

ВЛИЯНИЕ ПОМЕХ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ

Ю. М. Скрябин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
meh-record@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Настоящее исследование относится к области локации летательных аппаратов с помощью информационно-измерительной системы электростатической локации. Для локации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) необходимо определить признаки электростатического сигнала с нескольких датчиков. В зависимости от соотношения сигнал/шум признаки определяются с погрешностью, которая влияет на погрешность определения координат БПЛА. *Материалы и методы.* Для анализа погрешности использовалась математическая модель работы системы электростатической локации. Определено влияние погрешности на основе методики расчета погрешности косвенных измерений. *Результаты.* Получены уравнения расчета координат БПЛА и их погрешность при различных сочетаниях параметров пролета и уровня сигнал/шум. *Выводы.* Погрешность пролета БПЛА можно уменьшить путем совместного использования вейвлет-функции Морле и рациональной функции в качестве анализирующей, а также за счет использования трехрядной схемы расположения датчиков.

Ключевые слова: электростатический сигнал, электростатический мониторинг, электростатическая локация, цифровая обработка сигналов, время-частотное распределение

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90028.

Благодарности: выражаю благодарность своему научному руководителю Потехину Дмитрию Станиславовичу за критику настоящего исследования.

Для цитирования: Скрябин Ю. М. Влияние помех на точность определения местоположения летательного аппарата информационно-измерительной системой электростатической локации // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 20–29. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-3

THE INFLUENCE OF NOISE ON THE ACCURACY OF DETERMINING THE LOCATION OF AN AIRCRAFT BY AN INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM OF ELECTROSTATIC LOCATION

Yu.M. Scryabin

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
meh-record@yandex.ru

Abstract. *Background.* This research relates to the field of aircraft location using an information and measurement system of electrostatic location. To locate aircraft, it is necessary to determine the signs of an electrostatic signal from several sensors. Depending on the signal-to-noise ratio, the signs are determined with an error that affects the error in determining the coordinates of the UAV. *Materials and methods.* A mathematical model of the operation of the electrostatic location system was used to analyze the error. The influence of the error is determined based on the method of calculating the error of indirect measurements. *Results.* The equations for calculating the coordinates of the UAV and their error are obtained for various combinations of flight parameters and signal/noise values. *Conclusions.* The error of the UAV flight can be reduced by combining the Morlaix wavelet function and the rational function as an analyzing one, as well as by using a three-row sensor layout.

Keywords: electrostatic signal, electrostatic monitoring, electrostatic location, digital signal processing, time-frequency distribution

Financing: the research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of a scientific project № 20-37-90028.

Acknowledgements: I would like to thank my supervisor Dmitry Stanislavovich Potekhin for his criticism of this study.

For citation: Scryabin Yu.M. The influence of noise on the accuracy of determining the location of an aircraft by an information and measurement system of electrostatic location. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):20–29. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-3

Введение

Большое распространение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и частое нарушение ими частных или государственных границ требует серьезного отношения к развитию систем их детектирования и нейтрализации. Радиолокационные средства разведки, которые показали свою эффективность для обнаружения пилотируемых летательных аппаратов, имеют затруднения с обнаружением малых низковысотных летательных аппаратов ввиду их малой эффективной площади рассеяния и отражения радиоволн от подстилающей поверхности (ПП). Кроме того, необходимо соблюдать экологические нормы по уровню радиоизлучений [1].

В настоящее время для увеличения вероятности обнаружения БПЛА используется объединение радиолокационных средств разведки со средствами на иной физической природе: радиотехнической, оптической, звуковой [2]. Потенциально определенными преимуществами обладает принцип электростатической локации [3–5].

Принцип электростатической локации заключается в том, что любой объект, перемещающийся в атмосфере, несет на себе электростатический заряд. Траекторию движения данного заряда можно определить из анализа создаваемых им возмущений электростатического поля в разных точках ПП [6].

Для измерения возмущений электростатического поля существуют и используются два основных типа измерителя: электростатический зонд и электростатический флюксометр. Электростатические зонды имеют большую практику применения в сфере электростатического мониторинга состояния технических объектов путем детектирования движения заряженных частиц в потоке жидкости или газа [7, 8]. Электростатические флюксометры до настоящего времени по большей части использовались в сфере метеонаблюдений, но последние усовершенствования их помехоустойчивости позволяют рассчитывать на их успешное использование в сфере электростатической локации [9, 10].

В работе [6] были выведены идеальные функции электростатического сигнала на основе математической модели, которые представлены на рис. 1.

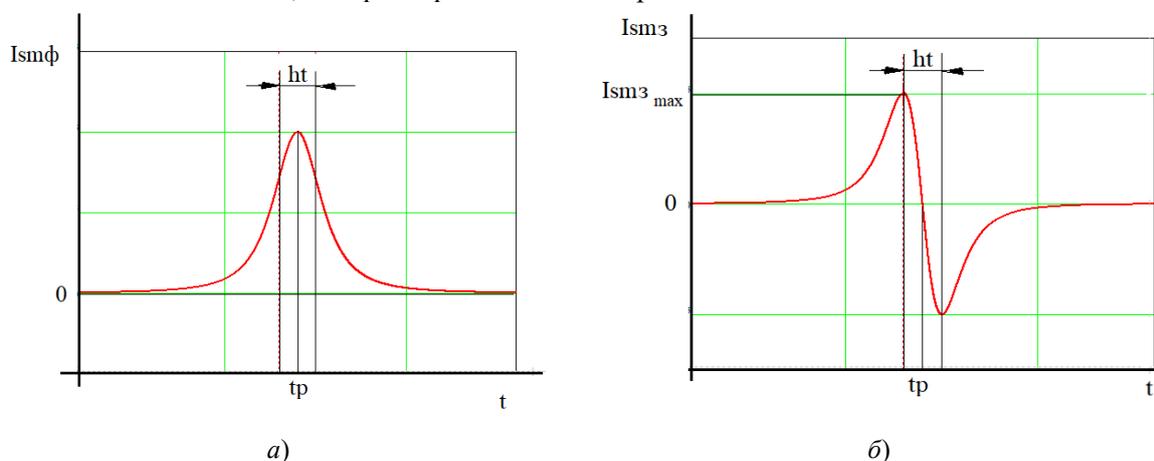


Рис. 1. Идеальные измерительные сигналы:

а – электростатического флюксометра; *б* – электростатического зонда

Для определения траектории БПЛА достаточно временного tp и частотного признака ht электростатического сигнала, полученного от трех датчиков [6]. Траектория БПЛА задается

четырьмя геометрическими параметрами, которые представлены на рис. 2: скоростью v , высотой пересечения периметра h , горизонтальным углом пересечения α и координатой пересечения p относительно первого датчика (рис. 2). Для решения задачи также необходимо знать расстояние между датчиками s .

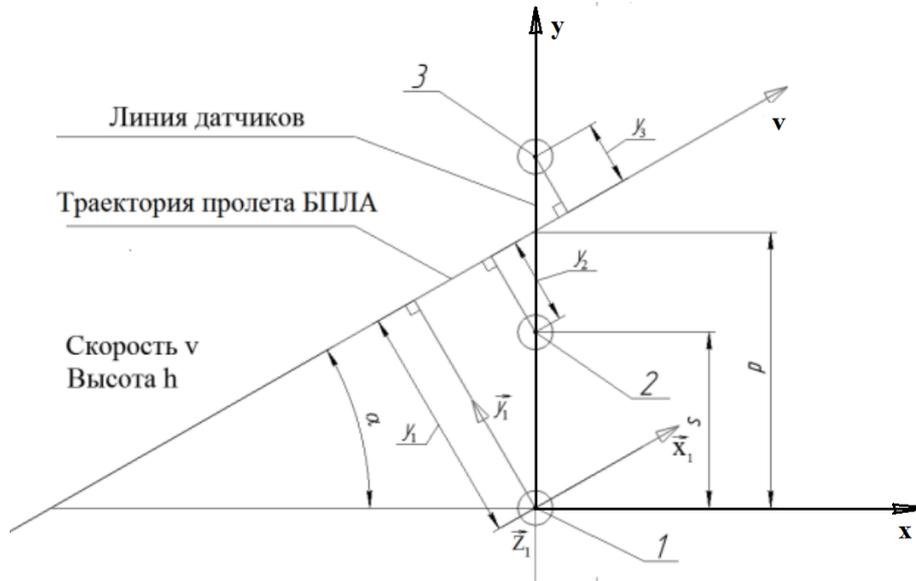


Рис. 2. Траектория БПЛА. Вид сверху

На рис. 2 БПЛА пересекает охраняемый периметр, образуемый цепочкой электростатических датчиков, вдоль оси x . Для определения параметров траектории используются три датчика, пронумерованные на рис. 2 в порядке появления на них центра электростатического сигнала 1, 2 и 3.

В предшествующем исследовании [11] были разработаны алгоритмы цифровой обработки сигнала на основе свертки модифицированной вейвлет-функцией Морле и с рациональной анализирующей функцией. Для данных функций выявлена погрешность определения параметров ht и tp в зависимости от абсолютного уровня помех.

Целью настоящей работы является оценка точности метода электростатической локации в зависимости от погрешности определения признаков электростатического сигнала.

Для достижения поставленной цели необходимо рассчитать и проанализировать погрешность определения координат для всего множества возможных сочетаний параметров пролета БПЛА.

Материалы и методы

Для определения погрешности используется математическая модель задачи электростатической локации БПЛА из предыдущего исследования [6]. Согласно решению данной задачи параметры пролета БПЛА связаны со спектральными характеристиками сигнала следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} v^2 ht_1^2 = h^2 + p^2 \cos^2 \alpha; \\ v^2 ht_2^2 = h^2 + (p-s)^2 \cos^2 \alpha; \\ v^2 ht_3^2 = h^2 + (2s-p)^2 \cos^2 \alpha; \\ v^2 (tp_3 - tp_1)^2 = 4s^2 \sin^2 \alpha; \\ v^2 (tp_3 - tp_2)^2 = s^2 \sin^2 \alpha. \end{cases} \quad (1)$$

Погрешность локации БПЛА определяется как погрешность косвенных измерений [12]:

$$\Delta z_{loc} = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_1} ht_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_2} ht_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_3} ht_3 \right)^2 \right) \varepsilon_{ht}^2 + \left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial (tp_3 - tp_1)} \frac{(ht_3 + ht_1)}{2} \right)^2 \left(\sqrt{2} \cdot \frac{\Delta tp}{ht_i} \right)^2}, \quad (2)$$

где Δz_{loc} , $\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_1}$, $\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_2}$, $\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_3}$, $\frac{\partial z_{loc}}{\partial (tp_3 - tp_1)}$ являются функциями от ht_1 , ht_2 , ht_3 и $tp_3 - tp_1$; $\varepsilon_{ht} = \frac{\Delta ht}{ht}$ –

относительная погрешность определения ht ; $\frac{\Delta tp}{ht_i}$ – приведенная (относительная) погрешность определения tp .

Вид формулы (2) обусловлен тем, что цифровые методы обработки сигналов дают относительные погрешности ε_{ht} и $\Delta tp/ht_i$, которые напрямую не зависят от параметров пролета БПЛА или признаков электростатических сигналов. Данные погрешности зависят от соотношения сигнал/шум. Следует отметить, что амплитуда сигнала электростатического зонда согласно работе [6] прямо пропорциональна $\sqrt[3]{v/h}$, а электростатического флюксметра $\sqrt{v/h}$.

Для анализа влияния погрешности признаков электростатического сигнала на точность локации БПЛА при различных параметрах пролета была составлена расчетная программа с визуализацией результатов.

Входными данными для расчетной программы являются параметры пролета БПЛА v , h , $\cos\alpha$, p . Выходными данными являются погрешности определения $\Delta x_{loc}(v, h, \cos\alpha, p)$, $y_{loc}(v, h, \cos\alpha, p)$ и $z_{loc}(v, h, \cos\alpha, p)$ в виде 5-мерного распределения от входных данных.

Расчет выходных данных осуществлялся в следующем порядке:

1. На основе первых четырех уравнений системы (1) с подстановкой входных данных рассчитывались точные значения признаков электростатических сигналов ht_1 , ht_2 , ht_3 и $tp_3 - tp_1$.
2. На основе точных признаков электростатических сигналов рассчитываются погрешности определения v , h , $\cos\alpha$, p по формуле при относительной погрешности $\varepsilon_{ht} = 1\%$ и $\varepsilon_{tp} = 0$, а также при относительной погрешности $\varepsilon_{ht} = 0$ и $\varepsilon_{tp} = 1\%$.
3. На основе полученных погрешностей Δv , Δh , $\Delta \cos\alpha$, Δp определяют погрешность Δx_{loc} , Δy_{loc} и Δz_{loc} как косвенных измерений.

Определение погрешности локации БПЛА

Спектральный анализ согласно предложенному ранее алгоритму [11] определяет местоположение БПЛА после пролета последней точки траектории на дистанцию, определяемую временем $5ht_3$. Это время необходимо, чтобы последний фиксирующий БПЛА датчик под номером 3 получил полный электростатический сигнал. Считается, что система электростатической локации должна определить для этого момента времени положение БПЛА для посылки более мощного радиопульса в ту область пространства. Согласно уравнениям кинематики координаты БПЛА для момента времени $t_{loc} = t_3 + 5ht_3$ можно определить по следующим уравнениям:

$$\begin{cases} x_{loc} = 5ht_3 v \cos \alpha + y_3 \cos \alpha; \\ y_{loc} = 5ht_3 v \sin \alpha + y_3 \sin \alpha + p; \\ z_{loc} = h. \end{cases} \quad (3)$$

Система уравнений (3) определяет координаты БПЛА x_{loc} , y_{loc} и z_{loc} в системе координат, где ось y направлена от первого датчика в сторону третьего по рис. 2. Старая система координат с осью x , направленной по движению БПЛА, неудобна для решения данной задачи и использовалась ранее для вывода системы уравнений (1).

Система уравнений (3) показывает, что БПЛА улетает от линии периметра к моменту его локации на расстояние, определяемое катетом прямоугольного треугольника с третьим датчиком в вершине и расстоянием, которое БПЛА успеет преодолеть за время ht . При расчете координаты y следует учесть смещение на p .

Точность решения будет определяться погрешностью Δs как суммой квадратов абсолютных погрешностей координат БПЛА, определяемых уравнением (3), записанным через признаки сигнала tp_j и ht_j . Выражение параметров α , v , p и h через признаки сигнала осуществляется через систему уравнений (1). Для выражения y_3 используется следующее тождество:

$$vht_i = \sqrt{h^2 + y_i^2}. \quad (4)$$

Погрешность определения положения БПЛА по уравнению (2) определяется как результат косвенных измерений на основании погрешности признаков сигнала Δht и Δtp . Особенно здесь важен факт того, по каким уравнениям рассчитываются значения параметров движения БПЛА через периметр v , p , h и α . Данные уравнения зависят от порядка выражения данных параметров. В предыдущей работе [6] был приведен наиболее быстрый с точки зрения скорости выражения алгоритм выражения данных параметров из системы (1). Как было проверено с помощью символьных вычислений, данный подход скорее приводит к наиболее наилучшим уравнениям с точки зрения отношения погрешности выражения параметров v , p , h и α к погрешности определения признаков ht и tp , кроме одного шага.

Рассмотрим наилучший способ выражения параметров v , p , h и α и сравним его с порядком выражения из работы [6]. Первым действием выгодно выразить параметр p . Это, похоже, единственный параметр, который можно выразить независимо от признака времени tp на основе первых трех уравнений системы (1) с четырьмя неизвестными. Для этого h переносится в левую часть и приравниваются правые части с получением двух независимых уравнений с тремя неизвестными. Путем переноса в левую часть слагаемых с $\cos(\alpha)$, а в правую с v и последующим делением двух уравнений друг на друга можно избавиться сразу от двух неизвестных, потеряв только одно независимое уравнение. В результате параметр p рассчитывается по следующей формуле:

$$p = s \frac{3ht_1^2 - 4ht_2^2 + ht_3^2}{2ht_1^2 - 4ht_2^2 + 2ht_3^2}. \quad (5)$$

На первый взгляд возможна ситуация, когда знаменатель (5) будет равен (или близок) к нулю и погрешность результата уравнения (5) будет сильно зависеть от погрешностей определения признака частоты. Однако такая ситуация на практике не осуществится по той причине, что для этого необходимо, чтобы признак ht_2 был близок к полусумме признаков ht_1 и ht_3 . Однако данный признак прямо зависит от расстояния между датчиками и траекторией полета БПЛА согласно уравнению (4). А второй датчик по алгоритму является наиболее близким к данной траектории. Близость знаменателя к нулю возможна при большом значении отношения h к s , но данное соотношение не выполняется ввиду профиля границы обнаружения БПЛА датчиком и рекомендуемых характеристиках сети датчиков, которые выведены в работе [6].

Далее можно вывести скорость БПЛА v и угол пересечения периметра α . Высота h при этом не может быть выражена при неизвестной v и α . Для их вывода необходимо убрать одно из первых трех уравнений в системе (1). Для решения проще всего перейти к одной тригонометрической функции. В итоге при исключении первого или третьего уравнения получается формула для расчета v соответственно:

$$v = 2 \sqrt{\frac{s^2}{2ht_1^2 - 4ht_2^2 + 2ht_3^2 + (tp_3 - tp_1)^2}}. \quad (6)$$

Оставшиеся два параметра – α и h . Однако так как сам угол не требуется для получения текущего местоположения БПЛА, то достаточно выразить значения $\sin\alpha$ и $\cos\alpha$:

$$\cos\alpha = \sqrt{2} \sqrt{\frac{ht_1^2 - 2ht_2^2 + ht_3^2}{2ht_1^2 - 4ht_2^2 + 2ht_3^2 + (tp_3 - tp_1)^2}}; \quad (7)$$

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2s^2(ht_1^4 - 8ht_1^2ht_2^2 - 2ht_1^2ht_3^2 + 16ht_2^4 - 8ht_2^2ht_3^2 + ht_3^4)}{(2ht_1^2 - 4ht_2^2 + 2ht_3^2 + (tp_3 - tp_1)^2)(ht_1^2 - 2ht_2^2 + ht_3^2)}}. \quad (8)$$

Погрешность локации БПЛА Δz_{loc} определяется по формуле (2), примененной к выражению (8). Погрешности определения других координат Δx_{loc} и Δy_{loc} уже зависят от погрешности определения v , h , $\cos\alpha$ и в случае последней еще и p . Для избавления от громоздких выражений их учет будет учитываться в два шага. Предполагается, что информационно-измерительная система сначала рассчитывает v , h , $\cos\alpha$, p на основе признаков электростатического сигнала. Их погрешности определяются по формуле, аналогичной (8). Затем на их основе рассчитываются x_{loc} и y_{loc} и их погрешности считаются как погрешности косвенных измерений от ошибок Δv , Δh , $\Delta \cos\alpha$, Δp .

Результаты

Кроме этого, необходимо проанализировать погрешность для практических диапазонов изменения $h, p, \cos\alpha$ и v . Диапазон изменения скорости v оказался неважен, так как она влияет только на ошибку определения самой скорости и влияние на определение координаты оказывается минимальное. Диапазоны остальных величин при $s = 30$ (м) следующие: $0 \leq \cos\alpha \leq 0,5$; $0,5s \leq p \leq 1,5s$; $3 \leq h \leq 30$. Диапазон p ограничен самим алгоритмом, при выходе p за указанный диапазон выбираются другие три датчика, чьи сигналы будут наиболее сильными [6]. Диапазон h определен согласно теоретическому диапазону высот, на которых летательный аппарат может быть определен между датчиками согласно расчетам.

Результаты проведенного анализа более наглядно могут быть представлены в виде графиков на рис. 3 при $p = s = 30$ (м) и рис. 4 при $p = s/2 = 15$ (м). От скорости v данные графики практически не зависят.

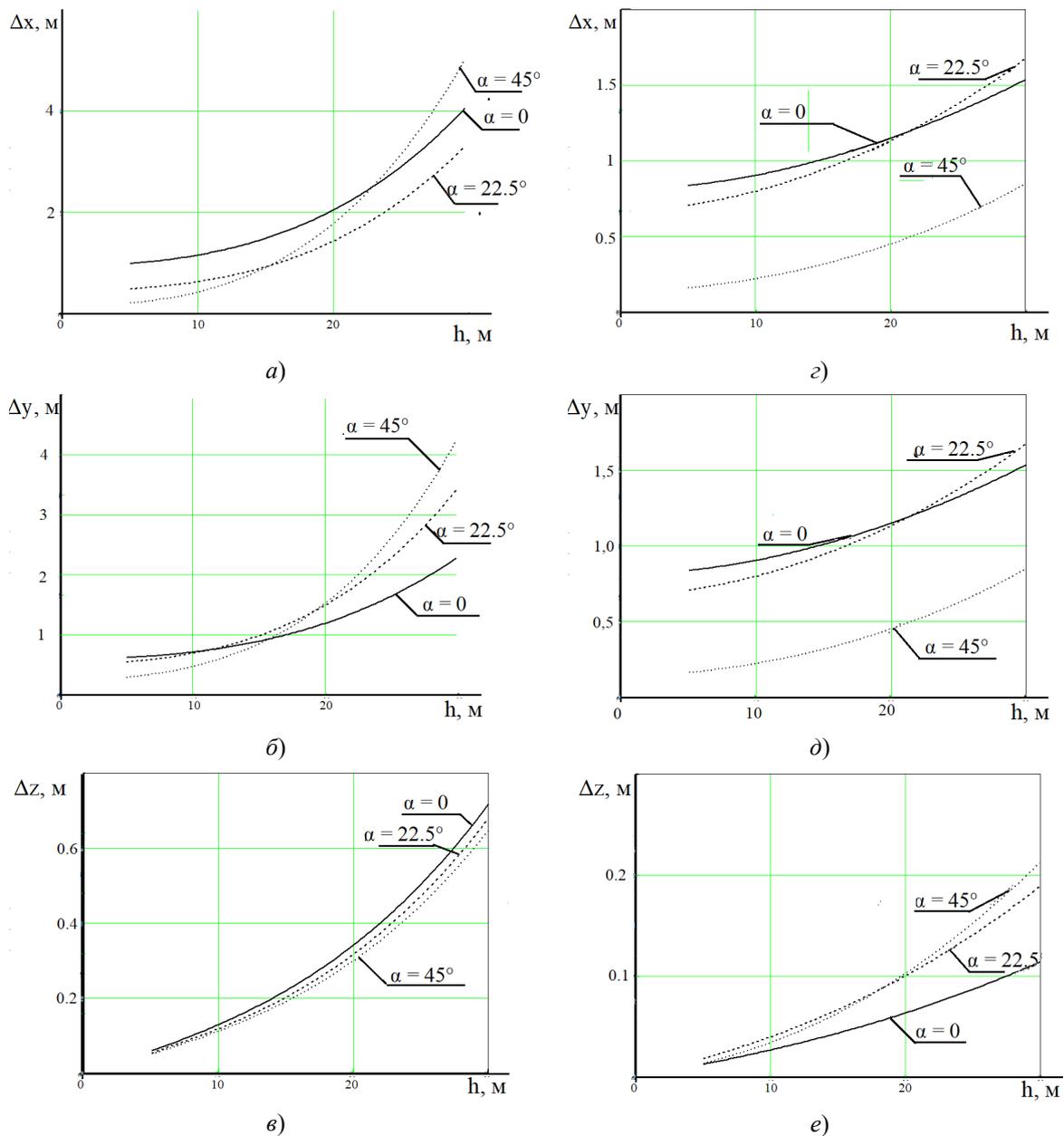


Рис. 3. Зависимость ошибки от высоты и угла пересечения периметра при $p = s$:
 $a - \Delta x_{ht}(h)$; $b - \Delta y_{ht}(h)$; $e - \Delta z_{ht}(h)$; $c - \Delta x_{tp}(h)$; $d - \Delta y_{tp}(h)$; $e - \Delta z_{tp}(h)$

Исходя из графиков рис. 3 и 4 получается, что влияние погрешности определения частотного признака в несколько раз выше, чем влияние погрешности определения признака времени. Погрешность определения координат на горизонтальной плоскости в несколько раз выше, чем погрешность определения высоты.

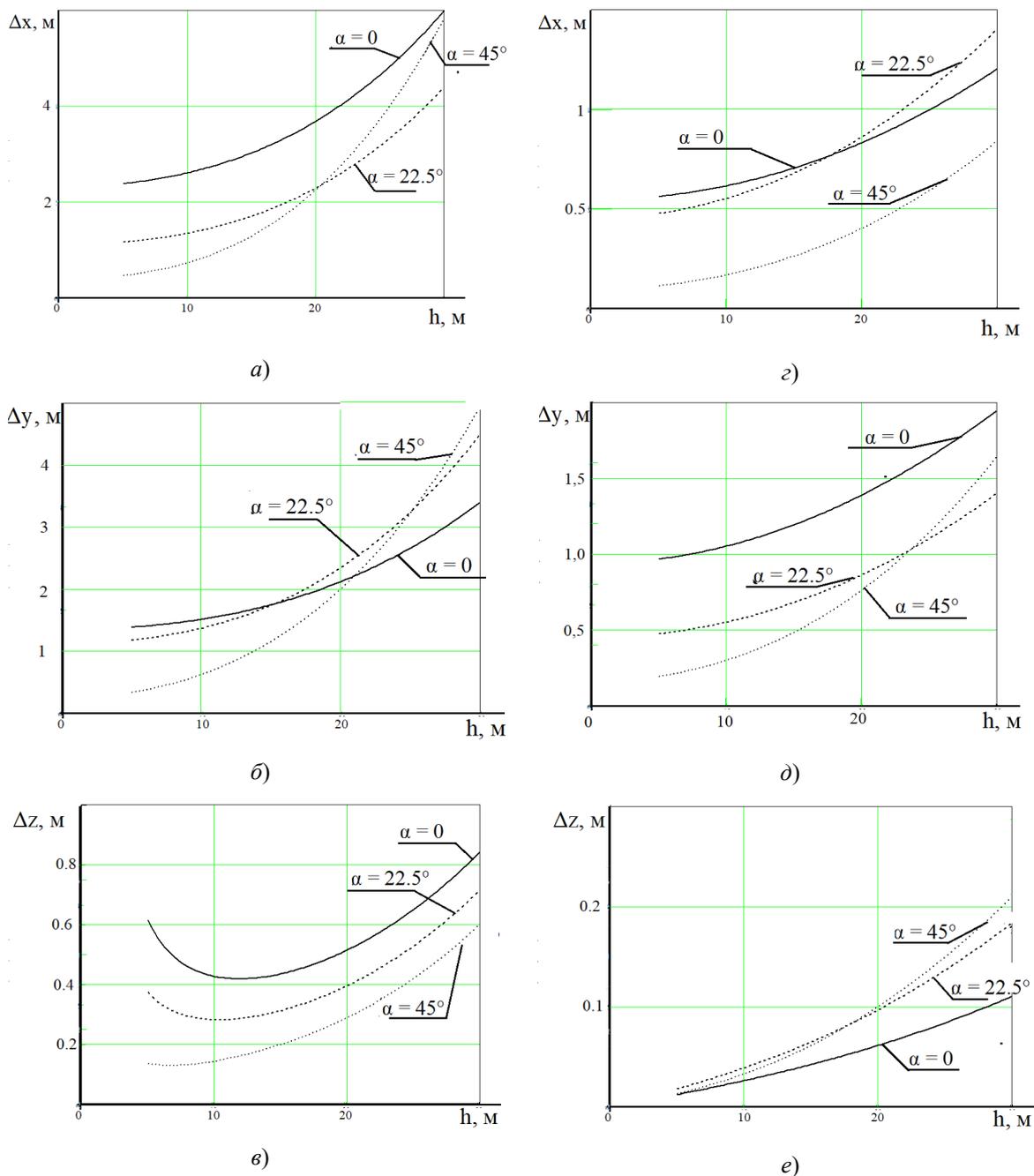


Рис. 4. Зависимость ошибки от высоты и угла пересечения периметра при $p = s/2$:
 $a - \Delta x_{ht}(h)$; $b - \Delta y_{ht}(h)$; $e - \Delta z_{ht}(h)$; $z - \Delta x_{ip}(h)$; $d - \Delta y_{ip}(h)$; $e - \Delta z_{ip}(h)$

На основе приведенных в данной статье расчетов (для ошибки в 1 %) и результатов предыдущей работы [11] можно составить таблицу ошибки определения координаты БПЛА системой электростатической локации для условий скорости полета 5 м/с, высоты полета 20 м и пересечения периметра по нормали ($\alpha = 0$) над одним из электростатическим датчиков ($p = s = 20$).

Таблица 1

Погрешности определения координат БПЛА

Анализирующая функция	Сигнал/шум	$\varepsilon_{ht}, \%$	$\varepsilon_{ip}, \%$	$\Delta x, \text{ м}$	$\Delta y, \text{ м}$	$\Delta z, \text{ м}$
Вейвлет Морле	3	0	2 %	1,5	2,6	0,1
	2	0	4 %	3	5,2	0,2
Рациональная функция	3	0,1 %	0,1 %	0,39	0,41	0,05
	2	1,1 %	1 %	4,5	3,6	0,55

Обсуждение

Существует сложная зависимость между погрешностью определения координат БПЛА и углом входа. В целом можно сказать, что для низких высот наибольшая погрешность определения координат возникает при нормальном пересечении периметра датчиков. С увеличением высоты ситуация меняется на противоположную, но в первую очередь при достаточно больших углах между нормалью к периметру и угле пересечения границы и отклонении от центрального датчика (p близком к $1/2s$ или $3/2s$).

Это способствует мысли использования трехрядной системы расположения датчиков (рис. 5) для уменьшения погрешности.

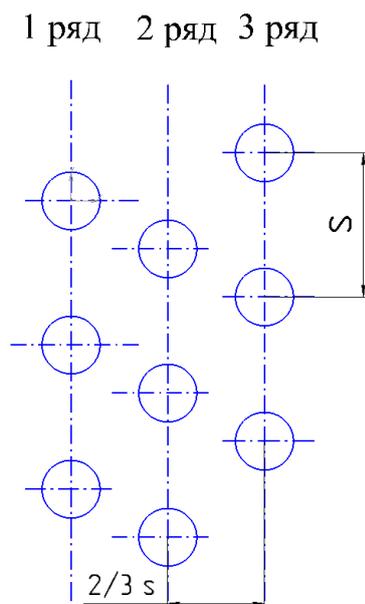


Рис. 5. Трехрядное расположение датчиков

При использовании трехрядной схемы можно использовать не только тройку датчиков из соответствующего ряда, для которой p максимально близко к s , но и использовать датчики из разных рядов, обеспечивая другие углы α между траекторией БПЛА и нормалью к линии датчиков, т.е. те, для которых погрешность определения координат является наименьшей. Также из-за возможности использования нескольких групп датчиков для одной и той же цели можно разработать алгоритм определения признаков на основе их измерений.

В случае снижения расстояния между датчиками значительно вырастают погрешности определения координаты x . С другой стороны, естественно, что увеличивается соотношение сигнал/шум, однако если расстояние между датчиками выбрано из требований, изложенных в работе [12], то дополнительный выигрыш не превышает 5 %.

Заключение

Метод электростатической локации, основанный на измерении напряженности электростатического поля, на основе приведенного алгоритма позволяет определить местоположение одиночного равномерно летящего объекта над ровной поверхностью с погрешностью, не превышающей 1 м при соотношении сигнал/шум больше или равным 3. Уменьшение погрешности в выбранных условиях может быть целесообразным путем использования трехрядной границы электростатических датчиков для возможности локации БПЛА на основе сигналов с датчиков, расположенных под другим углом к траектории полета БПЛА, а также одновременном расчете признака частоты с помощью вейвлет-функции Морле и признака времени при использовании рациональной функции.

Список литературы

1. Сенцов А. А., Поляков В. Б., Иванов С. А. Помозова Т. Г. Метод перехвата малоразмерных и малозаметных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2023. № 129. С. 1–30. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173033>

2. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 101–146.
3. Ластовецкий А. Е., Клепка С. П., Рябоконт М. С. Дистанционное измерение электрических зарядов воздушных объектов // Вестник концерна ПВО Алмаз-Антей. 2015. № 3. С. 59–69.
4. Борзов А. Б. Электрическая модель летательного аппарата в задачах ближней электростатической локализации воздушных целей // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 12. С. 1159–1167.
5. Chubb J. The measurement of atmospheric electric fields using pole mounted electrostatic fieldmeters // Journal of Electrostatics. 2014. № 72. P. 295–300.
6. Скрябин Ю. М., Потехин Д. С. Определение траектории горизонтального пролета беспилотного летательного аппарата через линию электростатических датчиков // Труды МАИ. 2019. № 106. С. 1–19. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105747>
7. Zhenhua W., Junxing Ho., Jason A. A review of electrostatic monitoring technology: The state of the art and future research directions // Progress in Aerospace Sciences. 2017. Vol. 2, iss. 1. P. 1–11.
8. Yong Y., Yonghui H., Lijuan W. [et al.]. Electrostatic sensors – Their principles and applications // Measurement. 2022. № 169. P. 153–183.
9. Патент 2722477 Российская Федерация. Электростатический флюксметр / Потехин Д. С., Скрябин Ю. М., Тетерин Е. П. № 2019123353 ; заявл. 24.07.2019 ; опубл. 01.06.2020.
10. Бирюков С. В. Предпосылки создания прибора для измерения напряженности электрического поля с определением погрешности результата измерений // Информационные технологии и средства обучения. 2023. № 7. С. 1–7.
11. Скрябин Ю. М., Потехин Д. С. Рациональная анализирующая функция для точного определения параметров электростатического сигнала // Труды МАИ. 2021. № 119. С. 1–32. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159792>
12. Пухаренко Ю. В., Норин В. А. Статистическая обработка результатов измерений. М. : Лань, 2021. 236 с.

References

1. Sentsov A.A., Polyakov V.B., Ivanov S.A. Pomozova T.G. Metod intercepts small-sized and inconspicuous flying devices. *Trudy MAI = Proceedings of the MAI*. 2023;(129):1–30. (In Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173033>
2. Makarenko S.I., Timoshenko A.V., Vasil'chenko A.S. Analysis of means and methods of countering unmanned aerial vehicles. Part 1. Unmanned Aerial Vehicle as an object of detection and Damage. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control systems, communications and security*. 2020;(1):101–146. (In Russ.)
3. Lastovetskiy A.E., Kleпка S.P., Ryabokon' M.S. Remote measurement of electric charges of air objects. *Vestnik kontserna PVO Almaz-Antey = Bulletin of the Almaz-Antey Air Defense concern*. 2015;(3):59–69. (In Russ.)
4. Borzov A.B. Electrical model of an aircraft in the problems of near electrostatic location of air targets. *Radiotekhnika i elektronika = Radio engineering and electronics*. 2016;61(12):1159–1167. (In Russ.)
5. Chubb J. The measurement of atmospheric electric fields using pole mounted electrostatic fieldmeters. *Journal of Electrostatics*. 2014;(72):295–300.
6. Skryabin Yu.M., Potekhin D.S. Determination of the horizontal flight path of an unmanned aerial vehicle through a line of electrostatic sensors. *Trudy MAI = Proceedings of the MAI*. 2019;(106):1–19. (In Russ.). Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105747>
7. Zhenhua W., Junxing Ho., Jason A. A review of electrostatic monitoring technology: The state of the art and future research directions. *Progress in Aerospace Sciences*. 2017;2(1):1–11.
8. Yong Y., Yonghui H., Lijuan W. et al. Electrostatic sensors – Their principles and applications. *Measurement*. 2022;(169):153–183.
9. Patent 2722477 Russian Federation. Electrostatic fluxmeter. Potekhin D.S., Skryabin Yu.M., Teterin E.P. No. 2019123353; appl. 24.07.2019; publ. 01.06.2020. (In Russ.)
10. Biryukov S.V. Prerequisites for the creation of a device for measuring the electric field strength with the determination of the measurement result error. *Informatsionnye tekhnologii i sredstva obucheniya = Information technologies and learning tools*. 2023;(7):1–7. (In Russ.)
11. Skryabin Yu.M., Potekhin D.S. Rational analyzing function for accurate determination of electrostatic signal parameters. *Trudy MAI = Proceedings of the MAI*. 2021;(119):1–32. (In Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159792>
12. Pukharenko Yu.V., Norin V.A. *Statisticheskaya obrabotka rezul'tatov izmereniy = Statistical processing of measurement results*. Moscow: Lan', 2021:236. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Юрий Михайлович Скрябин

преподаватель кафедры вычислительной техники,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: meh-record@yandex.ru.

Yuriy M. Skryabin

Lecturer of the sub-department
of computer engineering,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 11.07.2024

Поступила после рецензирования/Revised 05.08.2024

Принята к публикации/Accepted 03.09.2024