

УДК 51.74

## РАЗМЕЩЕНИЕ ДАТЧИКОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЛОКАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Д. С. Потехин, д.т.н., доцент, профессор кафедры вычислительной техники РТУ МИРЭА, Москва, Россия;

orcid.org/0000-0003-3339-1530, e-mail: msyst@msyst.ru

Ю. М. Скрыбин, преподаватель кафедры вычислительной техники РТУ МИРЭА, Москва, Россия;

orcid.org/0000-0002-4890-5314 e-mail: meh-recoryandex.ru

*Рассматриваются точность локации и время реагирования на летательный аппарат информационно-измерительной системы электростатической локации, которая опирается на пассивные измерения напряженности электростатического поля в точках охраняемого периметра. Целью работы является определение дистанции, которую преодолевает летательный аппарат после пересечения охраняемого периметра до его обнаружения, а также влияния шага расположения датчиков на точность реагирования. Результаты получены с учетом использования сверточного алгоритма цифровой обработки полной длины электростатических сигналов, возникающих при движении заряженного летательного аппарата вблизи датчика. Проводится анализ погрешности расчетов координат цели с учетом погрешности расчета признаков электростатического сигнала. Дается ответ на вопрос о шаге расположения датчиков не только с точки зрения уровня сигнал/шум, как это было предложено делать ранее, но и на основе точности расчетов его текущих координат.*

**Ключевые слова:** электростатическая локация, электростатический мониторинг, электростатический флюксметр, электростатический зонд, средства разведки летательных аппаратов.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-89-21-30

### Постановка задачи

В работе рассматривается точность определения положения летательного аппарата информационно-измерительной системой в зависимости от шага расположения датчиков. Для этого также определяется момент времени, когда данная система может принять решение об обнаружении летательного аппарата (ЛА) и рассчитать его координаты. Рассматриваемая система опирается на пассивное измерение электростатического поля в нескольких точках на земной поверхности при помощи электростатических зондов [1] или электростатических флюксметров [2]. Алгоритм обнаружения и локации цели разобран в предыдущих исследованиях [3, 4].

Необходимость использования данной системы возникает при обнаружении малых низколетящих целей, т.е. в первую очередь для обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Данная система не является самодостаточной, так как не позволяет идентифицировать и сопровождать цели. Поэтому предполагается включение данной системы в общую схему средств разведки БПЛА как подсистемы. По сравнению со средствами оптической и радиолокационной разведки данная система потенциально обладает более высокими возможностями по обнаружению низколетящих целей. Система электростатической разведки передает координаты обнаруженной и локализованной цели средствам оптической и радиолокационной разведки, которые могут обнаружить, идентифицировать и сопровождать цель. Увеличение вероятности обнаружения обеспечивается тем, что средства оптической разведки могут пожертвовать угловым полем обзора для большего оптического увеличения [5], а средства радиолокационной разведки могут кратковременно послать более мощный радиоимпульс в указанную область пространства [6] для увеличения вероятности обнаружения.

Способности по обнаружению цели у системы электростатической локации схожи со способностями средств звуковой разведки. Преимуществом средств электростатической ло-

кации по сравнению со средствами звуковой разведки является невосприимчивость к восходящим потокам воздуха и передвижению цели в режиме планирования или использованию целями планерного типа малошумных электрических двигателей [5, 7]. Чтобы оценить актуальность использования системы электростатической локации, следует рассчитать необходимое время для обнаружения БПЛА системой электростатической локации, а также точность определения местоположения цели.

В смежной области электростатического мониторинга состояния технических объектов для увеличения количества информации о движении заряженных частиц в потоке жидкости или газа используется многорядная схема расположения электростатических датчиков [8, 9] или обработки сигналов датчиков, находящихся вокруг всего поперечного сечения потока жидкости или газа [10, 11]. Данную стратегию можно использовать и здесь, хотя следует пересмотреть методы обработки сигналов, так как наблюдаются различия в соотношении расстояний между датчиками системы к расстоянию до цели и различия в требуемой точности локации объекта.

Целью настоящего исследования является получение рекомендованного шага между электростатическими датчиками и рассмотрение возможности более плотного их расположения, чем это было предложено в [3], для увеличения точности локации. Задачей данного исследования является получение зависимости от времени (или расстояния) обнаружения БПЛА и точности определения его координат от шага расположения датчиков. Для определения погрешности локации координат цели оценивается уровень сигнала на датчиках, его влияния на погрешность определения признаков электростатических сигналов и соответственно координат БПЛА.

### Время обнаружения

В работе [3] было предложено, что обнаружение БПЛА осуществляется после пересечения охраняемого периметра, на границе которого в ряд расположены электростатические датчики (рисунок 1). БПЛА пересекает охраняемый периметр на высоте  $h$ , на горизонтальном расстоянии  $p$  между датчиком под номером 1 и точкой пересечения периметра, под углом  $\alpha$  между траекторией БПЛА и нормалью к периметру. БПЛА движется равномерно со скоростью  $v$  слева направо на рисунке 1, а. Выбираются три электростатических датчика с которыми БПЛА сближается на наименьшее расстояние  $y_i$ . Т.е. выбираются три датчика, амплитуда электростатического сигнала (рисунок 1, б) на которых является наибольшей. Датчики нумеруются в порядке максимального сближения с БПЛА или в порядке возрастания момента времени центров сигнала  $tp_i$ .

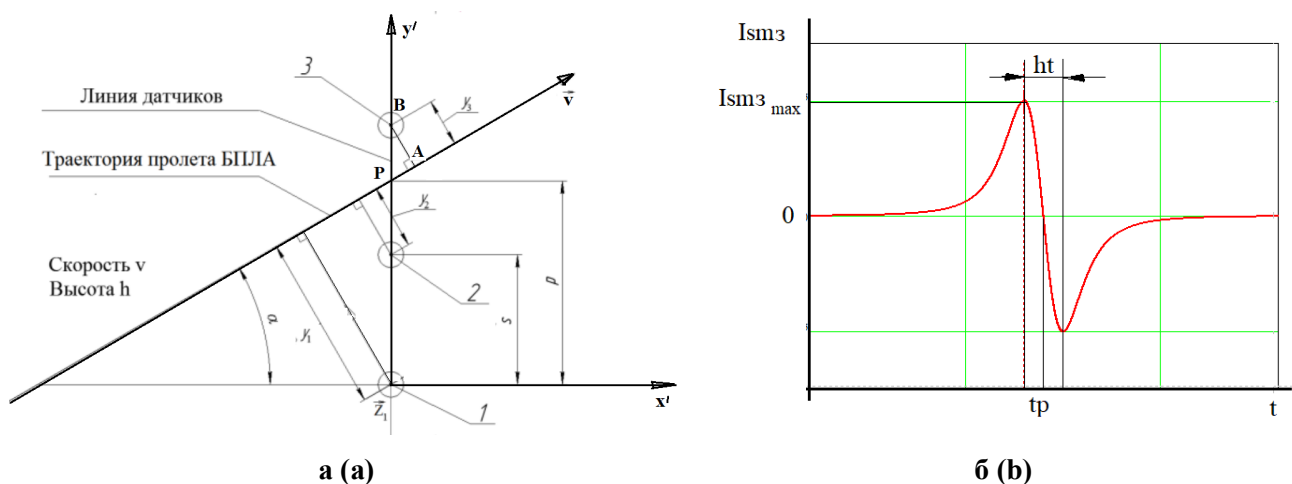


Рисунок 1 – Однорядная схема локации БПЛА (а) и электростатический сигнал, получаемый при локации БПЛА (б): 1, 2 и 3 – электростатические датчики

Figure 1 – Single row UAV location scheme (a) and electrostatic signal received when UAV is located (b)

В работе [3] было получено, что горизонтальное расстояние  $p$  между 1-м датчиком и точкой пересечения периметра (рисунок 1, а), скорость цели  $v$ , угол между траекторией и нормалью к периметру  $\alpha$  и высоту  $h$  следует находить по формулам:

$$p = s \cdot \frac{3 \cdot ht_1^2 - 4 \cdot ht_2^2 + ht_3^2}{2 \cdot ht_1^2 - 4 \cdot ht_2^2 + 2 \cdot ht_3^2}; \quad (1)$$

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

$$\cos \alpha = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{ht_1^2 - 2 \cdot ht_2^2 + ht_3^2}{2 \cdot ht_1^2 - 4 \cdot ht_2^2 + 2 \cdot ht_3^2 + (tp_3 - tp_1)^2}}; \quad (3)$$

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

где  $s$  – шаг расположения датчиков;  $tp_i$  – временной признак или время центра сигнала;  $ht_i$  – частотный признак или временной интервал между экстремумами сигнала (рисунок 1, б).

Согласно статье [4], признак частоты  $ht_i$  и времени  $tp_i$  каждый датчик определяет по окончании спектрального анализа электростатического сигнала. В таком случае БПЛА будет обнаружен спустя время, рассчитываемое по следующей формуле:

$$t_{\text{обн}} = v^{-1} \cdot y_i \cdot \sin \alpha + C \cdot ht_i, \quad (5)$$

где  $i$  – номер датчика, информацию с которого система получила позже всего;  $C$  – коэффициент, определяемый алгоритмом цифровой обработки.

В формуле (5) первое слагаемое соответствует времени, которое затрачивает БПЛА на преодоление расстояния между точкой пересечения периметра Р и пересечением траектории БПЛА с нормалью от 3-го датчика А для случая  $i = 3$ . Это слагаемое определяется временем пролета катета РА в прямоугольном треугольнике ΔВРА, в котором точка В определяется положением 3-го датчика. Угол В равен  $\alpha$  из геометрических соображений. Второе слагаемое определяет время цифровой обработки после центра электростатического сигнала. Для алгоритма, представленного в [4], коэффициент  $C = 9$ .

Между признаком частоты и расстоянием до датчика существует функциональная связь [3]:

$$v^2 \cdot ht^2 = h^2 + y^2. \quad (6)$$

Из уравнения (1), соображений выше и кинематических соотношений можно сделать вывод о том, какой из трех датчиков на рисунке 1 получит признаки сигнала позже остальных. Согласно выражению (6), чем дальше датчик находится от траектории, тем больше 2-е слагаемое в формуле (5). С учетом этого и того, что 2-й датчик находится ближе всего к траектории БПЛА, а также того, что сигнал на него приходит не позже 3-го датчика, в формуле (5)  $i$  не равно 2. Максимальные значения 2-го слагаемого в (5) для 1-го и 3-го датчика равны для крайних случаев при  $p = 1,5 \cdot s$  или  $p = 0,5 \cdot s$  соответственно. При этом для 1-го датчика 1-е слагаемое не положительно, а для 3-го не отрицательно, поэтому наибольшее возможное  $t_{\text{обн}}$  соответствует 3-му датчику при  $p = 0,5 \cdot s$ . В таком случае  $y_3 = 1,5 \cdot s \cdot \cos \alpha$  из треугольника РВА. Если подставить это и выражение (6) в формулу (5), то получим, что максимум зависимости  $t_{\text{обн}}(\alpha)$  наблюдается при  $\alpha = 8^\circ$ .

При высотах цели  $h = 10$  метров,  $s = 30$  метров и  $C = 9$  цель будет обнаружена после её пролета на 415 метров после пересечения периметра. Изменение длины реагирования  $l$  при других высотах показано на графиках рисунка 2. Учтем, что время обнаружения связано с длиной обнаружения как  $t = l/v$ .

### Шаг между датчиками

В предыдущем исследовании [3] была выведена граница обнаружения цели датчиком, которая показана на рисунке 3. Из условия обеспечения хорошего коридора высот от 2 % до 91 % от максимальной был выведен оптимальный шаг расположения датчиков (рисунок 3).

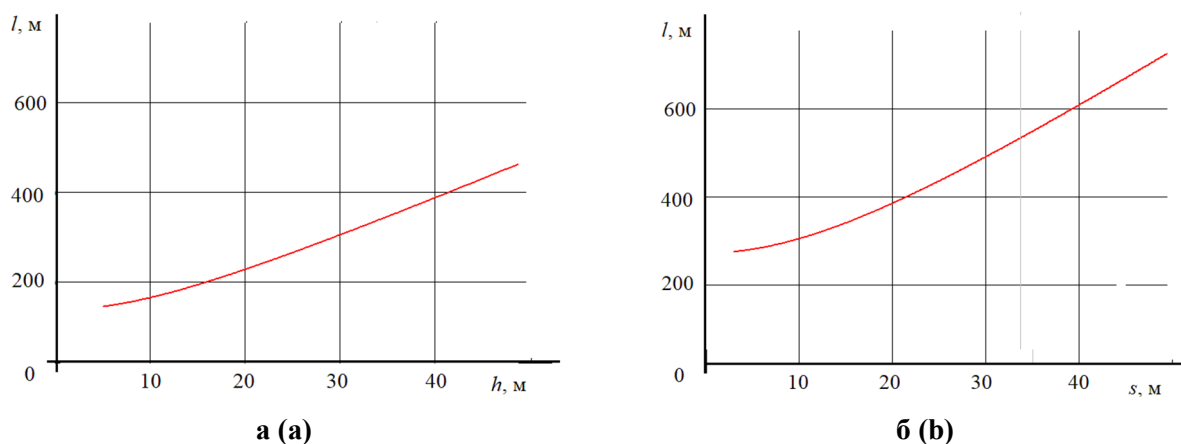


Рисунок 2 – Зависимость расстояния обнаружения от (а) высоты  $h$  (б) шага  $s$   
 Figure 2 – Dependence of detection distance on (a) height  $h$  (b) step  $s$

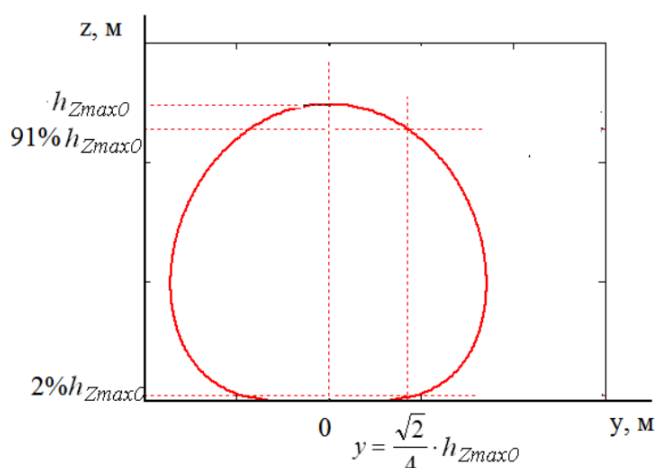


Рисунок 3 – Граница обнаружения БПЛА электростатическим зондом  
 Figure 3 – The boundary of UAV detection by electrostatic probe

Однако стоит отметить, что граница, показанная на рисунке 3, условная и выведена из соображений минимального порога обнаружения с учетом одного датчика в работе [3]. Согласно характеристикам электростатических флюксметров они могут реагировать на изменение поля менее 0,1 В/м [13]. Ограничение точности приборов обусловлено дрейфом нуля, однако в связи с медленным изменением дрейфа относительно процесса электростатической локализации данное явление не препятствует нахождению временного и частотного признака электростатических сигналов [3].

В работе [4] было выявлено, что соотношение сигнал/шум влияет на точность определения данных признаков и, таким образом, на точность локализации летательных аппаратов. Главный результат, который необходимо отметить, это то, что нет четкого порога сигнал/шум, ниже которого точность локализации резко снижается. Поэтому уменьшение расстояния между датчиками может способствовать тому, что локация будет осуществляться более близко расположенными к траектории БПЛА датчиками, что снизит соотношение сигнал/шум. С другой стороны, уравнения расчета признаков сигнала при уменьшении расстояния между датчиками становятся более восприимчивы к точности параметров. Необходимо уточнить вопрос целесообразности использования более мелкого шага между датчиками, чем это было предложено в [4].

Для получения информации о погрешности определения координат БПЛА на основе нескольких датчиков электростатического поля в зависимости от координат БПЛА необходимо провести расчеты в следующем порядке:

1. На основе параметров пролета БПЛА  $h$ ,  $v$ ,  $\alpha$  и  $p$  для выбранного шага  $s$  рассчитываются идеальные значения признаков электростатических сигналов  $tp_i$  и  $ht_i$  согласно системе уравнений в [3].

2. На основе точных признаков электростатических сигналов рассчитываются абсолютные 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  $\Delta v$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta \cos\alpha$ ,  $\Delta p$  определяют погрешность  $\Delta x_{loc}$ ,  $\Delta y_{loc}$  и  $\Delta z_{loc}$  как косвенных измерений.

Координаты БПЛА находятся в следующей декартовой системе координат: центр системы координат располагается на 1-м датчике, ось  $x'$  направлена по нормали от периметра вглубь охраняемой зоны, ось  $y'$  направлена в сторону 3-го датчика вдоль периметра, ось  $z'$  направлена вверх от подстилающей поверхности (рисунок 1, а). В таком случае координаты БПЛА с учетом (5) находятся по следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} x_{loc} = C \cdot ht_3 \cdot v \cdot \cos \alpha + y_3 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha; \\ y_{loc} = C \cdot ht_3 \cdot v \cdot \sin \alpha + y_3 \cdot \sin^2 \alpha + p; \\ z_{loc} = h. \end{cases} \quad (7)$$

Для расчета косвенных погрешностей в формуле (7) учитывалось то, что координаты  $x_{loc}$ ,  $y_{loc}$  и  $z_{loc}$  цели зависят от шага расположения датчиков  $s$ , признаков электростатических сигналов  $ht_i$  и разницы  $tp_3 - tp_1$ . При расчете частных производных  $\sin\alpha$  заменяется на  $\cos\alpha$  через основное тригонометрическое тождество. В статистике известна следующая формула для расчета погрешности косвенных измерений [14]:

$$\Delta z_{loc} = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_1} \cdot \Delta ht_1\right)^2 + \left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_2} \cdot \Delta ht_2\right)^2 + \left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_3} \cdot \Delta ht_3\right)^2 + \left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial tp_1} \cdot \Delta tp_1\right)^2 + \left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial tp_3} \cdot \Delta tp_3\right)^2\right)}. \quad (8)$$

Формула (8) нуждается в преобразовании, так как в работе [4], в зависимости от погрешности сигнал/шум, были получены значения относительной погрешности определения  $ht_i$  в виде  $\varepsilon_{ht}$  и приведенной (относительной) погрешности определения  $tp$  в виде  $\Delta tp/ht_i$ . Относительная погрешность выражается через абсолютную следующим образом:

$$\varepsilon_{ht} = \Delta ht_i / ht_i. \quad (9)$$

Для простоты считаем, что относительная погрешность  $\varepsilon_{ht}$  одинакова для всех датчиков, т.е. одинаково соотношение сигнал/шум. На самом деле это соотношение изменяется в пределах 10 % согласно рисунку 3 в указанном диапазоне. Если сделать допущение о неизменяемости соотношения сигнал/шум, то можно подставить (9) в (8) в первых трех слагаемых и вынести за скобку  $\varepsilon_{ht}$ . В последних двух слагаемых учитываем, что частные производные равны по модулю. Выражаем из последних двух слагаемых  $\Delta tp/ht_i$ . Вместо  $ht_i$  используем среднее арифметическое  $(ht_1 + ht_3) / 2$ . В результате формула (8) записывается следующим образом:

$$\Delta z_{loc} = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_1} \cdot ht_1\right)^2 + \left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_2} \cdot ht_2\right)^2 + \left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_3} \cdot ht_3\right)^2\right) \cdot \varepsilon_{ht}^2 + \left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial (tp_3 - tp_1)} \cdot \frac{(ht_3 + ht_1)}{2}\right)^2 \cdot \left(\sqrt{2} \cdot \frac{\Delta tp}{ht_i}\right)^2}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_{ht} = \Delta ht/ht$  – относительная погрешность определения  $ht$ ;  $\Delta tp/ht_i$  – приведенная (относительная) погрешность определения  $tp$ .

Абсолютные погрешности  $\Delta x_{loc}$ ,  $\Delta y_{loc}$  находятся по формуле, аналогичной (10). Для использования формулы (10) частные производные были раскрыты аналитически через символьные операции в системе компьютерной алгебры Maple и проверены через численный расчет. Наиболее экстремальное изменение точности  $\Delta x$  при  $\varepsilon_{ht} = \varepsilon_{tp} = 1\%$  при изменении  $s$  показано на рисунке 4.

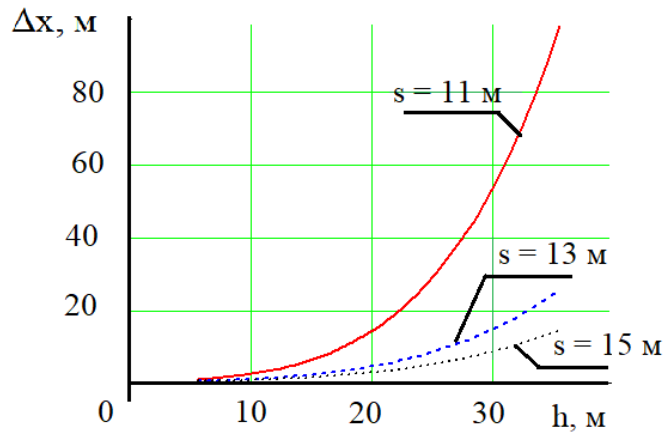


Рисунок 4 – Зависимости  $\Delta x(h)$  при различных  $s$   
Figure 4 – Dependences of  $\Delta x(h)$  for different  $s$

При анализе абсолютной погрешности оценивалась сумма погрешностей координат  $\Delta S = \Delta x_{\text{loc}} + \Delta y_{\text{loc}} + \Delta z_{\text{loc}}$  локации БПЛА. При погрешности  $\varepsilon_{\text{ht}} = 1\%$  и  $\varepsilon_{\text{tp}} = 1\%$  было выявлено, что при малых шагах  $s$  погрешность локации чрезвычайно высока и резко падает при превышении определенного порога  $s$ , зависящего от высоты цели. Существует определенный минимум зависимости  $\Delta S(s)$ . При дальнейшем увеличении шага  $s$  погрешность увеличивается. Из положения данного минимума можно сформулировать требования к шагу расположения датчиков. В статье [3] приведено другое значение шага датчиков, которое было получено не из соображений погрешности расчета координат, а из обеспечения требуемого уровня значения сигнал/шум согласно границе обнаружения датчика, изображенного на рисунке 3:

$$s_{\text{sn}} = 2/3 \cdot \sqrt{2} / 4 \cdot 0,91 \cdot h. \quad (11)$$

В уравнении (11) первый множитель  $2/3$  обусловлен тем, что цель должна быть обнаружена тремя датчиками, т.е. траектория не должна быть дальше, чем на полтора шага расположения датчиков. Второй и третий множители обуславливают дистанцию обнаружения и верхнюю границу коридора высот относительно максимума на рисунке 3.

Шаг в уравнении (11) рассчитывается из соображений для предполагаемого уровня сигнала от цели. То есть, строго говоря, данный шаг удовлетворяет нахождение всех целей, попадающих в зону обнаружения трех датчиков (рисунок 3), т.е. в нужный диапазон высот от 2 % до 91 % от максимально обнаруживаемых. В настоящем исследовании представляются рекомендации по шагу датчиков  $s_{\text{sn}}$  для каждой предполагаемой высоты цели. И если такую высоту подставить в уравнение (11), то шаг датчиков  $s_{\text{sn}}$  с точки зрения необходимого соотношения сигнал/шум будет меньше, чем шаг датчиков  $s_{\text{min}}$ , который дает минимальную погрешность. Т.е. без учета соотношения сигнал/шум требуется увеличить шаг до значений, которые были получены в настоящем исследовании из условия минимума зависимости  $\Delta S(s)$ .

Было решено выделить три шага расположения датчиков  $s$  погрешности:  $s_{\text{sn}}$  как максимальный шаг с наилучшим соотношением сигнал/шум по верхней границе фигуры на рисунке 3,  $s_{\text{min}}$  с точки зрения минимальной погрешности расчетов и  $s_{\text{opt}}$  как точка минимума функции, учитывающая при увеличении  $s$  увеличение погрешности определения признаков частоты и времени из-за снижения соотношения сигнал/шум и зависимости  $\Delta S(s)$ :

$$f(s) = \left( \frac{s}{s_{\text{sn}}} \right)^3 \cdot \Delta S(s). \quad (12)$$

В зависимости (12) 3-я степень обусловлена зависимостью уменьшения амплитуды электростатического сигнала от высоты в данной степени в случае использования электростатических зондов в качестве датчиков системы локации. Если же используется электростатический флюксометр для локации БПЛА, то в функции (12) 3-ю степень следует заменить на 2-ю [3]. Амплитуда электростатического сигнала линейно связана с соотношением сигнал/шум. Счи-

таем, что погрешность определения признаков обратно пропорциональна соотношению сигнал/шум, что на самом деле справедливо для некоторого диапазона. Это замечание будет обговорено дальше.

### Результаты расчетов

Результаты расчетов шага датчиков для различных высот обнаружения БПЛА представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Возможные шаги датчиков**

**Table 1 – Calculation Results**

|                                               |     |      |     |     |     |     |
|-----------------------------------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| $h$ , м                                       | 5   | 20   | 40  | 60  | 80  | 100 |
| $s_{sn}$ , М                                  | 2,2 | 8,6  | 17  | 26  | 34  | 42  |
| $(\Delta x + \Delta y + \Delta z)_{\max}$ , М | 287 | 50   | 57  | 76  | 106 | 133 |
| $s_{\min}$ , М                                | 12  | 23   | 40  | 60  | 79  | 100 |
| $(\Delta x + \Delta y + \Delta z)_{\min}$ , М | 1,7 | 7    | 21  | 37  | 53  | 70  |
| $s_{\text{opt}}$ (эл. зонд)                   | 9   | 14   | 14  | 16  | 20  | 20  |
| $(\Delta x + \Delta y + \Delta z)$            | 3,1 | 12,8 | 105 | 256 | 342 | 732 |
| $s_{\text{opt}}$<br>(эл. флюксметр)           | 12  | 17   | 22  | 32  | 32  | 37  |
| $(\Delta x + \Delta y + \Delta z)$            | 1,7 | 8    | 31  | 55  | 119 | 164 |

Оптимальное значение шага датчиков  $s_{\text{opt}}$  в случае электростатического флюксметра оказывается заметно выше, чем для зонда, в связи с более медленным уменьшением отношения сигнал/шум. Следует отметить, что для электростатического флюксметра функция  $f(s)$  является гораздо более полой, чем при использовании электростатического зонда. Следует учитывать меньшую восприимчивость электростатического флюксметра к помехам вследствие меньшего сопротивления на землю (в тысячи раз) и специфике получения измерительного сигнала [2].

Поэтому потенциально можно обеспечить больший шаг расположения у электростатических флюксметров, чем у зондов. С другой стороны, зонды обладают более простой конструкцией, в которой отсутствуют движущиеся части.

Какой шаг из представленных в таблице 1 следует использовать? Если система строится для обнаружения максимально высоколетящих целей, то следует определить высоту, для которой уровень сигнал/шум в случае пролета цели на расстоянии  $1,5 s_{\text{opt}}$  (наибольшее возможное расстояние между датчиком и целью) составляет 4, и использовать данный шаг как наилучший. При совместном использовании обоих алгоритмов, представленных в работе [4], можно добиться малых погрешностей определения признаков электростатического сигнала в  $\varepsilon_{\text{тр}} = 0,5 \% - 0,8 \%$  и  $\varepsilon_{\text{ht}} = 0,1 \%$ . Если задача ставится как обнаружение цели до определенной высоты  $h$  и для неё соотношение сигнал/шум для расстояния  $1,5 s_{\text{opt}}$  составляет более 4, то это расстояние следует увеличивать до расстояния, на котором соотношение сигнал/шум будет равно 4, но не более  $s_{\min}$ .

### Заключение

В статье рассчитано расстояние обнаружения БПЛА системой электростатической локализации. Впервые была оценена погрешность расчетных формул (1) – (4) и на их основе составлены новые рекомендации расчета наилучшего расстояния между электростатическими датчиками с учетом соотношения сигнал/шум и погрешности расчета координат цели. Согласно новым результатам следует увеличить расстояние между датчиками в системе по сравнению с рекомендациями в [3], если речь идет об обнаружении БПЛА до определенной высоты.

Согласно погрешности цифровой обработки электростатических сигналов в статье [4] шаг расположения датчиков  $s_{\text{opt}}$  следует выбирать при соотношениях сигнал/шум около 4. Если соотношение сигнал/шум больше 8, т.е. цифровая обработка дает наиболее точные зна-

чения признака частоты и времени электростатических сигналов, то следует выбирать значение шага датчиков  $s_{\min}$  из таблицы 1.

Достоверность полученных результатов обоснована использованием аналитических формул (1) – (4) для определения координат БПЛА, которые были выведены ранее из решения квазиэлектростатической задачи пролета БПЛА через охраняемый периметр. Таким образом, результаты полностью соответствуют также и численной модели пролета БПЛА через границу, описанной в [3].

Уменьшение расстояния между датчиками с целью использования более трех датчиков для вычисления координат БПЛА не имеет особого смысла из-за необходимости использования достаточно большого их разнесения. Для увеличения точности локации более применимо использование нескольких рядов датчиков.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90028.*

### Библиографический список

1. **Yong Y., Yonghui H., Lijuan W. and others.** Electrostatic sensors – Their principles and applications // Measurement. 2022. No. 169. Pp. 153-183.
2. **Ефимов Е., Полушин П., Грунская Л.** Измерение электростатической составляющей электростатических полей. Измерители электростатического поля: монография. Берлин: Verlag, 2008. 146 с.
3. **Скрябин Ю.М., Потехин Д.С.** Определение траектории горизонтального пролета беспилотного летательного аппарата через линию электростатических датчиков // Труды МАИ. 2019. № 106. С. 1-19.
4. **Скрябин Ю. М.** Определение коэффициентов рациональной анализирующей функции с помощью метода наименьших квадратов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 5-13.
5. **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. № 10. С. 109-146.
6. **Ананенков А.Е., Марин Д.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В.** К вопросу о наблюдении мало-размерных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 1-18.
7. **Борзов А.Б., Ластовецкий А.Е., Кленка С.П. и др.** Электрическая модель летательного аппарата в задачах ближней электростатической локации воздушных целей // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 12. С. 1159-1167.
8. **Qian X, Yan Y., Huang X., Hu Y.** Measurement of the mass flow and velocity distributions of pulverised fuel in primary air pipes using electrostatic sensing techniques // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2017. No. 66. Pp. 944-952.
9. **Zhang C., Wang C., Wang Y.** Parameter selection in cross-correlation-based velocimetry using circular electrostatic sensors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2010. Vol. 59. Pp. 1268-1275.
10. **Qian X, Yan Y., Wu S., Zhang S.** Measurement of velocity and concentration profiles of pneumatically conveyed particles in a square-shaped pipe using electrostatic sensor arrays // Powder Technology. 2021. Vol. 377. Pp. 693-708.
11. **Qian X, Yan Y.** Measurement of biomass and blended biomass fuels in pneumatic conveying pipelines using electrostatic sensor-arrays // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2012. Vol. 61. Pp. 1343-1352.
12. **Потехин Д.С., Тарасов И.Е.** Синтез сверточных функций в реальном времени в системах программно-зависимого радио и фазо-частотных измерительных устройствах // Российский технологический журнал. 2018. № 6. С. 41-54.
13. **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.
14. **Гмурман В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика. М: Высш. шк. 2005. 478 с.

UDC 51.74

## AIRCRAFT LOCATION INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM SENSORS PLACEMENT

**D. S. Potekhin**, Dr. Sc. (Tech.), associate professor, professor in the department of computer science, RTU MIREA, Moscow, Russia;

orcid.org/0000-0003-3339-1530, e-mail: msyst@msyst.ru

**Y. M. Skryabin**, lecturer, department of computer science, RTU MIREA, Moscow, Russia;

orcid.org/0000-0002-4890-5314, e-mail: meh-record@yandex.ru

*The accuracy of location and response time to the aircraft of information and measurement system of electrostatic location, which is based on passive measurements of electrostatic field strength at the points of protected area, are considered. **The aim of the work** is to determine the distance that the aircraft overcomes after crossing the guarded perimeter before it is detected, as well as the influence of sensor location on the accuracy of response. The results were obtained taking into account the use of a convolutional algorithm for digital processing of full length of electrostatic signals arising from the movement of a charged flying apparatus near a sensor. The error in calculating target coordinates is analyzed, taking into account the error in calculating electrostatic signal features. The answer to the question of sensor placement step is given not only from the viewpoint of signal/noise level, as it was proposed earlier, but also on the basis of the accuracy of its current coordinates calculations.*

**Keywords:** electrostatic location, electrostatic monitoring, electrostatic fluxmeter, electrostatic probe, aerial reconnaissance vehicles.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2024-89-21-30

### References

1. **Yong Y., Yonghui H., Lijuan W. and others.** Electrostatic sensors – Their principles and applications. *Measurement*. 2022, no. 169, pp. 153-183.
2. **Efimov E., Polushin P., Grunskaya L.** *Izmerenie elektrostatoicheskoi sostavlyayushchei elektrostatoicheskikh polei. Izmeriteli elektrostatoicheskogo polya* (Measurement of the electrostatic component of electrostatic fields. Electro-static field meters). Monografiya. Berlin: Verlag. 2008. 146 p. (in Russian).
3. **Skryabin Yu.M., Potekhin D.S.** Opredelenie traektorii gorizontaln'nogo proleta bes-pilotnogo letatel'nogo apparata cherez liniyu elektrostatoicheskikh datchikov. *Trudy MAI*. 2019, no. 106, pp. 1-19 (in Russian).
4. **Skryabin Yu. M.** Opredelenie koeffitsientov ratsional'noi analiziruyushchei funktsii s pomoshch'yu metoda naimen'shikh kvadratov. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*. 2024, no. 1. pp. 5-13. (in Russian).
5. **Makarenko S.I., Timoshenko A.V., Vasil'chenko A.S.** Analiz sredstv i sposobov protivodeistviya bespilotnym letatel'nyim apparatam. Chast' 1. Bepilotnyi letatel'nyi apparat kak ob'ekt obnaruzheniya i porazheniya. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2020, no. 10, pp. 109-146. (in Russian).
6. **Ananenko A.E., Marin D.V., Nuzhdin V.M., Rastorguev V.V.** K voprosu o nablyudenii malorazmernykh letatel'nykh apparatov. *Trudy MAI*. 2016. no. 91. pp. 1-18. (in Russian).
7. **Borzov A.B., Lastovetskii A.E., Klepka S.P. i dr.** Elektricheskaya model' letatel'nogo apparata v zadachakh blizhnei elektrostatoicheskoi lokatsii vozdukhnykh tselei. *Radiotekhnika i elektronika*. 2016, vol. 61, no. 12. pp. 1159-1167. (in Russian).
8. **Qian X., Yan Y., Huang X., Hu Y.** Measurement of the mass flow and velocity distributions of pulverised fuel in primary air pipes using electrostatic sensing techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2017, no. 66, pp. 944-952.
9. **Zhang C., Wang C., Wang Y.** Parameter selection in cross-correlation-based velocimetry using circular electrostatic sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2010, vol. 59. pp. 1268-1275.

10. **Qian X, Yan Y., Wu S., Zhang S.** Measurement of velocity and concentration profiles of pneumatically conveyed particles in a square-shaped pipe using electrostatic sensor arrays. *Powder Technology*. 2021, vol. 377, pp. 693-708.
11. **Qian X, Yan Y.** Measurement of biomass and blended biomass fuels in pneumatic conveying pipelines using electrostatic sensor-arrays. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2012, vol. 61, pp. 1343-1352.
12. **Potekhin D.S., Tarasov I.E.** Sintez svertochnykh funktsii v real'nom vremeni v sistemakh programmno-zavisimogo radio i fazo-chastotnykh izmeritel'nykh ustroystvakh. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*. 2018, no. 6, pp. 41-54. (in Russian).
13. **Biryukov S.V.** Predposylki sozdaniya pribora dlya izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya s opredele-niem pogreshnosti rezul'tata izmerenii. *Informatsionnye tekhnologii i sredstva obucheniya*. 2023, no. 7, pp. 1-7. (in Russian).
14. **Gmurman V.E.** *Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika* (Probability theory and mathematical statistics). Moscow: Higher school. 2005, 478 p. (in Russian).