

УДК 621.396.96

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.48.1.004](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.004)

Динамическая модель координатометрии близкорасположенных источников сигналов с использованием алгоритма сверхразрешения MUSIC

Е.И. Глушанков^{1,2}, З.К. Кондрашов², Д.С. Сыроветник³, Е.А. Рылов⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф.
М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт микроэлектронной аппаратуры «Прогресс»,
Москва, Российская Федерация

³ООО «Амунго», Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴Проектно-конструкторское бюро «РИО», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Резюме. В последние годы задача радиолокации и радиопеленгации является очень актуальной благодаря стремительному развитию микроэлектроники малогабаритных беспилотных устройств и терминалов связи. Статья посвящена определению координат источников сигналов. В частности, исследуются близкорасположенные, некоррелированные источники и приемные антенные решетки на нескольких разнесенных в пространстве мобильных устройствах. Для разрешения таких источников сигналов используется алгоритм сверхразрешения MUSIC с последующим решением задачи координатометрии с помощью метода наименьших квадратов. Была создана программная модель в среде MATLAB, реализующая динамическую систему, в которой у каждого из радиоустройств есть свои траектории и показатели скорости. Проведен сравнительный анализ точности получаемых результатов в различных ситуациях с точки зрения геометрии и динамики. Установлено, что наиболее эффективно алгоритм работает в случае нахождения целей внутри зоны, образованной сканирующими объектами. При этом достигается точность определения координат, сравнимая с дистанцией между источниками сигналов. На основе полученных результатов можно осуществлять построение радиолокационных приемников для пеленгации близкорасположенных источников сигналов в основном лепестке диаграммы направленности приемной антенны локационной станции, что требуется при решении ряда задач локации и мониторинга в условиях сложной радиоэлектронной обстановки.

Ключевые слова: пеленгация, координатометрия, сверхразрешение, MUSIC, MATLAB.

Для цитирования: 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://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1775> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.004

Dynamic model of coordinateometry of nearby signal sources using the super-resolution algorithm MUSIC

E.I. Glushankov^{1,2}, Z.K. Kondrashov², D.S. Syrovetnik³, E.A. Rylov⁴

¹The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
Saint-Petersburg, the Russian Federation

²Research Institute of Microelectronic Equipment "Progress", Moscow,
the Russian Federation

³Amungo LLC, Saint-Petersburg, the Russian Federation

⁴Design Bureau "RIO", Saint-Petersburg, the Russian Federation

Abstract. In recent years, the problem of radar and radio direction finding has become very relevant due to the rapid development of microelectronics for small-sized unmanned aerial vehicles and communication terminals. The article is devoted to determining the coordinates of signal sources. In particular, closely spaced, uncorrelated emitters and receiving antenna arrays on several mobile devices spaced apart in space are investigated. To resolve such signal sources, the MUSIC super-resolution algorithm is used, followed by solving the coordinate measurement problem using the least squares method. A software model was created in the MATLAB environment, implementing a dynamic system in which each radio device has its own trajectories and speed indicators. A comparative analysis of the accuracy of the results obtained in various situations from the point of view of geometry and dynamics was carried out. It was found that the algorithm works most effectively in the case of targets located inside the zone formed by the scanning objects. In this case, the accuracy of determining coordinates is comparable to the distance between the signal sources. Based on the obtained results, it is possible to construct radar receivers for direction finding of nearby signal sources in the main lobe of the directional pattern of the receiving antenna of a location station, which is required when solving a number of location and monitoring problems in a complex electronic environment.

Keywords: direction finding, coordinateometry, super-resolution, MUSIC, MATLAB.

For citation: Glushankov E.I., Kondrashov Z.K., Syrovetsnik D.S., Rylov E.A. Dynamic model of coordinateometry of nearby signal sources using the super-resolution algorithm MUSIC. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(1). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1775> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.004

Введение

Задачи радиолокации и радиопеленгации были актуальны с начала XX века и являются одними из важнейших и в настоящее время [1]. В современных условиях для передачи данных и организации связи используются малогабаритные устройства и терминалы, развертываемые на всех типах подвижных объектов, на различных ландшафтах и участках местности. Именно благодаря малым размерам, относительной дешевизне и повсеместности применения появляется острая необходимость во все более модернизированных системах определения направления на источники сигналов и их местоположение при использовании малоэлементных антенных систем на объектах [2]. В данной статье представлена система, реализованная в среде MATLAB, позволяющая промоделировать современную ситуацию излучения близкорасположенных сигналов и их динамическую координатометрию. Эта работа является продолжением статической версии, рассмотренной в [3], и добавляет в нее возможность задавать траектории исследуемых объектов, движущихся на определенной скорости. Для рассмотрения были выбраны источники излучения неизвестного происхождения, без привязки к определенным физическим антенным структурам. В качестве пеленгаторов, принимающих эти сигналы и определяющих направление на них, были подобраны антенные решетки, состоящие из четырех антенных элементов. Выбор малоэлементных антенн связан с потенциальным применением разрабатываемой системы на подвижных объектах, небольших пунктах связи и прочих малогабаритных конструкциях.

Методы сверхразрешения и координатометрии

В разрабатываемой системе предусматривается некоторое число некоррелированных источников сигналов, разнесенных в пространстве и излучающих сигналы в определенном диапазоне частот с задаваемой мощностью. Назовем их целями. Также в системе существуют устройства с приемными антенными решетками на борту, которые принимают приходящие сигналы от целей. Назовем их объектами. Задача группы объектов – определить пеленги, а затем и координаты целей.

В качестве антенных решеток (АР) были рассмотрены простейшие плоские эквидистантные прямоугольные панели из четырех антенных элементов. Математическая модель такой АР изображена на Рисунке 1.

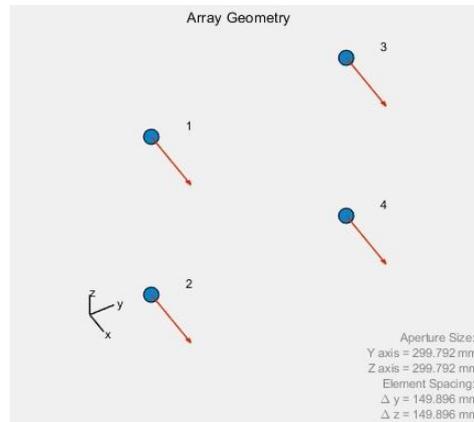


Рисунок 1 – Антенная решетка из четырех элементов
 Figure 1 – Four-element antenna array

Ранее также были рассмотрены антенные решетки, состоящие из шестнадцати антенных элементов. На некоторых, высоких частотных диапазонах связи их применение могло бы быть обусловлено, но в большинстве случаев наибольший интерес и практическую эффективность показывают именно малоэлементные антенные решетки [4].

Первой задачей в системе координатометрии является определение пеленгов на цели. Для этого используются специальные математические алгоритмы, которых существует достаточно большое многообразие [5]. Проведенный анализ наиболее популярных алгоритмов разрешения [6], среди которых были выбраны алгоритм сканирования лучом (Beamscan, BSA), алгоритм минимума дисперсии шума (MVDR, Capon), алгоритм множественного разрешения сигналов (MUSIC) и алгоритм методов ротационной инвариантности (ESPRIT). По результатам тестирования наиболее эффективным в статических ситуациях сигнально-помеховой обстановки (при неподвижных объектах и целях) был алгоритм MUSIC, что совпадает и с исследованиями других авторов [7]. Результат работы алгоритма MUSIC представлен на Рисунке 2, где по оси X и Y отложены соответственно азимут и угол места зоны сканирования, а по оси Z – спектральная мощность в децибелах.

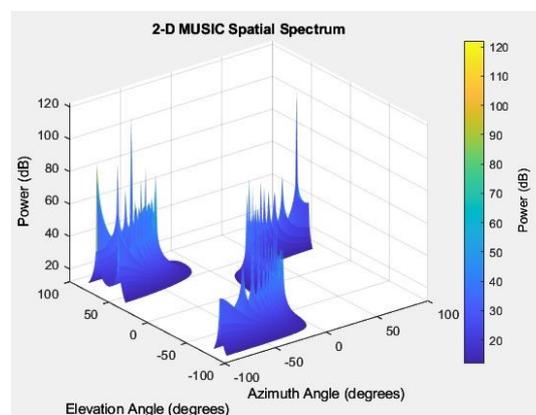


Рисунок 2 – Результат работы алгоритма MUSIC
 Figure 2 – Result of the MUSIC algorithm

Задача координатометрии может решаться разными способами [8], среди которых наиболее распространены такие методы, как метод среднего арифметического, метод среднего квадратического, метод медианного, метод среднего по размаху, метод наименьших квадратов, метод средневзвешенных координат и другие [9]. Наша задача заключается в попарном пересечении линий положения и в рассматриваемой системе мы используем направляющие вектора и метод наименьших квадратов. Таким образом, задача сводится к поиску точки $a(x, y, z)$, для которой значение функции f минимально:

$$f = \sum_{n=1}^N D(a; a_0, p),$$

где a – точка, из которой строится перпендикуляр, a_0 – точка начала луча, p – направляющий вектор луча.

Статическая модель координатометрии

Используя выбранные алгоритмы, была написана программа в среде MATLAB для реализации системы координатометрии близкорасположенных источников сигналов [10]. На Рисунке 3 приведен ее графический интерфейс с результатом работы, где две цели были успешно распознаны тремя объектами с точностью до 100 метров. Задавая координаты и мощностные характеристики передатчиков и приемников, пользователь затем вводил значения параметров системы – ошибки пеленга (в градусах) и мощности шума (в децибелах на милливатт). После чего по кнопке «Старт» производился расчет координатометрии с выводом результатов в соответствующие таблицы.

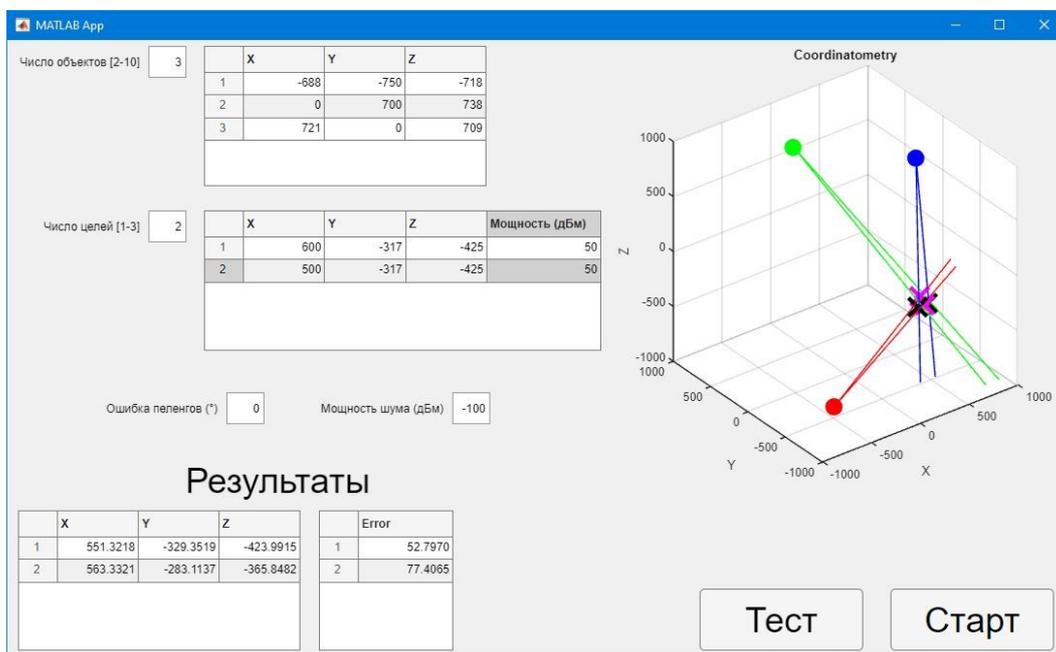


Рисунок 3 – Работа статической модели координатометрии
Figure 3 – Operation of the static coordinate measurement model

В статической модели при рассмотрении нескольких ситуаций с разным числом объектов и целей с разными мощностными параметрами было установлено, что алгоритм координатометрии работает с удовлетворительной точностью, сравнимой с расстоянием между целями. Так, например, для двух целей, находящихся на расстоянии 100 метров, точность определения координат составляла около 70 метров. При худшем уровне шума

на приемнике, неудачной геометрии или с большим числом целей, результаты координатометрии будут хуже.

Динамическая модель координатометрии

Для приближения модели к реальной ситуации, в статическую модель были добавлены параметры скорости и возможность задавать траектории объектов и целей. Так была создана простейшая динамическая модель. Она реализовывалась путем дискретизации траектории объектов и целей на точки, в которых многократно решалась статическая задача координатометрии.

Изображение графического интерфейса представлено на Рисунке 4, где приведен пример работы системы с двумя целями и тремя объектами. При этом цели были неподвижны, а объекты двигались по задаваемым траекториям в интерфейсе. По сравнению со статической моделью были добавлены параметры скорости, количества точек траектории и интервала времени между ними. В таблицах результата добавился расчет среднеквадратичного отклонения. Добавлена возможность проигрывания анимации системы в динамике по нажатию на соответствующую кнопку.

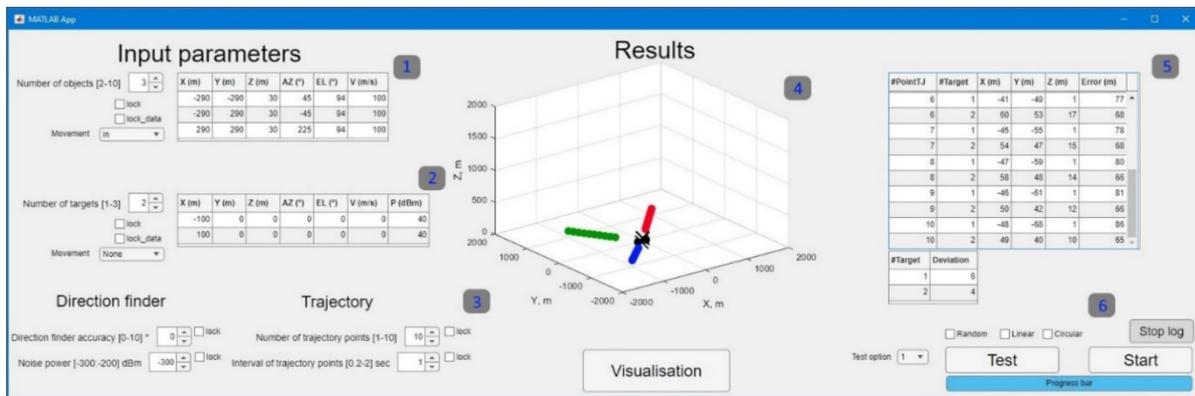


Рисунок 4 – Интерфейс программы динамической координатометрии
 Figure 4 – Interface of the dynamic coordinate measurement program

Графический интерфейс на Рисунке 4 состоит из следующих частей:

1. Число объектов (от 2 до 10), координаты объектов по осям X, Y, Z, направляющий вектор траектории в виде углов азимута AZ и угла места EL, скорость движения объекта (от 0 до 100 метров в секунду). Можно задавать заранее запрограммированные типы движения (к центру координат, от центра координат, к соседнему объекту).
2. Аналогичные параметры для целей с добавлением мощности излучения, выраженной в децибелах на милливатт (дБм).
3. Можно настроить точность работы пеленгатора в моделировании (от 0 до 10 градусов), уровень шума на приеме (от -200 до -50 дБм). Траектория задается в виде параметров количества точек (от 1 до 10) и временному интервалу между этими точками (от 0,2 до 2 секунд). Все окна для вводимых значений можно заблокировать для невозможности их изменения при случайной генерации исходных параметров.
4. На графике отображается работа системы, а также по кнопке "Visualisation" можно воспроизвести анимацию траекторий объектов и целей.
5. Результаты в каждой точке приводятся в виде таблицы. Указываются расчетные координаты, ошибка расчета и среднеквадратическое отклонение.

6. При симуляции можно выбрать один из трех заранее созданных сценариев ("Test option") или выбрать случайную генерацию исходных параметров. Основная кнопка запуска симуляции – это кнопка "Старт". По кнопке "Тест" происходит запуск теста статической координатометрии. Также при каждом запуске программы включается логирование, которое фиксирует каждое изменение входных параметров и сохраняет промежуточные результаты алгоритма координатометрии.

С использованием данной модели были получены результаты в динамике, которые можно было сравнивать между собой, определяя степень эффективности алгоритма в той или иной ситуации.

Были рассмотрены 3 основные ситуации:

1. Объекты находятся на краях зоны, образуя треугольник вокруг центра системы координат. Каждый из них движется к нулевой точке системы с максимальной скоростью в 100 метров в секунду. Цели неподвижны и располагаются около центра системы координат на расстоянии 200 метров друг от друга.

2. Объекты сфокусированы в одном углу зоны, образуя треугольник, который не охватывает центр системы координат. Каждый из них движется строго от нулевой точки системы с максимальной скоростью. Цели располагаются около центра системы координат на расстоянии 100 метров друг от друга и движутся с максимальной скоростью вдоль оси OY.

3. Объекты находятся на краях зоны, образуя треугольник вокруг центра системы координат. Каждый из них движется к соседнему объекту с максимальной скоростью. Цели располагаются около центра системы координат на расстоянии 10 метров друг от друга и движутся с максимальной скоростью вдоль оси OY. При этом в качестве одной из целей рассматривается помеха, находящаяся на расстоянии 100 метров от целей и движущаяся в том же направлении.

Таким образом, рассмотрены различные геометрические ситуации взаимного расположения объектов и целей. А также рассмотрены разные типы движения для анализа точности алгоритма в различных ситуациях.

Исходные данные тестов приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Тесты динамической координатометрии
 Table 1 – Dynamic coordinatometry tests

#	Объекты					Цели				Число точек траектории
	X [м]	Y [м]	Z [м]	Скорость [м/с]	тип движения	X [м]	Y [м]	Z [м]	тип движения	
1	1000	1000	100	100	к центру	-100	0	0	-	10
	-1000	1000	100	100	к центру	100	0	0	-	
	-1000	-1000	100	100	к центру	-	-	-	-	
2	1000	500	100	100	от центра	-50	0	0	вдоль OY	10
	500	1000	100	100	от центра	50	0	0	вдоль OY	
	1500	1500	100	100	от центра	-	-	-	-	
3	1000	1000	100	100	к соседу	-5	0	0	вдоль OY	10
	-1000	1000	100	100	к соседу	5	0	0	вдоль OY	
	-1000	-1000	100	100	к соседу	100	0	0	вдоль OY	

Результаты теста № 1 представлены на Рисунке 5.

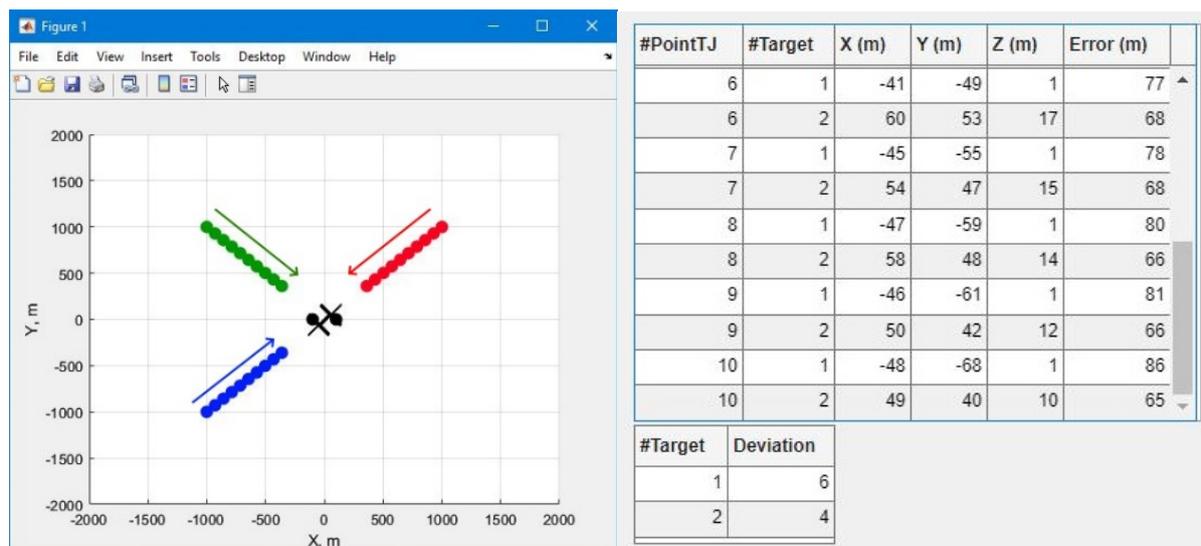


Рисунок 5 – Тест № 1. Координатометрия внутри треугольника
Figure 5 – Test No. 1. Coordinate measurement inside the triangle

Из Рисунка 5 видно, что точность определения координат целей составила порядка 73 метров. Значение среднеквадратичного отклонения получилось около 5 метров.

Результаты теста № 2 представлены на Рисунке 6.

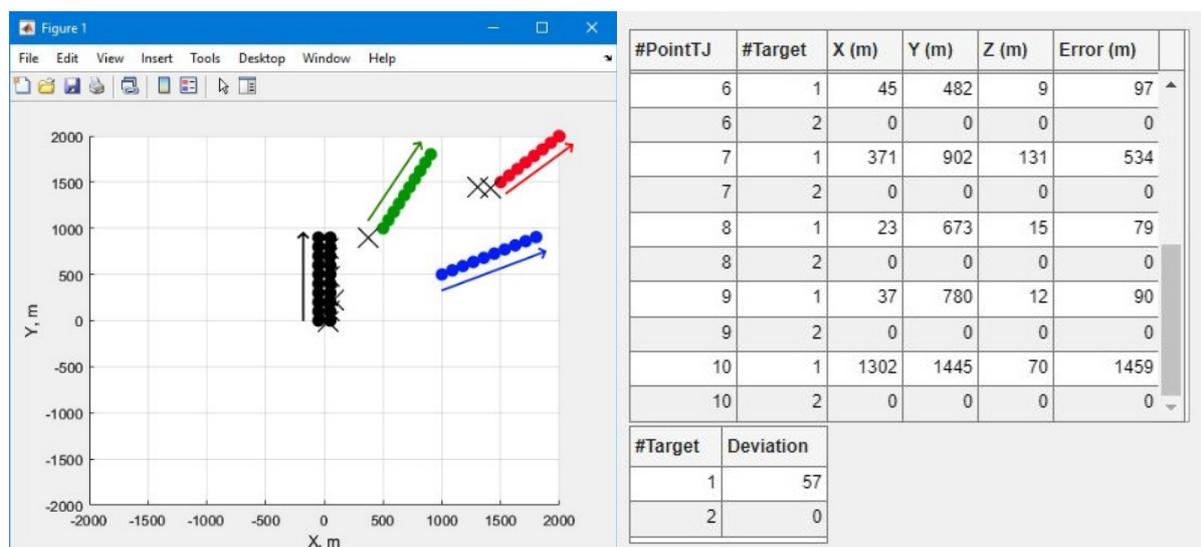


Рисунок 6 – Тест № 2. Координатометрия вне треугольника
Figure 6 – Test No. 2. Coordinate measurement outside the triangle

Из Рисунка 6 видно, что одну из целей алгоритм не смог определить, а точность определения координаты первой составила несколько сотен метров. Значение среднеквадратичного отклонения составило 57 метров.

Результаты теста № 3 представлены на Рисунке 7.

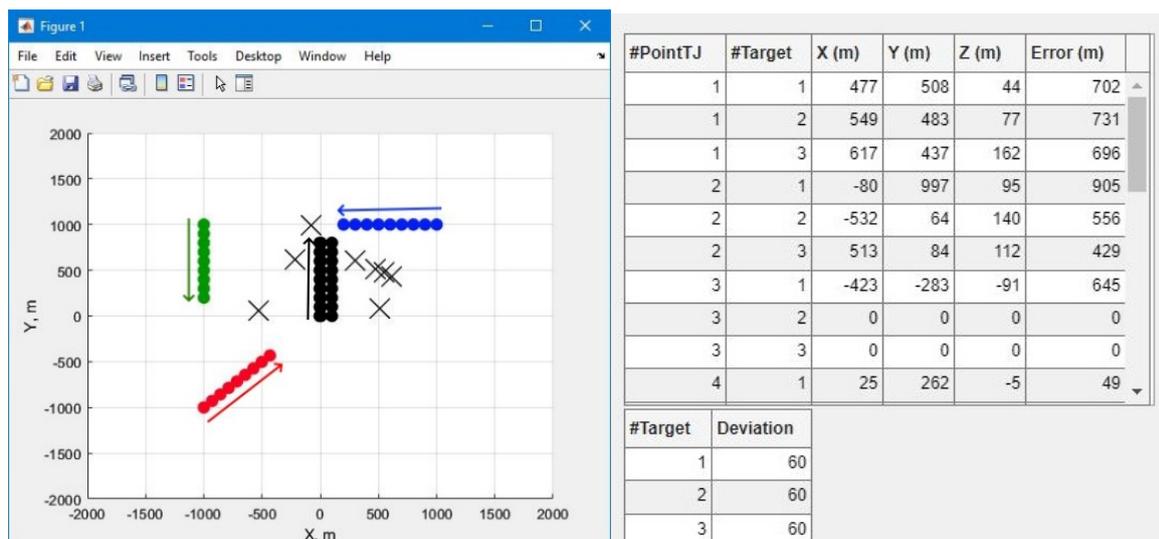


Рисунок 7 – Тест № 3. Координатометрия в «патруле»
Figure 7 – Test No. 3. Coordinateometry in "patrol"

Из Рисунка 7 видно, что точность определения координат целей составила более 500 метров. Значение среднеквадратичного отклонения составило 60 метров.

Результаты динамической координатометрии сведены в Таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты динамической координатометрии
Table 2 – Results of dynamic coordinate measurement

№ Теста	№ Цели	Средняя ошибка (м)	Среднеквадратическое отклонение (м)
1	1	80,4	6
	2	66,6	4
2	1	451,8	57
	2	-	-
3	1	575,2	60
	2	643,5	60
	3	562,5	60

Таким образом, можно сделать вывод, что текущий алгоритм координатометрии эффективен для ситуации, при которой цели находятся внутри области сканирования, образованной несколькими объектами. В случае целей, находящихся с одной стороны от пеленгующих объектов, результаты будут неточные.

Заключение

В данной работе были представлены результаты работы динамической модели координатометрии близкорасположенных источников сигналов с использованием алгоритма сверхразрешения MUSIC. В среде MATLAB было создано графическое приложение, позволяющее пользователю задавать исходные параметры ситуации, а также динамические параметры скорости и траекторий для анализа работы алгоритма. Был проведен анализ различных ситуаций для более полного охвата теоретически возможных геометрических положений объектов и целей между собой. По результатам был сделан вывод, что алгоритм координатометрии на основе малоэлементных антенных систем является эффективным в случае, когда цели находятся в зоне сканирования

объектов. Данная ситуация является весьма распространенной на практике, а результаты показали эффективность для данного случая алгоритмов координатометрии даже для малоэлементных антенн.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Антропов Д.А. Новые антенно-фидерные устройства средств радиорелейной связи на основе исторического опыта их создания. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022;(9):139–143.
Antropov D.A. New antenna-feeder devices of means radio relay communication based on the historical experience of their creation. *News of the Tula State University. Technical sciences*. 2022;(9):139–143. (In Russ.).
2. Бобылкин И.С., Иванов А.В., Куземкин А.А., Ямпольский Д.А. Сравнительный анализ устройств для радиопеленгации и пассивной радиолокации, доступных для гражданского применения. В сборнике: *Актуальные проблемы деятельности подразделений уголовно-исполнительной системы: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции: Том 1, 19 октября 2023 года, Воронеж, Россия*. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга»; 2023. С. 246–252.
3. Глушанков Е.И., Горобцов И.А., Сыроветник Д.С.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича». Программа для моделирования задачи сверхразрешения и координатометрии нескольких источников радиосигналов в среде MATLAB: № 2024663312; заявл. 11.06.2024; опубл. 24.06.2024. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664687 Российская Федерация.
4. Рыжков А.А. Малоэлементные антенные решетки для беспилотных летательных аппаратов. В сборнике: *Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2020): Региональная научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей: Сборник лучших докладов конференции, 01–03 декабря 2020 года, Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; 2021. С. 118–122.
Ryzhkov A. Circular antenna array UAV. In: *Podgotovka professional'nykh kadrov v magistrature dlya tsifrovoi ekonomiki (PKM-2020): Regional'naya nauchno-metodicheskaya konferentsiya magistrantov i ikh rukovoditelei: Sbornik luchshikh dokladov konferentsii, 01–03 December 2020, Saint Petersburg, Russia*. Saint Petersburg: The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications; 2021. pp. 118–122. (In Russ.).
5. Паринов М.Л. Моделирование процедур пеленгования и координатометрии источников радиоизлучения в условиях стохастического характера изменений параметров среды распространения и воздействия случайных факторов, вызывающих ошибки при измерениях информативных параметров. *Воздушно-космические силы. Теория и практика*. 2024;(31):145–169.
Parinov M.L. Simulation of radio-frequency radiation source directionfinding and coordiante-measuring procedures inthe enviroments of stochastic-nature propagation medium parameter change and random factor impact to produce errors in the course of informational parameter measurements. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*. 2024;(31):145–169. (In Russ.).

6. Глушанков Е.И., Сыроветник Д.С. Определение координат источников сигналов с использованием алгоритмов сверхразрешения. В сборнике: *Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2023): Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей: Сборник лучших докладов: Том 1, 05–07 декабря 2023 года, Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; 2023. С. 94–99.
Glushankov E., Syrovetnik D. Determination of coordinates of signal sources using super-resolution algorithms. In: *Podgotovka professional'nykh kadrov v magistrature dlya tsifrovoi ekonomiki (PKM-2023): Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya i nauchno-metodicheskaya konferentsiya magistrantov i ikh rukovoditelei: Sbornik luchshikh dokladov: Volume 1, 05–07 December 2023, Saint Petersburg, Russia*. Saint Petersburg: The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications; 2023. pp. 94–99. (In Russ.).
7. Давыденко А.С., Попов Е.Н., Цикин И.А. Радиопеленгация по методу music в сочетании с методом эталонных разностей фаз. В сборнике: *Неделя науки ИФНУТ: Сборник материалов Всероссийской конференции, 16–20 ноября 2020 года, Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: Политех-Пресс; 2020. С. 12–14.
8. Лустгартен М.Ю., Собченко М.И., Швецова А.П., Ухандеев В.И. Алгоритм определения координат источника радиоизлучения. *Электронные информационные системы*. 2019;(3):22–28.
Lustgarten M.Yu., Sobchenko M.I., Shvetsova A.P., Ukhandeev V.I. Algorithm of radio source positioning. *Electronic Information Systems*. 2019;(3):22–28. (In Russ.).
9. Телегин В.А., Шашеро В.А., Антонов Е.А., Чикшов Л.И., Курилов А.А. Определение координат местоположения объекта: № 2020667131: заявл. 21.12.2020: опубл. 25.01.2021. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611300 Российская Федерация.
10. Глушанков Е.И., Сыроветник Д.С. Координатометрия близлежащих источников сигналов с использованием алгоритма сверхразрешения MUSIC. В сборнике: *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024): Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции: Том 3, 27–28 февраля 2024 года, Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; 2024. С. 165–169.
Glushankov E., Syrovetnik D. Coordinatometry of nearby signal sources using the super-resolution algorithm MUSIC. In: *Aktual'nye problemy infotelekomunikatsii v nauke i obrazovanii (APINO 2024): Materialy XIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi i nauchno-metodicheskoi konferentsii: Volume 3, 27–28 February 2024, Saint Petersburg, Russia*. Saint Petersburg: The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications; 2024. pp. 165–169. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Глушанков Евгений Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиосистем и обработки сигналов, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, эксперт по радиотехническим системам научно-исследовательского института

Evgeniy I. Glushankov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Radio Systems and Signal Processing, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, expert in radio engineering systems Research

микроэлектронной аппаратуры «Прогресс», Institute of Microelectronic Equipment
Москва, Российская Федерация. "Progress", Moscow, the Russian Federation.
e-mail: glushankov57@gmail.com
ORCID: [0000-0003-4148-3208](https://orcid.org/0000-0003-4148-3208)

Кондрашов Захар Константинович, генеральный директор научно-исследовательского института микроэлектронной аппаратуры «Прогресс», Москва, Российская Федерация. **Zahar K. Kondrshov**, General Manager Research Institute of Microelectronic Equipment "Progress", Moscow, the Russian Federation.
e-mail: info@i-progress.tech

Сыроветник Дмитрий Сергеевич, инженер ООО «Амунго», Санкт-Петербург, Российская Федерация. **Dmitriy S. Syrovetnik**, Engineer of the Amungo LLC, Saint-Petersburg, the Russian Federation.
e-mail: syrovetnikds@gmail.com

Рылов Евгений Александрович, генеральный директор проектно-конструкторского бюро «РИО», кандидат технических наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация. **Evgeniy A. Rylov**, General Manager Design Bureau "RIO", Candidate of Technical Sciences, Saint-Petersburg, the Russian Federation.
e-mail: rylov79@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.12.2024; одобрена после рецензирования 13.01.2025; принята к публикации 15.01.2025.

The article was submitted 13.12.2024; approved after reviewing 13.01.2025; accepted for publication 15.01.2025.