

Радиостроение

Научно-практический журнал

<http://www.radiovega.su>

Ссылка на статью:

// Радиостроение. 2020. № 02. С. 39–50

DOI: [10.36027/rdeng.0220.0000167](https://doi.org/10.36027/rdeng.0220.0000167)

Представлена в редакцию: 14.02.2020

© Морозов А.Н., Назолин А.Л., Фуфурин И.Л.

УДК 543.424

Оптические и спектральные методы в задачах обнаружения и распознавания подвижных летательных объектов

Морозов А.Н.^{1,*}, Назолин А.Л.¹,
Фуфурин И.Л.¹

[*amor59@mail.ru](mailto:amor59@mail.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Статья посвящена анализу возможности использования оптических и спектральных оптических методов для решения задач обнаружения и идентификации подвижных летательных объектов на фоне объектов живой природы, а также идентификации следовых количеств вещества на их поверхности. Приведен обзор современного уровня развития методик и технических средств, реализующих различные спектральные методы оптической локации. Показаны особенности их применения и перспективы развития. Изучены области применения описанных методик и дано описание экспериментального стенда по изучению возможности создания гибридного лидарного комплекса идентификации подвижных объектов и переносимого груза.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; оптическая локация; лидар; идентификация

Введение

В последние несколько лет техника беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) получила очень активное развитие. БПЛА находят применение в различных областях городской инфраструктуры, в то же время возникает высокая вероятность проникновения сторонних БПЛА на охраняемые объекты или в места скопления людей, а также существует вероятность несения разнообразной, в т.ч. опасной нагрузки на борту БПЛА. В связи с этим возникает необходимость обнаружения БПЛА, его идентификации и распознавания опасной нагрузки. В настоящее время ведется большое количество работ в этом и смежных направлениях.

1. Анализ уровня техники

В работе [1] приведена классификация БПЛА по типу, размеру и техническим характеристикам, а также приведены основные методы обнаружения БПЛА на основе анализа

радиочастотного и видео сигналов. В работе [2], а также в патенте US 9,715,009 B1 приведены ограничения применения радиолокационных систем для обнаружения современных миниатюрных БПЛА типа ZALA 421-08, DJI Phantom 2 и подобных. Показано, что для обнаружения и идентификации подобных типов БПЛА эффективным подходом является применение методов оптической локации, в т.ч. совместно с датчиками, основанными на анализе радиочастотного спектра и акустических волн. Также в работе [3] показано, что при использовании радиолокационных методов для обнаружения малых БПЛА для расстояний 250-700 м существует мертвая зона и в этом случае необходимо применение оптических методов обнаружения БПЛА.

Для обнаружения объектов по инфракрасному (ИК) изображению в мировой практике существует два подхода. Первый подход [4] связан с идентификацией объекта по собственному излучению с помощью тепловизоров. Спектр собственного излучения объекта лежит в диапазоне 7-14 мкм. Современные тепловизоры обладают чувствительностью по яркостной температуре около 0,05 К. В перспективе подобные системы необходимо оснащать трансфокатором до 10-20 крат. Второй подход предусматривает применение активной инфракрасной лазерной подсветки, например, ИК лазером 903 нм или 1560 нм [5] для обнаружения и идентификации объекта, топографирования местности с последующим выделением движущихся БПЛА на фоне подвижных объектов живой природы. Для возможности обнаружения БПЛА на расстоянии до 2 км авторы [5] предлагают использовать 1560 нм с длительностью импульсов 1 нс, частотой повторения 1 МГц и мощностью в импульсе – 700 кВт. Расходимость луча лазера составляет величину порядка 0,5 град. При этом система укомплектована матричным фотоприемником (150 x 20 пикселей) и оптической системой такой, что угловое поле зрения матричного фотоприемника соответствует угловому полю луча лазера. Другими словами, система работает на фиксации отраженного сигнала от БПЛА в заданном угловом пространстве матричным фотоприемным устройством (ФПУ). Система сканирования оснащена быстродействующим гальванометрическим зеркалом ($f = 1$ кГц) для последовательного сканирования поля подсветки лазера. Подобные системы также выполняют функцию лазерного дальномера - ЛИДАРа.

В работе [6] описана возможность обнаружения БПЛА с помощью ИК камер или тепловизоров, по тепловому излучению воздуха, выделяемому двигателем БПЛА или аккумуляторной батареей. Для визуализации данных лазерного ЛИДАРа применяются методы 3D топографирования типа OctoMap [7]. Существует целый класс методов динамического анализа фона и выделения подвижных малозаметных объектов [8]. Для анализа изображений и 3D картин (типа гиперкуб) применяют методы теории графов и нейронные сети [9]. Начиная с 2012 г в области глубокого обучения (deep learning) были разработаны сверточные нейронные сети (Convolution Neural Network – CNN), которые могут обнаруживать объекты в режиме реального времени с высокой точностью.

В настоящее время наиболее популярными сетями, применяемыми в глубоком обучении для решения этой задачи, представляют собой сети FasterR-CNN [10], YOLO [11],

SSD [12]. Каждая модель зависит от базового классификатора, влияющего на качество модели [13]. В 2013 г. была разработана модель R-CNN [14], которая значительно улучшила точность детектирования объектов по анализу их видео изображений.

Самые современные разработанные модели относятся к семействам YOLO и SSD, и основаны на распознавании по одному полученному кадру (SingleShot). Модели на основе Faster R-CNN процесс детектирования происходит в 2 этапа. На первом этапе производится поиск регионов с предположительными объектами RPN. На втором этапе применяется модель Fast R-CNN, которая производит поиск в найденных регионах с первого этапа. Недостатком данного подхода является независимое обучение сетей друг от друга. Модели YOLO и SSD решают данную задачу обнаружения, как задачу регрессии. Высокая скорость работы данных моделей позволяет применять их в режиме реального времени для детектирования движущихся объектов.

Методы оптической локации БПЛА предполагают выделение частей изображения объекта и по набору характерных признаков. С другой стороны, для анализа химического состава материала, из которого изготовлено покрытие БПЛА, а также для обнаружения следовых количеств веществ на поверхности объекта, в мировой практике применяют спектральные оптические методы. Так, например, для анализа биологических объектов применяются люминесцентные методы с применением ультрафиолетовой подсветки [15]. Подобные подходы позволяют на расстоянии отличать объекты живой и неживой природы, что, например, может позволить отличать БПЛА от птиц и послужит дополнительным каналом детектирования.

В работе [16] приведен обзор существующих лазерных методов анализа химических соединений. Среди наиболее актуальных спектральных методов для анализа следовых количеств веществ на поверхности исследуемого объекта на расстоянии можно выделить люминесцентную спектроскопию с УФ подсветкой, спектроскопию комбинационного рассеяния света, спектроскопию дифференциального поглощения на основе перестраиваемого УФ лазера, метод формирования спектральных изображений (гипер- / мультиспектральные изображения), лазерную спектроскопию диффузного рассеяния с применением инфракрасных перестраиваемых квантово-каскадных лазеров (ККЛ).

Так в работе [17] показано, что для источника на длине волны 532 нм с энергией 100 мДж в импульсе и с применением телескопа с апертурой 203 мм произведено обнаружение химических соединений на расстоянии в несколько сотен метров. В работе [18] приведены результаты применения квантово-каскадного лазера с перестройкой 7,6-11,4 мкм с мощностью излучения 100 мВт/см² и показано, что путем построения гиперспектральных изображений удастся обнаруживать следовые количества веществ до 10 мкг/см² на расстоянии до 20 м. В работе [19] показана возможность создания ЛИДАРов диффузного рассеяния ИК излучения, построенных на базе ИК ККЛ для дистанционного обнаружения веществ на поверхностях. В работах [20 - 22] показаны возможности ККЛ для детектирования малых количеств вещества. В [20] показано, что с применением лазе-

ров с пиковой мощности 150 мВт в спектральном диапазоне 5,3 - 12,8 мкм с кадмий-ртуть-теллуриевым фотоприемником, охлаждаемым каскадом ячеек Пельтье, предел обнаружения составляет около 10 мкг/см^2 на расстоянии около 1 м. Увеличение мощности лазерного излучения позволит значительно увеличить дальность обнаружения и расширить возможность инфракрасных ЛИДАРов диффузного рассеяния света.

2. Постановка задач исследования

Возможность использования оптических спектральных методов в решении проблем обнаружения и распознавания беспилотных летательных аппаратов на фоне объектов живой природы во многом зависит от мощности источников излучения, падающей с увеличением расстояния до объекта и чувствительности регистрирующей аппаратуры. Оценка потенциально возможных предельных расстояний обнаружения БПЛА оптическими методами требует проведения дополнительных фундаментальных научных исследований. Целью таких исследований должна стать разработка научных основ дистанционного обнаружения, идентификации, сопровождения и определения параметров БПЛА и принадлежности БПЛА к различным группам методами оптической локации и оптической спектроскопии, а также автоматического оптического распознавания в различных средах на фоне подвижных объектов живой природы. Исследования должны охватывать существующие и перспективные спектральные оптические методы, направлены, в том числе, на выявление новых информативных признаков детектирования. Для их осуществления создается экспериментальный стенд, позволяющий реализовать поставленные задачи исследования.

3. Экспериментальный стенд

На первом этапе создания экспериментального стенда планируется изучить возможности экспресс-анализа видеоизображений с целью идентификации БПЛА, сопровождения и определения их характеристик, включая расстояние до них. Для их осуществления предлагается использовать специальную аппаратуру в составе: инфракрасная видеокамера для работы в ночное время; система инфракрасной подсветки с помощью лазера на длине волны 808 нм и мощностью порядка 30 Вт; трансфокатор не менее 20 крат, система наведения с точностью позиционирования порядка 1 мрад; лазерный дальномер на длине волны 1540 - 1570 нм с длительностью импульса не более 25 нс, расходимостью излучения не более 1 мрад и энергией излучения не менее 15 мДж.

На втором этапе планируется изучить возможность создания гибридного лидарного комплекса для идентификации БПЛА и переносимого груза, а также диагностики вихревых образований, состоящего из следующих основных устройств (рис. 1):

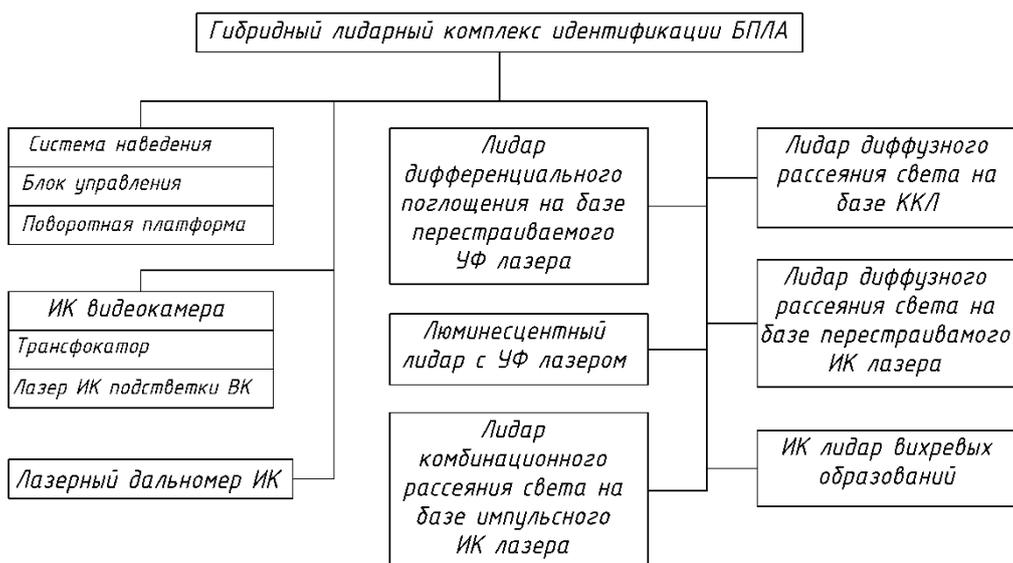


Рис. 1. Составные части экспериментального стенда идентификации БПЛА

люминесцентный лидар с УФ лазером на 266 нм с длительностью импульса 8 нс, частотой повторения 20 Гц и энергией излучения не менее 10 мДж; видеокамера (ВК) 1 Мпикс с рабочим спектральным диапазоном 120-1100 нм; ЛИДАР дифференциального поглощения на базе перестраиваемого УФ лазера в диапазоне длин волн 193 - 2600 нм с частотой следования импульсов 1 кГц и энергией импульса не менее 40 мкДж; ЛИДАР комбинационного рассеяния света на базе импульсного лазера с длиной волны 532 нм и энергией импульса не менее 50 мДж; лидар диффузного рассеяния света на базе квантово-каскадного лазера и Кадмий-Ртуть-Теллуриевый фотоприемника, охлаждаемого каскадом ячеек Пельтье с обнаружительной способностью $3 \cdot 10^9 \text{ см}^2/\text{Гц}/\text{Вт}$; ЛИДАР диффузного рассеяния света на базе перестраиваемого ИК лазера с длиной волны 4400 - 18000 нм и энергией импульса не менее 1 мДж, расходимостью излучения не более 1 мрад типа NT 373-XIR и Кадмий-Ртуть-Теллуриевый фотоприемника, охлаждаемого микрокриогенной системой с обнаружительной способностью порядка $10^{10} \text{ см}^2/\text{Гц}/\text{Вт}$; инфракрасный ЛИДАР для регистрации характеристик вихревых образований при движении БПЛА.

Представленный на рис. 1. состав экспериментального стенда позволит провести комплексные экспериментальные исследования, в том числе, оценить возможность создания принципиально новых дистанционных средств химической разведки, основанных на применении перестраиваемых ультрафиолетовых лазеров с регистрацией спектров люминесценции, возбуждаемых разными длинами волн, а также перестраиваемых инфракрасных лазеров для дистанционного определения БПЛА с помощью спектроскопии диффузного рассеяния инфракрасного излучения.

Заключение

Анализ современного состояния методов и технических средств, оптической локализации и оптической спектроскопии, показал перспективность использования в задачах обна-

ружения и идентификации подвижных объектов. Вместе с тем, комплексной эффективной системы спектрального оптического контроля за БПЛА пока не создано, остается много нерешенных проблем, таких как быстродействие нейронных сетей и необходимость их постоянного обучения; физические ограничения на дальность действия оптических методов разного типа; сложность задачи дистанционной дифференциации объектов различной природы. Для их решения необходимо совмещение методов оптической локации и спектрального анализа, методов теории статистики, графов, машинного обучения, нейронных сетей и методов автоматического управления, что является междисциплинарной фундаментальной научной задачей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №19-29-06009.

Список литературы

1. Филин Е.Д., Киричек Р.В. Методы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе анализа электромагнитного спектра // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Т. 6. № 2. С. 87-93.
2. Stary V., Krivanek V., Stefek A. Optical detection methods for laser guided unmanned devices // J. of Communications and Networks. 2018. Vol. 20. No. 5. Pp. 464-472.
DOI: [10.1109/JCN.2018.000071](https://doi.org/10.1109/JCN.2018.000071)
3. Farlik J., Kratky M., Casar J., Stary V. Radar cross section and detection of small unmanned aerial vehicles // 17th intern. conf. on mechatronics - Mechatronika (ME) (Prague, Czech Republic, December 7-9, 2016): Proc. N.Y.: IEEE, 2017. Pp. 433-439. Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7827857> (дата обращения 28.04.2020).
4. Kim B.H., Kim M.Y. Anti-saturation and contrast enhancement technique using interlaced histogram equalization (IHE) for improving target detection performance of EO/IR images // 17th intern. conf. on control, automation and systems: ICCAS 2017 (Jeju, South Korea, December 14, 2017): Proc. N.Y.: IEEE, 2018. DOI: [10.23919/iccas.2017.8204254](https://doi.org/10.23919/iccas.2017.8204254)
5. Kim B.H., Khan D., Bohak C., Wonju Choi, Hyun Jeong Lee, Kim M.J. V-RBNN based small drone detection in augmented datasets for 3D LADAR system // Sensors. 2018. Vol. 18. No. 11. P. 3825. DOI: [10.3390/s18113825](https://doi.org/10.3390/s18113825)
6. Müller T. Robust drone detection for day/night counter-UAV with static VIS and SWIR cameras // Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2017. Vol. 10190. P.1019018. DOI: [10.1117/12.2262575](https://doi.org/10.1117/12.2262575)
7. Hornung A., Wurm K.M., Bennewitz M., Stachniss C., Burgard W. OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees // Autonomous Robots. 2013. Vol. 34. No. 3. Pp. 189–206. DOI: [10.1007/s10514-012-9321-0](https://doi.org/10.1007/s10514-012-9321-0)
8. Chunyun Wang, Tian Wang, Ershen Wang, Enyan Sun, Zhen Luo. Flying small target detection for anti-UAV based on a Gaussian mixture model in a compressive sensing domain // Sensors. 2019. Vol. 19. No. 9. P. 2168. DOI: [10.3390/s19092168](https://doi.org/10.3390/s19092168)

9. Klasing K., Wollherr D., Buss M. A clustering method for efficient segmentation of 3D laser data // IEEE intern. conf. on robotics and automation: ICRA 2008 (Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008): Proc. N.Y.: IEEE, 2008. Pp. 4043-4048. DOI: [10.1109/ROBOT.2008.4543832](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543832)
10. Shaoqing Ren, Kaiming He, Girshick R., Jian Sun. Towards real-time object detection with region proposal networks // Advances in neural information processing systems: Neural information processing systems conf.: NIPS 2015 (Montreal, Canada, December 7-12, 2015): Proc. Red Hook: Curran Asss., 2016. Pp. 91-99. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1506.01497.pdf> (дата обращения 28.04.2020).
11. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, faster, stronger. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1612.08242.pdf> (дата обращения 28.04.2020).
12. Wei Liu, Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Cheng-Yang Fu, Berg A.C. SSD: Single shot MultiBox detector // Computer vision: 14th Eur. conf. on computer vision: ECCV 2016 (Amsterdam, Netherlands, October 11-14, 2016): Proc. Pt.1. Cham: Springer, 2016. Pp. 21-37. DOI: [10.1007/978-3-319-46448-0_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2)
13. Xin Li, Yiming Zhou, Zheng Pan, Jiashi Feng. Partial order pruning: for best speed/accuracy trade-off in neural architecture search. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1903.03777.pdf> (дата обращения 28.04.2020).
14. Gkioxari G., Hariharan B., Girshick R., Malik J. R-CNNs for pose estimation and action detection. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1406.5212.pdf> (дата обращения 28.04.2020).
15. Lefcourt A.M., Siemens M.C., Rivadeneira P. Optical parameters for using visible-wavelength reflectance or fluorescence imaging to detect bird excrements in produce fields // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. No. 4. P. 715. DOI: [10.3390/app9040715](https://doi.org/10.3390/app9040715)
16. Скворцов Л.А. Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел. М.: Техносфера, 2015. 207 с.
17. Misra A.K., Acosta-Maeda T.E., Porter J.N., Berlanga G., Muchow D., Sharma S.K., Chee B. A two components approach for long range remote raman and laser-induced breakdown (LIBS) spectroscopy using low laser pulse energy // Applied Spectroscopy. 2019. Vol. 73. No. 3. Pp. 320–328. Режим доступа: <https://www.osapublishing.org/as/abstract.cfm?URI=as-73-3-320> (дата обращения 28.04.2020).
18. Hugger S., Fuchs F., Jarvis J., Yang Q.K., Rattunde M., Ostendorf R., Schilling C., Driad R., Bronner W., Aidam R., Wagner J., Tybussek T., Rieblinger K. Quantum cascade laser based active hyperspectral imaging for standoff detection of chemicals on surfaces // Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2016. Vol. 9755. P. 9755A. DOI: [10.1117/12.2210913](https://doi.org/10.1117/12.2210913)
19. Rayner T., Weida M., Pushkarsky M., Day T. Remote explosive and chemical agent detection using broadly tunable mid-infrared external cavity quantum cascade lasers // Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2007. Vol. 6540. P. 65401Q. DOI: [10.1117/12.727700](https://doi.org/10.1117/12.727700)

20. Fufurin I.L., Tabalina A.S., Morozov A.N., Golyak I.S., Svetlichnyi S.I., Anfimov D.R., Kochikov I.V. Identification of substances from diffuse reflectance spectra of a broadband quantum cascade laser using Kramers–Kronig relations // *Optical Engineering*. 2020. Vol. 59. No. 6. P. 061621. DOI: [10.1117/1.OE.59.6.061621](https://doi.org/10.1117/1.OE.59.6.061621)
21. Голяк И.С., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалина А.С., Фуфурин И.Л. Идентификация химических соединений по спектрам рассеянного излучения в диапазоне длин волн 5.3-12.8 мкм с применением перестраиваемого квантово-каскадного лазера // *Химическая физика*. 2019. Т. 38. № 7. С. 3-10. DOI: [10.1134/S0207401X19070057](https://doi.org/10.1134/S0207401X19070057)
22. Fufurin I.L, Tabalina A.S., Morozov A.N., Golyak I.S., Svetlichnyi S.I. Causality relations in analysis of diffuse reflectance spectra obtained by infrared quantum cascade laser // *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*. 2020. Vol. 11441. P. 114410G. DOI: [10.1117/12.2549554](https://doi.org/10.1117/12.2549554)

Optical and Spectral Methods for Detection and Recognition of Unmanned Aerial Vehicles

A.N. Morozov^{1,*}, A.L. Nazolin¹,
I.L. Fufurin¹

* amor59@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: unmanned aerial vehicle; optical detection; LIDAR; identification

The paper considers a problem of detection and identification of unmanned aerial vehicles (UAVs) against the animate and inanimate objects and identification of their load by optical and spectral optical methods. The state-of-the-art analysis has shown that, when using the radar methods to detect small UAVs, there is a dead zone for distances of 250-700 m, and in this case it is important to use optical methods for detecting UAVs.

The application possibilities and improvements of the optical scheme for detecting UAVs at long distances of about 1-2 km are considered. Location is performed by intrinsic infrared (IR) radiation of an object using the IR cameras and thermal imagers, as well as using a laser range-finder (LIDAR). The paper gives examples of successful dynamic detection and recognition of objects from video images by methods of graph theory and neural networks using the network FasterR-CNN, YOLO and SSD models, including one frame received.

The possibility for using the available spectral optical methods to analyze the chemical composition of materials that can be employed for remote identification of UAV coating materials, as well as for detecting trace amounts of matter on its surface has been studied. The advantages and disadvantages of the luminescent spectroscopy with UV illumination, Raman spectroscopy, differential absorption spectroscopy based on a tunable UV laser, spectral imaging methods (hyper / multispectral images), diffuse reflectance laser spectroscopy using infrared tunable quantum cascade lasers (QCL) have been shown.

To assess the potential limiting distances for detecting and identifying UAVs, as well as identifying the chemical composition of an object by optical and spectral optical methods, a described experimental setup (a hybrid lidar UAV identification complex) is expected to be useful. The experimental setup structure and its performances are described. Such studies are aimed at development of scientific basics for remote detection, identification, tracking, and determination of UAV parameters and UAV belonging to different groups by optical location and spectroscopy methods, as well as for automatic optical UAV recognition in various environments against the

background of moving wildlife. The proposed problem solution is to combine the optical location and spectral analysis methods, methods of the theory of statistics, graphs, deep learning, neural networks and automatic control methods, which is an interdisciplinary fundamental scientific task.

RFBR research project No. 18-29-02024.

References

1. Filin E.D., Kirichek R.V. Approaches to the detection micro air vehicle based on the analysis of the electromagnetic spectrum. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii* [Information Technologies and Telecommunications], 2018, vol. 6, no. 2, pp. 87-93 (in Russian).
2. Sary V., Krivanek V., Stefek A. Optical detection methods for laser guided unmanned devices. *J. of Communications and Networks*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 464-472.
DOI: [10.1109/JCN.2018.000071](https://doi.org/10.1109/JCN.2018.000071)
3. Farlik J., Kratky M., Casar J., Sary V. Radar cross section and detection of small unmanned aerial vehicles. *17th intern. conf. on Mechatronics - Mechatronika (ME)* (Prague, Czech Republic, December 7-9, 2016): Proc. N.Y.: IEEE, 2017. Pp. 433-439. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7827857>, accessed 28.04.2020.
4. Kim B.H., Kim M.Y. Anti-saturation and contrast enhancement technique using interlaced histogram equalization (IHE) for improving target detection performance of EO/IR images. *17th intern. conf. on control, automation and systems: ICCAS 2017* (Jeju, South Korea, December 14, 2017): Proc. N.Y.: IEEE, 2018. DOI: [10.23919/iccas.2017.8204254](https://doi.org/10.23919/iccas.2017.8204254)
5. Kim B.H., Khan D., Bohak C., Woniu Choi, Hyun Yeong Lee, Kim M.J. V-RBNN based small drone detection in augmented datasets for 3D LADAR system. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 11, p. 3825. DOI: [10.3390/s1811382](https://doi.org/10.3390/s1811382)
6. Müller T. Robust drone detection for day/night counter-UAV with static VIS and SWIR cameras. *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2017, vol. 10190. P. 1019018. DOI: [10.1117/12.2262575](https://doi.org/10.1117/12.2262575)
7. Hornung A., Wurm K.M., Bennewitz M., Stachniss C., Burgard W. OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. *Autonomous Robots*, 2013, vol. 34, no. 3, pp. 189–206. DOI: [10.1007/s10514-012-9321-0](https://doi.org/10.1007/s10514-012-9321-0)
8. Chunyun Wang, Tian Wang, Ershen Wang, Enyan Sun, Zhen Luo. Flying small target detection for anti-UAV based on a Gaussian mixture model in a compressive sensing domain. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 9, p. 2168. DOI: [10.3390/s19092168](https://doi.org/10.3390/s19092168)
9. Klasing K., Wollherr D., Buss M. A clustering method for efficient segmentation of 3D laser data. *IEEE intern. conf. on robotics and automation: ICRA 2008* (Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008): Proc. N.Y.: IEEE, 2008. Pp. 4043-4048. DOI: [10.1109/ROBOT.2008.4543832](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543832)
10. Shaoqing Ren, Kaiming He, Girshick R., Jian Sun. Towards real-time object detection with region proposal networks. *Advances in neural information processing systems: Neural information processing systems conf.: NIPS 2015* (Montreal, Canada, December 7-12, 2015): Proc.

Red Hook: Curran Asss., 2016. Pp. 91-99. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1506.01497.pdf>, accessed 28.04.2020.

11. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, faster, stronger. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1612.08242.pdf>, accessed 28.04.2020.
12. Wei Liu, Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Cheng-Yang Fu, Berg A.C. SSD: Single shot MultiBox detector. *Computer vision: 14th Eur. conf. on computer vision: ECCV 2016* (Amsterdam, Netherlands, October 11-14, 2016): Proc. Pt.1. Cham: Springer, 2016. Pp. 21-37. DOI: [10.1007/978-3-319-46448-0_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2)
13. Xin Li, Yiming Zhou, Zheng Pan, Jiashi Feng. Partial order pruning: for best speed/accuracy trade-off in neural architecture search. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1903.03777.pdf>, accessed 28.04.2020.
14. Gkioxari G., Hariharan B., Girshick R., Malik J. R-CNNs for pose estimation and action detection. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1406.5212.pdf>, accessed 28.04.2020.
15. Lefcourt A.M., Siemens M.C., Rivadeneira P. Optical parameters for using visible-wavelength reflectance or fluorescence imaging to detect bird excrements in produce fields. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 4, p. 715. DOI: [10.3390/app9040715](https://doi.org/10.3390/app9040715)
16. Skvortsov L.A. *Lazernye metody distantsionnogo obnaruzheniia khimicheskikh soedinenij na poverkhnosti tel* [Laser methods for remote detection of chemical compounds on the surface of bodies]. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2015. 207 p. (in Russian).
17. Misra A.K., Acosta-Maeda T.E., Porter J.N., Berlanga G., Muchow D., Sharma S.K., Chee B. A two components approach for long range remote raman and laser-induced breakdown (LIBS) spectroscopy using low laser pulse energy. *Applied Spectroscopy*, 2019, vol. 73, no. 3, pp. 320–328. Available at: <https://www.osapublishing.org/as/abstract.cfm?uri=as-73-3-320>, accessed 28.04.2020.
18. Hugger S., Fuchs F., Jarvis J., Yang Q.K., Rattunde M., Ostendorf R., Schilling C., Driad R., Bronner W., Aidam R., Wagner J., Tybussek T., Rieblinger K. Quantum cascade laser based active hyperspectral imaging for standoff detection of chemicals on surfaces. *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2016, vol. 9755, p. 9755A. DOI: [10.1117/12.2210913](https://doi.org/10.1117/12.2210913)
19. Rayner T., Weida M., Pushkarsky M., Day T. Remote explosive and chemical agent detection using broadly tunable mid-infrared external cavity quantum cascade lasers. *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2007, vol. 6540, p. 65401Q. DOI: [10.1117/12.727700](https://doi.org/10.1117/12.727700)
20. Fufurin I.L., Tabalina A.S., Morozov A.N., Golyak I.S., Svetlichnyi S.I., Anfimov D.R., Kochikov I.V. Identification of substances from diffuse reflectance spectra of a broadband quantum cascade laser using Kramers–Kronig relations. *Optical Engineering*, 2020, vol. 59, no. 6, p. 061621. DOI: [10.1117/1.OE.59.6.061621](https://doi.org/10.1117/1.OE.59.6.061621)
21. Golyak I.S., Morozov A.N., Svetlichnyi S.I., Tabalina A.S., Fufurin I.L. Identification of chemical compounds by the reflected spectra in the range of 5.3–12.8 μm using a tunable quantum

cascade laser. *Russian J. of Physical Chemistry B*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 557-564.

DOI: [10.1134/S1990793119040055](https://doi.org/10.1134/S1990793119040055)

22. Fufurin I.L., Tabalina A.S., Morozov A.N., Golyak I.S., Svetlichnyi S.I. Causality relations in analysis of diffuse reflectance spectra obtained by infrared quantum cascade laser. *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2020, vol. 11441, p. 114410G.

DOI: [10.1117/12.2549554](https://doi.org/10.1117/12.2549554)