

# СИСТЕМНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ РАДИОПЕЛЕНГАЦИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ШУМОВ

## SYSTEM-ANALYTICAL APPROACH TO THE SELECTION OF RADIO DIRECTION FINDING METHODS AND ALGORITHMS UNDER INFLUENCE OF NOISE

**Gburi Osamah Qasim Abd Zaid  
Kareem Mohammed Hakeem Kareem**

*Summary.* Global demand for radar systems is growing rapidly, with the market expected to reach US\$46.8 billion by 2030. The growth rate is 4.5 % per year. Angular coordinates are key parameters for accurately determining the location of the signal source. System analysis of current super-resolution angular position determination algorithms, such as MUSIC, ROOT MUSIC, MVDR and ESPRIT, helps establish relationships between radar system performance and application requirements. The choice between algorithms depends on the specific application requirements, operating environment, available resources, and other factors. The article provides a comprehensive analysis of these methods with an emphasis on their performance characteristics in various conditions. The dependence of the choice of algorithm on specific operating conditions, navigation requirements and resource limitations highlights the importance of a systematic approach to optimizing the direction finding process. At high interference levels, MVDR and ROOT-MUSIC demonstrate better reliability, while in less demanding conditions MUSIC remains preferred due to its efficiency and ease of implementation.

*Keywords:* system analysis, direction finding methods, super-resolution, digital signal processing, MUSIC, ROOT MUSIC, MVDR, ESPRIT algorithms.

**Жбури Осам Касим Абд Заид**

Аспирант, Саратовский государственный  
технический университет имени Газарина Ю.А.

*Osamaaljore89@gmail.com*

**Карим Мохаммед Хаким Карим**

Аспирант, Саратовский государственный технический  
университет имени Газарина Ю.А.

*Mohammedhakeem22@gmail.com*

*Аннотация.* Глобальный спрос на радиолокационные системы быстро возрастает, ожидается, что этот рынок достигнет 46,8 миллиарда долларов США к 2030 году. Темпы роста составляют 4,5 % в год. Угловые координаты являются ключевыми параметрами для точного определения местоположения источника сигнала. Системный анализ текущих алгоритмов определения угловых координат с суперразрешением, таких как MUSIC, ROOT MUSIC, MVDR и ESPRIT, помогает установить зависимости между характеристиками радиолокационных систем и требованиями прикладных задач. Выбор между алгоритмами зависит от специфических требований приложения, условий рабочей среды, доступных ресурсов и других факторов. В статье произведен комплексный анализ этих методов с акцентом на их эксплуатационные характеристики в различных условиях. Зависимость выбора алгоритма от специфических условий эксплуатации, навигационных требований и ограничений ресурсов подчеркивает важность системного подхода для оптимизации процесса пеленгации. При высоких уровнях помех MVDR и ROOT-MUSIC демонстрируют лучшую надежность, в то время как в менее требовательных условиях MUSIC остается предпочтительным за счет своей эффективности и простоты в реализации.

*Ключевые слова:* системный анализ, методы пеленгации, суперразрешение, цифровая обработка сигналов, алгоритмы MUSIC, ROOT MUSIC, MVDR, ESPRIT.

### Введение

Глобальный спрос на радиолокационные системы в 2022 г. оценивался в 33,0 миллиарда долларов США. Согласно отчету компании Research and Markets (Ирландия) ожидается, что этот рынок достигнет 46,8 миллиарда долларов США к 2030 году [1]. Общий тренд на рынке связан с повышением эффективности, точности и стабильности навигационных систем, которые зависят от методов вычисления угловых координат источников радиопередачи с учетом шумов. Как ожидается, этот рынок будет продолжать расти высокими темпами (среднегодовой темп роста составит 4,5 % за анализируемый период 2022–2030 гг.) вместе с развитием новых технологий и расширением применения в разных отраслях.

Военные и гражданские радары, а также системы мониторинга и обнаружения источников излучения (ИИ), применяют различные методы вычисления угловых координат для определения положения и скорости целей. Поэтому исследование методов вычисления угловых координат источников радиопередачи с учетом шумов имеет высокую актуальность. Угловые координаты являются ключевыми параметрами для точного определения местоположения источника сигнала. В реальных условиях сигналы обычно сопровождаются шумами, которые могут исказить точность вычисления угловых координат. Поэтому разработка новых методов, способных эффективно справляться с шумами и обеспечивать высокую точность и скорость вычислений, является актуальной задачей. Улучшение точности вычисления угловых координат источников радиопередачи с учетом шумов позволяет оптимизировать радиосвязь, по-

высить надежность систем радионавигации и улучшить качество радиолокационных систем.

Большинство задач в радиолокации и пеленгации решается с использованием антенных решеток (АР). Прямоугольная антенная решетка (Rectangular Antenna Array) — это особый тип антенной системы, состоящий из регулярного прямоугольного массива множества антенн, расположенных на равных расстояниях друг от друга в виде сетки. Каждая антенна в решетке является активной точкой приема или передачи сигналов. Принцип действия прямоугольной антенной решетки основан на комбинировании сигналов, полученных от каждой антенны в массиве. Путем управления фазой и амплитудой сигнала на каждой антенне можно формировать и настраивать направленные лучи сигнала. Каждая антенна в решетке синхронизирована по фазе и также расположена в строго определенных пространственных координатах. Это позволяет антеннам взаимодействовать друг с другом и формировать усиленный направленный луч. За счет изменения фазы (и амплитуды) сигналов на каждой антенне в массиве можно контролировать фазовое распределение в пространстве, что приводит к формированию желаемого направленного луча. Используя информацию о фазовых различиях между сигналами, полученными от разных антенн в решетке, можно определить угловые координаты источника сигнала. Большое число антенн в решетке позволяет получить высокую пространственную разрешающую способность, что помогает локализовать источник сигнала с высокой точностью.

#### Методы последовательной и параллельной пеленгации источников излучения

Известные методы углового сверхразрешения, способные обеспечить высокую точность определения координат источников излучения (ИИ) можно разбить на два больших класса: параллельные и последовательные.

Методы последовательной пеленгации: метод неискаженного отклика с наименьшей дисперсией (MVDR — Minimum Variance Distortionless Response) или метод Кейпона (J. Capon), метод классификации множественных сигналов (MUSIC — Multiple Signal Classification) и другие. При последовательной направленной пеленгации ИИ используется последовательная компенсация сигнала, полученного от каждого источника, и сравнение его с пределом обнаружения. Эти методы применяются для поиска источников излучения в конкретном направлении, используя непосредственную информацию о направлении отраженных сигналов. К недостаткам этих методов можно отнести: длительное время обработки сигнала, так как требуется последовательное позиционирование источников, а также снижение точности

в определении положения источников из-за ограниченной информации о направлении отраженных сигналов.

Методы параллельной пеленгации: метод ROOT-MUSIC, метод Писаренко, метод параллельного обзора пространства (ESPRIT — Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) и другие. При параллельной пеленгации происходит совместное обнаружение ИИ во всех направлениях (определяются относительные мощности и направления сигналов, полученных с нескольких антенн, установленных в различных местах). Однако, эти методы требуют более высоких вычислительных ресурсов и мощности, особенно при обработке большого количества данных с нескольких антенн одновременно. Кроме того, при параллельной пеленгации требуется точная синхронизация антенн. Несовместимость или неточность синхронизации антенн может негативно сказаться на результате позиционирования.

#### Характеристики методов определения координат источников излучения с высоким разрешением

Рассмотрим преимущества и недостатки наиболее известных методов пеленгации:

1. Метод и алгоритмы многофакторного анализа сигнала MUSIC (Multiple Signal Classification) — последовательный метод обзора пространства, т.е. последовательное направление пеленгации источника излучения (ИИ) [2,3,4].

Преимущества: хорошая разрешающая способность в условиях малого шума, высокая точность определения направления источника сигнала, возможность обработки нескольких источников одновременно.

Ограничения: чувствительность к высокому уровню соотношения сигнал/шум, что влияет на точность определения угловых координат, когда источники близко расположены друг к другу. Кроме того, для организации вычислений требуется априорная информация о предполагаемом количестве источников и их угловых координатах.

2. Метод неискаженного отклика с наименьшей дисперсией (MVDR — Minimum Variance Distortionless Response) или метод Кейпона, основан на минимизации дисперсии сигнала с сохранением его неискаженности [5,6].

Преимущества метода: высокая разрешающая способность при небольшом уровне шума или искажении волнового фронта, возможность учета пространственной корреляции сигналов.

Ограничения: метод не позволяет разделять сколь угодно близкие источники при точно известной корреляционной матрице сигнала, требуется сравнительно большой объем вычислений, снижена чувствительность к высоким уровням шума, что может привести к неправильному определению угловых координат.

3. Метод ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) — метод параллельного обзора пространства, т.е. параллельная пеленгация источников излучения [7, 8, 9, 10]. Для функционирования ESPRIT необходима AP состоящая из двух одинаковых или одинаково ориентированных подрешеток. Это численный метод, позволяющий оценить параметры суммы синусоид на фоне шумов по серии измерений расчетным путем, без поиска локальных максимумов по координатам. При этом обеспечивается высокая надежность и точность.

Преимущества метода: высокая разрешающая способность по различению близко находящихся источников при низком уровне шума, возможность обработки нескольких сигналов одновременно.

Ограничения: потребность в априорной информации о количестве источников и их угловых координатах, возникновение ошибок при наличии коррелированного шума.

4. Метод ROOT-MUSIC для нахождения угловых координат ИИ использует ортогональность собственных сигнальных и шумовых векторов и применяется для линейных антенных решеток [11,12]. Создается матрица ковариации, отражающая статистическую корреляцию между сигналами, полученными на разных антеннах. Затем проводится анализ собственных векторов корреляционной матрицы. Отличительной особенностью метода является более высокая точность оценивания угловых координат даже в условиях помех и интерференции.

К достоинствам метода Root-MUSIC можно отнести независимость от количества ИИ, высокую скорость сканирования и хорошую разрешающую способность при определении направлений ИИ даже в условиях сложных помеховых и шумовых сигналов. Более того, возможно подавление помех и нежелательных сигналов, что дополнительно увеличивает точность пеленгации. Root-MUSIC обладает низкой вычислительной сложностью, что делает его практичным для использования в реальном времени.

Недостатки метода Root-MUSIC: чувствительность к передвижению ИИ, применимость только к линейной геометрии антенной решетки.

### Сравнительный системный анализ методов пеленгации источников сигналов

Алгоритмы MUSIC, Root-MUSIC, ESPRIT и MVDR являются наиболее распространенными методами для пеленгации источников сигналов. При сравнении этих алгоритмов можно использовать следующие численные показатели:

Разрешающая способность (Angular resolution), т.е. способность алгоритма различать источники сигнала, находящиеся близко друг к другу в пространстве. Более высокое значение разрешающей способности говорит о возможности более точного разделения источников сигнала.

Пространственная спектральная разделимость (Spatial spectral separation) — способность алгоритма отделять разные источники сигнала только на основе их направлений. Более высокое значение спектральной разделимости указывает на более эффективное разделение источников сигналов.

Устойчивость к помехам (Resistance to noise) — характеризует способность алгоритма обрабатывать сигналы в условиях шума и помех. Более высокая устойчивость к помехам означает более эффективное подавление шума и помех, что приводит к более точным результатам пеленгации.

Вычислительная сложность (Computational complexity) для реализации алгоритма (чем ниже этот показатель, тем более быстро и эффективно обрабатывается сигнал в реальном времени).

Таким образом, высокая разрешающая способность и пространственная спектральная разделимость гарантируют точность определения направлений источников сигнала. Устойчивость к помехам — ключевой фактор надежности системы в реальных условиях. Низкая вычислительная сложность обеспечивает скорость обработки сигналов без необходимости использования значительных вычислительных ресурсов.

На основании обзора литературы и диссертационных исследований [13, 14, 15] была проведена экспертная оценка этих показателей (табл. 1). Оценка производилась экспертно в баллах (от 1 до 10, где 10 — наивысшая оценка).

### Выводы

1. Методы MUSIC, ROOT-MUSIC и ESPRIT интенсивно исследуются как в России, так и за рубежом. В научно-технической литературе предложено большое количество модификаций этих методов.

Таблица 1.  
Сравнительный системный анализ характеристик методов пеленгации ИИ

Показатель	MUSIC	MVDR	ESPRIT	Root-MUSIC
Разрешающая способность	8	7	9	10
Чувствительность к помехам (по соотношению сигнал/шум)	8	9	7	9
Пространственная спектральная разделяемость	7	10	8	9
Вычислительная сложность	6	7	9	9

2. Разрешающая способность методов параллельной пеленгации (ROOT-MUSIC и ESPRIT) больше разрешающей способности методов последовательной пеленгации (MUSIC и MVDR), однако методы с параллельной обработкой данных требуют

больших вычислительных ресурсов и временных затрат.

- MVDR имеет высокую устойчивость к помехам и шуму. Он использует модель ковариационной матрицы, что позволяет эффективно подавлять помехи и улучшать качество сигнала. Это делает MVDR надежным и стабильным алгоритмом даже в условиях сильного шума.
- Выбор между алгоритмами зависит от специфических требований приложения, условий рабочей среды, доступных ресурсов и других факторов. При наличии помех или необходимости работы в сложных условиях, алгоритмы MVDR и ROOT-MUSIC более предпочтительны для достижения более надежной и точной пеленгации. Однако, в простых условиях среднего и низкого уровня шума, алгоритм MUSIC может быть более применимым и достаточным.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Radar Systems — Global Strategic Business Report, ID: 4805409, URL: [https://www.researchandmarkets.com/report/radar-systems?utm\\_source=GNE&utm\\_medium=PressRelease&utm\\_code=jqlhgp&utm\\_campaign=1908376+--+Global+Radar+Systems+Market+Report+2023%3a+Players+Include+Raytheon%2c+Reutech+Radar+Systems%2c+Rheinmetall+and+Rockwell+Collins&utm\\_exec=jamu273prd](https://www.researchandmarkets.com/report/radar-systems?utm_source=GNE&utm_medium=PressRelease&utm_code=jqlhgp&utm_campaign=1908376+--+Global+Radar+Systems+Market+Report+2023%3a+Players+Include+Raytheon%2c+Reutech+Radar+Systems%2c+Rheinmetall+and+Rockwell+Collins&utm_exec=jamu273prd), (дата обращения 02.12.2023)
- Сухов И.А., Акимов В.П. Метод повышения разрешающей способности пеленгатора с кольцевой антенной решеткой при использовании алгоритма MUSIC // Информатика, телекоммуникации и управление. 2013. №3 (174). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-povysheniya-razreshayushey-sposobnosti-pelengatora-s-koltzovoy-antennoy-reshetkoy-pri-ispolzovanii-algoritma-music> (дата обращения: 02.12.2023).
- Schmidt R.O. Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Transactions on Antennas Propagation. — 1986. — Vol. AP-34. — № 3. — P. 271–280.
- MUSIC and improved MUSIC algorithm to estimate direction of arrival / Gupta S. K. P. [et al] // SPACES-2015, Dept of ECE, K L UNIVERSITY, 2015. — P. 309–313.
- Capon, Jack. «High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis.» Proceedings of the IEEE 57, no. 8 (1969): 1408–1418.
- Чистяков, В.А. Сравнительный анализ разрешающей способности методов сверхразрешения MVDR и MUSIC / В.А. Чистяков. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 16 (306). — С. 165–168. — URL: <https://moluch.ru/archive/306/68978/> (дата обращения: 02.12.2023).
- R. Roy and T. Kailath, ESPRIT—Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-37, pp. 984–995, 1989.
- Петров В.П., Шаурман А.К. Спектральные способы оценки направления источников сигналов в адаптивных антенных решётках // Вестник СибГУТИ. 2011. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/spektralnye-sposoby-otsenki-napravleniya-istochnikov-signalov-v-adaptivnyh-antennyh-reshyotkah> (дата обращения: 02.12.2023).
- Shevchenko M. & Gorovoy, A. & Balashov, V. & Solovoyov, S. (2021). Features of application of ESPRIT method for different configurations of antenna arrays. Issues of radio electronics. 30-37. 10.21778/2218-5453-2020-12-30-37.
- 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.
- Москалец Н.В. Сравнительный анализ методов оценки направления прихода сигналов / Н.В. Москалец // Радиотехника: Всеукраинский межведомственный науч.-техн. сборник № 188 / Харьков, 2017.
- Duy-Thai Nguyen, Thanh-Hai Le, Van-Sang Doan, Van-Phuc Hoang, UNet-rootMUSIC: A high accuracy direction of arrival estimation method under array imperfection, AEU — International Journal of Electronics and Communications, V.173, 2024, 155008, <https://doi.org/10.1016/j.aeu.2023.155008>.
- Сафонова А.В. Эффективные алгоритмы оценивания угловых координат источников радиоизлучения, [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.12.04 и 05.12.14: защищена 10.02.2016 / Автор Сафонова А.В. — Рязань, 2016. — 113 с.
- Шмонин О.А. Разработка методов двумерного углового разрешения источников излучения в адаптивных антенных системах [Текст]: дис. канд. физ.-мат. наук: 1.3.4.: защищена 28.09.2022 / Автор Шмонин О.А. — Нижний Новгород, 2022. — 141 с.
- Макаров Е.С. Анализ углового сверхразрешения источников электромагнитного поля в многоканальных системах с малой апертурой, [Текст]: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.03.: защищена 19.03.2009 / Автор Макаров Е.С. — Воронеж, 2009. — 164 с.