

Анализ алгоритма определения координат и угловой ориентации подвижного объекта при детерминированном подходе

А. В. Данилова, email: danilova-anyav@mail.ru¹

Е. Ю. Морозов, email: morozov_e@cs.vsu.ru¹

¹ Воронежский Государственный Университет

***Аннотация.** Проведена проверка работоспособности двух моделей определения координат и угловой ориентации подвижного объекта по данным, полученным в результате реальных экспериментов. Показано, что первая модель с использованием трёх радиоориентиров даёт приемлемую в условиях эксперимента точность, а вторая – требует доработки. Выявлено, что при отсутствии непрерывного мониторинга подвижного объекта могут появляться ложные решения, что обусловлено нелинейностью исходной задачи.*

***Ключевые слова:** азимутально-угломестное радиопеленгование, пространственная ориентация, декартова система координат, курс, тангаж, крен, матрица вращения, анализ данных.*

Введение

В настоящее время задача определения координат и угловой ориентации подвижных объектов в воздухе, на суше и в море решается с помощью глобальных спутниковых радионавигационных систем (GPS NAVSTAR или ГЛОНАСС). В работах [1] и [2] были предложены и исследованы различные теоретические способы нахождения пространственных параметров подвижных объектов с помощью азимутально-угломестного пеленгования. Данная работа посвящена практической части исследования, представленного в [1] и [2], а именно анализу данных, полученных в результате натурального эксперимента.

1. Описание модели и постановка задачи

Пусть N радиоориентиров размещены в i -х точках M_i пространства (где $i = 1, \dots, N$) с известными координатами $M_i(x_i, y_i, z_i)$ в нормальной земной системе координат (НЗСК). Подвижный объект находится в точке M_0 с неизвестными координатами $M_0(x, y, z)$, а его угловая ориентация определяется тремя неизвестными углами Эйлера: углами курса ψ , крена μ и тангажа ϑ . В результате азимутально-

угломестного радиопеленгования реперного источника M_i , определяются углы азимута (α_i) и угла места (ε_i) в связанной системе координат подвижного объекта. Необходимо определить минимальное количество радиоориентиров M_i , при котором представляется возможным однозначно найти координаты $M_0(x, y, z)$ и угловую ориентацию (углы ψ , μ и ϑ) подвижного объекта.

Детерминированный подход к определению координат и пространственной ориентации подвижного объекта, описанный в работах [1] и [2], заключается в следующем:

1. Нахождение совокупности расстояний от фазового центра (ФЦ) бортовой пеленгаторной антенны (БПА) до радиоориентиров;
2. Определение координат подвижного объекта;
3. Нахождение матрицы вращения и связанных с нею углов Эйлера, определяющих угловую ориентацию БПА.

В статье [1] были рассмотрены два варианта локальной угломерной навигационной системы, которые представляют наибольший интерес – случай с тремя наземными ориентирами и случай с дополнительным, четвертым, радиоориентиром. В обоих случаях ключевым является решение следующей системы нелинейных уравнений на нахождение расстояний ℓ_1 , ℓ_2 и ℓ_3 от ФЦ БПА до радиоориентиров:

$$\begin{cases} \ell_1^2 + \ell_2^2 - 2\ell_1\ell_2 \cos \alpha_{12} = d_{12}^2 \\ \ell_1^2 + \ell_3^2 - 2\ell_1\ell_3 \cos \alpha_{13} = d_{13}^2 \\ \ell_2^2 + \ell_3^2 - 2\ell_2\ell_3 \cos \alpha_{23} = d_{23}^2 \end{cases} \quad (1)$$

Координаты в таком случае находятся из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 = \ell_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 = \ell_2^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 = \ell_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

В первом случае (рис. 1) оказалось, что аналитическое решение системы (1) хотя и возможно, но чрезвычайно неустойчиво и непригодно для использования в реальных системах. Поэтому, для решения этой системы был использован метод Ньютона для систем нелинейных уравнений. Нахождение координат и угловой ориентации может производиться аналитически, по явным формулам.

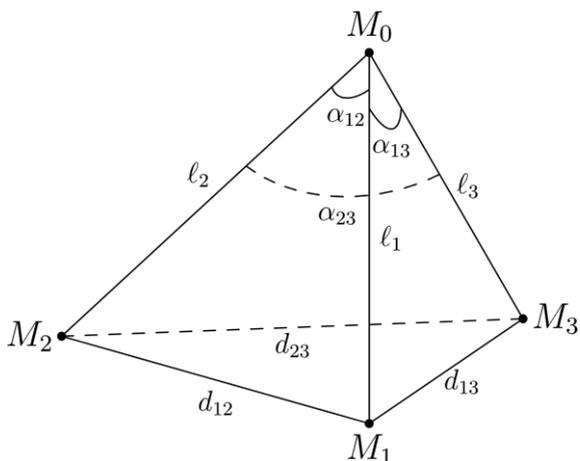


Рис. 1. Схема размещения в пространстве трех радиоориентиров и фазового центра БПА

В случае с дополнительным РО система уравнений (1) решается аналитически благодаря избыточной информации, приходящей от радиоориентира M_4 (рис. 2).

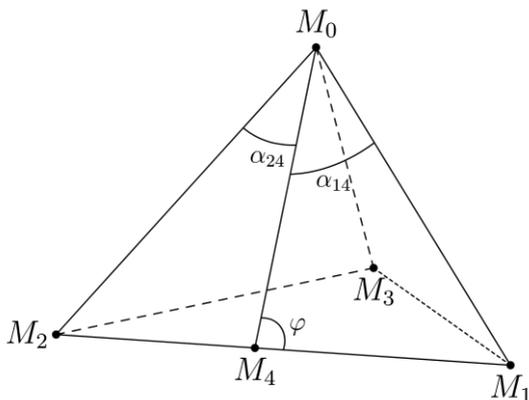


Рис. 2. Схема размещения в пространстве четырех радиоориентиров и фазового центра БПА

2. Описание эксперимента

На беспилотный летательный аппарат (БПЛА) вертолетного типа, помещенный в центре окружности радиусом 50 м, была установлена

фазированная антенная решетка, позволяющая проводить азимутально-угломестное пеленгование радиоориентиров. БПЛА также был оснащен бортовыми системами навигации. Четыре реперные точки, оснащенные источниками электромагнитного излучения, были настроены на опорные частоты и установлены на местности. Конкретные значения координат и частот излучения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры радиоориентиров

Радиоориентир	Координаты, м	Частота, МГц
M1	(-80, 0, 0)	2251
M2	(40, -69.3, 0)	2255
M3	(40, 69.3, 0)	2253
M4	(150, 0, 0)	2254

Помимо этого, по координатам (200, 0, 0) был поставлен тестовый генератор M_5 , с каждым отсчетом увеличивавший частоту своего излучения на 25 МГц, начиная с 300 МГц. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 3.

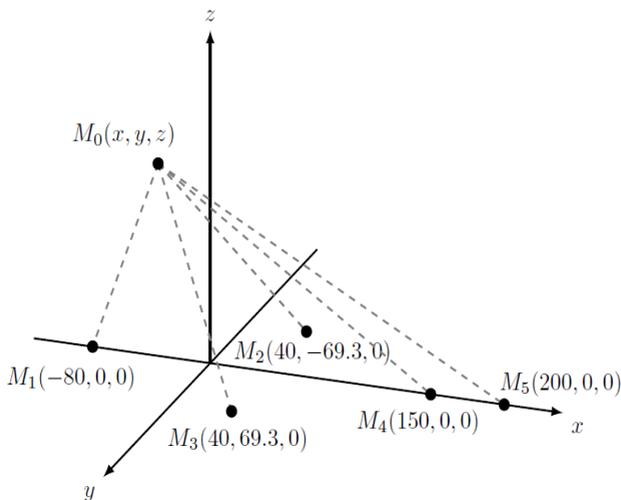


Рис. 3. Схема проведения эксперимента

Эксперимент заключался в следующем: БПЛА поднимался на высоту до 65 м и каждые 10 мс производилась серия из пяти измерений азимутов и углов места всех радиоориентиров. Помимо этого,

происходило измерение координат и угловой ориентации БПЛА с помощью бортовых навигационных систем. Все эти данные (а также частоты тестового генератора) записывались в хранилище данных. После этого, с помощью алгоритмов, описанных в [1] и [2], определялась пространственная ориентация БПЛА. Всего было проведено два таких эксперимента.

3. Анализ экспериментальных данных

Для анализа данных была написана программа, реализующая алгоритмы определения координат и пространственной ориентации БПЛА и определяющая местоположение тестового генератора (ТГ). Ошибка определения позиции ТГ использовалась при оценке точности применяемых методов. Пример данных приведён в табл. 2, содержащей выборку значений из тех, при которых СКО ТГ было меньше пяти метров.

Таблица 2

Фрагмент отсчетов с СКО определения местоположения ТГ, меньшим 5 метров

Отсчет	Частота, ГГц	БПЛА Z, м	ТГ ΔX , м.	ТГ ΔY , м.
240	0,9	56,376	-0,659	-0,891
244	0,9	55,307	-2,069	-0,526
254	0,925	57,017	4,509	0,813
294	1,025	59,089	-3,102	0,708
374	1,225	57,991	-4,553	-0,806
410	1,325	58,026	-1,302	2,266
414	1,325	57,569	-0,374	2,345
420	1,35	57,147	-3,086	-1,336
430	1,375	54,899	-3,46	-1,304
434	1,375	54,21	-4,071	-1,635
464	1,45	53,709	-1,738	2,543
494	1,525	47,688	-3,408	-0,488
500	1,55	48,237	-0,025	-3,424

При реализации алгоритмов было обнаружено несколько особенностей. Во-первых, тестовые данные показали, что на реальных данных формулы (6) – (8) из [1] для решения оказываются несостоятельными вследствие накопления ошибки при арифметических операциях. Поэтому решение системы уравнений (2) в вычислительной программе производилось с помощью метода Ньютона для систем нелинейных уравнений. В качестве начального приближения

использовались координаты, рассчитанные для предыдущих измерений. Для самого первого отсчета использовалась точка $(0, 0, 50)$.

Во-вторых, в ходе эксперимента, местоположение БПЛА отклонялось от ожидаемого из-за погодных условий и БПЛА оказывался над радиоориентиром M_4 , что сказывалось на точности пеленгования данного радиоориентира. В частности, выяснилось, что формулы для расчета расстояний ℓ_1 , ℓ_2 и ℓ_3 не являются устойчивыми в условиях реальных данных и в большинстве случаев не могут быть использованы для решения задачи. Поэтому было принято решение по доработке модели с четырьмя радиоориентирами.

В-третьих, на БПЛА была размещена плоская фазированная антенная решетка, что негативно повлияло на точность данных. Кроме этого, масштаб размещения РО вместе с погодными условиями привели к полёту объекта вблизи границ треугольника, образованного радиоориентирами $M_1 M_2 M_3$. Как известно из [1], в этой зоне возможно появление ложных решений, что и было выявлено с помощью расчетной программы.

Также были произведены сравнительные расчеты алгоритмов из работ [1] и [3]. На одинаковых входных данных алгоритмы показали практически идентичные результаты, однако метод Ньютона из статьи [1] оказался быстрее метода максимального правдоподобия из [3]. Это делает первый алгоритм более предпочтительным при использовании в реальных системах.

Помимо этого, результаты эксперимента показали, что имеет смысл провести исследование системы с четырьмя и более опорными радиоориентирами, но координаты и угловую ориентацию БПЛА определять с помощью модифицированного метода наименьших квадратов (по аналогии со спутниковыми системами). Также, в дальнейшем имеет смысл производить расчеты предложенным в [1] методом сразу для нескольких созвездий радиоориентиров и из них выбирать оптимальное.

Заключение

На основе проведённых расчётов по экспериментальным данным можно сделать следующие выводы:

2. Детерминированный подход к решению задачи определения координат и угловой ориентации бортовой пеленгаторной антенны по результатам радиопеленгования радиоориентиров в случае трёх точек показал свою принципиальную состоятельность, а в случае четырёх точек – необходимость доработки.

3. На проведение натуральных экспериментов большое влияние оказывает геометрическое расположение РО.

4. При отсутствии мониторинга БПЛА вблизи границ треугольника, образованного РО, возможно появление ложного решения.

5. Плоская фазированная решётка, использованная на БПЛА, даёт в некоторых случаях высокую погрешность экспериментальных данных, поэтому для дальнейшего анализа алгоритмов, предложенных авторами, требуются натурные эксперименты как с другой геометрией расположения РО, так и с объёмной фазированной решёткой

В связи с этим, можно сформулировать дальнейшие шаги исследования:

6. Разработка программного комплекса, позволяющего моделировать различные конфигурации взаимного расположения РО и БПЛА.

7. Исследование возможности использования модифицированного метода наименьших квадратов для более надежного определения координат и угловой ориентации БПЛА.

Список литературы

1. Виноградов А. Д. Детерминированный подход к решению задачи определения координат и угловой ориентации бортовой пеленгаторной антенны по результатам радиопеленгования радиоориентиров. / Виноградов А. Д., Минин Л. А., Морозов Е. Ю., Ушаков С. Н // Информационно-измерительные и управляющие системы – 2019. – Т. 17. – № 2. – С. 5-23.

2. Виноградов А. Д. Локальные угломерные системы определения координат и угловой ориентации бортовых пеленгаторных антенн. / Виноградов А. Д., Минин Л. А., Морозов Е. Ю., Ушаков С. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2019. . – Т. 24. – № 4. – С. 46-53.

3. Виноградов А. Д. Максимально правдоподобный алгоритм определения координат и угловой ориентации бортовой пеленгаторной антенны по результатам радиопеленгования реперных источников радиоизлучения / А. Д. Виноградов, А. Ю. Востров, И. С. Дмитриев // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов 25-й Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. – 2019. – Т. 4. – С. 17-32.