

УДК 621.396

МЕТОД ОЦЕНКИ ЧИСЛА ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ АМПЛИТУДНОЙ МОНОИМПУЛЬСНОЙ ПЕЛЕНГАЦИИ

А. А. Логинов, О. А. Морозов, М. Ю. Семенова, В. Р. Фидельман

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В работе предлагается алгоритм обработки сигналов, принятых многоканальной амплитудной моноимпульсной системой пеленгации, который позволяет оценить число источников излучения в рабочей области пространства. Решение о числе источников принимается на основе порогового метода. Значение порога определяется по критерию минимума суммы условных вероятностей ошибки.

ВВЕДЕНИЕ

Алгоритмы моноимпульсной пеленгации применяются в задачах с жёсткими требованиями к скорости и повышенной точности получения информации об угловых координатах объекта [1]. Основное ограничение данных методов состоит в том, что многолучёвое распространение или наличие двух и более источников радиоизлучения с близкими мощностями в рабочей области антенной системы приводит к появлению аномальных ошибок в случае применения систем моноимпульсной пассивной локации, использующих классические методы оценки угловых координат источников.

В моноимпульсной системе с фазированной антенной решёткой для работы с несколькими объектами традиционно осуществляется переключение с одних приёмных каналов на другие для каждого излучаемого импульса [2]. При переключении формируются такие диаграммы направленности, что в каждый момент в рабочей области моноимпульсной антенной системы находится только один источник, а за счёт выбора оптимального весового вектора адаптивной антенной решётки обеспечивается максимальное отношение сигнал/шум на её выходе [3]. В ряде практических задач в силу малости апертуры антенной системы создание требуемой для разделения источников радиоизлучения диаграммы направленности невозможно, и для определения числа источников в адаптивных антенных решётках применяются различные методы. Например, в [4] предлагается пороговая обработка на основе оценки степени минимального многочлена корреляционной матрицы выходного процесса.

Для моноимпульсных систем, не использующих адаптацию диаграммы направленности каналов приёма, в настоящее время актуальна проблема исключения аномальных ошибок при приёме сигнала от нескольких источников [5–8]. В работах [5, 6] предложены методики определения угловых координат двух объектов для систем с нестандартными конфигурациями (например, приёмной системы из пяти антенн с разными диаграммами направленности), которые пеленгуют два объекта по результатам приёма одного импульса. В работе [6] предлагается алгоритм определения угловых координат для любого априорно известного количества источников по данным, принимаемым многоканальной моноимпульсной антенной системой. Система уравнений пеленгации упрощается путём разложения функций, аппроксимирующих диаграмму направленности приёмных каналов, в ряд Тейлора вблизи равносигнального направления (сигналы, приходящие с равносигнального направления и принимаемые различными каналами, имеют одинаковые амплитуды). Максимальная степень в разложении и число приёмных каналов антенной системы, необходимых для однозначного решения системы уравнений пеленгации, зависят от предполагаемого числа источников.

В работах [7, 8] проблема исключения аномальных ошибок пеленгации решается введением критериев наличия сигнала от одного или более «мешающих» источников. В зависимости от приложения такие критерии могут быть использованы для определения низкой степени доверия к оценённому направлению прихода сигнала или для исключения измерения пеленга из последующей обработки, например, в алгоритмах слежения [7].

В данной работе представлен алгоритм определения числа источников радиоизлучения в рабочей области многоэлементной моноимпульсной антенной системы, основанный на критерии минимума среднего квадрата ошибки [9]. В алгоритме проводится последовательный поиск координат источников для всех возможных значений количества источников с последующим сравнением ошибок решения системы уравнений пеленгации с пороговым значением. Оптимальное пороговое значение определяется путём статистического моделирования. Знание числа источников излучения позволяет на следующем этапе решить задачу определения угловых координат источников или принять решение о степени доверия к оценкам этих координат на основе традиционного алгоритма моноимпульсной пеленгации.

1. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЧИСЛА ИСТОЧНИКОВ

В случае наличия одного источника излучения в рабочей области пространства антенной системы определение его угловых координат x, y амплитудным моноимпульсным методом выполняется в два этапа. На первом этапе определяются амплитуды сигнала $A_i, i \in [1, N_A]$, принятого N_A каналами антенной системы. На втором этапе решается система нелинейных уравнений пеленгации:

$$F[f_i(x, y), f_j(x, y)] = F(A_i, A_j), \quad (1)$$

где f_i — диаграмма направленности i -го приёмного канала, F — пеленгационная характеристика. Наиболее часто в задачах радиолокации применяется суммарно-разностная пеленгационная характеристика [10]:

$$F(A_i, A_j) = (A_i - A_j)/(A_i + A_j).$$

Решение системы нелинейных уравнений пеленгации (1) может быть найдено на основе критерия минимума среднего квадрата ошибки [9] путём оптимизации функционала среднеквадратичного рассогласования:

$$\{\hat{x}, \hat{y}\} = \arg \min_{x, y} \Phi(x, y).$$

При определении положения одного источника радиоизлучения функционал среднеквадратичного рассогласования, соответствующий среднему по всем парам приёмных каналов квадрату ошибки, имеет следующий вид:

$$\Phi(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_A} \left\{ F[f_i(x, y), f_j(x, y)] - F(A_i, A_j) \right\}^2}. \quad (2)$$

Значение функционала (2) в точке минимума $\Phi(\hat{x}, \hat{y})$ задаёт среднеквадратичную ошибку решения системы уравнений пеленгации.

Для определения амплитуд при пассивной моноимпульсной пеленгации традиционно используется оценка энергии принятого сигнала [1]. При наличии N некоррелированных источников излучения в рабочей области антенной системы энергия суммарного сигнала, принимаемого каналами антенной системы, задаётся взвешенной суммой энергий каждого излучённого сигнала.

Амплитуда сигнала в i -м приёмном канале определяется выражением

$$A_i = \sqrt{\sum_{k=1}^N [\alpha_k f_i(x_k, y_k)]^2},$$

где α_k и x_k, y_k — амплитуда сигнала и угловые координаты k -го источника излучения соответственно.

При определении положения N источников излучения $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ функционал среднеквадратичного рассогласования (2) приводится к следующему виду:

$$\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\alpha}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_A} \left[F \left(\sqrt{\sum_{k=1}^N \alpha_k^2 f_i^2(x_k, y_k)}, \sqrt{\sum_{m=1}^N \alpha_m^2 f_j^2(x_m, y_m)} \right) - F(A_i, A_j) \right]^2}. \quad (3)$$

В случае, когда мощности всех источников одинаковые и равны α_0 , амплитуда сигнала, принятого i -м приёмным каналом, определяется выражением

$$A_i = \alpha_0 \sqrt{\sum_{k=1}^N f_i^2(x_k, y_k)},$$

а функционал среднеквадратичного рассогласования (3) принимает вид

$$\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_A} \left[F \left(\sqrt{\sum_{k=1}^N f_i^2(x_k, y_k)}, \sqrt{\sum_{m=1}^N f_j^2(x_m, y_m)} \right) - F(A_i, A_j) \right]^2}. \quad (4)$$

Анализ зависимости среднеквадратичной ошибки решения системы уравнений пеленгации $\Phi(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}})$ от числа искомых источников радиоизлучения N может быть использован для определения числа источников излучения.

Исследования зависимости функционала $\Phi(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}})$ от числа источников N проводились на примере модельной антенной системы, состоящей из 37 приёмных элементов (рис. 1), диаграмма направленности каждого из которых в рабочей области антенной системы может быть аппроксимирована двумерной функцией Гаусса с шириной 1° по уровню -3 дБ. На рис. 2 показаны характерные графики зависимостей среднеквадратичной ошибки (4) решения системы уравнений пеленгации от предполагаемого числа искомых источников радиоизлучения N в случае наличия от 1 до 6 источников с одинаковой мощностью, случайным образом распределённых по рабочей области антенной системы. На рис. 2а представлены зависимости абсолютной величины ошибок $\Phi(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}})$, на рис. 2б — ошибки, нормированной на значение при $N = 1$:

$$\Phi_n(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}) = \frac{\Phi(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}})}{\Phi(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}})|_{N=1}}.$$

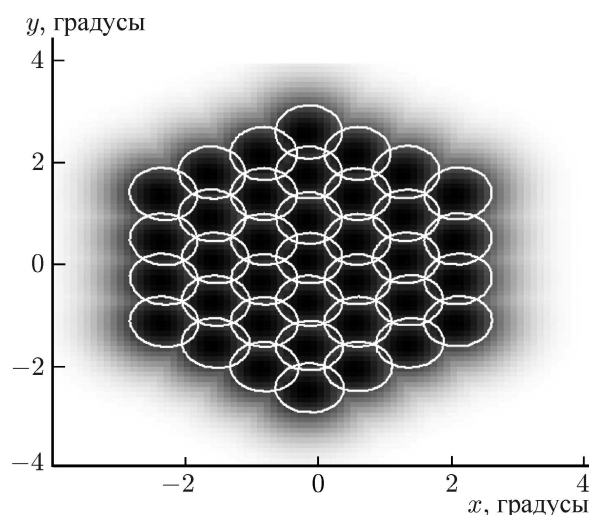


Рис. 1. Модельная антенная система

Исследования зависимости функционала $\Phi(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}})$ от числа источников N проводились на примере модельной антенной системы, состоящей из 37 приёмных элементов (рис. 1), диаграмма направленности каждого из которых в рабочей области антенной системы может быть аппроксимирована двумерной функцией Гаусса с шириной 1° по уровню -3 дБ. На рис. 2 показаны характерные графики зависимостей среднеквадратичной ошибки (4) решения системы уравнений пеленгации от предполагаемого числа искомых источников радиоизлучения N в случае наличия от 1 до 6 источников с одинаковой мощностью, случайным образом распределённых по рабочей области антенной системы. На рис. 2а представлены зависимости абсолютной величины ошибок $\Phi(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}})$, на рис. 2б — ошибки, нормированной на значение при $N = 1$:

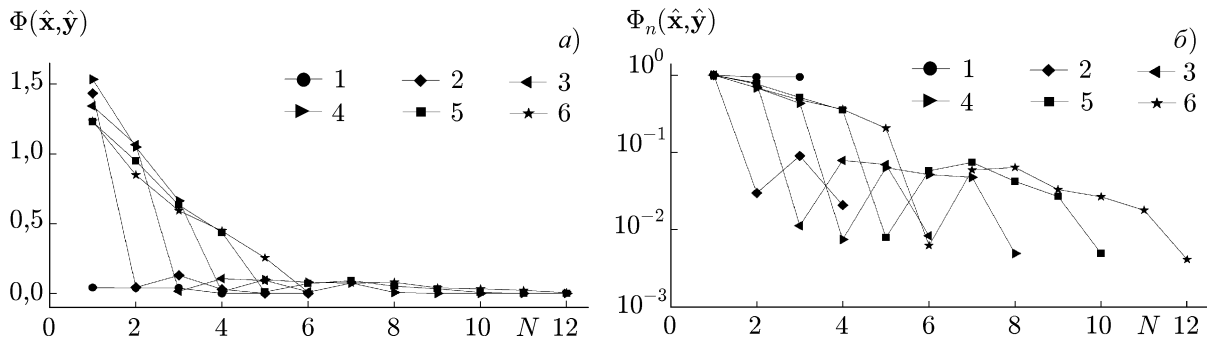


Рис. 2. Зависимости абсолютных (а) и нормированных (б) среднеквадратичных ошибок решения системы уравнений пеленгации от предполагаемого числа источников N . Цифрами у обозначений кривых указано количество источников радиоизлучения

На сигнал накладывался аддитивный некоррелированный белый гауссов шум. Отношение сигнал/шум (ОСШ) составляло 50 дБ. Оценку числа источников предлагается выполнять на основе анализа величин $\Phi_n(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}})$ для различных значений N .

Анализ графиков на рис. 2 позволяет сделать вывод, что решение о количестве источников в рабочей области антенной системы может быть принято пороговым методом: существует уровень принятия решения l , такой, что минимальное значение числа источников N , при котором величина ошибки $\Phi_n(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}})$ лежит ниже этого уровня, является искомым числом источников. Для $N = 1$ вывод о наличии только 1 источника радиоизлучения принимается на основании исключения остальных гипотез. Например, если в рабочей области антенной системы может находиться не больше $N_{\max}$ источников ($N_{\max} > 1$), и величины ошибок $\Phi_n(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}})$ для $2 \leq n \leq N_{\max}$ превышают уровень принятия решения l , то принимается решение о наличии только 1 источника. В случае, показанном на рис. 2, уровень l из диапазона $[0,03, 0,20]$ позволяет правильно определить число источников для каждого из шести вариантов. Выбор оптимального значения уровня принятия решения может быть осуществлён по критерию минимума среднего риска R [9]:

$$R = \sum_{j=1}^{N_{\max}} \sum_{k=1}^{N_{\max}} p_j W_{jk} p(k | j), \quad (5)$$

где p_j — априорная вероятность наличия j источников, $p(k | j)$ — вероятность того, что при работе j источников принято решение о наличии k источников, W_{jk} — штрафная функция, соответствующая плате за принятие решения о наличии k источников при работе j источников, $N_{\max}$ — максимальное возможное число источников. Примем, что потери, связанные с неверной оценкой числа источников, одинаковые при любых неверных решениях, заданы выражением

$$W_{jk} = \begin{cases} W, & j \neq k; \\ 0, & j = k. \end{cases}$$

В условиях априорной неопределённости числа источников в рабочей области антенной системы в качестве оценки априорных вероятностей возможных состояний системы можно использовать равномерное распределение

$$p_j = p = 1/N_{\max}, \quad (6)$$

которое соответствует оптимальной оценке распределения по методу максимума энтропии [11].

В таких условиях функция среднего риска (5) сводится к следующему виду:

$$R = \frac{W}{N_{\max}} \sum_{j=1}^{N_{\max}} \sum_{k=1, k \neq j}^{N_{\max}} p(k | j), \quad (7)$$

а критерий минимума среднего риска

$$\hat{l} = \min_l R(l) \quad (8)$$

соответствует критерию минимума вероятности принятия неверного решения $p_w(l)$. Зависимость вероятности принятия неверного решения $p_w(l)$ от величины уровня принятия решения l оценивается в ходе статистических испытаний частотным методом:

$$p_w = \frac{1}{n_p} \sum_{j=1}^{N_{\max}} \sum_{k=1, k \neq j}^{N_{\max}} n_{kj},$$

где n_{kj} — число испытаний, в которых было определено k источников, когда в действительности их было j ,

$$n_p = \sum_{j=1}^{N_{\max}} \sum_{k=1}^{N_{\max}} n_{jk}$$

— общее число испытаний. Исходя из гипотезы о равновероятности состояний (6) для каждого возможного числа источников проводится одинаковое количество испытаний.

Для антенной системы, показанной на рис. 1, в предположении о том, что в рабочей области антенной системы одновременно может находиться не более 3 источников с одинаковой мощностью $N \in [1, 3]$, было проведено по 20 000 экспериментов со случайным расположением источников ($n_p = 60\,000$). Для диапазона уровня принятия решения $l \in [10^{-4}, 1]$ был построен график зависимости вероятности $p_w(l)$ принятия неверного решения о числе источников от уровня l (рис. 3). Согласно критерию (8) в качестве уровня принятия решения было выбрано значение $\hat{l} = 0,0165$, при котором достигается минимальная вероятность $p_w(l)$. Результаты, полученные при использовании данного уровня принятия решения, верны с вероятностью $p = 1 - p_w(\hat{l}) \approx 0,95$.

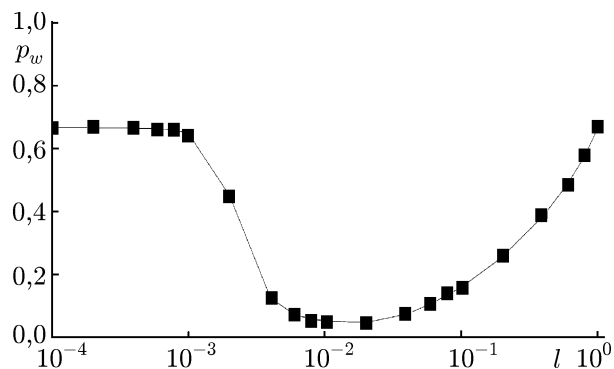


Рис. 3. Зависимость вероятности принятия неверного решения о числе источников от уровня принятия решения

Пороговый метод принятия решения не налагает жёсткие требования на объём оперативной памяти вычислительного устройства. Выбор уровня принятия решения l проводится при предварительных испытаниях, и в процессе работы требуется хранить в памяти только оптимальное значение уровня $\hat{l}$. Как будет показано ниже, в условиях наличия аддитивных шумов оптимальное значение порогового уровня $\hat{l}$ увеличивается и зависит от шумовой обстановки (уровня шума). Поэтому на практике необходим дополнительный канал обработки, который позволяет оценить уровень шума в обрабатываемых данных и выбрать соответствующий оптимальный уровень, что, в целом, позволит повысить достоверность определения числа источников радиоизлучения.

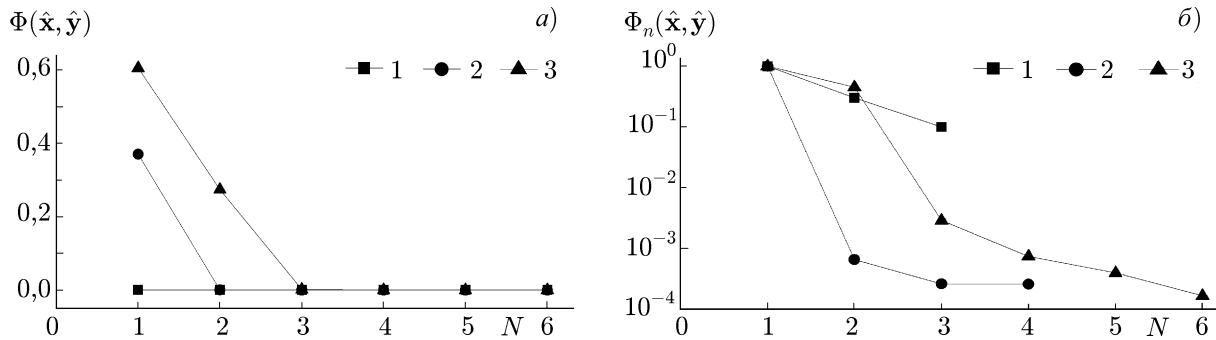


Рис. 4. Зависимости абсолютных (а) и нормированных (б) среднеквадратичных ошибок от предполагаемого числа источников N для антенной системы, состоящей из 7 приёмных элементов. Цифрами у обозначений кривых указано количество источников радиоизлучения

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ПРИЁМА

На практике сигнал, принимаемый многоканальной антенной системой, имеет приемлемый для последующей обработки уровень не во всех приёмных элементах, поэтому для увеличения устойчивости к шумам [12] обработка данных обычно ведётся по «соцветию», состоящему из 6÷9 диаграмм направленности. Для системы, состоящей из 7 центральных приёмных элементов из представленных на рис. 1, были проведены отдельные исследования. На рис. 4 показаны характерные графики зависимостей $\Phi(\hat{x}, \hat{y})$ от предполагаемого числа источников N при наличии от 1 до 3 источников (при ОСШ 50 дБ). Существенное уменьшение значения нормированных ошибок $\Phi_n(\hat{x}, \hat{y})$ при предполагаемом числе источников N не меньше исходного числа позволяет сделать вывод, что в качестве уровня принятия решения о числе источников может быть выбрано значение из диапазона $[0,005, 0,100]$.

Для антенной системы, состоящей из трёх приёмных элементов, центры диаграмм направленности которых расположены в углах правильного треугольника, предлагаемая выше логика принятия решения о числе источников пороговым методом не работает: при предполагаемом числе источников N не меньше исходного числа не наблюдается существенный спад значений $\Phi_n(\hat{x}, \hat{y})$. Причина состоит в том, что для такой антенной системы система уравнений пеленгации является недоопределённой, т.е. состоит из двух уравнений и для определения координат x, y содержит 4 и 6 неизвестных для 2 и 3 источников соответственно. Решение этой некорректно поставленной задачи может быть получено с применением других, более совершенных, методов регуляризации [13], однако в данной работе это не исследовалось.

На рис. 5 представлены графики зависимостей вероятности $p_w(l)$ принятия неверного решения о числе источников от уровня l для сигналов с ОСШ от 10 до 30 дБ (в сигнале присутствует аддитивный некоррелированный белый гауссов шум) для антенной системы, показанной на рис. 1. Для повышения устойчивости алгоритма определения числа источников из расчёта исключались данные приёмных элементов, в которых зарегистрирован низкий уровень сигнала. В качестве порога при статистических исследованиях использовалось значение -15 дБ. На практике этот уровень должен выбираться исходя из уровня боковых лепестков диаграммы направленности приёмных каналов.

При изменении ОСШ от 30 дБ до 10 дБ наблюдается увеличение минимальной вероятности неверного определения числа источников, и положение минимума сдвигается в сторону больших значений уровня принятия решения. Для ОСШ = 20 дБ выбор оптимального значения уровня $\hat{l} \approx 0,0956$ обеспечивает вероятность правильного определения числа источников в рабочей области

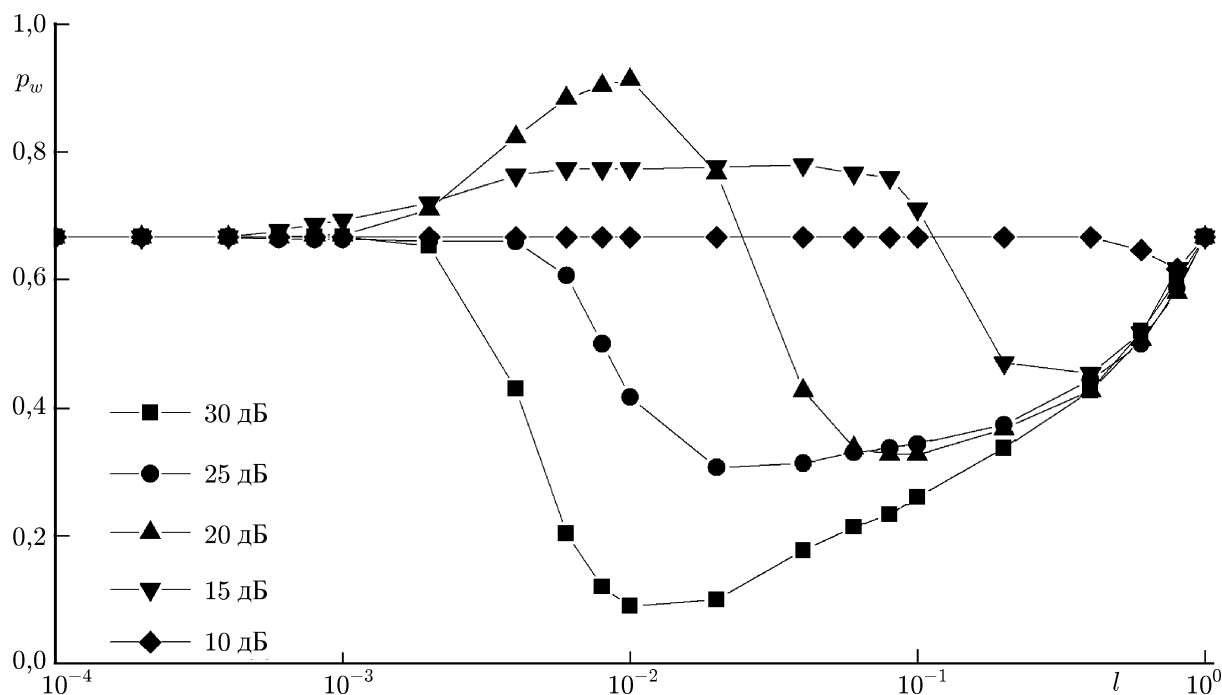


Рис. 5. Зависимости вероятности принятия неверного решения о числе источников от уровня l принятия решения для сигналов с различными ОСШ

антенной системы, равную $p = 1 - p_w \approx 0,68$, что примерно в 2 раза выше, чем при гипотезе о равных вероятностях каждого возможного числа источников ($p = 1/3$). Алгоритм остаётся устойчивым до ОСШ = 15 дБ.

Результаты, представленные выше, получены в предположении, что мощности всех источников излучения одинаковые. Однако некоторые источники могут иметь существенно более высокую мощность, в частности постановщики помех. В случае значительного (на порядок и больше) превосходства мощности одного из источников предлагаемый в работе метод не позволяет обнаруживать остальные источники.

Для систем связи характерны ситуации, когда мощности источников сравнимы по величине и в условиях «плохого» приёма могут меняться в 2÷3 раза. В этом случае применение функционала (4) для оценки числа источников приводит к значительному ухудшению эффективности, т. е. увеличению вероятности принятия неверного решения о числе источников (кривая 1 на рис. 6).

Включение в функционал среднеквадратичного рассогласования $\Phi(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}})$ дополнительных переменных α_k , отвечающих за амплитудные коэффициенты мощности источников, в форме (3) позволяет увеличить устойчивость алгоритма к вариациям мощностей (кривая 2 на рис. 6). Эффективность алгоритма определения числа источников при их разных мощностях ниже по сравнению

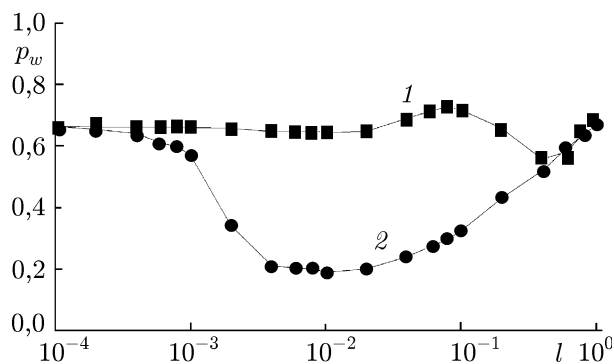


Рис. 6. Зависимости вероятности принятия неверного решения о числе источников от уровня l принятия решения, когда один из трёх источников мощнее остальных в 2 раза (1 — без учёта различия мощностей, 2 — с учётом различия мощностей)

со случаем источников с одинаковыми мощностями, однако это ухудшение не существенно в случае различий в амплитудах источников не более чем в 2 раза.

Следует отметить, что для «соцветия», состоящего из 7 центральных элементов антенной системы, показанной на рис. 1, система уравнений пеленгации для трёх источников является недоопределённой (6 уравнений и 8 переменных). Введение дополнительных переменных, отвечающих за амплитуды сигналов, приводит к необходимости повышения минимального числа приёмных каналов антенной системы для однозначного решения системы уравнений пеленгации.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен алгоритм определения числа источников излучения в рабочей области пространства многоэлементной моноимпульсной антенной системой. Применимость алгоритма продемонстрирована в условиях одновременной работы двух или трёх источников излучения на фоне аддитивных шумов. Для модельной антенной системы установлено, что устойчивость алгоритма сохраняется для отношения сигнал/шум до 15 дБ. Предложенный алгоритм может применяться как для систем активной локации с малым уровнем шума, так и для пассивных моноимпульсных систем, для которых характерна необходимость обработки сигналов с существенно более высокими шумами. Предложенная в работе методика позволяет обнаруживать факт одновременной работы и количество сравнимых по мощности источников излучения, что даёт возможность применять её, например, для задач пеленгации обычно близких по мощности наземных систем связи в спутниковых радиолокационных комплексах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин Ю. П., Ипатов В. П., Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы. М.: Высшая школа, 1990. 496 с.
2. Howard D. D. // Radar handbook / Ed. by M. Skolnik. McGraw-Hill Companies, 2008. P. 437.
3. Ермолаев В. Т., Флакман А. Г., Сорокин И. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 9. С. 641.
4. Ермолаев В. Т., Флакман А. Г., Анулин А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 9. С. 1144.
5. Pollon G. E., Lank G. W. // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. 1968. V. 4. P. 541.
6. Peebles P. Z., Berkowitz R. S. // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. 1968. V. 4. P. 845.
7. McAulay R. J., McGarty T. P. // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. 1974. V. 7. P. 821.
8. Bogler P. L. // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. 1986. V. 22. P. 197.
9. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.
10. Леонов А. И., Фомичёв К. И. Моноимпульсная радиолокация. М.: Радио и связь, 1984. 312 с.
11. Джейнс Э. Т. // ТИИЭР. 1982. Т. 70, № 9. С. 33.
12. Семенова М. Ю., Логинов А. А., Морозов О. А. // Вестник ННГУ. 2010. № 5 (2). С. 358.
13. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. 302 с.

Поступила в редакцию 10 июня 2013 г.; принята в печать 25 июля 2013 г.

**METHOD FOR ESTIMATING THE NUMBER OF RADIATION SOURCES
IN THE PROBLEM OF THE AMPLITUDE MONOPULSE DIRECTION FINDING**

A. A. Loginov, O. A. Morozov, M. Yu. Semenova, and V. R. Fidelman

In this work, we propose the algorithm for processing the signals received by a multi-channel amplitude monopulse direction finding system, which allows one to estimate the radiation-source number in the operation region of space. The decision on the number of sources is made on the basis of the threshold method. The threshold value is determined using the criterion of maximum of the sum of the conditional probability of error.