

Д. В. Смирнов – магистрант кафедры бортовой радиоэлектронной аппаратуры

А. А. Филиппов (д-р техн. наук, проф.) – научный руководитель

ОБНАРУЖЕНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ НАЗЕМНЫХ ПОДВИЖНЫХ ЦЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ БОРТОВОЙ РЛС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Обнаружение целей есть одна из главных задач радиолокации, включающая в себя обнаружение как воздушных, так и наземных целей. В отличие от обнаружения воздушных целей, задача обнаружения наземных целей при помощи бортовых РЛС сталкивается с большими проблемами, связанными с помехами, возникающими при отражении зондирующего сигнала о поверхность земли. Принимаемый сигнал содержит как полезную составляющую, отраженную от цели, так и помеху, отраженную от земли. В настоящее время созданы алгоритмы, позволяющие обнаруживать подвижные наземные цели на фоне подстилающей поверхности земли. Это обнаружение основано на том, что сигнал от движущейся цели смещен на частоту Доплера

$$f_D = -\frac{2V_{rad}}{\lambda} \quad (1)$$

Если радиолокационная станция неподвижна, то для выделения полезного сигнала достаточно использовать обычный доплеровский фильтр высоких частот. Так как бортовая РЛС находится в движении относительно поверхности, то сигнал от неподвижной земли тоже будет иметь доплеровский сдвиг, который обусловлен движением РЛС относительно земли. Спектр принимаемого сигнала в азимутально-доплеровской плоскости показан на рисунк 1.

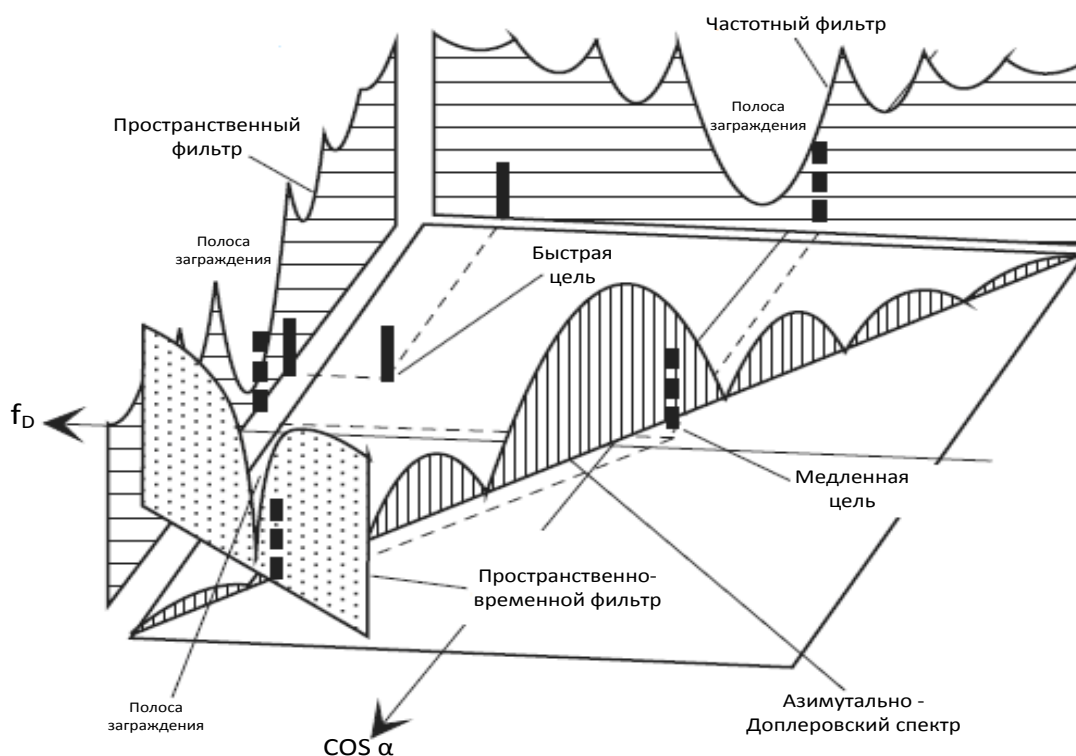


Рис. 1. Спектр принимаемого сигнала в азимутально-доплеровской плоскости

Спектр располагается по диагонали и модулируется диаграммой направленности передающей антенны. Применение пространственной или временной обработки не позволит выделить полезный сигнал. Пространственно-временная обработка использует тот факт, что спектр помех занимает узкую

полосу в азимутально-доплеровской плоскости. Поэтому пространственно-временной «фильтр» имеет узкую полосу заграждения, тем самым отфильтровывая только помеху.

Основополагающим принципом во всех системах пространственно-временной адаптивной обработки является использование нескольких приемных антенн. Сигналы, принимаемые каждой антенной, адаптивно взвешиваются с целью изменения направления усиления антенны в сторону полезного сигнала и создания нулей диаграммы направленности в сторону нежелательных сигналов и помех. Базовая структура систем пространственно-временной адаптивной обработки показана на рисунке 2.

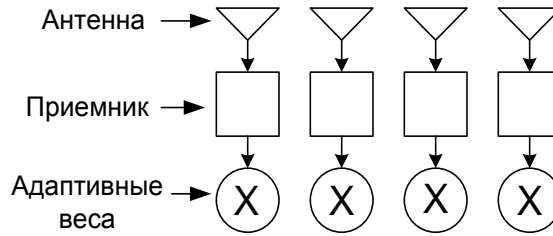


Рис. 2. Базовая структура систем пространственно-временной адаптивной обработки

Задача обнаружения может быть представлена в рамках проверки гипотез (2),(3)

$$H_0 : x = d \quad (2)$$

$$H_1 : x = \alpha e(\theta_i, f_i) + d \quad (3)$$

где x – полученные данные в соответствии с любой гипотезой, d – суммарная помеха, e – является пространственно-временным вектором, моделью сигнала цели, который возвращается с определенного угла θ_i с определенной частотой Доплера f_i , α является неизвестной комплексной амплитудой цели.

Антенная решетка состоит из эквидистантных элементов, поэтому пространственный и временной вектор можно записать следующим образом (4),(5),(6).

$$e_t = [1 \quad z_t \quad z_t^2 \quad \dots \quad z_t^{(N-1)}]^T \quad (4)$$

$$e_s = [1 \quad z_s \quad z_s^2 \quad \dots \quad z_s^{(J-1)}]^T \quad (5)$$

$$z_s = e^{j2\pi f_s} = e^{(j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \phi_i)} , \quad z_t = e^{j2\pi f_i / f_R} \quad (6)$$

где e_t и e_s представляют временные и пространственные вектора, соответственно.

В формуле (6) ϕ_i и f_i представляют угол наблюдения и доплеровскую частоту, f_R – частота следования импульсов, а λ – длина волны. Пространственно-временной вектор будет находиться в соответствии с формулой

$$e = e_t \otimes e_s \quad (7)$$

где \otimes представляет произведение Кронекера для двух векторов.

Для достижения проверки гипотез адаптивные алгоритмы определяют весовой вектор.

$$\Lambda = \begin{matrix} H_1 \\ |w^H x|^2 \\ H_0 \end{matrix} \begin{matrix} > \\ \lambda \\ < \end{matrix} \quad (8)$$

где $()^H$ – эрмитово сопряжение для векторов/матриц, а λ в (8) является порогом, который определяется уровнем ложной тревоги.

Оптимальным случаем обработки при известной помехе является метод с ковариационной матрицей помех R_d . Тогда вектор весов W будет определяться по известной ковариационной матрице R_d в соответствии с зависимостью (9) [2].

$$w = \frac{R_d^{-1} e}{\sqrt{e^H R_d^{-1} e}} \quad (9)$$

На практике ковариационная матрица помех не известна и должна быть оценена. В большинстве современных алгоритмов пространственно-временной адаптивной обработки (10) [2] ковариационная матрица оценивается, используя экземпляры принятого сигнала

$$\hat{R}_d = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k x_k^H = \frac{1}{K} X X^H \quad (10)$$

Адаптивные веса определяются в соответствии с формулой

$$w = \hat{R}_d^{-1} e \quad (11)$$

При реализации этого подхода можно столкнуться с рядом проблем – трудность расчетов, большое количество данных, необходимых для формирования ковариационной матрицы, неоднородность этих данных. Для решения этих проблем были разработаны частично адаптивные алгоритмы.

Рассмотрим один из примеров частично адаптивного алгоритма – JDL (jointdomainlocalized – совместная область локализации) алгоритм. Этот алгоритм отображает данные в угло-доплеровской плоскости. Создатели алгоритма полагают, что антенна представляет собой линейный массив эквидистантных датчиков. Исходя из этого предположения, пространственно-временные данные преобразуются в угло-доплеровскую область при помощи двумерного дискретного преобразования Фурье. Преобразование в угло-доплеровскую область локализует цель и помеху в нескольких углах и доплеровских частотах, это существенно сокращает количество данных, необходимых для формирования ковариационной матрицы помех и уменьшает трудность вычисления.

Рассмотрим еще один важный метод пространственно-временной адаптивной обработки – D³ метод. Этот алгоритм является нестатистическим, то есть весовой вектор может быть определен без оценки ковариационной матрицы помех. Основой D³ алгоритма является то, что угол наблюдения и частоту Доплера определяет направленный вектор сдвига фазы сигналы цели от одного антенного элемента/импульса к другому (6). Угол наблюдения и частота Доплера определяет z_s, фазовый сдвиг от одного антенного элемента к другому и z_t, сдвиг фазы от одного импульса к другому. Если x_j(n) есть суммарный сигнал на j элементе n-го импульса, тогда x_j(n) – z_s⁻¹ * x_(j+1)(n) и x_j(n) – z_t⁻¹ * x_j(n+1) должны содержать только помехи и шумы. D³ метод уменьшает величину этих членов, то есть мощность помех и шумов. Определение весов w, определение матрицы помех A (13)[2] и оптимальных весов w_s является следующей задачей оптимизации (12) [2].

$$w_s^{opt} = \arg \max_{w_s, w_s^H, w_s=1} \left[|w_s^H e_{s,0:J-2}(\theta)|^2 - k_s w_s^H A^T A^* w_s \right], \quad (12)$$

где оператор ^T и * являются транспонированием и сопряжением соответственно; вектор e_{s,0:J-2}(θ) представляет собой первые J – 1 элементов пространственного вектора длиной J.

Первое слагаемое отображает влияние весового вектора на усиление в направлении угла наблюдения, в то время как второе слагаемое представляет собой остаточную мощность помехи при фильтрации одними и теми же весами.

Таким образом, оптимальные веса D³ алгоритма максимизируют разность между усилением в наблюдаемом направлении и остаточной мощностью помех. Коэффициент k_s выбран как компромисс между усилением и фильтрацией помех [2]

$$A = \begin{bmatrix} x_0(0) - z_s^{-1} x_1(0) & \cdots & x_{(J-2)}(0) - z_s^{-1} x_{(J-1)}(0) \\ x_0(1) - z_s^{-1} x_1(1) & \cdots & x_{(J-2)}(1) - z_s^{-1} x_{(J-1)}(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_0(N-1) - z_s^{-1} x_1(N-1) & \cdots & x_{(J-2)}(N-1) - z_s^{-1} x_{(J-1)}(N-1) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Используя метод множителей Лагранжа (метод нахождения условного экстремума функции) можно показать, что желаемый весовой вектор есть собственный вектор соответствующий максимальному собственному значению матрицы (J – 1)(J – 1) a_{0:J-2}a_{0:J-2}^H – A^TA*. Временной весовой вектор можно найти аналогично, и общий весовой вектор будет определяться выражением (14) [2]

$$w = \begin{bmatrix} w_t \\ 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} w_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

где \otimes представляет произведения Кронекера, и добавленные нули представляют потерю одной степени свободы в пространстве и времени.

Обратим внимание на то, что весовой вектор получается без оценки ковариационной матрицы. Это дает наибольшее преимущество и наибольшие недостатки. Отсутствие оценки ковариационной матрицы позволяет использовать D³ алгоритм в сильно неоднородных ситуациях. По своей природе данный алгоритм эффективен против дискретных помех и не так эффективен против однородной помехи. Это происходит потому, что он игнорирует все статистические данные.

Пространственно-временная адаптивная обработка является методом двумерной фильтрации, которая позволяет фильтровать помехи. Этот метод использует несколько пространственных каналов в фазированной антенной решетке и зондирование пачками когерентных импульсов и прием сигнала с помощью радиолокатора для формирования вектора адаптивных весов. В зависимости от метода формирования вектора адаптивных весов, системы пространственно-временной адаптивной обработки подразделяют на статистические и нестатистические. Статистические методы определяют вектор весов при помощи ковариационной матрицы, в нестатистических методах ковариационная матрица не требуется. Статистические методы хорошо справляются с подавлением однородной помехи, в свою очередь нестатистические хорошо фильтруют неоднородные. Также стоит отметить, что минусом статистических методов является высокая трудность вычислений, а также большое количество входных данных, необходимых для формирования ковариационной матрицы. Поэтому были разработаны частично адаптивные алгоритмы, позволяющие сократить количество вычислений, а также уменьшить число необходимых выборок входного сигнала. Необходимо также заметить, что данный алгоритм позволяет находить, только подвижные цели. Неподвижные цели являются для данного алгоритма не заметными, потому что их спектр в угло-доплеровской плоскости совпадает с помехой.

Библиографический список

1. Klemm R., *Principles of Space-Time Adaptive Processing*, IEE, London, UK, 2002.
2. Wicks M.C., Rangaswamy M., Adve R., Hale T.B., *Space-time adaptive processing*, *Signal Processing Magazine*, IEEE, Volume 23, Issue 1, Date: Jun.2006, Pages: 51-65.