

**МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧИЙ В ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ
ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ ГЛУБИН
АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ****И. Д. Мусихин^{1*}, В. В. Капустин¹, А. Мовчан¹, С. А. Забуга¹, Е. С. Познахарев²**¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия² Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,
Томск, Россия* ilia.d.musikhin@tusur.ru

Аннотация. Рассмотрено влияние отражательной способности объектов на точность построения нормированной карты глубин пространства с использованием активно-импульсной телевизионной измерительной системы. Приведены краткие сведения о системе, ее устройстве, принципах измерения дальности и построения карт глубин с ее помощью. В качестве материала для исследования взяты восемь видеофайлов, которые получены в результате проведения экспериментальных исследований в большой аэрозольной камере при использовании активно-импульсной телевизионной измерительной системы в режиме многозонного измерения дальности и многозонного измерения дальности с модуляцией. Предложен метод вычитания коэффициентов, обеспечивающий устранение расхождения значений относительной яркости на нормированной карте глубин между темными и светлыми объектами, находящимися на одном расстоянии от системы. Метод экспериментально апробирован. Выполнено сравнение предложенного метода и метода вычитания темного кадра по критерию минимизации среднеквадратического отклонения измеренной глубины между темными и светлыми объектами. В результате применения обоих методов достигнуто уменьшение среднеквадратического отклонения от 1,3 до 20 раз в зависимости от примененного метода минимизации и метода измерения дальности, используемого в системе. Метод вычитания коэффициентов может быть использован только в процессе постобработки, однако он показывает лучшие результаты, по сравнению с методом вычитания темного кадра, который может быть использован в режиме реального времени.

Ключевые слова: отражательная способность объектов, активно-импульсная телевизионная измерительная система, нормированная карта глубин, метод вычитания коэффициентов, метод вычитания темного кадра

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУР.

Ссылка для цитирования: Мусихин И. Д., Капустин В. В., Мовчан А., Забуга С. А., Познахарев Е. С. Методы компенсации влияния различий в отражательной способности объектов для повышения точности построения карт глубин активно-импульсной телевизионной измерительной системой // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 8. С. 713–721. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-713-721.

**METHODS OF COMPENSATING FOR THE INFLUENCE OF DIFFERENCES IN THE REFLECTIVITY
OF OBJECTS TO IMPROVE THE ACCURACY OF CONSTRUCTING DEPTH MAPS USING AN ACTIVE-PULSE
TELEVISION MEASURING SYSTEM****I. D. Musikhin^{1*}, V. V. Kapustin¹, A. Movchan¹, S. A. Zabuga¹, E. S. Poznakharev²**¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia² V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the RAS, Siberian Branch, Tomsk, Russia* ilia.d.musikhin@tusur.ru

Abstract. The influence of the reflectivity of objects on the accuracy of constructing a normalized depth map of space using an active-pulse television measuring system is considered. Brief information about the system, its structure, principles of measuring range and constructing depth maps with its help is given. Eight video files obtained as a result of experimental studies in a large aerosol chamber using an active-pulse television measuring system in the multi-zone range measurement mode and multi-zone range measurement with modulation are taken as material for the study. A method for subtracting coefficients is proposed, which ensures the elimination of the discrepancy in the relative brightness values on the normalized depth map between dark and light objects located at the same distance from the system. The method is experimentally tested. A comparison of the proposed method and the method of subtracting a dark frame is performed according to the criterion of minimizing the root-mean-square deviation of the depth measurement between dark and light objects. As a result of applying both methods, the mean square deviation was reduced by 1.3 to

20 times, depending on the minimization method and the range measurement method used in the system. The coefficient subtraction method can only be used in post-processing, but it shows better results than the dark frame subtraction method, which can be used in real time.

Keywords: reflectivity of objects, active pulse television measuring system, normalized depth map, coefficient subtraction method, dark frame subtraction method

Acknowledgment: This work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 21-79-10200 to TUSUR.

For citation: Musikhin I. D., Kapustin V. V., Movchan A., Zabuga S. A., Poznakharev E. S. Methods of compensating for the influence of differences in the reflectivity of objects to improve the accuracy of constructing depth maps using an active-pulse television measuring system. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 8. P. 713–721 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-713-721.

Введение. В промышленности [1–3], игровой индустрии [4, 5], навигации [6–8], при создании 3D-текстур реальных объектов [9–11] необходимо получать карты глубин для измерения размеров объектов и расстояния до них. Разработано множество устройств и методов, которые позволяют дистанционно измерять расстояния до объектов. Одним из таких устройств является активно-импульсная телевизионная измерительная система (АИ ТИС) [12]. Благодаря своим особенностям АИ ТИС измеряет расстояния до объектов, находящихся в поле зрения камеры, причем измерения возможно проводить даже при условии замутненности среды распространения оптического излучения.

Активно-импульсная телевизионная измерительная система (рис. 1) состоит из излучающего модуля, приемного модуля, а также модуля управления и обработки.

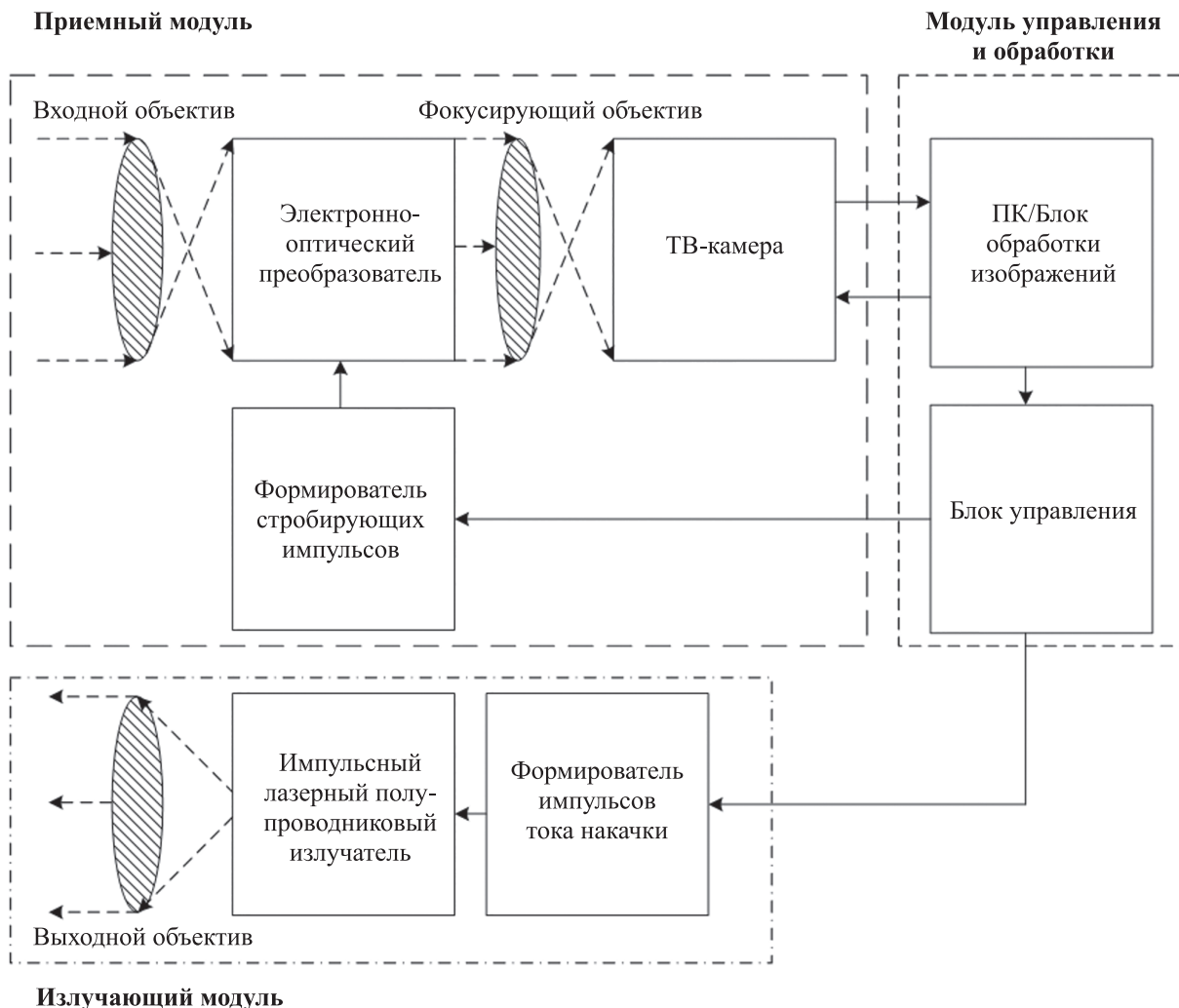


Рис. 1

Излучающий модуль содержит формирователь импульсов тока накачки, импульсный лазерный полупроводниковый излучатель (ИЛПИ) и объектив. Формирователь импульсов тока накачки управляет ИЛПИ для обеспечения требуемой интенсивности потока оптического излучения в течение заданного времени. Оптическое излучение проходит через объектив излучателя, где оно приобретает необходимый угол расходимости для освещения пространства. В качестве ИЛПИ в АИ ТИС применяются решетка лазерных диодов ИК-диапазона и оптический интегратор, необходимый для формирования равномерного поля подсвета.

Приемный модуль фотоприемника состоит из электронно-оптического преобразователя (ЭОП), перед которым расположен входной объектив, фокусирующий отраженный от наблюдаемых объектов поток оптического излучения. ЭОП выступает в роли быстродействующего затвора, а также преобразует обратный световой поток, излучаемый в невидимом глазу диапазоне частот, в видимое оптическое излучение, увеличивая его интенсивность. Световой поток, выходящий из экрана электронно-оптического преобразователя, фокусируется на матрице телевизионной камеры благодаря согласующему объективу [13].

Модуль управления и обработки позволяет принимать видеопоток с телевизионной камеры АИ ТИС и выполнять необходимую обработку видеок кадров для построения нормированной карты глубин пространства, а также накладывать на нее псевдоцвета.

ТВ-камера АИ ТИС синхронизирована через модуль управления с ЭОП. Частота кадров ТВ-камеры — 50 Гц, частота стробирования ЭОП — 5 кГц. Таким образом, за один кадр в ТВ-камере может быть накоплено до ста кадров, сформированных на экране ЭОП.

Для построения карты глубин с помощью АИ ТИС применяется многозонный метод измерения дальности (ММИД) [13, 14], который позволяет регулировать динамический диапазон определения расстояний до объектов без изменения длительности импульса подсвета пространства (ИПП). ММИД основан на использовании двух видеок кадров, полученных с использованием АИ ТИС. Данные видеок кадры содержат множество активных зон видения (АЗВ), сформированных определенным образом. Основой метода определения дальности является операция над двумя изображениями наблюдаемой сцены, где каждое изображение формируется из множества АЗВ по определенному алгоритму [15].

Результатом применения ММИД в АИ ТИС является получение нормированного изображения, в котором значения яркости пикселей соответствуют расстоянию до наблюдаемых объектов. Нормировка выполняется путем деления значения яркости пикселей в кадре, содержащем суммарную АЗВ, на значение яркости пикселей в кадре, содержащем первую АЗВ. Значение яркости после нормировки в ММИД может превышать 1 из-за разности в итоговой глубине АЗВ, т. е. на определенном расстоянии яркость объектов на кадрах с суммарной АЗВ будет выше, чем в кадрах с первой АЗВ.

Многозонный метод измерения дальности с модуляцией (ММИДМ), основанный, как и ММИД, на использовании двух видеок кадров, полученных в АИ ТИС [16], повышает эффективность использования амплитудного динамического диапазона фотоприемника, что приводит к увеличению интервала измерения дальностей.

Исследование и компенсация влияния различной отражательной способности объектов наблюдения. В качестве исходных данных были взяты видеоматериалы, полученные при проведении экспериментальных исследований в большой аэрозольной камере [17], находящейся в Институте оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН). Большая аэрозольная камера (объем 2000 м³) предназначена для исследований закономерностей распространения лазерных пучков в моделируемых аэрозольных образованиях (дымы, туманы и пр.).

Для исследования использовались восемь видеофайлов (четыре для ММИД и четыре — для ММИДМ), снятых в большой аэрозольной камере, при использовании АИ ТИС в режиме измерения дальности методами ММИД и ММИДМ с задержками стробирования 60, 80, 90 и 100 нс. Пример кадра с увеличенной яркостью при использовании ММИД с задержкой стробирования 100 нс приведен на рис. 2.



Рис. 2

Было проведено исследование влияния различной отражательной способности объектов на точность построения карт глубин пространства. В качестве инструмента для исследования использовалось специально разработанное авторами ПО [18, 19]. Был снят ряд зависимостей нормированного отношения яркостей объектов в кадре для светлых и темных объектов от расстояния до объектов. В программном обеспечении на изображениях темных и светлых объектов назначались области интереса, после чего производились накопление кадров, их

усреднение и запись в файл средних значений яркостей и их нормированных отношений. Стоит отметить, что размеры и положения областей интереса не изменялись, а количество накопленных и усредненных кадров оставалось постоянным.

В качестве светлых объектов были взяты фоновые области измерительных транспарантов, а в качестве темных — цифры, обозначающие расстояние до транспарантов. Для полученных параметров было рассчитано среднее квадратическое отклонение (СКО) нормированных отношений яркостей темных и светлых объектов

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{\sum_{d=12}^{24} (I_c - I_T)^2}{N}},$$

где $d = 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24$ м — расстояние от АИ ТИС до светлых и темных объектов; I_c — нормированное отношение яркостей для светлых объектов на расстоянии d ; I_T — нормированное отношение яркостей для темных объектов на расстоянии d ; N — число точек определения яркости (в нашем случае 7).

Другими словами, СКО показывает, насколько нормированные отношения яркостей для темных объектов расходятся с отношениями для светлых объектов. Пример зависимостей нормированных отношений яркостей для темных и светлых объектов от расстояния до объектов при задержке стробирования 100 нс приведен в табл. 1: видно расхождение значений, в этом и заключена проблема влияния различной отражательной способности объектов на точность построения карт глубин.

Таблица 1. Пример зависимостей нормированных отношений яркостей от расстояния до объектов при задержке стробирования 100 нс

Метод	Объект	Расстояние до объектов, м							СКО
		12	14	16	18	20	22	24	
ММИД	Светлый	0,472	0,63	0,808	0,934	1,053	1,183	1,189	0,092
	Темный	0,661	0,736	0,838	0,939	1,019	1,12	1,105	
ММИДМ	Светлый	0,423	0,432	0,426	0,461	0,486	0,492	0,569	0,128
	Темный	0,591	0,462	0,425	0,456	0,472	0,469	0,547	

При проведении измерений было замечено, что в видеофайлах уровень черного всегда не равен нулю. Это обусловлено внутренними шумами камеры и дробовыми шумами ЭОП, причем это искажение влияет сильнее на темные объекты (см. рис. 2, цифры на транспарантах) в связи с их малой яркостью.

Для минимизации влияния уровня черного и, как следствие — минимизации СКО для темных и светлых участков объекта, был предложен метод вычитания коэффициентов. Суть

данного метода заключается в вычитании вычисленных значений из числителя и знаменателя при построении нормированной карты глубин (для ММИД из суммарной и первой зоны, для ММИДМ — из зоны с модуляцией и суммарной зоны). Для подбора этих значений был разработан алгоритм, представленный на рис. 3. В этом алгоритме K_1 и K_2 — значения, вычитаемые из числителя и знаменателя.

Для анализа работоспособности предложенного метода было проведено экспериментальное сравнение с методом вычитания темнового кадра из видеопотока для корректировки уровня черного. Темновой кадр — это изображение, полученное сенсором при закрытом затворе или закрытом объективе. Такой темновой кадр по сути является изображением шума, создаваемого датчиком. В нашем случае темновой кадр представляет собой усредненный видеопоток, снятый с выключенным источником подсветки при использовании ММИД. Для ММИДМ использовался тот же темновой кадр, что и для ММИД.

Сравнительная апробация методов была выполнена на исходных видеоданных. Полученные по формуле (1) значения среднеквадратического отклонения зависимостей нормированных отношений яркостей для светлых и темных объектов от дальности сведены в табл. 2.

Графики зависимостей нормированных отношений яркостей от расстояния для ММИД с задержкой стробирования 100 нс до (а) и после обработки методами вычитания коэффициентов (б) и темнового кадра (в) приведены на рис. 4.

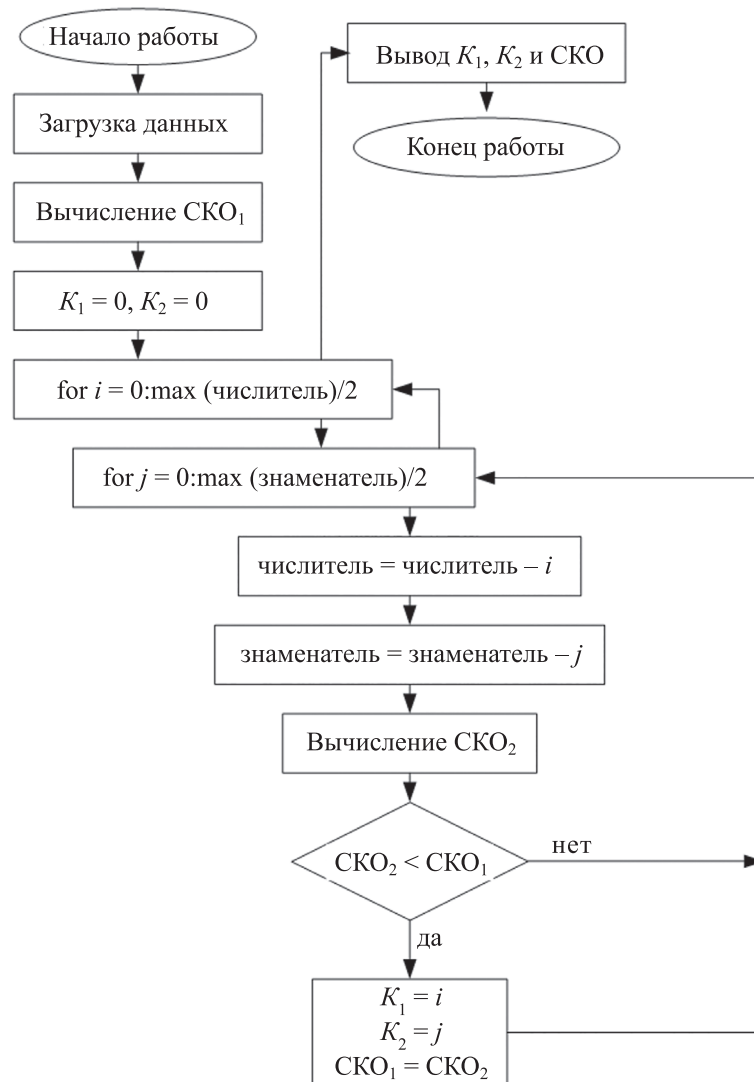


Рис. 3

Таблица 2. СКО зависимостей нормированных отношений яркостей от дальности до и после обработки

Метод	Задержка, нс	СКО		
		исходное	метод вычитания коэффициентов	метод вычитания темного кадра
ММИД	60	0,091	0,044	0,086
	80	0,065	0,026	0,06
	90	0,064	0,021	0,054
	100	0,092	0,018	0,051
ММИДМ	60	0,066	0,004	0,016
	80	0,071	0,003	0,011
	90	0,089	0,003	0,01
	100	0,128	0,002	0,015

Из экспериментальных данных, табл. 1 и 2, а также рис. 4 следует, что предварительная обработка видеокadres AI ТИС значительно снизила СКО между темными и светлыми объектами, причем в большинстве случаев наблюдается схождение двух кривых практически в одну.

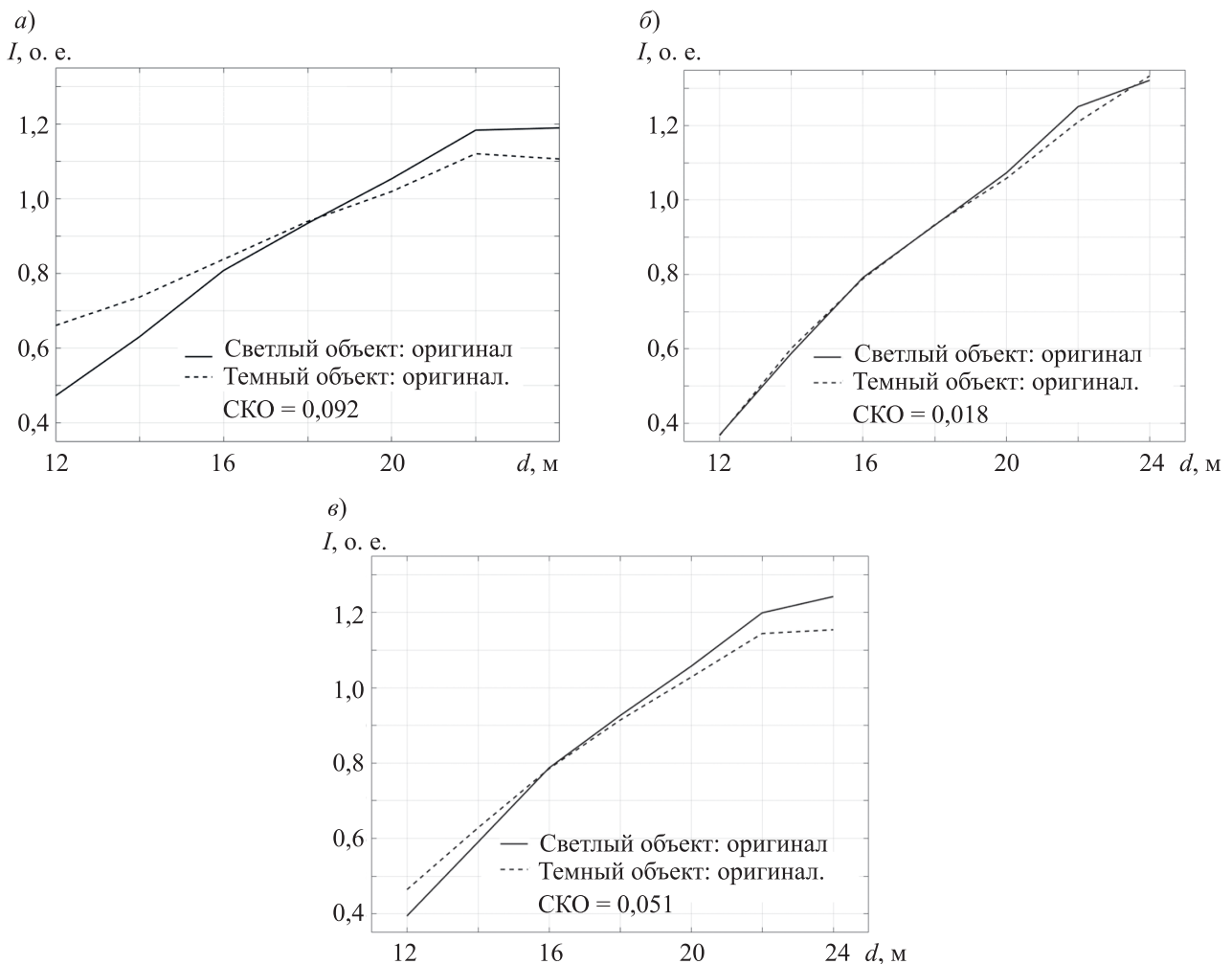


Рис. 4

На результирующей карте глубин уменьшение СКО проявляется как „размытие“ или, в идеальном случае, исчезновение цифр с транспарантов. В настоящей работе для метода вычитания коэффициентов не анализировались параметры системы. Для этого не хватает данных, так как предполагается, что подобранные коэффициенты зависят от инерционности люминофора ЭОП, шума ЭОП, шума камеры, яркости сцены и используемого метода получения карт глубин. Для визуального сравнения результатов применения методов на рис. 5 приведены карты глубин до обработки (а), после обработки методом вычитания коэффициентов (б) и после обработки методом вычитания темного кадра (в) для видеофайла, содержащего ММИД с задержкой стробирования 100 нс.

После применения метода вычитания коэффициентов на карте глубин пропадает фоновый шум, а также исчезают номера транспарантов, что также свидетельствует об успешном применении метода. После применения метода вычитания темного кадра на карте глубин черные цифры стали визуально менее заметными, но, в отличие от метода вычитания коэффициентов, осталась фоновая составляющая.

Заключение. Для повышения точности построения карт глубин пространства исследованы способы компенсации влияния различной отражательной способности объектов. Из исследований следует, что хорошо себя показал предложенный метод вычитания коэффициентов. Для ММИД применение метода вычитания коэффициентов обеспечило уменьшение СКО в среднем в 3 раза, а для ММИДМ — в 20 раз. Применение метода сократило расхождение кривых зависимостей нормированных отношений яркостей от дальности, что подтверждается численно. Визуально на карте глубин пропадает фоновый шум, а также исчезают номера транспарантов, что свидетельствует об успешном применении метода.

Метод вычитания темного кадра показал меньшую эффективность, по сравнению с методом вычитания коэффициентов. Для ММИД этот метод уменьшил СКО в среднем в 1,3 раза, для ММИДМ — в 7 раз. Визуально на карте глубин этот метод сделал черные цифры менее заметными, но, в отличие от метода вычитания коэффициентов, оставил фоновую составляющую.

Стоит отметить, что метод вычитания коэффициентов может быть использован только в процессе постобработки, тогда как метод вычитания темного кадра может быть использован для работы в режиме реального времени. В данной работе для метода вычитания коэффициентов не проводился поиск зависимостей для подобранных коэффициентов. Для поиска этих зависимостей не хватает данных, так как предполагается, что подобранные коэффициенты зависят от инерционности люминофора ЭОП, шума ЭОП, шума камеры, от яркости сцены и используемого метода получения карт глубин.

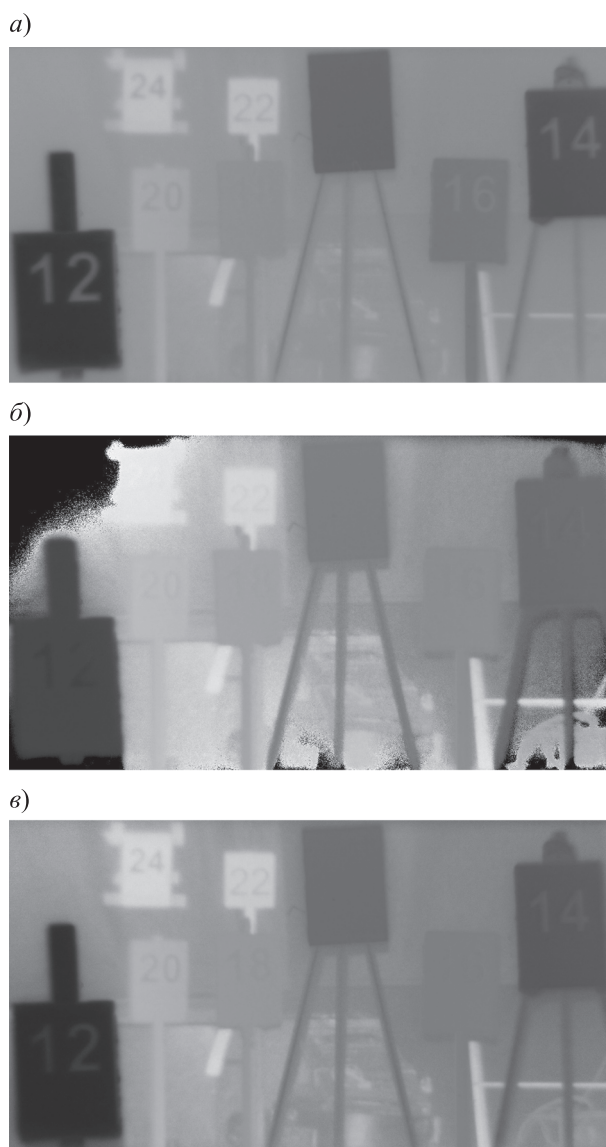


Рис. 5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gimeno J.* et al. A new AR authoring tool using depth maps for industrial procedures // *Computers in Industry*. 2013. Vol. 64, N 9. P. 1263–1271.
2. *Devagiri J. S.* et al. Augmented Reality and Artificial Intelligence in industry: Trends, tools, and future challenges // *Expert Systems with Applications*. 2022. P. 118002.
3. *Rahimian F. P.* et al. On-demand monitoring of construction projects through a game-like hybrid application of BIM and machine learning // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 110. P. 103012.
4. *Vijayanagar K. R., Loghman M., Kim J.* Refinement of depth maps generated by low-cost depth sensors // 2012 Intern. SoC Design Conf. (ISOCC). IEEE, 2012. P. 355–358.
5. *Yahav G., Iddan G. J., Mandelbroum D.* 3D imaging camera for gaming application // 2007 Digest of Technical Papers Intern. Conf. on Consumer Electronics. IEEE. 2007. P. 1–2.
6. *Häne C.* et al. Stereo depth map fusion for robot navigation // 2011 IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. IEEE. 2011. P. 1618–1625.
7. *Haigron P.* et al. Depth-map-based scene analysis for active navigation in virtual angiography // *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2004. Vol. 23, N 11. P. 1380–1390.
8. *Angelopoulos A. N.* et al. Enhanced depth navigation through augmented reality depth mapping in patients with low vision // *Scientific reports*. 2019. Vol. 9, N 1. P. 11230.
9. *Krutikova O., Sisojevs A., Kovalovs M.* Creation of a depth map from stereo images of faces for 3D model reconstruction // *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 104. P. 452–459.
10. *Fu Y.* et al. Texture mapping for 3d reconstruction with rgb-d sensor // *Proc. of the IEEE Conf. on computer vision and pattern recognition*. 2018. P. 4645–4653.
11. *Ma R.* et al. Real-time 3D reconstruction of colonoscopic surfaces for determining missing regions // *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention—MICCAI 2019: 22nd Intern. Conf. Shenzhen, China, 13–17 October 2019, Proc., Pt V 22*. Springer International Publishing, 2019. P. 573–582.
12. *Movchan A. K., Kapustin V. V., Kuryachiy M. I., and Movchan E. S.* Distance Measurement using Active-Pulse Television Measuring Systems with Automatic Scanning of Space by Depth // 2023 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, Russian Federation, 2023. P. 1–7. DOI: 10.1109/Dynamics60586.2023.10349593.
13. *Капустин В. В., Мовчан А. К.* Многозонные методы формирования карт глубин с использованием активно-импульсных телевизионных измерительных систем // *Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения*. 2023. № 2. С. 44–54.
14. *Chaldina E. S., Movchan A. K., Kapustin V. V. and Kuryachiy M. I.* Multi-Area Range Measurement Method Using Active-Pulse Television Measuring Systems // 21st Intern. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Chemal, Russia, 2020. P. 293–297. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153500.
15. *Мовчан А. К.* и др. Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности активно-импульсными телевизионными измерительными системами // *Докл. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2020. Т. 23, №. 2. С. 7–14.
16. *Movchan A. K., Kapustin V. V., Kuryachiy M. I., and Movchan E. S.* Multi-Area Method of a Depth Map Building with Gain Modulation in Active-Pulse Television Measuring Systems // 2022 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). Tomsk, Russian Federation, 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002872.
17. Аэрозольные камеры [Электронный ресурс]: <<https://iao.ru/ru/about/resources/equip/acams>>. (дата обращения: 30.01.2024)
18. *Musikhin I. D., Kapustin V. V., Tislenko A. A., Movchan A., Zabuga S. A.* Building Depth Maps Using an Active-Pulse Television Measuring System in Real Time Domain // *Scientific Visualization*. 2024. Vol. 16, N 1. P. 38–51. DOI: 10.26583/sv.16.1.04.
19. Свид-во о гос. рег. программы для ЭВМ 2023615399 РФ. Формирователь карт глубин АИ ТИС / *И. Д. Мусихин, С. А. Забуга, В. В. Капустин, А. Мовчан*. Заяв. № 2023614290 от 11.03.2023, опубл. 14.03.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Илья Денисович Мусихин

— магистрант; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, кафедра телевидения и управления;
E-mail: ilia.d.musikhin@tusur.ru

Вячеслав Валериевич Капустин

— канд. техн. наук; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, кафедра телевидения и управления;
E-mail: viacheslav.v.kapustin@tusur.ru

- Сергей Александрович Забуга** — магистрант; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, кафедра телевидения и управления; E-mail: sergeizabuga@gmail.com
- Андрей Мовчан** — канд. техн. наук; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, кафедра телевидения и управления; доцент; E-mail: mr.movchann@mail.ru
- Егор Сергеевич Познахарев** — Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, лаборатория распространения оптических сигналов; науч. сотр.; E-mail: 724_pes1992@iao.ru

Поступила в редакцию 15.03.2024; одобрена после рецензирования 19.04.2024; принята к публикации 19.06.2024.

REFERENCES

- Gimeno J. et al. *Computers in Industry*, 2013, no. 9(64), pp. 1263–1271.
- Devagiri J.S. et al. *Expert Systems with Applications*, 2022, pp. 118002.
- Rahimian F.P. et al. *Automation in Construction*, 2020, vol. 110, pp. 103012.
- Vijayanagar K.R., Loghman M., Kim J. *International SoC Design Conference (ISOC)*, IEEE, 2012, pp. 355–358.
- Yahav G., Iddan G.J., Mandelbom D. *2007 Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics*, IEEE, 2007, pp. 1–2.
- Häne C. et al. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2011, pp. 1618–1625.
- Haigron P. et al. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2004, no. 11(23), pp. 1380–1390.
- Angelopoulos A.N. et al. *Scientific reports*, 2019, no. 1(9), pp. 11230.
- Krutikova O., Sisojevs A., Kovalovs M. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 104, pp. 452–459.
- Fu Y. et al. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 4645–4653.
- Ma R. et al. *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention—MICCAI 2019, 22nd International Conference*, Shenzhen, China, October 13–17, 2019, Proc., Part V 22. Springer International Publishing, 2019, pp. 573–582.
- Movchan A.K., Kapustin V.V., Kuryachiy M.I., and Movchan E.S. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Omsk, Russian Federation, 2023, pp. 1–7, DOI: 10.1109/Dynamics60586.2023.10349593.
- Kapustin V.V., Movchan A.K. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika teledeniya*, 2023, no. 2, pp. 44–54. (in Russ.)
- Chaldina E.S., Movchan A.K., Kapustin V.V., and Kuryachiy M.I. *21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Chemal, Russia, 2020, pp. 293–297, DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153500.
- Movchan A.K., Kapustin V.V., Kuryachiy M.I., Chaldina E.S. *Proceedings of TUSUR University*, 2020, no. 2(23), pp. 7–14. (in Russ.)
- Movchan A.K., Kapustin V.V., Kuryachiy M.I., and Movchan E.S. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Tomsk, Russian Federation, 2022, pp. 1–6, DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002872.
- <https://iao.ru/ru/about/resources/equip/acams>. (in Russ.)
- Musikhin I.D., Kapustin V.V., Tislenko A.A., Movchan A., Zabuga S.A. *Scientific Visualization*, 2024, no. 1(16), pp. 38–51, DOI: 10.26583/sv.16.1.04.
- Certificate on the state registration of the computer programs RU 2023615399, *Formirovatel' kart glubin AI TIS* (Depth Map Maker AI TIS), I.D. Musikhin, S.A. Zabuga, V.V. Kapustin, A. Movchan, Application no. 2023614290, Priority 11.03.2023, Published 14.03.2023. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- Ilya D. Musikhin** — Master Student; Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Department of Television and Control; E-mail: ilia.d.musikhin@tusur.ru
- Vyacheslav V. Kapustin** — PhD, Associate Professor; Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Department of Television and Control; Associate Professor; E-mail: viacheslav.v.kapustin@tusur.ru
- Sergey A. Zabuga** — Master Student; Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Department of Television and Control; E-mail: sergeizabuga@gmail.com
- Andrew Movchan** — PhD, Associate Professor; Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Department of Television and Control; Associate Professor; E-mail: mr.movchann@mail.ru
- Egor S. Poznakharev** — V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the RAS, Siberian Branch, Laboratory of Optical Signals Propagation; Researcher; E-mail: 724_pes1992@iao.ru

Received 15.03.2024; approved after reviewing 19.04.2024; accepted for publication 19.06.2024.