

УДК 621.391

Анализ современных методов оценки направления приема сигнала с высоким разрешением

И.Б. Бирюков

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, аспирант кафедры радиотехнических систем, ул. Большая Морская, 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия

E-mail: ibfspo@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена анализу современных методов пеленгации объектов, особенностям и возможностям применения методов MVDR, MUSIC, root-MUSIC, ESPRIT DOA в среде Matlab 2020. Моделирование применения данных алгоритмов для определения углов пеленгации целей и анализ результатов.

Ключевые слова: методы пеленгации, MUSIC, MVDR, фазированная антенная решетка

Analysis of modern methods for assessing the direction of signal reception with high resolution

I.B. Biryukov

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, PhD Student of the department of radio systems, Bolshaya Morskaya str., 67, Saint Petersburg, 190000, Russia

E-mail: ibfspo@yandex.ru

Abstract. The work is devoted to the analysis of modern methods of direction finding of objects, the features and possibilities of using the methods MVDR, MUSIC, root-MUSIC, ESPRIT DOA in the Matlab 2020 environment. Simulation of the application of these algorithms to determine the direction finding angles of targets and analysis of the results.

Keywords: direction finding methods, MUSIC, MVDR, phased array

Современные методы и алгоритмы для определения угломерных координат целей хорошо показывают в различных реальных системах и при моделировании. В данной работе будут представлены не только сами методы, но и анализ способности разделять объекты если они находятся в пределах нескольких азимутальных градусов друг относительно друга.

В пакет программ Matlab и Simulink будут проводиться некоторые исследования и сравнение алгоритмов и методов, так как они сформированы отдельными модулями и собраны в единый пакет Phased Array System Toolbox.

Блок ULA Beamscan Spectrum оценивает пространственный спектр входящих узкополосных сигналов путем сканирования области широких углов с использованием узкополосного обычного формирователя луча.

Блок ULA Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) Spectrum - Блок ULA MVDR Spectrum оценивает пространственный спектр входящих узкополосных сигналов путем сканирования области широких углов, используя формирователь луча без искажений с минимальной дисперсией.

Блок ULA MUSIC Spectrum оценивает пространственный спектр входящих узкополосных сигналов, используя алгоритм MUSIC. Алгоритм вычисляет псевдо-спектр путем сканирования области углов широкой стороны. Блок дополнительно вычисляет направление прихода (DOA) заданного количества сигналов путем оценки пиков спектра. Алгоритм выполняет анализ собственного псевдо-спектра корреляционной матрицы сигнала, чтобы оценить частотную составляющую сигнала. На основе алгоритма MUSIC сформирован алгоритм root-MUSIC. В алгоритме имеются следующие отличия:

- MUSIC возвращает псевдоспектр на всех частотных выборках,
- root-MUSIC возвращает оцененный дискретный частотный спектр вместе с соответствующими оценками мощности сигнала. root-MUSIC наиболее полезен для оценки частоты сигналов, состоящих из суммы синусоид, встроенных в аддитивный белый гауссовский шум.

Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariant Techniques (ESPRIT) – численный метод, позволяющий оценить параметры суммы синусоид на фоне шумов по серии измерений. Преимущество данного метода в том, что он позволяет получать оценки пеленгов расчетным путем без поиска локальных максимумов по координатам и при этом обеспечивать высокую надежность и точность [2].

Данные методы применимы для фазированных антенных решеток. При этом в Matlab возможно смоделировать фазированные антенные решетки с различным количеством элементов и различными параметрами самой решетки. При использовании линейной ФАР возможно определение одного угла.

В дальнейшем исследовании будет проверяться влияние изменение таких параметров на работу алгоритмов как изменение длины волны сигнала, количества элементов в линейной антенной решетке, изменение закона распределения шума, результаты будут сведены в таблицу 2. Размеры антенной системы будут выбираться такими, чтобы их можно было установить на летательных аппаратах, вес ЛА Supercam S350 составляет 4,5 кг, а максимальный взлетный вес 11,5 кг.

В модель задаются углы прихода сигналов от пассивных источников радиоизлучения, несущая, длина волны, некоторое значение теплового шума на каждой антенне. Задается диапазон углов по азимуту, чтобы отследить точность определения координат. В программе Simulink создана схема для исследования и оценки алгоритмов, схема представлена на рисунке 1. Стоит отметить, что некоторые алгоритмы (MUSIC, Beamscan, MVDR) могут предоставить на выходе результирующий пространственный спектр. А другие методы (ESPIRIT, root-MUSIC) предоставляют решение и определенные углы. Количество входных сигналов от целей могут изменяться, при этом перечисленные алгоритмы и методы, определяют из углы. Точность определения угломестных координат от множества объектов в данную статью не выносятся.

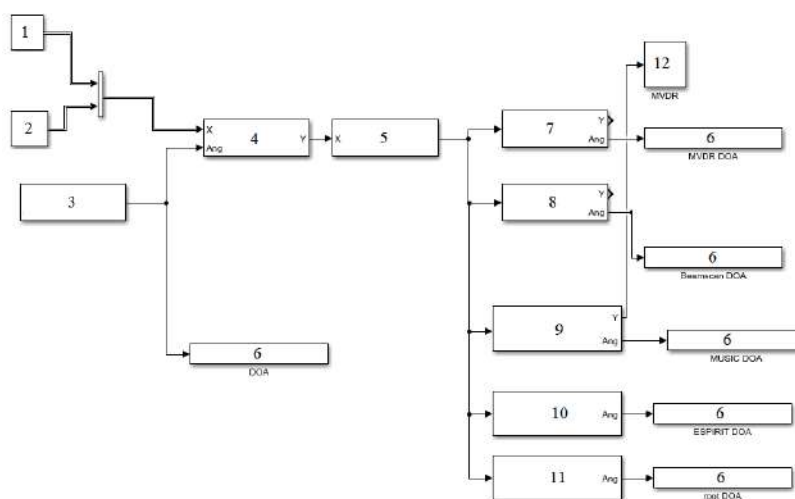
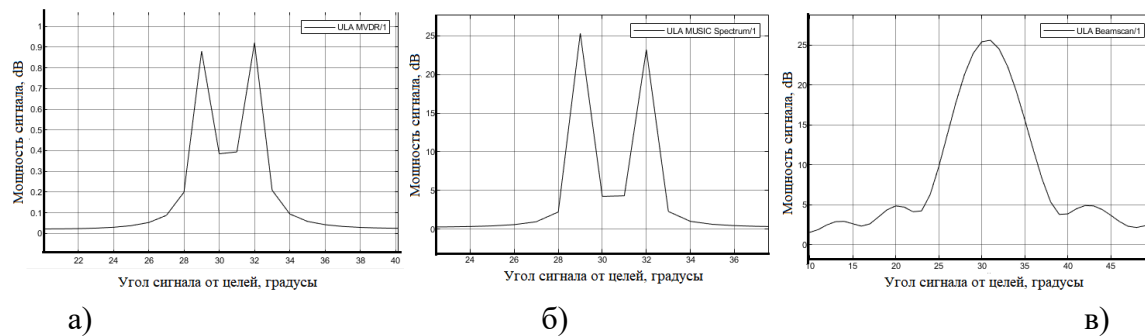


Рисунок 1. Схема исследования.

На рисунке 1 представлена схема исследования алгоритмов, состоящая из следующих элементов:

- 1,2 – Источник сигнала. Формируется отдельно для каждой цели. Существует возможность задать мощность сигнала.
- 3 – Блок, в котором задаются направления сигналов 1,2.
- 4 – Блок моделирования приема узкополосного сигнала (Narrowband Receive Array) на заданную антенную систему, в которой следует задать вид излучателя.
- 5 – Блок Receiver Preamplifier реализует предусилитель приемника, в модель приемной системы добавляется тепловой шум, рабочая температура, коэффициент потерь. Так же в блок добавляется фазовый шум.
- 6 – Вывод реальных углов и значений оценки алгоритмов.
- 7-11 – Блоки исследуемых алгоритмов.
- 12 – Пространственный спектроанализатор.



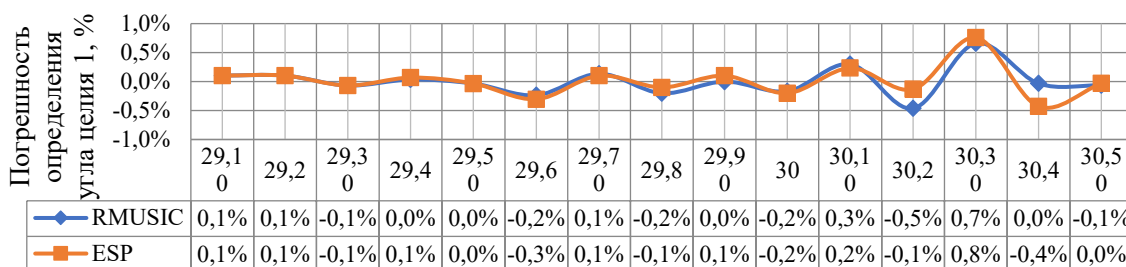
а) MUSIC, б) MVDR, в) Beamscan

Рисунок 2. Результат моделирования алгоритмов при углах 29 и 32.

Количество элементов в антенной решетке влияет на пространственный спектр, так как меняется диаграмма направленности антенны в целом.

Для исследования результатов оценки алгоритмов были выбраны следующие параметры антенной системы:

$$N_{\text{элементов}} = 16, f_c = 9,98 \text{ ГГц}, \lambda = 3 \text{ см. } L_{\text{ант}} = 0,48 \text{ м.}$$



Угол сигнала от цели, градусы

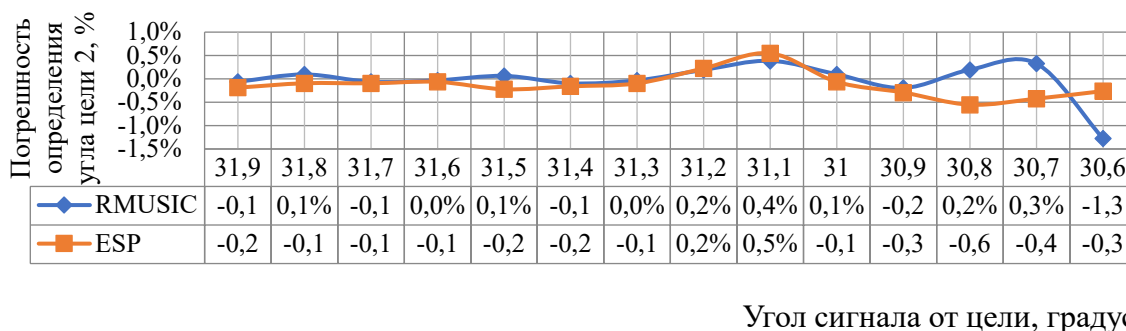


Рисунок 3. Погрешность определения углов в пределах трех градусов.

В процесс исследования выяснилось, что алгоритм Beamscan не может различать близкорасположенные цели, что показано на рисунке 2.

Значительное расстояние между объектами позволяет алгоритмам различать углы от целей. При этом алгоритм MUSIC и MVDR дают оценку кратную градусам, определение минут в данной системе, данными алгоритмами не представляется возможным.

Алгоритмы ESPIRIT и root – MUSIC с погрешностью различали близкорасположенные объекты. Оценка погрешности для двух целей показана на рисунке 3.

При совмещении углов от двух целей алгоритмы определяют верно, угол от одной из целей, при этом мощность сигнала вырастает. Так как алгоритмы MUSIC, root-MUSIC, ESPIRIT правильно дают оценку лишь в том случае, когда известно количество сигналов, и при совпадении углов от целей, алгоритмы дают 2 результата. При этом одно из значений всегда оказывается верными и мощность сигнала возрастает, в результате совпадения углов двух целей.

В исследовании для данной статьи результаты работы алгоритмов можно считать хорошими, так как погрешность определения координат составила один процент в случае, когда объекты находились на углах с разницей 0,1 градуса.

Результаты следует проверить с помощью критерия Релея. С учетом известных параметров (длины волны, длина активной части антенны). Критерий Релея в радиолокации говорит о возможности различать 2 цели если между ними возможно разместить диаграмму направленности антенны. Если различать цели возможно и на меньшем расстоянии, то можно говорить о сверхразрешении.

Ширину диаграммы направленности по уровню 0,7 можно определить по приближенной формуле 1:

$$\Theta_{0,7} = 0,75 \cdot \lambda / Nd, \quad (1)$$

$\Theta_{0,7} \approx 0,75 \cdot 0,03 / (0,03 \cdot 15) \approx 0,05$ рад $\approx 2,86$ градусов.

Так как для анализа выбрано расстояние в 3 градуса между целями, то при обнаружении целей алгоритмы будут сверхразрешающими.

На рисунке 4 показан процесс определения углов для алгоритмов MUSIC и MVDR.

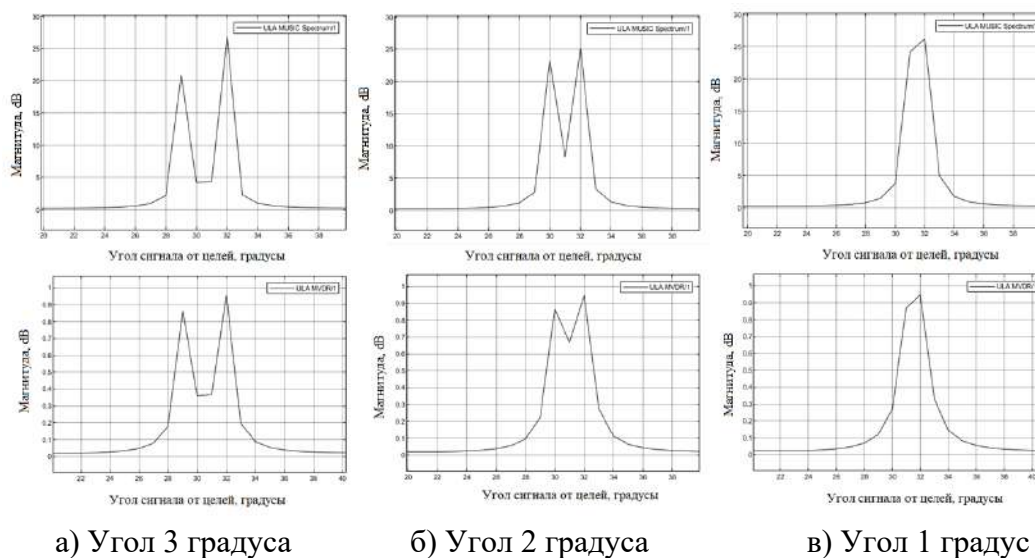


Рисунок 4. Работа алгоритмов MUSIC и MVDR при сверхмалых углах.

Список литературы

1. Direction of Arrival Estimation with Beamscan, MVDR, and MUSIC. – URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ug/direction-of-arrival-estimation-with-beamscan-mvdr-and-music.html> (дата обращения 10.04.2021).
2. Fulton, C., Salazar J.L., Zhang Y. *et al.* “Cylindrical Polarimetric Phased Array Radar: Beamforming and Calibration for Weather Applications” // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2017. – Vol. 55. – № 5. – P. 2827-2841.
3. MUSIC Super-Resolution DOA Estimation. – URL: https://www.mathworks.com/help/phased/ug/music-super-resolution-doa-estimation.html?searchHighlight=MUSIC&s_tid=srchtitle (дата обращения 10.04.2021).
4. Song, N., Yang T., Sun H. “Overlapped subarray based hybrid beamforming for millimeter wave multiuser massive MIMO” // IEEE Signal processing Letters. – 2017. – Vol. 24. – № 5. – P. 550-554.

5. Wu, C., Guo Y., Na Y., Wang X., Fu Q. and Yan Y. “Robust beamforming using beam-to-reference weighting diagonal loading and Bayesian framework” // IEEE Electronics Letters. – 2020. – Vol. 51. – № 22. – P. 1772-1774.