

В. А. Фираго, А. В. Весельев

## ОПТИЧЕСКИЕ ЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ИК ДИАПАЗОНА

### Введение

Пассивные оптико-локационные системы выгодно отличаются от активных незаметностью для противника, поскольку каждый достаточно быстродвигающийся летательный аппарат затрачивает энергию на преодоление сопротивления воздуха, часть которой, преобразуясь в электромагнитное излучение, позволяет обнаружить его. Основным недостатком таких систем – отсутствие данных о скорости и дальности аэродинамического объекта. Введение в состав пассивной локационной системы активного лазерного канала позволяет устранить этот недостаток [1] и получить точные данные о параметрах траектории быстро маневрирующего объекта, которые невозможно получить с помощью радиолокационных средств, поскольку диаграмма направленности их антенн намного шире, чем у оптических локаторов. Рассмотрим основные проблемы, возникающие в процессе обнаружения объектов и измерения параметров их траектории оптическими локаторами.

### Обнаружение объектов по их тепловому излучению

Отсутствие в пассивных локационных системах информации о расстоянии и скорости лоцируемых тел создает большие затруднения при разработке алгоритмов выделения реальных объектов из фоновых помех. Используемые критерии должны вырабатываться на основе информации о форме, размерах и спектральных характеристиках излучения объектов, траекторной динамике их координат при движении. Важными сведениями для создания алгоритмов обнаружения, выбора порога принятия решения и последующего слежения являются пространственно-временные статистические характеристики флуктуаций излучения естественных яркостных фонов. Только сложные многоступенчатые процедуры обработки поступающего потока видеоданных, использующие базы данных о характеристиках целей и яркостных фонов, обеспечивают низкую частоту появления ложных тревог при заданной вероятности правильного обнаружения. Стремительное развитие микропроцессорной техники существенно увеличило возможности использования пространственно-временной фильтрации и процедур распознавания образов. Но даже сейчас, при использовании самой суперсовременной элементной базы, создание цифрового блока обработки информации работающего в режиме реального времени является чрезвычайно сложной задачей.

Сущность проблемы обнаружения объекта заключается в решении вопроса о наличии или отсутствии соответствующего сигнала на некотором фоне помех и шумов. Очевидно, что без априорного знания признаков, характерных для объекта и фона, процесс обнаружения невозможен.

Признаков, по которым сигнал абсолютно отличается от фона, в реальных задачах обычно указать невозможно, ибо любой признак или свойство в той или иной степени присущи как объекту, так и фону. Поэтому задача обнаружения объекта носит вероятностный характер.

Изображения принято подразделять на два класса: семантические (смысловые) и текстурные, примеры которых приведены на рис. 1.



**Рис. 1. Примеры семантического (вертолет на фоне облачного неба в средней ИК области спектра) (а) и текстурного (случайное гауссовое поле) (б) изображений и их фрагменты (в), (г)**

В процессе длительной эволюции зрительная система человека приспособилась опознавать и классифицировать не любые произвольные распределения яркости, спроецированные хрусталиком на сетчатку глаза, а лишь те, которые создаются объектами внешнего мира. В этом легко убедиться, если попытаться обнаружить шумовой узор (объект со случайным распределением яркости), показанный на рис. 1 г, на фоне случайного поля, представленного на рис. 1 б. Решение этой задачи дается с большим напряжением, поскольку приходится, мысленно сдвигая фрагмент, поэлементно сравнивать оба изображения. В то же время обнаружение фрагмента, показанного на рис. 1 в, происходит гораздо легче и быстрее. Характерной особенностью изображений реальных объектов является то, что они состоят из областей, разделенных более или менее резкими световыми границами, внутри которых яркость изменяется сравнительно медленно. Эти световые границы или контуры изображений передают форму объекта и являются основой для его распознавания. Например, даже отсутствие на рис. 1 а вращающихся лопастей не мешает нам классифицировать объект в середине нижнего правого квадранта как вертолет. Каждый из нас неодно-

кратно наблюдал полет вертолета, и имеющийся опыт легко позволяет сопоставить не совсем четкое изображение с реальным объектом.

При известной заранее форме изображения объекта, применяя оптимальный пространственный фильтр, можно проводить его обнаружение с вероятностью, определяемой отношением сигнал/шум [1]. Однако при поисково-обзорном сканировании небосвода, даже зная заранее виды летательных аппаратов, которые подлежат обнаружению, невозможно построить конечный набор согласованных фильтров вследствие неизвестности расстояния до лоцируемых аппаратов, их ориентации и углов, под которыми они наблюдаются.

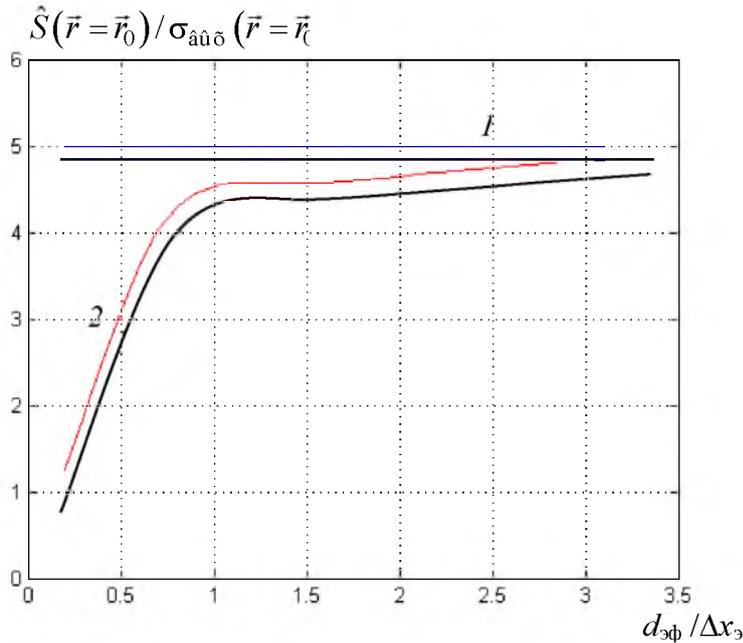


Рис. 2. Зависимости отношения сигнал/шум на выходе оптимального пространственного фильтра при непрерывном (1) и дискретном (2) представлении от величины  $d_{\text{эф}} / \Delta x_3$ .

$\hat{S}(\vec{r})$  и  $\sigma_{\hat{a}\hat{u}\hat{\delta}}(\vec{r})$  – сигнальная и помеховая функции на выходе пространственного фильтра,  $\vec{r}$  и  $\vec{r}_0$  – положения центров изображения объекта и центрального пиксела маски пространственного фильтра

Лишь в крайнем случае, когда удаленный летательный аппарат представляет собой яркий точечный источник, оптимальная пространственная фильтрация может эффективно использоваться для его обнаружения, но не классификации. Показано [2], что при обнаружении точечных объектов переход от непрерывного представления яркости поля обзора  $L(x, y)$  к дискретному, характерный для современных локационных систем, приводит к ухудшению достижимого отношения сигнал/шум. На рис. 2 представлены соответствующие зависимости при разных отношениях эффективного диаметра гауссового пятна рассеяния объектива  $d_{\text{эф}}$  к величине элементов матрицы инфракрасных приемников  $\Delta x_y$ . Также установлено, что наи-

меньшая погрешность оценки положения точечного источника  $\vec{r}$  наблюдается при  $d_{y\delta} / \Delta x_y \approx 0.7$ . Для оценки вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог необходимо применять адаптивные процедуры выбора порога принятия решения, основанные на получении текущей оценки вида плотности вероятности мелкоструктурных пространственно-временных флуктуаций яркости поля обзора, которые часто описываются семейством экспоненциальных распределений с разными показателями степени [3].

Задача обнаружения летательного аппарата значительно облегчается, если наблюдается его смещение при движении относительно фоновых образований и решение принимается при анализе последовательности кадров. Однако в ряде задач обнаружение приходится проводить при анализе только одного кадра и априори неизвестной форме объекта.

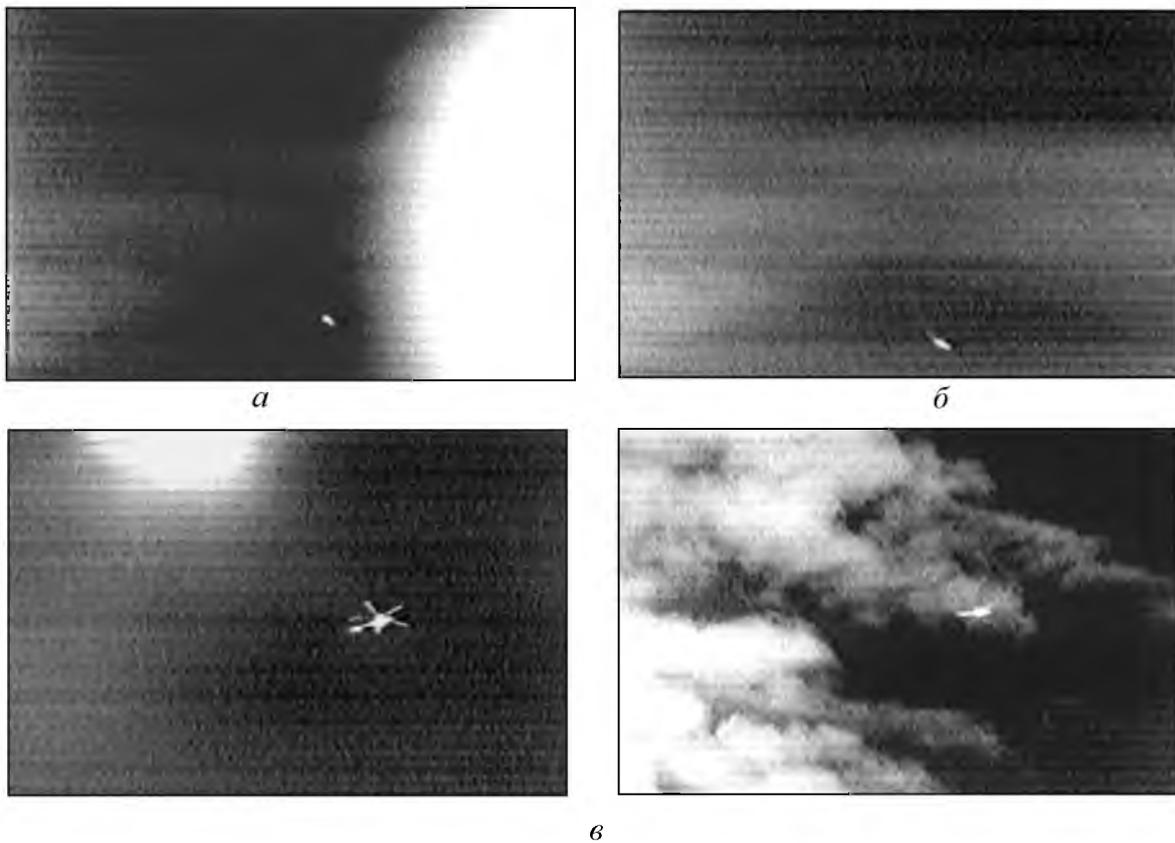


Рис. 3. Кадры с полетами учебного реактивного самолета (а, б) и вертолета (в), полученные с помощью тепловизионной камеры в спектральной области 8–12 мкм

Поиск признаков, которые можно использовать для обнаружения летательных аппаратов в условиях априорной неопределенности их формы при поисково-обзорном сканировании и анализе только текущего кадра показал, что при не очень больших дальностях (менее 10 км) летательные аппараты имеют больший градиент изменения яркости на краях по сравнению с облаками и аэрозольными образованиями и их средняя

по площади яркость в спектральной области 8–14 мкм превышает среднюю яркость окружающего их фона (см. рис. 3). Современные летательные аппараты обязательно имеют мощный двигатель, выделяющий тепловую энергию. Поэтому корпус даже зависшего на одном месте вертолета омывается потоком воздуха (создаваемым вращающимися лопастями винта), в который попадают горячие выхлопные газы двигателя. К тому же в процессе быстрого движения летательного аппарата его корпус нагревается за счет аэродинамического трения.

Численное моделирование характеристик алгоритмов обнаружения объектов с априори неизвестной формой, основанных на использовании одномерных линейных фильтров, осуществляющих анализ градиентов яркости по четырем направлениям, показало необходимость применения нелинейной фильтрации и морфологических операций с полутоновыми изображениями. Созданные алгоритмы для выделения обводов объектов с неизвестной формой и их последующего обнаружения на основе анализа изображения одного кадра, используют: оценку приращений яркости на краях изображений, морфологические операции, подавляющие ложные точки и линии путем устранения небольших региональных максимумов, бинаризацию полутонового изображения получаемых приращений яркости, вычисление величины превышения средней (по площади изображения) яркости объектов соответствующей яркости окружающего их фона и почти не требуют применения целочисленных операций умножения.



Рис. 4. Исходное инфракрасное изображение ИЛ-86 на фоне облачного неба и моделей двух прямоугольных объектов (1) с размерами яркой области 8×5 пикселей, двух объектов с размерами 4×2 пиксела (2) и двух точечных объектов (3)

Для иллюстрации эффективности работы этих алгоритмов на рис. 4 представлен кадр исходного ИК изображения самолета на фоне облачного

неба, в который добавлены 3 пары моделируемых объектов. Результат обработки этого кадра приведен на рис. 5, а характеристики областей, классифицированных как объекты, представлены в табл. 1. Благодаря достаточному контрасту всех модельных объектов и большой яркости изображения самолета в результате применения разработанных алгоритмов правильно определена принадлежность оставшихся после дискриминации областей к классу объектов.

Характеристики обнаружения разработанных подоптимальных алгоритмов (порог принятия решения чуть более  $7\sigma$ ) несколько хуже максимально достижимых при известной форме изображения обнаруживаемых объектов. Для их улучшения необходимо использование дополнительных признаков: усреднения хотя бы по двум кадрам, использование смещения объекта и т. д.



Рис. 5. Бинарное изображение после обработки исходного полутонового кадра

Для существенного снижения вероятностей ложных тревог, быстро возрастающих с понижением порога принятия решений, необходимо использование в подозрительных областях поля обзора, где наблюдаются сильные градиенты изменения яркости, активного канала. В случае наличия в этих местах только облачных образований отраженный от них сигнал за счет поглощения ИК излучения мельчайшими каплями воды будет слабым по сравнению с отраженным от летательного аппарата.

При этом скрытность работы локационной системы ухудшается незначительно, поскольку лазерное зондирующее импульсное излучение будет посылаться всего лишь в нескольких направлениях.

Таблица 1

Площадь и координаты центров масс областей классифицированных как объекты							
№ объекта	1	2	3	4	5	6	7
Площадь в пикселах	40	3	8	1031	8	3	38
Координаты по оси $Ox$ , в пикселах	115.5	122.0	257.5	315.3	282.5	402.0	475.8
Координаты по оси $Oy$ , в пикселах	53.0	142.0	262.5	242.0	112.5	232.0	225.8

### Гибридная локационная система

Функциональная схема гибридной локационной системы, обладающей набором всех функций, свойственных как пассивным, так и активным инфракрасным локаторам приведена на рис. 6. Система может работать в двух режимах: 1) поисково-обзорного сканирования, 2) слежения за перемещающимся летательным аппаратом.

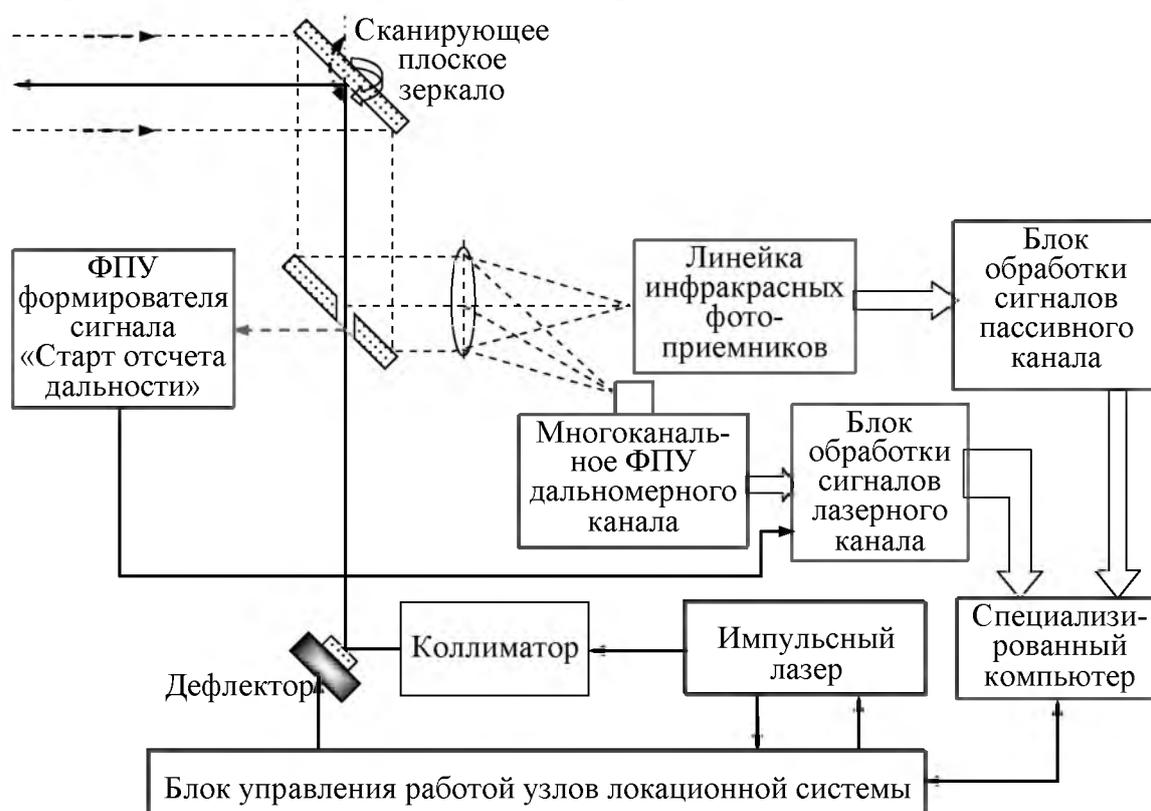


Рис. 6. Функциональная схема гибридной локационной системы

В режиме поисково-обзорного сканирования многоканальное инфракрасное фотоприемное устройство на основе линейки приемников формирует сигналы, пропорциональные яркости поля обзора, которые далее поступают в блок обработки сигналов пассивного канала. Сканирование вдоль азимута осуществляется вращением плоского зеркала вокруг вертикальной оси, а сканирование по углу места – за счет поворота вокруг гори-

зонтальной оси. После анализа получаемого кадра выбираются области, подлежащие проверке на наличие в них материальных объектов с помощью активного канала. Импульсное излучение лазера посылается в выбранные области поля обзора на следующем витке сканирования с помощью поворотного зеркала, углы наклона которого задаются с помощью дефлектора. Это позволяет оперативно отклонять в небольшом диапазоне углов ось мгновенного поля зрения активного канала в горизонтальной и вертикальной плоскостях. При наличии материального объекта фиксируется расстояние до него и определяется эффективная площадь рассеяния. Мощность лазерного импульса, параметры объектива и многоканального фотоприемного устройства позволяют установить наличие материального объекта на расстояниях до 15 км.

При обнаружении объекта система может переходить в режим слежения, осуществляемый путем периодического азимутального сканирования в небольшом диапазоне отклонений от направления на объект. В этом режиме определение положения объекта и расстояния до него ведется с помощью активного канала, посылающего зондирующие импульсы с частотой до 400 Гц. Поскольку точное управление положением оси мгновенного поля зрения активного канала осуществляется с помощью дефлектора, можно непрерывно получать угловые координаты положения объекта и расстояние до него, что особенно ценно при локации малоразмерных и низколетящих объектов.

### **Заключение**

Таким образом, разработаны алгоритмы обнаружения летательных аппаратов по их инфракрасному излучению. Показано, что алгоритмы обнаружения объектов с неизвестной формой должны использовать оценку приращений яркости на краях изображений, морфологические операции с полутоновыми изображениями, которые подавляют ложные точки и линии, образующиеся за счет фоновых помех и собственных шумов локационной системы, путем устранения небольших региональных максимумов. Указывается на эффективность бинаризации полутонового изображения, получаемого после морфологических операций, для обнаружения по превышению средней (по площади изображения) яркости объектов соответствующей яркости окружающего их фона. Проанализирована специфика использования лазерного канала при одновременной работе с пассивным, регистрирующим тепловое излучение.

### **Литература**

1. *Фираго В. А., Козлов В. Л.* // Лазерная и оптоэлектронная техника. Сб. научн. статей. Вып. 8 Мн.: БГУ, 2003. С. 225–254.
2. *Фираго В. А.* Определение оптимального радиуса гауссовой функции рассеяния объектива при обнаружении точечных объектов системами с дискретным представлением изображения // Вестник БГУ, Сер.1. 2005, № 3. С. XX – XX.
3. *Фираго В. А., Ханох Б. Ю.* Статистические характеристики некоторых естественных фоновых помех // Изв. Вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29, № 2. С. 281–290.