

УДК: 621.397

## **Корреляционно-разностный алгоритм обнаружения воздушных объектов, наблюдаемых на фоне неоднородного неба**

**Суровцев П.Ю.\*, Суслин А.С.**

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,*

*ул. Красноказарменная, 14, Москва, 111250, Россия*

*\*e-mail: [petr.surovcev@mail.ru](mailto:petr.surovcev@mail.ru)*

### **Аннотация**

В данной работе предлагается решение известной проблемы обнаружения подвижных воздушных объектов на фоне неоднородного неба пассивными оптико-электронными системами (ОЭС). Выяснено, что известные алгоритмы обнаружения, основанные только на яркостных характеристиках объектов малоэффективны при работе на сложном фоне. Для решения задачи предлагается использовать разработанный корреляционно-разностный алгоритм селекции меток, основанный на формировании разностных кадров с предварительной компенсацией сдвига, величина сдвига между двумя кадрами вычисляется корреляционным методом. Данный алгоритм позволяет снизить количество ложных срабатываний и увеличить дальность обнаружения воздушных объектов. Алгоритм проверен на большом объеме экспериментальных данных, а также внедрен и проверен в опытной работе в натуральных условиях с привлечением реальных воздушных объектов. Основным достоинством алгоритма является способность работать при движении и носителя, и фона. Получены удовлетворительные результаты работы алгоритма при

использовании в сухопутных войсках ПВО РФ на неподвижной ОЭС в интервале времени 100 мс, а так же при смещении линии визирования ОЭС до 1,5 угл.минут, что позволит использовать алгоритм в том числе и на авиационной технике.

**Ключевые слова:** оптико-электронная система, разностный алгоритм обнаружения, корреляционный сдвиг, обнаружение воздушных объектов, сложная фоноцелевая обстановка.

### **Введение**

Появление матричных фотоприемных устройств (МФПУ) повлекло за собой активное развитие ОЭС. ОЭС, работающие в среднем ИК диапазоне (теплопеленгаторы) [1, 2], хорошо справляются с задачей пассивного обнаружения нагретых объектов. Интерес к ОЭС разведки воздушного пространства объясняется пассивностью работы системы - отсутствием демаскирующих признаков (активного излучения) [3, 4]. Использование только изображений обзораемого сектора пространства, позволяет обеспечить скрытность носителя при решении задач обнаружения воздушных объектов (ВО) [5]. ОЭС выводит информацию о состоянии воздушного пространства в заданном секторе на многофункциональный индикатор (МФИ), необходимую оператору для работы. Именно возможность пассивного обнаружения послужила развитию ОЭС и применению ОЭС для военных нужд.

Процесс обнаружения воздушных объектов сводится к выполнению двух основных задач:

- автоматический поиск на изображениях обзриваемого сектора воздушного пространства претендентов на звание ВО (первичная обработка информации);
- траекторный анализ движения претендентов (вторичная обработка информации).

### **1. Яркостные алгоритмы обнаружения**

Задача обнаружения воздушных объектов бортовыми ОЭС среднего ИК диапазона на фоне чистого неба [6] давно изучена и имеет множество решений. Обнаружение объектов на фоне неоднородного неба, в том числе облаков, значительно усложняет процесс правильного выделения.

Существующие и реализованные алгоритмы обнаружения в основном базируются на внутрикадровом анализе уровней сигналов в пикселях - сравнение сигнала, в исследуемом пикселе, с окружающими его пикселями (яркостные алгоритмы) [7 - 10]. Такие алгоритмы отлично работают в простых условиях – равномерный фон (чистое небо без облаков). В облачную погоду возникают трудности с селективированием меток на облаках (выделение объектов от фоновых помех). Метки от облаков можно отсеивать, повышая пороги обнаружения, что неминуемо приведет к уменьшению дальности обнаружения объектов [11].

Распространение получили и разностные алгоритмы [12, 13], основанные на том, что в последовательности кадров объект будет перемещаться по пикселям матрицы, а фон оставаться неподвижным. Предполагается, что в результате разности текущих кадров с предыдущим, фон будет исключаться (неподвижный), а точечный объект (подвижный) выделяться. Естественно, полностью фон исключить

нельзя, останется шумовая составляющая, которая будет определять пороговое условие для выделения метки. Однако, применение только разностного алгоритма ограничено движением фона, которое зависит от погодных условий (высота и скорость облаков) и стабилизации линии визирования ОЭС. Смещение облака даже на четверть пикселя может привести к появлению ложных меток.

На рис.1. показаны результаты работы яркостного алгоритма и разностного алгоритма с одинаковыми порогами обнаружения  $14\sigma$  ( $\sigma$  - среднее квадратическое отклонение сигнала фона вокруг анализируемого объекта).



а) – яркостной алгоритм



б) – разностный алгоритм

Рис.1. Результат работы алгоритмов с порогом  $14\sigma$

Из рис.1. видно, что даже при больших порогах алгоритмы выделяют ложные метки. Для разностного алгоритма было выбрано два кадра с интервалом времени 20 мс и сдвигом линии визирования по азимуту и углу места  $0,9'$ , что для используемой камеры составляет примерно 0,4 пикселя.

## 2. Корреляционно-разностный алгоритм

Для селекции ложных меток предлагается ввести предварительную обработку изображений перед вычитанием. Корреляционный анализ позволяет вычислять величину сдвига текущего кадра, вызванную движением фона и ОЭС, относительно опорного. Учитывая это смещение, можно вычесть фон с большей точностью и избежать ложных меток.

В общем случае можно выделить 6 компонент сдвигов (рис.2):

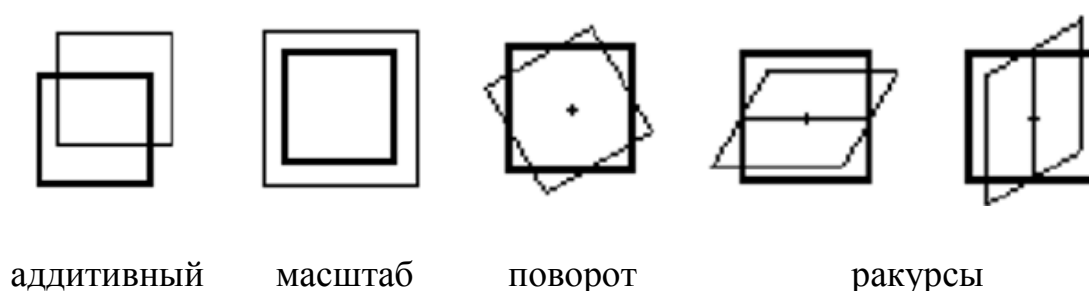


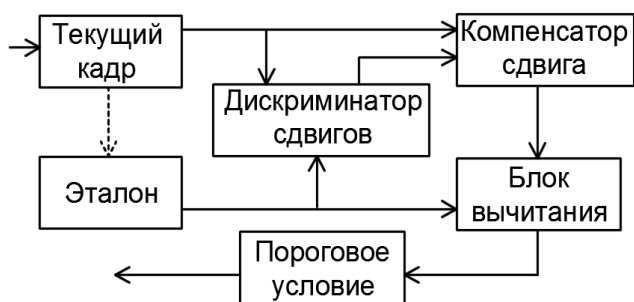
Рис.2. Возможные компоненты сдвига

два параллельных переноса, крен (поворот), масштаб и два ракурсных сдвига. Предполагается, что за короткое время между кадрами не произойдет существенных изменений изображения для того, чтобы вычислять компоненты крена, масштаба и ракурса, поэтому в данной работе будут рассмотрены только аддитивные сдвиги.

В основе работы алгоритма лежит дискриминатор сдвигов (ДС). В общем случае ДС многомерный и представляет собой совокупность одномерных измерительных звеньев – одномерных корреляционных дискриминаторов (КД), каждый из которых служит для измерения сдвигов между кадрами лишь по одной из компонент сдвига между входными многомерными сигналами (текущий и опорный кадры). Кроме одномерных КД многомерный дискриминатор содержит средства,

обеспечивающие нормировку измерений и компенсацию перекрестных связей между оценками отдельных компонент сдвига.

На рис.3 представлена структурная схема работы корреляционно-разностного алгоритма (КРА), которая включает следующие компоненты:



текущий кадр – изображение, поступающее с матричного приемника; эталон – перезаписываемый опорный кадр; дискриминатор сдвигов – измеритель сдвигов между текущим и

Рис.3. Структурная схема КРА

опорным кадром; компенсатор сдвига – преобразует текущий кадр по вычисленному сдвигу; блок вычитания – вычитание соответствующих пикселей текущего и опорного кадров; пороговое условие – выделение меток в разностном кадре по заданному порогу.

Корреляционный дискриминатор сдвигов служит для измерения сдвигов между кадрами. На его вход поступают текущее изображение, формируемое приемником, и эталонное изображение, хранящееся в памяти. Выбор эталонного кадра может быть строго по времени или по величине измеренного рассогласования. Мерой рассогласования служат компоненты сдвига между входными многомерными сигналами (текущий и опорный кадры).

В книге [14] написан подробный вывод формулы для оценки сдвигов. Воспользуемся основными результатами:

$$\mathbf{s} = B^{-1} \left( \frac{d\mathbf{x}}{ds} \right)^T Q(\mathbf{y} - \mathbf{x}). \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]^T$  – эталонное изображение (опорный кадр),  $N$  – число пикселей в фотоприемной матрице;  $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N]^T$  – текущее изображение (текущий кадр), Оно равно сдвинутому эталонному изображению:  $\mathbf{y} = T^s \mathbf{x}$ ,  $T^s$  – оператор обобщенного сдвига  $\mathbf{s} = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_n]$ ,  $Q$  – весовая матрица;  $B$  – матрица нормировки, приводит оценки к правильным единицам измерения (пиксели, радианы), а также в первом приближении устраняет перекрестные связи между сдвигами (когда наличие сдвига по «соседней» компоненте изменяет измеренное значение сдвига по «нашей»). Алгоритм нахождения сдвигов сводится к следующему порядку:

- 1) Определение производных эталонного изображения по каждому сдвигу: это будет массив  $df[k, i, j]$ , номер сдвига  $k = 0 \dots n - 1$ ,  $i = 0 \dots w - 1$ ,  $j = 0 \dots h - 1$  ( $w$  и  $h$  – количество столбцов и строк в изображении).

Для параллельного переноса по оси  $X$  ( $k = 0$ ):

$$df[0, i, j] = (x[i + 1, j] - x[i - 1, j]) / 2, i = 1 \dots w - 2, j = 0 \dots h - 1,$$

$$df[0, 0, j] = x[1, j] - x[0, j],$$

$$df[0, w - 1, j] = x[w - 1, j] - x[w - 2, j]. \quad (2)$$

Для параллельного переноса по оси  $Y$  ( $k = 1$ ):

$$df[1, i, j] = (x[i + 1, j] - x[i - 1, j]) / 2, i = 0 \dots w - 1, j = 1 \dots h - 2,$$

$$df[1, i, 0] = x[i, 1] - x[i, 0],$$

$$df[1, i, h - 1] = x[i, h - 1] - x[i, h - 2]. \quad (3)$$

Для крена ( $k = 2$ ):

$$df[2, i, j] = -(j - h/2) \cdot df[0, i, j] + (i - w/2) \cdot df[1, i, j]. \quad (4)$$

Для масштаба ( $k = 3$ ):

$$df[3, i, j] = (i - w/2) \cdot df[0, i, j] + (j - h/2) \cdot df[1, i, j]. \quad (5)$$

2) Нахождение ненормированной оценки сдвига  $a[k], k = 0 \dots n - 1$ :

$$a[k] = \sum_{i=0}^{h-1} \sum_{j=0}^{w-1} df[k, i, j] \cdot (y[i, j] - x[i, j]). \quad (6)$$

3) Нахождение нормирующей матрицы  $B^{-1}$  размером  $n \times n$ :

$$b[d, g] = \sum_{i=0}^{h-1} \sum_{j=0}^{w-1} df[d, i, j] \cdot df[g, i, j]. \quad (7)$$

4) Нахождение нормированной оценки сдвига  $s[i], i = 0 \dots n - 1$ :

$$s[i] = \sum_{k=0}^{n-1} c[i, k] \cdot a[k], \quad (8)$$

где  $c[i, k]$  обратная матрица к  $b[d, g]$ .

Оценим работу КРА на примере смотрящей системы с полем зрения  $25^\circ$ . На рис.4 показан результат работы КРА для кадров с интервалом времени 20 мс при угловом сдвиге по оси  $X$  (азимут)  $s_1 = 45''$ , по оси  $Y$  (угол места)  $s_2 = 31''$ .

Среднеквадратическое отклонение разностного кадра с предварительной компенсацией сдвига составило  $\sigma = 6$  ур., а без –  $\sigma = 7,5$  ур. из 16384 ур.

На рис.5 показано распределение сигнала в разностном кадре при работе КРА, представляющее собой остаточный шум. Полученное значение СКО  $\sigma = 6$  ур. будет использоваться для выбора порога обнаружения.



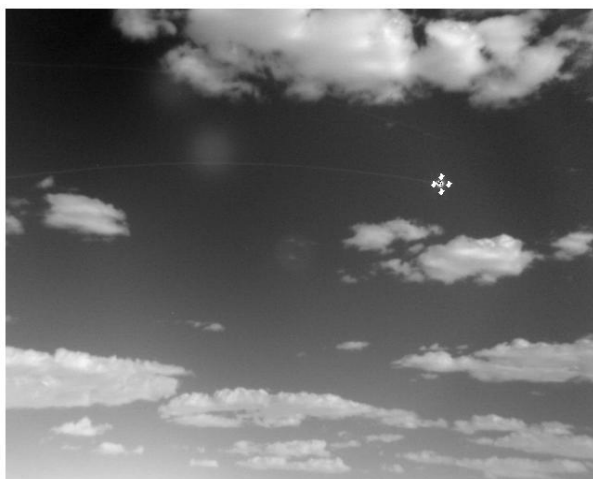


Рис.4. Выделение объекта КРА:

$\Delta t = 20$  мс,  $s_1 = 45''$ ,  $s_2 = 31''$ ,  $10\sigma$

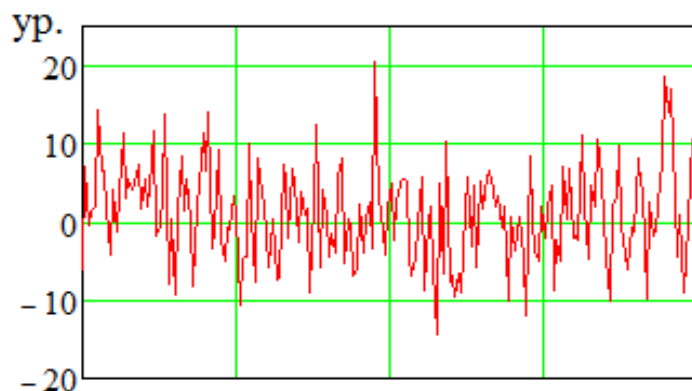


Рис.5. Распределение сигнала в строке разностного кадра в работе КРА

При неподвижном носителе КРА алгоритм обрабатывает кадры с интервалом времени 100 мс с порогом  $10\sigma$  (в условиях данного эксперимента).

Так как КРА должен применяться, в том числе и при движении носителя, в экспериментах оно имитировалось перемещением линии визирования по азимуту и углу места.

При смещении линии визирования больше  $1,5'$  сказывается влияние большого поля зрения, оно проявляется в разных угловых перемещениях: на больших углах места большие смещения, на малых – маленькие. Большой шаг смещения линии визирования вызван малой частотой работы камеры, с увеличением частоты этот шаг уменьшится. Однако, при дальнейшем увеличении поля зрения этот эффект будет снова проявляться.

Для того чтобы КРА работал для больших полей зрения и больших угловых перемещений, предлагается ввести в структуру алгоритма сегментацию

изображения [15 - 17]. Используя уже разработанные методы сегментации, основанные на яркостных цветовых и текстурных различиях [18] или другие [19 - 21], позволит разделить изображения на отдельные связанные группы, в таком случае эталоном будет не весь кадр, а его контрастные области.

Таким образом, на полученных экспериментальных записях, продемонстрирована работа КРА, получен хороший результат для малых и больших угловых перемещений. Проведено компьютерное моделирование с использованием экспериментальных данных, полученных ОЭС при наблюдении за реальными воздушными объектами. Отработаны азимутальные и угломестные перемещения линии визирования. Проведена оценка основных параметров алгоритма, характеризующих его обнаружительную способность. Выполнено сравнение с ранее разработанными алгоритмами, базирующимися на яркостном контрасте объектов. Получены практические результаты комплексного применения селекции.

### **Библиографический список**

1. Ллойд Дж. Системы тепловидения. - М.: Мир, 1978. - 414 с.
2. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. - Л.: Машиностроение, 1983. - 696 с.
3. Accetta J.S., Shumaker D.L. The Infrared and Electro-Optical System Handbook. Volume 4. Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing, Bellingham, Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1993, 361 p.

4. Криксунов Л.З. Справочник по основам ИК-техники. - М.: Советское радио, - 1978. - 400 с.
5. Бабаян П.В., Фельдман А.Б. Обнаружение и оценка параметров воздушных объектов в видеопоследовательностях на основе краткомасштабной пространственной обработки // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 4. С. 7 - 12.
6. Yilmaz A., Shaque K., Shah M. Target tracking in airborne forward looking infrared imagery // Image Vision Computing, 2003, no. 21, pp. 623 - 635.
7. Якименко И.В., Жендарев М.В. Пространственная фильтрация тепловых объектов на коррелированном атмосферном фоне // Журнал Радиоэлектроники. 2009. № 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb09/1/text.pdf>
8. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Фельдман А.Б. Обнаружение и оценка параметров малоразмерных воздушных объектов в последовательности изображений // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова «Цифровая обработка сигналов и ее применение». - М.: 2010. Т.1 – С. 117 - 120.
9. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.
10. Катулев А.Н., Колонсков А.А. Храмичев А.А., Ягольников С.В. Адаптивный метод и алгоритм обнаружения малоконтрастных объектов оптико-электронным средством // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 2. С. 29 - 39.

11. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: ЛОГОС, 1999. – 360 с.
12. Ваниев А.А., Емельянов Г.М. Метод выделения быстродвижущихся объектов при использовании цифрового оптического локатора следящего типа // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37. № 4. С. 477 - 483.
13. Кочкин В.А. Автоматическое выделение динамических объектов на фоне подстилающей поверхности // Наука и Образование. 2014. №12. URL: <http://engineering-science.ru/doc/749279.html>
14. Астапов Ю.М., Васильев Д.В., Заложнев Ю.И. Теория оптико-электронных следящих систем. – М.: Наука, 1988. – 322 с.
15. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
16. Претт У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982. – 781 с.
17. Бельский А.Б., Чобан В.М. Математическое моделирование и алгоритмы распознавания целей на изображениях, формируемых прицельными системами летательного аппарата // Труды МАИ. 2013. № 66. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=40856>
18. Чочиа П.А. Сегментация изображений на основе анализа расстояний в пространстве признаков // Автометрия. 2014. Т. 50. № 6. С. 97 - 110.
19. Минченков М.В., Хельвас А.В., Юрин Д.В. Алгоритм автоматической сегментации изображений для систем технического зрения. Сборник: Обработка информации и моделирование. – М.: МФТИ, 2002. С. 66 - 80.

20. Чочиа П.А. Пирамидальный алгоритм сегментации изображений // Информационные процессы. 2010. Т. 10. № 1. С. 23 – 35.
21. Белим С.В., Ларионов С.Б. Алгоритм сегментации изображения с помощью искусственной нейронной сети без использования других изображений // Радиостроение. 2017. № 3. С. 43 - 53.