

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОБЪЕКТАМИ И ИХ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ В ПОЛЕ ЗРЕНИЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

**В. В. Капустин, А. С. Захлебин*, А. К. Мовчан, М. И. Курячий, С. А. Забуга,
И. Д. Мусихин, А. В. Каменский**

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

* aerosnimok@gmail.com

Аннотация. Разработан и экспериментально исследован алгоритм определения расстояния между наблюдаемыми объектами и их линейных размеров в поле зрения активно-импульсной телевизионной измерительной системы (АИ ТИС) с использованием карт глубин, полученных многозонным методом измерения дальности (ММИД). Оценена возможность применения АИ ТИС и ММИД для задачи дистанционного измерения расстояний между наблюдаемыми объектами и линейных размеров последних. Предложенный алгоритм позволяет определять размеры объектов и расстояния между ними на основе известных параметров АИ ТИС и информации о расположении пикселов на матрице фотоприемного устройства. Под размерами объектов понимаются их линейные величины — ширина и высота, определяемые в метрической системе координат. Информация о расположении пикселов на матрице включает координаты пикселов (номера строк и столбцов матрицы), которые соответствуют определенным точкам объектов, в системе координат фотоприемной матрицы (номера строк и столбцов матрицы). Алгоритм адаптирует известные соотношения геометрической оптики для ММИД, используемого в АИ ТИС.

Для апробации алгоритма проведен эксперимент в лабораторных условиях с использованием макета АИ ТИС. Результаты измерений показали, что применение ММИД с длительностью импульса стробирования электронно-оптического преобразователя 50 нс обеспечивает наименьшее среднеквадратическое отклонение (СКО) рассчитанных значений относительно эталонных (измеренных): для размеров объектов СКО = 0,01 м (не более 5 %), для расстояний между объектами СКО = 0,12 м.

Таким образом, предложенный алгоритм может быть использован при дистанционном определении линейных размеров объектов и расстояний между ними с использованием АИ ТИС.

Ключевые слова: поле зрения, карта глубины, размеры объектов, расстояние, активно-импульсная телевизионная измерительная система, активная зона видения

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

Ссылка для цитирования: Капустин В. В., Захлебин А. С., Мовчан А. К., Курячий М. И., Забуга С. А., Мусихин И. Д., Каменский А. В. Алгоритм определения расстояния между объектами и их линейных размеров в поле зрения активно-импульсной телевизионной измерительной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 4. С. 320–327. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-4-320-327.

**ALGORITHM FOR DETERMINING THE DISTANCE BETWEEN OBJECTS AND THEIR LINEAR DIMENSIONS
IN THE FIELD OF VIEW OF AN ACTIVE-PULSE TELEVISION MEASURING SYSTEM**

**V. V. Kapustin, A. S. Zakhlebin*, A. K. Movchan, M. I. Kuryachy, S. A. Zabuga,
I. D. Musihin, A. K. Kamensky**

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

* aerosnimok@gmail.com

Abstract. An algorithm for determining the distance between observed objects and their linear dimensions in the field of view of an active-pulse television measuring system (AP TMS) using depth maps obtained by the multi-area range measurement method (MARMM) has been developed and experimentally studied. The possibility of using AP TMS and MARMM for the task of remotely measuring distances between observed objects and their linear dimensions has been assessed. The proposed algorithm allows determining the dimensions of objects and the distances between them based on known AP TMS parameters and information on the location of pixels on the matrix of the photodetector. The objects dimensions are understood as their linear quantities — width and height, determined in the metric coordinate system. Information on the location of pixels on the matrix includes the coordinates of pixels (row and column numbers of the matrix), which correspond to certain points of objects, in the coordinate system of the photodetector matrix (row and column numbers of the matrix). The algorithm adapts the known relationships of geometric optics for MARMM used

in AP TMS. An experiment performed in laboratory conditions with an AP TMS prototype is used to test the algorithm. Results of the measurements show that the use of MARMM with 50 ns duration of the electron-optical converter strobing pulse provides the standart deviation (SD) of the calculated values relative to the reference (measured): for the objects sizes, $SD = 0.01$ m (no more than 5%); for distances between objects, $SD = 0.12$ m. Thus, the proposed algorithm can be used in practice for remote determination of linear dimensions of objects and distances between them using AP TMS.

Keywords: field of view, depth map, object sizes, distance, active-pulse television measuring system, active vision area

Acknowledgments: The study was carried out with the support of the Russian Science Foundation, Grant No. 21-79-10200 at TUSUR.

For citation: Kapustin V. V., Zakhlebin A. S., Movchan A. K., Kuryachy M. I., Zabuga S. A., Musihin I. D., Kamensky A. K. Algorithm for determining the distance between objects and their linear dimensions in the field of view of an active-pulse television measuring system. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 4. P. 320–327 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-4-320-327.

Введение. Активно-импульсные телевизионные измерительные системы (АИ ТИС) широко применяются в различных областях, таких как дистанционное зондирование, робототехника, навигация и др. [1–5]. АИ ТИС относятся к системам с импульсным методом наблюдения, что не только позволяет эффективно подавлять помеху обратного рассеяния (для наблюдения в рассеивающих средах), но и обеспечивает построение карт глубин в поле зрения системы [6, 7]. Одной из важных задач, решаемых с помощью АИ ТИС, является определение линейных размеров наблюдаемых объектов, расстояний до них и между ними [8–10]. Это позволяет получать информацию о пространственных характеристиках объектов, необходимую для решения различных прикладных задач.

Методы определения размеров объектов, основанные на анализе изображений, имеют ряд ограничений, связанных не только с необходимостью знания точных параметров камеры и сцены съемки, но и с отсутствием данных о глубине сцены. В таком случае данные о глубине сцены можно получить, используя специальные маркеры для калибровки камеры с известными пространственными координатами в искомой системе координат. Это существенно увеличивает время измерений.

Также информацию о глубине сцены можно получить при съемке одного объекта с разных ракурсов. На практике такой подход не всегда реализуем. Информацию о глубине сцены можно получить при использовании стереокамер, но разрешающая способность таких камер по глубине значительно уменьшается с увеличением расстояния до объектов наблюдения, кроме того — точность измерения глубины такими камерами будет зависеть от условий освещенности объектов наблюдения. Использование АИ ТИС с многозонным методом измерения дальности (ММИД) [11, 12] позволяет определять линейные размеры объектов и расстояния между ними за счет получения информации о глубине сцены в реальном масштабе времени.

Многозонный метод измерения дальности. АИ ТИС состоит из импульсного излучателя, стробируемого фотоприемного устройства, а также модуля синхронизации и обработки сигналов. В АИ ТИС используются сигналы наносекундной длительности (для приемника и излучателя), поэтому в результате стробирования фотоприемника изображение формируется с ограниченного по глубине участка пространства, этот участок в зарубежных источниках обозначается как Range Intensity Profile (RIP), авторами настоящей работы он назван активной зоной видения (АЗВ).

Работа ММИД основана на интеграции множества экспозиций фотоприемного устройства. Это позволяет в широких пределах регулировать динамический диапазон определения расстояний без изменения длительности импульса подсвета АИ ТИС. Оригинальность многозонного метода заключается в том, что для четных кадров длительность задержки стробирования импульсов фотоприемного устройства неоднократно изменяется за время одного кадра (АЗВ сдвигается по дальности), интегрируя полученные значения экспонируемых на фотоприемном устройстве освещенности, а для нечетных кадров длительность задержки стробирования остается постоянной. В результате вычисления отношения четного и нечетного кадров будет получена

линейная зависимость яркости от расстояния, благодаря чему может быть измерена дальность одновременно в каждом элементе изображения (построена карта глубин) [13].

Предлагаемый алгоритм. Чтобы найти линейные размеры наблюдаемых объектов и расстояний между ними в поле зрения АИ ТИС, можно воспользоваться имеющейся априорной информацией: фокусное расстояние; угловое поле зрения; расстояние от камеры до точек, между которыми рассчитывается расстояние; расположение пикселов; размер пикселя.

Введем системы координат. Система координат пространства предметов основана на декартовой системе с осями OX , OY , OZ , где OZ направлена вдоль оптической оси камеры, OX и OY определяют плоскость, перпендикулярную оптической оси. В системе координат пространства изображений центр системы координат совпадает с центром матрицы фотоприемника. Ось OX направлена вдоль строк пикселов, а OY — вдоль столбцов пикселов.

На первом этапе необходимо вычислить удельное угловое поле по OX в пространстве изображений как отношение углового поля зрения камеры по горизонтали к числу пикселов в горизонтальном направлении матрицы. Это позволяет найти угол (в градусах), приходящийся на один пиксель:

$$w_x' = \frac{w_x'}{M_x}, \quad (1)$$

где w_x' — угловое поле зрения по OX ; M_x — число пикселов по OX .

На втором этапе необходимо найти разность пикселов изображений двух объектов, расстояние между которыми вычисляется.

Для определения координат точечного объекта на матрице фиксируются номера строк и столбцов, соответствующих положению объекта. Разность между координатами двух точек на изображении (в пикселях) рассчитывается как разность номеров строк и столбцов в системе координат матрицы:

$$\Delta x = |x_2 - x_1|, \quad (2)$$

где x_1 и x_2 — координаты первой и второй точек по оси OX в системе координат изображения, соответствующие номерам столбцов;

$$\Delta y = |y_2 - y_1|, \quad (3)$$

y_1 и y_2 — координаты первой и второй точек по оси OY в системе координат изображения, выраженные в номерах строк.

На третьем этапе рассчитывается угловое расстояние между точками как для горизонтальной (OX), так и для вертикальной (OY) составляющих [14–16]:

$$\Delta\theta_x = \Delta x w_x, \quad (4)$$

где Δx — разность между положениями пикселов двух объектов по оси OX ;

$$\Delta\theta_y = \Delta y w_y, \quad (5)$$

Δy — разность между положениями пикселов двух объектов по оси OY ; w_y — отношение угла поля зрения по вертикали к общему числу строк в кадре.

На четвертом этапе, когда известны угловые расстояния по горизонтали и вертикали, можно использовать формулу для расчета общего угла, образованного направлениями от камеры к двум точкам, определяемого их координатами и расстояниями до них

$$\theta = \sqrt{\Delta\theta_x^2 - \Delta\theta_y^2}. \quad (6)$$

На пятом этапе, имея угол θ и зная расстояния от камеры до каждой из точек объекта, можно найти расстояние между двумя точками объекта или между объектами в пространстве предметов

$$D_{AB} = \sqrt{D_A^2 + D_B^2 - 2D_A D_B \cos \theta}, \quad (7)$$

где D_{AB} — расстояние между двумя точками; D_A — расстояние от АИ ТИС до точки A ; D_B — расстояние от АИ ТИС до точки B .

Таким образом можно рассчитывать линейные размеры объектов и расстояния между ними, даже если интересующие точки находятся на различном удалении от АИ ТИС.

Практическая реализация. Для подтверждения состоятельности предложенного алгоритма был проведен эксперимент с использованием реальных данных с макета АИ ТИС (угол поля зрения — $9,35 \times 6,24^\circ$; размер формируемого изображения — 2064×1544 пикселов). В качестве объектов для проведения эксперимента были выбраны два транспаранта: № 12 и № 15 (рис. 1) на листах бумаги формата А4 (линейный размер по ширине 210, по высоте — 297 мм). Транспаранты были расположены параллельно друг другу.

Предварительно были измерены расстояния от оптического центра АИ ТИС до геометрических центров транспарантов с использованием лазерного дальномера, абсолютная погрешность которого по паспорту составляет $\pm 0,01$ м. Расстояние от АИ ТИС до транспаранта № 12 составило 12,02 м; до транспаранта № 15 — 14,97 м. Эти значения использовались в качестве эталонных при определении погрешности алгоритма. В качестве контрольных точек на объектах использовались углы транспарантов. Расстояния между транспарантами также были измерены лазерным дальномером в четырех контрольных точках.

Для формирования карты глубины пространства в АИ ТИС использовался двадцатизонный ММИД [17]. Использование двадцати АЗВ при формировании карт глубин было обусловлено ограниченным пространством помещения, в котором проводился эксперимент, и техническими ограничениями макета АИ ТИС. Кроме того, в ранее проведенных исследованиях было показано, что увеличение числа АЗВ не приводит к повышению точности определения дальности в реальных условиях [18]. Основные параметры режимов работы АИ ТИС для измерений с использованием ММИД приведены в табл. 1, они определяют эффективный диапазон дальностей, который охватывает карта глубин.



Рис. 1

Таблица 1

Режим измерений	Длительность импульса, нс		Шаг внутрикадрового сканирования, нс	Задержка стробирования, нс
	стробирования ЭОП	подсвета		
1	130	30	6	40
2	50	30	1	80

Полученная в результате работы системы в режиме 1 карта глубины приведена на рис. 2, *a*, в режиме 2 — на рис. 2, *б*.

На рис. 2 отрезки A—A1, B—B1, C—C1, D—D1 соединяют контрольные точки на транспарантах, между которыми расстояние было найдено с использованием лазерного дальномера и разработанного алгоритма.

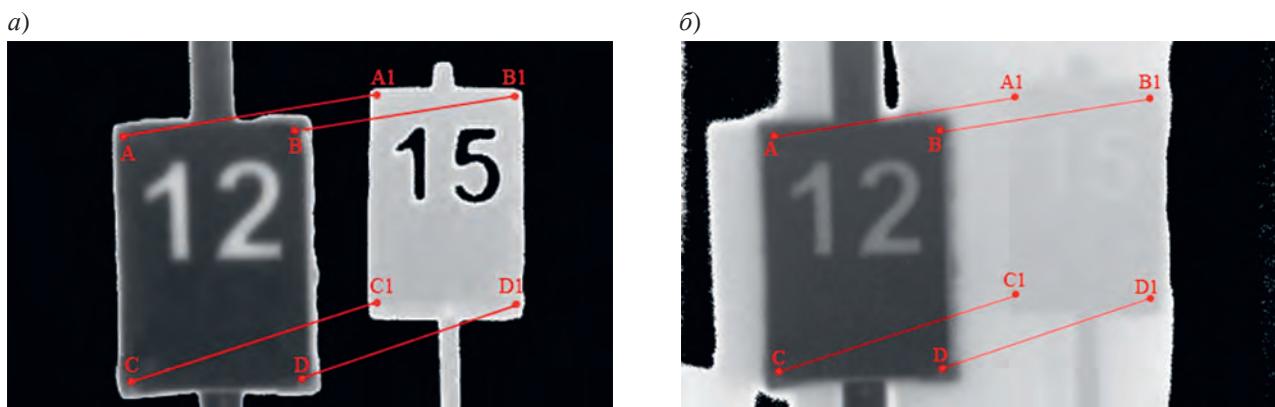


Рис. 2

В табл. 2 приведены результаты измерения расстояний между контрольными точками на объектах, расположенными на разном друг относительно друга расстоянии, с использованием предложенного алгоритма (формулы (1)–(7)), а также лазерного дальномера.

Таблица 2

Режим измерений	A–A1, м	B–B1, м	C–C1, м	D–D1, м
1	2,9	3,35	2,63	3,14
2	2,84	2,95	2,79	2,87
Эталонное значение	2,97	2,97	2,97	2,96

Из табл. 2 следует, что использование режима 2 для ММИД обеспечивает более стабильные и точные результаты, приближенные к результатам измерения лазерным дальномером (эталонным значениям). Для каждой контрольной точки было выполнено три серии измерений, чтобы оценить вариацию погрешности. Наименьшее отклонение от эталонных значений составляет 0,02 м при измерении расстояния между контрольными точками (B–B1) в режиме 2, а максимальное 0,38 м при измерении расстояний между контрольными точками B–B1 в режиме 1. Минимальное и максимальное отклонения — это абсолютные погрешности, найденные как модуль разности между эталонными значениями и значениями, полученными с использованием алгоритма. По всем контрольным точкам среднеквадратическое отклонение (СКО) от эталонных значений для режима 2 составило 0,12 м, для режима 1 — 0,273 м.

Также были найдены линейные размеры транспарантов для режима 2 (рис. 3, а) и режима 1 (б).

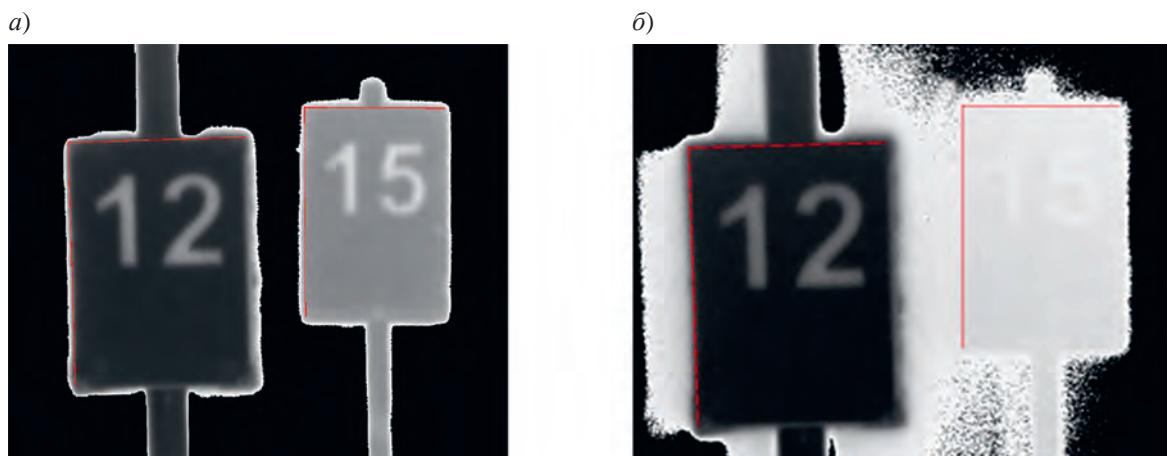


Рис. 3

Реальные линейные размеры измеряемой части транспарантов нам известны, так как в качестве них использовались листы бумаги формата А4. Результаты определения размеров транспарантов с использованием предложенного алгоритма представлены в табл. 3.

Таблица 3

Режим измерений	Транспарант № 12		Транспарант № 15	
	ширина, м	длина, м	ширина, м	длина, м
1	0,25	0,33	0,23	0,33
2	0,22	0,30	0,20	0,31

Из табл. 3 следует, что использование режима 2 при нахождении линейных размеров транспарантов так же, как и в случае с измерением расстояний между выбранными точками объектов (табл. 2), демонстрирует более стабильные результаты: СКО от эталонных значений 0,01 м (не более 5 %). Для измерений в режиме 1 СКО составило 0,032 м. Стабильность подтверждается повторяемостью результатов.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанный алгоритм может применяться для дистанционного определения линейных размеров наблюдаемых объектов и расстояний между интересующими точками на них. В результате эксперимента по применению алгоритма на картах глубин, полученных АИ ТИС, точность при использовании режима 2 в среднем в три раза выше, чем для режима 1. Для повышения точности измерений может потребоваться оптимизация алгоритма, а также учет специфических условий эксперимента. В данном эксперименте таким условием являлось узкое замкнутое пространство, в котором проводились измерения, что могло приводить к возникновению множественных переотражений светового потока, сформированного импульсным источником подсвета АИ ТИС.

Заключение. Разработанный алгоритм определения линейных размеров наблюдаемых объектов и расстояний между ними был протестирован на макете АИ ТИС в лабораторных условиях. В качестве входных данных для алгоритма были использованы карты глубин, сформированные с использованием ММИД.

Наилучшие результаты по точности были получены при использовании режима 2 (длительность импульса стробирования электронно-оптического преобразователя — 50 нс). Так, минимальная абсолютная погрешность найденных с помощью разработанного алгоритма расстояний между объектами и истинными значениями, измеренными лазерным дальномером, составила 0,02 м для расстояний между контрольными точками В–В1. Максимальная абсолютная погрешность измеренных расстояний между объектами составила 0,38 м при измерении расстояний между контрольными точками В–В1 для режима 1 (длительность импульса стробирования электронно-оптического преобразователя — 130 нс); по всем контрольным точкам СКО для режима 2 составило 0,12 м, для режима 1 — 0,273 м.

В результате измерения линейных размеров объектов СКО от эталонных значений составило 0,01 м при использовании режима 2 и 0,032 м при использовании режима 1, для транспарантов, расположенных на расстоянии 12,02 м и 14,97 м. Наибольшая абсолютная погрешность составила 0,05 м при использовании режима 1 для транспаранта, расположенного на расстоянии 12,02 м.

Полученные результаты продемонстрировали работоспособность алгоритма и его применимость для решения задач дистанционного измерения линейных размеров объектов и расстояний между последними с использованием АИ ТИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голицын А. А. Аппаратно-программный комплекс для исследования возможностей применения ПЗС-фотоприемников в составе активно-импульсных систем наблюдения // Автометрия. 2019. Т. 55, № 5. С. 107–114. DOI: 10.15372/AUT20190515.
- Кунцевич Б. Ф., Кабашников В. П. Особенности формирования зоны видимости активно-импульсными системами видения на малых дистанциях // Журнал прикладной спектроскопии. 2020. Т. 87, № 6. С. 984–989.
- Baranov P., Tsytulina A., Kurnikov A., & Chrnogubov A. 3D Imaging Method Based on CCD in the Ultra-Small Integration Time Mode // 2019 Intern. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). 2019, October. P. 0725–0728.
- Суриков А. В., Лещенюк Н. С., Кулешов В. К. Генератор наносекундных импульсов накачки для активно-импульсной системы видения в дыму и расчет дальности ее действия // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2021. Т. 5, № 1. С. 20–32. DOI 10.33408/2519-237X.2021.5-1.20.
- Грузевич Ю. К., Альков П. С., Балаясный Л. М., Чистов О. В. Лазерная оптико-телеизационная активно-импульсная система подводного видения // Подводные исследования и робототехника. 2024. № 3(49). С. 62–75. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_49_03_06.
- Иванов В. И., Иванов Н. И. Метод повышения эффективности лазерных активно-импульсных систем видения объектов с квазинулевым оптическим контрастом // Журнал прикладной спектроскопии. 2022. Т. 89, № 6. С. 858–868. DOI: 10.47612/0514-7506-2022-89-6-858-868.
- Baranov P. S., Kurnikov A. S., Mantsvetov A. A., Pyatkov V. V. Multi-pulse active CCD television system model for 3D imaging // Extreme Robotics. 2019. N 1(30). P. 45–51.
- Pengfei Wang, Hao Liu, Shaoping Qiu, Yu Liu, and Feng Huang. Three-dimensional super-resolution range-gated imaging based on Gaussian-range-intensity model // Appl. Opt. 2023. vol. 62. P. 7633–7642.
- 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.
- Денисов А. В., Капитонов Д. А., Курников А. С. Построение трехмерного образа искусственного космического объекта методом лазерной локации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 5. С. 783–789. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-783-789.
- Капустин В. В., Мовчан А. К. Многозонные методы формирования карт глубин с использованием активно-импульсных телевизионных измерительных систем // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 2. С. 44–54.
- Капустин В. В., Мовчан А. К., Тисленко А. А. Оценка точности измерения дальности многозонными методами с использованием активно-импульсной телевизионной измерительной системы по экспериментальным данным // Автометрия. 2024. Т. 60, № 1. С. 117–128. DOI: 10.15372/AUT20240113.
- Пат. РФ 2811331 С1, МПК G01S 17/02. Устройство формирования изображения карты дальностей до наблюдаемых объектов / А. Мовчан, М. И. Курячий, В. В. Капустин, Н. Бородина. Заяв. № 2023124916 от 28.09.2023, опубл. 11.01.2024.
- Fowles G. R. Introduction to modern optics. Courier Corporation, 1989.
- Гейдаров П. Ш. Алгоритм определения расположения и размеров объектов на основе анализа изображений объектов // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35, № 2. С. 275–280.
- Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. NY, 2013. 1022 р.
- Kapustin V. V., Zahlebin A. S., Movchan A. K. et al. Experimental assessment of the distance measurement accuracy using the active-pulse television measuring system and a digital terrain model // Computer Optics. 2022. Vol. 46, N 6. P. 948–954. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1114.
- Мовчан А. К., Капустин В. В., Курячий М. И., Чалдина Е. С. Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности активно-импульсными телевизионными измерительными системами // Доклады ТУСУР. 2020. Т. 23, № 2. С. 7–14. DOI: 10.21293/1818-0442-2020-23-2-7-14.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Вячеслав Валерьевич Капустин** — канд. техн. наук; ТУСУР, кафедра телевидения и управления; доцент;
E-mail: peregnun@mail.ru
- Александр Сергеевич Захлебин** — канд. техн. наук; ТУСУР, кафедра телевидения и управления; доцент;
E-mail: aerosnimok@gmail.com
- Андрей Кириллович Мовчан** — канд. техн. наук; ТУСУР, кафедра телевидения и управления; доцент;
E-mail: mr.movchann@mail.ru

- Михаил Иванович Курячий** — канд. техн. наук; ТУСУР, кафедра телевидения и управления; профессор; E-mail: kurtusur@mail.ru
- Сергей Александрович Забуга** — ТУСУР, кафедра телевидения и управления; инженер лаборатории телевизионной автоматики; E-mail: sergeizabuga@gmail.com
- Илья Денисович Мусихин** — ТУСУР, кафедра телевидения и управления; инженер лаборатории телевизионной автоматики; E-mail: ilia.d.musikhin@tusur.ru
- Андрей Викторович Каменский** — канд. техн. наук; ТУСУР, кафедра телевидения и управления; доцент; E-mail: andru170@mail.ru

Поступила в редакцию 22.08.24; одобрена после рецензирования 24.12.24; принята к публикации 27.02.25.

REFERENCES

1. Golitsyn A.A. *Avtometriya*, 2019, no. 5(55), pp. 107–114, DOI 10.15372/AUT20190515. (in Russ.)
2. Kuntsevich B.F., Kabashnikov V.P. *Zurnal Prikladnoj Spektroskopii*, 2020, no. 6(87), pp. 984–989. (in Russ.)
3. Baranov P., Tsytisulin A., Kurnikov A., & Chernogubov A. 2019 *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences* (SIBIRCON), 2019, October, pp. 0725–0728.
4. Surikov A.V., Leshenyuk N.S., Kuleshov V.K. *Vestnik Universiteta grazhdanskoy zashchity MCHS Belarusi*, 2021, no. 1(5), pp. 20–32, DOI 10.33408/2519-237X.2021.5-1.20. (in Russ.)
5. Gruzevich Yu.K., Alkov P.S., Balyasny L.M., Chistov O.V. *Underwater Investigations and Robotics*, 2024, no. 3(49), pp. 62–75, DOI 10.37102/1992-4429_2024_49_03_06. (in Russ.)
6. Ivanov V.I., Ivanov N.I. *Zurnal Prikladnoj Spektroskopii*, 2022, no. 6(89), pp. 858–868, DOI 10.47612/0514-7506-2022-89-6-858-868. (in Russ.)
7. Baranov P.S., Kurnikov A.S., Mantsvetov A.A., Pyatkov V.V. *Extreme Robotics*, 2019, no. 1(30), pp. 45–51.
8. Pengfei Wang, Hao Liu, Shaoping Qiu, Yu Liu, and Feng Huang, *Appl. Opt.* 2023, vol. 62, pp. 7633–7642.
9. 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.
10. Denisov A.V., Kapitonov D.A., Kurnikov A.S. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, no. 5(19), pp. 783–789, DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-783-789. (in Russ.)
11. Kapustin V.V., Movchan A.K. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2023, no. 2, pp. 44–54. (in Russ.)
12. Kapustin V.V., Movchan A.K., Tislenko A.A. *Avtometriya*, 2024, no. 1(60), pp. 117–128, DOI 10.15372/AUT20240113. (in Russ.)
13. Patent RU 2811331 C1, G01S 17/02, *Ustroystvo formirovaniya izobrazheniya karty dal'nostey do nablyudayemykh ob'yektov* (Device for Forming Image of Map of Distances to Surveyed Objects), A. Movchan, M.I. Kuryachiy, V.V. Kapustin, N. Borodina, Patent application no. 2023124916, Priority 28.09.2023, Published 11.01.2024. (in Russ.)
14. Fowles G.R. *Introduction to modern optics*, Courier Corporation, 1989.
15. Heydarov P.Sh. *Computer Optics*, 2011, no. 2(35), pp. 275–280. (in Russ.)
16. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*, NY, 2013, 1022 p.
17. Kapustin V.V., Zahlebin A.S., Movchan A.K. et al. *Computer Optics*, 2022, no. 6(46), pp. 948–954, DOI 10.18287/2412-6179-CO-1114.
18. Movchan A.K., Kapustin V.V., Kuryachiy M.I., Chaldina E.S. *Proceedings of TUSUR University*, 2020, no. 2(23), pp. 7–14, DOI 10.21293/1818-0442-2020-23-2-7-14. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- Viacheslav V. Kapustin** — PhD; Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Department of Television and Control; Associate Professor; E-mail: peregnun@mail.ru
- Alexander S. Zakhlebin** — PhD; Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Department of Television and Control; Associate Professor; E-mail: aerosnimok@gmail.com
- Andrey K. Movchan** — PhD; Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Department of Television and Control; Associate Professor; E-mail: mr.movchann@mail.ru
- Mikhail I. Kuryachiy** — PhD, Associate Professor; Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Department of Television and Control; Professor; E-mail: kurtusur@mail.ru
- Sergey A. Zabuga** — Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Department of Television and Control; Engineer; E-mail: sergeizabuga@gmail.com
- Ilya D. Musikhin** — Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Department of Television and Control; Engineer; E-mail: ilia.d.musikhin@tusur.ru
- Andrey V. Kamensky** — PhD; Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Department of Television and Control; Associate Professor; E-mail: andru170@mail.ru

Received 22.08.24; approved after reviewing 24.12.24; accepted for publication 27.02.25.