

УДК 681.78

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЛОКАЦИИ СВЕТОВОЗВРАЩАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

© Д. В. Алантьев<sup>1,2</sup>, С. М. Борзов<sup>1</sup>, В. И. Козик<sup>1</sup>, О. И. Потатуркин<sup>1</sup>,  
С. Б. Узилов<sup>1</sup>, К. Р. Яминов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1*

<sup>2</sup>*Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1  
E-mail: borzov@iae.nsk.su,  
potaturkin@iae.nsk.su*

Исследован метод лазерной импульсной локации применительно к задаче обнаружения световозвращающих объектов, в том числе оптических и оптико-электронных приборов наблюдения. С использованием созданного мобильного специализированного аппаратно-программного стенда экспериментально определены показатели световозвращения типичных приборов видеосъёмки в реальных условиях. Продемонстрирована эффективность применения периодической подсветки, накопления кадров и формирования разностных изображений для обнаружения объектов в условиях интенсивного солнечного освещения.

*Ключевые слова:* обнаружение световозвращающих объектов, лазерная импульсная локация, показатель световозвращения, обработка изображений.

DOI: 10.15372/AUT20210111

**Введение.** Во многих научных и практических приложениях для обнаружения световозвращающих объектов (СВО), таких как фотоприёмные устройства (ФПУ), а также объектов с широкой диаграммой направленности целесообразно применять метод лазерной импульсной локации (ЛИЛ) по бликам зондирующего излучения, отражённого в сторону наблюдателя. Общая теория и технические пути построения изображающих оптико-электронных систем лазерной локации, предназначенных для наблюдения дистанционных объектов при недостаточной естественной освещённости или в ночное время, рассмотрены в [1]. В представленной работе значительное внимание уделено специальному классу подобных систем, предназначенных для обнаружения СВО.

Суть метода лазерной импульсной локации заключается в организации синхронной работы лазерного излучателя, используемого для подсветки сцены, и ФПУ с быстродействующим затвором. Причём подсветка 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 счёт этого ФПУ воспринимает излучение, отражённое от объектов интереса, и отсекает свет, отражённый от объектов, находящихся ближе и дальше заданного расстояния (например, от частиц пыли, тумана и т. п.). Регистрируемые изображения несут информацию о наличии в поле наблюдения светоотражающих элементов.

Функцию затвора в устройствах, функционирующих на основе метода ЛИЛ, как правило, выполняет быстродействующий электрооптический преобразователь (ЭОП). Подробный обзор таких устройств представлен в [2]. Однако использование ЭОП приводит к усложнению их конструкции и снижению пространственного разрешения форми-

руемых изображений контролируемой сцены. Альтернативным решением является реализация функции затвора с помощью специального алгоритма управления прибором с зарядовой связью (ПЗС-приёмником) со строчно-кадровым переносом [3].

Указанный подход реализован в аппаратно-программном комплексе [4, 5], назначением которого является проверка работоспособности ПЗС-матриц в составе активно-импульсных устройств обнаружения СВО без использования в его конструкции электронно-оптического преобразователя или иного внешнего быстродействующего затвора. Комплекс позволяет управлять серийной ПЗС-матрицей с помощью сигналов произвольной формы, синхронизировать её работу с лазерным излучателем, получать изображение, производить его цифровую обработку и передавать изображение на внешние устройства. Разработанный аппаратно-программный комплекс даёт возможность выявить эффективный способ управления ПЗС-приёмниками со строчно-кадровым переносом, позволяющий использовать их в составе активно-импульсных устройств обнаружения СВО без ЭОП.

Эффективность метода лазерной импульсной локации во многом определяется отражательными характеристиками обнаруживаемых объектов, экспериментальному исследованию которых в последнее время уделяется большое внимание. Для этого необходимо соответствующее специализированное оборудование, предназначенное для отработки эффективных обнаружителей СВО. В частности, в [6] приведено описание экспериментальной лабораторной установки для исследования основных отражательных характеристик: показателя световозвращения (ПСВ), индикатрисы ретроотражённого излучения, пеленгационной характеристики. Отмечено, что наиболее важной характеристикой является ПСВ, поэтому особый интерес в настоящее время проявляется к усовершенствованию методов и аппаратуры для его измерения.

Целью данной работы является экспериментальное исследование метода лазерной импульсной локации и определение световозвращающих характеристик объектов с использованием зондирования импульсным лазерным излучением, накопления сигналов с частотой импульсной подсветки и обработки регистрируемых изображений.

**Мобильный аппаратно-программный стенд для исследования метода лазерной импульсной локации.** Для экспериментального исследования метода ЛИЛ и определения световозвращающих характеристик объектов разработан и создан специализированный аппаратно-программный стенд. Он состоит из оптико-электронного канала импульсного лазерного зондирования и канала синхронной регистрации и обработки изображений. Канал импульсного лазерного зондирования обеспечивает освещение наблюдаемой сцены узкополосным импульсным лазерным излучением (длительность импульса 150 нс, частота импульсов 6,6 кГц). Канал регистрации и обработки изображений состоит из узкополосного интерференционного фильтра, проецирующего объектива, модуля ПЗС-приёмника и модуля электронной цифровой обработки. Объектив оборудован трансфокатором и автоматической диафрагмой (формат 1/3", максимальная диафрагма  $f/1,8$ , фокусные расстояния 5,5–187,0 мм, угол обзора 47–1,5°). Модуль ПЗС-приёмника и модуль электронной обработки созданы на базе ПЗС марки ICX445ALA. Модуль ПЗС-приёмника включает в себя собственно ПЗС-матрицу (с буферизацией столбцов, прогрессивной развёрткой диагональю 6 мм, количеством активных пикселей  $1280 \times 960$ , пикселем размера  $3,75 \times 3,75$  мкм), а также ПЗС-процессор, источники питания и некоторые вспомогательные элементы. Модуль электронной обработки содержит программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), сигнальный процессор, элементы памяти, источники питания и элементы постоянной памяти, в которых хранятся программы ПЛИС и сигнального процессора. Управление стендом, а также визуализация и обработка регистрируемых изображений осуществляется на персональном компьютере через специально разработанное для этих целей приложение.

При подсветке сцены часть излучения, отражённого от СВО, возвращается к источнику освещения, создавая световой отклик (блик) существенно больший, чем при диффузном отражении от прочих объектов. Локация может производиться как одночастотными импульсами, так и их серией. Для повышения эффективности обнаружения предложено использовать:

— синхронизацию электронного затвора ПЗС с временем прихода отражённого излучения от СВО, что позволяет уменьшить фоновую составляющую путём режекции излучения, отражённого от объектов на другой дальности;

— накопление сигнала от серии импульсов отражённого излучения за счёт использования области хранения и считывания ПЗС-приёмника и особого способа управления переносом накапливаемых зарядов, что эквивалентно увеличению времени экспозиции и даёт возможность повысить уровень сигнала;

— узкополосный спектральный фильтр, согласованный со спектром излучения зондирующего лазера, что позволяет уменьшить фоновую составляющую, связанную с посторонними источниками излучения;

— периодическую подсветку с формированием фоновых кадров при отсутствии подсветки и их вычитанием из изображений, зарегистрированных при включённой подсветке, что даёт возможность уменьшить стационарную фоновую составляющую, связанную с посторонними источниками излучения.

Архитектура стенда позволяет вести приём и обработку информации в режиме реального времени. Обнаружение СВО в поле зрения осуществляется путём межкадровой обработки [7] и поиска пространственных аномалий [8] по серии из  $n$  12-разрядных кадров последовательности. Отметим, что  $n = n_1 + n_0$ , где  $n_1$  — количество кадров с подсветкой лазерным излучением,  $n_0$  — количество кадров без подсветки, при этом допустимы режимы работы, когда  $n_0 = 0$ .

Алгоритм обработки данных включает:

1. Формирование усреднённого изображения с подсветкой:

$$I_1(x, y) = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} I_1(x, y; i), \quad (1)$$

где  $I_1(x, y; i)$  —  $i$ -кадр с подсветкой.

2. Формирование фонового кадра путём усреднения исходных изображений без подсветки:

$$I_0(x, y) = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} I_0(x, y; i), \quad (2)$$

где  $I_0(x, y; i)$  —  $i$ -кадр без подсветки.

3. Формирование разностного изображения:

$$I(x, y) = |I_1(x, y) - I_0(x, y)|. \quad (3)$$

4. Световозвращающие объекты в разностном изображении  $I(x, y)$  характеризуются несколькими яркими информативными пикселями, расположенными в центральной зоне соответствующих фрагментов и превышающими более однородный уровень фоновых пикселей на их периферии. Поскольку примерные размеры этих зон, как правило, известны в качестве критерия наличия в центре некоторого фрагмента СВО, целесообразно использовать информативный сигнал

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

где  $\omega$  и  $\Omega$  — центральная и периферийная зоны фрагмента,  $N_\omega$  и  $N_\Omega$  — количество пикселей в них, соответственно  $x_1, y_1 \in \omega, \Omega$ .

5. В полученном двумерном массиве  $F(x, y)$  в результате пороговой обработки скользящим окном  $\omega$  определяется массив локальных максимумов

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

где  $x_1, y_1 \in \omega$ .

6. В массиве  $M(x, y)$  рассчитываются среднее  $\mu$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  ненулевых значений, т. е. находятся типичные для данной сцены параметры локальных максимумов (формируется описание класса «фон»). Далее с помощью пороговой обработки определяются аномальные элементы массива  $M(x, y)$ :

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

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  $(x_j, y_j)$ , в которых определяются значения информативных сигналов объектов  $F(x_j, y_j)$ .

**Измерение показателя световозвращения.** В данной работе использован метод измерения ПСВ с помощью виртуальных измерительных диафрагм, предложенный в [9]. Известно, что показатель световозвращения объекта в некотором направлении распространения ретроотражённого излучения представляет собой следующее отношение:

$$R(\varphi, \alpha) = \frac{I(\varphi, \alpha)}{E} \left[ \frac{\text{м}^2}{\text{ср}} \right],$$

где  $I(\varphi, \alpha)$  — энергетическая сила света, отражённого от объекта, т. е. индикатриса отражения;  $\varphi, \alpha$  — углы, характеризующие направление индикатрисы отражения от оси;  $E$  — энергетическая освещённость плоскости СВО.

При дистанционных измерениях значения ПСВ усредняются по телесному углу

$$\Theta = \pi \left( \frac{D}{2L} \right)^2,$$

где  $D$  — диаметр входного зрачка приёмной системы,  $L$  — расстояние от излучателя до объекта, на практике

$$\bar{R} = \frac{1}{E\Theta} \int_{\Theta} I(\varphi, \alpha) d\varphi d\alpha = \frac{\bar{I}}{E}.$$

Сферическое зеркало может служить эталонным отражателем, так как его ПСВ рассчитывается по формуле

$$R_{\text{эТ}} = \rho r_{\text{эТ}}^2 / 4, \quad (7)$$

где  $\rho$  — коэффициент отражения по интенсивности от поверхности сферы;  $r_{\text{эТ}}$  — радиус образующей сферы. Принимая  $\rho = 0,96$  и  $r_{\text{эТ}} = 800$  мм для используемого в экспериментах зеркала, получаем согласно (7)  $R_{\text{эТ}} = 0,154 \text{ м}^2/\text{ср}$ .



Рис. 1. Одно из изображений  $I_1(x, y)$ , зарегистрированное при определении ПСВ объектов

Таблица 1

Результаты определения ПСВ объектов

Объект	Информативные сигналы объектов			ПСВ объектов		
	1	2	3	1	2	3
Зеркало	24624	22032	23328	0,154	0,154	0,154
Камера	1904	1428	1666	0,012	0,010	0,011
Модель камеры (диафрагма)	253440 (f/2,0)	104940 (f/2,8)	27720 (f/5,6)	1,544 (f/2,0)	0,714 (f/2,8)	0,178 (f/5,6)

Расчёт ПСВ объекта осуществляется по экспериментальным данным с помощью формулы

$$R_{об} = F_{об}^{изм} R_{эт} / F_{эт}^{изм}, \tag{8}$$

где  $F_{об}^{изм}$  и  $F_{эт}^{изм}$  — рассчитанные по выражению (4) информативные сигналы от объекта и от эталонного отражателя.

В данных экспериментах использовались три СВО: сферическое зеркало с радиусом кривизны 800 мм, модель камеры с объективом Computar  $f = 50$  мм и диафрагмой (f/1,3–f/16) и камера на базе объектива Computar  $f = 24$  мм с диафрагмой f/2,0 (камера). Модель камеры содержит объектив и закреплённую в его фокальной плоскости световозвращающую плёнку, что обеспечивает максимально возможный ПСВ для устройств на основе используемого объектива. Отметим, что эти параметры типичны для портативных оптико-электронных устройств, применяемых для наблюдения и видеосъёмки в реальных условиях. На рис. 1 приведено одно из изображений  $I_1(x, y)$ , зарегистрированное при диафрагме объектива модели камеры f/2,0.

Определение ПСВ проводилось тремя сериями, при этом параметры двух объектов были неизменными, а для модели камеры менялись значения диафрагмы объектива (f/2,0; f/2,8; f/5,6). Численные значения информативных сигналов объектов  $F(x_j, y_j)$  и рассчитанные на их основе в соответствии с (8) ПСВ приведены в табл. 1.

Имеющийся разброс сигналов между сериями обусловлен существующей временной нестабильностью измерений. Однако это практически не влияет на расчёт ПСВ, поскольку вычисления выполняются независимо по каждой серии экспериментальных данных от-

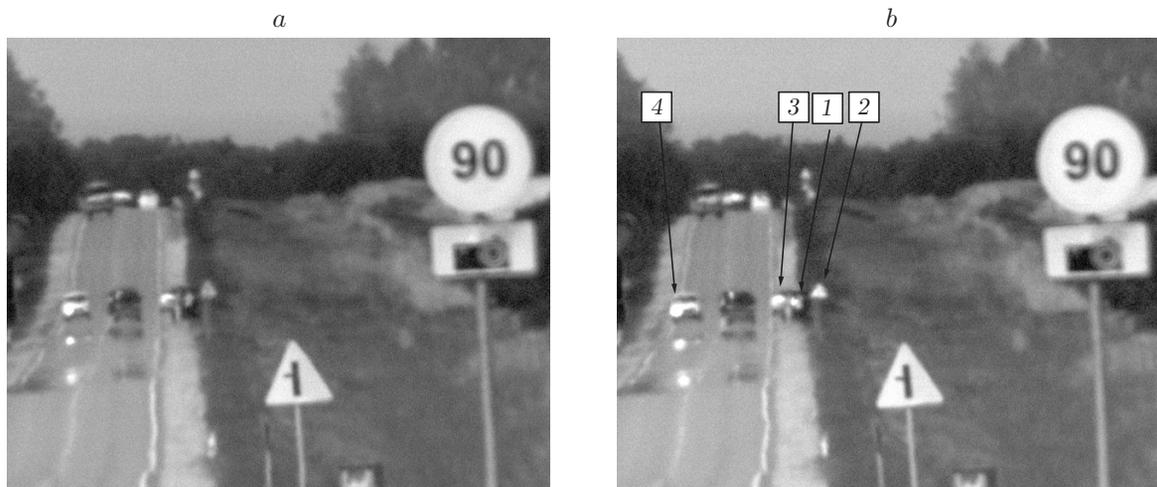


Рис. 2. Зарегистрированные изображения: при отсутствии (а) и наличии (b) лазерной подсветки

дельно. Принципиально важно, что зависимость полученных ПСВ от значения диафрагмы объектива модели камеры хорошо согласуется с квадратичной.

**Повышение эффективности обнаружения СВО за счёт применения периодической подсветки.** Для подтверждения перспективности применения периодической подсветки сериями импульсов (с формированием фонового кадра  $I_0(x, y)$  при отсутствии подсветки и его вычитанием из изображения  $I_1(x, y)$ , зарегистрированного при включённой подсветке) проведены экспериментальные исследования по обнаружению СВО в условиях интенсивного фонового излучения. Измерения осуществлялись в дневное время при ярком солнечном излучении. В поле зрения на различной дальности располагался ряд световозвращающих и зеркально отражающих объектов — два СВО, являющиеся целью обнаружения: телевизионная камера и дорожный знак со световозвращающим покрытием, расположенные на обочине на дальности порядка 1 км. На этой же дальности находились два объекта, зеркально отражающие солнечный свет в направлении регистрирующей системы (элементы автомобилей). Кроме того, на переднем и заднем планах сцены присутствовало ещё несколько объектов с отражающим свет покрытием (дорожные знаки).

На рис. 2 приведены изображения  $I_0(x, y)$  и  $I_1(x, y)$ , содержащие указанные объекты, зарегистрированные при отсутствии и наличии лазерной подсветки.

На данных изображениях обнаруживаемые СВО без выполнения специальной обработки трудно различимы. Кроме них, на проезжей части и на обочине наблюдалось ещё несколько объектов, интенсивно отражающих солнечное излучение.

С помощью предложенного алгоритма обнаружения по одиночному изображению, зарегистрированному при наличии лазерной подсветки ( $n = n_1 = 1, n_0 = 0$ ), выделены четыре объекта (рис. 2, b, 1–4): 1, 2 — обнаруживаемые СВО, 3 — бампер стоящего рядом с ними автомобиля, 4 — бампер автомобиля, движущегося во встречном направлении по проезжей части.

На рис. 3 приведены зависимости информативных сигналов обнаруженных объектов  $F(x_j, y_j)$  от номера кадра при периодической подсветке. В данном случае эти значения рассчитывались для каждого кадра отдельно, т. е. при  $n_1 = 1, n_0 = 0$  — нечётные кадры и  $n_1 = 0, n_0 = 1$  — чётные.

Видно, что сигналы от объектов 1 и 2 коррелированы с подсветкой, тогда как остальные с ней не связаны. Из этого следует целесообразность их выделения с помощью межкадровой обработки (формирования разностных изображений с накоплением).

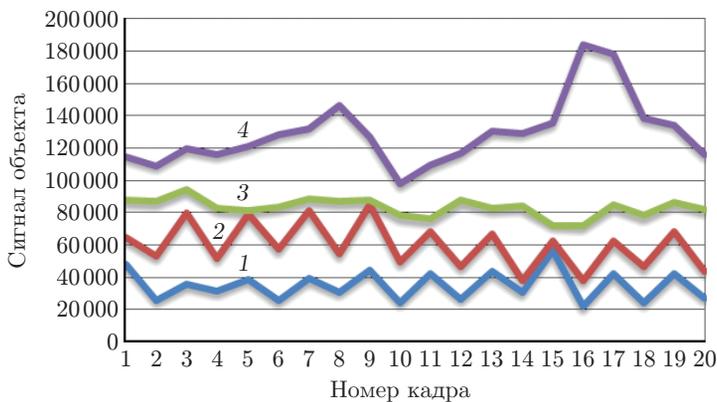


Рис. 3. Зависимости сигналов объектов от номера кадра



Рис. 4. Разностные изображения, накопленные по 2, 8 и 20 телевизионным кадрам

Разностные изображения  $I(x, y)$ , сформированные согласно (3) из 2, 8, 20 кадров, представлены на рис. 4. Их анализ показывает, что выполнение межкадровой обработки уже при использовании двух кадров приводит к подавлению сигналов от дорожных знаков и других объектов, расположенных на дальности большей и меньшей, чем дальность измерения. Контраст же обнаруживаемых СВО при этом существенно возрастает. Накопление большего количества кадров приводит к дальнейшему увеличению яркости сигналов, соответствующих обнаруживаемым СВО (относительно статических и динамических объектов в отражённом солнечном излучении).

Количественно эффективность обнаружения каждого объекта оценивалась на основе соотношения максимальных значений  $F(x, y)$  (информативные сигналы объектов) в областях  $S$  и  $B$ , соответствующих данному и наиболее яркому (на исходных изображениях) объектам:

$$r = \frac{\max_S(F(x, y))}{\max_B(F(x, y))}. \quad (9)$$

Результаты расчёта эффективности обнаружения рассматриваемых объектов при выполнении различных вариантов обработки приведены в табл. 2.

Представленные данные подтверждают, что применение процедуры накопления кадров позволило дополнительно на порядок повысить относительный сигнал от обнаруживаемых объектов.

Таблица 2

Оценка эффективности обнаружения объектов (сигналы объектов относительно объекта № 4 на рис. 4)

Номер объекта	Без вычитания	2 кадра	8 кадров	20 кадров
1	0,38	0,76	6,80	9,23
2	0,62	1,27	7,80	13,23
3	0,68	0,27	1,00	1,09
4	1,00	1,00	1,00	1,00

**Заключение.** В ходе работы создан специализированный мобильный оптико-электронный стенд для исследования метода активно-импульсной локации и определения световозвращающих характеристик объектов в реальных условиях. Предложены алгоритмы и разработаны программно-аппаратные средства комплексной внутри- и межкадровой обработки последовательности изображений для обнаружения световозвращающих объектов на основе поиска пространственно-временных аномалий.

Экспериментально определены показатели световозвращения для портативных оптико-электронных устройств, предназначенных для наблюдения и видеосъёмки натуральных сцен. Показано, что значения их ПСВ могут изменяться в широком диапазоне от 1,5 до 0,01 м<sup>2</sup>/ср, при этом, что принципиально важно, зависимость ПСВ от значений диафрагмы хорошо согласуется с квадратичной.

В реальных условиях продемонстрирована эффективность предложенного метода обнаружения оптико-электронных приборов с ФПУ и объектов со специальным покрытием. Использование периодической подсветки с формированием и накоплением разностных кадров позволяет более чем на порядок повысить эффективность обнаружения СВО при наличии интенсивного фонового освещения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасик В. Е., Орлов В. М. Локационные лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ, 2013. 478 с.
2. Волков В. Г. Приборы ночного видения для обнаружения бликующих элементов // Специальная техника. 2004. № 2. С. 2–9.
3. Голицын А. А., Сейфи Н. А. Активно-импульсный метод наблюдения с использованием ПЗС-фотоприёмника со строчным переносом // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 2017. 60, № 11. С. 1040–1047.
4. Алантьев Д. В., Голицын А. А., Голицын А. В., Сейфи Н. А. Стенд для исследования возможности использования матричных фотоприёмников видимого диапазона в составе активно-импульсных приборов наблюдения // Оптический журнал. 2018. 85, № 6. С. 53–57.
5. Голицын А. А. Аппаратно-программный комплекс для исследования возможностей применения ПЗС-фотоприёмников в составе активно-импульсных систем наблюдения // Автометрия. 2019. 55, № 5. С. 107–114. DOI: 10.15372/AUT20190515.
6. Барышников Н. В., Карасик В. Е. Лабораторные исследования пространственно-частотных характеристик оптических световозвращающих систем // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 1998. Спец. выпуск “Лазерные и оптико-электронные приборы и системы”. С. 11–15.
7. Киричук В. С., Косых В. П., Попов С. А., Синельщиков В. В. Подавление квазистационарного фона в последовательности изображений посредством межкадровой обработки // Автометрия. 2014. 50, № 2. С. 3–13.

8. **Борзов С. М.** Обнаружение динамических объектов по пространственно-временным аномалиям в видеопоследовательностях // Автометрия. 2013. **49**, № 1. С. 11–17.
9. **Барышников Н. В., Бокшанский В. Б., Животовский И. В.** Автоматизация измерений световозвращательных характеристик // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2004. № 2. С. 27–35.

*Поступила в редакцию 25.09.2020*

*После доработки 08.10.2020*

*Принята к публикации 19.10.2020*

---