерных адаптивных задач формирования луча (рис. 5).

Низкая производительность пост-доплеровского метода адаптивного формирования диаграммы может быть улучшена путем использования временной адаптации. Один из способов, которым это может быть достигнуто, — метод соседних ячеек, т. е. путем адаптивной обработки пространственных выходов из нескольких соседних элементов разрешения по частоте. В этом методе, который называется также расширенный факторизованный, $N \times M$ -размерная простран-

ственно-временная задача фильтрации делится на M отдельные $N \times L$ -размерные пространственно-временные задачи фильтрации (рис. 6).

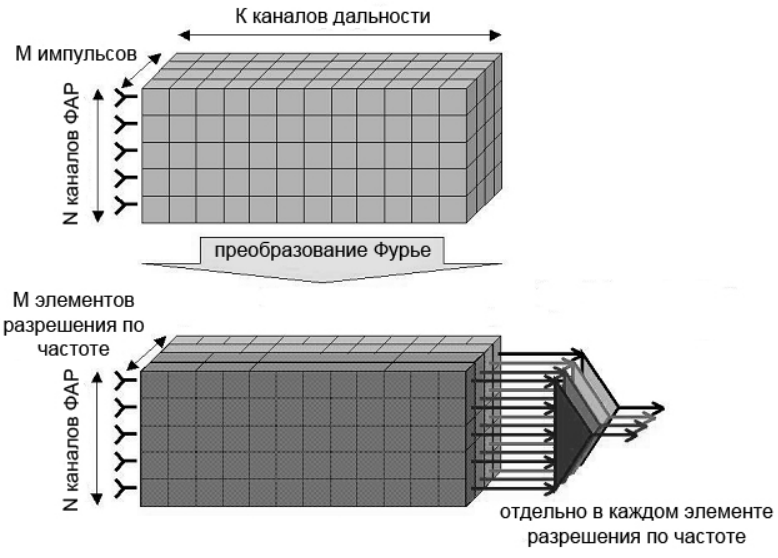


Рис. 5. Метод адаптивного формирования диаграммы

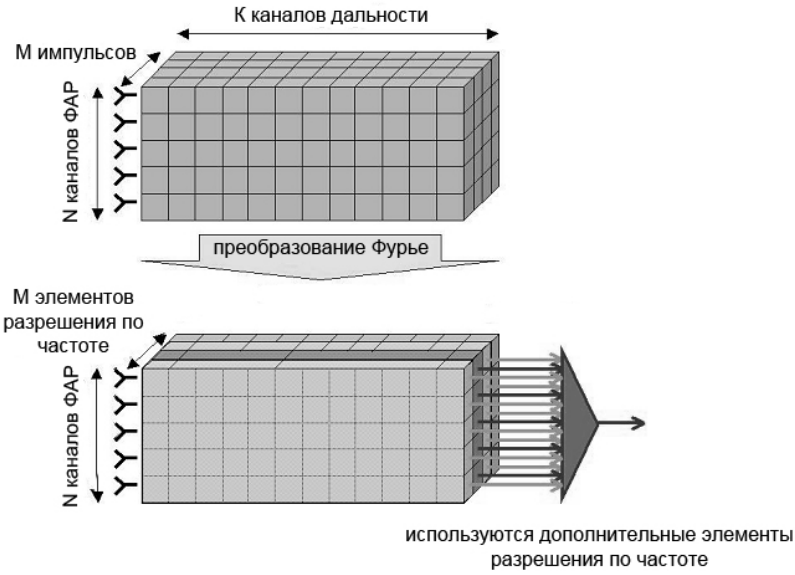


Рис. 6. Метод соседних ячеек

Другой метод использует набор M' -импульсных доплеровских фильтров, что фактически эквивалентно закруглению частоты. Фильтры производят $L = M - M' + 1$ выходных импульсов для каждого фильтра (рис. 7). Затем пространственный выход из L выходных импульсов обрабатывается адаптивно. Как и в методе соседних ячеек,

задача фильтрации $N \times M$ -размерного пространства-времени вновь разделилась на M отдельных $N \times L$ -размерных пространственно-временных задач фильтрации.

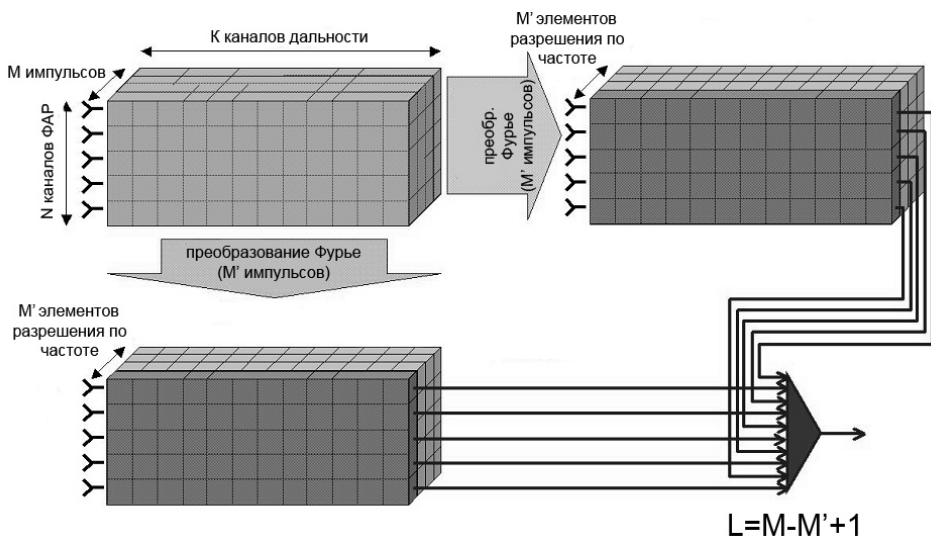


Рис. 7. Метод, основанный на загрублении разрешения по частоте

Совместно локализованный домен, вероятно, самый известный пост-доплеровский метод STAP в пространстве лучей. В этом методе $N \times M$ -размерная задача пространственно-временной фильтрации делится на $N' \times M$ отдельных $L' \times L$ -размерных задач пространственно-временной фильтрации (рис. 8).

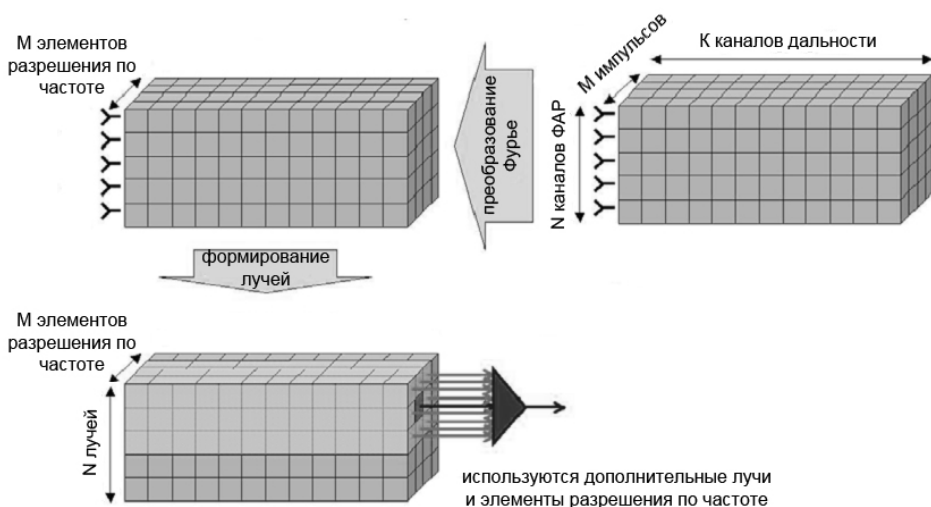


Рис. 8. Принцип работы совместно локализованного домена

Один из эффективных способов повышения вероятности обнаружения движущихся целей — увеличение времени когерентного накопления сигнала. Однако с увеличением времени наблюдения цель может перемещаться из одного элемента разрешения в другой, как по дальности, так и по доплеровской частоте. В этом случае применяют пространственно-частотно-временной анализ сигнала [2], который может быть основан на локальном преобразовании Фурье (STFT), либо на распределении Вигнера — Вилле, последнее отличается тем, что может точнее оценить мгновенную частоту сигнала, но при этом дает комбинационные составляющие, если имеют место другие сигналы.

Суть метода состоит в том, что сначала проводится наблюдение с грубыми разрешающими способностями. Если в результате этого образуется группа отсчетов, которые могли бы представлять собой траекторию цели, то выполняется компенсация дальности и частоты, которые позволяют произвести более длительное когерентное накопление сигнала, тем самым повысив отношение сигнал/помеха.

Как показывает практика, алгоритмы STAP имеют огромное значение для реализации режима селекции движущихся целей в РЛС с режимом синтеза апертуры космического базирования. Также следует отметить, что существенно повысить эффективность решения задачи обнаружения движущихся целей можно путем совместной обработки сигнала от группировки спутников, представляющих собой разреженную ФАР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parker M. Radar Basics. Part 4: Space-time adaptive processing <http://www.eetimes.com/design/programmable-logic/4217308/Radar-Basics-Part-4-Space-time-adaptive-processing>.
2. Bürger W. Space-Time Adaptive Processing: Algorithms <http://ftp.rta.nato.int/public//PubFullText/RTO/EN/RTO-EN-SET-086//EN-SET-086-07.pdf>
3. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: Справочник / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев и др.; Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАК-ВИС», 1998. – 828 с.
4. Ward J. Space-Time Adaptive Processing for Airborne Radar // Technical Report 1015, MIT Lincoln Laboratory, Lexington, MA, USA. – 1994. – 203 p.

Статья поступила в редакцию 07.09.2012