

УДК 378:004

DOI: 10.25686/978-5-8158-2474-4-2025-568-574

Способ оптико-информационного обеспечения обнаружения артефактов на сложном фоне роботизированным комплексом с элементами нейронных сетей

Р. В. Поляков

Филиал НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск, Россия

Аннотация. Работа посвящена разработке способа обнаружения артефактов на сложном атмосферном фоне с использованием инфракрасных оптических систем и нейросетевых алгоритмов. Основное внимание уделено оптимизации параметров сегментации видеопотока для повышения точности обнаружения при сохранении приемлемой вычислительной нагрузки.

Ключевые слова: компьютерное зрение, инфракрасная разведка, оптико-электронная система, обнаружение и распознавание БПЛА, нейронные сети, сегментация видеопотока.

Method of optical-information support for artifact detection on complex backgrounds using a robotic system with neural network elements

R. V. Polyakov

Branch of NIU "MEI" in Smolensk, Smolensk, Russia

Abstract. The work is devoted to the development of a method for detecting artifacts on a complex atmospheric background using infrared optical systems and neural network algorithms. The main focus is on optimizing video stream segmentation parameters to improve detection accuracy while maintaining acceptable computational load.

Keywords: computer vision, infrared reconnaissance, optoelectronic system, UAV detection and recognition, neural networks, video stream segmentation

Введение

Под артефактом следует рассматривать беспилотный летательный аппарат (БПЛА). В последние годы значительное внимание уделяется проблеме их обнаружения и распознавания. Особую сложность представляют малогабаритные БПЛА, обладающие низкой эффективной площадью рассеяния и способные двигаться по сложным траекториям на малых высотах. В таких условиях традиционные радиолокационные методы демонстрируют ограниченную эффективность [1-4].

Альтернативным решением является применение инфракрасных (ИК) оптико-электронных систем. По сравнению с радиолокационными методами, ИК-детектирование обеспечивает пассивный и скрытный режим наблюдения. Кроме того, в отличие от систем видимого диапазона, ИК-системы способны функционировать круглосуточно, сохраняя работоспособность при недостаточной освещённости.

Тем не менее, эффективность существующих неавтоматизированных оптико-электронных средств ИК-диапазона, не оснащённых алгоритмами автоматического обнаружения и распознавания, остается удовлетворительной. Основные трудности связаны с выявлением малоразмерных целей на сложном атмосферном фоне (например, на фоне кучевых облаков, разрывов облачности и других неоднородностей). Дополнительным фактором, снижающим эффективность, является утомление операторов при длительном визуальном поиске.

В работе [5] предложено использование ИК-систем в сочетании с нейросетевыми алгоритмами компьютерного зрения. Предварительно обученная нейросетевая модель на основе архитектуры YOLOv11 показала высокую точность в задачах обнаружения и классификации БПЛА, однако её эффективность снижалась при работе с малоразмерными объектами на неоднородном атмосферном фоне, характеризующемся наличием облачности различных типов, разрывов и значительных градиентов водности.

Для повышения точности обнаружения было предложено сегментирование видеопотока: вместо обработки целых кадров (рис. 1) использовались их части (рис. 2), размер которых соответствовал масштабу неоднородностей фона.



Рис. 1. Исходный кадр видеопотока



Рис. 2. Пример разделения кадра видеопотока на сегменты размером 512×512 с перекрытием 10 % от размера сегмента

Такой подход позволил повысить точность обнаружения малоразмерных БПЛА за счёт увеличенного масштаба анализа. Однако разделение кадра на множество сегментов привело к значительному росту вычислительной нагрузки, что выразилось в увеличении времени обработки и задержках видеопотока из-за многократных прогонов модели.

Постановка задачи

В данной работе ставятся следующие задачи:

1. Исследование влияния размера сегментов на эффективность обнаружения и распознавания БПЛА нейросетевой моделью.
2. Анализ зависимости вычислительной нагрузки системы обработки данных от размера сегментов.

Теория

Для проведения экспериментальных исследований использовались тепловизионные видеозаписи общей продолжительностью 43 минуты, полученные с помощью специализированного аппаратного комплекса (рис. 3), включающего следующие компоненты:

- 1) В качестве оптического датчика LWIR-диапазона – тепловизор Sii AT (LWIR-диапазон), обладающий следующими характеристиками:
 - рабочий спектральный диапазон: 8...14 мкм;
 - разрешение кадра: 640×480 пикселей;
 - угол поля зрения (по горизонтали): 73,3°;
 - пространственное разрешение (iFOV): 1,999 мрад;
 - чувствительность (NETD): $\leq 0,5$ К;
 - частота кадров: 50 Гц.
- 2) В качестве средства записи и хранения видеопотоков – видеорегистратор HIWATCH DS-H204GA, обладающий следующими характеристиками:
 - поддержка кодеков: H.265+/H.265/H.264+/H.264;
 - максимальный объём хранилища: 6 ТБ.
- 3) В качестве средства оперативного отображения информации – монитор для оперативного отображения данных.

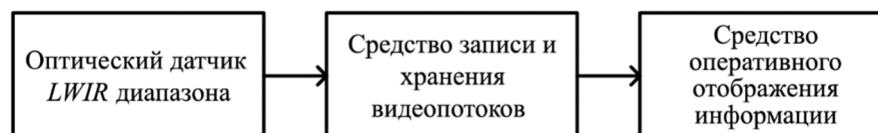


Рис. 3. Структурная схема специализированного аппаратного комплекса для регистрации видеозаписи полёта БпЛА

Видеоматериалы содержали записи полёта БпЛА (размах крыла – 5 м, длина – 2 м) на постоянной высоте 500 м с равномерной скоростью. Дистанция до точки наблюдения варьировалась от 1000 до 3700 м.

Методика анализа

Проведён сравнительный анализ двух ключевых параметров:

1. Эффективность обнаружения нейросетевой моделью:
 - процент корректных обнаружений (без идентификации);
 - процент идентификации;
 - процент ложных срабатываний.
2. Вычислительная нагрузка:
 - время обработки видеопотока.

Критерии сегментации

Для оптимизации обработки учитывались следующие требования:

- размеры сегментов кадра были выбраны с учётом размеров основных пространственных неоднородностей фона, это обеспечивает эффективное подавление фоновых помех;
- во избежание разделения БпЛА между сегментами и его последующей потери величина перекрытия между соседними сегментами должна превышать максимальный линейный размер проекции БпЛА на кадре, модель эффективно обнаруживает объекты без разделения на сегменты площадью >50 пикселей (максимальный линейный размер около 20 пикселей) [5].

Эти требования должны реализовываться в исследовании через систему постепенно уменьшающихся размеров сегментов с соответствующим увеличением процента перекрытия для малых сегментов, что позволило бы найти баланс между точностью обнаружения и вычислительными затратами.

Исходя из этого, параметры сегментации были выбраны следующим образом:

- размер сегмента: 1280×1024 пикселей, величина перекрытия 0 % (исходный кадр);
- размер сегмента: 850×600 пикселей, величина перекрытия 5 %;

- размер сегмента: 512×512 пикселей, величина перекрытия 5 %;
- размер сегмента: 480×400 пикселей, величина перекрытия 5 %;
- размер сегмента: 400×400 пикселей, величина перекрытия 10 %;
- размер сегмента: 400×320 пикселей, величина перекрытия 10 %;
- размер сегмента: 350×350 пикселей, величина перекрытия 10 %;
- размер сегмента: 300×300 пикселей, величина перекрытия 10 %;
- размер сегмента: 340×270 пикселей, величина перекрытия 10 %;
- размер сегмента: 256×256 пикселей, величина перекрытия 10 %;
- размер сегмента: 128×128 пикселей, величина перекрытия 20 %.

Результаты эксперимента

Анализ эффективности обнаружения и идентификации в зависимости от дальности и размера сегмента изображения представлен в таблице 1.

Таблица 1. Анализ эффективности обнаружения и идентификации БПЛА в зависимости от дальности и размера сегмента изображения

Параметры	Дальность от ОЭС до БПЛА, м										
	1000-1250	1250-1500	1500-1750	1750-2000	2000-2250	2250-2500	2500-2750	2750-3000	3000-3250	3250-3500	3500-3700
Тип атмосферного фона	ясное небо	ясное небо	ясное небо	ясное небо	ясное небо	ясное небо	мелкие АО	облако	облако	мелкие АО	ясное небо
Размер сегмента	1280 x 1024										
Кол-во обнаружений, %	100	87,5	63,5	58,5	46,5	33,5	12	0	0	1,5	0,6
Кол-во идентификаций, %	100	87,5	63,5	58,5	46,5	33,5	12	0	0	1,5	0,6
Кол-во ложных срабатываний, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Размер сегмента	800 x 650										
Кол-во обнаружений, %	100	100	100	100	97,5	86,7	71	19	28,5	68	29,9
Кол-во идентификаций, %	100	100	100	100	97,5	86,7	71	19	28,5	68	29,9
Кол-во ложных срабатываний, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Размер сегмента	512 x 512										
Кол-во обнаружений, %	100	100	100	100	100	100	92,5	19,5	44,5	88	56,3
Кол-во идентификаций, %	100	100	100	100	100	100	92,5	19,5	44,5	88	56,3
Кол-во ложных срабатываний, %	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0,2
Размер сегмента	480 x 400										
Кол-во обнаружений, %	100	100	100	100	100	100	90	22	53	84	68,9
Кол-во идентификаций, %	100	100	100	100	100	100	90	22	53	84	68,9
Кол-во ложных срабатываний, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Размер сегмента	400 x 400										
Кол-во обнаружений, %	100	100	100	100	100	100	94,5	21,5	51	91,5	76,4
Кол-во идентификаций, %	100	100	100	100	100	100	94,5	21,5	51	91,5	76,4

Окончание табл. 1

Параметры	Дальность от ОЭС до БПЛА, м										
	1000-1250	1250-1500	1500-1750	1750-2000	2000-2250	2250-2500	2500-2750	2750-3000	3000-3250	3250-3500	3500-3700
Тип атмосферного фона	ясное небо	ясное небо	ясное небо	ясное небо	ясное небо	ясное небо	мелкие АО	облако	облако	мелкие АО	ясное небо
Кол-во ложных срабатываний, %	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0,3
Размер сегмента	400 x 320										
Кол-во обнаружений, %	100	100	100	100	100	100	93,5	20	49,5	90,5	77,6
Кол-во идентификаций, %	100	100	100	100	100	100	93,5	20	49,5	90,5	77,6
Кол-во ложных срабатываний, %	0	0	0,5	0	0	0,5	0	1	2,5	0	0,2
Размер сегмента	350 x 350										
Кол-во обнаружений, %	100	100	100	100	100	97,3	90,5	11,5	40,5	91,5	82,2
Кол-во идентификаций, %	100	100	100	100	100	97,3	90,5	11,5	40,5	91,5	82,2
Кол-во ложных срабатываний, %	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0	0
Размер сегмента	300 x 300										
Кол-во обнаружений, %	100	100	100	100	100	94,7	80,5	2	27,5	84,5	72,9
Кол-во идентификаций, %	100	100	100	100	100	94,7	80	2	27,5	84,5	72,9
Кол-во ложных срабатываний, %	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0
Размер сегмента	340 x 270										
Кол-во обнаружений, %	100	100	100	100	100	93	81	14,5	30	87,5	75,1
Кол-во идентификаций, %	100	100	100	100	100	93	81	14,5	30	87,5	75
Кол-во ложных срабатываний, %	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0,5	0
Размер сегмента	256 x 256										
Кол-во обнаружений, %	100	100	100	100	96,5	84	69	0	13	84,5	39,5
Кол-во идентификаций, %	100	100	100	100	96	83	69	0	13	84,5	39
Кол-во ложных срабатываний, %	3	5,5	4,5	2	7,5	11	2,5	2,5	0	0	0,4
Размер сегмента	128 x 128										
Кол-во обнаружений, %	97	89,5	76	56	44,5	27,5	22,5	0	0	8	4,35
Кол-во идентификаций, %	96,5	89,5	76	56	43	27,5	22,5	0	0	8	4,26
Кол-во ложных срабатываний, %	12	15,5	14	4	12,5	10	16,5	1	13,5	5	5,8

Экспериментальные данные показывают устойчивое 100 % обнаружение на ближних дистанциях (1000...2000 м) для большинства параметров сегментации. Однако с увеличением расстояния до 2000...3500 м наблюдается заметное снижение эффективности, достигающее минимальных значений (0...28,5 %) в условиях облачности на дистанциях 2750...3000 м. На предельных расстояниях

3500...3700 м удовлетворительные результаты (76,4...94,5 %) демонстрируют только размеры сегментов 350×350...400×400 пикселей.

Наилучший компромисс между точностью обнаружения и уровнем ложных срабатываний обеспечивают сегменты 400×400 и 400×320 пикселей. В то время как крупные форматы (1280×1024) теряют эффективность на дистанциях свыше 2000 м, а чрезмерно мелкие (128×128) приводят к неприемлемому росту ложных срабатываний (до 16,5 %) и падению обнаружений ниже 50 %.

Наибольшие сложности для системы создает облачный фон, особенно в диапазоне 2750...3000 м, где эффективность обнаружения падает до нуля. Менее выраженное, но значимое влияние оказывают мелкие атмосферные объекты на дистанциях 3250...3500 м.

Зависимость роста вычислительных затрат от параметров сегментации видеопотока представлена в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость роста вычислительных затрат от параметров сегментации видеопотока

Размер сегмента, в пикселях	Размер кадра, в сегментах	Размер перекрытия между соседними сегментами, %	Количество сегментов в одном кадре	Усреднённая вычисленная кратность увеличения вычислительных затрат
1280 x 1024	1 x 1	0	1	1
800 x 650	1.6 x 1.6	5	4	3.19
512 x 512	2.5 x 2	5	9	6.23
480 x 400	2.7 x 2.6	5	12	6.44
400 x 400	3.2 x 2.6	10	12	8.78
400 x 320	3.2 x 3.2	10	16	9.85
350 x 350	3.7 x 2.9	10	16	11.8
300 x 300	4.3 x 3.4	10	20	14.49
340 x 270	3.8 x 3.8	10	25	14.89
256 x 256	5 x 4	10	30	20.3
128 x 128	10 x 8	20	130	90.58

Проведённый анализ данных показывает существенную зависимость между параметрами сегментации и ростом вычислительных затрат. Наибольший практический интерес представляет нелинейный характер этой зависимости – при уменьшении размера сегмента с 1280×1024 до 128×128 пикселей нагрузка возрастает с 1 до 90.58 условных единиц.

Ключевым фактором, определяющим вычислительную сложность, выступает количество сегментов в кадре. Так, обработка 130 фрагментов размером 128×128 требует в 90 раз больше ресурсов по сравнению с анализом целого кадра. При этом даже незначительное уменьшение размера сегмента (например, с 512×512 до 400×400 пикселей) приводит к заметному росту нагрузки – с 6.23 до 8.78 единиц.

Обсуждение результатов

Особого внимания заслуживает компромисс между точностью обнаружения и производительностью системы. Использование сегментов размером 400×400...512×512 пикселей обеспечивает разумный баланс между вычислительной нагрузкой (6-9 единиц) и эффективностью обнаружения, подтверждённой предыдущими исследованиями.

Полученные результаты подчёркивают необходимость тщательного выбора параметров сегментации с учётом как требований к точности обнаружения, так и доступных вычислительных ресурсов. Особенно это актуально для систем реального времени, где критически важна производительность.

Выводы

Проведенное исследование подтвердило эффективность сегментации видеопотока для обнаружения малоразмерных БПЛА в ИК-диапазоне на сложном атмосферном фоне. Экспериментальные данные показывают устойчивое обнаружение на ближних дистанциях (1000...2500 м) для большинства параметров сегментации. На дистанциях свыше 2500 м наилучшие результаты достигнуты при использовании сегментов 350×350 ... 400×400 пикселей, обеспечивающих наиболее высокую точность при умеренной вычислительной нагрузке.

Эксперименты выявили ключевые факторы, влияющие на эффективность системы: атмосферные условия, дальность до цели и размеры сегментов. Установлено, что уменьшение сегментов ниже 300×300 пикселей приводит к недопустимому росту вычислительных затрат при одновременном снижении качества обнаружения и возрастанию ложных обнаружений.

Полученные результаты могут быть рекомендованы для практического применения в системах мониторинга воздушного пространства.

Научный руководитель: д. т. н., проф. Якименко Игорь Владимирович, филиал НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск, Россия

Список литературы

1. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostoania (дата обращения 20.05.2019).
2. Самойлов П. В., Иванов К. А. Угрозы применения малоразмерных БПЛА и определение наиболее эффективного способа борьбы с ними // Молодой ученый. 2017. № 45. С. 59-65. URL: <https://moluch.ru/archive/179/46398/> (дата обращения: 21.09.2019).
3. Митрофанов Д. Г., Шишков С. В. Инновационный подход к вопросу обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1 (195). С. 28-40.
4. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Отвага. 29.01.2015. № 6 (14). URL: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki> (дата доступа 11.12.2019).
5. Оптико информационное обеспечение обнаружения артефактов на сложном фоне роботизированным комплексом с элементами нейронных сетей / И.В. Якименко, Ю.И. Якименко, Р.В. Поляков, Н.Н. Лавринков // МСАРД. 2025. С. 38-39.