

## РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

*В. В. Лопатина, младший научный сотрудник*

*В. Г. Сенченко, кандидат технических наук, доцент*

Существуют задачи, в которых необходимо бесконтактно с высокой точностью выполнять измерения геометрических перемещений подвижного объекта относительно стационарной базы, учитывая особенности его размера, формы, скорости маневрирования, скорости движения. Например, высокоточное позиционирование корпуса судна относительно причала при выполнении операции швартовки и погрузо-разгрузочных работ. Для решения этой задачи предлагается использовать лазерно-оптический измеритель, который представляет собой программно-аппаратный комплекс, включающий в себя лазерный дальномер, массив цифровых устройств видеорегистрации с объективами переменного фокусного расстояния (трансфокаторами) и микрокомпьютер для первичной обработки измеряемых данных. **Цель исследования:** определение требований к оптической системе лазерно-оптического измерителя (фокусное расстояние, угол обзора, кадровая частота и другие параметры оптической системы). **Результаты:** предложена структура лазерно-оптического измерителя геометрических перемещений подвижного объекта. Особенности измерителя являются совместное использование лазерного дальномера и массива устройств видеорегистрации с трансфокаторами с различным фокусным расстоянием и типами линз. Определены и обоснованы требования к лазерно-оптическому измерителю на примере решения задач мониторинга швартовных операций морских судов и контроля стоянки у причала. **Практическая значимость:** результаты работы могут быть использованы при создании высокоточных систем позиционирования и высокоточных систем проводки на различных видах транспорта. Такие системы решают задачи стабилизации положения подвижных объектов в различных транспортных системах, а также контроль положения и, как следствие, повышение безопасности. Повышение безопасности эксплуатации транспортной системы позволяет повысить интенсивность транспортного потока и пропускную способность транспортной системы.

**Ключевые слова:** лазерно-оптический измеритель, измерение продольного, поперечного и вертикального смещения, мониторинг швартовных операций, автоматизированная швартовка судна.

There are tasks in which it is necessary to measure the geometric displacements of a moving object relative to a stationary base without contact with high accuracy, taking into account the peculiarities of its size, shape, speed of maneuvering, and speed of movement. For example, high-precision positioning of the ship's hull relative to the berth during mooring and loading and unloading operations. To solve this problem, it is proposed to use a laser-optical measuring device, which is a software and hardware complex that includes a laser range finder, an array of video capture devices with zoom lenses and a microcomputer for primary processing of the measured data. **Purpose:** determination of requirements for the optical system of the laser-optical measuring device (focal length, angle of view, frame frequency and other parameters of the optical system). **Results:** the structure of a laser-optical measuring device of geometric displacements of a moving object is proposed. Features of the measuring device are the combined use of a laser rangefinder and an array of video capture devices with zoom lenses with different focal lengths and lens types. The requirements for a laser-optical measuring device have been determined and substantiated by the example of solving the problems of monitoring the mooring operations of sea vessels and control parking at the pier. **Practical relevance:** the results of the work can be used to create high-precision positioning systems and high-precision guidance systems for various types of transport. Such systems solve the problem of stabilizing the position of moving objects in various transport systems, as well as monitoring the position and, as a consequence, increasing safety. Improving the operational safety of the transport system makes it possible to increase the intensity of the traffic flow and the throughput of the transport system.

**Keywords:** laser-optical measuring device, measuring longitudinal, transverse and vertical displacements, monitoring mooring operations, automated mooring.

Лазерно-оптический измеритель [1] представляет собой программно-аппаратный комплекс, для измерения геометрических перемещений подвижного объекта относительно стационарной базы, а именно продольного, поперечного и вертикального смещения. Лазерно-оптический измеритель (рис. 1) включает в себя лазерный дальномер с длиной волны вблизи инфракрасного диапазона, массив цифровых устройств видеорегистрации с объективами переменного фокусного расстояния (трансфокаторами) и микрокомпьютер для первичной обработки измеряемых данных.

Лазерно-оптический измеритель решает следующие задачи:

1. получение дистанции до объекта (поперечного смещения) с помощью лазерного дальномера;
2. получение видеопотока;
3. обработка кадров с целью вычисления продольного и вертикального смещения подвижного объекта.

Метод измерений продольного и вертикального смещения основывается на выборе ключевых точек на изображении отслеживаемого

объекта и слежении за перемещением этих точек.

Метод измерений поперечного смещения – на сравнении фаз сигнала лазера и сигнала, отражённого от объекта. Задержка при распространении волны создает сдвиг фаз, который и измеряется. Лазер работает постоянно, его излучение амплитудно модулируется сигналом определенной

частоты [2-4]. Фаза отражённого сигнала сравнивается с фазой опорного сигнала [5, 6].

В роли фотоприёмника отражённого сигнала выступает устройство видеорегистрации с широкоугольным объективом, что упрощает конструкцию оптического модуля, за счёт исключения отдельного устройства для регистрации отражённого луча лазера.

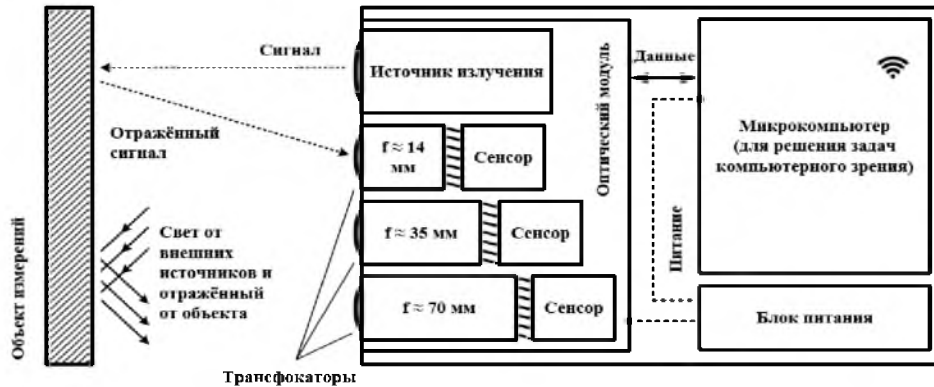


Рисунок 1 – Структурная схема лазерно-оптического измерителя (оптический модуль, микрокомпьютер, блок питания)

Существуют задачи, в которых необходимо выполнить измерения геометрических перемещений объекта, учитывая особенности его формы. Например, высокоточное позиционирование корпуса судна относительно причала при выполнении операции швартовки. Данная задача должна решаться независимо от уровня освещённости в течение суток (день, ночь), погодных условий (дождь, туман), помех, обусловленных несовершенством устройств для получения, передачи, хранения и обработки изображений, изменения взаимного расположения объектов (частичное или полное перекрытие отслеживаемого объекта).

Измерения начинаются при подходе судна к причалу (максимальная дистанция – 500 м), и продолжают во время швартовки судна к причалу, стоянки судна (минимальная дистанция – 2 м) и отхода судна от причала. Скорость судна на всех указанных этапах не превышает 3 узлов.

Измерителем отслеживается фрагмент борта судна (рис. 2), поэтому должны учитываться особенности его формы: неравномерная поверхность, выступающие части, кривизна и т.д. Все чётко различимые детали (надписи, опознавательные знаки, сварочные швы, коррозионные дефекты и разница в окраске корпуса судна) могут быть приняты за ключевые точки и в дальнейшем отслеживаться. Степень различимости деталей определяется резкостью изображения, которая зависит от двух параметров: разрешения системы матрица-трансфокатор и чёткости изображения [7, 8]. Разрешение ограничено одновременно размером пиксела на матрице и разрешающей способностью трансфокатора при заданном диаметре отверстия диафрагмы [9]. Чёткость изображения определяется величиной контрастного перехода и зависит от качества линз трансфокатора и неподвижности устройства видеорегистрации во время экспозиции [10, 11].



Рисунок 2– Примеры изображений фрагментов бортов морских судов на дистанции от 2 м до 500 м (слева 1, 3 – день, 2, 4 – ночь)

Высокая скорость съёмки (60 кадров в секунду) позволяет использовать динамические методы повышения качества изображения [12, 13],

путём комплексирования данных нескольких кадров, а также регистрировать быстро протекающие процессы.

В задаче высокоточного позиционирования корпуса судна относительно причала при выполнении операции швартовки большое значение имеет соотношение угла обзора устройства видеорегистрации, фокусного расстояния и дистанции до отслеживаемого объекта (рис. 3). На малой дистанции судна (2 – 10 м) от лазерно-оптического измерителя, борт судна займёт большую часть кадра, на большой дистанции (300 – 500 м) – в кадр попадут сторонние объекты (портовые сооружения, другие суда, причалы). Наличие сторонних объектов в кадре приведёт к неоднозначности выбора объекта и сложности в распознавании конкретного объекта слежения (частичное или полное перекрытие отслеживаемого объекта может подменить объект отслеживания). Поэтому в лазерно-оптическом измерителе используется массив устройств видеорегистрации с трансфокаторами с различным фокусным расстоянием и типами линз (рис. 4). Устройство видеорегистрации с фокусным расстоянием  $f \approx 14$  мм применяется для съёмки объекта на расстоянии от 2 до 140 метров,  $f \approx 35$  мм – от 140 до 320 метров,  $f \approx 70$  мм – от 320 до 500 метров.

Технические характеристики лазерно-оптического измерителя определяются параметрами сенсора, микросхемы обработки данных и конструкцией оптической системы.

Для определения продольного и вертикального смещения необходимо наблюдать чёткое изображение фрагмента поверхности корпуса судна (площадью от 1 м<sup>2</sup>) при любом его положении на расстоянии от 2 до 500 м от лазерно-оптического измерителя.

Например, при диагонали матрицы 43,1 мм и длине судна 220 м для получения чёткого изображения на дистанции от 2 до 140 м необходимо

обеспечить угол обзора по диагонали  $114^\circ \pm 20^\circ$ , следовательно, фокусное расстояние будет равно  $14 \pm \Delta$  мм (таблица 1). Тогда видимая часть судна в кадре не будет превышать  $170\% \pm 20\%$  от размеров судна. В этом случае количество сторонних объектов в кадре будет сведено к минимуму, следовательно, уменьшится неоднозначность выбора объекта и сложность его отслеживания.

При установке параметров съёмки необходимо обеспечить резкость изображения. Для этого отслеживаемый объект должен входить в границы резко изображаемого пространства. Границы резкости зависят от фокусного расстояния, величины апертуры, диаметра кружка резкости и дистанции до корпуса судна (таблица 2).

При тех же диагонали матрицы и длине судна на дистанции от 140 до 320 м необходимо обеспечить угол обзора по диагонали  $64^\circ \pm 20^\circ$ , фокусное расстояние  $35 \pm \Delta$  мм (таблица 1), для того, чтобы видимая часть судна в кадре составляла  $170\% \pm 20\%$ . Параметры для определения границ резкости содержит таблица 3.

Аналогично, для дистанции от 320 до 500 м угол обзора по диагонали должен составлять  $34^\circ \pm 20^\circ$ , фокусное расстояние  $70 \pm \Delta$  мм (таблица 1), чтобы видимая часть судна в кадре оставалась  $170\% \pm 20\%$ . Параметры для определения границ резкости на этой дистанции содержит таблица 4.

Различимость объектов на указанных расстояниях достаточна для выбора ключевых точек и их отслеживания. Т.к. скорость маневрирования судна не превышает 3 узлов, лазерно-оптический измеритель может зафиксировать его положение в каждый отдельный момент времени с учётом заданного фокусного расстояния. Погрешность измерений не превышает заданного порога и позволяет решить задачу с нужной точностью (таблица 5).

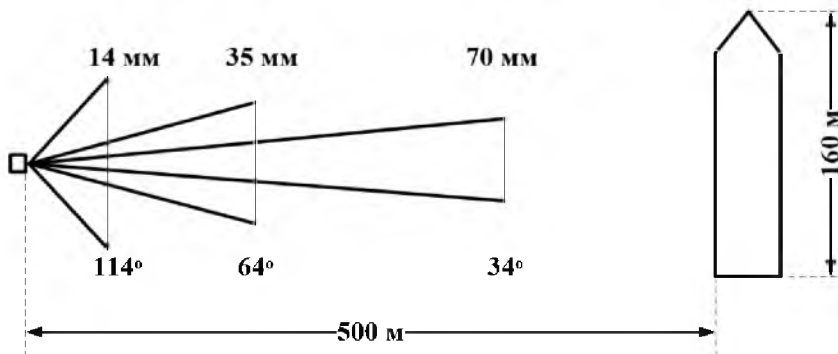


Рисунок 3 – Соотношение фокусного расстояния, угла обзора устройства видеорегистрации и дистанции до объекта

В структуре предлагаемого метода измерений продольного и вертикального смещения можно выделить следующие этапы: захват изображения (рис. 5), предварительная обработка

изображения, сегментация [14], извлечение признаков [15-17], классификация, пост-обработка результатов.

На этапе предварительной обработки изображения компенсируются ошибки, вызванные

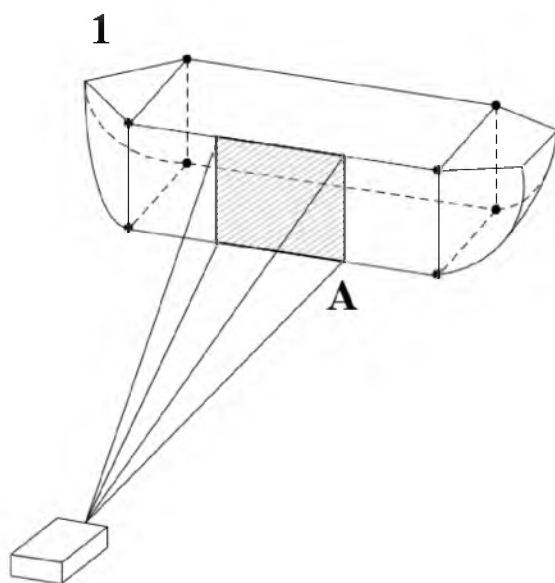






Таблица 5 – Основные требования к оптической системе лазерно-оптического измерителя

Расстояние до объекта	2 – 140 м		140 – 320 м	320 – 500 м
	2 – 10 м	10 – 140 м		
Фокусное расстояние трансфокатора	14 ± Δ мм		35 ± Δ мм	70 ± Δ мм
Угол обзора по диагонали	114° ± 20°		64° ± 20°	34° ± 20°
Экспозиция	1 мкс – 60 сек		1 мкс – 60 сек	1 мкс – 60 сек
Скорость съёмки	не менее 60 к/с		не менее 60 к/с	не менее 60 к/с
Фотоприёмник отражённого сигнала лазера	наличие		–	–
Инфракрасная подсветка	наличие		наличие	наличие
Тип матрицы	CMOS			
Формат матрицы	не менее 2/3"			
Разрешение	не менее 2448×2048			
Температурный диапазон	от –20°С до +65°С			
Длина волны лазера	900 нм			
Мощность	< 1 мВт			
Класс лазера	I М			
Расхождение луча	2,0 – 2,6 мрад			
Погрешность измерений продольного и вертикального смещения (стандартное отклонение одна сигма на расстоянии до 50 м)	± 10 мм	± 300 мм		
Погрешность измерений поперечного смещения (стандартное отклонение одна сигма на расстоянии до 50 м)	± 20 мм			
Дополнительная погрешность от расстояния	± 10 ppm			



2

Рисунок 5– Съёмка фрагмента борта судна с использованием лазерно-оптического измерителя для последующей обработки (1 – корпус судна, 2 – лазерно-оптический измеритель, А – отслеживаемый участок корпуса судна)

#### Литература

1. Лопатина В.В., Сенченко В.Г. Измерение продольного, поперечного и вертикального смещения подвижного объекта относительно стационарной базы // Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – №2(95). – С. 31-34.

- Poujouly S., Jourmet B. Atwofoldmodulationfrequencylaserrangefinder. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2002, № 4, с. 356–363.
- X. Y. Zheng, C. Zhao, H. Y. Zhang, Z. Zheng and H. Z. Yang. Coherent dual-frequency lidar system design for distance and speed measurements, 2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Laser Technology and Applications, Vol. 10619. International Society for Optics and Photonics, 2018.
- F. X. Jia, J. Y. Yu, Z. L. Ding and F. Yuan. Research on real-time laser range finding system. Applied Mechanics and Materials. Vol. 347. Trans Tech Publications, 2013.
- Beraldin J.-A., Steenaart W. Overflow Analysis of a Fixed-Point Implementation of the Goertzel Algorithm. IEEE Transactions on circuits and systems, 1989, Vol. 36, No. 2, pp. 322–324.
- Finlayson D.M., Sinclair B. Advances in Lasers and Applications. CRC Press, 1999, 346 p.
- Баходдин А.В., Романова Г.И., Цуканова Г.И. Теория и метод проектирования оптических систем. Часть I. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2011, 104 с.
- Sidney F. Ray. Applied Photographic Optics: Lenses and Optical Systems for Photography, Film, Video, Electronic and Digital Imaging. Focal Press, 2002, 656 p.
- Michael Langford, Anna Fox, and Richard Sawdon Smith. Langford's Basic Photography. Focal Press, 2007, 448 p.
- Цуканова Г.И., Карпова Г.В., Багдасарова О.В., Кривоустова Е.В., Ежова К.В. Геометрическая оптика: учебное пособие по курсу «Прикладная оптика». – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2002, 135 с.

11. Tim Dobbert. Matchmoving: The Invisible Art of Camera Tracking. John Wiley & Sons, 2012, 336 p.
12. S. K. Mitra and H. Li, A new class of nonlinear filters for image enhancement, Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics Speech Signal Processing, 1991, pp. 2525-2528.
13. G. Ramponi, N. Strobel, S. K. Mitra and T. Yu, Non-linear unsharp masking methods for image contrast enhancement, J. Electron. Imag., vol. 5, 1996, pp. 353-366.
14. Волков В. Ю. Адаптивное выделение мелких объектов на цифровых изображениях// Известия вузов России. Радиоэлектроника.– 2017.– № 1.– С. 17–28.
15. Naidu M. S. R., Kumar P. R. Multilevel image thresholding for image segmentation by optimizing fuzzy entropy using Firefly algorithm. Int. J. Eng. Technol, 2017, vol. 9.2, pp. 472–488.
16. Lowe, D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision 60, 2004pp. 91–110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
17. Jing Li, Nigel M. Allinson. A comprehensive review of current local features for computer vision. Neurocomputing, Volume 71, Issues 10–12, 2008, pp. 1771-1787. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2007.11.032>
18. Cao, Gang & Zhao, Yao & Ni, Rongrong&Kot, Alex. Unsharp masking sharpening detection via overshoot artifacts analysis. IEEE Signal Processing Letters. 18., 2011, pp. 603 - 606.
19. A. Polesel, G. Ramponi and V. J. Mathews, Image enhancement via adaptive unsharp masking, IEEE Trans. Image Process., vol. 9, no. 3, 2000, pp. 505-510.
20. G. Cao, Y. Zhao and R. Ni, Detection of image sharpening based on histogram aberration and ringing artifacts, Proc. IEEE Int. Conf. on Multimedia and Expo, 2009, pp. 1026-1029.
8. Sidney F. Ray. Applied Photographic Optics: Lenses and Optical Systems for Photography, Film, Video, Electronic and Digital Imaging. Focal Press, 2002, 656 p.
9. Michael Langford, Anna Fox, and Richard Sawdon Smith. Langford's Basic Photography. Focal Press, 2007, 448 p.
10. G.I. Tsukanova, G.V. Karpova, O. V. Bagdasarova, E.V. Krivopustova, K.V. Yezhov. Geometric optics. A manual for the course "Applied Optics" - St. Petersburg: ITMO University, 2002, 135 p.
11. Tim Dobbert. Matchmoving: The Invisible Art of Camera Tracking. John Wiley & Sons, 2012, 336 p.
12. S. K. Mitra and H. Li, A new class of nonlinear filters for image enhancement, Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics Speech Signal Processing, 1991, pp. 2525-2528.
13. G. Ramponi, N. Strobel, S. K. Mitra and T. Yu, "Non-linear unsharp masking methods for image contrast enhancement", J. Electron. Imag., vol. 5, 1996, pp. 353-366.
14. Volkov V. Yu. Adaptive extraction of small objects in digital images. IzvestiyavysshikhuchebnykhzavedeniiRossii. Radioelektronika, 2017, no. 1, pp. 17–28.
15. Naidu M. S. R., Kumar P. R. Multilevel image thresholding for image segmentation by optimizing fuzzy entropy using Firefly algorithm. Int. J. Eng. Technol, 2017, vol. 9.2, pp. 472–488.
16. Lowe, D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision 60, 2004pp. 91–110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
17. Jing Li, Nigel M. Allinson. A comprehensive review of current local features for computer vision. Neurocomputing, Volume 71, Issues 10–12, 2008, pp. 1771-1787. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2007.11.032>
18. Cao, Gang & Zhao, Yao & Ni, Rongrong&Kot, Alex. Unsharp masking sharpening detection via overshoot artifacts analysis. IEEE Signal Processing Letters. 18., 2011, pp. 603 - 606.
19. A. Polesel, G. Ramponi and V. J. Mathews, Image enhancement via adaptive unsharp masking, IEEE Trans. Image Process., vol. 9, no. 3, 2000, pp. 505-510.
20. G. Cao, Y. Zhao and R. Ni, Detection of image sharpening based on histogram aberration and ringing artifacts, Proc. IEEE Int. Conf. on Multimedia and Expo, 2009, pp. 1026-1029.

#### REFERENCES

1. Lopatina V.V., Senchenko V.G. Measurement of longitudinal, transverse and vertical displacements of a moving object relative to a stationary base. *Jekspluatacijamorskogotransporta* [Operation of Maritime Transport] №2(95), 2020, pp. 31-34.
2. Poujouly S., Journet B. A twofold modulation frequency laser range finder. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2002, № 4, с. 356–363.
3. X. Y. Zheng, C. Zhao, H. Y. Zhang, Z. Zheng and H. Z. Yang. Coherent dual-frequency lidar system design for distance and speed measurements, 2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Laser Technology and Applications, Vol. 10619. International Society for Optics and Photonics, 2018.
4. F. X. Jia, J. Y. Yu, Z. L. Ding and F. Yuan. Research on real-time laser range finding system. Applied Mechanics and Materials. Vol. 347. Trans Tech Publications, 2013.
5. Beraldin J.-A., Steenaart W. Overflow Analysis of a Fixed-Point Implementation of the Goertzel Algorithm. IEEE Transactions on circuits and systems, 1989, Vol. 36, No. 2, pp. 322–324.
6. Finlayson D.M., Sinclair B. Advances in Lasers and Applications. CRC Press, 1999, 346 p.
7. A.V. Bakholdin, G.I. Romanova, G.I. Tsukanov. Theory and methods of designing optical systems. Part I - St. Petersburg: ITMO University, 2011, 104 p.