

Сравнительный анализ работы динамической модели координатометрии близкорасположенных источников сигналов

Д. С. Сыроветник

ООО «Амунго»

syrovetnikds@amungo-navigation.com

Аннотация. Определение направления на источники излучений, а, тем более, их координатное разрешение всегда было одной из наиболее востребованных задач радиолокации и радиомониторинга, а в последние годы и совсем вышло на самый приоритетный уровень. Именно поэтому разработки новых и модернизация существующих алгоритмов пеленгования и координатометрии так важны в настоящее время. Целью этой статьи является сравнение работы разрабатываемой модели координатометрии на двух антенных решетках – с 4 и с 16 элементами. Для получения результатов применялись алгоритм сверхразрешения MUSIC, метод наименьших квадратов и положения аналитической геометрии. Были рассмотрены похожие пространственно-мощностные ситуации с целями, излучающими нежелательные радиосигналы, и объектами, принимающими и анализирующими их, для антенных решеток малого и большого размеров. Установлено, что, несмотря на увеличившуюся сложность расчета и применения алгоритма координатометрии к антенной решетке из 16 элементов, его использование оправдано и дает удовлетворительные результаты по точности определения координат, сравнимые с результатами на малой решетке.

Ключевые слова: антенная решетка, пеленгация, сверхразрешение, координатометрия, MUSIC, MATLAB

I. ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом число источников радиосигналов неизменно увеличивается. Разрабатываются новые и модернизируются уже существующие системы связи на всех частотах от длинноволнового (ДВ) до ультракоротковолнового (УКВ) диапазонов. Тенденция на миниатюризацию терминалов связи и их совместное использование на близких расстояниях друг от друга ставит сложную задачу перед современным научно-конструкторским обществом по созданию новейших алгоритмов и систем координатометрии [1]. В данной статье рассматривается динамическая модель координатометрии, имитирующая работу нескольких некоррелированных близкорасположенных источников сигналов и приемников, представляющих собой плоские эквидистантные антенные решетки (АР) из 4 и 16 патч-антенн. Основной целью этой работы является сравнение результатов работы модели для случаев антенных решеток с различным числом элементов. Как известно, количество возможных распознаваемых источников сигналов не может превышать $N-1$, где N – число антенных элементов [2]. Для некоторых особо сложных ситуаций, в которых необходимо произвести разрешение принимаемого сигнала на большое число компонент,

может понадобиться использование габаритного пеленгатора. Именно поэтому особый интерес представляет анализ модели на малогабаритной антенной решетке 2×2 из 4 элементов и более крупном ее аналоге 4×4 из 16 элементов. В данной работе основным критерием для сравнения выступит точность определения координат источников сигналов, а именно – значение девиации ошибки расчетов на некотором временном промежутке, то есть в динамике. Гипотеза исследования состоит в том, что, несмотря на увеличение числа антенных элементов и усложнение вычислительных требований к расчетам по сверхразрешению источников сигналов, результаты на обеих антенных решетках не будут сильно отличаться. Отдельный интерес может представлять поведение модели в экстремальных случаях, при рассмотрении ситуации с максимально возможным числом подсигналов. Данное исследование представляет собой продолжение разработки модели координатометрии близкорасположенных источников сигналов и основывается на ранее опубликованных работах по сравнительному анализу существующих алгоритмов сверхразрешения [3], по реализации алгоритма координатометрии [4] и по созданию приложений статической [5] и динамической [6] моделей в среде MATLAB.

II. ПРИЛОЖЕНИЕ MATLAB

A. Графический интерфейс

Для проработки алгоритма координатометрии на различных пространственно-мощностных ситуациях источников сигналов и приемников, было создано приложение в среде MATLAB. На текущий момент оно позволяет задавать исходные параметры системы и просматривать результаты в графическом интерфейсе. Его можно разделить на следующие блоки:

- параметры источников сигналов ('targets')
- параметры приемников ('receivers')
- параметры пеленгаторов ('direction finder')
- параметры траектории ('trajectory')
- результаты в табличном и графическом виде ('results')

Пример интерфейса приложения после ввода исходных параметров представлен на рис. 1.

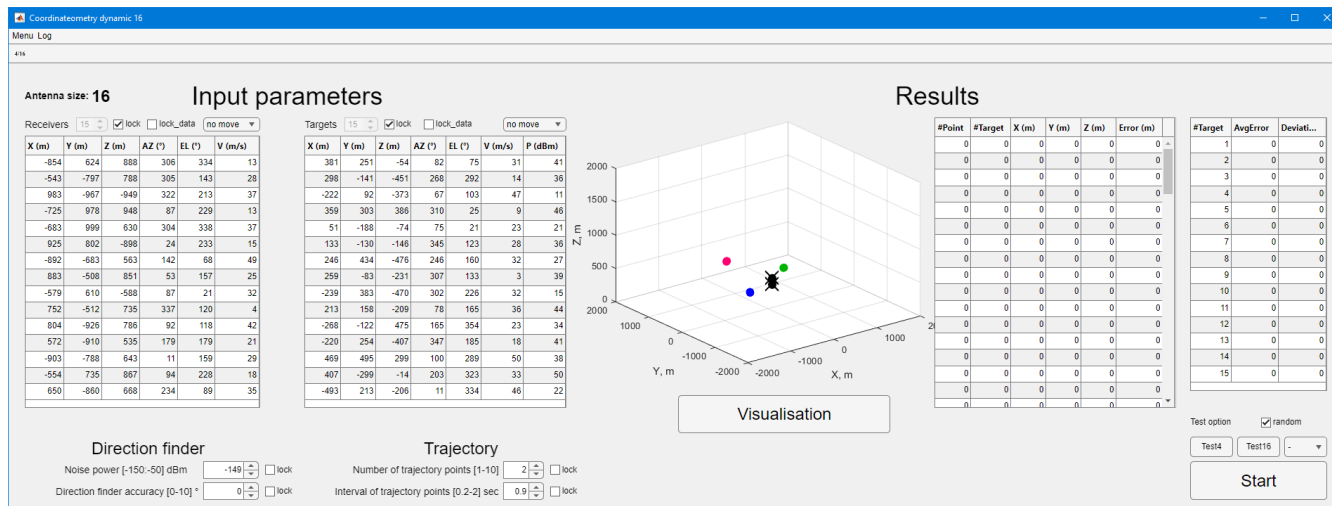


Рис. 1. Графический интерфейс приложения MATLAB

Параметры источников сигналов задаются в виде выпадающего списка с их количеством, а также таблицы, в которую вносятся координаты X, Y, Z, углы азимута и места, соответствующие направлению траектории их движения, скорость, а также мощность излучения. Для комфортного тестирования реализованы функции блокировки заданных значений, готовые наборы тест-векторов и возможность случайной генерации параметров. Параметры приемников в целом полностью повторяют параметры источников сигналов за исключением отсутствия мощности излучения по понятным причинам.

Параметры пеленгаторов задаются в виде значения уровня шума на входе приемника (от -150 до -50 дБм), а также гипотетической точности работы пеленгатора (от 0 до 10 градусов). Исходя из мощности излучения источника сигнала и расстояния до приемника, полученного по заданным координатам, рассчитывается уровень сигнала на приеме. Добавляя к этому значению уровень шума пеленгатора, получаем величину ОСШ (отношение сигнал-шум), играющее важнейшую роль в способности устройства стабильно распознавать приходящие сигналы. Исходя из реальных пеленгов на передатчики, рассчитанные по координатам объектов в системе, и добавляя случайное отклонение в диапазоне, удовлетворяющее точности работы пеленгатора, мы получаем его неидеальное выходное значение, близкое к реальной ситуации и учитывающее возможную неоптимальную помеховую обстановку.

Параметры траектории представляют собой количество точек (моментов измерений) и временной интервал между ними. Для упрощения модели было решено ограничиться числом точек от 1 до 10 с периодом от 200 до 2000 миллисекунд. После окончательной реализации модели динамической системы можно будет изменить параметры траектории для более продолжительных и сложных вариантов.

Блок результатов представляет собой две таблицы с результатами в виде рассчитанных координат источников сигналов, значением ошибки вычислений и СКО этих значений. Также присутствует графическое представление работы системы с отображением приемников, реальных (черный круг) и расчетных (черный крест) координат передатчиков, а также с

возможностью проигрывания анимации траекторий движений всех объектов модели.

В. Принцип работы модели

Алгоритм работы модели динамической координатометрии можно описать следующей последовательностью действий. Сначала задаются исходные параметры системы, в частности координаты передатчиков и приемников. Из их геометрии рассчитываются реальные пеленги. Затем генерируется сигнал плоской волны вида $x = \sum_i A \cos(2\pi f t) + N$,

являющийся суммой подсигналов, приходящих с разных направлений и шума. Далее применяется один из основополагающих алгоритмов модели – алгоритм сверхразрешения MUSIC. Реализующая его функция в качестве параметров помимо непосредственно сигнала принимает математические характеристики антенной решетки, в том числе и количество антенных элементов. Этот этап и является основным предметом исследования. Будут рассмотрены два варианта антенных решеток – с 4 и с 16 элементами. В результате применения алгоритма MUSIC для каждого из приемников будут получены пары углов (азимут и угол места пеленга) в количестве, равном числу передатчиков или меньше (в случае неудачного разрешения направлений приходов сигналов). Зная координаты объектов и пеленги, можно построить лучи, пересечение которых или, правильнее сказать, такая точка, сумма расстояний от которой до всех лучей будет минимальным, может являться рассчитанной координатой одного из источников сигналов. Наконец, по расчетным координатам и их реальным значениям подсчитываются значения средней ошибки вычислений и их среднеквадратичное отклонение (СКО) на протяжении всей динамики движения объектов в модели. Эти результаты выводятся на графический интерфейс приложения.

III. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Основной задачей данной работы является изучение работы модели на габаритной антенной решетке с 16 антенными элементами, а также сравнение полученных результатов с меньшим её аналогом.

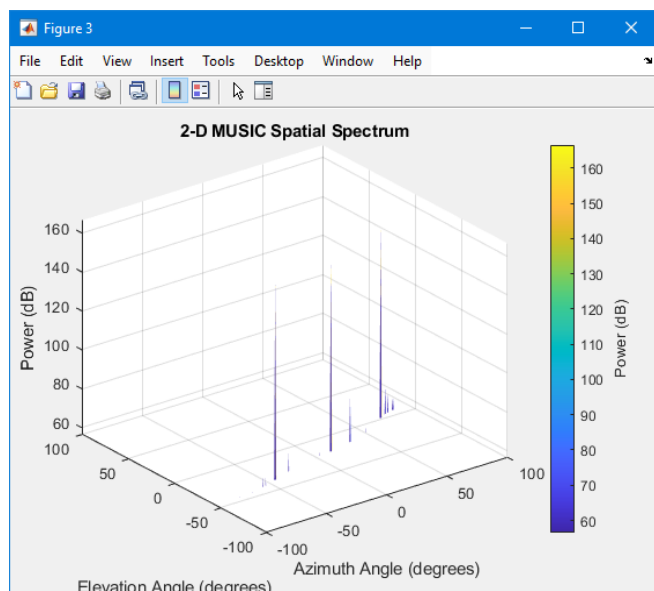


Рис. 2. Работа алгоритма MUSIC для АР из 4 элементов и 3 целей

Для правильного сравнения ситуаций с разными антенными решетками исходные данные для соответствующих тестов были взяты одинаковые, за тем лишь исключением, что в случае антенной решетки из 4 элементов не могло быть более 3 передатчиков.

Всего было проведено 18 тестовых запусков программы. Рассматривались случаи с разным числом целей. Для 4-элементной решетки были выбраны ситуации с 1, 2 и 3 целями, для 16-элементной – с 1, 8 и 15. В каждом из этих тестов были рассмотрены разные варианты движения приемников: они двигались к центру системы координат, от него или же перемещались каждый к своему соседу в режиме «патрулирования». В целях снижения аппаратной нагрузки вычислений и ускорения этого процесса, число приемников для соответствующих тестов было выбрано в количество 15, 4 и 3 штук соответственно. При максимальном числе передатчиков в случае антенной решетки из 16 элементов, вычислительные сложности начинаются уже от 3 приемников. Это происходит из-за того, что после применения алгоритма MUSIC необходимо отсортировать полученные результаты пеленгов, сопоставив найденные пары углов наиболее подходящим передатчикам. Для этого, собрав данные со всех приемников, происходит процесс перебора вариантов. Число таких вариантов можно сосчитать по следующей формуле: $N = T^R$, где N – общее число вариантов, T – число передатчиков, R – число приемников. Из-за такой экспоненциальной сложности было решено ввести ограничение на число приемников.

Другие параметры системы были выбраны следующими: число точек траектории – 10, интервал времени между замерами – 1 секунда, точность пеленгатора – 1° . Таким образом, динамическая модель в каждой точке траектории решает статическую задачу координатометрии и изменяет текущие координаты всех объектов в соответствии с направлением движения, скоростью и интервалом времени. При этом работа пеленгатора приближена к реальным устройствам, выдающим результат с некоторой погрешностью.

А. Антенная решетка из 4 элементов

В случае использования антенной решетки из 4 элементов каждый приемник имеет возможность распознать только 3 некоррелированных сигнала. В некоторых задачах этого может быть недостаточно. Также в более ранних исследованиях были замечены выбросы по результатам координатометрии в экстремальном случае с тремя передатчиками, а иногда и вовсе распознавалось меньшее число целей. То есть, в случае антенной решетки из 4 элементов комфортно работать можно только с парой сигналов, в случае же трёх целей при некоторых пространственно-мощностных ситуациях можно не получить выгоды.

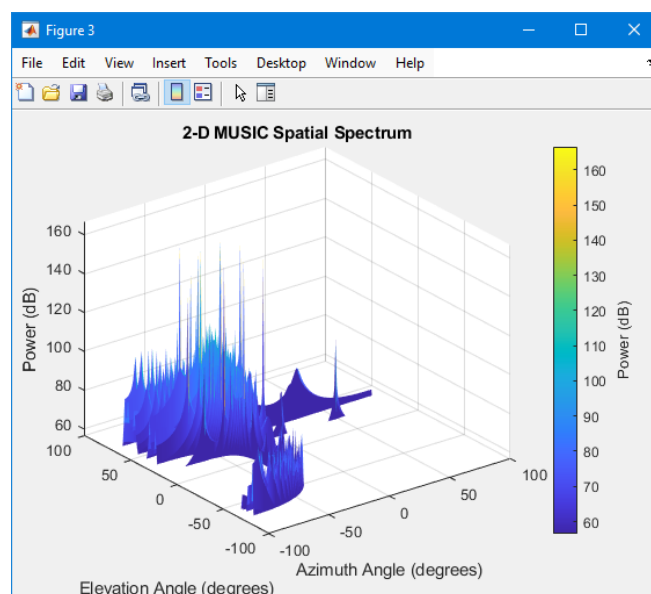


Рис. 3. Работа алгоритма MUSIC для АР из 16 элементов и 15 целей

Результат работы алгоритма MUSIC для случая антенной решетки из 4 элементов представлен на рис. 2. На нем видны три ярко выраженных пика, что говорит о хорошем отношении сигнал-шум принятого сигнала и благоприятном расположении источников сигналов вокруг приемного устройства.

В. Антенная решетка из 16 элементов

Для задач сверхразрешения с большим числом источников сигналов, находящихся близко друг к другу, вероятно, будет недостаточно использовать только 4 антенных элемента. Так как в модели рассматриваются только планарные эквидистантные решетки и с точки зрения удобства программирования и управления потенциального приемного устройства, было решено исследовать пеленгатор из 16 элементов. По сравнению с менее габаритным аналогом, эта антенная решетка способна распознавать в разы больше источников сигналов, характеризуется лучшей направленностью, имеет менее широкий главный лепесток диаграммы направленности и обладает лучшей чувствительностью в силу большей апертуры. Тем не менее, остается открытым вопрос о точности работы алгоритма сверхразрешения и координатометрии с ней, не возникнет ли дополнительной ошибки из-за совместной обработки такого числа источников сигналов.

Результат работы алгоритма MUSIC для случая антенной решетки из 16 элементов представлен на рис. 3.

Не все 15 пиков видны явно, некоторые из них могут быть выявлены ошибочно из-за низкого ОСШ и ложных максимумов функции.

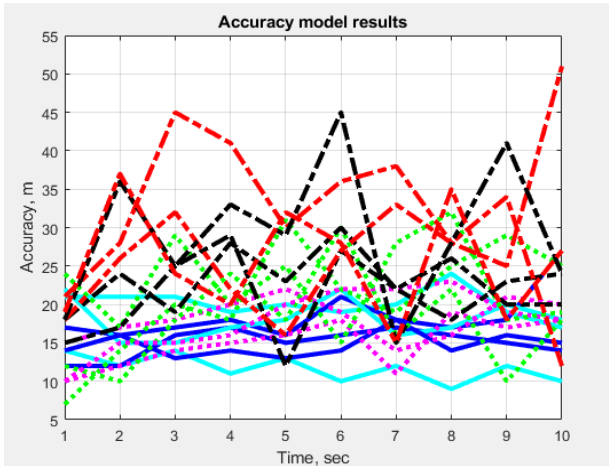


Рис. 4. Тесты модели координатометрии на разных АР (18 тестов)

С. Сравнение результатов

Получившиеся 18 вариантов для тестов были занесены в модель динамической координатометрии. Результаты её работы отображены на рис. 4 и в табл. 1.

Для случая с одним передатчиком (бирюзовый и зеленый цвета для, соответственно, антенной решетки из 4 и 16 элементов) ожидаемо были получены самые лучшие результаты – ошибка определения координат за редким исключением превосходила 20, девиация не превышала 5.

При повышении числа источников сигналов – до 2 в случае маленькой антенной решетки (розовый) и до 8 у большего аналога (зеленый), наблюдались незначительные ухудшения результатов по сравнению с первыми тестами, но в целом оставались удовлетворительными и друг от друга особо не отличались. На обеих решетках получена точность координатометрии до 30 метров с СКО не больше 10.

В экстремальных случаях (3 передатчика для АР из 4 элементов и 15 передатчиков для АР из 16 элементов), обозначенных на графике черным и красным цветом соответственно, результаты также были схожи между собой. Благодаря выбору высоких параметров ОСШ и точности работы пеленгатора, удалось добиться хорошей точности координатометрии. Ошибка расчетов не превысила 40 метров, с СКО 11–12 метров.

Проведенные тесты показали, что модель результаты работы модели не сильно отличаются для антенных решеток из 4 и 16 элементов.

ТАБЛИЦА I.

№	Количество передатчиков	Количество приемников (4/16)	Тип движ.	Ошибка/СКО ошибки АР-4	Ошибка/СКО ошибки АР-16
1	15	1/1	in	19/2	22/5
2	15	1/1	out	11/2	15/2
3	15	1/1	patrol	18/3	15/2
4	4	2/8	in	18/5	21/7
5	4	2/8	out	15/4	18/6
6	4	2/8	patrol	18/5	22/7
7	3	3/15	in	21/8	33/11
8	3	3/15	out	23/7	24/10
9	3	3/15	patrol	29/11	25/12

IV. Выводы

По результатам проведенных тестов модели динамической координатометрии в приложении MATLAB можно сделать вывод, что оно подходит для работы с антенными решетками, как с 4, так и с 16 антенными элементами.

Были рассмотрены ситуации с различным пространственно-мощностным расположением объектов в системе, количеством передатчиков и приемников, а также типом траекторий движения. Успешно применен алгоритм координатометрии к обоим типам антенных решеток, получены схожие результаты, не превышающие нескольких десятков метров по точности определения координат и их среднеквадратическому отклонению. В будущем планируется рассмотреть существующие метаэвристические алгоритмы и выбрать наиболее эффективный из них для задачи обработки результатов алгоритма сверхразрешения MUSIC.

По результатам данной работы разрабатываемая модель будет применена для ситуаций, требующих разрешения больше 3 (и меньше 16) источников сигналов и, соответственно, применения антенной решетки из 16 антенных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Сравнительный анализ устройств для радиопеленгации и пассивной радиолокации, доступных для гражданского применения / И.С. Бобылкин, А.В. Иванов, А.А. Куземкин, Д.А. Ямпольский // Актуальные проблемы деятельности подразделений уголовно-исполнительной системы: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 19 октября 2023 года. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», ФКОУ ВО Воронежский институт ФСИН России., 2023. С. 246–252. EDN CBHNPW.
- [2] O. Hu, F. Zheng, and M. Faulkner “Detecting the number of signals using antenna array: a single threshold solution,” Fifth International Symposium on Signal Processing and its Applications, August 1999.
- [3] Глушанков Е.И. Определение координат источников сигналов с использованием алгоритмов сверхразрешения / Е.И. Глушанков, Д.С. Сыроветник // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2023): Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей: Сборник лучших докладов в 2 томах, Санкт-Петербург, 05–07 декабря 2023 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2023. С. 94–99. EDN UKGFCP.
- [4] Глушанков Е.И. Координатометрия близконаходящихся источников сигналов с использованием алгоритма сверхразрешения MUSIC / Е.И. Глушанков, Д.С. Сыроветник // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024): Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2024 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2024. С. 165–169. EDN MMMVRJ.
- [5] D. Syrovetsnik, Y. Glushankov, Z. Kondrashov and D. Kirik, "Static Coordinateometry of Nearby Signal Sources Using the Super-Resolution Algorithm MUSIC," // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617645.
- [6] Глушанков Е.И., Кондрашов З.К., Сыроветник Д.С., Рылов Е.А. Динамическая модель координатометрии близкорасположенных источников сигналов с использованием алгоритма сверхразрешения MUSIC. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2025, 13(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1775> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.004