

УДК 621.391

## АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КОМБИНИРОВАННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ОТ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

О.А. АЗАРЧИК, Е.А. МАШКОВ, Н.С. ДАВЫДОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 6 марта 2021*

**Аннотация.** Рассматриваются подходы к разработке алгоритмического обеспечения оптико-электронных систем в части технического зрения. Целью данной работы является обзор алгоритмов обработки изображений комбинированных оптико-электронных систем защиты объектов от беспилотных летательных аппаратов для оценки и анализа эффективности детектирования объектов и расширения области применения подобных систем.

**Ключевые слова:** обработка изображений, беспилотный летательный аппарат, защита объектов.

### Введение

Стремительное развитие технологий беспилотной авиации значительно повысило автономность, дальность действия и спектр решаемых беспилотными летательными аппаратами (БЛА) задач. В связи с этим особенно остро встает вопрос защиты важных объектов от несанкционированного проникновения БЛА [1]. При этом малый размер, высокая маневренность и автономность БЛА создают необходимость в разработке сложных многоступенчатых автоматических комплексов обнаружения, распознавания и подавления бортовых систем БЛА.

Комбинированная оптико-электронная система (КОЭС) предназначена для автоматического обнаружения, селекции, распознавания и автосопровождения объектов. Система может выполнять обнаружение и селекцию БЛА как автономно, так и по пеленгу от системы радиопеленгации, дальность обнаружения зависит от размеров БЛА. КОЭС состоит из широкоугольной панорамной (ОЭС ШУ) и узкоугольной подсистем (ОЭС УУ) оптико-электронного мониторинга. ОЭС ШУ при обнаружении несанкционированных БЛА в охраняемой зоне передает угловые координаты всех обнаруженных объектов ОЭС УУ. ОЭС УУ предназначена для автоматического обнаружения, распознавания и сопровождения объектов. ОЭС УУ принимает угловые координаты от ОЭС ШУ, производит поиск объектов по предоставленным пеленгам, их автоматическое распознавание и, в случае классификации объекта как БЛА, переходит в режим автоматического сопровождения (рис. 1).

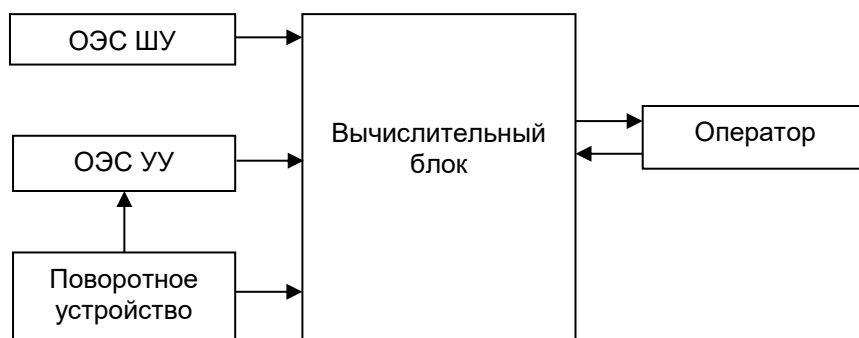


Рис. 1. Структурная схема КОЭС

## 1 Алгоритм формирования панорамного изображения

Данный алгоритм осуществляет совмещение изображений, получаемых от камер кругового обзора в единое бесшовное панорамное изображение, и состоит из нескольких этапов:

- устранение дисторсий на получаемых с камер изображениях;
- автоматическая коррекция яркости и контраста изображений;
- объединение исправленных изображений в единое панорамное изображение.

Для устранения дисторсий используется стандартная модель аппроксимации радиальной дисторсии, описываемая выражением

$$\begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \end{pmatrix} = L(r) \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $(x, y)$  – координаты искаженной точки изображения  $(x, y)$  – координаты исправленной точки изображения;  $(x_c, y_c)$  – центр модели дисторсии фотоприемника, обычно расположенный в центре изображения. Дистанция от каждой точки изображения до центра модели радиальной дисторсии фотоприемника определяется по формуле

$$r = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}. \quad (2)$$

$L(r)$  – функция, определяющая форму дисторсий в применяемой модели, обычно аппроксимируется рядом Тейлора как

$$L(r) = k_0 + k_1 r + k_2 r^2 + k_3 r^3 + \dots, \quad (3)$$

где набор  $k = (k_0, k_1, \dots, k_N)^T$  определяет параметры дисторсии. Точность модели определяется числом используемых членов аппроксимирующего ряда.

Для определения параметров модели  $k$  (калибровки) используется общепринятый подход [2], в основе которого лежит наложение требований на проекции трехмерных линий, которые должны быть прямыми линиями на изображениях.

Калибровка выполняется один раз, после чего одни и те же калибровочные параметры используются для устранения дисторсий на каждом изображении, поступающем с откалиброванного фотоприемника. После определения параметров модели дисторсии выражение (1) применяется для формирования исправленного изображения.

Для всех исправленных изображений выполняется эквализация их гистограмм [3], а также применяются другие алгоритмы улучшения изображений в случае необходимости, после из них формируется результирующее панорамное изображение.

## 2 Алгоритм автоматического обнаружения объектов на панорамном изображении

Для автоматического обнаружения малоразмерных объектов на панораме, формируемой со стационарно установленной оптико-электронной системы, применяется комплексный двухэтапный алгоритм. На первом этапе алгоритма производится вычитание усредненного панорамного изображения фоноцелевой обстановки из текущего панорамного изображения. По результатам вычитания формируется бинарное разностное изображение, на котором нули означают фон, а единицы – подозрительные на объект зоны. Усредненное панорамное изображение формируется по следующей формуле:

$$bg_i = bg_{i-1} \cdot \lambda + Im_i \cdot (1 - \lambda), \quad (4)$$

где  $bg_i$  – усредненное панорамное изображение на текущем кадре;  $bg_{i-1}$  – усредненное панорамное изображение на предыдущем кадре;  $Im_i$  – текущее панорамное изображение, а  $\lambda \in [0;1]$  устанавливает время накопления фона, что в свою очередь влияет на соотношение (точность обнаружения) / (число ложных срабатываний). Абсолютная разность между текущим панорамным изображением и усредненным панорамным изображением определяется как

$$d = |bg_i - Im_i|. \quad (5)$$

Абсолютная разность вычисляется для каждого пикселя панорамного изображения и если полученная разница выше порогового значения,  $d \geq t$ , то в результирующее бинарное изображение записывается единица, иначе – ноль.

Для определения порогового значения вычисляется средняя абсолютная разность между текущим панорамным изображением и усредненным панорамным изображением:

$$d_{avg} = \sum_{i=0, j=0}^{i=M, j=N} d_{ij}, \quad (6)$$

где  $M$  – ширина изображения;  $N$  – высота изображения;  $d_{ij}$  – модуль абсолютной разности между текущим панорамным изображением и усредненным панорамным изображением в точке  $(i, j)$ .

Таким образом, порог минимальной абсолютной разности можно определить как

$$t = d_{avg} \cdot w, \quad (7)$$

где  $w$  – корректирующий коэффициент, определяемый на этапе настройки системы.

Полученное разностное бинарное изображение, после обработки с помощью морфологических операций [4], является входными данными для второго этапа алгоритма.

На втором этапе применяется алгоритм автоматического обнаружения целей, подробно описанный в [5]. Данный алгоритм обнаружения целей основан на построении модели ключевых объектов сцены с использованием данных о количестве, положении и характеристиках объектов, получаемых при последовательной обработке каждого кадра видеопоследовательности. Этот способ предполагает два этапа анализа – пространственный и временной. На этапе пространственного анализа происходит обработка текущего кадра видеопоследовательности, а его результатом является некоторый список подозрительных объектов. На этапе временного анализа результаты пространственного анализа сравниваются с текущей моделью ключевых объектов сцены, после чего модель уточняется и обновляется. Результатом работы двухэтапного алгоритма автоматического обнаружения объектов на панорамном изображении является список объектов, угловые координаты которых передаются на дополнительный анализ в систему ОЭС УУ.

### 3 Алгоритмическое обеспечение ОЭС УУ

Получив угловые координаты от ОЭС ШУ, ОЭС УУ разворачивается по полученным угловым координатам и осуществляет автоматический поиск, распознавание и захват на сопровождение объекта в указанных координатах.

Алгоритмическое обеспечение ОЭС УУ состоит из нескольких ключевых частей:

- алгоритм автоматического обнаружения объектов в телевизионном (ТВ) и инфракрасном (ИК) каналах;
- алгоритм автоматического распознавания объектов;
- алгоритм мультиспектрального комплексирования ТВ- и ИК-каналов;
- алгоритм автоматического сопровождения объектов в ТВ- и ИК-каналах.

*Алгоритм автоматического обнаружения объектов в ТВ- и ИК-каналах.* Данный алгоритм схож со вторым этапом алгоритма автоматического обнаружения целей ОЭС ШУ [5], описанным ранее, с той лишь разницей, что бинарное изображение для анализа строится с применением адаптивного алгоритма бинаризации на основе анализа локальных контрастов [6–8]. Подобный алгоритм бинаризации позволяет применять его как для обработки изображений, полученных в видимом диапазоне, так и для инфракрасных изображений. Его отличительным свойством является инвариантность к четкости контуров объекта и его освещенности, необходимо лишь, чтобы объект обладал достаточным локальным контрастом на изображении.

*Алгоритм автоматического распознавания объектов.* Каждый обнаруженный на предыдущем этапе обработки объект подвергается процедуре автоматического распознавания.

Для автоматического распознавания используется алгоритм с применением сверточных нейронных сетей [9–10].

Сети сверточной архитектуры обычно состоят из нескольких идущих друг за другом слоев. Существует множество типов слоев в нейронной сети, наиболее часто используемыми являются сверточные слои, слои активации, слои субдискретизации, слои батч-нормализации, полносвязные слои и т.д.

Основой сверточных нейронных сетей являются слои свертки. Отличие данного слоя от полносвязного слоя заключается в том, что каждый нейрон связан только с ограниченным числом соседних нейронов, что позволяет существенно уменьшить число параметров сети. Веса данного слоя представляют собой набор многомерных изображений-фильтров с числом каналов, равным числу каналов входного изображения. В процессе прямого прохода данный фильтр двигают по входному изображению и вычисляют сумму попарных произведений элементов фильтра и значений входного изображения. В итоге на выходе блока получается изображение с количеством каналов, равным количеству фильтров блока.

Операцию свертки можно свести к операции матричного умножения, если предварительно преобразовать входное изображение в матрицу, в которой соседние элементы изображения оказываются в одном столбце. Данное преобразование называется "image to column".

*Алгоритм мультиспектрального комплексирования ТВ- и ИК-каналов.* Данный алгоритм осуществляет геометрическое и информационное совмещение изображений, получаемых в двух различных диапазонах видимости, с целью улучшения восприятия оператором (в особенности при плохой освещенности или сложных погодных условиях). Метод мультиспектрального комплексирования подробно описан в [11] и основан на использовании вейвлет преобразования [12]. В отличие от Фурье-преобразований, вейвлет-базисные функции являются хорошо локализованными, что дает возможность проводить локальный спектральный анализ [13]. Спектральные вейвлет-коэффициенты соответствуют не только амплитудам различных частот, но и различным пространственным участкам на изображении.

Для осуществления быстрого алгоритма вычисления вейвлет-преобразования в качестве базиса применяется система вейвлетов Хаара [14]. Данная система вейвлетов требует минимум вычислений, что немаловажно в условиях требований выполнения операций совмещения изображений в реальном масштабе времени.

*Алгоритм автоматического сопровождения объектов в ТВ- и ИК-каналах.* Для реализации устойчивого автоматического сопровождения малоразмерных подвижных объектов используется комбинированный корреляционно-признаковый алгоритм. Алгоритм основан на параллельном применении двух различных подходов к сопровождению.

В качестве результата автоматического обнаружения и распознавания формируется эталон цели, получаемый из изображения в видимом или инфракрасном спектре либо на основе комплексированного мультиспектрального изображения (в зависимости от времени суток и установок оператора). Полученный эталон используется в качестве шаблона для корреляционно-экстремального алгоритма поиска с применением нормализованной кросс-корреляции [15, 16] в качестве меры сходства шаблона (эталона) и участка изображения в проверяемых координатах. Поскольку объект претерпевает эволюции в процессе сопровождения (изменения масштаба и ракурса, развороты), необходимо периодически обновлять используемый эталон с заданным периодом либо по значению коэффициента корреляции. Для перезаписи используемого эталона и уточнения границ и размеров сопровождаемого объекта применяется признаковый алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения, описанный ранее [5], который периодически определяет и уточняет строб сопровождения цели (описывающий прямоугольник). По уточненному стробу сопровождения производится перезапись эталона для корреляционного сопровождения.

## Заключение

В статье был проведен обзор алгоритмов обработки изображений комбинированных оптико-электронных систем защиты объектов от БЛА для оценки и анализа эффективности детектирования объектов и расширения области применения подобных систем. Рассмотренные алгоритмы частично либо полностью реализованы в настоящее время в следующих комплексах

защиты объектов от БЛА: комплекс для защиты стратегических объектов от мультикоптеров "Гроза-3" производства КБ "Радар" (Республика Беларусь), комплекс "Силок" производства ООО "Специальный технологический центр" (Российская Федерация) и др.

Таким образом, комбинированные оптико-электронные системы позволяют эффективно обнаруживать и сопровождать воздушные объекты, что особенно актуально в случаях, когда БЛА совершают полет в режиме "радиомолчания" без обмена сигналами с пультом оператора.

## IMAGE PROCESSING ALGORITHMS IN COMBINED OPTOELECTRONIC SYSTEMS FOR PROTECTING OBJECTS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES

O.A. AZARCHIK, E.A. MASHKOV, N.S. DAVYDOVA

**Abstract.** Approaches to the development of algorithmic support for optoelectronic systems in terms of technical vision are considered. The purpose of this work is to review the image processing algorithms of combined optoelectronic systems for protecting objects from unmanned aerial vehicles to evaluate and analyze the effectiveness of object detection and expand the scope of such systems.

*Keywords:* image processing, unmanned aerial vehicle, object protection.

### Список литературы

1. Мясников Е.В. Угроза терроризма с использованием беспилотных летательных аппаратов: технические аспекты проблемы. 2004.
2. Luis Alvarez, Luis Gomez, and J. Rafael Sendra. Algebraic Lens Distortion Model Estimation. 2010.
3. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. 2002. P. 91–94.
4. Фурман Я.А., Юрьев А.Н., Яншин В.В. Цифровые методы обработки и распознавания бинарных изображений. 1992.
5. Тупиков В.А., Павлова В.А., Бондаренко В.А., [и др.] Способ автоматического обнаружения объектов на морской поверхности в видимом диапазоне. 2016. № 11. С. 105–121.
6. Sauvola J., Pietikainen M. Adaptive document image binarization. 2000.
7. Bradley D., Roth G. Adaptive Thresholding Using Integral Image. 2007. Vol. 12. P. 13–21.
8. Shafait F., Keysers D., Breuel T.M. Efficient implementation of local adaptive thresholding techniques using integral images. 2008.
9. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. 2016.
10. Deng L. and Yu. D. Deep Learning: Methods and Applications. 2013. Vol. 7. P. 197–387.
11. Фролов В.Н., Тупиков В.А., Павлова В.А., [и др.] Методы информационного совмещения изображений в многоканальных оптико-электронных системах. 2016.
12. Тетерин В.В. [и др.] Метод комплексирования информации от многоканальной системы с использованием вейвлет-спектров. 2006.
13. Петухов А.П. Введение в теорию базисов всплесков. 1999.
14. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. 1999.
15. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения. 2009.
16. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., [и др.] Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. 2008.