

УДК 528.837

*Моржак Анжела Вячеславовна,  
начальник сектора ОТРСиК ЦТРуК ФКУ НПО "СТуС" МВД России,*

*г. Москва*

*e-mail: [lika120281@rambler.ru](mailto:lika120281@rambler.ru)*

## **МЕТОД СОВМЕСТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЦЕЛИ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНИКОВ**

Аннотация. В статье представлен алгоритм совместного позиционирования наземной цели с использованием нескольких беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), который учитывает погрешности измерения координат станции и расстояния до цели. Предложенный метод позволяет повысить точность определения местоположения цели по сравнению с традиционными методами, особенно в условиях наличия ошибок измерения местоположения наблюдателей. Использование нескольких БПЛА, оснащённых ГЛОНАСС и дальномерами, и формирование равностороннего треугольника для оптимального позиционирования обеспечивает более надёжные и точные результаты. Эффективность метода подтверждается проведёнными моделированиями и сравнением с существующими алгоритмами.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, точность позиционирования, измерение расстояния, ГЛОНАСС, погрешность.

**Method for jointly determining the location of a target by a group of drones**

Author, affiliation

Abstract. The article presents an algorithm for the joint positioning of a ground target using several unmanned aerial vehicles (UAVs), which takes into account the errors in measuring the coordinates of the station and the distance to the target. The proposed method makes it possible to increase the accuracy of determining the location of the target compared to traditional methods, especially in conditions of errors in

measuring the location of observers. Using multiple UAVs equipped with GLONASS and rangefinders and forming an equilateral triangle for optimal positioning provides more reliable and accurate results. The effectiveness of the method is confirmed by the conducted simulations and comparison with existing algorithms.

Keywords: unmanned aerial vehicle, positioning accuracy, distance measurement, GLONASS, error

## Введение

Точное позиционирование целей является одной из ключевых технологий в современной жизни [1]. С быстрым развитием технологий беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) использование нескольких беспилотных летательных аппаратов для координации позиционирования цели стало актуальной темой в современной области военной науки и техники [2]. В настоящее время, благодаря зрелому развитию технологий радиолокации, их высокой точности и низкой стоимости, исследования методов определения местоположения цели, основанных на измерении расстояния, привлекли широкое внимание. В [3] предлагается алгоритм определения местоположения станции наблюдения с фиксированной разницей во времени, основанный на методе наименьших квадратов. Когда погрешность координат станции наблюдения игнорируется, точность ее определения местоположения высока, но если в измерении координат имеется случайная погрешность, то из точки наблюдения эффективность ее позиционирования резко снижается. В [4] предлагается алгоритм позиционирования для линейной коррекции разницы во времени прибытия. Предполагая, что информация о местоположении датчика точно известна, этот метод позволяет получить очень точные результаты позиционирования. Но если в информации о местоположении датчика есть случайная ошибка, этот метод серьезно снизит точность позиционирования цели. В [5] предлагается метод определения местоположения, который использует наклонное расстояние для анализа положения цели. Аналогично, этот метод не

учитывает погрешность измерения координат наблюдателя. Когда погрешность велика, эффективность определения местоположения резко падает. На основе проведенного анализа в данной статье предлагается алгоритм совместного позиционирования, который использует расстояние между несколькими БПЛА и целью и координаты местоположения БПЛА для оценки местоположения цели. Этот метод устраняет недостатки, связанные с резким снижением эффекта позиционирования, когда ошибка местоположения станции не может быть проигнорирована.

### 1 Модель и метод позиционирования

Как показано на рис. 1, для совместного обнаружения цели требуется не менее 3 беспилотных летательных аппаратов. Предполагается, что каждый беспилотник оснащен ГЛОНАСС и датчиками дальности и облетает одну и ту же цель, которая примерно расположена ниже центральной точки. Дроны могут использовать ГЛОНАСС для получения собственных координат местоположения и использовать датчики дальности для измерения расстояния от себя до цели. Принимая во внимание синхронизацию времени сигнала, принимаются следующие допущения:

1) если цель является движущейся, то перед выполнением операций определения местоположения несколькими беспилотными летательными аппаратами сигнал бортовых ГЛОНАСС -датчиков используется в качестве эталона для завершения первоначальной калибровки трех датчиков БПЛА;

2) данные, полученные тремя дронами, помечаются временными метками, и выбираются три набора данных с небольшой разницей во времени, и предполагается, что цель перемещается медленно, то есть величиной смещения цели в течение времени отклонения сигнала пренебречь;

3) результат в виде координат цели является выборкой из трех наборов данных с близкими временными метками.

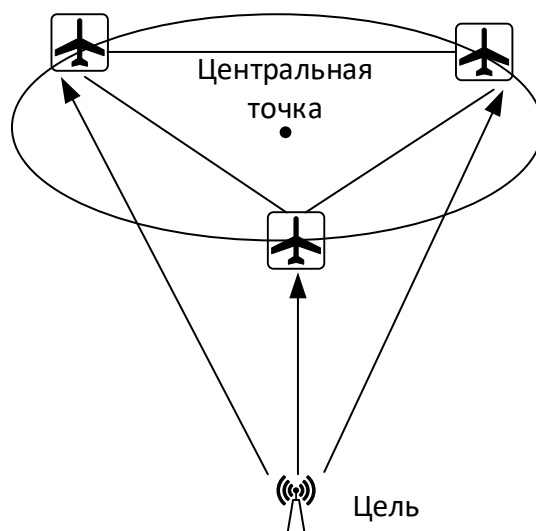


Рис. 1. Пример совместного позиционирования для нескольких БПЛА

Если цель неподвижна, нет необходимости учитывать синхронизацию времени подачи сигнала. Информация о местоположении и расстоянии от трех беспилотных летательных аппаратов используется для формирования уравнения позиционирования для достижения решения о позиционировании цели.

## 1.2 Метод определения местоположения

Алгоритм обнаружения состоит из трех блоков:

1) сначала используется традиционный алгоритм определения расстояния для получения приблизительного местоположения цели  $x_0$ ;

2) затем используется уравнение измерения расстояния, с помощью которого получают информацию о расстоянии до цели плюс погрешность местоположения станции;

3) наконец, определяется значение переменных параметров в решении о местоположении цели для завершения оценки.

Решение задачи о приблизительном местоположении цели предполагает, что модель совместного позиционирования определена в декартовой системе координат геоцентрического пространства [6], истинные координаты цели равны  $\mathbf{x}_t = [x_t, y_t, z_t]^T$ , а координаты станции наблюдения БПЛА равны  $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Расстояние между каждым дроном и целью составляет

$$\rho_i = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_t\| = \sqrt{(x_i - x_t)^2 + (y_i - y_t)^2 + (z_i - z_t)^2} \quad (1)$$

$$\begin{cases} r^2 = x_t^2 + y_t^2 + z_t^2; \\ r_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2, \end{cases} \quad (2)$$

где  $r$  - это расстояние между целевой областью и центром масс Земли.

Традиционное уравнение определения расстояния может быть записано в виде матрицы и имеет вид

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{x}_t = \mathbf{B}_1, \quad (3)$$

где

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & -2z_1 \\ -2x_2 & -2y_2 & -2z_2 \\ -2x_3 & -2y_3 & -2z_3 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \rho_1^2 & -r_1^2 & -r^2 \\ \rho_2^2 & -r_2^2 & -r^2 \\ \rho_3^2 & -r_3^2 & -r^2 \end{bmatrix}.$$

Используя (3) приблизительное положение цели можно записать как

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{A}_1^{-1} \cdot \mathbf{B}_1. \quad (4)$$

При вычислении координат цели вводится информация об ошибке определения дальности  $\varepsilon_{\rho i}$  для построения уравнения определения местоположения в виде

$$\rho_i = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_t\| + \varepsilon_{\rho i}, \quad (5)$$

где  $i=1-3$ .

Предварительное уравнение позиционирования в матричной форме запишется следующим образом

$$\mathbf{A} \mathbf{y} = \mathbf{B}, \quad (6)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{x_1 - x_0}{\rho_1^*} & \frac{y_1 - y_0}{\rho_1^*} & \frac{z_1 - z_0}{\rho_1^*} \\ \frac{x_2 - x_0}{\rho_2^*} & \frac{y_2 - y_0}{\rho_2^*} & \frac{z_2 - z_0}{\rho_2^*} \\ \frac{x_3 - x_0}{\rho_3^*} & \frac{y_3 - y_0}{\rho_3^*} & \frac{z_3 - z_0}{\rho_3^*} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} x_t - x_0 \\ y_t - y_0 \\ z_t - z_0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \rho_1^* - \rho_1 + \varepsilon_{\rho 1} \\ \rho_2^* - \rho_2 + \varepsilon_{\rho 2} \\ \rho_3^* - \rho_3 + \varepsilon_{\rho 3} \end{bmatrix}; \quad \rho_i^* = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0\|.$$

Аналогично формуле (3), можно получить решение предварительного уравнения позиционирования

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}. \quad (7)$$

Таким образом, если погрешность определения местоположения цели  $\Delta x_i$ , то с учетом (6) окончательное уравнение определения местоположения будет иметь вид

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{x_i - x_0}{\rho_i^*} - \mathbf{a}_i \Delta \mathbf{x}_i \quad \frac{y_i - y_0}{\rho_i^*} - \mathbf{b}_i \Delta \mathbf{y}_i \quad \frac{z_i - z_0}{\rho_i^*} - \mathbf{c}_i \Delta \mathbf{z}_i \right] \cdot \begin{bmatrix} x_t - x_0 \\ y_t - y_0 \\ z_t - z_0 \end{bmatrix} = \\ & = \rho_i^* - \mathbf{d}_i \Delta \mathbf{x}_i - \rho_i + \varepsilon_{\rho i} \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$  и  $\mathbf{d}$  – коэффициенты, определяемые производными по  $\Delta \mathbf{x}_i$  [4].

Решение для коэффициента геометрической точности может быть получено из уравнения (8) как

$$\delta \rho = \rho(x_t, y_t, z_t) - \rho(x_0, y_0, z_0) = \frac{\delta \rho}{\delta \mathbf{x}_0} \delta \mathbf{x} + \varepsilon \quad (9)$$

где  $\varepsilon$  - эквивалентная ошибка определения расстояния, а  $\delta \mathbf{x} = (\delta x_t, \delta y_t, \delta z_t)$  - ошибка определения адреса беспилотного летательного аппарата.

## 2 Имитационный эксперимент

Для проверки эффективности и адаптивности предлагаемого метода определения местоположения в данной работе сделаны следующие предположения:

1) Три беспилотных летательных аппарата находятся в воздухе и летают вокруг цели, а разница между погрешностью измерения расстояния каждым беспилотным летательным аппаратом и разницей местоположения станции идентична.

2) Система координат в этой статье представляет собой прямоугольную систему координат геоцентрического пространства ПЗ-90 [6], а началом координат является центр масс Земли.

Зададим истинное положение цели как  $\mathbf{x}_{true}$ . Основываясь на алгоритме позиционирования, предложенном выше, значение погрешности измерения местоположения в каждом тесте находится в интервале 0-0,01 км, приблизительное положение цели  $\mathbf{x}_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$  и расчетные координаты цели  $\mathbf{x}_t = [x_t, y_t, z_t]^T$  показаны на рис. 2.

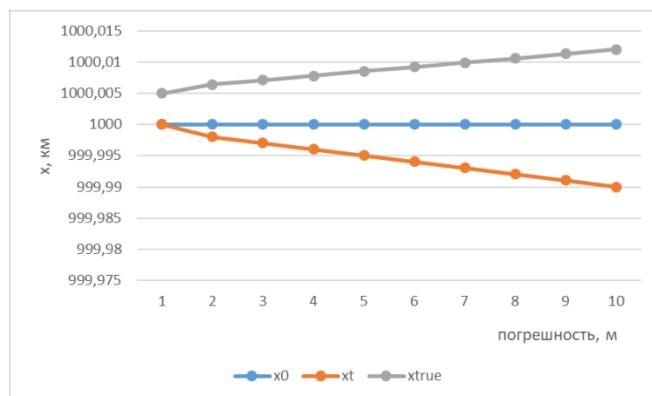


Рис. 2. Приблизительное положение и решение для позиционирования цели

С увеличением погрешности определения местоположения станции приблизительное положение цели и вычисленные координаты в разной степени отклоняются от реальных координат. Очевидно, что  $x_t$  ближе к реальному положению; кроме того, даже когда приблизительное положение цели далеко от реального положения, этот алгоритм все еще может вычислить идеальные координаты. Чтобы проанализировать эффективность и адаптивность алгоритма определения местоположения, этот метод (кривая 2) сравнивается с традиционным методом (кривая 1) определения местоположения [2] на расстоянии для двух случаев. Когда погрешностью определения местоположения БПЛА можно пренебречь, а значение погрешности измерения расстояния изменяется (рис. 3).

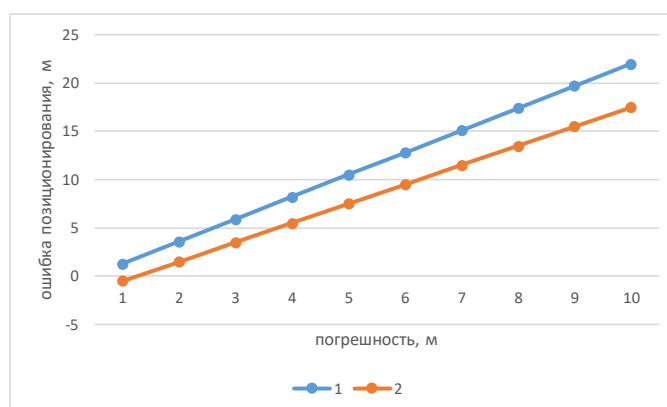


Рис. 3. Сравнение изменения погрешности позиционирования с погрешностью измерения расстояния

Далее, погрешность измерения расстояния остается неизменной, выполнено сравнение адаптируемости метода к изменениям погрешности измерения на БПЛА. Результаты моделирования показаны на рис. 4.

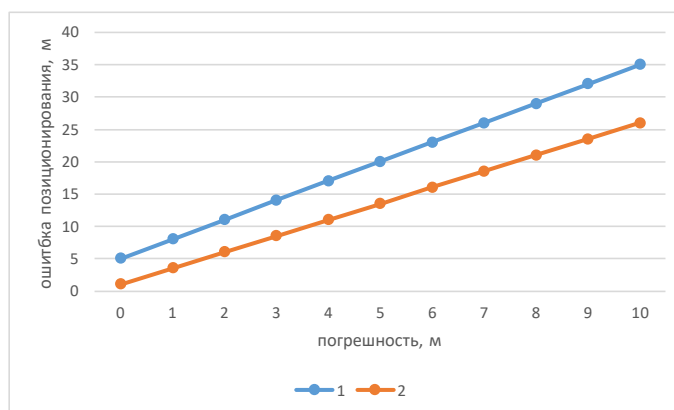


Рис. 4. Сравнение изменения погрешности позиционирования с погрешностью измерения местоположения станции

Как показано на рис. 3, по мере увеличения погрешности измерения расстояния алгоритм обеспечивает высокую точность позиционирования. Очевидно, что при измерении местоположения БПЛА, когда ошибка равна нулю, этот алгоритм обеспечивает хороший эффект позиционирования. Видно, что на точность его определения местоположения влияет точность определения радиуса Земли, что приводит к увеличению количества ошибок в алгоритмическом процессе.

Как видно из рис. 4, если погрешность измерения местоположения станции не может быть проигнорирована, очевидно, что этот алгоритм более адаптивен и обладает более высокой точностью; комбинируя рисунки 3 и 4, можно увидеть, что точность позиционирования представленного в статье метода значительно выше, чем у традиционных методов позиционирования.

#### Заключение

В данной статье предлагается совместный метод определения местоположения наземной цели с использованием нескольких БПЛА, который всесторонне учитывает погрешность измерений и измерения расстояния станциями наблюдения с БПЛА. Эффект определения местоположения лучше,

чем при использовании традиционного метода определения расстояния, а его эффективность и применимость подтверждаются с помощью моделирования. Для модели совместного позиционирования нескольких беспилотных летательных аппаратов, описанной в этой статье, целевое положение находится непосредственно под центром равностороннего треугольника, и для повышения точности позиционирования беспилотного летательного аппарата необходимо обеспечить формирование равностороннего треугольника.

### Литература

1. Zhang Y. et al. UAV multi-mission reconnaissance decision-making under uncertainty environment //J. Northwestern Polytech. Univ. – 2016. – Т. 34. – С. 1028-1034.
2. Qu Y. et al. Target cooperative location method of multi-UAV based on pseudo range measurement //Xibei Gongye Daxue Xuebao/Journal of Northwestern Polytechnical University. – 2019. – Т. 37. – №. 2. – С. 266-272.
3. Yang K. et al. Constrained total least-squares location algorithm using time-difference-of-arrival measurements //IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2009. – Т. 59. – №. 3. – С. 1558-1562.
4. Huang Y. et al. Real-time passive source localization: A practical linear-correction least-squares approach //IEEE transactions on Speech and Audio Processing. – 2001. – Т. 9. – №. 8. – С. 943-956.
5. Ююкин И. В. Проблема реализации концепции максимального интегрирования разнородных данных в практической навигации //Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала СО Макарова. – 2024. – Т. 15. – №. 6. – С. 998-1014.
6. Ванеева М. В., Сыров А. М. Сравнительный анализ геоцентрических систем координат ПЗ-90 и WGS-84 //Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). – 2018. – №. 1. – С. 160-164.