

## СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРООБЪЕКТОВ

В.И. Батшев<sup>1,2</sup>

batshev@bmstu.ru

SPIN-код: 6264-8316

Н.А. Булыгина<sup>3</sup>

bulyginan.a@yandex.ru

SPIN-код: 4478-4669

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,  
Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»,  
Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Статья посвящена разработке стереоскопического видеоспектрометра, позволяющего регистрировать трехмерные спектральные изображения объектов с большой скоростью, высоким пространственным и спектральным разрешением. В качестве спектрального элемента выбран акустооптический фильтр. Проанализированы проблемы, возникающие при проектировании оптических систем для таких фильтров. Разработана параксиальная оптическая система компактного спектрометра с использованием бипризмы для одновременного формирования изображений наблюдаемого объекта с двух ракурсов на одном матричном приемнике излучения. Выполнена оценка качества изображения и проанализированы факторы, влияющие на него. Предложено общее направление совершенствования оптической системы для улучшения ее характеристик.

### Ключевые слова

Стереоскопический объектив, микрообъект, акустооптический фильтр, спектроскопия, бипризма, микроскопия, трехмерное изображение, исследование аберраций

Поступила в редакцию 10.06.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

---

**Введение.** Стереоскопические микроскопические системы находят применение в разных сферах науки и техники, например, при изучении микроорганизмов, процессов, происходящих в живых тканях и клетках организмов [1], для систем машинного зрения [2], в медицине [3, 4]. Они позволяют получать изображение в трех пространственных измерениях посредством объединения двух изображений объекта, получаемых с двух различных ракурсов. Стереомикроскопы применяют тогда, когда восприятие глубины и контрастности критично для интерпретации структуры образца. Построение двух изображений с различных ракурсов осуществляется путем разделения в пространстве двух оптических каналов. Распространено построение по схеме, сходной со схемой Грену [5] или Аббе, с двумя отдельными объективами и двумя приемниками изображения [6]. Возможно угловое разделение каналов [6]. Каналы могут быть также разделены с помощью бипризмы, что позволяет получать более простые и компактные системы [7–10].

Следующим шагом в развитии данного направления может стать сочетание спектральной визуализации объекта с трехмерной. Данный шаг может быть полезен для решения многих исследовательских задач. Как трехмерные, так и спектральные изображения предоставляют оператору важную информацию об объекте, и их объединение способствует более полному восприятию и пониманию структуры реального объекта. Использование стереоскопических систем позволяет исследовать пространственное распределение спектральных свойств объекта по его объему или по поверхности, в том числе неплоской, т. е. работают в трех пространственных и спектральной координатах [6, с. 1]. Таким образом представляется возможным получение информации одновременно о форме объекта, его размерах и структуре, составе и пространственном распределении веществ, составляющих объект. Подобные приборы могут найти применение в биологии и медицине, в частности в микробиологических исследованиях.

Авторы предлагают построить стереоскопический спектрометр на базе схемы формирования стереоизображения с помощью бипризмы путем внедрения компонента, осуществляющего выделение необходимой спектральной составляющей.

**Требования к спектрометру.** Ставится задача разработки оптической схемы в области параксиальной оптики перестраиваемого стереоскопического спектрометра, применимого для наблюдения за динамическими микрообъектами.

Область применения прибора обуславливает предъявляемые к нему требования. Прибор должен строить изображение объекта в узкой составляющей спектра для видимого диапазона частот и обеспечивать скорость перестройки, достаточную для анализа спектральных свойств объекта в режиме реального времени.

К изображающим спектрометрам с возможностью спектральной перестройки относятся акустооптический (АО) фильтр и жидкокристаллические (ЖК) фильтры. Последние не обладают достаточной скоростью перестройки для исследования быстропротекающих процессов с длительностью меньше секунды, характерной для процессов, протекающих в живых организмах [11, 12]. Поэтому целесообразным представляется выбор АО-фильтра.

Акустооптические фильтры относятся к электронно-перестраиваемым фильтрам, следовательно, в конструкции АО-фильтра нет движущихся частей, что определяет следующие его достоинства: простота конструкции прибора, высокая точность регулировки [6]. Эти преимущества наряду с малым размером АО-ячейки делают прибор компактным, легким и удобным в использовании.

**Требования к оптической схеме спектрометра.** Сформулируем основные требования к оптической системе разрабатываемого спектрометра.

1. Стереоскопические системы должны иметь глубину резко изображаемого пространства (ГРИП), представляющую собой диапазон расстояний от объектива до объекта наблюдения, в пределах которого обеспечивается высокое качество изображения объекта, достаточную для получения резкого и точного изображения трехмерного объекта.

2. Разрешающая способность должна составлять не менее 30 лин/мм для матричного приемника, работающего в видимом диапазоне длин волн, т. е. пятно рассеяния должно занимать порядка пяти пикселей при размере пикселя 5,0...6,5 мкм.

3. Применение АО-фильтра также вносит свои требования к оптической схеме прибора. В первую очередь это необходимость использования поляризаторов для выделения необходимого порядка дифракции излучения [13]. Применение поляризаторов и АО-кристалла будет ограничивать углы падения на их входные грани значением  $2^\circ$ . Использование пленочных поляризаторов позволяет увеличить угол падения на поляризатор до  $20^\circ$ , что, однако, не устраняет ограничений.

**Оптическая система.** С учетом всех требований была разработана оптическая схема прибора, представленная на рис. 1.

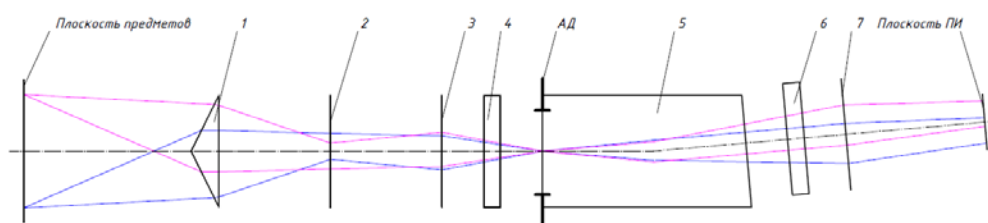


Рис. 1. Оптическая схема стереоскопического спектрометра

Апертурная диафрагма размещается на входной грани АО кристалла и не требует размещения как дополнительного элемента в схеме.

Для получения трехмерного изображения необходимо иметь в оптической схеме два канала, у каждого из которых свой входной зрачок. Для этого в схеме данного прибора использована бипризма 1. Использование бипризмы обеспечивает возможность получения простой и компактной схемы прибора. Бипризма разделяет падающее от объекта излучение на два пучка, один из которых проходит через верхнюю, а второй — через нижнюю грань бипризмы. Рассеивающая линза 2 уменьшает полевой угол падающих пучков, и излучение, пройдя через положительную линзу 3, параллельным пучком проходит через пару поляризаторов 4 и 6 и АО-кристалл 5, после чего фокусируется линзой 7 на матричном приемнике 8.

Поскольку угол падения лучей на входную грань АО-кристалла ограничен значением  $2^\circ$ , линейное поле для линзы 3 должно быть мало. Следовательно, задача рассеивающей линзы — обеспечить малое поле для линзы 3, т. е. уменьшить поле в пространстве объектов.

Ограничения значений углов падения обуславливают небольшое поле зрения в пространстве предметов. С помощью усложнения оптической схемы путем внедрения дополнительных оптических компонентов поле зрения можно увеличить.

Путем моделирования и оптимизации в программе Zemax была получена оптическая схема, удовлетворяющая поставленным условиям.

**Оценка качества изображения.** Как известно, лучшим качеством изображения оптическая система будет обладать при полной симметрии расположения компонентов в схеме относительно апертурной диафрагмы. Размещение апертурной диафрагмы в данной схеме на входной грани АО-кристалла является нарушением данного условия и в оптической системе с реальными компонентами будет приводить к возникновению комы и астигматизма [14].

Наиболее выгодной с точки зрения исправления aberrаций является конфокальная схема, в которой изображение формируется в плоскости дифракции в АО-кристалле. При такой схеме в изображении нет спектрального дрейфа, т. е. перемещения изображения по поверхности изображения при спектральной перестройке, дисторсии. Однако для получения качественного изображения необходима дополнительная калибровка, поэтому в данной схеме применена не конфокальная схема, а схема дифракции в параллельных пучках. При использовании данной схемы среди aberrационных искажений будут присутствовать лишь спектральный дрейф и дисторсия [15].

Наличие бипризмы обуславливает наличие aberrаций, характерных для призмы или клиньев в расходящемся пучке лучей: сферической aberrации, комы, астигматизма, хроматического сдвига изображения перпендикулярно оптической оси [9, 10]. Кома, сферическая aberrация проявляются в незначительной степени.

Поскольку поляризаторы и АО-кристалл расположены в параллельном пучке лучей, они не вносят монохроматических aberrаций.

Для количественной оценки качества оптической системы был выполнен анализ в программе Zemax. Ниже приведены результаты анализа качества изображения. Модуляционно-передаточная характеристика системы представлена на рис. 2.

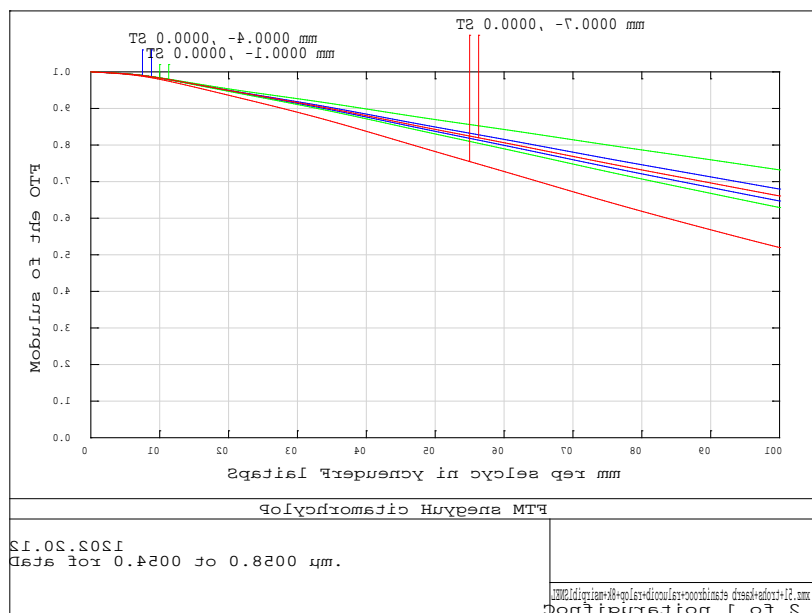


Рис. 2. График модуляционно-передаточной функции

## Стереоскопический спектральный фильтр для исследования микробъектов

Оптическая система спектрометра имеет разрешение более 100 лин/мм, достаточное для подобных систем, что, однако, не гарантирует хорошего качества изображения для системы с реальными компонентами.

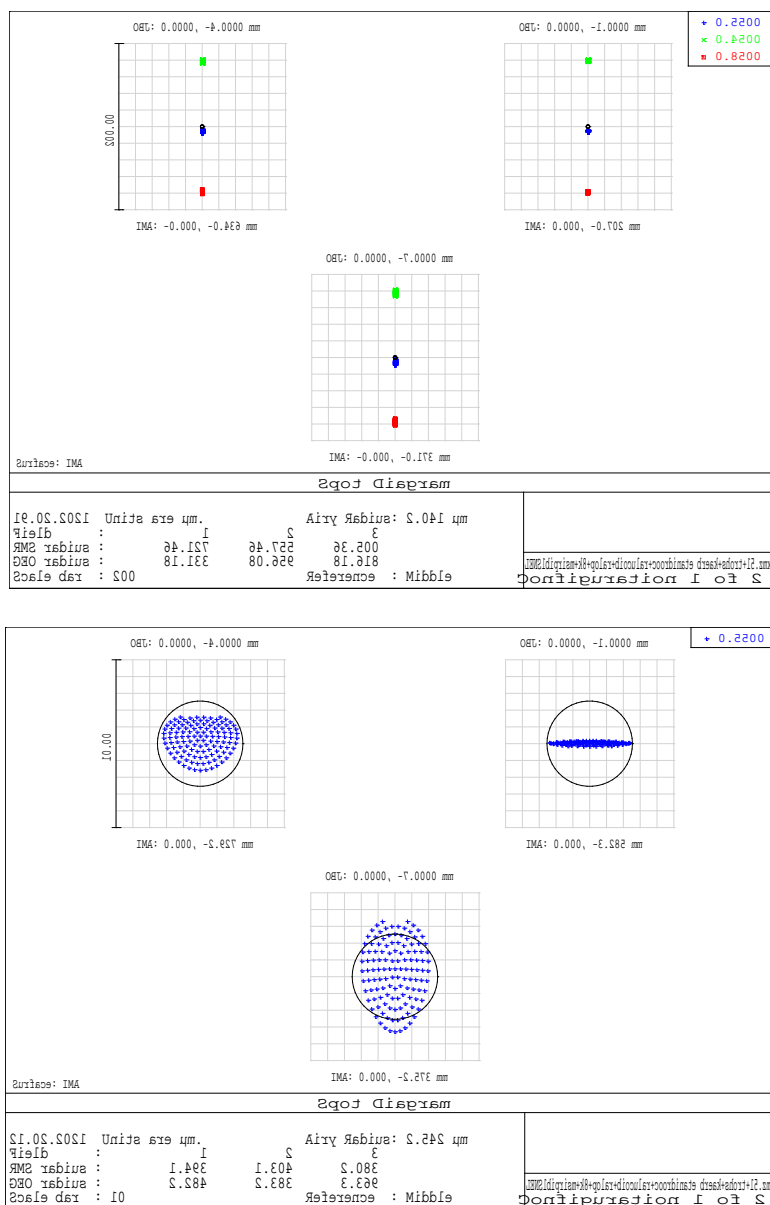


Рис. 3. Диаграммы пятен рассеяния.

Диаграмма пятен рассеяния системы представлена на рис. 3. Как и предполагалось, система обладает значительным спектральным дрейфом: изображение при перестройке будет смещаться в диапазоне (-80; +80) мкм. Согласно полученному в программе Zemax графику дисторсии (рис. 4) следует, что дисторсия равна 1,2 %.

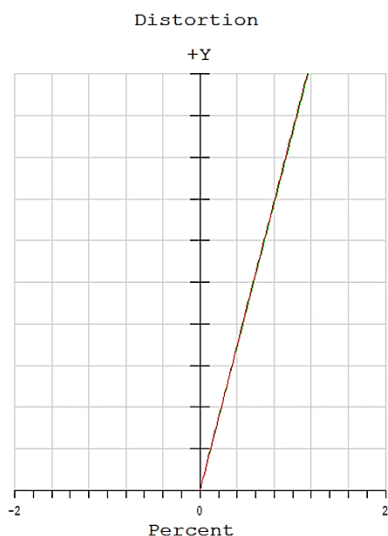


Рис. 4. График дисторсии

При моделировании была получена предельная ГРИП порядка 30 мкм. В данном диапазоне значений положений предметной плоскости размер среднеквадратичного пятна рассеяния не превышал 30 мкм. Значение ГРИП может быть увеличено либо путем снижения апертурных характеристик системы, либо путем проектирования соответствующих оптических компонентов.

Улучшение качества системы возможно при внедрении корректоров, приведения схемы к симметричному варианту, однако в данной работе оптическая система спектрометра рассматривается лишь в параксиальном приближении.

**Заключение.** В представленной работе описана оптическая схема стереоскопического акустооптического фильтра. Разработанная схема может быть использована для наблюдения и исследования динамических микрообъектов в биологии и медицине.

Использование АО-фильтра позволяет изучать быстропротекающие процессы, но при этом ограничивает светосилу и поле зрения в пространстве предметов. Кроме того, в системе присутствуют спектральный дрейф и дисторсия, которые, однако, могут быть скомпенсированы благодаря использованию специально рассчитываемых линзовых корректоров.

## Литература

- [1] Hu Z., Luo H., Du Y., et al. Fluorescent stereo microscopy for 3D surface profilometry and deformation mapping. *Opt. Express*, 2013, vol. 21, no. 10, pp. 11808–11818. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.21.011808>
- [2] Батшев В.И., Мачихин А.С., Горевой А.В. и др. Миниатюрный стереоскопический объектив для измерения геометрических параметров труднодоступных технических объектов. *Оптический журнал*, 2019, т. 86, № 6, с. 45–49. DOI: <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-86-06-45-49>
- [3] Probst T., Maninis K.K., Chhatkuli A., et al. Automatic tool landmark detection for stereo vision in robot-assisted retinal surgery. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 612–619. DOI: <https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2778020>
- [4] Keller K., State A. A single-imager stereoscopic endoscope. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 7964, art. 79641Z. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.873011>
- [5] Hu Y., Chen Q., Tao T., et al. Absolute three-dimensional micro surface profile measurement based on a Greenough-type stereomicroscope. *Meas. Sci. Technol.*, 2017, vol. 28, no. 4, art. 045004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5a2dm>

- [6] Machikhin A.S., Pozhar V.E. Stereoscopic 3-dimensional spectral imaging systems based on a single acousto-optical tunable filter. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2015, vol. 661, art. 012041. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/661/1/012041>
- [7] Zhang S., ed. Handbook of 3D machine vision. Optical metrology and imaging. CRC Press, 2016. 403 p.
- [8] Genovese K., Casaletto L., Rayas J.A., et al. Stereo-Digital Image Correlation (DIC) measurements with a single camera using a biprism. *Opt. Lasers Eng.*, 2013, vol. 51, no. 3, pp. 278–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.10.001>
- [9] Qian B., Lim K.B. Image distortion correction for single-lens stereo vision system employing a biprism. *J. Electron. Imaging*, 2016, vol. 25, no. 4, art. 043024. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JEI.25.4.043024>
- [10] Wu L., Zhu J., Xie H., et al. Single-lens 3D digital image correlation system based on a bilateral telecentric lens and a bi-prism: systematic error analysis and correction. *Opt. Lasers Eng.*, 2016, vol. 87, pp. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.02.006>
- [11] Chao T.H., Lu T.T., Davis S.R., et al. Monolithic liquid crystal waveguide Fourier transform spectrometer for gas species sensing. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 8055, art. 805506. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.886146>
- [12] Hu C., Xie P., Huo S., et al. A liquid crystal variable retarder-based reflectance difference spectrometer for fast, high precision spectroscopic measurements. *Thin Solid Films*, 2014, vol. 571-3, pp. 543–547. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.12.034>
- [13] Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М., Мир, 1987.
- [14] Русинов М.М. Техническая оптика. Л., Машиностроение, 1979.
- [15] Machikhin A., Batshev V., Pozhar V. Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems. *J. Opt. Soc. Am.*, 2017, vol. 34, no. 7, pp. 1109–1113. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.34.001109>

**Батшев Владислав Игоревич** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н. Э. Баумана, научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Российская Федерация.

**Булыгина Надежда Александровна** — инженер-исследователь, АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Батшев В.И., Булыгина Н.А. Стереоскопический спектральный фильтр для исследования микрообъектов. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 07(60). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-07-713>

---

## NOTARIAL EXAMINATION OF A WEBSITE ON THE INTERNET AS EVIDENCE IN CIVIL PROCEDURAL LAW

V.I. Batshev<sup>1,2</sup>

batshev@bmstu.ru

SPIN-code: 6264-8316

N.A. Bulygina<sup>3</sup>

bulyginan.a@yandex.ru

SPIN-code: 4478-4669

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Scientific and Technological Center for Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>AO «Scientific and Production Corporation «Precision instrumentation systems», Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The article is devoted to the development of a stereoscopic video spectrometer, which allows registering three-dimensional spectral images of objects at high speed, high spatial and spectral resolution. An acousto-optic filter was selected as a spectral element. The problems arising in the design of optical systems for such filters are analyzed. A paraxial optical system of a compact spectrometer using a biprism for the simultaneous formation of images of the observed object from two angles on one matrix radiation detector has been developed. The assessment of the image quality is carried out and the factors influencing it are analyzed. A general direction for improving the optical system to improve its characteristics is proposed.

### Keywords

Stereoscopic lens, micro-object, acousto-optic filter, spectroscopy, biprism, microscopy, three-dimensional image, aberration study

Received 10.06.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

---

### References

- [1] Hu Z., Luo H., Du Y., et al. Fluorescent stereo microscopy for 3D surface profilometry and deformation mapping. *Opt. Express*, 2013, vol. 21, no. 10, pp. 11808–11818. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.21.011808>
- [2] Batshev V.I., Machikhin A.S., Gorevoy A.V., et al. Miniature stereoscopic objective for measuring geometric parameters of poorly accessible technical objects. *Opticheskiy zhurnal*, 2019, vol. 86, no. 6, pp. 45–49. DOI: <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-86-06-45-49> (in Russ.). (Eng. version: *J. Opt. Technol.*, 2019, vol. 86, no. 6, pp. 362–366. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000362>)
- [3] Probst T., Maninis K.K., Chhatkuli A., et al. Automatic tool landmark detection for stereo vision in robot-assisted retinal surgery. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 612–619. DOI: <https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2778020>
- [4] Keller K., State A. A single-imager stereoscopic endoscope. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 7964, art. 79641Z. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.873011>
- [5] Hu Y., Chen Q., Tao T., et al. Absolute three-dimensional micro surface profile measurement based on a Greenough-type stereomicroscope. *Meas. Sci. Technol.*, 2017, vol. 28, no. 4, art. 045004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5a2dm>



- [6] Machikhin A.S., Pozhar V.E. Stereoscopic 3-dimensional spectral imaging systems based on a single acousto-optical tunable filter. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2015, vol. 661, art. 012041. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/661/1/012041>
- [7] Zhang S., ed. Handbook of 3D machine vision. Optical metrology and imaging. CRC Press, 2016. 403 p.
- [8] Genovese K., Casaletto L., Rayas J.A., et al. Stereo-Digital Image Correlation (DIC) measurements with a single camera using a biprism. *Opt. Lasers Eng.*, 2013, vol. 51, no. 3, pp. 278–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.10.001>
- [9] Qian B., Lim K.B. Image distortion correction for single-lens stereo vision system employing a biprism. *J. Electron. Imaging*, 2016, vol. 25, no. 4, art. 043024. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JEI.25.4.043024>
- [10] Wu L., Zhu J., Xie H., et al. Single-lens 3D digital image correlation system based on a bilateral telecentric lens and a bi-prism: systematic error analysis and correction. *Opt. Lasers Eng.*, 2016, vol. 87, pp. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.02.006>
- [11] Chao T.H., Lu T.T., Davis S.R., et al. Monolithic liquid crystal waveguide Fourier transform spectrometer for gas species sensing. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 8055, art. 805506. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.886146>
- [12] Hu C., Xie P., Huo S., et al. A liquid crystal variable retarder-based reflectance difference spectrometer for fast, high precision spectroscopic measurements. *Thin Solid Films*, 2014, vol. 571-3, pp. 543–547. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.12.034>
- [13] Yariv A., Yeh P. Optical waves in crystals. Wiley, 1984. (Russ. ed.: *Opticheskie volny v kristallakh*. Moscow, Mir Publ., 1987.)
- [14] Rusinov M.M. *Tekhnicheskaya optika* [Technical optics]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979 (in Russ.).
- [15] Machikhin A., Batshev V., Pozhar V. Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems. *J. Opt. Soc. Am.*, 2017, vol. 34, no. 7, pp. 1109–1113. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.34.001109>

**Batshev V.I.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, research fellow, Scientific and Technological Center for Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation.

**Bulygina N.A.** — Research Engineer, AO “Scientific and Production Corporation “Precision instrumentation systems”, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Batshev V.I., Bulygina N.A. Notarial examination of a website on the Internet as evidence in civil procedural law. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 07(60). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-07-713.html> (in Russ.).