

УДК 004.94:519.876.2

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.46.3.010](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.46.3.010)

## Исследование возможностей применения мультилатерации для автономной навигации беспилотных летательных аппаратов

Е.С. Галанцев, Д.Ю. Пономарев✉

*Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация*

**Резюме.** В работе рассматривается метод мультилатерации для обеспечения согласованного взаимодействия беспилотных летательных аппаратов для выполнения задач в составе роя при мониторинге полей в сельском хозяйстве, выполнении контроля параметров окружающей среды, сборе метеоданных и т. д. Мультилатерация позволит повысить надежность работы беспилотных летательных аппаратов в составе роя и обеспечит автономность действий отдельных аппаратов. В качестве цели работы рассматривается оценка потенциала использования метода мультилатерации радиосигнала для определения взаимного расположения беспилотных летательных аппаратов и создание программной и физической моделей для проверки этого метода. Для достижения поставленной цели в работе представлены результаты разработки алгоритма взаимодействия беспилотных летательных аппаратов при использовании метода мультилатерации, способ решения задачи определения местоположения источника сигнала при малых вычислительных затратах и результаты компьютерного и физического моделирования предложенных подходов. Разработанные модели продемонстрировали свою адекватность поставленным задачам и выявили некоторые недостатки предложенного подхода при практической реализации. В работе также рассмотрены возможные ситуации при взаимодействии беспилотных летательных аппаратов в рое и отмечены основные пути устранения недостатков.

**Ключевые слова:** метод мультилатерации, беспилотный летательный аппарат, рой летательных аппаратов, определение местоположения, физическая модель, система уравнений.

**Для цитирования:** Галанцев Е.С., Пономарев Д.Ю. Исследование возможностей применения мультилатерации для автономной навигации беспилотных летательных аппаратов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(3). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1614> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.010

## The investigation capabilities of multilateration for the unmanned aerial vehicle autonomous navigation

E.S. Galantsev, D.Yu. Ponomarev✉

*Military Innovative Technopolis “ERA”, Anapa, the Russian Federation*

**Abstract:** The paper discusses the multilateration method to ensure coordinated interaction of unmanned aerial vehicles as a part of a swarm during monitoring of fields in agriculture, checking of the environmental parameters, collecting of the weather data etc. Multilateration will improve the reliability of the control of unmanned aerial vehicles as a part of a swarm and will ensure the autonomy of the actions of individual vehicles. The goal of the work is to assess the potential of using the radiosignal multilateration method to determine the relative position of unmanned aerial vehicles and to create of the software and physical models to test this method. In order to achieve this goal, the work presents the algorithm for the interaction of unmanned aerial vehicles using the multilateration method, a method for solving the problem of determine the location of a signal source at low computational costs and the results of computer and physical modeling of the proposed approaches. The developed models

demonstrated their adequacy to the set tasks and revealed some shortcomings of the proposed approach in practical implementation. The work also examines possible situations during the interaction of unmanned aerial vehicles in a swarm and notes the main ways to eliminate shortcomings.

**Keywords:** multilateration method, unmanned aerial vehicle, swarm of aircraft, location determination, physical model, system of equations.

**For citation:** Galantsev E.S., Ponomarev D.Yu. The investigation capabilities of multilateration for the unmanned aerial vehicle autonomous navigation. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1614> DOI:10.26102/2310-6018/2024.46.3.010 (In Russ).

## Введение

В современном мире беспилотные летательные аппараты (БЛА) уже стали неотъемлемой частью нашей жизни. Они нашли свое применение во многих сферах человеческой деятельности. Летательные аппараты данного типа применяются для решения задач наблюдения, сбора информации, ретрансляции сигналов связи и др. Отдельно можно отметить использование БЛА в сельском хозяйстве для мониторинга состояния полей, оценки урожайности и уровня орошения [1–2]. Также БЛА применяются для мониторинга окружающей среды, изучения изменений климата, исследования дикой природы, контроля над нефтегазопроводами и дорожной обстановкой, сбора метеорологических данных и своевременного выявления очагов пожаров, применения в спасательных и поисковых операциях. Благодаря своей маневренности и мобильности, они открывают новые возможности для проведения научных исследований и анализа данных [3–4].

Объединение БЛА в группы, называемые роем, обладает большим потенциалом и широкими возможностями и позволяет решать задачи, с которыми не справится одиночный БЛА [5–7]. Принцип организации роя основан на взаимодействии и управлении каждым отдельным агентом с помощью собственного алгоритма и программы с элементами искусственного интеллекта. Качество роевого управления БЛА имеет большое значение, так как от выбора средств навигации, позиционирования и связи зависит эффективность выполнения задач и безопасность полета каждого из агентов строя [8–10].

Для эффективного управления группой БЛА необходимо точно определять их положение относительно друг друга. В большинстве существующих систем для определения положения БЛА используется глобальная спутниковая система навигации, реализуемая, например, ГЛОНАСС и *GPS* модулями (точность которых находится в пределах 5–15 метров) в сочетании с различными датчиками и измерительными устройствами: барометром, гироскопом и др. [11].

Для обеспечения автономной локальной навигации БЛА зачастую применяют инерциальные системы. Они основаны на принципах механики и измеряют ускорение и угловую скорость движения с помощью акселерометров и гироскопов для определения положения устройства и его ориентации. Главной проблемой подобных систем является накопление ошибки навигации, для устранения которой требуется периодически корректировать данные [12].

Помимо этого, могут быть применены наземные навигационные системы, основанные на использовании радиомаяков. Они способны обеспечить высокую точность позиционирования и навигации, особенно в сложных условиях, таких как городские районы, густые леса или горы. Радиомаяки служат ориентирами для определения положения БЛА относительно них. Недостатком такой системы навигации

является необходимость предварительной подготовки места проведения работ и установки соответствующих опорных точек [13].

В отличие от стационарного размещения радиомаяков в данной работе предлагается использовать метод мультилатерации при использовании источников радиоизлучения, установленных на самих беспилотных летательных аппаратах. Таким образом, актуальность работы обуславливается представлением неординарного подхода к применению мультилатерации для использования его при формировании и поддержании строя роем БЛА как самостоятельно, так и в комбинации с другими существующими технологиями позиционирования и навигации.

Цель работы заключается в изучении потенциала использования метода мультилатерации радиосигнала с использованием приемников (маяков), расположенных на самих БЛА для определения взаимного расположения агентов в группе БЛА и создании программных и физических моделей для проверки этого метода.

### Мультилатерация радиосигнала БЛА для нахождения его относительного положения

Трилатерация – метод определения положения объектов путем построения на местности системы смежных треугольников, в которых измеряются длины их сторон. Является одним из методов определения координат на местности наряду с триангуляцией и полигонометрией. В основе трилатерации лежит линейная засечка.

Мультилатерация – подвид трилатерации, в котором для определения положения интересующего объекта используется более трех расстояний. Метод мультилатерации основан на определении относительного положения источника сигнала на основе измерений разности времени прибытия от него сигнала на разные приемники. Помимо измерения разницы времени прибытия могут быть использованы и другие способы определения расстояния между устройствами [14].

В случае с БЛА, оснащенными приемниками с известным положением, метод мультилатерации можно использовать для определения относительного положения других БЛА. Каждый приемник, расположенный на БЛА, измеряет время прибытия сигнала от другого БЛА-отправителя. Затем эти данные передаются в управляющий узел устройства, который вычисляет относительное положение БЛА-отправителя на основе известной скорости распространения радиоволн. Графическое представление предложенного варианта применения метода мультилатерации представлено на Рисунке 1.

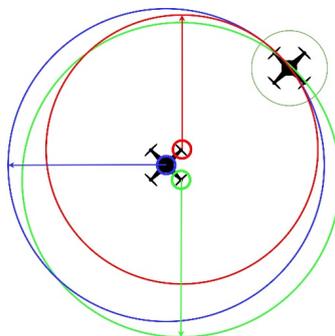


Рисунок 1 – Графическое представление метода мультилатерации  
Figure 1 – Graphical representation of the multilateration method

С помощью мультилатерационного метода можно определить местоположение БЛА-отправителя в трехмерном пространстве, используя минимум четыре приемника,

не расположенных в одной плоскости. Для этого необходимо провести измерения разности времени прибытия сигнала на каждый из приемников БЛА, составить и решить систему уравнений.

### Постановка задачи

Рассмотрим пример определения относительного положения источника сигнала беспилотным летательным аппаратом, имеющим четыре приемника.

Пусть рассматриваемый БЛА (БП – БЛА-приемник) имеет координаты  $U(0, 0, 0)$  в своей локальной системе координат. Ему известны координаты своих приемников  $R_j(X_j, Y_j, Z_j)$ ,  $j \in 1..4$  (синяя, фиолетовая, зеленая и серая точки на Рисунке 2). Существует БЛА, отправляющий сигнал (БО – БЛА-отправитель) в зоне действия приемников рассматриваемого БЛА, имеющий координаты  $U_s(X_s, Y_s, Z_s)$  (красная точка на Рисунке 2) в локальной системе координат БП. БО отправляет сигнал, а каждый из приемников БП получает этот сигнал и передает в управляющий узел разницу времени прибытия  $T_j$ . С использованием формулы преобразования времени в расстояние управляющий узел вычисляет дистанцию от БО до каждого своего приемника  $D_j$ . Задача состоит в нахождении координат БО  $U_s$ .

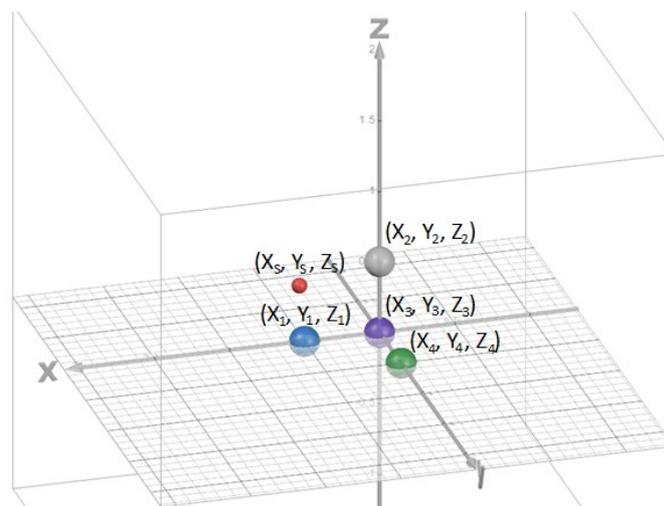


Рисунок 2 – Геометрическое представление задачи  
 Figure 2 – Geometric representation of the problem

Исходя из геометрического представления задачи, можно утверждать, что БО расположен в точке пересечения сфер, центры которых совпадают с координатами приемников и радиусами, равными расстояниям от БО до каждого из приемников.

В таком случае, для того чтобы получить координаты БО, необходимо решить следующую систему нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} (x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 + (z - Z_1)^2 = D_1 \\ (x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2 + (z - Z_2)^2 = D_2 \\ (x - X_3)^2 + (y - Y_3)^2 + (z - Z_3)^2 = D_3 \\ (x - X_4)^2 + (y - Y_4)^2 + (z - Z_4)^2 = D_4 \end{cases} \quad (1)$$

Тогда решение задачи определения координат БО может быть основано на геометрическом представлении системы (1), которое изображено на Рисунке 3.

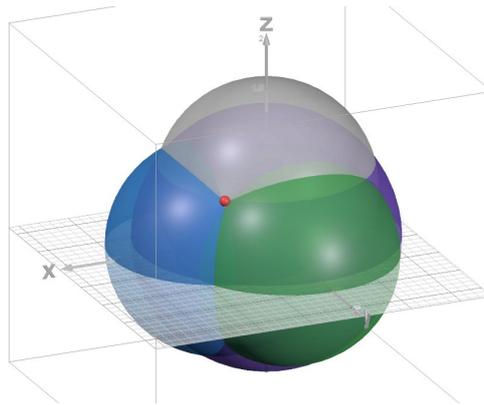


Рисунок 3 – Геометрическое представление системы уравнений (1)  
Figure 3 – Geometric representation of the system of equations (1)

### Способ решения системы нелинейных уравнений

В общем случае систему (1) можно решить с использованием различных программных библиотек, однако предложенные распространенными пакетами решения могут быть избыточными, поэтому рассмотрим возможный и более простой для программной реализации метод нахождения решения системы (1).

Так как известно, что рассматриваются неконцентрические сферы, центры которых не лежат в одной плоскости, то решением системы будет либо точка, либо решение для такой системы отсутствует.

При решении системы уравнений (1) используем следующие определения:

- степень точки – это разность квадрата расстояния от точки до центра сферы и квадрата радиуса сферы;
- радикальная плоскость двух сфер – геометрическое место точек пространства, имеющих одну и ту же степень относительно этих сфер.

Если сферы пересекаются, то их радикальная плоскость проходит через окружность пересечения сфер, а радикальные плоскости четырех сфер в общем случае должны проходить через одну точку. Пусть система (1) имеет решение, тогда мы можем утверждать, что точкой пересечения сфер является точка пересечения радикальных плоскостей, образованных попарно этими сферами. В случае же, когда система (1) не имеет решения, тогда точку пересечения радикальных плоскостей можно считать приближенным решением системы.

Найдем радикальные плоскости каждой пары сфер. Для этого нужно попарно вычесть формулу одной сферы из формулы другой, результатом чего является следующая система уравнений:

$$\begin{cases} -2xX_1 + X_1^2 + 2xX_2 - X_2^2 - 2yY_1 + Y_1^2 + 2yY_2 - Y_2^2 - 2zZ_1 + Z_1^2 + 2zZ_2 - Z_2^2 = D_1 - D_2 \\ -2xX_1 + X_1^2 + 2xX_3 - X_3^2 - 2yY_1 + Y_1^2 + 2yY_3 - Y_3^2 - 2zZ_1 + Z_1^2 + 2zZ_3 - Z_3^2 = D_1 - D_3 \\ -2xX_1 + X_1^2 + 2xX_4 - X_4^2 - 2yY_1 + Y_1^2 + 2yY_4 - Y_4^2 - 2zZ_1 + Z_1^2 + 2zZ_4 - Z_4^2 = D_1 - D_4 \\ -2xX_2 + X_2^2 + 2xX_3 - X_3^2 - 2yY_2 + Y_2^2 + 2yY_3 - Y_3^2 - 2zZ_2 + Z_2^2 + 2zZ_3 - Z_3^2 = D_2 - D_3 \\ -2xX_2 + X_2^2 + 2xX_4 - X_4^2 - 2yY_2 + Y_2^2 + 2yY_4 - Y_4^2 - 2zZ_2 + Z_2^2 + 2zZ_4 - Z_4^2 = D_2 - D_4 \\ -2xX_3 + X_3^2 + 2xX_4 - X_4^2 - 2yY_3 + Y_3^2 + 2yY_4 - Y_4^2 - 2zZ_3 + Z_3^2 + 2zZ_4 - Z_4^2 = D_3 - D_4 \end{cases} \cdot (2)$$

В таком случае получаем шесть уравнений плоскостей и геометрическое представление системы (2) будет иметь вид, представленный на Рисунке 4.

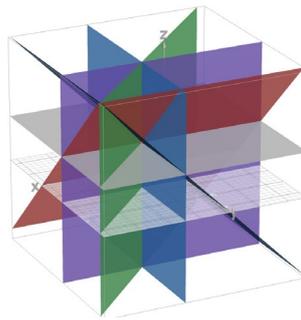


Рисунок 4 – Геометрическое представление системы уравнений (2)  
 Figure 4 – Geometric representation of the system of equations (2)

Далее необходимо найти решение для каждого набора из трех линейных уравнений, например, методом Крамера и найти точки пересечения плоскостей, исключив случаи, когда три плоскости не пересекаются или дают в результате пересечения прямую.

Любая из полученных точек будет являться решением системы (1) в случае существования точного решения или приближенным решением в случае его отсутствия, что позволит определить местоположение БО  $U_s$ .

В реальных случаях в связи с воздействием помех, наличии ошибок измерения или влиянии других факторов полученные результаты будут лишь приближены к точным, а система уравнений (1) чаще всего не будет иметь точного решения. Тогда можно использовать методы нахождения приближенных решений: метод итераций, численные методы и др.

### Алгоритм применения метода мультилатерации при роевом использовании БЛА

Система предполагает наличие головного БЛА (например, управляемым оператором) и набора ведомых БЛА, автономно поддерживающих строй. При изменении положения головного БЛА ведомые изменяют свое согласно определенных, заранее сформированных правил. Это позволяет не потерять связь с другими БЛА и не столкнуться с ними.

В качестве сигнала будем рассматривать сообщение, содержащее по меньшей мере идентификатор устройства отправителя.

В качестве примера рассмотрим случай связи двух БЛА. Сценарий взаимодействия систем тогда можно представить в следующем виде (Рисунок 5).

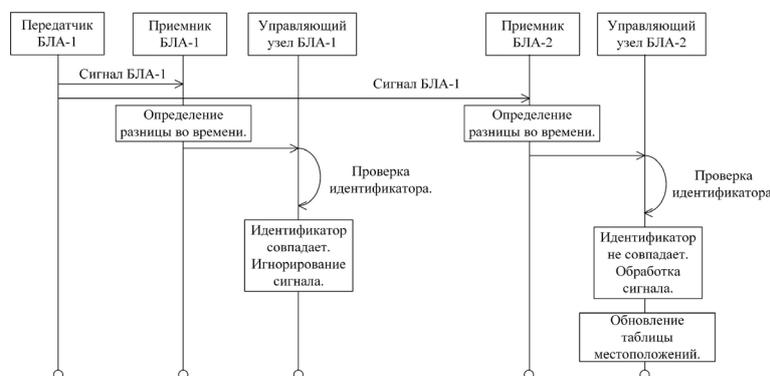


Рисунок 5 – Схема взаимодействия двух БЛА  
 Figure 5 – Scenario of interaction of two UAVs

Последовательность действий при взаимодействии двух БЛА приведена ниже.

1. БЛА-1 отправляет сигнал.
2. Приемники БЛА-1 получают сигнал и передают разницу времени отправки в управляющий узел.
3. Управляющий узел БЛА-1 сравнивает идентификатор устройства отправителя сигнала со своим идентификатором и при совпадении игнорирует полученные сигналы.
4. Приемники БЛА-2 получают сигнал и передают разницу времени отправки в управляющий узел БЛА-2.
5. Управляющий узел БЛА-2 сравнивает идентификатор устройства отправителя сигнала со своим идентификатором и при несовпадении обрабатывает полученные с приемников данные.
6. БЛА-2, зная положение своих приемников, с использованием метода мультилатерации определяет относительное положение БЛА-1 и заносит его в таблицу местоположений агентов для дальнейшей работы с ней.

Получив относительное положение других БЛА, каждое устройство может поддерживать определенное построение (строй) роя, сохранять дистанцию с другими участниками роя и обеспечивать предупреждение столкновений.

Применение этого метода в автономной навигации позволяет ведомым БЛА, входящим в рой, самостоятельно перемещаться в пространстве без необходимости постоянного контроля оператора. Это не только упрощает процесс управления роем, но и позволяет выполнять сложные операции и маневры в автономном режиме.

Представленный метод мультилатерации радиосигнала БЛА может найти применение в различных системах управления группами БЛА, например, как в рассмотренной в работе [15], автор которой предлагает определять воздействующие на БЛА силы в зависимости от расстояния между соседями. Под соседями в работе [15] понимаются все БЛА в зоне видимости устройства. Так, если дистанция между двумя соседними БЛА меньше радиуса их видимости и больше минимальной допустимой дистанции между ними, то вектор результирующей силы должен быть прямо пропорционален этой дистанции и направлен в сторону своего соседа. Если же дистанция между двумя устройствами меньше минимальной допустимой дистанции, то вектор должен быть обратно пропорционален этой дистанции и направлен в обратную от соседа сторону:

$$\begin{cases} |\bar{F}_{ij}(k)| \sim d, m < d < L \\ |\bar{F}_{ij}(k)| \sim d^{-1}, d < m < L \end{cases} \quad (3)$$

где  $m$  – минимальная допустимая дистанция между БЛА,  $d$  – текущая дистанция между летательными аппаратами  $R_i$  и  $R_j$ ,  $L$  – радиус видимости каждого БЛА  $R_i$ .

Следует отметить, что в представленном алгоритме в дальнейших работах необходимо предусмотреть ситуации, связанные с наличием излучений других радиотехнических систем, что может приводить к ошибкам в определении местоположения относительно ведущего БЛА и снижению автономности работы группы БЛА. С целью снижения влияния таких излучений в оборудовании БЛА возможно применение процедур, повышающих достоверность передачи, приема и обработки сигналов внутри роя, например, использование сигналов с большой базой или изменение используемых частот с применением технологий *SDR* (*software-defined radio* – программно-конфигурируемое радио). При практической реализации разработанного алгоритма предполагается уточнить возможность использования резервных каналов

управления или систем позиционирования с целью предотвращения нарушения строя или столкновений в рое БЛА.

### Компьютерное моделирование

Применимость алгоритма метода мультилатерации к задаче управления роем с учетом взаимодействия между БЛА, описываемого (3), была рассмотрена с использованием компьютерной модели. В качестве базового элемента модели была рассмотрена система, описанная в работе [15], в которой в качестве способа определения дистанций между агентами используется предложенный способ мультилатерации. В качестве среды разработки компьютерной модели использована среда *QtCreator* с библиотекой *OpenGL*. Внешний вид интерфейса разработанной модели изображен на Рисунке 6.

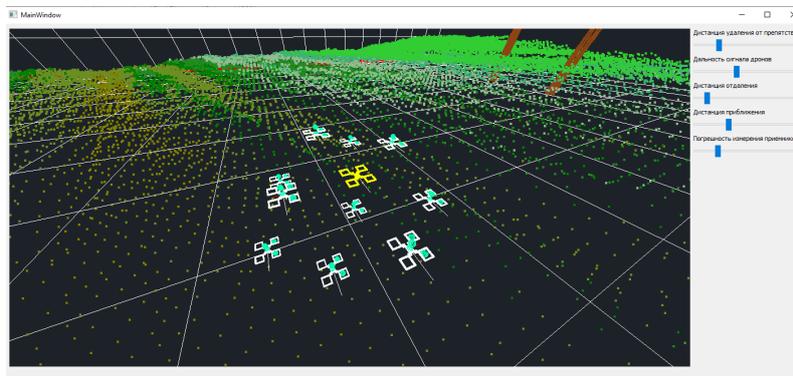


Рисунок 6 – Интерфейс компьютерной модели  
Figure 6 – The interface of the software model

При разработке модели учитывались следующие принципы взаимодействия элементов системы:

- 1) каждый ведомый БЛА (белого цвета) имеет четыре приемника (точки светло-зеленого цвета) на борту, система управления БЛА может различать их и знает их местоположение;
- 2) ведомые БЛА не имеют информации о своем положении, о положении других БЛА и приемниках других БЛА;
- 3) существует управляемый оператором БЛА (желтого цвета), способный перемещаться по сцене модели;
- 4) каждый БЛА отправляет другим БЛА широковещательные сообщения, содержащие идентификатор БЛА;
- 5) приемники БЛА принимают широковещательные сообщения, определяют идентификатор источника и дистанцию до него и отправляют данные в управляющий узел своего БЛА;
- 6) управляющие узлы БЛА, используя метод мультилатерации, определяют положение БЛА отправителя для каждого полученного сигнала;
- 7) ведомые БЛА рассчитывают воздействующие силы отталкивания и притяжения к другим БЛА в зависимости от расстояний между ними в соответствии с (4);
- 8) сцена состоит из неровной поверхности земли и других препятствий (стволы деревьев, здания);
- 9) препятствия состоят из точек (это может быть связано с использованием лидаров);

10) каждый ведомый БЛА помимо системы приемников использует систему определения расстояния до препятствий;

11) БЛА отдаляются от препятствия используя правило отдаления от других БЛА;

12) существует модуль, обладающий информацией о всех БЛА, транслирующий равнодействующую силу воздействия на каждый БЛА в скорость, определяющий положение БЛА в каждый момент времени, определяющий, какие сигналы получает каждый приемник и определяющий силу сигнала (разницу времени получения) с учетом помех.

Сила воздействия на БЛА определяется как общая сумма всех влияющих на него сил, зависящих от расстояний между самим БЛА и каждым из агентов, и определяется формулой (4):

$$\vec{F}_{ij}(k) = \begin{cases} \vec{d}_{ij}(d-k), & m < k < d < L \\ \frac{\vec{d}_{ij}}{d}, & d < m < k < L \\ 0, & m < d \leq k < L \end{cases}, \quad (4)$$

где  $m$  – минимальная допустимая дистанция между БЛА,  $\vec{d}_{ij}$  – единичный вектор расстояния,  $d$  – текущая дистанция между БЛА  $R_i$  и  $R_j$ ,  $k$  – желаемая (допустимая) дистанция между БЛА  $R_i$  и  $R_j$ ,  $L$  – радиус видимости каждого БЛА  $R_i$ .

Все переменные расстояний в формулах измеряются в условных единицах и, для рассматриваемого случая предполагается, что дистанция между БЛА не превышает десяти метров.

Помимо этого, в связи с наличием у каждого БЛА устройства определения дистанции до препятствий, в систему введена переменная, отвечающая за допустимое сближение с ними  $p$  (*proximity* – сближение). При нормальном для системы значении  $p_n$ , дистанция до препятствий равна двум условным единицам.

За погрешность измерений приемников принимается переменная  $E$  (*error* – ошибка). Каждому измерению дистанции приемником по полученному сигналу от БЛА добавляется случайная величина ошибки в диапазоне, определяемом самой переменной. При нормальном для системы значении  $E_n$  величина ошибки находится в диапазоне от минус 10 % до плюс 10 % реального расстояния.

В полученной симуляции, изменяя переменные в системе, можно отследить поведение роя БЛА и каждого его участника в отдельности. Исходя из этого, было проведено моделирование ситуаций с различными значениями входных переменных при  $p = p_n$ . Результаты моделирования приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Поведение БЛА в рое в зависимости от соотношений между переменными модели  
Table 1 – The behavior of the UAVs in a swarm depending on the relationship between the model variables

| Ситуация | Соотношение между $m$ и $k$ | Соотношение между $k$ и $L$ | Значение ошибки | Поведение БЛА в рое   |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|---|
| Норма    | $m < k$                     | $k \ll L$                   | $E_n$           | Ведомые БЛА формируют строй вблизи управляемого БЛА и следуют за ним, избегая столкновений с препятствиями на достаточном расстоянии (Рисунок 7). |

Таблица 1 (продолжение)  
Table 1 (continued)

| Ситуация      | Соотношение между $m$ и $k$ | Соотношение между $k$ и $L$ | Значение ошибки | Поведение БЛА в рое  |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|--|
| $m \approx k$ | $m \approx k$               | $k \ll L$                   | $E_n$           | Ведомые БЛА формируют строй вблизи управляемого БЛА и следуют за ним, избегая столкновений с препятствиями на достаточном расстоянии, но совершают небольшие хаотичные скачки (Рисунок 8). |
| $k \approx L$ | $m < k$                     | $k \approx L$               | $E_n$           | В процессе формирования строя и передвижения некоторые ведомые БЛА теряют связь с другими БЛА. Связь восстанавливается, когда в радиусе действия сигнала появляется агент (Рисунок 9).     |
| $E=2E_n$      | $m < k$                     | $k \ll L$                   | $2E_n$          | В процессе формирования строя и передвижения, ведомые БЛА совершают небольшие хаотичные скачки.  |
| $E=4E_n$      | $m < k$                     | $k \ll L$                   | $4E_n$          | В процессе формирования строя и передвижения, ведомые БЛА совершают значительные хаотичные скачки, но находятся на допустимом друг от друга расстоянии.                                    |

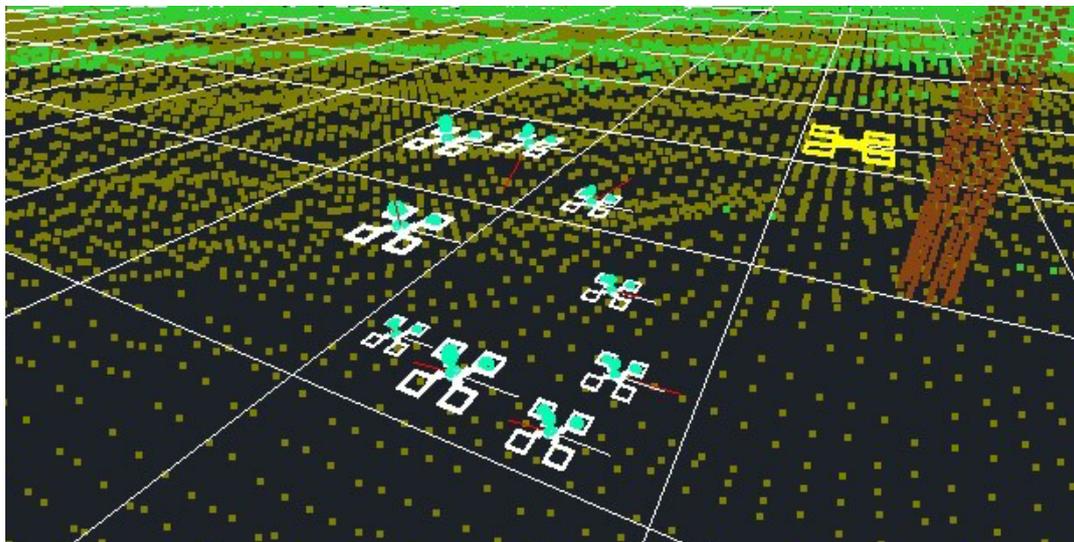


Рисунок 8 – Поведение БЛА в рое при  $m \approx k$   
Figure 8 – UAVs behavior in a swarm at  $m \approx k$

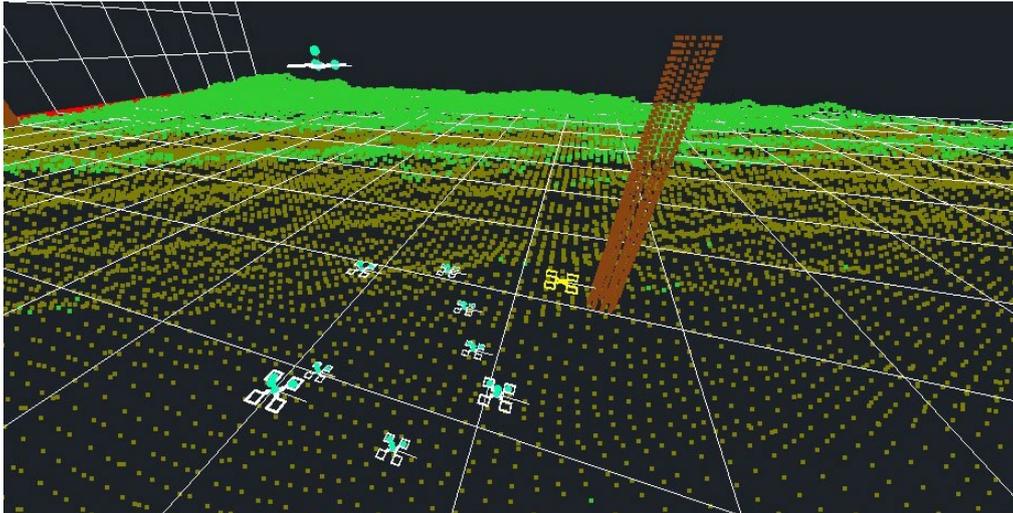


Рисунок 9 – Поведение БЛА в рое при  $k \approx L$   
Figure 9 – UAVs behavior in a swarm at  $k \approx L$

Визуальное представление поведения БЛА в рое позволяет наглядно оценить взаимодействие отдельных элементов роя и внести необходимые коррективы в алгоритмы управления. Например, на Рисунке 8 видно, что формирование роя на минимально допустимых дистанциях приводит к увеличению вероятности столкновений как внутри роя, так и с препятствиями. В другом случае (Рисунок 9), при нахождении БЛА на пределе радиуса видимости возможна потеря управляемости группы БЛА. Представленные на Рисунках 7–9 результаты демонстрируют адекватность работы разработанной компьютерной модели.

#### Физическая модель мультilaterационного определения координат источника

Представленные в работе алгоритмы были использованы при разработке физической модели роя БЛА, построенной с использованием микроконтроллеров *ESP8266* в качестве приемников и *ESP32* в качестве управляющих узлов БЛА. Для определения местоположения БЛА-отправителя был использован метод, основанный на измерении уровня сигнала, который поддерживается *Wi-Fi* модулем микроконтроллеров.

В качестве измеряемого уровня сигнала было использовано значение *RSSI* (*received signal strength indicator*) – это индикатор уровня мощности принимаемого сигнала. Данный метод позволяет определить местоположение источника, основываясь на уровне сигнала, полученного устройством:

$$d = d_0 \cdot 10^{\left(\frac{P_0 - RSSI}{10n}\right)}, \quad (5)$$

где  $d$  – расстояние от устройства до передатчика, м;  $d_0$  – расстояние от устройства до точки, на которой выполнялось измерение мощности сигнала, м;  $P_0$  – мощность сигнала устройства, измеренная на единичном расстоянии  $d_0$  от устройства, дБм;  $n$  – коэффициент потерь мощности сигнала при распространении в среде; *RSSI* – *RSSI*, измеренный в дБм.

Приемники физической модели были расположены, как показано на Рисунке 2, на расстоянии 30 см от условного центра БЛА. Источник отправляет широкополосный сигнал каждые 0,5 секунды, приемники получают сигнал, расшифровывают его с использованием формулы (5), переводят уровень сигнала в расстояние и отправляют полученное значение в управляющий узел.

Управляющий узел получает значения расстояний, решает систему уравнений и определяет координаты полученной точки, в которой и должен быть источник.

Точность получаемого расстояния была измерена экспериментально и в среднем составляет:

- при отсутствии препятствий – 10–20 % (в зависимости от дистанции);
- при наличии препятствий – 30–60 % (в зависимости от дистанции и препятствия).

С использованием физической модели была проведена серия экспериментов по определению координат объектов при отсутствии препятствий. Некоторые из результатов представлены на Рисунке 10 для двух случаев размещения источника.

По результатам проведенных экспериментов были сделаны следующие выводы:

- система определяет правильную координатную четверть источника сигнала в плоскости  $XU$  в 60 % случаев;
- в 30 % случаев вычисленное положение источника кардинально отличается от фактического;
- погрешность измерений испытуемой системы слишком велика для точного определения расстояния до источника и его положения.

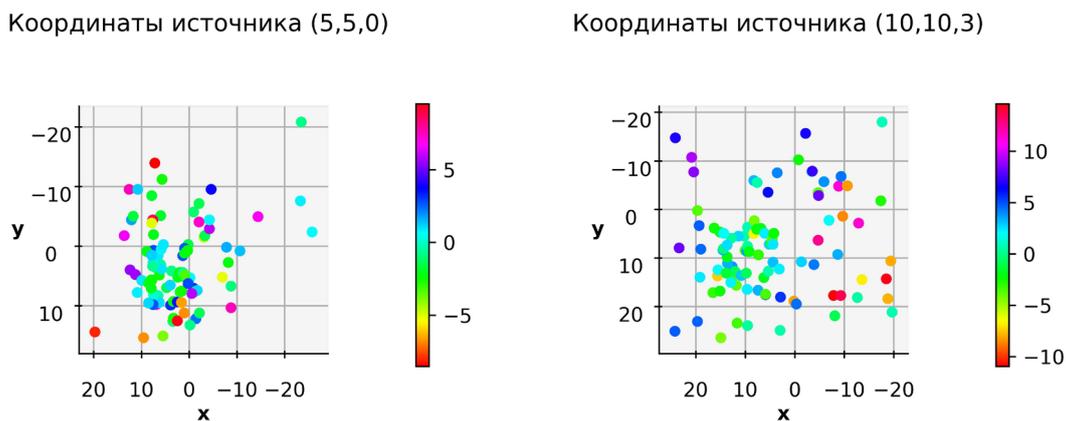


Рисунок 10 – Результаты измерений при различных координатах источника  
 Figure 10 – Measurement results at different source coordinates

Необходимо отметить, что использованные при проведении опыта микроконтроллеры не специализированы для решения поставленной задачи, а технология оценки уровня  $RSSI$  не приспособлена для определения расстояний, поэтому результаты оказались неудовлетворительными. Помимо этого, методы основанные на измерении задержки распространения сигнала ( $ToA$  – *Time of Arrival*,  $TDoA$  – *Time Difference of Arrival*) оказались неприменимы с использованными микроконтроллерами из-за малой частоты представленных в них таймеров. Однако использование устройств и технологий, позволяющих более точно измерять силу сигнала или задержку его распространения, например,  $UWB$  (*Ultra Wide Band*) или высокочастотных таймеров способно увеличить точность измерения всей системы и сделать ее применимой для реального использования [16].

### Заключение

Актуальность роевого применения БЛА определяется необходимостью решения задач наблюдения для некоторой площади: трубопроводы, сельхозугодья, заповедники и т. д. При этом необходимо обеспечить согласованность действий отдельных БЛА. Для

этой цели требуется оценить местоположение БЛА относительно друг друга. В данной работе для решения такой задачи предлагается использовать метод мультилатерации.

В статье представлен способ применения метода мультилатерации радиосигнала для определения относительного положения агентов в рое БЛА и алгоритм его использования. В рамках прикладного применения рассмотрена задача мультилатерации, а также описан один из возможных программных способов ее решения с небольшими вычислительными затратами. В дальнейшем в разработанном алгоритме необходимо предусмотреть учет влияния электромагнитной обстановки и переключение на резервные системы позиционирования при потере сигналов, обеспечивающих мультилатерацию в рое.

В ходе работы была сформирована компьютерная модель, имитирующая и визуализирующая работу всей системы и демонстрирующая применимость описанного подхода. С целью оценки реальных возможностей предложенного подхода были проведены эксперименты с использованием физической модели, построенной на базе микроконтроллеров *ESP8266* и *ESP32*, которая демонстрирует один из способов практической реализации подхода и указывает на недостатки разработанной модели и возможные пути их устранения.

Описанный в статье подход к мультилатерации радиосигнала открывает новые возможности для автономной навигации агентов в условиях слабого или отсутствия спутникового или сотового сигнала, на которые в основном и ориентируются существующие системы управления роями БЛА для поддержания строя и предотвращения столкновений. Этот подход может быть использован для разработки более надежных и эффективных систем навигации, способных функционировать в сложных и нестабильных условиях окружающей среды. Помимо этого, система может быть задействована в комбинации с другими системами автономной навигации.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Просвирина Н.В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов. *Московский экономический журнал*. 2021;(10):560–575.  
Prosvirina N. Analysis and prospects for the development of unmanned aircraft. *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal = Moscow Economic Journal*. 2021;(10):560–575. (In Russ.).
2. Зубарев Ю.Н., Фомин Д.С., Чашин А.Н., Заболотнова М.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве. *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*. 2019;(2):47–51. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.2.5>  
Zubarev Yu.N., Fomin D.S., Chashchin A.N., Zabolotnova M.V. Use of uncleaned aircraft in agriculture. *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo tsentra = Perm Federal Research Centre Journal*. 2019;(2):47–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.2.5>
3. Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Сивков Д.Е., Дзюба Е.А., Хотяновская Ю.В., Егорова Д.О. Разработка геоинформационных систем для управления окружающей средой и экологической безопасностью в районах эксплуатируемых нефтяных месторождений. *Антропогенная трансформация природной среды*. 2021;7(1):102–127.  
Buzmakov S.A., Sannikov P.Yu., Sivkov D.E., Dziuba E.A., Khotyanovskaya Yu.V., Egorova D.O. Development of geoinformation systems for environmental management and environmental safety in the areas of exploited oil deposits. *Antropogennaya*

- transformatsiya prirodnoi sredy = Anthropogenic Transformation of Nature.* 2021;7(1):102–127. (In Russ.).
4. Турк Г.Г., Карачёв Н.К. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в геодезии. *Вектор ГеоНаук.* 2023;6(2):56–60. <https://doi.org/10.24412/2619-0761-2023-2-56-60>  
Turk G.G., Karachev N.K. Use of unmanned aerial vehicles (UAVS) in geodesy. *Vektor GeoNauk = Vector of Geosciences.* 2023;6(2):56–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2619-0761-2023-2-56-60>
  5. Селин А.И., Туркин И.К. Обзор целевых объектов применения беспилотных летательных аппаратов, работающих в составе группы. *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации.* 2023;26(2):91–105. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2023-26-2-91-105>  
Selin A.I., Turkin I.K. Review of target objects for the group-operated unmanned aerial vehicles application. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii = Civil Aviation High Technologies.* 2023;26(2):91–105. (In Russ.). <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2023-26-2-91-105>
  6. Боровик В.С., Гуцул В.И., Клецов С.А. и др. *Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения.* Томск: СТТ; 2018. 140 с.  
Borovik V.S., Gutsul V.I., Klestov S.A. et al. *Kollektivny intellektual'nykh robotov. Sfery primeneniya.* Tomsk: STT; 2018. 140 p. (In Russ.).
  7. Javed S., Hassan A., Ahmad R. et al. State-of-the-Art and Future Research Challenges in UAV Swarms. *IEEE Internet of Things Journal.* 2024;11(11):19023–19045. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3364230>
  8. Morales-Ferre R., Richter P., Falletti E. et al. A Survey on Coping With Intentional Interference in Satellite Navigation for Manned and Unmanned Aircraft. *IEEE Communications Surveys & Tutorials.* 2020;22(1):249–291. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2949178>
  9. Chen X., Gao W., Wang J. Robust all-source positioning of UAVs based on belief propagation. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing.* 2013;2013. <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2013-150>
  10. Загородний Н.А., Головкин М.В. Анализ систем корректировки положения в пространстве беспилотных летательных аппаратов. *Российская наука и образование сегодня: проблемы и перспективы.* 2023;(5):40–42.  
Zagorodnii N.A., Golovkin M.V. Analiz sistem korrektyrovki polozheniya v prostranstve bespilotnykh letatel'nykh apparatov. *Rossiiskaya nauka i obrazovanie segodnya: problemy i perspektivy.* 2023;(5):40–42. (In Russ.).
  11. Амелин К.С. Метод ориентирования сверхлегкого БПЛА при редком обновлении данных о его местоположении. *Стохастическая оптимизация в информатике.* 2014;10(2):3–14.  
Amelin K.S. Metod orientirovaniya sverkhlegkogo BPLA pri redkom obnovenii dannyykh o ego mestopolozhenii. *Stokhasticheskaya optimizatsiya v informatike.* 2014;10(2):3–14. (In Russ.).
  12. Набиев Р.Н.О., Маммадов А.З.О. Модели построения инерциальной навигационной системы для беспилотных летательных аппаратов. *Авиакосмическое приборостроение.* 2021;(1):12–22. <https://doi.org/10.25791/aviakosmos.1.2021.1197>  
Nabiyev R.N., Mammadov A.Z. Models of construction of inertial navigation system for unmanned aerial vehicle. *Aviakosmicheskoe priborostroenie = Aerospace Instrument-Making.* 2021;(1):12–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.25791/aviakosmos.1.2021.1197>

13. Черных М.А., Черных Д.А. Методы координатно-временного обеспечения беспилотных летательных аппаратов. *Молодой ученый*. 2023;(37):29–31.  
Chernykh M.A., Chernykh D.A. Metody koordinatno-vremennogo obespecheniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov. *Molodoi uchenyi*. 2023;(37):29–31. (In Russ.).
14. Zafari F., Gkelias A., Leung K.K. A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019;21(3):2568–2599.  
<https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2911558>
15. Иванов Д.Я. Методы роевого интеллекта для управления группами малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2011;(3):221–229.  
Ivanov D.Ya. Methods of swarm intelligence for control of groups of small-sized unmanned aerial vehicles. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2011;(3):221–229. (In Russ.).
16. Фетисов В.С., Артемьев А.Е. Комплексование радиотехнических и видеотехнических средств в системах локального позиционирования малых беспилотных летательных аппаратов. *Альманах современной науки и образования*. 2016;(10):91–95.  
Fetisov V.S., Artem'ev A.E. Integration of radio and video facilities in systems of local positioning of small unmanned aerial vehicles. *Al'manakh sovremennoi nauki i obrazovaniya = Almanac of Modern Science and Education*. 2016;(10):91–95. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Галанцев Егор Сергеевич**, оператор, Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация.  
**Egor S. Galantsev**, Operator, Military Innovative Technopolis «ERA», Anapa, the Russian Federation.  
*e-mail:* [era\\_otd4@mil.ru](mailto:era_otd4@mil.ru)

**Пономарев Дмитрий Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник, научно-исследовательский отдел, Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация.  
**Dmitriy Yu. Ponomarev**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Research Department, Military Innovation Technopolis “ERA”, Anapa, the Russian Federation.  
*e-mail:* [era\\_otd4@mil.ru](mailto:era_otd4@mil.ru)  
ORCID: [0000-0003-1639-5935](https://orcid.org/0000-0003-1639-5935)

*Статья поступила в редакцию 28.06.2024; одобрена после рецензирования 08.07.2024; принята к публикации 19.07.2024.*

*The article was submitted 28.06.2024; approved after reviewing 08.07.2024; accepted for publication 19.07.2024.*