

УДК 528.851; 519.7

## **ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПОИСКА И СЛЕЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ**

**Р.Н. Абдулов, Н.А. Абдуллаев, Х.Г. Асадов**

Проведен критический анализ известного метода разницы времени прибытия сигнала, применяемого для поиска и слежения за объектами с использованием беспилотного летательного аппарата. Результаты проведенных исследований показали возможности его оптимизации и дальнейшего синтеза качественно нового метода. Проведенная оптимизация известного метода поиска и слежения за объектом на базе группы беспилотных летательных аппаратов позволила выработать практические рекомендации по использованию синтезированного оптимального метода.

**Ключевые слова:** оптимизация, БПЛА, поиск, локация, измерения, корреляция.

### **Введение**

Хорошо известно, что операции геолокации с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) выполняются при решении многих комплексных задач как мирного, так и военного характера. Например, как указывается в работе [1], общая концепция возможных задач, выполняемых БПЛА, создает высокий практический и технологический потенциал для усиления возможностей военно-воздушных сил. Так, согласно прогнозу, данному в [1], в близком будущем БПЛА будут применяться в разведывательных целях, и полноценное оснащение БПЛА вооружением является задачей отдаленного будущего, когда БПЛА будут выполнять задачи геолокации, а также уничтожения цели без точного взаимодействия с пилотируемыми воздушными средствами. При этом, как указывается в [1], операции геолокации могут быть реализованы с помощью БПЛА при решении таких задач, как исследование мест применения оружия массового поражения; подготовка вооруженного нападения на стационарные или вражеские движущиеся объекты; операции идентификации, распознавания, разведки, поиска, спасения и т.д. Например, согласно [2], БПЛА, ранее использованные в Ираке и в Афганистане, в дальнейшем нашли применение в Новом Орлеане для поиска людей, оставшихся в наводненных кварталах этого города во время сильного урагана Катрина. В этой же работе изложены основы построения системы поиска и спасения «CLOSE-SEARCH», представляющей собой интеграцию БПЛА, устройства термовидения, мультисенсорной навигационной системы для проведения поисковых работ.

Вместе с тем существуют алгоритмы, позволяющие выполнить задачу позиционирования БПЛА без средств визуального наблюдения. Проведенный анализ известного метода размещения БПЛА вокруг цели и оценки разности времен прихода сигналов с цели показал возможность оптимизации этого метода и синтеза наилучшего варианта. Даны практические рекомендации по практическому использованию синтезированного оптимального метода.

### Критический обзор существующих методов

В качестве примера реализации группового поиска и слежения движущихся целей с помощью группы БПЛА можно привести работу [3], где один оператор осуществляет контроль над многими БПЛА, которые, в свою очередь, реализуют следующие операции:

- автономное слежение за двигающимися и удаляющимися объектами;
- выдача отчета в централизованную базу данных.

Эта система осуществляет измерения экранных координат объекта в реальном времени и совместно с данными высоты, позиции и инерциальной навигационной системы формирует статистически точную оценку местонахождения объекта. Основным элементом в системе является бортовая передающая камера, управляемая многоступенчатой системой управления. Система имеет три контура обратной связи:

1. контур обратной связи в цепи гироскопа;
2. контур обратной связи GPS;
3. контур обратной связи видеокамеры.

Кроме этого, в системе предусматривается реализация алгоритма оптимизации траектории полета по критерию достижения максимального количества информации, полученной от датчиков. При этом алгоритм управления полетом должен одновременно удовлетворять двум условиям геолокации: во-первых, цель должна находиться в пределах поля зрения камеры, и, во-вторых, заданный часовой стрелочный угол между двумя БПЛА должен быть соблюден для наилучшей реализации геолокации. Что касается геолокации неподвижных объектов, то, как отмечается в работе [4], здесь возможно использование как геореференцированных спутниковых изображений объекта, так и изображений, полученных от бортовых датчиков, расположенных на малой высоте. В первом случае важен учет фактора изменения окружающей среды, чтобы исключить возможные ошибки геолокации.

Как было сказано выше, одним из методов рационального позиционирования БПЛА в окрестности объектов слежения является использование телевизионных камер. В то же время предложены эффективные алгоритмы, позволяющие выполнить эту задачу без использования телевизионных камер. Например, в работе [5] предлагается оптимизировать позиционирование БПЛА вокруг цели по разности времен прихода сигналов от цели. В этом случае задача формулируется следующим образом. Рассматриваются два БПЛА с приемниками сигналов. Один из приемников, например, первый БПЛА, принимает прямой сигнал  $x_1(t)$  без эффекта многопутности, а второй приемник принимает суммарный сигнал  $x_2(t)$ , составленный из отдельных сигналов, прибывших по  $N$  различными путями распространения. Тогда

$$x_1(t) = s(t) + m_1(t), \quad (1)$$

$$x_2(t) = \sum_{n=1}^N a_n s(t - D_n) + m_2(t), \quad (2)$$

где  $s(t)$  – интересующий нас переданный сигнал;  $m_1(t)$  и  $m_2(t)$  – аддитивные шумовые сигналы;  $a_n$  – ослабление сигнала при распространении по пути  $n$ ;  $D_n$  – относительная временная задержка сигнала по пути  $n$ . При этом временная разница прибытия сигнала вычисляется путем нахождения такой величины задержки, при которой перекрестная корреляционная функция, вычисляемая по формуле

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = E[x_1(t) \cdot x_2(t + \tau)], \quad (3)$$

достигает относительного максимума. Как указывается в работе [5], многопутность прохождения сигналов приводит к искажениям вычисленного среднего значения временной задержки  $\hat{D}$ . Чтобы показать это, учтем (1) и (2) в (3). Получим

$$R_{x_1 x_2} = \sum_{n=1}^N a_n R_{ss}(\tau - D_n) + R_{m_1 m_2}(\tau). \quad (4)$$

Если шумы не коррелированы и не имеют нулевую составляющую, то, согласно [5], получаем:

$$R_{x_1 x_2} = R_{ss}(\tau) \otimes \sum_{n=1}^N a_n \delta(\tau - D_n), \quad (5)$$

где  $\otimes$  означает операцию свертки. В работе [4] предложено использование коэффициента корреляции, вычисленного на основе функции перекрестной корреляции с аргументом, равным вычисленной величине временной задержки, т.е.

$$\hat{\rho} = \frac{R_{x_1 x_2}(\hat{D})}{\sqrt{R_{x_1 x_1}(0) \cdot R_{x_2 x_2}(0)}}. \quad (6)$$

Согласно [4], для узкополосных сигналов функция автокорреляции является более широкой, чем многопутевые временные задержки. Исходя из этого, при вычисленной временной задержке  $\hat{D}$  уравнение (5) может быть аппроксимировано как

$$R_{x_1 x_2}(D) \cong R_{ss}(0) \sum_{n=1}^N a_n. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6), а также учитывая наличие шумов, получим

$$\hat{\rho} = \frac{R_{ss}(0) \sum_{n=1}^N a_n}{\sqrt{[R_{ss}(0) + \sigma_{11}^2] \left[ R_{ss}(0) \sum_{n=1}^N a_n + \sigma_{22}^2 \right]}}. \quad (8)$$

### Оптимизация метода позиционирования БПЛА вокруг объекта по разности времени прихода сигналов от цели

В работе [5] выработаны различные практические рекомендации по идентификации условий пространства сигналов до приемников для дальнейшей выработки сигналов управления позиционированием БПЛА вокруг объекта. Однако в [5] не полностью раскрыты потенциальные возможности метода позиционирования БПЛА вокруг объекта по разности времени прихода сигналов от цели. Рассмотрим возможность оптимизации и обобщения данного метода.

Оптимизацию рассматриваемого метода осуществим путем нахождения такой оптимальной величины  $R_{ss}(0) \sum_{n=1}^N a_n$ , при которой  $\hat{\rho}$  достигла бы экстремального значения. При этом следует учесть, что функция автокорреляции может достичь двух экстремальных значений, т.е. +1 и -1. Так как для аппаратной реализации использование обоих этих экстремумов не представляет особого труда, то для поиска экстремума выражения (8) достаточно вычислить первую производную этого выражения и приравнять ее к нулю. В результате выполнения этих операций получим

$$\frac{\frac{1}{2} \cdot R_{ss}(0) \cdot \sum_{n=1}^N a_n [R_{ss}(0) + \sigma_{11}^2]}{\sqrt{[R_{ss}(0) + \sigma_{11}^2] \cdot [R_{ss}(0) \cdot \sum_{n=1}^N a_n + \sigma_{22}^2]}} - \frac{\frac{1}{2} \cdot R_{ss}(0) \cdot \sum_{n=1}^N a_n [R_{ss}(0) + \sigma_{11}^2]}{\sqrt{[R_{ss}(0) + \sigma_{11}^2] \cdot [R_{ss}(0) \cdot \sum_{n=1}^N a_n + \sigma_{22}^2]}}}{[R_{ss}(0) + \sigma_{11}^2] \cdot [R_{ss}(0) \cdot \sum_{n=1}^N a_n + \sigma_{22}^2]} = 0. \quad (9)$$

В выражении (9) примем следующие условные обозначения:

$$d_1 = R_{ss}(0) + \sigma_{11}^2; \quad (10)$$

$$z = R_{ss}(0) \cdot \sum_{n=1}^N a_n; \quad (11)$$

$$d_2 = \sigma_{22}^2. \quad (12)$$

С учетом (10)–(12) представим (9) в виде

$$d_1(z + d_2) - \frac{z \cdot d_2}{2} = 0. \quad (13)$$

Из выражения (13) находим

$$z = -2d_2. \quad (14)$$

Таким образом, с учетом (11), (12) и (14) функция автокорреляции  $\hat{\rho}$  достигает экстремального значения при выполнении следующего равенства:

$$R_{ss}(0) \cdot \sum_{n=1}^N a_n = -2\sigma_{22}^2.$$

Очевидно, что  $\sum_{n=1}^N a_n$  является положительной величиной, следовательно, оптимальным следует считать такой режим, при котором  $R_{ss}(0)$  оказывается отрицательной величиной, равной  $-2\sigma_{22}^2$ .

Таким образом, полученный результат позволяет синтезировать качественно новый метод позиционирования, заключающийся в вычислении перекрестной корреляционной функции, в следующем виде:

$$R_{x_1\bar{x}_2} = \sum_{n=1}^N a_n R_{s\bar{s}}(\tau - D_n) + R_{n_1n_2}(\tau).$$

Подобно выражению (4) выражения (5)–(8) в оптимизированном методе будут иметь соответствующую форму записи (15)–(18):

$$R_{x_1\bar{x}_2}(\tau) = R_{s\bar{s}}(\tau) \otimes \sum_{n=1}^N a_n \delta(t - D_n), \quad (15)$$

$$\hat{\rho} = \frac{R_{x_1\bar{x}_2}(\hat{D})}{\sqrt{R_{x_1\bar{x}_1}(0) \cdot R_{x_2\bar{x}_2}(0)}}, \quad (16)$$

$$R_{x_1\bar{x}_2}(D) \cong -2\sigma_{22}^2, \quad (17)$$

$$\hat{\rho} = -\frac{2\sigma_{22}^2}{\sqrt{[R_{s\bar{s}}(0) + \sigma_{11}^2] \cdot [R_{s\bar{s}}(0) \cdot \sum_{n=1}^N a_n + \sigma_{22}^2]}}. \quad (18)$$

Рассмотрим практические рекомендации, изложенные в [5], применительно к предложенному выше оптимальному методу. Для этого, подобно [5], проанализируем выражение (18).

Если отношение сигнал/шум имеет высокое значение, то сигнал функции автокорреляции при нулевой задержке намного превысит величину шумов приемника, и в этом случае получим

$$\hat{\rho} \cong \frac{\sum_{n=1}^N a_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^N a_n + \frac{\sigma_{22}^2}{R_{s\bar{s}}^2(0)}}}.$$

Если сумма коэффициентов ослабления имеет намного большее значение, чем квадрат отношения шум/сигнал, то получим

$$\hat{\rho} \cong \left\{ \sum_{n=1}^N a_n \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Если ослабление сигналов настолько велико, что во втором приемнике доминируют шумы, то

$$R_{s\bar{s}}(0) \ll \sigma_{22}.$$

В этом случае имеем

$$\hat{\rho} \cong \frac{R_{s\bar{s}}(0)}{\sigma_{22}} \sum_{n=1}^N a_n.$$

Если отношение сигнал/шум на обоих приемниках мало, то получим

$$\hat{\rho} \cong \frac{R_{s\bar{s}}(0)^2}{\sigma_{11} \cdot \sigma_{22}} \cdot \sum_{n=1}^N a_n.$$

Аналогично [5], эти выражения показывают, что при высоких значениях отношения сигнал/шум в коэффициенте корреляции доминирует сумма коэффициентов ослабления. При низких значениях отношения сигнал/шум коэффициент корреляции зависит как от величины этого отношения, так и от значения суммы коэффициентов ослабления. Следовательно, как и в [5], малая величина коэффициента корреляции будет означать, что либо приемник находится вдали от искомого объекта, либо на пути электромагнитного сигнала до приемника имеются препятствия. Таким образом, оператор БПЛА или бортовой вычислитель получает полезную информацию для осуществления соответствующей коррекции траектории полета БПЛА в целях слежения за объектом.

### Заключение

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования.

1. Проведенный критический анализ известного метода разницы времени прибытия сигнала, применяемого для поиска и слежения за объектами, используя беспилотный летательный аппарат, показал наличие возможности его оптимизации и дальнейшего синтеза качественно нового метода.

2. В результате оптимизации известного метода поиска и слежения за объектом, используя группу беспилотных летательных аппаратов, выработаны практические рекомендации по использованию синтезированного оптимального метода.

#### **Литература**

1. Sarris Z. Survey of UAV applications in civil markets. – June 2001 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://med.ee.nd.edu/MED9/Papers/Aerial\\_vehicles/med01-164.pdf](http://med.ee.nd.edu/MED9/Papers/Aerial_vehicles/med01-164.pdf), свободный. Яз. англ. (дата обращения 30.09.2012).
2. Molina P., Colomina I., Vitoria T., Silva P.F., Stebler Y., Skaloud J., Kornus W., Prades R. Egnos-based multi-sensor accurate and reliable navigation in search and rescue missions with UAVs // International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g). – Zurich, Switzerland, 2011. – V. XXXVIII-1/C22. – P. 87–93.
3. Wheeler M., Schrick B., Whutacre W., Campell M., Rusdyk R., Wise R. Cooperative tracking of moving targets by a team of autonomous UAVs // Authorized licensed use limited to: Uppsala Universitetbibliotek. Downloaded on January 8, 2010 at 03:11 from IEE Xplore. Restrictions apply. – P. 5C2-1-5C2-9.
4. Nuske S., Dille M., Grocholsky B., Singh S. Representing substantial heading uncertainty for accurate geolocation by small UAVs // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. – Toronto, Ontario, Canada, 2010. – 2–5 August [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ri.cmu.edu/publication\\_view.html?pub\\_id=6677](http://www.ri.cmu.edu/publication_view.html?pub_id=6677), свободный. Яз. англ. (дата обращения 25.08.2012).
5. Van Rheeden D.R., Brown B.C., Price J.C., Abbott B.A., Willden G.C., Chhokka K., Scott J., Barty T. Automatic positioning of UAVs to optimize TDOA geolocation performance / 0-7803-8539-X/04/\$20.00© 2004 IEEE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ece.lsv.edu/pub/aravena/GoGS\\_Literature/Rheeden2004AutomaticPositioning21ImproveGeoloration.pdf](http://www.ece.lsv.edu/pub/aravena/GoGS_Literature/Rheeden2004AutomaticPositioning21ImproveGeoloration.pdf), свободный. Яз. англ. (дата обращения 20.09.2012).

- Абдулов Рауф Нусрат оглы* – Азербайджан. НИИ Министерства оборонной промышленности, заместитель главного инженера, Rabdulov2009@rambler.ru
- Абдуллаев Новруз Алмамед оглы* – Азербайджан. НИИ Министерства оборонной промышленности, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, начальник отдела, Naabdullayev@mail.ru
- Асадов Хикмет Гамид оглы* – Азербайджан. НИИ аэрокосмической информатики. доктор технических наук, доцент; начальник отдела, asadzade@rambler.ru