

В. М. КАРТАШОВ, канд. техн. наук

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ РАДИОСИГНАЛА, РАССЕЯННОГО АКУСТИЧЕСКИМ ВОЛНОВЫМ ПАКЕТОМ

Рассеяние радиоволн акустическим волновым пакетом используется при определении характеристик атмосферы методом радиоакустического зондирования. В радиоакустических системах температурного ветрового зондирования атмосферы целесообразно использование приемной дискретной антенны достаточно больших размеров, позволяющей принимать отраженный радиосигнал при сносе акустического пакета ветром. При этом увеличивается дальность действия системы, а дискретный характер антенны позволяет отслеживать движение пятна отраженного сигнала в горизонтальной плоскости вблизи поверхности земли (в плоскости приемной антенны), что позволяет определять составляющие вектора скорости горизонтального ветра [1].

Обработка принимаемого радиосигнала в таких системах в целях обнаружения и измерения координат центра пятна относится к задачам пространственно-временной обработки. Для решения указанных задач целесообразно использовать «видеокогерентную» пространственно-временную обработку, которая организуется в предположении пространственной некогерентности полезных сигналов на входах приемных элементов антенной решетки. Решение в этом случае принимается по результатам обработки видеосигналов, полученных с выходов элементарных каналов.

«Видеокогерентные» системы значительно проще в реализации, чем когерентные, а по эффективности решений они для ряда задач при достаточно большом отношении сигнал-шум не уступают когерентным [2]. «Видеокогерентная» пространственно-временная обработка находит применение прежде всего при построении многопозиционных радиолокационных систем.

Для выполнения поставленных задач указанными методами необходимы: обнаружение сигнала в каждом элементарном канале антенной решетки; выделение пространственной огибающей; обнаружение пятна в целом; оценка координат центра пятна.

Пространственной огибающей будем называть распределение амплитуд сигнала по пространственным координатам X , Y . Указанные операции проводятся через определенные промежутки времени. В результате выполнения нескольких операций по обнаружению и оценке координат центра пятна будет получена траектория перемещения пятна в плоскости приемной антенны.

Рассмотрим математическую постановку задачи. Будем считать, что приемная антенна представляет собой плоскую эквидистантную антенную решетку (АР), которая содержит в горизонтальной плоскости XOY L одинаковых приемных элементов без взаимной связи. Фазовые центры элементов АР расположены в узлах прямоугольной сетки с координатами

$$\begin{aligned} x_{mn} &= x_0 + d(m-1), & m &= \overline{1, M}; \\ y_{mn} &= y_0 + d(n-1), & n &= \overline{1, N}; & MN &= L, \end{aligned}$$

где d — расстояние между соседними элементами АР вдоль осей X и Y .

Сигнал на входе приемной АР представим в виде аддитивной смеси пространственно-временного сигнала и помехи:

$$\|U_{ij}(t)\| = \|S_{ij}(t, \vec{g}, \vec{v})\| + \|n_{ij}(t)\|, \quad (1)$$

где \vec{g}, \vec{v} — векторы существенных и несущественных параметров сигнала.

Для аналитического решения задачи синтеза алгоритмов обработки необходимо выбрать модели полезного сигнала и помех. Системы радиоакустического зондирования (РАЗ) малочувствительны к действию внешних помех. Поэтому шумовое поле помех представим в виде пространственно-временного белого шума многоканального приемного устройства и окружающего пространства, который приведен ко входам приемника. Статистические характеристики помеховых составляющих имеют вид

$$\begin{aligned} &< \|n_{mn}\| > 0; \\ \|K_{mnkl}(t_1, t_2)\| &= < \|n_{mn}(t_1) n_{kl}(t_2)\| > = \\ &= \left\| \frac{N_0}{2} \delta(t_1 - t_2) \delta_{mk} \delta_{nl} \right\| \quad \left(\begin{array}{l} m, k = \overline{1, M} \\ n, l = \overline{1, N} \end{array} \right), \end{aligned}$$

где $N_{0mn}/2$ — двухсторонняя спектральная плотность шума на входе mn элемента АР; δ_{mk}, δ_{nl} — символы Кронекера; $\langle \cdot \rangle$ — знак математического ожидания.

В приемной АР предполагается использование одинаковых элементов, т.е. $N_{0mn} = N_0$, тогда корреляционную матрицу пространственно-временных шумов запишем в следующем виде:

$$\|K_{mnkl}(t_1, t_2)\| = \frac{N_0}{2} \delta(t_1 - t_2) J,$$

где J — блочная матрица, в которой элементы $m = kl$ равны единице, все остальные — нулю. Одномерный закон распределения мгновенных значений такого шума является нормальным.

Особенность подхода к анализу свойств отраженного сигнала в РАЗ и выбору его модели состоит в возможности строгого математического решения задачи дифракции радиоволн на звуке и получении выражения для отраженного сигнала. Это связано с тем, что для цели, используемой в РАЗ, удастся записать аналитическое выражение для поля неоднородности диэлектрической проницаемости в пространстве как функцию трех пространственных координат и времени. Выражение, полученное в результате решения задачи дифракции, может использоваться для анализа энергетических и различных неэнергетических свойств сигнала. Такой подход позволяет достаточно полно исследовать свойства отраженного сигнала.

Основываясь на обзоре [1] результатов работ, посвященных дифракции радиоволн на звуке, выражение для распределения напряженности поля в пятне представим в виде

$$E(\rho) = E_0 \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\rho_n^2}\right],$$

где E_0 — максимум напряженности в центре пятна; ρ_n — характерный размер пятна рассеянного излучения, определяемый через параметры передающих акустической и радиоантенн.

Учитывая свойства отраженного радиосигнала, выявленные в теоретических и практических работах [1], и многоканальность приемной аппаратуры, в качестве модели сигнала, принимаемого по элементарному каналу, примем сигнал с неизвестной неслучайной амплитудой и случайной начальной фазой. Начальные фазы сигналов в элементарных каналах представим в виде взаимно независимых случайных величин с равномерным распределением на интервале $[0, 2\pi]$. Плотность совместного распределения начальных фаз

$$p(\varphi_{11}, \varphi_{12}, \dots, \varphi_{MN}) = \prod_i \prod_j p(\varphi_{ij}) = (1/(2\pi))^{MN}.$$

Заметим, что оптимальные алгоритмы видеокогерентной обработки не критичны к виду принятой модели распределения начальных фаз сигналов и принятие такой модели, не меняя существа результатов, позволяет упростить проводимые математические преобразования. В [3] показано, что если начальная фаза является неинформативным параметром, то получающиеся при этом оптимальные для равномерного априорного распределения начальной фазы на интервале $[0, 2\pi]$ алгоритмы обработки

являются оптимальными и в случае произвольно априорного распределения начальной фазы.

При выбранных моделях сигналов и помех решение задачи обнаружения в элементарных каналах известно [3]. Для этого необходимо в каждом канале формировать величину z и сравнивать ее с порогом. Величина z может быть сформирована с помощью корреляционной схемы с квадратурными каналами или с использованием согласованного оптимального фильтра. Для выделения пространственной огибающей следует формировать матрицу $\|z_{ij}\|$.

Далее необходимо определить по имеющейся выборке, принадлежит ли она полезному сигналу или лежит в области помехи, т.е. решить задачу обнаружения для пятна в целом. Сигнал на входе обнаружителя пятна представим в виде смеси полезного сигнала и помехи:

$$\|z_{ij}\| = \|r_{ij}\| + \|n_{ij}\|. \quad (2)$$

Значения $\|z_{ij}\|$ в каждом канале распределены при наличии сигнала по обобщенному релеевскому закону, при отсутствии сигнала — по релеевскому закону.

При разработке алгоритмов обработки сигнала на каждом шаге измерений будем подвергать анализу только те приемные элементы, которые попадают в строб. Положение строба определяется по результатам предшествующих измерений координат центра пятна в данном цикле зондирования. Размеры строба будем выбирать, исходя из случайных и динамических ошибок измерений, а также размеров пятна. Область изменения значений индексов i, j в (2) определяется размерами строба.

Приняв во внимание, что входной шум решетки является гауссовым изотропным полем, дельта-коррелированным по пространству и по времени, отношение правдоподобия запишем в виде

$$\Lambda\left[\|z_{ij}\|\right] = \prod_{i_{\min}}^{i_{\max}} \prod_{j_{\min}}^{j_{\max}} \exp\left(-\frac{r_{ij}}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{z_{ij}r_{ij}}{\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где $I_0(\bullet)$ — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Область изменения значений индексов i, j в (3) определяется характерным размером пятна ρ_n . Использование аналитической модели пространственной огибающей позволит с погрешностью до постоянного

множителя представить все составляющие матричного параметра $\|r_{ij}\|$, входящего в (3).

Представим модель, не ограничивая общности рассуждений, в общем виде:

$$r_{ij} = r_0 \gamma(x_i, x_n) \varphi(y_i, y_n), \quad (4)$$

где r_0 — значение амплитуды сигнала в центре пятна; x_i, y_j — координаты i, j элемента антенной решетки.

Далее, подставив (4) в (3) и прологарифмировав последнее с учетом аппроксимации логарифма функции Бесселя в области достаточно сильных сигналов значениями аргумента, оптимальный алгоритм обнаружения сигнала представим в виде

$$\sum_{i_{\min}}^{i_{\max}} \sum_{j_{\min}}^{j_{\max}} z_{ij} \gamma(x_i, x_n) \varphi(y_j, y_n) \geq B_0. \quad (5)$$

Оптимальный алгоритм обнаружения пятна состоит в суммировании элементов $\|z_{ij}\|$ с весами, определяемыми значениями модельной пространственной огибающей в узлах приемной решетки, и сравнении полученной суммы с порогом B_0 .

Для обнаружения пятна необходимо выполнить последовательное перемещение модельной пространственной огибающей в пределах строба (в области возможных положений пятна) до превышения порога.

Можно использовать также более простой в реализации квазиоптимальный алгоритм, в котором элементы выборки входят в сумму с одинаковым единичным весом.

Анализ качественных показателей обоих алгоритмов производится методом статистического моделирования на ЭВМ. Выяснено, что отношение потерь квазиоптимального алгоритма обнаружения пятна к потерям при оптимальном алгоритме составляет примерно 1,2. Следовательно, оба алгоритма могут быть использованы в системах радиоакустического зондирования атмосферы.

Список литературы: 1. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 200 с. 2. *Пространственно-временная обработка сигналов* / Под ред. И.Я. Кремера. М.: Радио и связь, 1984. 224 с. 3. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 21.01.98