

ПАССИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ЛОКАЦИЯ: ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ

А.Н. ИСКРИК, А.И. ВИЛЬЧИКОВ, С.В. ГАШКОВ, В.Ю. ЦВЕТКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15 марта 2019

Аннотация. В статье проведен анализ современных методов пассивной локации, применяемых к задаче измерения дальности до наблюдаемого объекта. Описаны основные этапы их работы и особенности реализации. Проведено численное моделирование методов пассивной оценки дальности для оптико-электронных систем.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, пассивный метод оценки дальности, оптическая локация.

Введение

На сегодняшний день беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются сложным техническим комплексом позволяющим решать широкий круг задач, таких как построение цифровой карты местности, ведение воздушной разведки в реальном режиме времени, слежение за подвижными объектами, корректировка огня артиллерии, доставка взрывчатых веществ в заданную точку с целью диверсии и многие другие. Малоразмерные воздушные объекты уже несколько десятилетий доставляют множество трудностей системам противовоздушной обороны (ПВО) своими специфическими летно-техническими характеристиками. Низкие значения показателей эффективности поражения малоразмерных БПЛА зенитными средствами обуславливает необходимость разработки и проведения комплекса специальных мероприятий по организации их поражения.

Основные факторы, обусловившие сложность борьбы с БПЛА:

- небольшая масса и габариты и, как следствие, малая дальность обнаружения;
- низкий уровень акустического шума (около 50 дБ на дальностях выше 1000 м, что ниже порога чувствительности органов слуха);
- незначительные величины эффективной площади рассеяния (0,01–0,1 м²) и тепловой контрастности;
- достаточно широкий диапазон скорости полета (10–30 м/с);
- способность наводить на средства ПВО ударные самолеты, вертолеты и артиллерию;
- возможность полета на предельно малых высотах (до 200 м);
- нечувствительность к психологическому воздействию огня средств ПВО.

Способы определения дальности до цели

Основными способами обнаружения БПЛА являются следующие:

1. Использование тепловизора инфракрасного диапазона.
2. Использование камер оптического диапазона.
3. Использование радиолокационных станций.
4. Осуществление радиомониторинга.

Использование радиолокационных станций для определения дальности до цели

Основным современным средством обнаружения БПЛА являются радиолокационные станции. В ряде случаев БПЛА являются сложной целью для существующих РЛС. Эти аппараты

имеют малую эффективную площадь рассеяния (ЭПР), из-за чего их обнаружение становится достаточно сложной задачей. В частности, снижается максимальная дальность обнаружения [1]. Расчетные дальности обнаружения БПЛА радиолокационными станциями при различных значениях ЭПР БЛА составляют для РЛС метрового диапазона – 8–14 км (БЛА с ЭПР около $0,1 \text{ м}^2$) и 0,1–1,5 км (БЛА с ЭПР, равной $0,01 \text{ м}^2$), для РЛС дециметрового диапазона – 9–16 км (ЭПР = $0,1 \text{ м}^2$) и 0,8–2,0 км (ЭПР = $0,01 \text{ м}^2$); РЛС сантиметрового диапазона – 12–25 км и 1,4–2,8 км [2]. Учитывая установку на них антирадарных покрытий, наибольшую эффективность дает применение двухчастных импульсных радиолокаторов. Первая группа частот в дециметровом диапазоне, вторая – в сантиметровом для обнаружения [3].

Известны следующие способы определения дальности объекта с помощью приемника электромагнитных волн (ПЭВ) [4, 5].

1. Угломерный способ определения дальности объекта и его радиальной скорости с помощью ПЭВ. В этом способе искомые параметры определяются при помощи двух (или более) пассивных ПЭВ, разнесенных на расстояние.

Если объект и два ПЭВ расположены в горизонтальной (вертикальной) плоскости, достаточно найти 2 азимута (2 угла места). Определение дальности осуществляется решением треугольника. Для установления координат объекта в общем случае необходимо измерить не менее 3 угловых координат. Скорость объекта определяется по результатам измерения наклонной дальности в различные моменты времени.

2. Разностно-дальномерный способ определения дальности. Он предусматривает измерение разностей расстояний от излучаемого объекта до ПЭВ. Для установления координат объекта на плоскости требуется определить не менее двух значений разности расстояний, для чего необходимо иметь по крайней мере 3 разнесенных ПЭВ. Местоположение объекта определяется точкой пересечения гипербол, соответствующих измеренным разностям расстояний, с фокусами в точках расположения ПЭВ.

3. Угломерно-разностно-дальномерный способ определения дальности. Он является комбинацией первых двух представленных способов и заключается в определении направлений и разности расстояний от объекта до ПЭВ. При этом способе надо иметь не менее двух ПЭВ. Определение плоскостных координат объекта обеспечивается измерением одной угловой координаты и разности расстояний [6].

Известные способы обладают следующими недостатками:

- не являются однопозиционными;
- для определения дальности и радиальной скорости объекта необходимо применять несколько ПЭВ.

Указанные недостатки приводят к усложнению конструкции измерительной системы и повышению ее стоимости, а также к снижению живучести системы.

Использование оптической локации для определения дальности до цели

Для выявления объектов с отличающейся от окружающей среды температурой используются инфракрасные тепловизионные камеры, что позволяет вести наблюдение за БПЛА в условиях ограниченной видимости и в темное время суток. Для получения наиболее информативных и стабильных результатов возможно точное совмещение тепловизионных снимков с видимым изображением. Для этого применяется тепловизор и видеокамера. Для обнаружения БПЛА в оптическом диапазоне используются активные и пассивные методы. Активными считаются метод анаглифов и метод определения координат БПЛА в пространстве. Пассивные методы включают в свой состав метод визуального наблюдения и метод комбинированного стереоэффекта.

Оптико-электронные системы решают следующие основные задачи.

1. Улучшение видения фоноцелевой картины, выдаваемой телевизионным каналами для повышения эффективности обнаружения и распознавания целей оператором на экране монитора.

2. Отображение на экране монитора фоноцелевой картины от ТВ каналов с наложенной знакографией.

3. Автоматическое или операторское обнаружение воздушных целей и их захват на автосопровождение.
4. Автосопровождение воздушных целей в подвижном и неподвижном полях зрения.
5. Определение дальности до цели, сопровождение которой ведется в замкнутом контуре слежения.

Общие особенности оптической локации. В оптическом диапазоне облегчается получение координатной информации о цели, ее размерах, форме, ориентации и т. д. При получении координатной информации используют поляризационные и фотометрические характеристики рассеянного излучения, регистрируют изображение цели. Получение координатной информации часто является основной задачей оптических локационных средств. Создание преднамеренных помех для оптической локации возможно, но сложнее, чем для радиолокации.

Полуактивная оптическая локация. Используется явление вторичного излучения (отражения) целями оптических волн от источника естественного интенсивного первичного излучения. Чаще всего таким источником является Солнце. Средства полуактивной локации, основанные на этом принципе, называют оптико-электронными станциями. К средствам полуактивной оптической локации можно отнести также биологические зрительные системы. Пренебрегая фактором использования вторичного излучения, оптико-электронные станции часто относят к средствам пассивной оптической локации.

Пассивная оптическая локация. Использует собственное оптическое излучение нагретых участков поверхности цели или ионизированных образований в ее окрестности. Известно, что максимум излучения абсолютно черного тела при температуре T (по Кельвину) приходится на длину волны $\sim 2898/T$ мкм. Длина волны, на которую приходится максимум излучения реальных целей, обычно находится в инфракрасной области спектра (лишь при $T \sim 4000$ К максимум совпадает с красной, а при $T \sim 5000$ К – с желтой областью видимого спектра). Средства пассивной оптической локации обычно работают в ближнем ИК диапазоне. К подобным средствам относят ИК пеленгаторы, тепловизоры, тепловые головки самонаведения, пассивные приборы ночного видения, видеокамеры и др.

Оптические системы основаны на использовании законов оптики для получения изображений различного масштаба для одного и того же объекта.

Один из алгоритмов определения расположения и размеров объектов заключается в последовательном приближении и удалении экрана или линзы относительно друг друга вдоль оптической оси в некотором заданном диапазоне Δx (рис. 1). В качестве оптической системы может использоваться и более сложная система линз, тогда изображение будет строиться согласно схеме, представленной на рис. 2 [7].

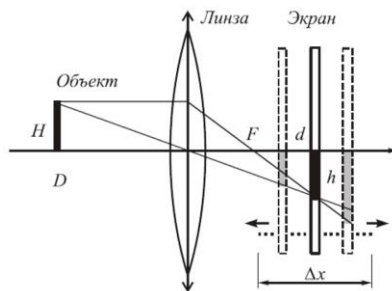


Рис. 1. Формирование изображения на движущемся экране с использованием одной линзы

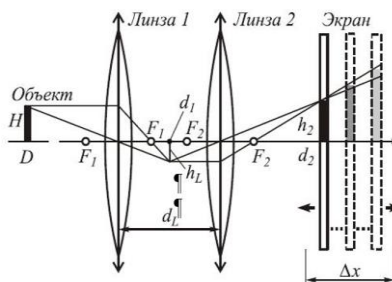


Рис. 2. Формирование изображения на экране с использованием двух линз

В результате расстояние для 1-го случая (рис. 1) определяется по формуле:

$$D_i = \frac{d_i \cdot F}{d_i - F}, \quad (1)$$

где D_i – расстояние от объекта до линзы для i -го изображения массива, F – фокусное расстояние линзы, d_i – расстояние от линзы до изображения i -го кадра массива.

Для 2-го случая значение D определяется путем последовательного применения формулы 2 к каждой линзе.

Другой способ заключается в определении расстояния до объекта в дискретные моменты времени посредством оптического фотоприемника, имеющего перестраиваемую оптическую систему с двумя известными граничными фокусными расстояниями (рис. 2) [8]. В результате получаются два изображения различного масштаба и расстояние до объекта определяется по следующей формуле:

$$a = f_2' \frac{1 - \frac{Y_1'}{Y_2'}}{\frac{Y_1'}{Y_2'} \cdot \frac{f_2'}{f_1'} - 1}, \quad (2)$$

где f_1 и f_2 – граничные фокусные расстояния оптической системы; Y_1' , Y_2' – размеры изображений объекта при f_1 и f_2 соответственно.

Данные способы имеют высокую точность показания результатов, но наличие механического перемещения в процессе получения изображения влияет на скорость получения результата, как следствие такие системы будут неэффективны при использовании алгоритмов на высоких скоростях передвижения объектов.

Использование двух камер (принцип стереометрии)

Алгоритмы определения расстояния, использующие две камеры, предполагают, что камеры находятся на некотором удалении друг от друга и на одной оси, параллельной относительно изучаемому объекту, а их оптические оси перпендикулярны положения объекта.

Так, например, один из алгоритмов использует две usb-камеры, и, следовательно, стереоскопическое зрение, для построения Z -изображения или изображения глубины – одноканального изображения, значение каждого пикселя которого пропорционально дистанции до объекта сцены [9].

Суть метода состоит в следующем. Для каждой точки на одном изображении выполняется поиск парной ей точки на другом изображении. По паре соответствующих точек можно выполнить триангуляцию и определить координаты их прообраза в трехмерном пространстве. На основе трехмерных координат прообраза вычисляется глубина как расстояние до плоскости камеры. Для каждого пикселя левого изображения с координатами (x_0, y_0) выполняется поиск пикселя на правом изображении. При этом предполагается, что пиксель на правом изображении должен иметь координаты $(x_0 - d, y_0)$, где d – величина смещения камер друг относительно друга. В результате получается изображение глубины.

Другой предлагаемый метод измерения расстояния до объекта основан на принципах фотограмметрии и корреляционной обработке цифровых изображений стереопары. Получение информации о дальности заключается в регистрации нескольких изображений объектов под различными ракурсами.

Если расстояние между камерой и наблюдаемой сценой значительно превышает фокусное расстояние оптической системы, можно считать, что изображение строится в ее фокальной плоскости. В проективной модели камеры изображение трехмерного объекта получается его проектированием в фокальную плоскость (рис. 3).

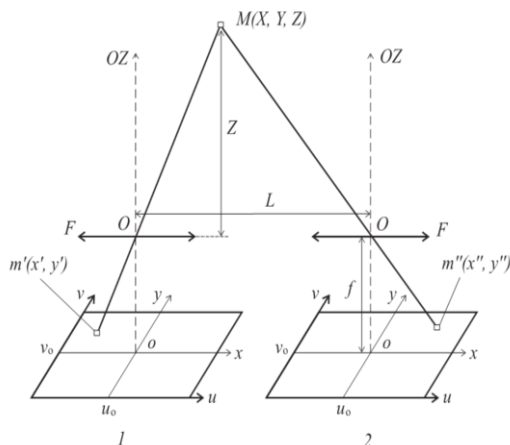


Рис. 3. Проективная модель фотокамеры и стереоскопической системы:
 f – фокусное расстояние, L – величина базы, Z – дальность до объекта

Проекцией точки трехмерного пространства M с координатами (X, Y, Z) , где Z – расстояние, является точка m с координатами (x, y) . При этом выполняются следующие соотношения (3):

$$x = \frac{fX}{Z}; y = \frac{fY}{Z}, \tag{3}$$

где f – фокусное расстояние оптической системы (камеры).

В результате многочисленных вычислений можно установить, что дальность до объекта Z из геометрии изображений определяется соотношением (4):

$$Z = \frac{(f \cdot L)}{(x' - x'')}, \tag{4}$$

где f – фокусное расстояние, L – величина базы (расстояние между оптическими осями камер), x' и x'' – координаты объекта в плоскости изображения на правом и левом снимках стереопары соответственно, а их разность – смещение объекта в плоскости изображения на первом и втором снимках стереопары соответственно.

Для более удобного практического применения формулы (4) представим ее в виде

$$r_n = \frac{LH}{\text{tg}\alpha(x_1 - x_2)}, \tag{5}$$

где L – величина базы (расстояние между оптическими осями камер); H – горизонтальное разрешение изображения; α – угол обзора камеры; x_1 и x_2 – координаты точки, до которой определяется расстояние, в координатной системе отсчета первой и второй камеры соответственно [10].

Для возможности использования формулы (5) считается, что изображения, получаемые с камер, ректифицированы, т. е. камеры расположены так, что в их координатных системах отсчета координаты точки, до которой требуется определить расстояние, равны. Это означает, что горизонтальные линии на изображениях соответствуют одной плоскости.

Из условия, в соответствии с которым чувствительность определения расстояния должна быть высокой (т. е., чтобы изменение разности пикселей на единицу приводило к изменению определяемого расстояния не более чем на 5%), можно определить, начиная с какой разности пикселей следует применять формулу (4):

$$r_1 - r_2 = 0,05r_1,$$

$$0,95 \cdot LH / (\text{tg}\alpha \cdot Dx_1) = LH / (\text{tg}\alpha \cdot Dx_2),$$

$$\Delta x_1 = 0,95 \cdot \Delta x_2.$$

Учитывая, что $\Delta x_2 = \Delta x_1 + 1$, получаем $\Delta x_1 = 19$.

Это означает, что, начиная с разности пикселей двух изображений, равной 19, возможно применять метод определения расстояния до объекта с помощью стереовидения.

Для того чтобы можно было определить расстояние вплоть до 500 м при угле обзора одной камеры $\alpha = 1,5^\circ$ и горизонтальном разрешении изображения, равном 1920 пикселей, вычислим по формуле базу L :

$$L = r_n \cdot \operatorname{tg} \alpha (x_1 - x_2) / H = 1,14 \text{ м.}$$

На рис. 4 показана зависимость расстояния до исследуемого объекта от разности между изображениями, полученными с двух стереокамер.

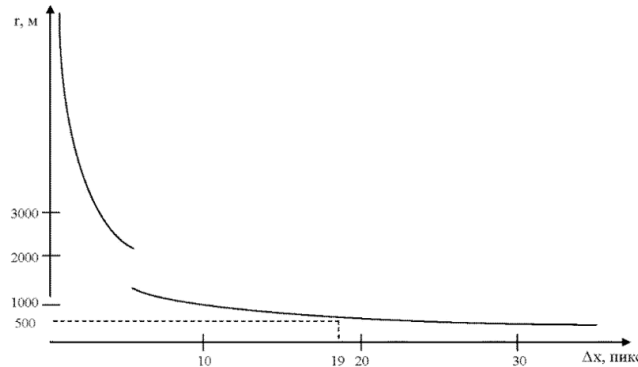


Рис. 4. Зависимость расстояния до объекта от разности пикселей между изображениями объекта с двух камер

PASSIVE OPTICAL LOCATION: FEATURES AND LIMITATIONS

A.N. ISKRYK, A.I. VILCHIKOV, S.V. GASHKOV, V.Yu. TSVIATKOU

Abstract. The current methods of passive location are analyzed. The main stages of their work and features of implementation are described. A numerical simulation of passive range estimation methods for optoelectronic systems is carried out.

Keywords: unmanned aerial vehicle, passive range estimation methods, optical location.

Список литературы

1. Рябов К. Как противодействовать беспилотнику // Военное обозрение. [Электронный ресурс] URL: <https://mensby.com/technology/guns/5386-how-counteract-drone> (дата обращения: 15.03.2019).
2. Годунов А.И., Шишков С.В., Юрков Н.К. // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2 (6). С. 62–70.
3. Свинин Е.В. Рамочная антенна для системы радиомониторинга. Выпускная квалификационная работа специалиста. Санкт-Петербург. 2017.
4. Быстров Р.П., Загорин Г.К., Федорова Л.В. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов. М.: Радиотехника, 2008.
5. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч.1. Основы радиолокации. М.: Воениздат. 1983. 456 с.
6. Черевко А.А., Ильин Е.М., Черевко А.Г. Способ пассивного однопозиционного определения дальности объекта и его радиальной скорости. 2018, [Электронный ресурс] URL: <https://edrid.ru/rid/218.016.1346.html> (дата обращения: 15.03.2019).
7. Гейдаров П.Ш. // Компьютерная оптика. 2011. Том 35. № 2. С. 275–280.
8. Моностатический способ определения расстояния до объекта, его направления и скорости движения: пат. 2340872 РФ/ Зуев С.В.; опубл.: 10.12.2008.
9. Козлов В.Л., Кузьмичев И.Р. // Вестник БГУ. 2011. Сер. 1. № 1. С. 33–38.
10. Локтев Д.А., Алфимцев А.Н. // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 11. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/996.html> (дата обращения: 15.03.2019).