

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.3.3>

УДК: 621.396.96

**АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ БЕСПИЛОТНОГО
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫМ
МЕТОДОМ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
РАДИОСИГНАЛОВ БОРТОВОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

С.Н. Замуруев, М.В. Цветков

**МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Москва, просп. Вернадского, 78**

Статья поступила в редакцию 22 января 2026 г.

Аннотация. В статье предложен алгоритм пассивного определения координат беспилотного летательного аппарата на основе совместной обработки разностей времени прихода и поляризационных измерений радиосигналов его бортового радиоэлектронного оборудования. Традиционный разностно-дальномерный метод демонстрирует высокую точность лишь в условиях прямой видимости, однако его эффективность снижается при многолучевом распространении радиоволн, вызванном отражениями от зданий, рельефа и других объектов. Для повышения точности и устойчивости оценки координат в данных условиях предлагается использовать поляризационную информацию, измеряемую триортогональными антенными системами на территориально распределенных радиопеленгаторных пунктах. На основе измеренного комплексного вектора напряженности электрического поля вычисляется девятикомпонентный вектор Стокса, по которому определяется степень деполяризации радиосигнала, служащая индикатором присутствия отраженных составляющих. Степень

деполяризации используется для формирования адаптивных весовых коэффициентов, встраиваемых в функцию стоимости, минимизация которой осуществляется методом дифференциальной эволюции. Результаты численного моделирования функционирования радиопеленгаторной сети, состоящей из трех радиопеленгаторных пунктов, показали, что в условиях искусственного введения отраженного радиосигнала с заданной задержкой на одном из пунктов предложенный алгоритм обеспечивает уменьшение ошибки определения координат по сравнению с традиционным разностно-дальномерным методом. Подход особенно эффективен в урбанизированных и гористых районах, где многолучевое распространение радиоволн является доминирующим фактором, снижающим точность определения координат беспилотного летательного аппарата.

Ключевые слова: определение координат, радиосигнал, разностно-дальномерный метод, беспилотный летательный аппарат, поляризация, триортогональная антенная система, параметры Стокса, степень деполяризации.

Автор для переписки: Цветков Максим Викторович, sergei_lutsenko@inbox.ru

Введение

В условиях стремительного распространения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и роста связанных с ними угроз для безопасности критически важных объектов и регулируемого воздушного пространства возрастает потребность в устойчивых и точных методах их обнаружения и определения координат [1]. Особенно актуальными становятся методы пассивной радиолокации, основанные на приеме и анализе собственного излучения бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) БПЛА [2,3], поскольку данные методы не раскрывают факт наблюдения и могут применяться в гражданских и военных системах радиомониторинга.

Одним из наиболее распространенных таких методов является разностно-дальномерный метод, основанный на измерении разностей времени прихода радиосигнала на территориально разнесенные радиопеленгаторные

пункты (РПП). В условиях прямой видимости между БПЛА и РПП метод обеспечивает высокую точность определения координат. Однако в реальных условиях, особенно в урбанизированных, гористых или лесистых районах, радиосигнал подвергается многолучевому распространению, вызванному отражениями от зданий, рельефа местности и других препятствий. Данный факт приводит к искажению временных засечек прихода радиосигнала, появлению систематических смещений в оценках разностей времени прихода радиосигнала и, как следствие, к ухудшению точности определения координат.

1. Алгоритм определения координат БПЛА разностно-дальномерным методом на основе поляризационных измерений радиосигналов БРЭО

Для преодоления указанного ограничения предлагается алгоритм определения координат БПЛА разностно-дальномерным методом на основе поляризационных измерений радиосигналов БРЭО (рис. 1), особенностью которого является совместная обработка разностей времени прихода радиосигналов и их поляризационных измерений.

Основными этапами алгоритма являются:

Этап 1. Осуществляется инициализация следующих входных параметров:

$\mathbf{p}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ – вектор пространственных параметров i -го РПП, где $i = 1, 2, 3, \dots, N$ – порядковый номер РПП, N – количество РПП в радиопеленгаторной сети;

$\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \dots \ \tau_i]^T$ – вектор временных засечек прихода радиосигнала на соответствующие РПП;

$\mathbf{E}_i = [E_{xi} \ E_{yi} \ E_{zi}]^T$ – комплексный вектор напряженности электрического поля, полученный в результате приема радиосигнала триортогональной антенной системой [4,5] (ТОАС) i -го РПП и предварительной обработки, включающую фильтрацию, аналого-цифровое преобразование и дискретное преобразование Фурье, где E_{xi} , E_{yi} , E_{zi} – составляющие комплексного вектора,

принятого антенными элементами X, Y, Z , ориентированными по осям абсцисс, ординат и аппликат, соответственно.

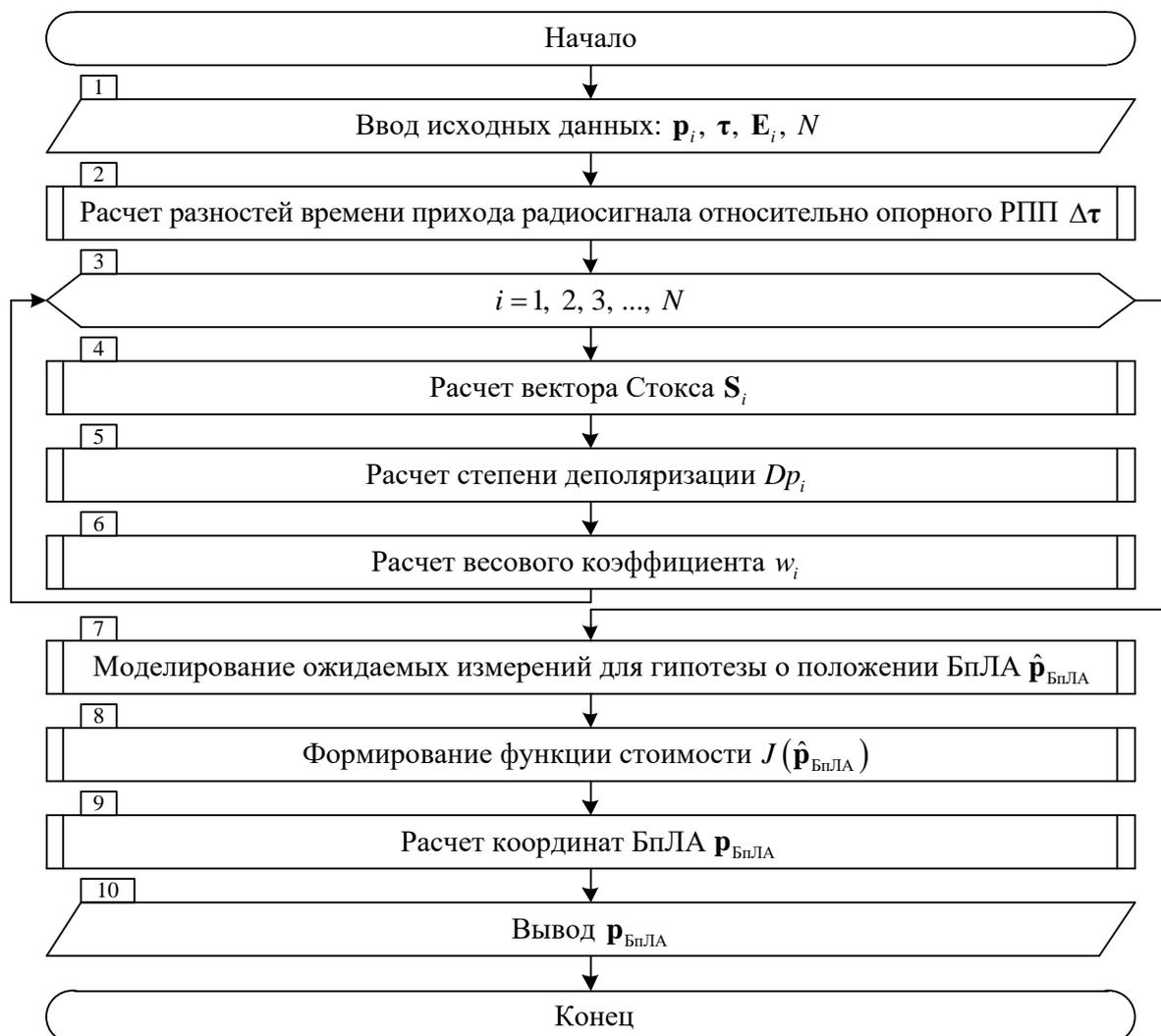


Рис. 1. Алгоритм определения координат БПЛА разностно-дальномерным методом на основе поляризационных измерений радиосигналов БРЭО.

Этап 2. Преобразование временных засечек прихода радиосигнала на каждый из РПП в разности времени прихода относительно одного из пунктов, принимаемого в качестве опорного. В рамках рассматриваемого алгоритма в качестве опорного, выбирается первый РПП ($i = 1$):

$$\Delta\tau = \begin{bmatrix} |\tau_2 - \tau_1| & |\tau_1 - \tau_1| & |\tau_3 - \tau_1| & \dots & |\tau_i - \tau_1| \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & \tau_{21} & \tau_{31} & \dots & \tau_{i1} \end{bmatrix}^T. \quad (1)$$

Этап 3. Данный этап характеризует структуру последующих вычислений: для каждого РПП в радиопеленгаторной сети последовательно выполняются этапы № 4-6.

Этап 4. Для i -го РПП на основе измеренного комплексного вектора напряженности электрического поля $\mathbf{E}_i = [E_{xi} \ E_{yi} \ E_{zi}]^T$ вычисляется девятикомпонентный вектор Стокса $\mathbf{S}_i = [S_{0i} \ S_{1i} \ S_{2i} \ \dots \ S_{8i}]^T$ согласно выражениям [6]:

$$S_{0i} = |E_{xi}|^2 + |E_{yi}|^2 + |E_{zi}|^2, \quad (2)$$

$$S_{1i} = |E_{xi}|^2 - |E_{yi}|^2, \quad (3)$$

$$S_{2i} = 2\operatorname{Re}(E_{xi}E_{yi}^*), \quad (4)$$

$$S_{3i} = -2\operatorname{Im}(E_{xi}E_{yi}^*), \quad (5)$$

$$S_{4i} = 2\operatorname{Re}(E_{xi}E_{zi}^*), \quad (6)$$

$$S_{5i} = -2\operatorname{Im}(E_{xi}E_{zi}^*), \quad (7)$$

$$S_{6i} = 2\operatorname{Re}(E_{yi}E_{zi}^*), \quad (8)$$

$$S_{7i} = -2\operatorname{Im}(E_{yi}E_{zi}^*), \quad (9)$$

$$S_{8i} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(|E_{xi}|^2 + |E_{yi}|^2 - |E_{zi}|^2 \right), \quad (10)$$

где $*$ – комплексное сопряжение.

Параметр S_{0i} представляет собой полную мощность радиосигнала, а остальные компоненты $S_{1i}, S_{2i}, S_{3i}, \dots, S_{8i}$ описывают его поляризационную структуру. Совокупность данных параметров полностью описывает когерентную матрицу плотности электромагнитного поля и являются стандартом в радиополяриметрии.

Этап 5. На основе вектора Стокса осуществляется расчет степени деполяризации:

$$Dp_i = 1 - \frac{\sqrt{S_{1i}^2 + S_{2i}^2 + S_{3i}^2 + \dots + S_{8i}^2}}{S_{0i}}. \quad (11)$$

Степень деполяризации представляет собой безразмерную величину в диапазоне от 0 до 1, характеризующую насколько электромагнитная волна отклоняется от поляризованного состояния: значение «0» соответствует полностью поляризованной волне, как при прямом распространении в свободном пространстве, а значение, близкое к «1» – полностью или частично деполяризованной волне, что обычно возникает при отражениях, рассеянии или интерференции прямого и отраженного радиосигналов.

Этап 6. Для каждого РПП вычисляется весовой коэффициент w_i , количественно характеризующий надежность измерения разности времени прихода радиосигнала, полученного на i -м РПП. Основой для формирования весового коэффициента служит степень деполяризации Dp_i :

$$w_i = \exp\left(-\frac{Dp_i^2}{2\sigma_{Dp}^2}\right) + \varepsilon_w, \quad (12)$$

где $\sigma_{Dp} > 0$ – параметр чувствительности, определяющий скорость убывания веса с ростом степени деполяризации (чем больше σ_{Dp} , тем сильнее подавляется вклад деполяризованного радиосигнала в оценку координат БПЛА); $\varepsilon_w \in (0, 1]$ – нижняя граница веса, вводимая для обеспечения устойчивости последующей оптимизационной задачи, без данной границы возможны ситуации, когда $w_i \rightarrow 0$, что приводит к неустойчивости решения.

Весовой коэффициент w_i служит адаптивным фильтром, автоматически понижающим вклад тех измерений РПП, в которых наблюдается значительная деполяризация радиосигнала, т.е. наиболее подверженных искажениям ввиду многолучевого распространения радиоволн.

Этап 7. Формирование модельной оценки разностей времени прихода радиосигнала на i -й РПП при условии, что БПЛА находится в некоторой гипотетической точке пространства $\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}} = [\hat{x}_{\text{БПЛА}} \quad \hat{y}_{\text{БПЛА}} \quad \hat{z}_{\text{БПЛА}}]^T$.

Предполагается, что электромагнитная волна распространяется в свободном пространстве без отражений и искажений по прямой линии от БПЛА к каждому РПП. В этом случае геометрическое расстояние от гипотетического положения БПЛА до i -го РПП с известными координатами $\mathbf{p}_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T$ определяется евклидовой нормой:

$$d_i(\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}}) = \|\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}} - \mathbf{p}_i\| = \sqrt{(\hat{x}_{\text{БПЛА}} - x_i)^2 + (\hat{y}_{\text{БПЛА}} - y_i)^2 + (\hat{z}_{\text{БПЛА}} - z_i)^2}. \quad (13)$$

В рамках разностно-дальномерного метода используется разность расстояний до текущего и опорного РПП. Соответствующая разность времени прихода радиосигнала в модели свободного пространства выражается как:

$$\tau_{i1}^{\text{мод}}(\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}}) = \frac{d_i(\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}}) - d_1(\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}})}{c} = \frac{\|\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}} - \mathbf{p}_i\| - \|\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}} - \mathbf{p}_1\|}{c}, \quad (14)$$

где c – скорость света в вакууме (или в атмосфере, с достаточной для практических целей точностью).

Этап 8. Осуществляется формирование функции стоимости $J(\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}})$, которая количественно оценивает степень несоответствия между фактически измеренными разностями времени прихода радиосигнала и модельными значениями для текущей гипотезы о положении БПЛА.

Функция стоимости учитывает как статистические характеристики шума в измерениях, так и весовые коэффициенты, основанные на степени деполяризации и определяется следующим выражением:

$$J(\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}}) = \frac{1}{2\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N w_i (\tau_{i1} - \tau_{i1}^{\text{мод}}(\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}}))^2, \quad (16)$$

где σ_i^2 – дисперсия гауссовского шума в измерениях разности времени прихода радиосигнала.

Физический и методологический смысл компонентов функции стоимости (16) заключается в следующем: квадратичная невязка $(\tau_{i1} - \tau_{i1}^{\text{мод}}(\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}}))^2$ отражает степень несоответствия между реально измеренной разностью времени прихода радиосигнала и ее модельным значением, рассчитанным для гипотетического положения БПЛА в пространстве, тем самым обеспечивая привязку оценки к геометрии распространения радиоволны; нормировка на дисперсию шума σ_i^2 реализует статистически обоснованное взвешивание, при котором наименее зашумленные измерения оказывают большее влияние на результат, что соответствует принципам взвешенного метода наименьших квадратов; весовой коэффициент w_i , вычисляемый на основе степени деполяризации радиосигнала, вводит физически обоснованную коррекцию, снижая вклад тех измерений, которые потенциально искажены многолучевым распространением радиоволн. В совокупности данные компоненты обеспечивают баланс между геометрической точностью, статистической оптимальностью и устойчивостью к физическим искажениям радиосигнала.

Этап 9. Данный этап подразумевает оценку пространственного положения БПЛА путем минимизации функции стоимости $J(\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}})$. Формально, задача заключается в нахождении такой точки в пространстве, при которой функция стоимости достигает своего глобального минимума:

$$\mathbf{p}_{\text{БПЛА}} = \arg \min_{\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}} \in \Omega} J(\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}}), \quad (17)$$

где Ω – допустимая область поиска БПЛА в пространстве.

Поскольку функция $J(\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}})$ является нелинейной ввиду наличия евклидовых норм в выражении для модельных разностей времени прихода $\tau^{\text{мод}}(\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}})$, необходимо применение итерационных численных методов оптимизации, таких как: метод градиентного спуска, метод

Левенберга-Марквардта, метод дифференциальной эволюции, алгоритмы на основе квазиньютоновских приближений (например, BFGS) или другие методы локальной оптимизации.

Эффективность и сходимость итеративных методов напрямую зависят от качества начального приближения. В условиях наличия нескольких локальных минимумов, что типично для традиционного разностно-дальномерного метода, плохая инициализация может привести к сходимости к неверному решению. Возможно использование одного из следующих начальных приближений:

оценка, полученная классическим разностно-дальномерным методом без учета поляризационной структуры радиосигнала. Несмотря на потенциальную смещенность в условиях многолучевости, она часто достаточно близка к истине в зонах прямой видимости;

априорная информация о возможном местоположении БПЛА, например, исходя из предыдущих измерений, сектора радиомониторинга или результатов пеленгования угломерным методом.

Этап 10. В ходе данного этапа результаты, полученные в ходе решения задачи нелинейной оптимизации, оформляются в виде окончательной оценки пространственного положения БПЛА $\mathbf{p}_{\text{БПЛА}} = [x_{\text{БПЛА}} \quad y_{\text{БПЛА}} \quad z_{\text{БПЛА}}]^T$.

2. Программная реализация предложенного алгоритма

В рамках программной реализации предложенного алгоритма определения координат БПЛА разработана вычислительная модель, которая позволяет симулировать функционирование радиопеленгаторной сети с различной пространственной конфигурацией [7,8], состоящей из трех РПП, каждый из которых оснащен ТОАС, обеспечивающей измерение полного комплексного вектора напряженности электрического поля. Источником радиоизлучения в модели является БПЛА, оснащенный БРЭО, излучающим радиосигнал с фиксированными энергетическими и поляризационными параметрами. Модель учитывает как прямое, так и многолучевое распространение радиосигнала, включая возможность формирования отраженных компонент

с заданной временной задержкой и измененной поляризационной структурой, что позволяет исследовать эффективность предложенного алгоритма в условиях, приближенных к реальным (рис. 2).

Исследование проводилось для различных энергетических параметров БРЭО, что влияет на отношение сигнал-шум и, как следствие, на точность измерений. Ключевым элементом исследования было то, что на РПП № 3 приходит не только прямой, но и отраженный радиосигнал, имитирующий ситуацию многолучевого распространения радиоволн.

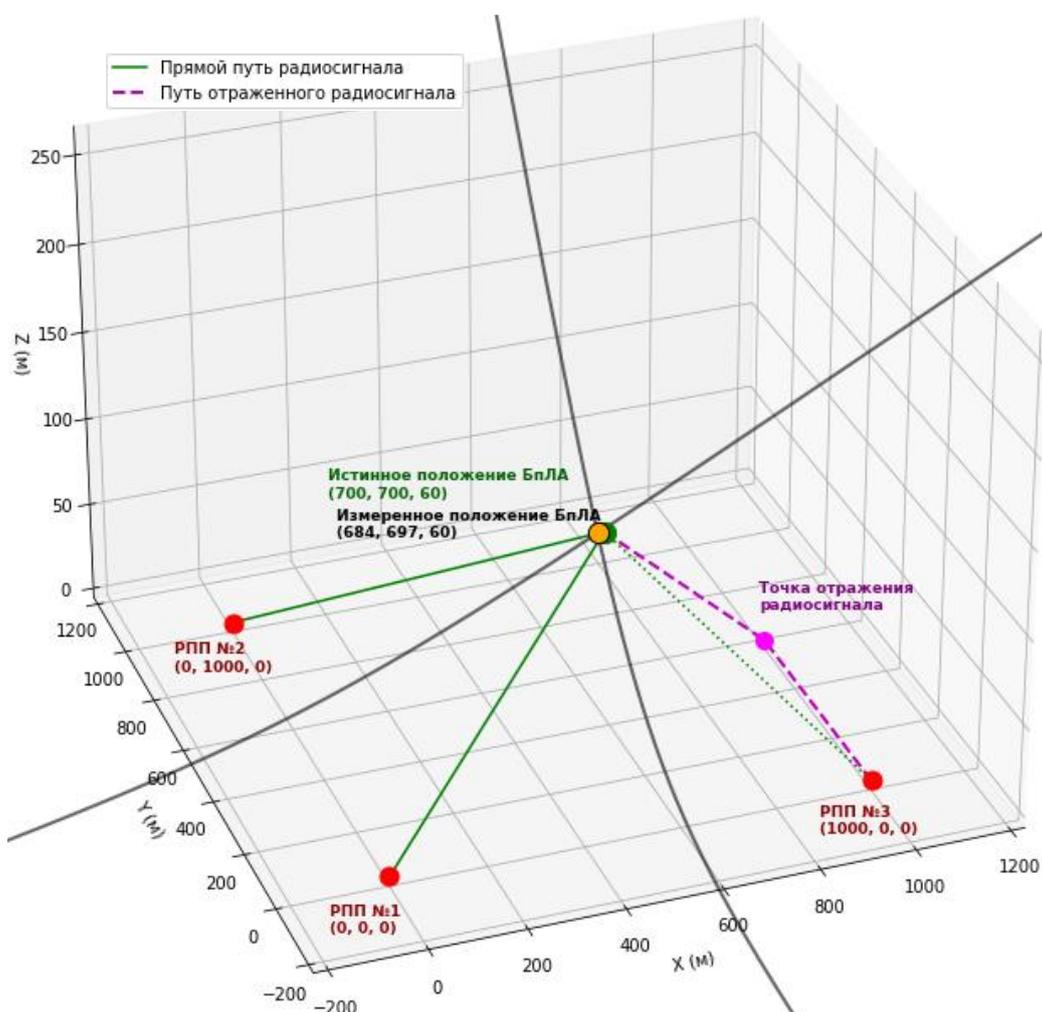


Рис. 2. Графическое представление оценивания координат БПЛА в условиях многолучевого распространения радиоволн.

Для наглядной демонстрации функционирования алгоритма реализована визуализация функции стоимости на фиксированной высоте БПЛА 60 м. На рис. 3 представлена трехмерная поверхность данной функции, где по осям абсцисс и ординат отложены координаты в горизонтальной плоскости, а по оси

аппликат – значение функции стоимости. Минимум функции, соответствующий наиболее вероятному местоположению БПЛА, отчетливо виден вблизи точки с координатами $\mathbf{p}_{\text{БПЛА}} = [700 \ 700 \ 60]^T$. Измеренная же оценка, полученная алгоритмом, составляет $\hat{\mathbf{p}}_{\text{БПЛА}} = [684 \ 697 \ 60]^T$, что визуально и численно подтверждает работоспособность алгоритма.

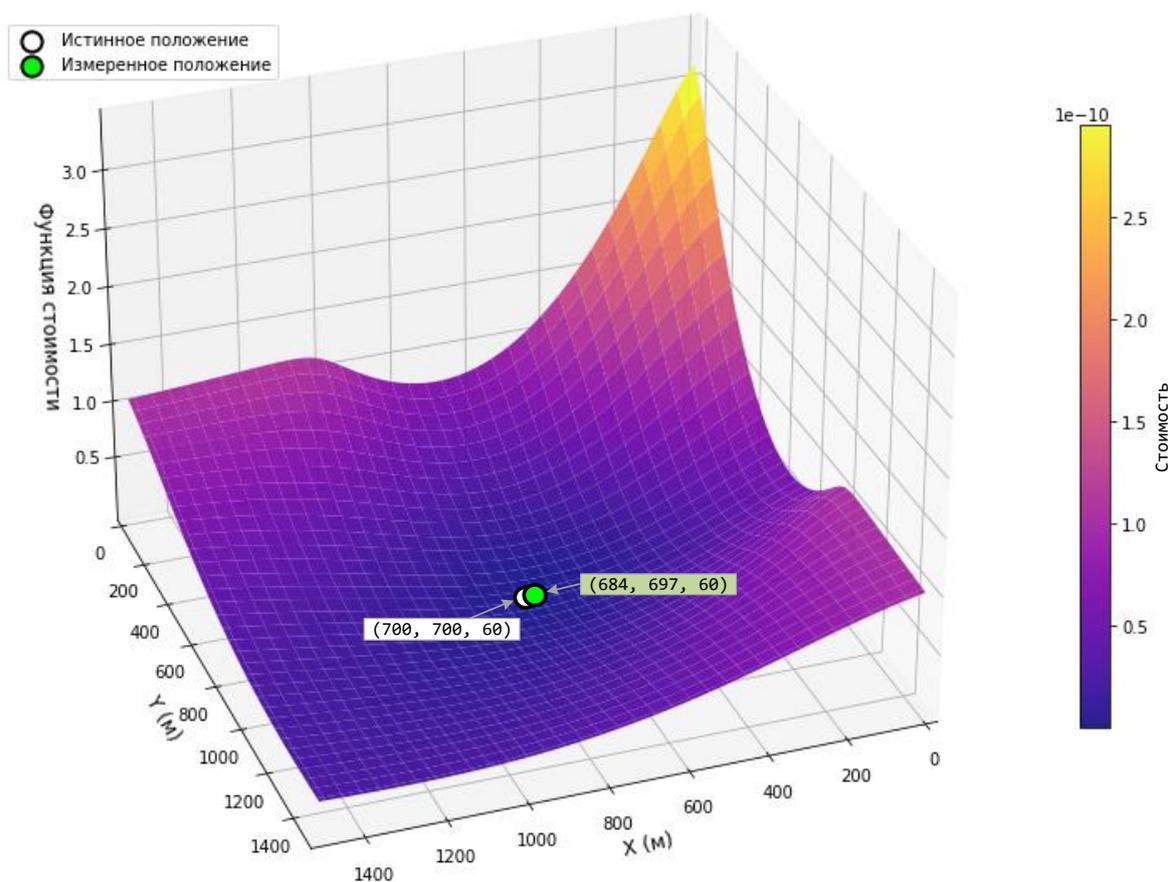


Рис. 3. Визуализация функции стоимости на фиксированной высоте БПЛА 60 м.

Поиск минимума функции стоимости в данном случае осуществлен с помощью метода дифференциальной эволюции, который является глобальным оптимизатором и хорошо подходит для задач с множественными локальными минимумами, характерных для систем, реализующих разностно-дальномерный метод определения координат. Выбор метода дифференциальной эволюции обусловлен тем, что функция стоимости, основанная на измерениях разностей времени прихода радиосигнала и взвешенная по его степени деполяризации, является нелинейной и может иметь несколько локальных минимумов. Данный метод оптимизации является глобальным, градиентно-независимым, а также

устойчивым к шуму и неопределенностям, что делает его особенно подходящим для задач определения координат, где: пути распространения радиосигнала могут быть искажены отражениями; измерения зависят от отношения сигнал-шум; веса в функции стоимости адаптируются на основе поляризационных параметров.

Кроме того, для объективной оценки преимуществ предлагаемого алгоритма по сравнению с традиционным разностно-дальномерным методом построен график зависимости линейной ошибки определения координат БПЛА от времени задержки отраженного радиосигнала на РПП № 3 (рис. 4) для конфигурации радиопеленгаторной сети и БПЛА, в соответствии с рис. 2. График показывает, что при увеличении задержки отраженного радиосигнала, что эквивалентно увеличению расстояния до точки отражения, ошибка традиционного разностно-дальномерного метода значительно возрастает, достигая сотен метров. В то же время, разработанный алгоритм, за счет использования весовых коэффициентов, основанных на степени деполяризации, демонстрирует меньшую ошибку определения координат БПЛА.

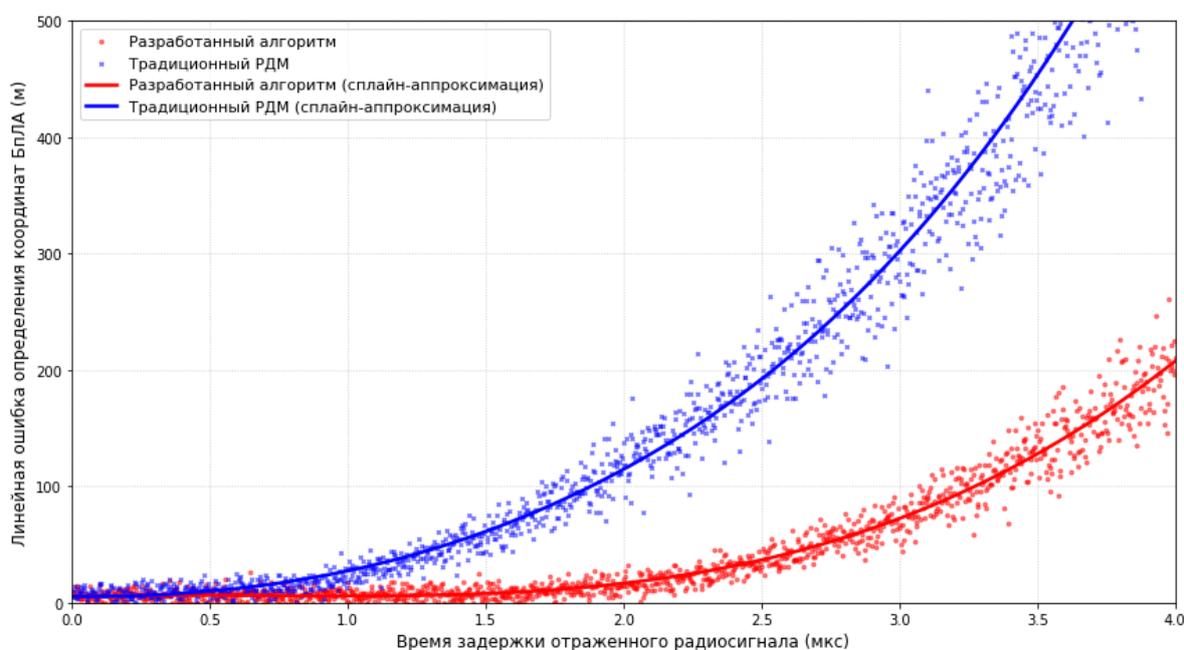


Рис. 4. График зависимости линейной ошибки определения координат БПЛА от времени задержки отраженного радиосигнала при использовании разработанного алгоритма и традиционного разностно-дальномерного метода.

Заключение

В настоящей статье предложен алгоритм определения координат БПЛА, интегрирующий разностно-временные и поляризационные измерения радиосигналов его БРЭО. В отличие от традиционного разностно-дальномерного метода, опирающегося исключительно на разности времени прихода радиосигнала и оказывающегося уязвимым к искажениям при многолучевом распространении радиоволн, предложенный алгоритм использует информацию о состоянии поляризации электромагнитной волны, определяемую с помощью ТОАС. На основе девятикомпонентного вектора Стокса вычисляется степень деполяризации, которая служит индикатором присутствия отраженных компонент радиосигнала. Данная величина, в свою очередь, используется для формирования весового коэффициента в функции стоимости, что позволяет автоматически понижать вклад деполяризованного радиосигнала в оценку координат БПЛА.

Результаты численного моделирования радиопеленгаторной сети из трех РПП, подтверждают, что предложенный алгоритм обеспечивает меньшую ошибку определения координат БПЛА по сравнению с традиционным разностно-дальномерным методом.

Разработанный алгоритм относится к области радиотехники и может быть использован в системах пассивной радиолокации и мониторинга воздушного пространства, функционирующих в урбанизированных, гористых или иных сложных условиях, где многолучевое распространение радиоволн является доминирующим фактором, снижающим точность определения координат БПЛА. Реализация алгоритма требует оснащения РПП ТОАС и соответствующими вычислительными модулями для обработки поляризационной информации, однако дополнительные аппаратные и программные внедрения оправдываются повышением устойчивости и точности определения координат БПЛА.

Литература

1. Макаренко С.И., Старостин А.В. Противовоздушная оборона страны от ударов беспилотных летательных аппаратов и крылатых ракет: новые угрозы, проблемные вопросы, технико-экономический анализ вариантов архитектуры //Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – №. 2. – С. 86-148.
2. Антипов Н.С., Богдановский С.В., Володин Р.С. Лабораторный макет аппаратно-программных средств обнаружения сигналов бортового радиоэлектронного оборудования средств воздушного нападения на основе поляризационных измерений //Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. – 2023. – №. 5 (24). – С. 4-10.
3. Антипов Н.С., Богдановский С.В. Способ определения поляризационных характеристик сигналов бортового радиоэлектронного оборудования беспилотных летательных аппаратов //ББК 3 Р 15. – 2024. – С. 21.
4. Патент № 2649097 Российская Федерация, МПК H01Q 9/00 (2006.01). Антенна триортогональная: № 2016146582: заявл. 28.11.2016: опубл. 29.03.2018 / Демичев И.В., Шмаков Н.П., Колесников Р.В., Иванов А.В. – 11 с.: ил. – Текст: непосредственный.
5. Павлов В.А. Адаптивные пространственно-поляризационные методы обработки сигналов и помех в условиях радиоэлектронного конфликта //Воронеж: ВВАИУ. – 2007.
6. Козлов Н.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Поляризационная структура радиолокационных сигналов //М.: Радиотехника. – 2005.
7. Семенюк С.С. и др. Выбор топологии измерений разностно-дальномерной системы определения местоположения источников радиоизлучений с фактически заданными позициями приемных пунктов //Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.6.5>

8. Семенюк С.С., Христиничан Е.В., Саниев Р.Р. Обоснование подхода к снижению вариативности геометрического фактора системы определения координат воздушных объектов по технологии MLAT //Журнал радиоэлектроники. – 2021. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.14>

Для цитирования:

Замуруев С.Н., Цветков М.В. Алгоритм определения координат беспилотного летательного аппарата разностно-дальномерным методом на основе поляризационных измерений радиосигналов бортового радиоэлектронного оборудования. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.3.3>