

Обнаружение световозвращающих объектов на основе поиска пространственных аномалий

С.М. Борзов¹, О.И. Потатуркин¹, С.Б. Узилов¹

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, Россия, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, д. 1

Аннотация

Данная работа посвящена исследованию методов обнаружения световозвращающих объектов, в т.ч. оптических и оптико-электронных приборов наблюдения, на основе поиска пространственных аномалий в изображениях, сформированных в системах лазерной импульсной локации. Разработаны алгоритмы и программно-аппаратные средства обнаружения световозвращающих объектов. При этом особое внимание уделено различным способам формирования разностных кадров при периодической подсветке, в т.ч. с предварительным замещением каждого пикселя фоновых изображений на максимальное значение по соответствующей окрестности. Продемонстрирована эффективность предложенных методов для обнаружения световозвращающих объектов в условиях интенсивного солнечного освещения, несмотря на наличие в поле зрения зеркальных и диффузных отражающих поверхностей.

Ключевые слова: дистанционное обнаружение световозвращающих объектов, формирование разностных изображений, поиск пространственных аномалий, лазерная локация.

Цитирование: Борзов, С.М. Обнаружение световозвращающих объектов на основе поиска пространственных аномалий / С.М. Борзов, О.И. Потатуркин, С.Б. Узилов // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 1. – С. 97-102. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-929.

Citation: Borzov SM, Potaturkin OI, Usilov SB. Detection of retroreflective objects based on search for spatial anomalies. Computer Optics 2022; 46(1): 97-102. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-929.

Введение

В последние десятилетия активное развитие получили теория и технические пути построения изображающих оптико-электронных систем лазерной локации, предназначенных для наблюдения дистанционных объектов при недостаточной естественной освещенности или в ночное время [1]. В частности, большое внимание уделяется специальному классу подобных систем, предназначенных для обнаружения световозвращающих объектов (СВО), таких как фото- и видеоаппаратура, оптические и оптико-электронные системы наблюдения, различного рода отражатели и т.п. [2].

Функционирование подобных систем основано на использовании эффекта световозвращения, возникающего при подсветке объектов указанных типов, в результате которого в поле зрения в координатах, соответствующих СВО, формируются светящиеся точки на фоне подстилающей поверхности, наблюдаемые только из позиции, близкой к позиции излучателя. Данный эффект хорошо известен под названием эффекта «красных глаз» и проявляется при проведении фотосъемки с использованием вспышки из-за отражения ее излучения от сетчатки глаза человека [3]. Для повышения эффективности обнаружения СВО на больших дистанциях осуществляется организация синхронной работы лазерного излучателя, используемого для подсветки сцены, и фотоприемного устройства (ФПУ) с быстродействующим затвором (лазерная импульсная локация – ЛИЛ). При этом под-

светка осуществляется короткими импульсами, а затвор ФПУ открывается на время, близкое к их длительности с задержкой (относительно срабатывания излучателя), равной времени распространения света до наблюдаемых объектов и обратно. За счет этого ФПУ воспринимает излучение, отраженное от объектов интереса, и отсекает свет, отраженный от объектов, находящихся ближе и дальше заданного расстояния.

В качестве затвора в устройствах, функционирующих на основе изложенного метода, как правило, применяется быстродействующий электрооптический преобразователь (ЭОП). Подробный обзор таких устройств представлен в [4]. Однако использование ЭОП приводит к усложнению их конструкции и снижению пространственного разрешения формируемых изображений контролируемой сцены. Альтернативным решением является реализация функции затвора с помощью специального алгоритма управления двухсекционным ПЗС-приёмником со строчным переносом [5]. Указанный подход реализован в аппаратно-программном комплексе [6, 7], назначением которого является проверка работоспособности ПЗС-матриц в составе активно-импульсных устройств обнаружения СВО без использования в его конструкции ЭОП или иного внешнего быстродействующего затвора.

Для эффективного решения задачи обнаружения и распознавания СВО в реальных условиях необходимо оснащение систем лазерной импульсной локации встроенными функциями обработки регистрируемых изображений, направленной на выделение фрагментов, потенциально содержащих объекты интереса [8].

Классические алгоритмы обнаружения СВО основаны на вычитании двух соседних – «активного» и «пассивного» – видеокadres с дальнейшей пороговой обработкой разностного кадра [9]. Однако, как отмечается в [10], в ситуациях, когда интенсивность отраженного от СВО излучения не превышает интенсивности «ложного», представленный алгоритм не обеспечивает правильную работу системы. Необходимо его усовершенствование. В частности, в [10] предлагается дополнительная селекция объектов по морфологическим признакам, например, их размеру и форме. С этой целью в разностных кадрах осуществляется вычисление адаптивных пороговых значений и формирование бинарных изображений, которые анализируются с применением морфологической обработки и сегментации. Однако при расположении световозвращающих объектов вблизи диффузных происходит их объединение, и выделить СВО при дальнейшей обработке становится невозможным, что затрудняет практическое применение такого метода.

Поэтому в данной работе для обнаружения СВО в поле наблюдения предлагается использовать метод, не применяющий бинаризацию изображений. Он основан на формировании описания фона для каждой сцены с последующим поиском фрагментов, параметры которых не соответствуют полученному описанию. Такой подход в литературе называется поиском аномалий [11], не требует выполнения предварительных процедур обучения и позволяет обнаруживать в поле зрения системы наблюдения нетипичные по определенным параметрам фрагменты на неоднородном фоне. Примерами работ с различными модификациями метода поиска аномалий являются [12–15].

Целью данной работы является разработка и экспериментальное исследование эффективности методов цифровой обработки данных систем лазерной импульсной локации, предназначенных для автоматического обнаружения СВО путем накопления сигналов с частотой импульсной подсветки и внутри- и межкадровой обработки регистрируемых изображений.

1. Программно-аппаратные средства

Для экспериментального исследования метода обнаружения СВО использован оптико-электронный (ОЭ) стенд, состоящий из каналов зондирования и синхронной регистрации изображений [16]. Первый из них обеспечивает освещение наблюдаемой сцены узкополосным импульсным лазерным излучением, а второй – формирование результирующих изображений. Управление стендом, а также визуализация и обработка полученных данных осуществляется на персональном компьютере с помощью специально разработанного для этих целей приложения.

При подсветке сцены часть излучения, отраженного от СВО, возвращается к источнику освещения, создавая световой отклик (блик) существенно большей интенсивности, чем при диффузном отражении

от прочих объектов. Локация может производиться как одночастотными импульсами, так и их серией с накоплением сигналов ПЗС-приемником ФПУ.

Стенд позволяет с высокой достоверностью обнаруживать СВО с малой световой апертурой на значительной дальности. В качестве примера на рис. 1 приведены изображения сцены, содержащей группу людей с фотокамерой (фокус объектива – 50 мм, значение диафрагмы – $f/16$), зарегистрированные стандартной ТВ-камерой и с помощью оптико-электронного стенда при 100 импульсах подсветки.

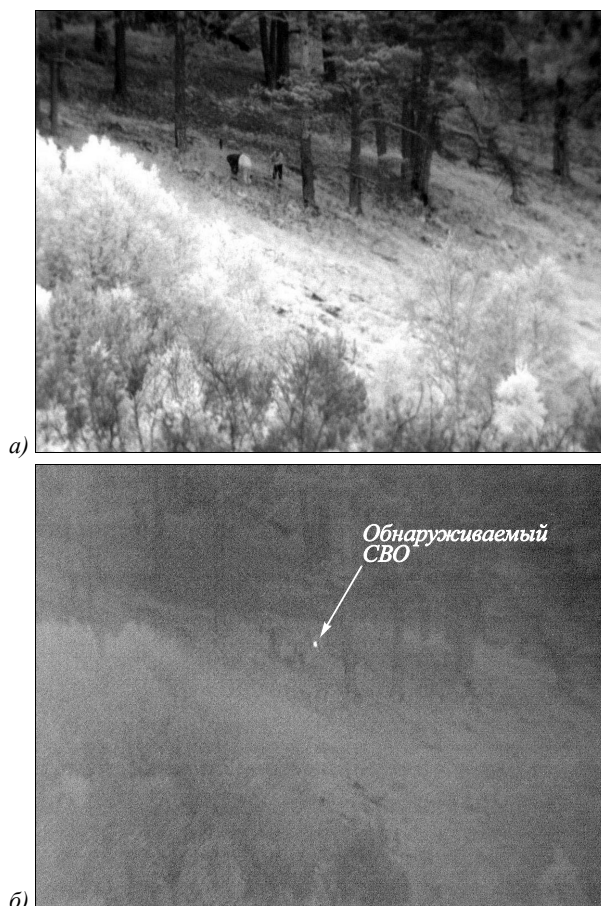


Рис. 1. Изображения сцены, зарегистрированные стандартной ТВ-камерой (а) и ОЭ-стендом (б)

Видно, что обнаружение СВО с таким малым показателем световозвращения в пассивном режиме (рис. 1а) практически невозможно, а в активно-импульсном режиме (рис. 1б) может быть выполнено безошибочно за счет существенного увеличения отношения сигнал/фон даже без применения дополнительной обработки изображений. Однако, как показала практика, при интенсивном солнечном освещении и наличии в поле зрения объектов искусственного происхождения задача существенно усложняется.

Для повышения эффективности обнаружения СВО в указанных условиях предложено применять периодическую подсветку сцены, а на этапе анализа данных осуществлять межкадровую обработку [17] регистрируемых изображений и поиск простран-

ственных аномалий по серии из $2n$ кадров последовательности, где n – количество кадров с подсветкой и без подсветки.

Межкадровая обработка предназначена для формирования разностных кадров и выполняется двумя способами. Первый реализуется простым попиксельным вычитанием i кадра с подсветкой $I_1(x, y; i)$ и i кадра без подсветки $I_0(x, y; i)$

$$I(x, y; i) = I_1(x, y; i) - I_0(x, y; i). \quad (1)$$

Второй предложено осуществлять путем предварительного замещения каждого пикселя изображения, полученного в отсутствие лазерной подсветки, на максимальное значение по его заданной окрестности ω , т.е. путем обработки, являющейся одним из примеров локального порядкового преобразования [18].

$$I(x, y; i) = I_1(x, y; i) - \max_{\omega} [I_0(x, y; i)]. \quad (2)$$

При этом размер окрестности ω должен соответствовать предполагаемому размеру изображений обнаруживаемых объектов, который определяется в первую очередь дальностью, являющейся заданной величиной для каждого изображения, регистрируемого системой ЛИЛ.

На заключительном этапе межкадровой обработки целесообразно выполнять усреднение серии полученных тем или иным способом разностных изображений

$$I(x, y) = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^n I(x, y; i). \quad (3)$$

Процедура поиска пространственных аномалий по сформированным разностным изображениям $I(x, y)$ включает:

- формирование пространственного распределения информативного сигнала

$$F(x, y) = \left(\frac{1}{N_{\omega}} \sum_{\omega} I(x + x_1, y + y_1) - \frac{1}{N_{\Omega}} \sum_{\Omega} I(x + x_1, y + y_1) \right) \cdot N_{\omega}, \quad (4)$$

где ω и Ω – центральная и периферийные зоны фрагмента, N_{ω} и N_{Ω} – количество пикселей в них соответственно, $x_1, y_1 \in \omega, \Omega$;

- определение локальных максимумов в полученном распределении $F(x, y)$ путем обработки скользящим окном ω

$$M(x, y) = \begin{cases} F(x, y), & \text{if } F(x, y) > \max_{\omega} (F(x + x_1, y + y_1)), \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \quad (5)$$

где $x_1, y_1 \in \omega$.

Далее в массиве $M(x, y)$ рассчитывается среднее μ и среднеквадратичное отклонение σ ненулевых значений, т.е. определяются типичные для данной

сцены параметры локальных максимумов (формируется описание класса «фон»), и с помощью пороговой обработки выделяются аномальные элементы массива $M(x, y)$

$$R(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } M(x, y) > \mu + k \cdot \sigma, \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (6)$$

где k – пороговый коэффициент, равный, как правило, 3 (может подбираться оператором в зависимости от условий наблюдения). Положение ненулевых элементов в бинарном массиве $R(x, y)$ соответствует координатам обнаруженных объектов на исходном изображении (x_i, y_i) .

2. Обнаружение СВО в сложных условиях

Для подтверждения перспективности предложенного метода обработки данных проведены экспериментальные исследования по обнаружению СВО в условиях интенсивного фонового излучения с применением периодической подсветки сериями импульсов и формированием разностных изображений. Измерения осуществлялись в дневное время при ярком солнечном излучении. На рис. 2 приведены изображения $I_1(x, y)$ и $I_0(x, y)$, зарегистрированные при наличии и отсутствии лазерной подсветки.

В поле зрения на различной дальности располагался ряд световозвращающих и зеркально отражающих объектов. Среди них два СВО, являющиеся целью обнаружения: телевизионная камера и дорожный знак со световозвращающим покрытием, расположенные на обочине на дальности 1800 м. На этой же дальности находились два объекта, зеркально отражающих солнечный свет в направлении регистрирующей системы (элементы автомобилей). Кроме того, на переднем и заднем планах сцены располагались еще несколько ярких объектов, в том числе с отражающим свет покрытием. Видно, что на данных изображениях обнаруживаемые объекты без выполнения специальной обработки трудно различимы.

На разностном изображении (рис. 3), сформированном без накопления согласно (1), (3) путем вычитания последовательных изображений, зарегистрированных при наличии и отсутствии лазерной подсветки ($n = 1$), также наблюдается большое количество откликов, обусловленных различными объектами. Наиболее характерные из них пронумерованы от 1 до 9. Здесь 1, 2 обусловлены ретроотражением от обнаруживаемых СВО, 3–7 – зеркальным отражением солнечного света (3 – от бампера стоящего рядом с обнаруживаемыми объектами автомобиля, 4 – от бампера автомобиля, движущегося во встречном направлении по проезжей части, 5 – от корпуса легкового автомобиля на малой дальности, 6, 7 – от катафотов легкового автомобиля на переднем плане), а 8, 9 – обусловлены диффузным отражением элементов корпуса грузового автомобиля на переднем плане.

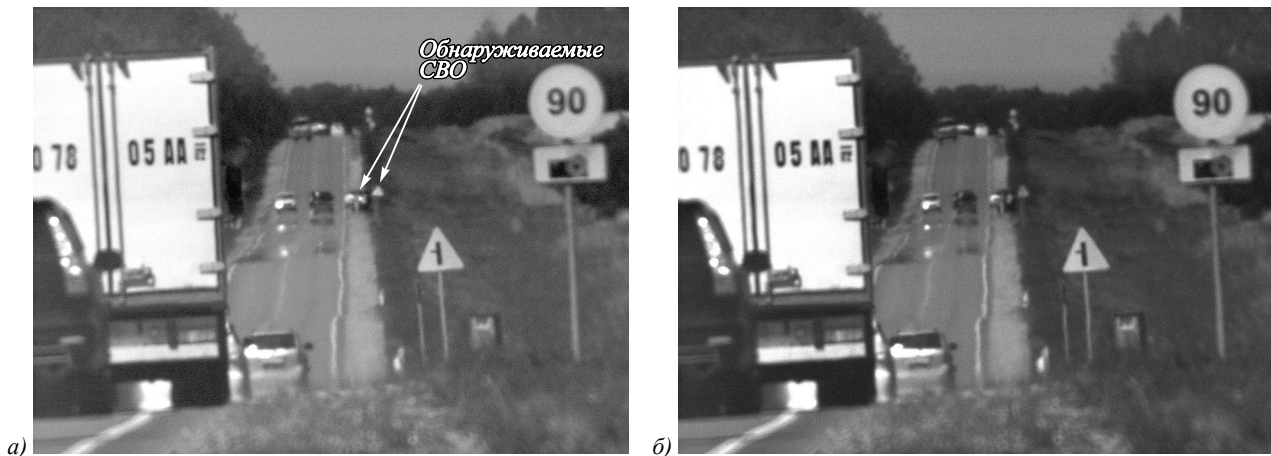


Рис. 2. Изображения дорожной обстановки, зарегистрированные при наличии (а) и отсутствии (б) лазерной подсветки

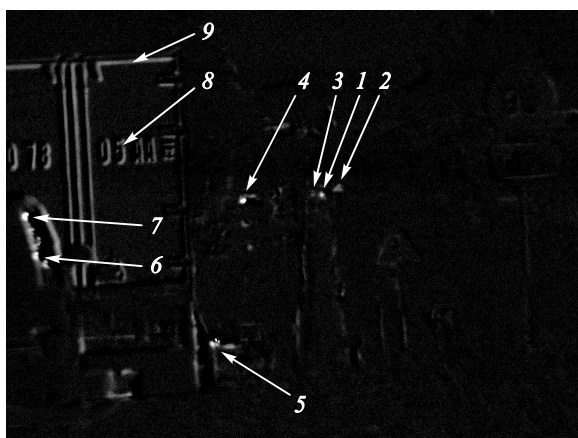


Рис. 3. Разностное изображение, сформированное из двух кадров, зарегистрированных при наличии и отсутствии лазерной подсветки

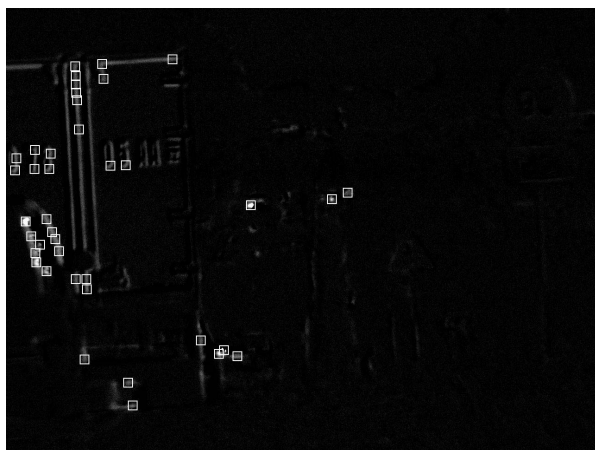


Рис. 4. Результат обнаружения по двум кадрам

Необходимо отметить, что выполнение межкадровой обработки сформированных изображений уже при использовании двух кадров приводит к подавлению сигналов, обусловленных отражением солнечного излучения от неподвижных объектов. Контраст же обнаруживаемых СВО, как и динамических объектов в отраженном солнечном излучении, при этом существенно возрастает. Выполнение процедур (4–6) в данных условиях приводит к выделению, помимо об-

наруживаемых, большого количества ложных объектов (показаны метками на рис. 4).

На рис. 5 приведены зависимости сигналов пяти первых объектов от номера кадра при периодической подсветке. Видно, что сигналы от СВО 1, 2 меньше, чем сигналы от остальных объектов, однако они коррелированы с подсветкой (через кадр), тогда как остальные с ней не связаны. Из этого следует целесообразность выделения СВО с помощью накопления разностных изображений, т.е. использования процедуры (3) при $n > 1$.

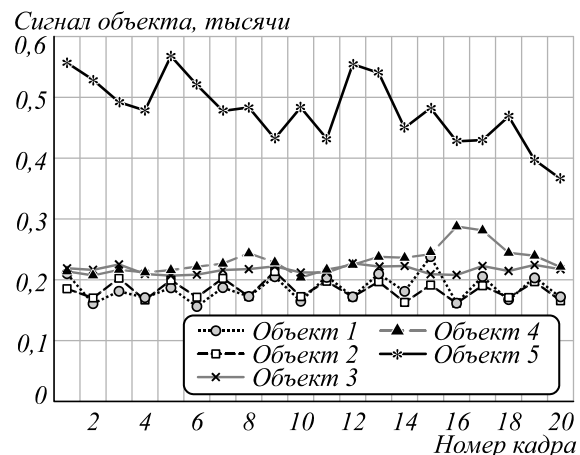


Рис. 5. Сигналы объектов от номера кадра

Разностное изображение $I(x, y)$, сформированное согласно (1), (3) из двадцати кадров ($n = 10$), и результат последующего обнаружения объектов приведены на рис. 6а. Его анализ показывает, что накопление большего количества кадров приводит к дальнейшему увеличению яркости сигналов, соответствующих обнаруживаемым СВО (по сравнению с сигналами статических и динамических объектов в отраженном солнечном излучении). Однако отдельные относительно медленные динамические объекты с большой яркостью, смещающиеся за время регистрации серии изображений не более чем на размер объекта, по-прежнему формируют достаточно интенсивные отклики (например, объект 5).

Для их подавления предложено использовать формирование разностных изображений с предварительным замещением каждого пикселя изображения, полученного в отсутствие лазерной подсветки, на максимальное значение по его заданной окрестности ω в соответствии с (2), (3). Такое разностное изображение, сформированное из двадцати кадров, и результат последующего обнаружения согласно (4–6) приведены на рис. 6б.

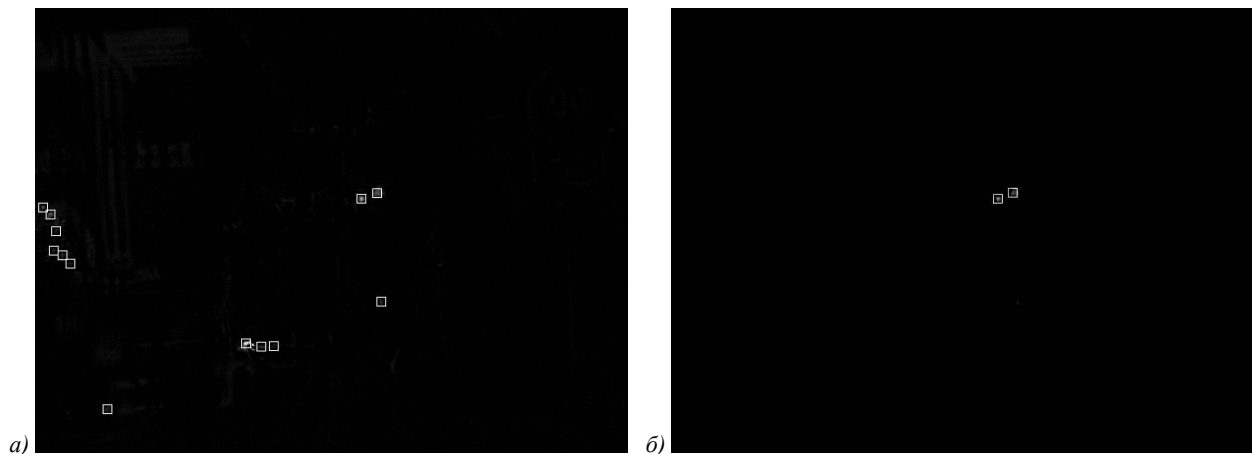


Рис. 6. Разностные изображения, накопленные по 20 кадрам, и результат обнаружения: при попиксельной обработке (а), при локальной обработке (б)

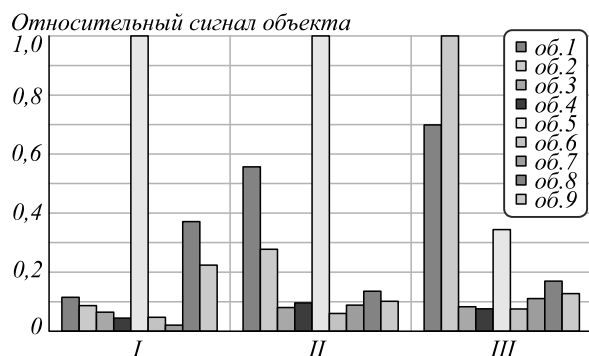


Рис. 7. Нормированные сигналы объектов при различных способах формирования разностного кадра

Полученные данные подтверждают, что накопление кадров с предварительным использованием процедуры определения максимального значения по окрестности в фоновом кадре позволяет дополнительно (в несколько раз) повысить относительный уровень сигналов обнаруживаемых объектов (1, 2) и исключить ошибки, связанные с выделением ярких объектов, имеющих незначительное смещение от кадра к кадру.

Заключение

Предложены алгоритмы и разработаны программно-аппаратные средства комплексной внутри- и межкадровой обработки последовательностей изображений для обнаружения световозвращающих объектов на основе поиска пространственно-временных аномалий с применением активно-импульсной локализации оптико-электронными средствами.

Нормированные сигналы 9 рассматриваемых объектов (1, 2 – обнаруживаемые СВО, 3–9 – прочие объекты) при выполнении трех вариантов формирования разностных изображений: I – в соответствии с (1), (3) при $n=1$; II – в соответствии с (1), (3) при $n=10$; III – в соответствии с (2), (3) при $n=10$; приведены в графическом виде на рис. 7.

Продемонстрирована их эффективность для селекции СВО в условиях интенсивного солнечного освещения при наличии в поле зрения зеркально и диффузно отражающих поверхностей, сигналы которых подавляются за счет применения предложенных методов цифровой обработки данных. Так, сигналы статических объектов подавляются путем попиксельного межкадрового вычитания, а динамических объектов – путем накопления разностных изображений.

Особо следует отметить способ формирования разностных кадров с предварительным замещением каждого пикселя фоновых изображений на максимальное значение по его окрестности. Его применение позволяет подавить сигналы относительно медленных ярких динамических объектов, смещающихся за время регистрации серии изображений не более чем на размер объекта.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию № 121022000116-0 в ИАиЭ СО РАН.

References

- [1] Fedorov BF. Lasers. Device basics and application [In Russian]. Moscow: "DOSAAF" Publisher; 1988.
- [2] Karasik VE, Orlov VM. Location laser vision systems [In Russian]. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University; 2013.
- [3] Krymov B, Vladin M, Lender S. Tutorial Adobe Photoshop CS3 [In Russian]. Moscow: "Triumph" Publisher; 2007.

- [4] Volkov VG. Night vision devices for detecting glare elements [In Russian]. *Specialnaya Tehnika* 2004; 2: 2-9.
- [5] Golitsyn AA, Seifi NA. Active-pulse method of observation using a CCD photodetector with a lowercase transfer [In Russian]. *Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedenii. Priborostroenie* 2017; 60(11): 1040-1047.
- [6] Alantiev DV, Golitsyn AA, Golitsyn AV, Seifi NA. Stand for the study of the possibility of using matrix photodetectors of the visible range as part of active-pulse observation devices [In Russian]. *Opticheskii Journal* 2018; 85(6) 53-57.
- [7] Golitsyn AA. Hardware-software system for exploring the possibility of application of CCD image sensors as part of gated-viewing systems. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2019; 55(5): 513-518.
- [8] Bokshansky VB, Vyazov MV, Litvinov IS, et al. Digital processing in optoelectronic systems: textbook [In Russian]. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University; 2017.
- [9] Bokshansky VB, Karasik VE, Taranov MA. Automatic detection of retroreflectors using laser location systems [In Russian]. *Vestnik MGTU Imeni NE Baumana. Seriya Priborostroenie* 2011; 83(2): 25-35.
- [10] Bokshansky VB, Tevun E, Vyazovih MV, Litvinov IS. The method of selection of the retroreflective objects from the diffuse same with the digital adaptive processing [In Russian]. *Engineering Journal: Science and Innovation* 2013; 9(21). Source: (<http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/910.html>). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-910.
- [11] Chandola V, Banerjee A, Kumar V. Anomaly detection : A survey. *ACM Comput Surv* 2009; 41(3), 15.
- [12] Denisova AYu, Myasnikov VV. Anomaly detection for hyperspectral imaginary. *Computer Optics* 2014; 38(2): 287-296. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-2-287-296.
- [13] Andriyanov NA, Vasilev KK, Dementev VE. Detection of anomalies on spatially inhomogeneous multi-zone images [In Russian]. *Sbornik Trudov III Mezhdunarodnoi Konferencii i Molodejnoi Shkoli «Informacionnie Tehnologii i Nanotehnologii» (ITNT-2017)*. Samara: "Novaya Tehnika" Publisher; 2017: 529-534.
- [14] Andriyanov NA, Gavrilina YuN. Investigation of the algorithm for detecting deterministic anomalies in complex structure images using a doubly stochastic model. *Ural Radio Engineering Journal* 2020; 4(1): 18-32. DOI: 10.15826/urej.2020.4.1.002.
- [15] Borzov SM. Detection of dynamic objects on the basis of space-time anomalies in video sequences. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2013; 49(1): 9-13.
- [16] Alantiev DV, Borzov SM, Kozik VI, Potaturkin OI, Uzilov SB, Yaminov KR. Experimental study of method of laser pulsed location for retroreflective objects detecting. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2021; 56(1): 103-111.
- [17] Kirichuk VS, Kosykh VP, Popov SA, Sinel'shechikov VV. Suppression of a quasi-stationary background in a sequence of images by means of interframe processing. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2014; 50(2): 109-117.
- [18] Myasnikov VV. A local order transform of digital images. *Computer Optics* 2015; 39(3): 397-405. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-397-405.

Сведения об авторах

Борзов Сергей Михайлович, кандидат технических наук, 1961 года рождения, в 1983 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Автоматизация физико-технических исследований», работает заведующим лабораторией в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматизации и электротехники СО РАН. Область научных интересов: цифровая обработка изображений, обработка данных дистанционного зондирования Земли. E-mail: borzov@iae.nsk.su.

Потатуркин Олег Иосифович, доктор технических наук, профессор, 1947 года рождения, в 1970 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Квантовая оптика», работает главным научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматизации и электротехники СО РАН. Область научных интересов: геоинформационные системы, дистанционное зондирования Земли, обработка и анализ многоспектральных изображений, распознавание образов, терагерцовая спектроскопия, физическая оптика. E-mail: potaturkin@iae.nsk.su.

Узилев Сергей Борисович, 1987 года рождения, в 2013 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Информационно-измерительные системы», работает ведущим инженером-программистом лаборатории Информационной оптики в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматизации и электротехники СО РАН. Область научных интересов: цифровая обработка изображений, обработка данных дистанционного зондирования Земли. E-mail: usilov@gmail.com.

ГРНТИ: 28.23.15

Поступила в редакцию 31 мая 2021 г. Окончательный вариант – 30 августа 2020 г.

Detection of retroreflective objects based on search for spatial anomalies

S.M. Borzov¹, O.I. Potaturkin¹, S.B. Usilov¹

¹ Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Novosibirsk, Russia, Academician Koptyug ave. 1

Abstract

This work is devoted to the study of methods for detecting retroreflective objects, including optical and optoelectronic observation devices, based on the search for spatial anomalies in images formed in pulsed laser ranging systems. Algorithms, software and hardware for detecting retroreflective objects have been developed. At the same time, special attention is paid to various ways of forming difference frames with periodic illumination, including with the preliminary replacement of each pixel of the background images by the maximum value for the corresponding neighborhood. The effectiveness of the proposed methods for detecting retroreflective objects exposed to bright sunlight, despite the presence of (mirror and diffuse) reflecting surfaces in the field of view, is demonstrated.

Keywords: remote detection of retroreflective objects, formation of difference images, search for spatial anomalies, laser ranging.

Citation: Borzov SM, Potaturkin OI, Usilov SB. Detection of retroreflective objects based on search for spatial anomalies. *Computer Optics* 2022; 46(1): 97-102. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-929.

Acknowledgements: This work was financially supported by the RF Ministry of Science and Higher Education within the government project No. 121022000116-0 of the IA&E SB RAS.

Authors' information

Sergey Mihaylovich Borzov (b. 1961) graduated from Novosibirsk State University in 1983, majoring in Automation of Physico-Technical researches. Candidate of Technical Science. Currently he works as the head of laboratory at the Institute of Automation and Electrometry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests are digital processing of images, data processing of remote sensing. E-mail: borzov@iae.nsk.su.

Oleg Iosifovich Potaturkin (b. 1947) graduated from Novosibirsk State University in 1970, majoring in Quantum Optics. Doctor of Technical Science, Professor. Currently he works as the main researcher at the Institute of Automation and Electrometry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests are GIS, digital processing of images, data processing of remote sensing, images recognition, spectroscopy, physical optics. E-mail: potaturkin@iae.nsk.su.

Sergey Borisovich Usilov (b. 1987) graduated from Novosibirsk State University in 2013, majoring in Information and Measurement Systems. Currently he works as a leading software engineer at the Institute of Automation and Electrometry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests are digital processing of images, data processing of remote sensing. E-mail: usilov@gmail.com.

Received May 31, 2021. The final version – August 30, 2021.
