

УДК 535.317.2

## **ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НАБЛЮДЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Манин А.П., Васильев В.В., Джуган Р.В.

Рассматриваются основные факторы, определяющие дальность действия оптических измерительных средств, используемых для обнаружения и оценки параметров траектории малоразмерных летательных аппаратов.

### **Введение**

В настоящее время широкое применение нашли беспилотные летательные аппараты. В различных приложениях возникают задачи обнаружения БЛА, идентификации и оценивания их параметров движения. Однако обнаружение БЛА и оценка параметров движения затруднены из-за малых размеров и малой эффективной отражающей поверхности. Возникают трудности обеспечения испытания БЛА. Ещё сложнее стоит вопрос обеспечения безопасности, возникающие при их применении.

Применение радиолокационных средств не в полной мере обеспечивает решение указанных задач. Оптические средства в широком спектре оптического диапазона позволяют обнаруживать и оценивать движение. Однако дальность действия этих систем обусловлена рядом ограничений и при оценке возможности их применения требуется определять прежде всего дальность действия.

Оптические измерительные средства нашли широкое применение при испытании летательных аппаратов, оценки эффективности их применения. Они отличаются от радиолокационных средств высокой точностью измерения угловых параметров наряду с фиксацией и регистрацией сопутствующих полёту различных физических эффектов. Однако из-за узких диаграмм направленности лазерных передатчиков и ответчиков применять активные методы оптической локации по высокодинамичным ЛА не представляется возможным. Приходится ограничиваться применением пассивных оптических средств, к числу которых относятся теодолиты и телескопы, принимающие от объектов наблюдения некогерентные оптические сигналы естественного или искусственного происхождения.

К числу таких систем относится, в частности, система обеспечения безопасности проведения работ с ЛА «Конгломерат» (индекс 9Ш320). Она обладает достаточно точными характеристиками оценок параметров движения. Но дальность действия, как и всех оптических пассивных средств, невелика. Приходится преодолевать это противоречие расстановкой множества лёгких, носимых (возимых) оптических модулей системы вдоль трассы полёта ЛА. При этом возникает необходимость оценки дальности действия оптического модуля. В технической литературе есть все предпосылки для расчёта дальности действия оптических средств. В статье приводится компактно изложенный материал, который необходим для оценки тактико-технических характеристик оптической системы и выбора конкретного варианта её применения.

**Основные факторы, определяющие дальность действия оптических измерительных систем**

Дальность действия оптического прибора – максимальное расстояние между прибором и объектом наблюдения, при котором обеспечивается выделение энергетических и пространственных признаков объекта наблюдения с заданным уровнем вероятности их выделения.

Дальность действия зависит от ряда факторов:

- сила активного оптического излучения объекта наблюдения;
- расстояние между источником излучения и объективом;
- состояние атмосферы и величины пути прохождения светового потока в атмосфере;
- разность мощности принимаемых оптических сигналов объекта наблюдения и фона (контрастность);
- геометрические размеры области изображения объекта наблюдения;
- технические характеристики объектива (оптическая разрешающая способность);
- технические характеристики фотоприёмного устройства (чувствительность и разрешающая способность фотодетекторного слоя).

Оценка дальности действия оптических средств существенным образом зависит от того, является ли объект наблюдения активным источником светового излучения, или объект обладает существенно меньшим уровнем излучения чем наблюдаемый общий фон. Для этих случаев покажем расчёт дальности действия.

#### **Дальность действия оптических средств при наличии активного источника излучения на объекте наблюдения.**

Зависит в первую очередь от мощности потока излучаемой световой энергии. Далее вступают факторы, связанные с расстоянием между объективом и объектом наблюдения, характеристикой среды распространения, техническими характеристиками оптики и фотоприёмного устройства.

Плотность  $E_{vR}$  светового потока  $\Phi_v$  на расстоянии  $R$  от источника составляет

$$E_{vR} = \frac{\Phi_v}{4\pi R^2} . \quad (1)$$

Энергия световых колебаний, проходя через толщу атмосферы, рассеивается, поглощается. В результате световая энергия уменьшается, затухает. Степень затухания зависит от состояния атмосферы и длительности пути прохождения световых волн в атмосфере. В связи с этим на входе объектива плотность светового потока составляет

$$E_{vоб} = \frac{\Phi_v}{4\pi R^2} \cdot \gamma_{cp} , \quad (2)$$

где  $\gamma_{cp}$  – коэффициент затухания среды.

Объектив оптической системы фокусирует энергию точечного излучателя, проходящую через входное отверстие, на ПЗС матрицу, размещённую на фокальной плоскости. В предельном случае освещённость участка ПЗС матрицы  $E_{ом}$ , на который проецируется удалённый источник излучения, зависит от той части светового потока, которая воспринимается объективом, и фокусирующими свойствами объектива, т.е. от площади входного отверстия объектива  $S_{вх}$  и площади светового пятна изображения точечного источника  $S_{из}$ .

$$E_{v.m} = E_{v.ob} \frac{S_{ex}}{S_{uz}}. \quad (3)$$

Учитывая, что  $S_{ex} = \frac{\pi D_{ex}^2}{4}$  и  $S_{uz} = \pi \left( \frac{1,22\lambda f}{D} \right)^2$ , находим

$$E_{v.m} = E_{v.ob} \frac{D_{ex}^2 \gamma_{ob}}{4 \left( \frac{1,22\lambda f}{D} \right)^2} = \frac{\Phi_v}{4\pi R^2} \cdot \gamma_{cp} \cdot \frac{D_{ex}^2 \gamma_{ob}}{4 \left( \frac{1,22\lambda f}{D} \right)^2}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина световой волны;

$f$  - фокусное расстояние;

$\gamma_{ob}$  - коэффициент пропускания объектива.

Можно иначе выразить площадь освещённости участка ПЗС матрицы, на котором сосредоточена энергия принимаемого светового потока, используя вместо показателя предельной линейной разрешающей способности объектива  $\frac{1,22\lambda f}{D}$  практически определяемый показатель в виде числа  $N$  линий на мм. В этом случае

$$E_{v.m} = \frac{\Phi_v \gamma_{cp}}{4\pi R^2} D_{ex}^2 N^2 \gamma_{ob}. \quad (5)$$

Излучение точечного источника принимается на фоне, обусловленном освещением окружающей среды. Обнаружение источника зависит от уровня превышения энергии точечного излучателя над энергией фона  $E_{vфон}$  и чувствительности ПЗС матрицы

Чувствительность ПЗС матрицы составляет  $E_{vпор} = 0.1 \dots 0,25$  лк.

Учитывая это, составим условие обнаружения источника излучения

$$\frac{\Phi_v \gamma_{cp}}{4\pi R^2} D_{ex}^2 N^2 \gamma_{ob} - E_{vфон} \gamma_{ob} \geq E_{vпор}, \quad (6)$$

из которого определим значение максимального расстояния между источником излучения и объективом

$$R_{max} \leq \frac{ND}{2} \sqrt{\frac{\Phi_v \gamma_{cp} \gamma_{ob}}{\pi (E_{vфон} \gamma_{ob} + E_{vпор})}} \quad (7)$$

Коэффициент затухания среды, обусловленной атмосферой, существенным образом зависит от её состояния. Экспериментальным способом получено следующее соотношение

$$\gamma_{cp} = \alpha^{R[км]}$$

где  $\alpha$  - показатель, зависящий от состояния атмосферы;

$R[км]$  – расстояние до объекта наблюдения, выраженное в километрах.

При средней прозрачности  $\alpha=0,81$ , при хорошей прозрачности  $\alpha=0,92$ , при очень прозрачном воздухе  $\alpha=0,96$ .

С учётом этого

$$R_{\max} \leq \frac{ND}{2} \sqrt{\frac{\Phi_v \alpha^{R(\kappa_m)} \gamma_{об}}{\pi (E_{\text{фон}} \gamma_{об} + E_{\text{впор}})}} \quad (8)$$

Рассмотрим следующий пример. Наблюдается удалённый световой источник, эквивалентный лампе накаливания 100 Вт, световой поток которой равен 1340 лм. Используется объектив с диаметром входного отверстия  $D = 50$  мм и разрешением 200 линий на мм. Чувствительность ПЗС  $E_{\text{впор}} = 0,25$ лк. Диапазон световых волн - видимый,  $\lambda = 0,4 \dots 0,7$  мкм. Освещённость среды: ночью  $E_{\text{впрН}} = 0,0001$ лк, вечером близко к заходу  $E_{\text{впрВ}} = 500$ лк днём  $E_{\text{впрД}} = 14000$ лк. Вычисления показывают, что максимальное расстояние, при котором источник света наблюдается безлунной ночью, составляет  $R_{\max\text{Н}} = 48$  км, вечером -  $R_{\max\text{В}} = 7,5$  км, днём -  $R_{\max\text{Д}} = 1,6$  км. С увеличением диаметра входного отверстия эти значения возрастают.

Расчёт дальности действия оптической системы в ИК диапазоне оптических волн аналогичен приведенному. Необходимо знание характеристик излучаемой энергии и пропускной способности атмосферы в интересующем диапазоне волн.

Дальность действия оптической системы зависит от интенсивности светового потока, излучаемого объектом наблюдения. Если объект наблюдения не излучает световую энергию, то в безоблачный солнечный день его поверхность может отражать солнечные лучи. Интенсивность отраженного излучения зависит от энергии потока солнечных лучей и эффективной отражающей поверхности ЛА.

Например, эффективная отражающая поверхность ЛА длиной 1 м, с диаметром поперечного сечения 120 мм и размахом крыльев 0,8 м составляет примерно  $S_{\text{эфф}} = 0,06$  м<sup>2</sup>. Освещённость прямым солнечным светом равна  $E_{\text{вс}} = 100000$  лк. Отражённая часть светового потока составляет

$$\Phi_{\text{вс}} = E_{\text{вс}} \cdot S_{\text{эфф}}$$

Положим, что отражённая энергия ЛА сосредоточена в полусфере. С учётом этого максимальное расстояние обнаружения снаряда находится следующим образом.

$$R_{\max} \leq ND \sqrt{\frac{\Phi_{\text{вс}} \alpha^{R(\kappa_m)} \gamma_{об}}{2\pi (E_{\text{фон}} \gamma_{об} + E_{\text{впор}})}} \quad (9)$$

Максимальное расстояние наблюдения ЛА в указанных выше условиях составляет: днём 4,8 км, утренней и вечерней зарёй – 18 км.

Чем больше усиление объектива (больше диаметр входного отверстия объектива и выше разрешающая способность), тем больше дальность действия оптической системы. Чем больше мощность фона, тем дальность действия меньше. Наибольшая дальность достигается ночью. Чем больше чувствительность ПЗС матрицы, тем ниже уровень допустимой контрастности и тем больше дальность действия

**Дальность действия оптических средств при наблюдении не «святищегося» летательного аппарата.**

На практике часто возникает необходимость наблюдать ЛА на общем фоне, светимость которого превышает уровень энергии, излучаемой объектом. Например, в видимом диапазоне на фоне белых облаков БЛА излучает отражённый рассеянный свет. Вероятность обнаружения в этом случае зависит от двух факторов: от контрастности и геометрических размеров изображения.

Контрастность зависит от разности световой энергии фона (облака) и БЛА и, в первую очередь, от диаметра входного отверстия объектива. С учётом этого условием обнаружения объекта может служить неравенство

$$\frac{(\Phi_{\text{вобл}} - \Phi_{\text{внс}}) \gamma_{\text{сп}}}{2\pi R^2} D^2 N^2 \gamma_{\text{об}} \geq E_{\text{впор}}, \quad (10)$$

где  $\Phi_{\text{вобл}}$  - поток световой энергии, излучаемой облаком;

$\Phi_{\text{внс}}$  - поток световой энергии, отражённой ЛА.

Если решается задача обнаружения «точечного» источника излучения, то первостепенную роль играют размеры входного отверстия оптической системы (теодолита, телескопа) и оптическая разрешающая способность. Обнаружение «несветящегося» летательного аппарата помимо отмеченных параметров оптики существенно зависит от фокусного расстояния объектива.

Обнаружение и распознавание признаков объекта, отличающих его от фона и других объектов, зависит от размеров изображения объекта на фокальной плоскости (на ПЗС матрице). Чем больше размеры изображения объекта, тем больше отличительных признаков может быть обнаружено. Можно ввести такое понятие, как эквивалентной радиус области пространственных признаков изображения объекта на фокальной плоскости  $r_n$ .

Радиус  $r_n$  области пространственных признаков объекта наблюдения связан с фокусным расстоянием следующим образом

$$r_n = 2f \cdot \text{tg} \frac{\theta}{2}, \quad (11)$$

где  $\theta$  – пространственный угол, под которым наблюдается объект.

Чем меньше величина пространственного угла  $\theta$ , тем большее значение фокусного расстояния требуется для обеспечения заданного радиуса.

Если известен линейный размер объекта  $L$  и допустимое значение  $r_{\text{пдоп}}$ , необходимое для надёжной идентификации объекта, то можно определить максимальное расстояние до объекта, удовлетворяющему этому требованию (максимальную дальность)

$$R_{\max} = f \frac{L}{r_{\text{дон}}} . \quad (12)$$

Отсюда требуемое значение фокусного расстояния

$$f_{\text{mp}} = \frac{R_{\max} \cdot r_{\text{дон}}}{L} . \quad (13)$$

Однако, чем больше  $f$ , тем больше кружок рассеяния энергии. Для удержания размеров кружка рассеяния в пределах размеров элементарного детектора  $h$  (пикселя ПЗС матрицы) требуется, чтобы диаметр входного отверстия объектива  $D$  удовлетворял следующему условию

$$\frac{1,22\lambda f_{\text{mp}}}{D} \leq h . \quad (14)$$

Следует заметить, что чувствительность ПЗС матрицы ( $1/E_{\text{дон}}$ ) существенно зависит от размеров пикселя ( $h$ ). Связь количества элементарных зарядов, накапливающихся в пикселе под воздействием света, и размеров пикселя нелинейная. С возрастанием размеров пикселя чувствительность ПЗС матрицы существенно возрастает. В связи с этим физические размеры оптической системы с увеличением значения требуемой дальности действия возрастают. Так при работе по собственному излучению ЛА в ИК-диапазоне на расстоянии 120 км используются телескопы с диаметром входного отверстия (зеркала) до 1000 мм. Стоимость таких систем уникальна. На небольших расстояниях применяются достаточно простые оптические системы. От выбора их технических характеристик существенно зависит их дальность действия.

Таким образом, при эскизном проектировании оптических измерительных систем, при выборе объективов для существующих систем при их модернизации необходимо учитывать основные факторы формирования, излучения и распространения оптических сигналов, технические параметры объективов и современных цифровых фотодетекторных приёмных устройств, характеристики признаков пространства ЛА.

## Литература

1. Васильев В.В., Манин А.П., Белоус Р.А. Принципы построения цифровых оптических локаторов патрульного типа. XV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», г Воронеж, 2009 г.
2. Васильев В.В., Манин А.П., Мацыкин С.В., Семёнов И.Г. Анализ задач пассивной цифровой оптической локации. «Вопросы оборонной техники». №2, 2010 г., стр. 47...53.
3. Васильев В.В., Манин А.П., Челахов Д.М. Концептуальные вопросы построения оптических систем обеспечения безопасности полётов, контроля параметров движения и ориентации летательных аппаратов в пространстве. М., «Машиностроение», ОНТЖ «Полёт», 2013 г., №9.



**АВИАЦИЯ ♦ РАКЕТНАЯ ТЕХНИКА ♦ КОСМОНАВТИКА**

Орган Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского  
и Академии наук авиации и воздухоплавания

Журнал выходит ежемесячно  
Выпускается с августа 1998 г.

**Г.В. НОВОЖИЛОВ** – Главный редактор (авиация),  
академик РАН

**А.С. КОРОТЕЕВ** – Главный редактор (ракетная  
техника и космонавтика), академик РАН, профессор

**Члены  
редакционной  
коллегии**

А.А. АЛЕКСАНДРОВ,  
д.т.н., проф.  
А.П. АЛЕКСАНДРОВ,  
к.т.н., летчик-космонавт  
Б.С. АЛЕШИН,  
чл.-кор. РАН  
Б.В. БАЛЬМОНТ,  
академик РАКЦ  
В.Г. ДМИТРИЕВ,  
чл.-кор. РАН  
Б.И. КАТОРГИН,  
академик РАН, проф.  
А.А. ЛЕОНОВ,  
к.т.н., летчик-космонавт  
А.М. МАТВЕЕНКО,  
академик РАН, проф.  
С.В. МИХЕЕВ,  
академик РАН  
Н.Ф. МОИСЕЕВ, к.т.н.  
М.А. ПОГОСЯН,  
академик РАН, проф.  
И.Б. ФЕДОРОВ,  
академик РАН  
Е.А. ФЕДОСОВ,  
академик РАН, проф.  
В.В. ХАРТОВ,  
д.т.н., проф.  
С.Л. ЧЕРНЫШЕВ,  
чл.-кор. РАН, проф.

Редактор-организатор  
О.С. РОДЗЕВИЧ

**Редакционный совет**

А.М. МАТВЕЕНКО,  
председатель редсовета,  
академик РАН, проф.  
О.М. АЛИФАНОВ,  
чл.-кор. РАН, проф.  
И.В. БАРМИН,  
чл.-кор. РАН, проф.  
В.Е. БАРСУК, д.т.н.  
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ,  
д.т.н., проф.  
О.Ф. ДЕМЧЕНКО, к.э.н.  
Н.Н. ДОЛЖЕНКОВ, д.т.н.  
С.Ю. ЖЕЛТОВ,  
чл.-кор. РАН  
Л.М. ЗЕЛЕНЬКИЙ,  
академик РАН, проф.  
А.Н. КИРИЛИН, д.т.н.  
А.А. КОРОТЕЕВ,  
академик РАН  
С.Б. ЛЕВОЧКИН, д.т.н.  
Л.Н. ЛЫСЕНКО,  
д.т.н., проф.  
А.П. МАНИН, д.т.н.  
К.М. ПИЧХАДЗЕ,  
д.т.н., проф.  
С.С. ПОЗДНЯКОВ, инж.  
Ю.А. РЫЖОВ,  
академик РАН, проф.  
Г.Г. САЙДОВ, к.т.н.  
В.Г. СВЕТЛОВ, д.т.н.  
А.Н. СЕРЬЕЗНОВ, д.т.н.  
В.П. СОКОЛОВ,  
д.т.н., проф.  
В.А. СОЛОВЬЕВ, чл.-кор. РАН,  
проф., летчик-космонавт  
В.А. ШАТАЛОВ,  
летчик-космонавт

**СОДЕРЖАНИЕ**

**Манин А.П., Васильев В.В., Джуган Р.В.** Дальность  
действия оптических средств наблюдения беспилотных  
летательных аппаратов . . . . . 3

**Кузнецов В.И., Шпаковский Д.Д.** Оценочный расчет  
КПД основных узлов газотурбинного двигателя . . . . . 8

**Мизрохи В.Я.** Построение алгоритмов управления зе-  
нитной ракеты с активной радиолокационной головкой  
самонаведения при наведении на низколетящие цели на  
фоне подстилающей морской поверхности . . . . . 15

**Досиков В.С., Карутин С.Н., Болкунов А.И., Лаптев Н.Н.**  
Современные методы оценки социально-экономической  
эффективности функционирования спутниковых систем  
и их близких аналогов . . . . . 20

**Бомштейн К.Г.** Научно-технический вклад университе-  
тов различных стран в разработку малых спутников . . . 34

**Болкунов А.И., Карутин С.Н., Климов В.Н., Можаров И.В.,  
Рейтор К.И.** Уточнение концепции создания единой системы  
нормативного регулирования в области координатно-вре-  
менного и навигационного обеспечения. Часть 2 . . . . . 44

**Цыганков О.С.** Луна как объект геополитики и колони-  
зации . . . . . 52

*Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для  
публикации трудов соискателей ученых степеней.  
Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.  
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламо-  
датель. Плата с аспирантов за публикацию статей не взимается.  
Аннотации статей журнала и требования к оформлению предоставляемых  
авторами рукописей приведены на сайте <http://www.viartpolet.ru>*

Адрес редакции: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4  
Телефон: 8 (499) 269-54-97  
Адрес электронной почты: [rosipolet@mail.ru](mailto:rosipolet@mail.ru)  
Адрес в интернете: <http://www.viartpolet.ru>