

Научная статья

УДК 520.2.062; 535.317.23

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-57-61>

Метод оптимизации погрешностей волнового фронта регистрируемого излучения для крупногабаритных информационно-измерительных оптических систем

Виктор Васильевич Сычев¹, Андрей Иванович Клем²✉

¹ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия, viktorsychev@list.ru

² ПАО «Компания «Сухой», Москва, Россия, black.n.hot.ice@gmail.com✉

Аннотация. Разработан метод оптимизации погрешностей волнового фронта регистрируемого излучения оптической системы крупногабаритного телескопа с помощью перераспределения погрешностей по полю изображения. Для решения оптимизационной задачи равномерного распределения аберраций по полю изображения крупногабаритного телескопа на примере криотелескопа диаметром 12 м проведена вариация параметров вторичного зеркала в пакете Zemax-EE. Представлены результаты расчётов оптических схем традиционным методом и предложенным методом оптимизации погрешностей волнового фронта излучения. Рассмотрены преимущества и недостатки обоих методов.

Ключевые слова: волновой фронт, телескоп, погрешность, оптическая схема, аберрация, оптимизация, вторичное зеркало

Для цитирования: Сычев В. В., Клем А. И. Метод оптимизации погрешностей волнового фронта регистрируемого излучения для крупногабаритных информационно-измерительных оптических систем // Измерительная техника. 2021. № 2. С. 57–61. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-57-61>

Method for optimizing the errors of the wavefront of recorded radiation for large-size information-measuring optical systems

Victor V. Sychev¹, Andrey I. Klem²✉

¹ Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology), Moscow, Russia, viktorsychev@list.ru

² JSC "Aviation Holding Company Sukhoi", Moscow, Russia, black.n.hot.ice@gmail.com✉

Abstract. The article proposes a new method for increasing the information content of the image by minimizing the errors of the optical system of a large telescope using the redistribution of errors over the image field. Variation of the parameters of the secondary mirror is carried out to solve the optimization problem of uniform distribution of aberrations over the image field of a large telescope using the example of a cryotelescope with a diameter of 12 m in the Zemax-EE package. The results of calculations of optical schemes by the traditional method and by the method of optimization of the errors of the radiation wavefront are presented. The advantages and disadvantages are considered.

Keywords: wavefront, telescope, error, optical design, aberration, optimization, secondary mirror

Введение. Создание крупногабаритных оптических телескопов для исследования космического пространства является актуальной задачей для человечества. К разработке ряда проектов, связанных с расширением задач космических исследований, привлечено мировое научное сообщество. Оптические схемы в этих проектах включают высокоточные крупногабаритные оптические детали, размеры которых часто превышают единицы метров, а требуемые отклонения геометрических параметров формы поверхностей зеркал и их подложек порой достигают долей нанометра. Прецизионные характеристики оптических

деталей необходимы для уменьшения влияния светорассеивающих характеристик зеркал на результаты работы систем и подлежат контролю при производстве и эксплуатации. Контроль крупногабаритной оптики – сложная задача, что обусловлено, например, большой (до нескольких сотен килограммов) массой контролируемых деталей. Перемещение таких деталей может привести к изменению формы поверхностей. С этим связан ряд дополнительных трудностей при контроле качества прецизионных поверхностей, в частности, вибрации при измерениях. В настоящее время разрабатываются новые оптические методы контроля.

Необходимы новые алгоритмы и программное обеспечение методов измерений при контроле крупногабаритных оптических деталей.

Анализ погрешностей крупногабаритного телескопа с главным зеркалом диаметром 12 м (и даже более) показал, что количество искажающих факторов увеличивается с увеличением диаметра телескопа. На качество получаемого телескопом изображения опережающее влияние имеют искажающие факторы [1], которые необходимо устранять или минимизировать в совокупной погрешности телескопа с последующей адаптивной коррекцией остаточных искажений, как описано в [2].

Однако помимо увеличения количества доминирующих искажающих факторов изменяется и характер их влияния на крупногабаритный телескоп. Это касается ряда искажающих факторов, например, фактора жёсткости, влияние которого увеличивается пропорционально кубу диаметра зеркала [1]. Кроме того, происходит перераспределение центров масс отдельных узлов и, следовательно, возникают весовые деформации в различных местах зеркала. Изменяется также и характер влияния абберационных искажающих факторов. Влияние и компенсация аббераций в оптических системах является актуальной проблемой, ей посвящено множество исследований [3–8].

Цель настоящей работы – оптимизация абберационной составляющей погрешности оптической системы астрофизического комплекса для повышения информативности телескопа (получения большего количества полезной информации наблюдений) путём предложенного перераспределения аббераций по полю изображения оптической системы на примере космического криотелескопа КТ-12 [9].

Оптическая система космического криотелескопа КТ-12. Рассмотрим абберации оптической системы КТ-12. В качестве оптической схемы телескопа космической обсерватории выбрана классическая двухзеркальная схема

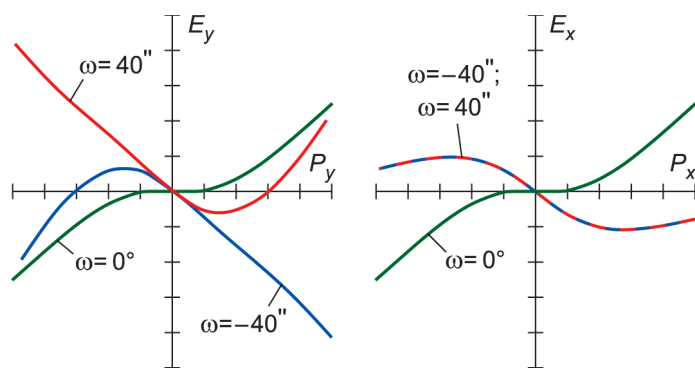


Рис. 1. Диаграмма поперечных аббераций по нормализованным координатам P_y , P_x соответственно в меридиональном E_y и сагиттальном E_x направлениях для разных углов ω поля зрения

Fig. 1. Diagram of transverse aberrations along the normalized coordinate P_y in the meridional direction E_y and along the normalized coordinate P_x in the sagittal direction E_x for different values of the angles of the field of view ω

Кассегрена. Оптическая схема КТ-12 опубликована в [9]. Требования к оптической схеме определены научными задачами проекта и условиями работы телескопа на орбите. В частности, необходимо уменьшать собственное излучение телескопа до уровня космического фона, для чего следует минимизировать внешнее тепловое излучение, при этом требуется единая система криогенного охлаждения, что, в свою очередь, требует компактности расположения аппаратуры телескопа. Все указанные обстоятельства обусловили конструкцию телескопа как двухзеркальную систему с глубоким главным зеркалом, в которой вторичное зеркало находится между плоскостью входного зрачка и вершиной главного зеркала.

Конструктивные параметры главного параболического зеркала – диаметр 12 м, фокусное расстояние 2,8 м, глубина 3,214 м, вторичного гиперболического зеркала – диаметр $595 \cdot 10^{-3}$ м, стрелка прогиба $154,4 \cdot 10^{-3}$ м. Мнимый фокус F_1 гиперболического зеркала совпадает с фокусом F параболического зеркала, расстояние между геометрическими фокусами F_1 , F_2 этих зеркал составляет 4 м.

Моделирование оптической системы телескопа КТ-12 в среде Zemax. Абберационный расчёт оптической системы КТ-12, включающий её моделирование, анализ и оптимизацию, выполнен в программном пакете Zemax-EE. В качестве расчётной принята длина волны регистрируемого криотелескопом излучения $\lambda = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м. Задано три угловых поля с углами при входном зрачке оптической системы $\omega = 0$; $+40''$; $-40''$. Диаметры апертур фиксированные, эксцентриситет e^2 входного зрачка переменный для целей дальнейшей оптимизации оптической системы.

Координаты входного и выходного зрачков и поля зрения нормализованы по полевым углам ω , не зависят от способа их задания и поля зрения. Метод нормализации – на единичном круге. Целесообразность использования нормализованных координат состоит в том, что некоторые лучи всегда имеют те же самые координаты, независимо от размера и положения предмета или входного зрачка.

Входной зрачок определяется диаметром составного главного зеркала 12 м. Выходной зрачок диаметром $589,4328 \cdot 10^{-3}$ м расположен на расстоянии $3867,213 \cdot 10^{-3}$ м от входного.

С помощью программы оптимизации пакета Zemax путём вариации значения эксцентриситета e^2 входного зрачка получена конфигурация оптической системы с равномерным распределением аббераций по полю изображения по сравнению с расчётной моделью оптической системы. Для оптической системы эксцентриситет входного зрачка оптимизированной системы составляет $e^2 = 1,147243$.

Результаты информационно-метрологической оптимизации оптической системы телескопа КТ-12. Качественный анализ расчётной оптической системы целесообразно начать с лучевых поперечных аббераций, ограничивающих качество изображения КТ-12. Проекции векторов поперечных аббераций (E_x ; E_y) в системе координат OXY вдоль двух плоскостей срезов выходного зрачка – меридионального (нормализованная координата P_y) и сагиттального (нормализованная координата P_x), представлены на рис. 1.

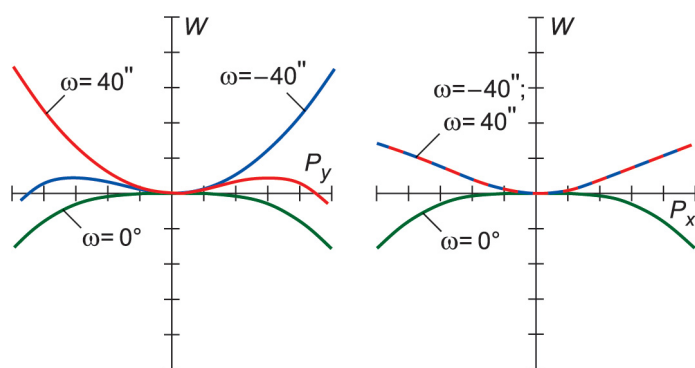


Рис. 2. Диаграмма волновых aberrаций W в меридиональном E_y и в сагитальном E_x направления для разных углов ω поля зрения

Fig. 2. Diagram of wave aberrations W in the meridional direction E_y and in the sagittal direction E_x for different values of the angles of the field of view ω

Меридиональной плоскостью положения главного луча для рассматриваемого случая точек поля, лежащих на оси Y , является плоскость YZ . Сагитальная плоскость ортогональна меридиональной плоскости YZ и также пересекает оптическую ось.

Диаграммы рис. 1 имеют вид S-образных кривых, характерных для оптической системы, где сферическая aberrация частично нивелируется дефокусировкой системы. В расчётной оптической системе качество изображения криотелескопа ограничивает сферическая aberrация. Для нивелирования её влияния, как указано выше, оптимизирована оптическая система с вариацией эксцентриситета выходного зрачка. В результате продольные aberrации распределены по полю более равномерно, а их максимальные значения составляют $100,1 \cdot 10^{-6}$ м.

Для диагностики качества расчётной и оптимизированной оптических систем необходимо рассмотреть наряду с диаграммой поперечных aberrаций диаграмму волновых aberrаций W в зависимости от нормализованных координат выходного зрачка (P_x ; P_y). Волновые aberrации представлены на рис. 2 в виде долей расчётной длины волны λ и характеризуются оптической разностью хода главного и рассматриваемого лучей до опорного источника в выходном зрачке. Согласно рис. 2 оптическая разность хода лучей составляет $3,02 \cdot 10^{-6}$ м. Оптическая система дифракционно ограничена, если значения волновой aberrации укладываются в четверть длины волны λ [10], что имеет место в рассматриваемом случае.

Для дальнейшего анализа оптимизированной оптической системы необходимо рассмотреть точечные диаграммы пятен рассеяния в выходном зрачке в зависимости от угла ω поля зрения (рис. 3). Наибольший диаметр пятна рассеяния точечного источника после оптимизации по среднеквадратическому значению (СКЗ) его радиального размера составляет $37,177 \cdot 10^{-6}$ м, и после оптимизации по радиусу круга R_k с центром в опорной точке, в пределы которого попадают все лучи (GEO), – $82,21 \cdot 10^{-6}$ м.

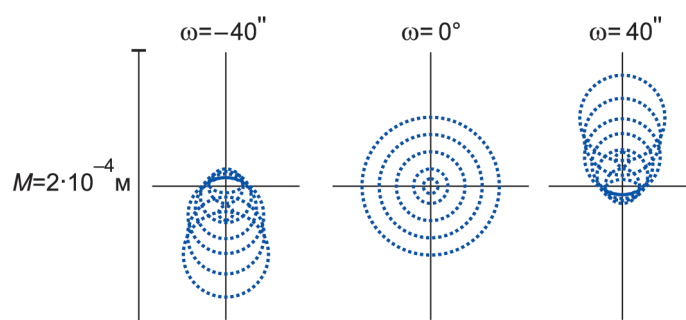


Рис. 3. Диаграмма пятен рассеяния трассируемых лучей для разных углов ω поля зрения; $M = 2 \cdot 10^{-4}$ м – масштаб поля зрения

Fig. 3. Diagram of the scattering spots of the traced rays for different values of the angles of the field of view ω , the indicated scale of the field of view is $M = 2 \cdot 10^{-4}$ m

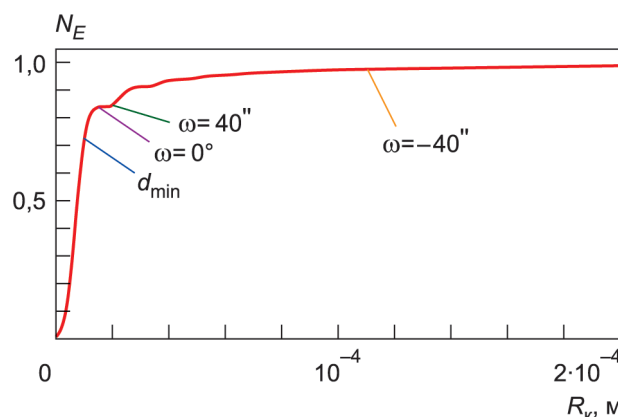


Рис. 4. Диаграмма дифракционной концентрации энергии N_E в круглой зоне R_k ; $d_{\min}$ – дифракционный предел точечного источника; ω – рассматриваемые углы поля зрения

Fig. 4. Diagram of the diffraction energy concentration N_E in a circular zone R_k ; $d_{\min}$ – the diffraction limit of a point source; ω – the considered values of the angles of the field of view

Анализ диаграммы дифракционной концентрации энергии N_E в круглой зоне для расчётной и оптимизированной систем, представленной на рис. 4, позволяет сделать вывод, что дифракционная кривая и кривые для заданных углов ω поля зрения совпадают.

Результаты aberrационных расчётов оптической схемы предложенным в данной работе методом перераспределения погрешностей по полю изображения, реализующим метрологический подход к оптимизации параметров оптической системы, и результаты расчётов традиционным методом сведены в таблицу, где ТМ, ПМ – традиционный и предложенный методы. График концентрации энергии: дифракционная кривая и кривые для заданных углов поля совпадают.

Преимущества предложенного метода перераспределения aberrаций по полю изображения оптической системы по сравнению с традиционным подходом, принятым в оптике. Традиционный метод успешно применяется

для телескопов с главным зеркалом диаметром до 6 м и позволяет избежать рассеяния точечного источника в центре поля. Однако ближе к краям поля изображения пятно рассеяния изображения становится значительным, что особенно негативно влияет на качество изображения крупногабаритных оптических систем.

При использовании предложенного метода за счёт ухудшения (в пределах допускаемых значений) качества изображения в центре поля можно уменьшить размер пятна рассеяния на краях поля изображения и таким образом выровнять

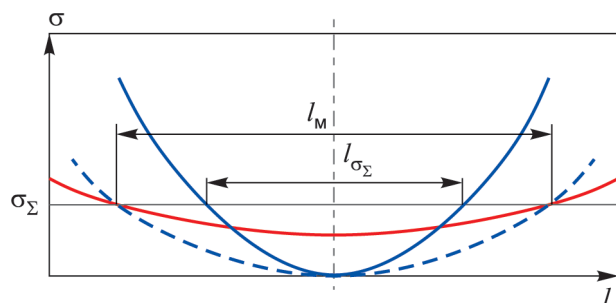


Рис. 5. Зависимость погрешности оптической системы σ от линейного размера поля изображения l при традиционном и предложенном метрологическом подходах – соответственно синяя и красная кривые; пунктирная линия – кривая расширения поля изображения за счёт установки дополнительных оптических элементов

Fig. 5. Dependence of the error of the optical system σ on the linear size of the image field l with the traditional and the proposed metrological approaches – blue and red curves, respectively; dotted line – curve of image field expansion due to the installation of additional optical elements

размер пятна изображения по всему полю. Суть метрологического подхода состоит в увеличении количества получаемой оптической системой информации за счёт увеличения площади изображения с допустимым уровнем разрешения. Для достижения аналогичного эффекта традиционный подход потребует использования дополнительного элемента – компенсатора аберраций по полю изображения.

Традиционный подход без применения компенсатора аберраций при выборе оптической поверхности зеркала, используемый для телескопов с зеркалом диаметром до 6 м, даёт допустимые погрешности как в центре поля, так и на краю. Однако для зеркал больших диаметров (более 8 м) аберрации в центре поля и на краях сильно разнятся, что неприемлемо.

Проведенные расчёты и последующий анализ их результатов показал, что варианты расчётов схем в рамках традиционного и предложенного авторами настоящей статьи методов находятся в пределах допускаемой погрешности оптической системы. Однако преимущество предложенного метода состоит в более равномерном распределении аберраций по полю, что позволяет повысить информативность телескопа. Кроме того, перераспределение погрешностей по полю изображения позволяет снизить требования к установке сегментов на составной поверхности зеркала за счёт исключения дополнительных оптических элементов, корректирующих аберрации по полю изображения. Сравнение традиционного и предложенного в статье метрологического подхода к решению проблемы создания оптической системы с оптимальными аберрационными характеристиками наглядно представлено на рис. 5 в виде зависимости погрешности оптической системы σ от линейного размера поля изображения l ; σ_Σ – уровень совокупной погрешности оптической системы; l_Σ – линейный размер поля изображения при нулевой погрешности традиционного

расчёта оптическими методами; l_M – линейный размер поля изображения при перераспределении погрешностей.

Метрологический метод перераспределения погрешностей по полю изображения позволяет: уменьшить совокупную погрешность оптической системы за счёт уменьшения количества её элементов, которые являются дополнительными источниками погрешностей;

снизить требования к позиционированию составных апертур и прочих элементов оптической схемы путём исключения дополнительных оптических элементов, корректирующих аберрации по полю изображения;

увеличить число разрешаемых элементов изображения и повысить информативность астрофизического комплекса;

Сравнительная таблица результатов расчетов оптической схемы КТ-12

Расчётная величина	Результат расчёта		Предпочтительный метод расчёта
	ТМ	ПМ	
Эксцентриситет выходного зрачка e^2	1,147278	1,147243	ПМ
Сферическая аберрация, мкм, в центре ($\omega=0$) при меридиональном и сагиттальном направлениях	0,1548	100,1	ТМ
Сферическая аберрация, мкм, на краю поля ($\omega=40^\circ$): меридиональное направление сагиттальное направление	151,0	94,0	ПМ
	127,0	40,0	ПМ
Сферическая аберрация, мкм, на краю поля ($\omega=-40^\circ$): меридиональное направление сагиттальное направление	151,0	94,0	ПМ
	127,0	40,0	ПМ
Волновая аберрация, мкм, в центре ($\omega=0$) при меридиональном и сагиттальном направлениях	0	1,26	ТМ
Волновая аберрация, мкм, на краю поля ($\omega=\pm 40^\circ$): меридиональное направление сагиттальное направление	4,08	3,02	ПМ
	2,40	1,12	ПМ
Волновая аберрация, мкм, на краю поля ($\omega=-40^\circ$): меридиональное направление сагиттальное направление	151,0	94,0	ПМ
	127,0	40,0	ПМ
Диаграмма пятна рассеяния (СКЗ), мкм: в центре ($\omega=0$) на краю поля ($\omega=\pm 40^\circ$)	0,055	34,481	ТМ
	59,684	37,177	ПМ
Диаграмма пятна рассеяния (GEO), мкм: в центре ($\omega=0$) на краю поля ($\omega=\pm 40^\circ$)	0,077	50,494	ТМ
	59,684	82,210	ПМ

расширить возможности предложенного метода в части других влияющих факторов, например, жёсткости конструкции телескопа.

Заключение. Для крупногабаритного телескопа оптимизация аберраций (погрешностей) оптической системы впервые производится в рамках метрологического подхода к оптимизации оптической системы путём перераспределения погрешностей по полю изображения.

Более равномерное распределение аберраций по полю изображения, полученное в ходе оптимизации оптической схемы КТ-12, уменьшает влияние аберрационного фактора в несколько раз, увеличивая количество разрешаемых точек изображения, получаемого оптической системой. Выигрыш в информативности достигается за счёт увеличения площади изображения с допустимой погрешностью.

Список литературы

1. Сычев В. В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении: монография. Старый Оскол: Тонкие наукоёмкие технологии, 2005. 464 с.
2. Сычев В. В., Клем А. И. Проблемы адаптации в космическом телескопе обсерватории «Миллиметрон» // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 1. С. 93–102. <https://doi.org/10.15372/AOO20170113>
3. Клебанов Я. М., Карсаков А. В., Хонина С. Н., Давыдов А. Н., Поляков К. А. Компенсация аберраций волнового фронта в телескопах космических аппаратов с регулировкой температурного поля телескопа. // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 1. С. 30–36. <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2017-41-1-30-36>
4. Кожевников А. В. Исследование влияния аберраций на качество изображения в оптических системах. Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). Самара: Новая техника, 2017. С. 344–348.
5. Кулакова Н. Н., Каледин С. Б., Сазонов В. Н. Анализ погрешностей измерения фокусного расстояния ИК-объективов гониометрическим методом // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 4. С. 17–26. <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-4-17-26>
6. Тимашова Л. Н., Кулакова Н. Н., Сазонов В. Н. Оптико-электронная система для измерения сферической аберрации // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 6. С. 112–122. <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-6-112-122>
7. Левин И. А. Термооптические аберрации радиально-симметричных дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 1. С. 51–56. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-1-51-56>

8. Селиверстова Е. В., Щербина Г. А., Шурыгин Б. М. Алгоритм нахождения аберрационных коэффициентов в космической оптико-электронной аппаратуре наблюдения // Журнал радиоэлектроники: сетевой журнал. 2017. № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec17/8/text.pdf> (дата обращения 27.01.2020).

9. Smirnov A., Graauw Th., Baryshev A., Bernardis P., Likhachev S., Radchenko D., Pilipenko S., Kardashev N., *Proceeding 26th International Symposium on Space Terahertz Technology*, Cambridge, MA, 16-18 March, 2015, ISSTT, 2015. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1916.2729>

10. *Handbook of Visual Optics, Volume Two: Instrumentation and Vision Correction*, 1 ed., ed. Artal P., Boca Raton, CRC Press, 2017, 404 p.

References

1. Sychev V. V. *Adaptivnyye opticheskiye sistemy v krupnogabaritnom teleskopostroyenii: monografiya*, Staryy Oskol, Tonkiye naukoemykiye tekhnologii Publ., 2005, 464 p. (in Russian).
2. Sychev V. V., Klem A. I. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 389–398. <https://doi.org/10.1134/S1024856017040121>
3. Klebanov Ya. M., Karsakov A. V., Honina S. N., Davydov A. N., Polyakov K. A., *Kompyuternaya optika*, 2017, vol. 41, no. 1, pp. 30–36 (in Russian). <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2017-41-1-30-36>
4. Kozhevnikov A. V., *Collection of reports of the 3rd International Conference and Youth School "Informatsionnyie tehnologii i nanotehnologii" (ITNT-2017)*, Samara, Novaya tehnika, 2017, pp. 344–348 (in Russian).
5. Kulakova N. N., Kaledin S. B., Sazonov V. N., *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Ser. Priborostroyenie*, 2017, no. 4, pp. 17–26 (in Russian). <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-4-17-26>
6. Timashova L. N., Kulakova N. N., Sazonov V. N., *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Ser. Priborostroyenie*, 2018, no. 6, pp. 112–122 (in Russian). <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-6-112-122>
7. Levin I. A., *Kompyuternaya optika*, 2016, vol. 40, no. 1, pp. 51–56 (in Russian). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-1-51-56>
8. Seliverstova E. V., Scherbina G. A., Shuryigin B. M., *Zhurnal radioelektroniki*, 2017, no. 12, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/dec17/8/text.pdf> (accessed: 27.01.2020).
9. Smirnov A., Graauw Th., Baryshev A., Bernardis P., Likhachev S., Radchenko D., Pilipenko S., Kardashev N., *Proceeding 26th International Symposium on Space Terahertz Technology*, Cambridge, MA, 16-18 March, 2015, ISSTT, 2015. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1916.2729>
10. *Handbook of Visual Optics, Volume Two: Instrumentation and Vision Correction*, 1 ed., ed. Artal P., Boca Raton, CRC Press, 2017, 404 p.

Статья поступила в редакцию 21.09.2020; принята к публикации 21.11.2020.