

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, И.В. КОРЫТЦЕВ, канд. техн. наук,
В.Н. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук, О.В. ЗУБКОВ, канд. техн. наук,
С.И. БАБКИН, канд. техн. наук, С.А. ШЕЙКО, канд. техн. наук,
Н.А. ЛЕВСКИЙ, И.С. СЕЛЕЗНЕВ*

АЛГОРИТМЫ ПЕЛЕНГАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО ИХ АКУСТИЧЕСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) получили широкое распространение и применение во многих областях человеческой деятельности. Они могут выполнять набор полезных функций, но при этом могут нести значительную физическую или информационную угрозу в военной области, хозяйственной деятельности, частной жизни людей [1 – 4].

БПЛА успешно применяют для доставки почты и различных грузов. С их помощью производят аэрофотосъемку поверхности, которая позволяет выявлять нарушения технического состояния объектов, составлять карты грунтов, оценивать степень вырубki лесных массивов и т. п. Военные используют БПЛА для выполнения таких задач, как разведка местности, ретрансляция сигналов, целеуказание артиллерии, постановка помех радиосредствам противника и др.

В то же время появление и развитие беспилотных летательных аппаратов значительно расширило возможности правонарушителей и организованных групп в области терроризма, организованной преступности, транспортировки и распространения наркотиков, контрабанды, слежения за отдельными лицами и организациями, несанкционированным мониторингом объектов и территорий государственного значения (АЭС, закрытых предприятий) [1, 2]. Значительные проблемы порождает неадекватное поведение некоторых владельцев БПЛА, что приводит, например, к угрозам воздушному транспорту в районах аэропортов (может привести к столкновению БПЛА с самолетами гражданской авиации при взлете и посадке), другим видам транспорта, известны случаи психических расстройств, вызванных полетами БПЛА.

Специфические свойства и преимущества БПЛА – относительно невысокая стоимость, разнообразие выполняемых функций, высокая оперативность подготовки к применению, экономичность и простота в эксплуатации, трудности контроля приводят к повышению безнаказанности и массовости противоправных действий с их использованием. Актуальной в соответствии с этим является задача получения достаточно полной оперативной информации о БПЛА с помощью специальных технических средств и обеспечения высокой скорости и эффективности адекватных действий на возникающие и существующие вызовы и угрозы с их использованием [1, 2].

Современные малые БПЛА имеют низкий уровень заметности: они изготавливаются из композитных материалов, имеют малую эффективную поверхность рассеяния (ЭПР) в радиодиапазоне, их двигатели не нагреваются до высокой температуры и излучают мало тепла, поэтому актуальным является направление по использованию их собственного акустического шума [2, 4]. В соответствии с этим возникают задачи обнаружения, оценки координат и параметров движения (в частности оценки угловых координат – пеленга), а также распознавания класса БПЛА по их акустическому излучению.

Классические методы пеленгации

При определении угловых координат источников акустического излучения (ИАИ) направление прихода сигнала отождествляется пеленгатором с направлением нормали к фронту волны, созданной источником излучения [5]. В общем случае различие между классическими методами определения угловых координат объектов заключается в технических особенностях определения ориентации искомой нормали.

Наиболее распространены два основных способа определения пеленга: амплитудный и фазовый [5]. Амплитудный заключается в анализе распределения поля, создаваемого пеленгуемым источником излучения, в раскрыве приемной антенны: при этом уровень сигнала будет максимален в том случае, когда раскрыв антенны параллелен фронту приходящей волны.

Выделяют три основные разновидности амплитудного метода [5, 6]:

- максимума;
- минимума;
- сравнения или равносигнального направления.

При пеленговании методом максимума изменяется пространственное положение диаграммы направленности антенны (ДНА) и направление на ИАИ совпадает с направлением, соответствующим максимальному значению сигнала. Точность пеленгации при этом определяется крутизной ДНА в окрестностях максимума и составляет десятки процентов от ширины ДНА по уровню половинной мощности [2].

В методе минимума применяется ДНА с ярко выраженным минимумом приема. Преимущество метода в более высокой точности измерения координат ИАИ по сравнению со способом максимума, но дальность действия таких пеленгаторов существенно меньше. При равносигнальном методе пеленг определяется сравнением сигналов, принимаемых лепестками двух ДНА. Данный метод в определенной мере позволяет устранить недостатки пеленгации по минимуму и максимуму сигнала.

Фазовый метод пеленгования основан на использовании зависимости разности фаз сигналов, принимаемых двумя одинаковыми антеннами, которые разнесены в пространстве на некоторое расстояние. Метод широко используется на практике в различных модификациях.

Широкое распространение получили доплеровские пеленгаторы [5, 6]. В этом случае вывод о направлении на ИИ делается на основании характера изменения доплеровского сдвига частоты сигнала, принимаемого движущейся пеленгационной системой (или антенной системой с коммутируемыми элементами).

В литературе обсуждаются возможности классических методов для пеленгования БПЛА по их акустическому излучению [7]. Однако при попадании в ДНА нескольких объектов появляются аномальные ошибки оценки пеленга, поскольку амплитудно-фазовое распределение акустического поля в раскрыве антенны будет представлять собой суперпозицию нескольких волн. Из-за малых размеров апертуры антенной системы разделение источников акустического излучения в этом случае оказывается практически невозможным.

Значительные возможности по обнаружению и измерению координат БПЛА открываются при использовании многоэлементных акустических антенных решеток (АР). Такая система имеет преимущества перед системой с одноэлементной антенной, так как позволяет осуществлять автоматическую подстройку характеристик в соответствии с изменяющимися условиями приема сигнала [8].

Адаптивная антенная решетка (ААР) – это система, состоящая из многоэлементной АР и адаптивного процессора, который подстраивает весовые коэффициенты в диаграммообразующей схеме. Характеристики элементов и порядок их расположения накладывают основные ограничения на результирующие свойства системы [8, 9].

Для линейной антенной решетки, состоящей из N элементов и принимающей сигналы от M источников излучения с известными углами прихода, выходной сигнал будет иметь вид [8]

$$\vec{x}(t) = \sum_{m=1}^M \vec{S}(\theta_m) \cdot S_m(t) + \vec{n}(t), \quad (1)$$

где $\vec{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t)]$ – вектор сигналов, на выходе элементов ААР; $\vec{S}(\theta_m) = [e^{-j\psi_1(\theta_m)}, e^{-j\psi_2(\theta_m)}, \dots, e^{-j\psi_n(\theta_m)}]$ – направляющий вектор, элементы которого определяются фазовыми набегами m -го сигнала на n -й антенный элемент; $S_m(t)$ – сигнал

m -го ИИ; $\vec{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), n_N(t)]$ – вектор шумов, включающий в себя пространственный шум и шум приемника.

Задача пеленга и углового разрешения сводится к определению координат θ_i ИАИ, а также их количества M [9, 10].

Методы, которыми определяется направление прихода сигналов с использованием ААР, делят на классические и методы сверхразрешения [11, 12]. Основное достоинство таких алгоритмов состоит в том, что они позволяют определять количество и угловые координаты ИАИ, не прибегая к перемещению ДНА, а используя лишь алгоритмические способы обработки принимаемых сигналов. Кроме того, современные спектральные методы являются адаптивными к входным данным. Как правило, в качестве исходных данных в них используется корреляционная матрица сигналов, принимаемых АР [12].

Стандартный (классический) метод формирования диаграммы направленности также называется методом обработки с вводом относительных временных задержек и суммированием – так называемый метод Бартлетта. Его суть заключается в сканировании интересующего углового сектора, а направление с наибольшей отдаваемой мощностью соответствует оценке направления прихода полезного сигнала [9].

При использовании данного метода пространственный спектр формируется с использованием выражения [11]

$$P(\theta) = \frac{S(\theta)R_{xx}S^T(\theta)}{S(\theta)S^T(\theta)}, \quad (2)$$

где $S(\theta)$ – вектор отклика антенной решетки; R_{xx} – пространственная корреляционная матрица размером N на N элементов.

Истинной оценкой направления прихода сигнала является угол θ , соответствующий пиковому значению спектра выходной мощности решетки [12].

Этот метод принято считать методом Фурье, так как он представляет собой естественное расширение классического спектрального анализа. Решетка из нескольких элементов неспособна к формированию острых пиков и, следовательно, неспособна различить близко расположенные источники сигналов. Метод Бартлетта не может различить ИАИ, если разнесение фазы излучаемых ими колебаний менее чем $\frac{2\pi}{N}$. Плохое разрешение – существенный недостаток данного метода [10].

Метод основан на сканировании лучом АР в пространстве и определении максимума уровня излучения. Низкая разрешающая способность определяется шириной основного луча АР и уровней боковых лепестков. Разрешающая способность зависит от ширины основного луча АР и связана с ограничением релейского разрешения. Недостаток может быть смягчен увеличением количества элементов АР. Увеличение соотношения сигнал/шум или увеличение времени наблюдения не изменяют разрешения.

Современные методы и алгоритмы со сверхразрешением, реализуемые с использованием адаптивных антенных решеток, позволяют определять координаты нескольких ИАИ, разнесенных на достаточно малое угловое расстояние, при условии, что отношение сигнал/шум велико, а отклонение амплитудно-фазового распределения в раскрытие реальной антенной системы от модельного пренебрежимо мало [12].

На рис. 1 приведены результаты выполнения задачи пеленгования с использованием классического метода (метод Бартлетта) и метода сверхразрешения (метод Кейпона). Результаты получены для одинаковых условий моделирования: используется антенная решетка из восьми элементов, направления прихода полезного сигнала 30 и 40 градусов.

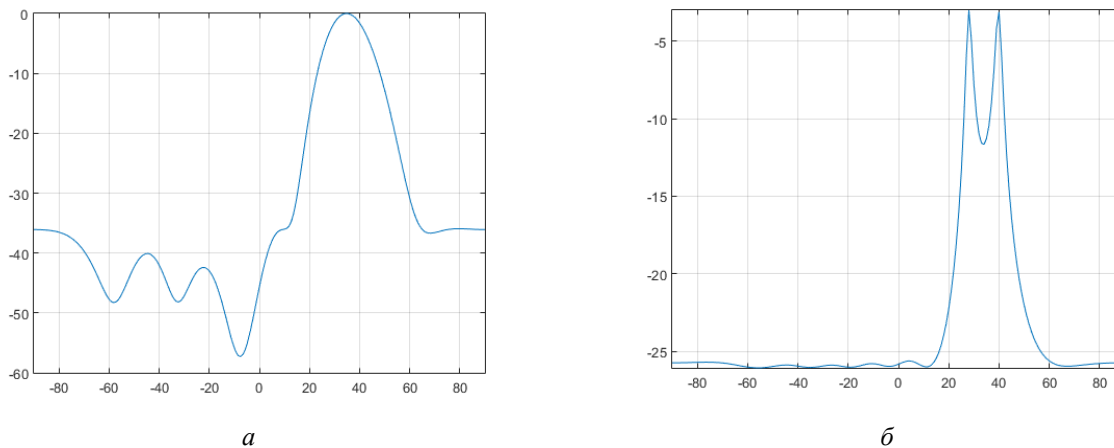


Рис. 1. Пространственные спектры для оценки направлений источников сигналов, полученные с использованием метода Бартлетта (а) и Кейпона (б)

Таким образом, методы нелинейного спектрального анализа, или методы сверхразрешения, обеспечивают, в сравнении с классическими, значительно лучшее угловое разрешение и точность пеленгования.

Сверхразрешающие методы пеленгации

В литературе рассматриваются различные классификации методов сверхразрешения: последовательные и параллельные, спектральные и параметрические и др. [13 – 16]. На наш взгляд, методы сверхразрешения для задач пеленгования могут быть классифицированы следующим образом:

- алгоритмы линейного предсказания;
- последовательные алгоритмы (алгоритмы типа Кейпона и методы, основанные на разложении пространственной корреляционной матрицы R_{xx} по собственным векторам – метод MUSIC, EV (eigenvector));
- параллельные алгоритмы, в том числе проекционные алгоритмы, или алгоритмы, основанные на разделении сигнального и шумового пространств. К их числу относятся методы ROOT-MUSIC и ESPRIT, ориентированные на использование линейных эквивалентных АР;
- алгоритмы, основанные на согласовании (подборе) параметрических моделей сигналов.

Среди алгоритмов первой группы наиболее распространен алгоритм максимума энтропии или алгоритм подбора параметров авторегрессионной модели, который позволяет получить пространственный спектр с использованием выражения [15]:

$$P(\theta) = \frac{R_{11}^{-1}}{|S^T(\theta)R_1^{-1}|^2}, \quad (3)$$

где R_1^{-1} – первый столбец обратной корреляционной матрицы R_{xx} , R_{11}^{-1} – первый элемент первого столбца той же матрицы, $S^T(\theta)$ – опорный вектор или вектор-гипотеза.

Алгоритмы линейного предсказания вначале были развиты применительно к анализу временных рядов [12] и применялись для получения временных спектров. Поэтому их наиболее часто применяют в задачах пеленгования при использовании линейной эквидистантной антенной решеткой (ЛЭАР) с равномерным амплитудным распределением. В то же время они могут быть применены и в нерегулярных линейных АР.

Наиболее сложным на практике является оценка адекватного порядка авторегрессионной модели [12] – размерности фильтра, или размерности вектора R_1^{-1} в выражении (3). При короткой характеристике фильтра параметрический спектр получается гладким, но характеризуется плохим угловым разрешением. Чрезмерная размерность фильтра предсказания по-

зволяет получить хорошее пространственное разрешение, но обеспечивает формирование чрезмерно флуктуирующего пространственного спектра со значительными уровнями боковых лепестков случайного характера.

В последовательных алгоритмах (к их числу относятся метод Кейпона, метод классификации множественных сигналов (MUSIC), метод «собственных» векторов (EV), метод теплового шума, метод Борджоти – Лагунаса) выполняется последовательный пространственный анализ или сканирование по пространству [17, 18]. В этом случае выходное напряжение формируется в виде непрерывной функции угловой координаты; никаких дополнительных априорных предположений о количестве излучающих объектов не делается, предполагается лишь, что их сигналы не коррелированы между собой [18].

С помощью этих методов направления на объекты излучения оцениваются по получаемым максимумам выходной функции (пеленгационному рельефу). В качестве выходной функции используется зависимость мощности выходного сигнала AP от направления, на которое настраивается система обработки сигналов. Оценка мощности получаемых сигналов выполняется по максимумам выходной величины.

Рассматриваемые алгоритмы оценки направления прихода сигнала обеспечивают несколько важных преимуществ. Расчет пространственного спектра мощности (энергетического спектра) для одного диапазона углов θ не мешает использовать алгоритм для последующего расчета спектра для другого диапазона углов θ с использованием тех же данных. Пространственные характеристики объектов по всем направлениям компактно выражаются через корреляционную матрицу, которая рассчитывается только один раз. Таким образом, методы характеризуются отсутствием временных провалов чувствительности, в течение которых переходные сигналы могут появляться случайным образом и в связи с этим оказаться недетектируемыми. Другое преимущество заключается в том, что при электронном, а не механическом управлении ДН скорость сканирования заданной области пространства ограничивается скоростью вычислений, а не механической скоростью [18].

Таким образом, угловые координаты объектов излучения при последовательном обзоре пространства находятся математическим сканированием с помощью опорного пространственного сигнала и последующего отыскания положения максимумов. Определенным недостатком этих методов является относительно низкий темп обзора. Кроме того, пеленгация, основанная на оценке пространственного спектра излучения, сопровождается смещением угловых оценок при наличии временной корреляции между сигналами объектов излучения в точках приема. Для устранения этого недостатка приходится усложнять алгоритмы обработки сигналов [16].

Основоположником теории квазистатического сверхразрешения принято считать Кейпона. Пространственный спектр Кейпона рассчитывается в соответствии с выражением [11]

$$P(\theta) = \frac{1}{S(\theta)R_{xx}^{-1}S^T(\theta)}. \quad (4)$$

Оценкой истинного направления прихода сигнала является угол, который соответствует пиковому значению этого спектра. В сравнении со стандартным методом формирования луча метод Кейпона, характеризующийся в большинстве случаев более высоким разрешением, требует лишь дополнительного обращения матрицы.

Метод применим к AP любой конфигурации (одно-, двух-, трехмерным, регулярным и нерегулярным AP). Требуется значительное количество обучающих выборок (вдвое больше, чем число элементов решетки), что увеличивает объем вычислительных операций. Отмечается слабая эффективность метода при малых объемах выборки, а также для сильно коррелированных источников [12].

Если в выражении (4) вместо первой степени обратной корреляционной матрицы использовать ее квадрат, то получится алгоритм теплового шума [11]:

$$P(\theta) = \frac{1}{S(\theta)R_{xx}^{-2}S^T(\theta)}, \quad (5)$$

применение которого в идеальном случае (без учета технических характеристик и погрешностей аппаратуры) обеспечивает более высокую разрешающую способность, чем алгоритм Кейпона.

К этой же группе относят и «алгоритм адаптивного углового отклика», или алгоритм отношения Релея [14]:

$$P(\theta) = \frac{S(\theta)R_{xx}^{-1}S^T(\theta)}{S(\theta)R_{xx}^{-2}S^T(\theta)}, \quad (6)$$

фактически нормирующий отношение сигнал/(помеха + шум) на выходе ААР мощностью теплового шума.

Метод MUSIC применим к решеткам с произвольной, но заранее известной конфигурацией и откликом, а также для оценки нескольких параметров на источник (азимута, угла места, поляризации и т.д.). Однако за расширенную применимость приходится платить необходимостью знать отклик решетки на все возможные комбинации параметров источника. Кроме того, при использовании метода MUSIC необходимо априорное знание пространственной статистики второго порядка для полей фонового шума и помех [16].

Алгоритм MUSIC разработан Шмидтом и основан на разделении пространства на сигнальное и шумовое подпространства. Корреляционная матрица сигналов и шумов представляется в виде суммы [15]

$$R_{xx} = U_s \Lambda_s U_s^T + U_n \Lambda_n U_n^T, \quad (7)$$

где Λ_s и Λ_n – диагональные матрицы собственных значений сигналов и шумов соответственно, а U_s и U_n – матрицы собственных векторов, соответствующих собственным значениям. Проекция подпространств сигналов и помех можно выразить матрицей направлений в виде [16]:

$$\Pi = U_s U_s^T = S(\theta)(S^T(\theta)S(\theta))^{-1}S^T(\theta), \quad (8)$$

$$\Pi^\perp = U_n U_n^T = I - S(\theta)(S^T(\theta)S(\theta))^{-1}S^T(\theta), \quad (9)$$

где Π содержит информацию о всех возможных направлениях источников сигналов, а Π^\perp – информацию об источниках помех. Пространственный спектр на основе алгоритма MUSIC определяется уравнением

$$P(\theta) = \frac{S^T(\theta)S(\theta)}{S^T(\theta)\Pi^\perp S(\theta)}. \quad (10)$$

На рис. 2 приведены результаты моделирования алгоритма MUSIC для АР из восьми элементов и направлений прихода полезного сигнала 30 и 40 градусов.

Алгоритм MUSIC, так же как и алгоритм Кейпона, применим к антенным решеткам любой конфигурации, но потенциально превосходит алгоритм Кейпона по разрешающей способности [12], чем и объясняется повышенный интерес к нему со стороны многих исследователей. Недостатками алгоритма MUSIC являются необходимость предварительной оценки размерности сигнального (или шумового) подпространства, а также сравнительно большая вычислительная сложность, что определяется необходимостью сингулярного разложения ковариационной матрицы выходов элементов АР. Критичен к неопределенностям параметров математической модели и к величине соотношения сигнал/шум, когда источники излучения расположены достаточно близко друг к другу. Метод не дает положительных ре-

зультатов для коррелированных источников сигналов. Root-MUSIC позволяет осуществлять пеленгацию когерентных сигналов [14, 15].

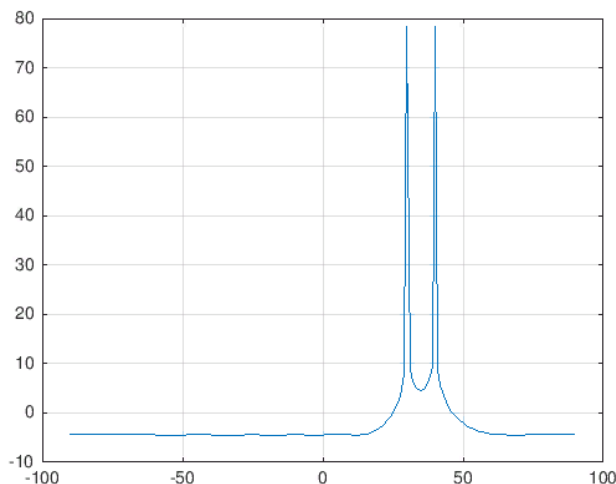


Рис. 2. Пространственный спектр для оценки направлений источников сигналов, полученных методом MUSIC

Если размерность шумового подпространства равна единице, а антенная решетка – линейная и эквидистантная, то алгоритм MUSIC эквивалентен алгоритму Писаренко [12].

В случае ЛЭАР проекционные алгоритмы могут быть также сведены к так называемой алгебраической форме, при которой пеленги источников сигналов определяются не экстремумами пеленгационного рельефа, а аргументами комплекснозначных корней некоторых полиномов. К таким решениям приводят, в частности, алгоритмы Редди и Кумаресана – Тафтса [10], а в качестве полинома выступает знаменатель выражений типа (10), но с представлением шумового подпространства одним единственным вектором (9).

К параллельным методам обзора пространства относятся методы ROOT-MUSIC, Писаренко, поворота подпространства (ESPRIT), Прони и др.

Методы ROOT-MUSIC и Писаренко, как и метод MUSIC, основаны на использовании информации, содержащейся в системе собственных векторов корреляционной матрицы сигналов AP, но при этом определяется не спектр мощности, а корни некоторых полиномов. При этом предполагается, что число M объектов излучения меньше числа N приемных каналов AP, а корреляционная матрица аддитивного шума имеет вид $\sigma_w^2 I$, где σ_w^2 – дисперсия шума, а I – единичная матрица [12].

Подпространство источников излучения рассматривается как подпространство, натянутое на собственные векторы, соответствующие M наибольшим собственным значениям, т.е. как и в случае отсутствия шума, а ортогональное подпространство, или подпространство шума, – как натянутое на остальные собственные векторы.

В методе ROOT-MUSIC для нахождения угловых координат объектов излучения используется ортогональность собственных сигнальных и шумовых векторов. Метод позволяет в рамках одной вычислительной процедуры находить углы прихода сигналов всех источников, попадающих в поле наблюдения антенной решетки.

Метод Прони [17] основан на отыскании корней полинома, коэффициенты которого определяются из системы уравнений, связывающей входные данные с экспоненциальной моделью.

В методе ESPRIT [17] угловые координаты источников определяются по результатам нахождения обобщенных собственных значений регулярного пучка из корреляционных матриц. Метод построен с учетом того, что вектор, определяющий направление прихода m -го сигнала, имеет один и тот же сдвиг на каждом элементе AP.

ESPRIT – вычислительно эффективный и надежный метод оценки направления прихода сигнала. Алгоритм базируется на том, что вектор отклика AAP, определяющий направление

прихода m -го сигнала, имеет один и тот же сдвиг на каждом элементе. Например, линейная антенная решетка из четырех одинаковых элементов с интервалом d между ними может быть рассмотрена как два массива из трех соответствующих пар: одна из первых трех элементов и одна с тремя последними элементами так, что первый и второй элементы образуют одну пару, второй и третий элементы образуют другую пару, и так далее [13].

Сигналы, наводимые на k -ю пару элементов источником с направления θ , обозначим через $x_k(t)$ и $y_k(t)$ [17]:

$$y_k(t) = x_k(t) \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} d \cos(\theta)). \quad (11)$$

Пусть имеются k массивов смещенных пар сигналов $x(t)$ и $y(t)$:

$$x(t) = AS(t) + n_x(t), \quad (12)$$

$$y(t) = A\Phi S(t) + n_y(t), \quad (13)$$

где A – матрица размерностью $K \times M$, столбцами которой являются M векторов направления, относящегося к M источникам; Φ – диагональная матрица с диагональными элементами $\varphi_{mm} = e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d \cos(\theta_m)}$; $S(t)$ – матрица M источников сигналов; $n_x(t)$ и $n_y(t)$ – матрицы шумов; $A\Phi$ – вектор поворота.

Собственные векторы U_x и U_y корреляционных матриц R_{xx} и R_{yy} сигналов $x(t)$ и $y(t)$ и собственные значения φ связаны соотношением

$$U_x \varphi = U_y. \quad (14)$$

Это уравнение определяет собственные значения φ , которые, в свою очередь, определяют направления источников сигналов:

$$\theta_i = \arccos \left\{ \frac{\text{Arg}(\varphi_m)}{\frac{2\pi d}{\lambda}} \right\}, m = 1, \dots, M. \quad (15)$$

Результаты моделирования показывают, что точность определения угловых координат источников излучения спектральными методами ROOT-MUSIC и ESPRIT примерно совпадает с точностью классического метода MUSIC. Разрешающая способность методов спектрального оценивания ROOT-MUSIC и ESPRIT превосходит в 1,5-2 раза разрешающую способность распространенного на практике MUSIC. Метод ROOT-MUSIC превосходит по точности метод ESPRIT примерно на 10 % [17].

Класс алгоритмов, основанный на согласовании (подборе) моделей полезных сигналов, предполагает задание модели пространственно-временного сигнала с определенным набором его параметров (направления прихода, поляризации, амплитуды, фазы волны) и дальнейшую «подгонку» значений этих параметров по критерию наилучшего согласования в некотором смысле с получаемыми результатами измерений [12]. Алгоритмы этого класса характеризуются значительным объемом и сложностью производимых вычислений, которые незначительно изменяются для различных вариантов поиска экстремума целевой функции.

Выводы

1. Возможности использования классических методов для пеленгования БПЛА по их акустическому излучению в значительной степени ограничены тем, что пеленгование возможно только при наличии в диаграмме направленности системы лишь одного объекта. Если в ДНА присутствует несколько объектов, то это приводит к появлению аномальных ошибок

при оценке пеленга, поскольку амплитудно-фазовое распределение акустического поля в раскрытой антенне будет представлять собой суперпозицию нескольких волн. В силу малых размеров апертуры антенной системы разделение ИАИ в этом случае затруднительно.

2. Классический неадаптивный метод Бартлетта является наиболее простым с точки зрения его реализации в практике пеленгации БПЛА с использованием АР, однако он имеет существенный недостаток – его пространственное угловое разрешение ограничено релеевским пределом. Повышение пространственного разрешения возможно только увеличением количества элементов АР, а увеличение времени наблюдения или отношения сигнал/помеха практически не влияет на характеристики разрешения.

3. Характеристики пространственного разрешения источников излучения методом сверхразрешения Кэйпона при использовании АР существенно превосходят характеристики классического метода Бартлетта, поскольку он использует дополнительные степени свободы для концентрации полученной энергии вдоль направления пеленга объекта. При этом уменьшается спектральное рассеяние от близко расположенных источников излучения, а разрешающая способность по методу Кэйпона зависит от соотношения сигнал/помеха и от числа элементов АР.

4. В практике пеленгования наиболее часто среди сверхразрешающих [17, 18] используются методы MUSIC (а также его разновидность ROOT-MUSIC) и ESPRIT. При этом разрешающая способность методов ROOT-MUSIC и ESPRIT превосходит примерно в два раза разрешающую способность метода MUSIC, однако методы параллельного анализа требуют значительных вычислительных затрат. Большинство известных методов пеленгования получены эвристическим путем, а основным методом исследования их характеристик и возможностей является метод статистического компьютерного моделирования.

5. Недостатком большинства методов сверхразрешения является необходимость формирования выборочных корреляционных матриц, а также необходимость выполнения сингулярного разложения или разложения по собственным векторам полученных матриц. В условиях быстро меняющейся динамической обстановки, особенно при пеленговании малых БПЛА, это условие накладывает достаточно жесткие ограничения на временные и вычислительные ресурсы локационной АС.

6. Большинство известных алгоритмов [18] предполагают функционирование в условиях стационарного гауссовского шума. В соответствии с этим встает вопрос обеспечения работоспособности алгоритмов пеленгования БПЛА при воздействии нестационарных акустических шумов.

7. В настоящее время не представляется возможным выделить среди алгоритмов оценивания пространственных спектров и пеленгования один единственный, который превосходит все известные методы в различных условиях функционирования. Выбор метода для задачи пеленгования БПЛА при разработке локационной АС должен осуществляться с учетом наличия априорной информации об исследуемых объектах, имеющейся сигнально-помеховой обстановке, а также с учетом конфигурации АР, ее геометрических параметров и количества элементов.

Список литературы:

1. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. Москва : Стратегические приоритеты, 2016. 676 с.
2. Kartashov V.M., Oleynikov V.N., Sheiko S.A., Koryttsev I.V., Babkin S.I., Zubkov O.V., Anokhin M.A. Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2018. Vol. 77, №10. P.915-924.
3. Semenets V.V., Kartashov V.M., Leonidov V.I. Registration of refraction Phenomenon in the Problem of acoustic Sounding of Atmosphere in Airport Zone // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2018. Vol. 77, №5. P.461-468.
4. Kartashov V.M., Tikhonov V.A., Voronin V.V. Features of construction and application of complex systems for the atmosphere remote sounding // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2017. Vol. 76, №8. P.743-749.
5. Ситнік О.В. Радіотехнічні системи : навч. посіб / О.В. Ситнік, В.М. Карташов. – Харків : Компанія СМІТ, 2009.

6. Kartashov V.M., Tikhonov V.A., Voronin V.V. and Tymoshenko L.P. Complex model of random signal in problems of acoustic sounding of atmosphere // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2016. Vol. 75, №20. P.1885-1892.
7. Гордієнко Ю.А., Бугайов М.В., Солонець О.І., Солопій І.А. Особливості акустичних сигналів // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2016. № 1(22). С. 32-35.
8. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию ; пер. с англ. Москва : Радио и связь, 1986. 448 с.
9. Баланис Константин А., Иоанидес Панайотис И. Введение в смарт-антенны. Москва : Техносфера, 2012. 200 с.
10. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis // Proceedings of the IEEE. Vol. 57, No. 8. P. 1408-1418.
11. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. Москва : Радио и связь, 1989. 440 с.
12. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Москва : Мир, 1990. 584 с.
13. Москалец Н.В. Сравнительная оценка методов определения направления прихода сигналов на основе выборочной корреляционной матрицы // Вісник Нац. техн ін-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. №16 (1238). С. 53-61.
14. Сафонова А.В. Эффективность алгоритма оценивания угловых координат источника радиосигнала при различных методах обработки входных реализаций // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. №2. С. 54-60.
15. Петров В.П., Шауэрман А.К. Спектральные способы оценки направления источников сигналов в адаптивных антенных решетках // Вестник СибГУТИ. 2011. №2. С. 53-62.
16. Косяков В.М., Свиридов М.А. Сравнительная оценка методов спектрального анализа по совокупности показателей эффективности // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. № 4. С. 23-27.
17. Макаров Е.С. Анализ углового сверхразрешения источников электромагнитного поля в многоканальных системах с малой апертурой. Воронеж, 2009. 167 с.
18. Sytnik O.V., Kartashov V.M., Suprun A.A. Spatial Selection of Wide-Band Sources by Covariance Matrix Eigenvalues // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2014. Vol. 73, №9. P.793-801.
19. Kartashov Vladimir, Oleynikov Vladimir, Koryttsev Igor, Zubkov Oleh, Babkin Stanislav and Sheiko Sergiy. Processing and Recognition of Small Unmanned Vehicles Sound Signals [Электронный ресурс]. 2018 International Scientific-Practical Conference. 1 FLASH.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 07.02.2019