

В. М. КАРТАШОВ, канд. техн. наук, О. В. СЫТНИК, канд. техн. наук, А. А. ВАСИЛЬЧЕНКО

АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ АКУСТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Акустические локаторы (АЛ, содары) являются эффективным средством получения информации о характере и динамике процессов, происходящих в нижней тропосфере. АЛ работают в условиях достаточно сильных пассивных и особенно активных помех. Наиболее неблагоприятный фактор, ограничивающий эффективность их работы — внешний шум. Даже при расположении АЛ в наименее зашумленных местах внешний шумовой фон оказывается на несколько порядков больше по уровню внутреннего шума приемника. В то же время, в соответствии с имеющейся необходимостью, содары должны работать вблизи взлетно-посадочных полос аэродромов, в районах крупных предприятий, в черте города. Имеющиеся средства защиты АЛ от помех не позволяют им функционировать с необходимой эффективностью в местах, характеризующихся сложной помеховой обстановкой, и в соответствии с этим вопрос повышения помехозащищенности АЛ является чрезвычайно актуальным.

Разработка и применение в содарах ведущими фирмами производителями акустических фазированных антенных решеток (ФАР) и достаточно мощных вычислительных средств позволяет значительно расширить как функциональные возможности содаров, так и возможности их по защите от помех.

Отличительной особенностью систем, в которых в качестве приемной антенны используется ФАР, является возможность реализации адаптивной пространственной избирательности, т.е. возможности адаптивного формирования в направлениях на источники помех нулей диаграмм направленности (ДН). В настоящее время методы адаптивной обработки сигналов в антенных решетках широко используются в радиолокационных и связных системах [1-4]. Однако в отличие от радиолокационных задач, где направление прихода полезного сигнала либо заранее известно, либо задано, и оптимизация осуществляется, например, по критерию максимума отношения сигнал/помеха на выходе антенны [1], в задачах акустического зондирования атмосферы направление излучения зондирующего сигнала, а следовательно, и направление приема рассеянных сигналов может изменяться в некоторых пределах в зависимости от пространственного распределения источников помех. Физической основой для изменения направления зондирования является распределенность в атмосфере рассеивающих образований, представляющих собой естественные неоднородности среды. Поэтому при построении алгоритмов обработки сигналов в содарах, оснащенных ФАР, целесообразно не только формировать распределение нулей ДН ФАР в направлениях на источники помех, но и выбирать углы излучения полезного сигнала с целью минимизации мощности помех на выходе решетки.

Для построения алгоритма оценки оптимального направления излучения зондирующего сигнала в присутствии внешних помех, действующих с различных направлений, рассмотрим N -элементную ААР. Вектор весовых коэффициентов (ВВК) решетки $\vec{W}^T = [W_1, W_2, \dots, W_N]$ в исходном состоянии, когда в системе имеется только собственный шум приемника, совпадает с вектором управления $\vec{B}(\theta_0)$, который требуется для формирования ДН $G(\theta_0, \theta)$ с максимумом в направлении θ_0

$$\vec{B}^T = [B_1, B_2, \dots, B_N], \quad (1)$$

где $B_k = b_k \cdot \exp(j[2\pi(k-1)d \cdot \sin \theta_0]/\lambda)$, $k = 1, \dots, N$.

Значения коэффициентов b_k выбираются так, чтобы обеспечить необходимое распределение поля по апертуре. Если, например, $b_k = 1$ для $k = 1, \dots, N$ при $\theta_0 = 0$, то уровень первого бокового лепестка будет 13,5 дБ, а ДН может быть записана в виде [3]

$$|G(\theta_0, \theta)| = \left| \vec{S}^T \cdot \vec{B}^*(\theta_0) \right| = \left| \sum_{k=1}^N b_k \cdot \exp\left(\frac{j(k-1)2\pi d}{\lambda} [\sin \theta - \sin \theta_0]\right) \right|, \quad -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2. \quad (2)$$

Под вектором \vec{S} в формуле (2) понимается вектор-столбец сигналов единичной амплитуды, принимаемых ААР с направления θ . Осуществляя подбор коэффициентов b_k , можно получить требуемую форму диаграммы направленности либо максимизировать коэффициент направленного действия антенной решетки.

В соответствии с [1] при появлении источников внешних помех ДН ААР видоизменяется таким образом, что в направлениях на источники внешних шумов в ДН формируются провалы. Причем, глубина каждого провала и скорость адаптации решетки зависят от величины отношения "помеха/тепловой шум", а оптимальный в смысле максимума отношения "сигнал/помеха" ВВК вычисляется как:

$$\vec{W}_{opt}(\theta_0) = \mu \cdot \vec{R}^{-1} \cdot \vec{B}^*(\theta_0), \quad (3)$$

где μ – комплексный нормирующий множитель; $\vec{R} = E\{\vec{N}^* \cdot \vec{N}^T\}$ – корреляционная матрица отсчетов смеси внешней помехи и собственного шума каждого элемента ААР; $\vec{N}^T = [n_1, n_2, \dots, n_N]$ – вектор мгновенных значений шумового процесса в элементах решетки; \vec{B} – вектор управления ДН ААР.

Адаптивное вычисление ВВК в ААР содара целесообразно осуществлять в соответствии с выражением (3) по критерию максимума отношения сигнал-шум, используя алгоритм непосредственного обращения корреляционной матрицы (НОМ) \vec{R} . Преимущества данного метода по сравнению, например, с алгоритмом, функционирующим по критерию минимума среднего квадрата ошибки, который широко применяется в связанных ААР, обусловлены следующим обстоятельством: для реализации алгоритма НОМ не требуется априорной информации о направлении и свойствах полезного сигнала. Адаптация ВВК ААР по этому алгоритму осуществляется в паузах между приходом эхо-сигналов или в предположении об их малом уровне по отношению к мощности помех. Следовательно, данный алгоритм оказывается практически инвариантным к структуре и параметрам рассеянного, а также зондирующего сигналов.

В адаптивном процессоре, функционирующем по критерию минимума среднего квадрата ошибки, необходимо иметь ожидаемый полезный сигнал [2,3]. Причем, если последний совпадает с полезным сигналом, т. е. является его точной копией, то выходное колебание ААР является оптимальной оценкой принимаемого полезного сигнала по критерию минимума среднего квадрата ошибки, а шум при этом подавляется в максимальной степени. Однако на практике в условиях работы содара необходимая информация о полезном сигнале отсутствует или носит вероятностный характер, что затрудняет непосредственную реализацию подобных алгоритмов.

Составляющая полезного сигнала, принятого с направления θ_0 , в аддитивной смеси на выходе ААР определяется выражением $v_c = \vec{W}^{*T} \cdot \vec{S}$, а составляющая, обусловленная внутренним и внешним шумами, – формулой: $v_n = \vec{W}^{*T} \cdot \vec{N}$.

Мощность помеховой компоненты за интервал усреднения составит

$$P_n = E\{v_n^2\} = E\{\vec{W}^{*T} \cdot \vec{N} \cdot \vec{N}^{*T} \cdot \vec{W}\} = \vec{W}^{*T} \cdot E\{\vec{N} \cdot \vec{N}^{*T}\} \cdot \vec{W} = \vec{W}^{*T} \cdot \vec{R} \cdot \vec{W}. \quad (4)$$

Таким образом, вычисление оптимального ВВК, минимизирующего мощность помех при ориентации главного лепестка ДН на направление θ_0 , производится в соответствии с выражением (3). Мощность помех, принимаемых антенной при таком положении ДН, определяется формулой (4). Поскольку ВВК является функцией угла θ_0 , то и мощность помех на выходе решетки будет зависеть от положения ДН, т.е. от значения θ_0 . Определив минимум функции $P_n(\theta_0)$ в некотором диапазоне углов $[\theta_{min}, \theta_{max}]$, найдем наилучшее с точки зрения минимума помех направление зондирования.

Отметим, что пространственная адаптация с целью выбора оптимального направления зондирования может осуществляться не только в содарах, оснащенных ААР, но также и в содарах с неадаптивными АР, а также в акустических локаторах, содержащих обычные непрерывные по пространству антенны. Распространенным методом защиты от внешних помех в локационных системах с неадаптивными АР является формирование диаграммы направленности заданной формы, отвечающей определенным требованиям (например, по уровню боковых лепестков). Форма ДН в этом случае неизменна во времени и получается с помощью требуемого модуля вектора \vec{B} .

Чтобы проиллюстрировать возможность выполнения пространственной адаптации применительно к содарам с апертурными антеннами, запишем выражение для мощности помех на выходе акустической антенны (соотношение справедливо также для решеток):

$$P_n(\theta_0, \phi_0) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |G(\theta, \phi, \theta_0, \phi_0)|^2 \cdot P(\theta, \phi) \cdot \cos(\theta) \cdot d\theta \cdot d\phi, \quad (5)$$

где ϕ, θ – соответственно азимут и угол места; $P(\theta, \phi)$ – пространственное распределение плотности мощности внешних акустических источников помех. Как видно из (5), если направление излучения выбрать таким образом, чтобы в точке ϕ_0, θ_0 наблюдался минимум функции $P(\theta, \phi)$, то это обеспечит минимум мощности помех на выходе антенны.

Рассмотрим особенности реализации алгоритма нахождения оптимального θ_0 , основанного на анализе функции $P_n(\theta_0)$, определяемой (4). Как следует из (3), в системах с адаптивной АР для нахождения зависимости $\vec{W}(\theta_0)$ достаточно только один раз определить корреляционную матрицу \vec{R} , характеризующую помеховую обстановку, и вычислить \vec{R}^{-1} . При использовании ФАР мощность помех также определяется выражением (4), но \vec{W} понимается в смысле (1) а корреляционная матрица \vec{R} для каждого θ_0 здесь также неизменна.

Характер функции $P_n(\theta_0)$ для содаров с ААР и ФАР в различных помеховых условиях и соответствующие особенности реализации алгоритма пространственной адаптации исследовались методом имитационного моделирования работы 6-ти элементной линейной антенной решеткой на ЭВМ.

На рис. 1 представлена зависимость $P_n(\theta_0)$ для ААР, полученная при следующих условиях: $\theta_{\text{п}} = 30^0$; отношение мощности помехи к мощности теплового шума $\frac{P_n}{P_{\text{в}}} = 50$.

Значение множителя μ в формуле (3) полагалось $\mu = 1$. Аналогичная зависимость для неадаптивной решетки представлена на рис. 2. С целью объяснения обратного характера кривых рис.1 и рис.2 представим полученную при моделировании зависимость среднего значения модулей ВВК ААР W_c от направления главного максимума (рис. 3).

Как видно из рис.3, при попадании помехи в главный лепесток ДН ААР значения модулей весовых коэффициентов, вычисляемых в соответствии с (3), значительно уменьшаются и для данных условий W_c в направлении помехи составляет $-78,2$ Дб. С возрастанием уровня помех усиление ААР падает. При увеличении помехи на 40 дб уровень W_c в направлении источника составил $-110,8$ Дб. Это объясняется принятым допущением, что при всех условиях $\mu = 1$.

Для используемого критерия максимума отношения сигнал-шум коэффициент μ в выражении (1) записывается в форме

$$\mu = \frac{\vec{W}^{*T} \cdot \vec{R} \cdot \vec{W}}{\vec{W}^T \cdot \vec{B}^*}. \quad (6)$$

Переписав последнее соотношение в виде

$$\mu = \frac{P_n}{\vec{W}^T \cdot \vec{B}^*}, \quad (7)$$

приходим к выводу, что нормирующий множитель в (3) пропорционален мощности помех на выходе решетки и является функцией θ_0 .

Для выравнивания интегрального усиления ААР в различных направлениях можно использовать нормирование ВВК к текущему значению W_c . Преобразованная подобным образом кривая рис.1 представлена на рис.4. Полученная характеристика $P_n(\theta_0)$ соответствует ожидаемой и пригодна для оценки оптимального направления зондирования.

Для неадаптивной решетки значение W_c представляет собой постоянную величину, не зависящую от θ_0 .

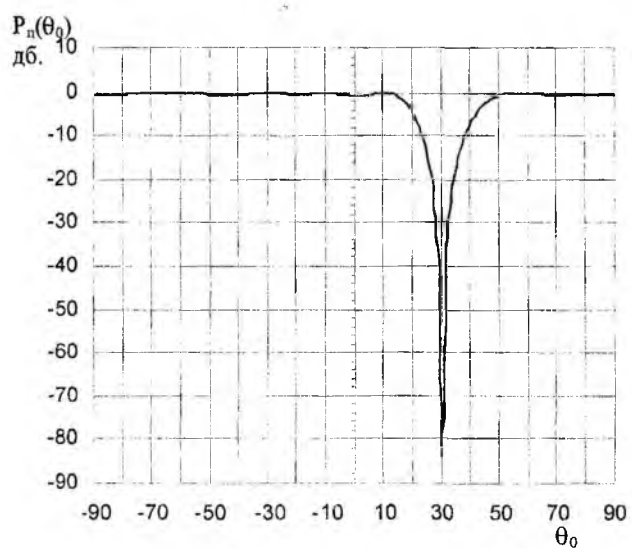


Рис. 1

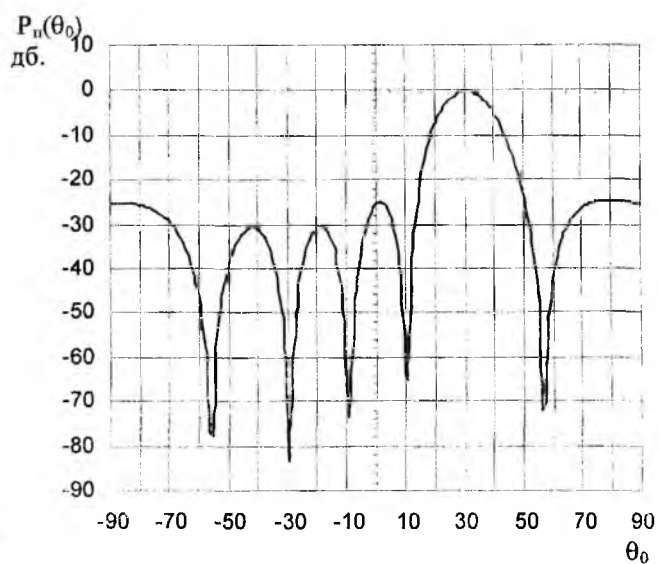


Рис. 2

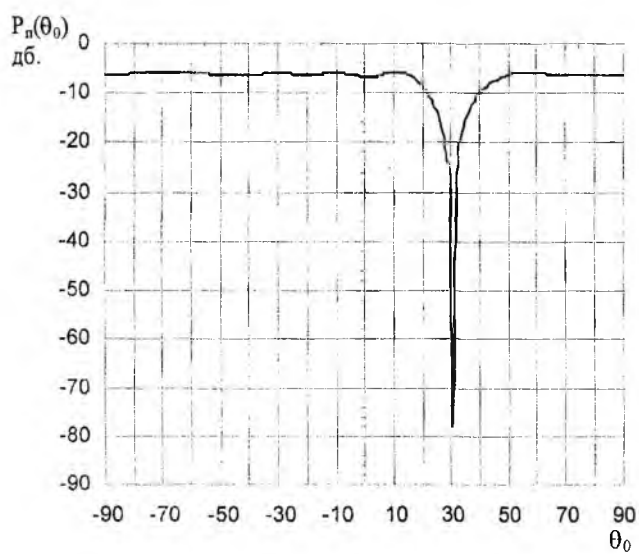


Рис. 3

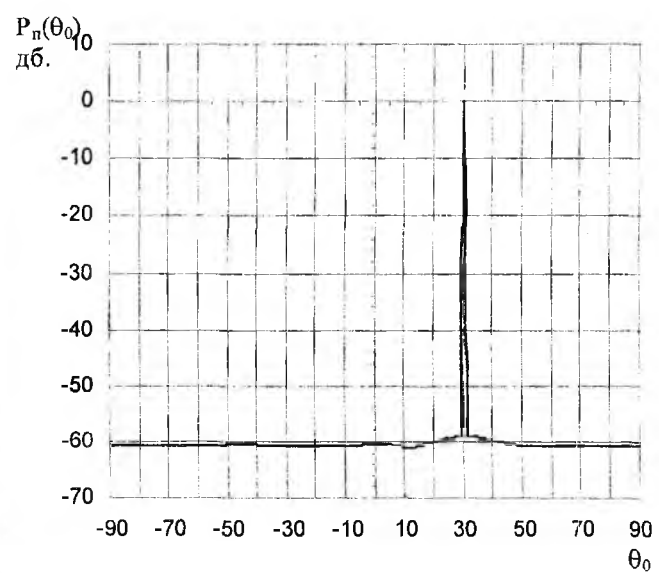


Рис. 4

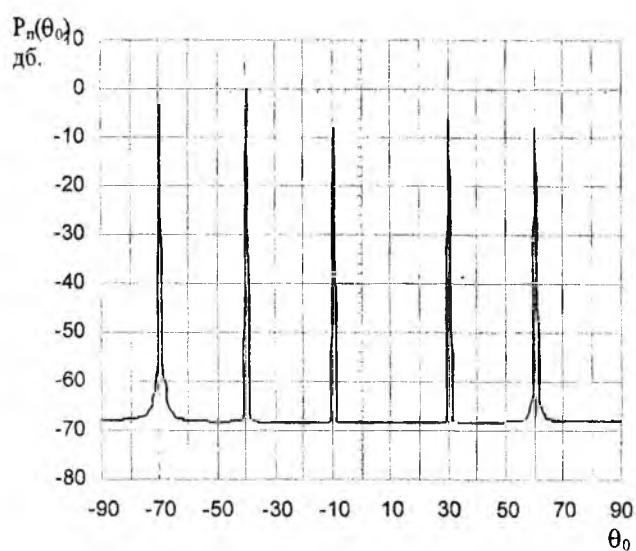


Рис. 5

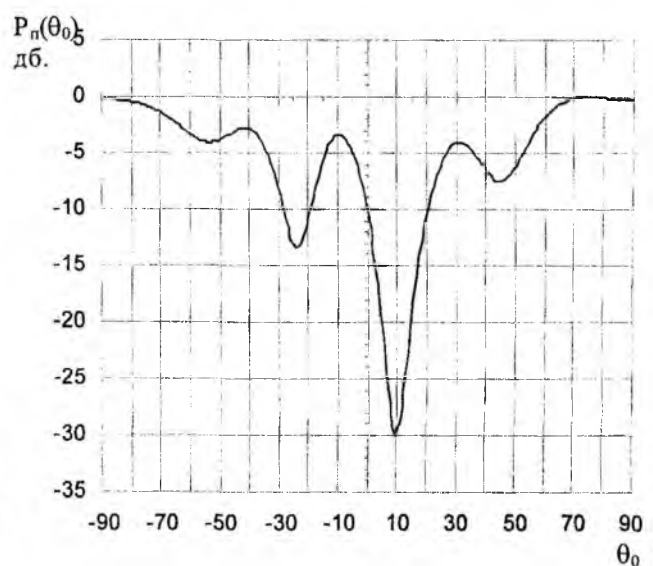


Рис. 6

На рис. 5 и 6 представлены зависимости $P_n(\theta_0)$ для адаптивной и неадаптивной решеток соответственно, полученные при наличии пяти источников помех, характеризующихся следующими параметрами: $\theta_{n1} = -70^\circ, \theta_{n2} = -40^\circ, \theta_{n3} = -10^\circ, \theta_{n4} = 30^\circ, \theta_{n5} = 60^\circ$; отношение мощности помехи к мощности внутреннего шума для каждого источника составляет $\frac{P_n}{P_e} = 50$. Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать следующие выводы.

Для адаптивной АР зависимости $P_n(\theta_0)$ имеют «всплески» на направлениях, соответствующих расположению источников помех. При всех других значениях θ_0 уровни помех на выходе решетки отличаются незначительно. Следовательно, направления зондирования не должны совпадать с углами, на которых расположены помеховые источники. Все другие направления примерно равноценны с точки зрения мощности шумов на выходе ААР.

Для неадаптивной АР, а следовательно, для непрерывных по пространству антенн, характер зависимостей $P_n(\theta_0)$ иной. Функции $P_n(\theta_0)$ имеют явно выраженные глубокие «провалы», которые указывают на значения углов, наиболее подходящие для излучения в этих направлениях зондирующих сигналов.

Запишем выражение для отношения сигнал-шум на выходе адаптивной АР как функцию θ_0 , учитывая, что мощность полезного сигнала составляет

$$P_s = E\{|v_c|^2\} = \bar{W}^{*T} \cdot \bar{R}_s \cdot \bar{W}, \quad (8)$$

где $\bar{R}_s = E\{\bar{S} \cdot \bar{S}^T\} = S \cdot \bar{B} \cdot \bar{B}^T$; S – амплитуда сигнала.

Тогда

$$P_{sn} = \frac{P_s(\theta_0)}{P_n(\theta_0)} = \frac{\bar{W}^{*T}(\theta_0) \cdot \bar{R}_s \cdot \bar{W}(\theta_0)}{\bar{W}^{*T}(\theta_0) \cdot \bar{R}_n \cdot \bar{W}(\theta_0)}. \quad (9)$$

Преобразуем последнее соотношение

$$P_{sn}(\theta_0) = \frac{\mu^2 \cdot S^2 \cdot \bar{B}^T(\theta_0) \cdot \bar{R}^{-1} \cdot \bar{B}^*(\theta_0) \cdot \bar{B}^T(\theta_0) \cdot \bar{R}^{-1} \cdot \bar{B}^*(\theta_0)}{\mu^2 \cdot \bar{B}^T(\theta_0) \cdot \bar{R}^{-1} \cdot \bar{B}^*(\theta_0)} = S^2 \cdot \bar{B}^T(\theta_0) \cdot \bar{R}^{-1} \cdot \bar{B}^*(\theta_0). \quad (10)$$

Полученное выражение достаточно конструктивно с точки зрения его использования в процессе оценивания θ_0 . Определение оптимальных направлений зондирования для содаров, оснащенных ААР, с использованием соотношения (10) на практике достигается более просто, чем при использовании (4). В качестве направления зондирования в этом случае следует выбирать значения углов, при которых функция $P_{sn}(\theta_0)$ достигает максимальных значений.

Заметим, что зависимости $P_n(\theta_0)$ и $P_{sn}(\theta_0)$, полученные для ААР, представляют собой различные формы оценок пространственного спектра корреляционной матрицы \bar{R} , а рассмотренные методы формирования данных зависимостей относятся к методам сверхразрешения, реализуемым при использовании адаптивных решеток [5].

Таким образом, при измерении полного вектора скорости ветра акустическими локаторами по методике 3-х или 5-ти зондирований каждое из направлений излучения сигнала следует выбирать на основе анализа функций $P_n(\theta_0)$ или $P_{sn}(\theta_0)$, характеризующих помеховую обстановку в месте и в период выполнения измерений.

Список литературы: 1. Applebaum S.P. Adaptiv Arrays. IEEE Transactions on Antennas and Propagations. V. AP-24, №5. 1976. Pp.585-598. 2. Гейбриел У.Ф. Введение в теорию адаптивных антенных решеток. ТИИЭР. 1976. Т.64, №2. С. 55-95. 3. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с. 4. Журавлёв А.К. Лукошкишкин А.П., Поддубный С.С. Обработка сигналов в адаптивных антенных решётках. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. 239с. 5. Гейбриел У.Ф. Спектральный анализ и методы сверхразрешения с использованием адаптивных антенных решёток. ТИИЭР .1980. Т. 68, №6. С 19-32.