

УДК 621.396.966

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ШУМОВ

Ф.Х. Абдуллин, Д.С. Пискорский

Рассматриваются методы пространственной обработки сигналов, повышающие угловое разрешение источников радиоизлучений. Проводится оценка эффективности алгоритмов со сверхразрешением при различных отношениях сигнал-шум и конфигурациях антенной решетки методами математического моделирования в среде Matlab/Simulink.

Ключевые слова: источники радиоизлучений, алгоритмы сверхразрешения, антенные решетки, помехи.

Введение

Одной из задач, решаемых радиолокационными комплексами, является оценка угловых координат источников радиоизлучения (ИРИ) путем обработки принятого радиосигнала на заданном интервале наблюдения.

Для оценки эффективности того или иного метода измерения направления на ИРИ используют помимо точности измерения, такой показатель как разрешающая способность по направлению.

Разрешающая способность по направлению (азимуту) определяется минимальной величиной угла $\delta\theta$ между направлениями на два равноудаленных точечных объекта, при котором отраженные сигналы от этих объектов принимаются отдельно. Согласно рэлеевскому критерию углового разрешения для повышения разрешающей способности РЛС по азимуту необходимо сужать диаграмму направленности антенны в горизонтальной плоскости, что связано с увеличением размеров антенны или укорочением длины волны:

$$\delta\theta \approx \lambda / d,$$

где d – размеры антенны, λ – длина волны.

Данное правило справедливо для классических методов оценки угловых координат ИРИ, основанных на анализе амплитудного распределения поля или разности фаз (между двумя одинаковыми антеннами).

Современные цифровые методы пространственной обработки сигналов [1, 2], позволяют преодолеть рэлеевское ограничение и решать задачи определения угловых координат нескольких ИРИ разнесенных на сколь угодно малое расстояние, при условии достаточно большого отношения сигнал-шум на входе приемника. Это так называемые методы со сверхразрешением. И в данном контексте интересным вопросом являет-

ся оценка этого «достаточного» отношения сигнал-шум, позволяющего применить тот или иной метод сверхразрешения.

Постановка задачи

Известные алгоритмы обработки сигналов со сверхразрешением можно разделить на две группы. С последовательной (методы Кейпона (MVDR), MUSIC, собственных векторов EV, теплового шума) и параллельной (ROOT MUSIC, ESPRIT, Прони и др.) пеленгацией ИРИ. Эффективность указанных алгоритмов зависит от отношения сигнал-шум. Целью работы является сравнение результатов работы алгоритмов со сверхразрешением при различных отношениях сигнал-шум и конфигурациях антенной решетки, на основе измерения и анализа разрешающей способности по углу методами математического моделирования в среде Matlab/Simulink.

Для исследования выбраны следующие алгоритмы сверхразрешения MVDR, ROOTMUSIC и ESPRIT.

Описание алгоритмов сверхразрешения

Метод минимизации дисперсии MVDR (метод Кейпона)

Метод минимизации дисперсии искажения характеристик сигнала применим к антенным решеткам любой конфигурации и позволяет получить спектр в котором высоты пиков прямо пропорциональны мощностям гармоник на заданном угле визирования.

Выходной угловой спектр метода Кейпона определяется выражением (1):

$$P(\theta) = \frac{1}{v^H(\theta) \cdot R^{-1} \cdot v(\theta)}, \quad (1)$$

где $v(\theta)$ – оценочный вектор-строка (H – знак эрмитового сопряжения);

R – оценочная корреляционная матрица.

Вычисления по формуле (1) проводятся во всем возможном диапазоне углов визирования, после чего отыскиваются положения максимумов, по которым оцениваются угловые координаты ИРИ (а по числу максимумов - количество ИРИ).

Метод ROOT MUSIC

В методе ROOT-MUSIC для нахождения угловых координат ИРИ используется ортогональность собственных сигнальных и шумовых векторов. Он позволяет в рамках одной вычислительной процедуры находить углы прихода сигналов от всех источников, находящихся в поле наблюдения.

Выходная функция метода ROOT-MUSIC имеет вид (2) [3]:

$$P(\varphi, \theta) = \sum_{l=-(N-1)}^{N-1} C_1 \cdot z^l. \quad (2)$$

ESPRIT (метод поворота пространства)

Данный метод базируется на нахождении основного угла поворота общих подпространств, связанных с решеткой из попарно согласованных и одинаково направленных приемных элементов антенной решетки [4].

Результаты исследования

Поскольку точность методов со сверхразрешением по углу также определяется конфигурацией применяемой антенной решетки [5], то исследования будут проведены на двух линейных решетках с 4-мя и 10-ю элементами (рис. 1).

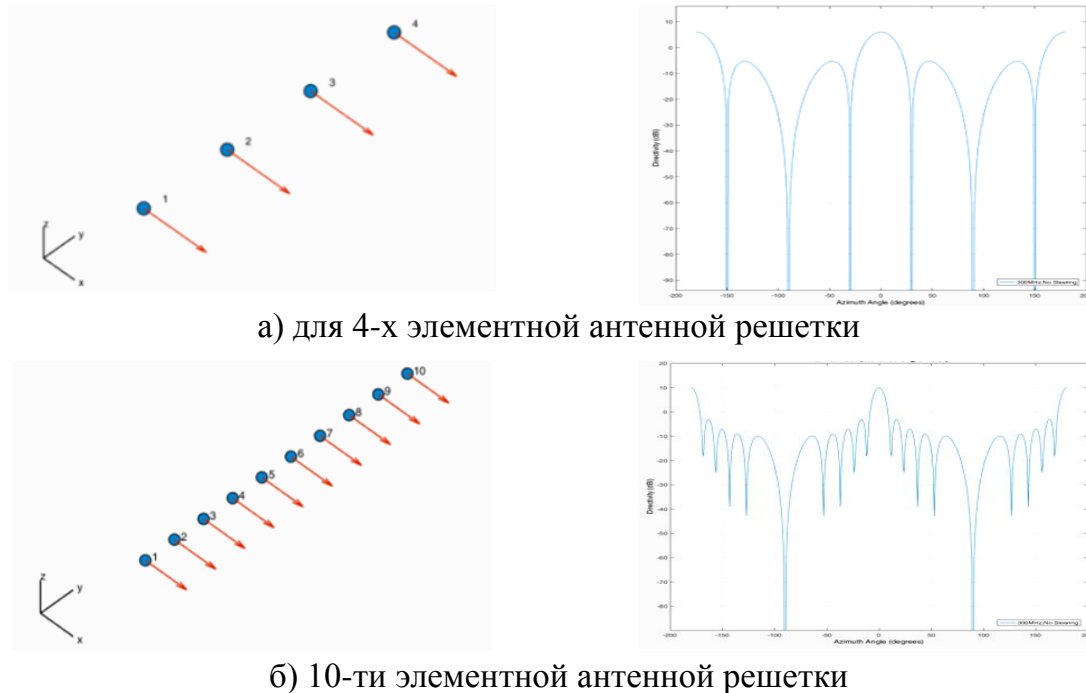


Рис. 1. Вид линейной антенной решетки и диаграмма направленности

Это позволит выбрать оптимальное сочетание конфигурации принимающей решетки и метода обработки принимаемого сигнала в заданном диапазоне частот для получения оценки углов направления удовлетворяющих заданным точностным характеристикам. Расстояние между элементами выбрано равным половине длины волны.

В проводимых исследованиях разрешающей способности алгоритмов в качестве оцениваемых источников радиоизлучения выбраны две встречно движущиеся цели (ИРИ). Расчет разрешающей способности производился в моменты появления больших ошибок пеленгования или перепутывания целей, при этом фиксировалось истинное угловое положение этих целей относительно приемного поста.

Результаты расчета разрешающей способности при различных отношениях сигнал/шум приведены в табл. 1 и 2.

Зависимости разрешающей способности от отношения сигнал-шум для 4- и 10-элементной АР показаны на рис. 2 и 3 соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о существенном превосходстве характеристик методов сверхразрешения по сравнению с классиче-

скими методами. Данное преимущество сохраняется даже в условиях воздействия шумов превышающих уровень сигнала. Наиболее эффективным, но в тоже время и вычислительно емким является метод ROOTMUSIC.

Таблица 1

4-элементная AP

Отношение сигнал/шум, дБ	-15	-10	-3	0	3	10	15	20	30
Метод	Минимальная разрешающая способность по углу, град								
Классический	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
MVDR	20.0	19.0	14.2	10.4	8.4	4.8	3.0	1.4	0.09
ESPRIT	19.9	16.9	6.7	4.1	3.1	1.3	0.6	0.3	0.08
ROOTMUSIC	18.4	9.2	3.9	2.7	2.2	0.6	0.4	0.2	0.05

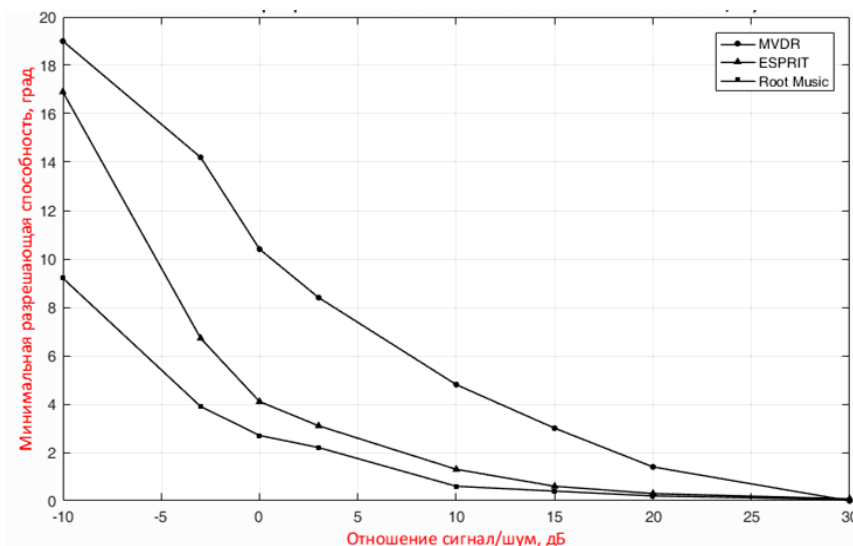


Рис. 2. Зависимость разрешающей способности от отношения сигнал-шум 4-элементной AP

Таблица 2

10-элементная AP

Отношение сигнал/шум, дБ	-15	-10	-3	0	3	10	15	20	30
Метод	Минимальная разрешающая способность по углу, град								
Классический	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
MVDR	18.3	13.3	8.5	6.6	5.0	3.0	1.3	0.3	0.05
ESPRIT	16.0	8.4	3.2	2.2	1.5	0.7	0.4	0.1	0.04
ROOTMUSIC	8.9	4.6	2.1	1.8	1.2	0.6	0.3	0.1	0.04

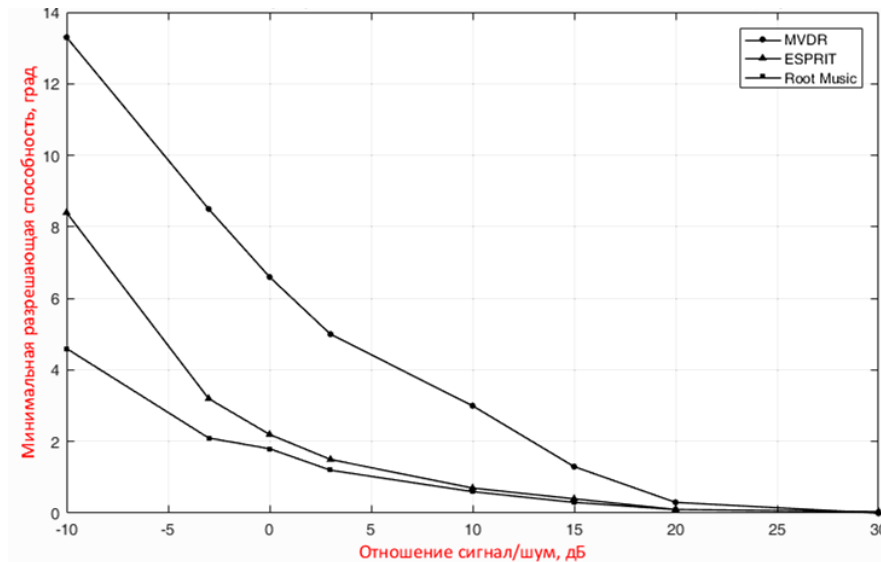


Рис. 3. Зависимость разрешающей способности от отношения сигнал-шум 10-элементной AP

Вместе с тем для практического применения, например, в задачах распознавания образов радиолокационных целей по отраженному сигналу, требуется высокая разрешающая способность по углу, которая достигается алгоритмом MVDR (Кейпона) при отношении сигнал-шум более 20дБ, а алгоритмами ROOTMUSIC и ESPRIT более 15дБ. В сложной помеховой обстановке, тем более при воздействии активных преднамеренных помех, повторяющих структуру полезного сигнала, обеспечение требуемого для распознавания образа цели или группы близко летящих целей остается трудно решаемой задачей.

Заключение

Проведенное моделирование описанных алгоритмов показывает, что они имеют хорошую эффективность по сравнению с классическими методами даже при малом количестве антенных элементов и несложной структуре ДНА, что важно при решении практических задач.

Исследование показало также лучшую эффективность методов сверхразрешения по углу по сравнению с классическими, даже в условиях наличия шумоподобных помех превышающих уровень сигнала на 10дБ. Вместе с тем остается открытым вопрос их эффективности при воздействии сигналподобных помех.

Наилучшие показатели по разрешающей способности в условиях воздействия шумов показал алгоритм ROOTMUSIC. Основной его недостаток – большие вычислительные затраты.

Кроме того все алгоритмы с высокой разрешающей способностью должны обладать априорной информацией о количестве ИРИ. Иначе возникает неопределенность в определении направления источников сигналов в пространственном спектре, ведь количество максимумов в спектре может быть больше, чем количество реальных источников.

Библиографический список

1. Сафонова, А.В. Исследование возможностей углового разрешения источников излучения / А.В. Сафонова // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвузовский сб. научн. тр. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С. 125–129.
2. Нечаев, Ю.Б. Радиопеленгация в секторе методами ROOT-MUSIC и ESPRIT с использованием линейных антенных решеток / Ю.Б. Нечаев, Е.С. Макаров // Теория и техника специальной радиосвязи. – 2008. – № 3. – С. 51–58.
3. Wong, K.T. Root-MUSIC-based azimuth-elevation angle of arrival estimation with uniformly spaced but arbitrary oriented velocity hydrophones / K.T. Wong, M.D. Zoltowski // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1999. – Vol. 47, № 12. – Pp. 3250–3260.
4. Gao, F. A generalized ESPRIT approach to direction-of-arrival estimation / F. Gao, A.B. Gershman // IEEE Signal Processing. – 2005. – Vol. 12, № 3. – Pp. 254–257.
5. Григорян, Д.С. Сверхразрешение по частоте при обработке радиолокационных сигналов когерентными методами линейного предсказания вперед-назад с прореживанием данных // Д.С. Григорян // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – № 7.

[К содержанию](#)