

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ИЗЛУЧЕНИЯ, РЕГИСТРИРУЕМОГО ТЕЛЕСКОПОМ

В.В. Сычев¹

viktorsychev@bmstu.ru

А.И. Клем^{1,2}

black.n.hot.ice@gmail.com

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлено решение информационно-метрологической задачи минимизации погрешностей волнового фронта излучения, регистрируемого телескопом, на примере моделирования и абберационного расчета оптической системы космического телескопа обсерватории «Миллиметрон». Показано, что на космический телескоп действует множество факторов, ухудшающих качество получаемого телескопом изображения. Необходимо исключить влияние искажающих факторов и снизить их вклад в совокупный бюджет погрешностей волнового фронта. С увеличением размеров приемной апертуры телескопов значительно возрастает влияние факторов, искажающих волновой фронт регистрируемого телескопом излучения, на качество получаемого изображения. Рассмотрены способы снижения влияния искажающих факторов, вызванных абберациями оптической системы. Одним из решений этой проблемы является выбор рациональной оптической системы космического телескопа. Для минимизации абберационных характеристик в программном пакете *Zemax 13 Release 2 SP4 Premium* выполнено моделирование оптической системы, ее анализ и оптимизация в целях уменьшения пятна рассеяния изображения в выходном зрачке. Указанная цель достигнута путем снижения сферической абберации с ее более равномерным распределением по полю. На основе полученных данных проведен оценочный расчет допустимого размера пятна разъюстировки

Ключевые слова

Абберационный расчет, оптическая система, космический телескоп «Миллиметрон», волновой фронт, качество изображения

Поступила 14.02.2020

Принята 26.03.2020

© Автор(ы), 2020

Введение. Создание крупногабаритных космических телескопов с эквивалентным диаметром приемной апертуры 10...12 м является сложной научной и технической проблемой. Традиционный опыт проектирования и изготовления наземных телескопов предполагает использование сплошной апертуры диаметром не более 6...8 м [1, 2]. Как правило, дальнейшее увеличение диаметра зеркала телескопов связано с реализацией идеи составного главного зеркала (СГЗ).

Проект космического телескопа *JWST* (США), призванный заменить *Spitzer* [3], имеет эквивалентный диаметр главного зеркала 6,5 м, составленного из 18 гексагональных сегментов, расположенных в два ряда [4]. В [5] показано, что увеличение диаметра главного зеркала крупногабаритного телескопа ограничивается опережающим ростом его суммарной погрешности. Бюджет погрешностей показал, что для большого числа стыков сегментов, позволяющих составить крупный эквивалентный диаметр СГЗ, в настоящее время нет приемлемой схемы оптической системы и эффективной системы контроля пространственного положения сегментов. В отечественном проекте космического телескопа «Миллиметрон» световой диаметр СГЗ составляет 10 м, зеркало имеет 96 сегментов [6]. В связи с этим выбор и расчет оптической схемы телескопа, а также создание адаптивной системы контроля пространственного положения сегментов СГЗ для большого числа стыков являются актуальной проблемой [7].

Вопросам выбора и расчета оптических систем посвящено множество работ, например [8–15]. Однако вопрос информационно-метрологической оптимизации оптической системы, заключающейся в перераспределении погрешности по полю изображения, рассматривается впервые в настоящей работе.

Факторы, искажающие регистрируемое телескопом изображение. Ограничения диаметра СГЗ вызваны влиянием факторов, ухудшающих качество получаемого телескопом изображения. Эти факторы вносят искажения в волновой фронт регистрируемого телескопом излучения. Классификация искажающих факторов по природе их возникновения и с учетом особенностей космического телескопа [16] приведена на рис. 1.

Группа физических факторов включает в себя дифракции на оптических элементах, абберации оптической системы, термодформации оптических элементов и др. Расчет аббераций с учетом термодформаций оптических элементов описан в [10, 11].

Группа технологических факторов содержит весовые деформации крупногабаритных оптических элементов, трудности прецизионной обра-

ботки и контроля этих элементов при их изготовлении, а также их взаимной юстировки.

Группа инструментальных и эксплуатационных факторов включает в себя нестабильность характеристик элементов и оптической системы вследствие недостаточной жесткости конструкции, разъюстировки, погрешности ведения оси визирования следящим приводом, погрешности фазировки и союстировки компенсирующих устройств.



Рис. 1. Классификация искажающих факторов по природе их возникновения и с учетом особенностей космического телескопа

Эффективность использования системы контроля пространственного положения сегментов СГЗ выше при меньшем значении суммарной погрешности регистрируемого волнового фронта. Поэтому для получения максимальной эффективности адаптивной коррекции искаженного волнового фронта необходимо использовать средства минимизации искажений.

Минимизация искажений волнового фронта может проводиться либо полным исключением некоторых искажающих факторов, например устранением фазового корректора в выходном зрачке телескопа, либо уменьшением влияния каждого фактора до величины, соответствующей дифракционному пределу оптики телескопа. В этом случае вклад каждого фактора в суммарную погрешность искажений волнового фронта снижается.

ется, а допуск на величину влияния этих факторов остается в разумных пределах.

Представление о допустимом значении погрешности искажений волнового фронта дает сопоставительный анализ влияния искажающих факторов на качество изображения телескопа. Оценка влияния каждого фактора может быть представлена в виде совокупного бюджета погрешностей или распределения составляющих погрешностей в общем размере пятна изображения. Для совокупной погрешности волнового фронта, превышающей по величине пять дифракционных изображений точки, использование адаптивных средств для дальнейшего улучшения качества изображения не имеет смысла, так как коэффициент Штреля практически не возрастает.

В настоящей работе рассмотрена одна из составляющих суммарной погрешности волнового фронта, обусловленная аберрациями оптической системы с параметрами космического телескопа «Миллиметрон». Оптимизация оптической системы за счет перераспределения погрешностей по полю изображения с помощью коррекции формы поверхности зеркал позволяет минимизировать аберрационные характеристики.

Параметры оптической схемы космического телескопа «Миллиметрон» для аберрационного расчета. В космическом телескопе «Миллиметрон» использована классическая двузеркальная схема Кассегрена, где вторичное зеркало находится между плоскостью входного зрачка и вершиной поверхности СГЗ. Компактность оптической системы обусловлена необходимостью минимизации влияния внешнего теплового излучения и использования единой системы криогенного охлаждения телескопа.

Расчетные параметры оптической системы телескопа «Миллиметрон» [6]:

- СГЗ: параболическое зеркало диаметром 10 м, фокусное расстояние 2,4 м, стрелка прогиба зеркала 2,60417 м;
- вторичное зеркало: гиперболическое зеркало диаметром 0,54213 м, стрелка прогиба 0,13866 м, эксцентриситет 1,14745.

Расстояние между СГЗ и вторичным зеркалом 2,277 м. Мнимый фокус гиперболического зеркала совпадает с фокусом параболического, расстояние между их геометрическими фокусами 3,582 м. Эквивалентное фокусное расстояние 70 м.

Внешний вид расчетной оптической системы космического телескопа и чертеж его оптической системы приведены на рис. 2.

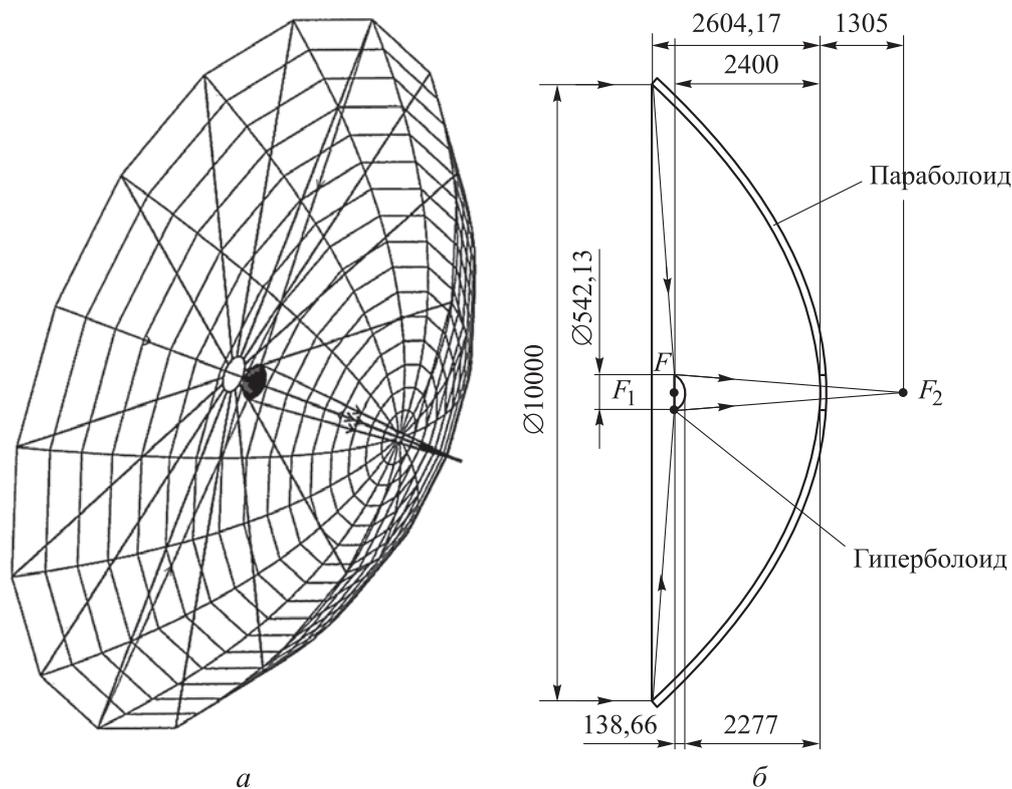


Рис. 2. Общий вид расчетной оптической системы телескопа «Миллиметр»: *а* — вид оптической системы (изометрия); *б* — чертеж оптической системы

Моделирование оптической системы телескопа «Миллиметр».

Аберрационный расчет оптической системы космического телескопа, включающий в себя ее моделирование, анализ и оптимизацию, проведен в программном пакете *Zemax 13 Release 2 SP4 Premium*. В качестве расчетной принята длина волны регистрируемого излучения $\lambda = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м. Задано три коэффициента углового поля со значениями углов при входном зрачке оптической системы ω : 0; $-40''$; $40''$. Диаметры апертур заданы фиксированными, а значение эксцентриситета вторичного зеркала (e^2) задано переменной в целях дальнейшей оптимизации оптической системы.

В расчетах использованы нормализованные по полевым углам ω координаты входного зрачка (P_X ; P_Y) и поля зрения (H_X ; H_Y), не зависящие от способа их задания и поля зрения. Входной зрачок определяется диаметром СГЗ, равным 10 м. Выходной зрачок имеет диаметр $530,7774 \cdot 10^{-3}$ м и расположен на расстоянии $3709,942 \cdot 10^{-3}$ м от входного зрачка.

С использованием встроенной в пакет *Zemax* программы оптимизации найдена конфигурация оптической системы с уменьшенным пятном изображения по сравнению с расчетной моделью системы. Причем оптимизация осуществлена за счет вариации значения эксцентриситета вторичного зеркала (e^2) методом наименьших квадратов с демпфированием. Точность оптимизации задана тремя кольцами квадратуры гауссиана. Для оптимизированной оптической системы эксцентриситет вторичного зеркала составил $e^2 = 1,147375$.

Результаты моделирования и информационно-метрологической оптимизации оптической системы телескопа «Миллиметр». Качественный анализ расчетной и оптимизированной оптических систем целесообразно начать с лучевых поперечных aberrаций, ограничивающих качество изображения космического телескопа.

Графически проекции векторов поперечных aberrаций ($E_X; E_Y$) в микрометрах в системе координат OXY вдоль двух плоскостей срезов входного зрачка — меридионального (нормализованная координата P_Y) и сагиттального (нормализованная координата P_X) — приведены на рис. 3. Меридиональной плоскостью положения главного луча для рассматриваемого случая точек поля, лежащих на оси Y , является плоскость YZ . Сагиттальная плоскость ортогональна меридиональной YZ и также пересекает оптическую ось.

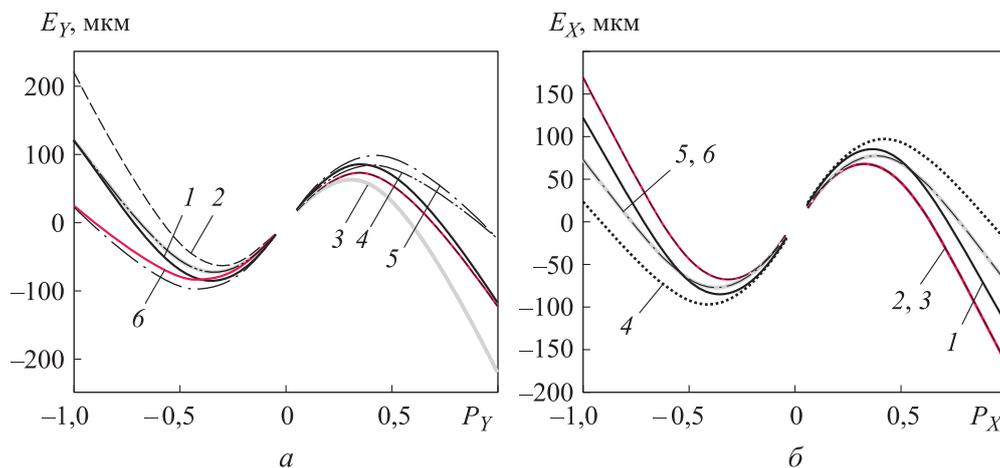


Рис. 3. Диаграммы поперечных aberrаций в меридиональном (а) и сагиттальном (б) направлениях:

для $e^2 = 1,14745$: 1 — $\omega = 0$; 2 — $\omega = 40''$; 3 — $\omega = -40''$; для $e^2 = 1,147375$: 4 — $\omega = 0$; 5 — $\omega = 40''$; 6 — $\omega = -40''$

Диаграммы, приведенные на рис. 3, представлены S-образными кривыми, характерными для оптической системы, где сферическая aberrация частично нивелируется дефокусировкой системы. В расчетной оптической системе космического телескопа качество изображения ограничивается сферической aberrацией. Для снижения уровня сферической aberrации проведена оптимизация оптической системы изменением эксцентриситета вторичного зеркала. В результате максимальное значение поперечных aberrаций снижено примерно на 20...50 %: с 120...220 до 100...120 мкм. К тому же после оптимизации продольные aberrации оказались распределенными по полю более равномерно.

Для диагностики качества расчетной и оптимизированной оптических систем необходимо рассмотреть, наряду с диаграммой поперечных aberrаций, представленную на рис. 4 диаграмму волновых aberrаций в зависимости от нормализованных координат входного зрачка (P_X ; P_Y). Волновые aberrации W характеризуются оптической разностью хода главного и рассматриваемого лучей до опорного источника в выходном зрачке. Волновые aberrации на рис. 4 представлены в виде долей от расчетной длины волны λ .

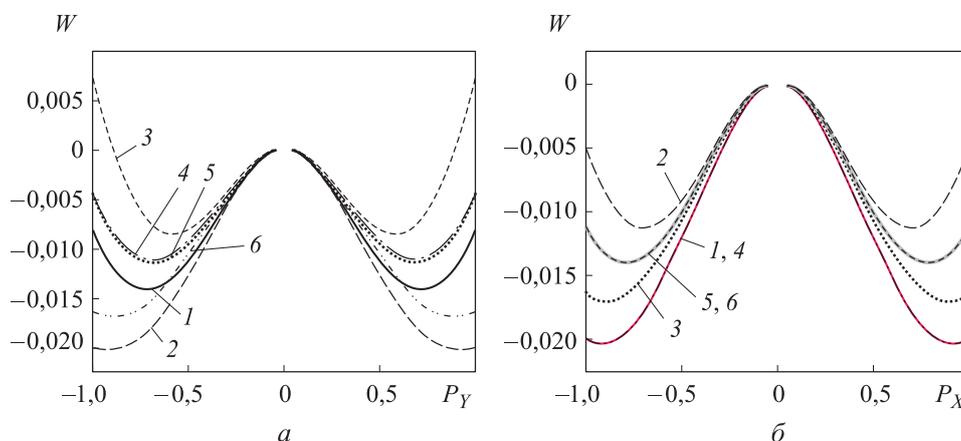


Рис. 4. Диаграммы волновых aberrаций в меридиональном (а) и сагиттальном (б) направлениях:

1 — $\omega = 0$ $e^2 = 1,14745$; 2 — $\omega = 0$ $e^2 = 1,147375$; 3 — $\omega = 40''$ $e^2 = 1,14745$;
4 — $\omega = 0$ $e^2 = 1,147375$; 5 — $\omega = -40''$ $e^2 = 1,14745$; 6 — $\omega = -40''$ $e^2 = 1,147375$

Согласно диаграммам, приведенным на рис. 4, значения оптической разности хода лучей после оптимизации расчетной системы увеличились примерно на 40...50 %: с 2,0...2,8 до 2,8...4,0 мкм. Это хуже, чем для расчетной схемы оптической системы до оптимизации. Тем не менее опти-

ческая система полагается дифракционно ограниченной, так как значения волновой аберрации укладываются в четверть длины волны λ [8, 15, 17].

Для дальнейшего анализа расчетной и оптимизированной оптических систем необходимо рассмотреть точечные диаграммы пятен рассеяния в выходном зрачке в зависимости от угла ω поля зрения (рис. 5). После проведения оптимизации заметно уменьшилось пятно рассеяния по величине его среднеквадратического радиального размера (*RMS*) примерно на 27...43 % (с 80...108 до 58...62 мкм) и по радиусу круга с центром в опорной точке, в пределы которого попадают все лучи (*GEO*), приблизительно на 21...43 % (с 120...222 до 94...126 мкм).

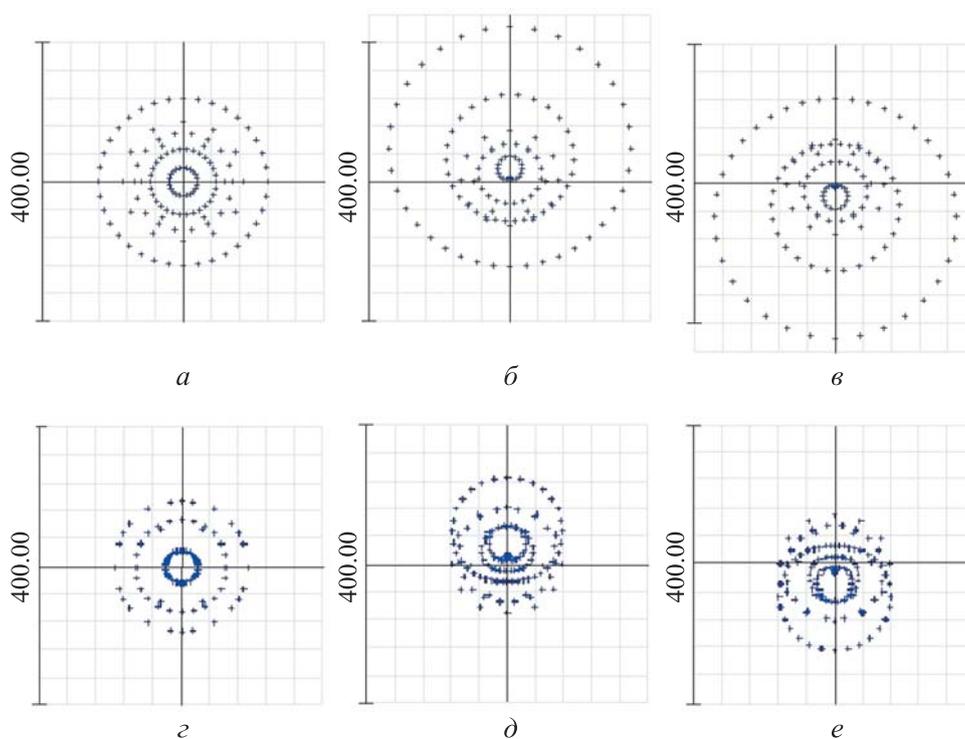


Рис. 5. Диаграммы пятна рассеяния трассируемых лучей:

a — расчетная схема, $\omega = 0$; *б* — расчетная схема, $\omega = 40''$; *в* — расчетная схема, $\omega = -40''$;
г — оптимизированная схема, $\omega = 0$; *д* — оптимизированная схема, $\omega = 40''$; *е* — оптимизированная схема, $\omega = -40''$

Анализ диаграммы дифракционной концентрации энергии N_E в круглой зоне R_K для расчетной и оптимизированной оптических систем (рис. 6) позволяет сделать вывод, что дифракционная кривая и кривые для заданных углов ω поля совпадают. Результаты аберрационных расчетов приведены в таблице.

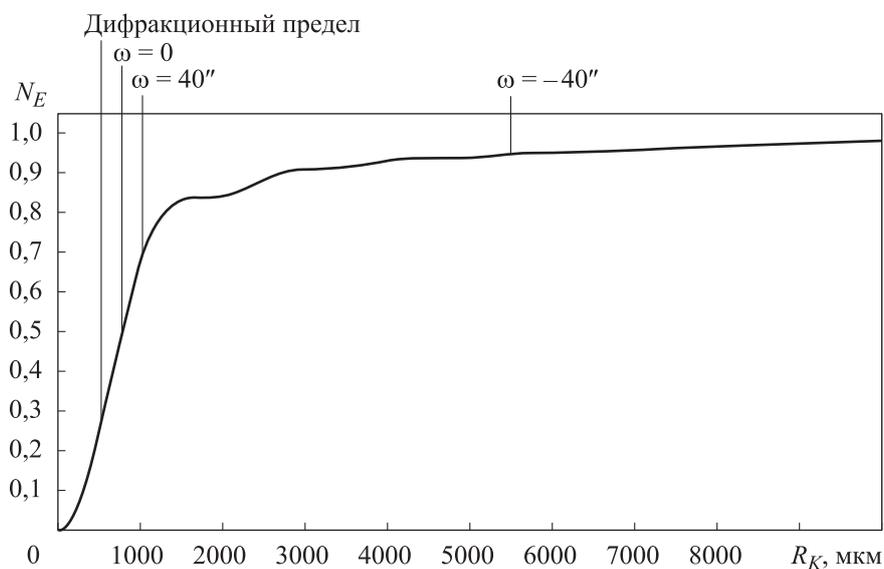


Рис. 6. Диаграмма дифракционной концентрации энергии N_E в круглой зоне R_K

Результаты абберационных расчетов

Результаты расчетов	Оптическая система		Изменение характеристики после оптимизации, %
	расчетная	оптимизированная	
Эксцентриситет вогнутого зеркала e^2	1,14745	1,147375	–
<i>Сферическая абберация, мкм (улучшение)</i>			
В центре ($\omega = 0$):			
меридиональное	120,05	98,22	–18,2
сагиттальное	120,05	98,22	–18,2
На краю поля ($\omega = 40''$):			
меридиональное	222,42	125,87	–43,4
сагиттальное	168,81	78,35	–53,6
На краю поля ($\omega = -40''$):			
меридиональное	222,42	125,87	–43,4
сагиттальное	168,81	78,35	–53,6
<i>Волновая абберация, мкм (ухудшение)</i>			
В центре ($\omega = 0$):			
меридиональное	2,84	4,07	43,3
сагиттальное	2,84	4,07	43,3

Результаты расчетов	Оптическая система		Изменение характеристики после оптимизации, %
	расчетная	оптимизированная	
<i>Волновая аберрация, мкм (ухудшение)</i>			
На краю поля ($\omega = 40''$):			
меридиональное	2,3	3,4	47,8
сагиттальное	2,02	2,79	38,1
На краю поля ($\omega = -40''$):			
меридиональное	2,3	3,4	47,8
сагиттальное	2,02	2,79	38,1
<i>Диаграмма пятна рассеяния (RMS), мкм (улучшение)</i>			
В центре ($\omega = 0$)	79,294	58,235	-26,6
На краю поля:			
$\omega = 40''$	108,229	61,748	-42,9
$\omega = -40''$	108,229	61,748	-42,9
<i>Диаграмма пятна рассеяния (GEO), мкм (улучшение)</i>			
В центре ($\omega = 0$)	120,05	94,495	-21,3
На краю поля:			
$\omega = 40''$	222,421	126,243	-43,2
$\omega = -40''$	222,421	126,243	-43,2
График концентрации энергии	Дифракционная кривая и кривые для заданных углов поля совпадают		-

Заключение. Проведенные расчеты и анализ результатов показали (см. таблицу), что оптимизация расчетной схемы оптической системы обеспечила уменьшение пятна рассеяния за счет снижения сферической аберрации и более равномерного ее распределения по полю. При этом несколько возросли волновые аберрации. Результаты оптимизации в целом положительные, что закономерно, так как оптимизация оптической системы проведена только для одной длины волны $\lambda = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м.

По результатам проведенного в программном пакете *Zemax 13 Release 2 SP4 Premium* аберрационного расчета с оптимизацией оптической системы размер пятна рассеяния составил $108,229 \cdot 10^{-6}$ м (RMS). Размер пятна

разъюстировки принят равным $1/10$ (для длины волны λ) от пятна рассеяния, как это принято в оптике [8, 15, 17], т. е. $108,229 \cdot 10^{-7}$ м. Это допуск, выход за пределы которого даст потерю качества изображений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lillie C.F., Polidan R.S., Dailey D.R. Key enabling technologies for the next generation of space telescopes. *Proc. SPIE*, 2010, vol. 7731, art. 773102.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.857826>
- [2] Кириченко Д.В., Клеймёнов В.В., Новикова Е.В. Крупногабаритные оптические космические телескопы. *Известия вузов. Приборостроение*, 2017, т. 60, № 7, с. 589–602. DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-7-589-602>
- [3] Missions. Spitzer space telescope. *jpl.nasa.gov: веб-сайт*.
URL: <https://www.jpl.nasa.gov/missions/spitzer-space-telescope>
(дата обращения: 28.01.2020).
- [4] JWST Telescope. *jwst-docs.stsci.edu: веб-сайт*. URL: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-observatory-hardware/jwst-telescope> (дата обращения: 27.08.2019).
- [5] Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении. Старый Оскол, Тонкие наукоемкие технологии, 2005.
- [6] Космическая обсерватория «Миллиметрон». *millimetron.ru: веб-сайт*.
URL: <http://www.millimetron.ru/ru> (дата обращения 27.08.2019).
- [7] Сычев В.В., Клем А.И. Проблемы адаптации в космическом телескопе обсерватории «Миллиметрон». *Оптика атмосферы и океана*, 2017, т. 30, № 1, с. 93–102.
DOI: <http://dx.doi.org/10.15372/AOO20170113>
- [8] Artal P., ed. Handbook of visual optics. Vol. 2. Instrumentation and vision correction. CRC Press, 2017.
- [9] Клебанов Я.М., Карсаков А.В., Хонина С.Н. и др. Компенсация аберраций волнового фронта в телескопах космических аппаратов с регулировкой температурного поля телескопа. *Компьютерная оптика*, 2017, т. 41, № 1, с. 30–36.
- [10] Кожевников А.В. Исследование влияния аберраций на качество изображения в оптических системах. *Сб. тр. III междунар. конф. и молодежной школы ИТНТ-2017*. Самара, Новая техника, 2017, с. 344–348.
- [11] 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 (115), с. 17–26.
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-4-17-26>
- [12] 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 (123), с. 112–122.
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-6-112-122>

- [13] Левин И.А. Термооптические аберрации радиально-симметричных дифракционных оптических элементов. *Компьютерная оптика*, 2016, т. 40, № 1, с. 51–56. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-1-51-56>
- [14] Селиверстова Е.В., Щербина Г.А., Шурыгин Б.М. Алгоритм нахождения аберрационных коэффициентов в космической оптико-электронной аппаратуре наблюдения. *Журнал радиоэлектроники*, 2017, № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec17/8/abstract.html>
- [15] Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. Л., Машиностроение, 1989.
- [16] Feinberg L., Dean B., Hayden W.L., et al. Space telescope design considerations. *Opt. Eng.*, 2012, vol. 51, no. 1, art. 011006-1-10. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.1.011006>
- [17] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., Наука, 1973.

Сычев Виктор Васильевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Клем Андрей Иванович — аспирант кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); инженер-конструктор ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого» (Российская Федерация, 125284, Москва, ул. Поликарпова, д. 23Б, а/я 604).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сычев В.В., Клем А.И. Информационно-метрологическая оптимизация погрешностей волнового фронта излучения, регистрируемого телескопом. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 3 (132), с. 37–51. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-3-37-51>

INFORMATION AND METROLOGY-DRIVEN OPTIMISATION OF WAVEFRONT ERROR IN TELESCOPE-DETECTED RADIATION

V.V. Sychev¹
A.I. Klem^{1,2}

viktorsychev@bmstu.ru
black.n.hot.ice@gmail.com

¹ **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

² **Public Joint Stock Company Aviation Holding Company Sukhoi, Moscow, Russian Federation**

Abstract

The paper presents a solution to an information and metrology problem concerning minimising the wavefront error of telescope-detected radiation. As an

Keywords

Aberration computation, optical system, Millimetron space telescope, wavefront, image quality

example, we used aberration computation and simulation describing the optical system of the space telescope installed in the *Millimetron* observatory. We show that many factors that affect a space telescope decrease the quality of the image obtained. It is necessary to eliminate the effects of the distortion-generating factors and reduce their contribution to the total wavefront error. As the dimensions of the collecting aperture in telescopes increase, the factors that distort the wavefront of the radiation detected by the telescope begin to significantly affect the quality of the image obtained. We consider the ways of decreasing the effects of the distortion-generating factors caused by aberrations in the optical system. One of the solutions to this problem is to select a rational configuration of the space telescope optical system. In order to minimise the aberration, we used the *Zemax 13 Release 2 SP4 Premium* software package to simulate the optical system, to analyse and optimise it so as to diminish the scattering spot in the exit pupil. We achieved this goal by decreasing the spherical aberration and ensuring a more uniform distribution of it over the field. We used the data obtained to estimate the admissible dimensions of the misalignment spot

Received 14.02.2020

Accepted 26.03.2020

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Lillie C.F., Polidan R.S., Dailey D.R. Key enabling technologies for the next generation of space telescopes. *Proc. SPIE*, 2010, vol. 7731, art. 773102.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.857826>
- [2] Kirichenko D.V., Kleymenov V.V., Novikova E.V. Large optical space-based telescopes. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2017, vol. 60, no. 7, pp. 589–602 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-7-589-602>
- [3] Missions. Spitzer Space Telescope. *jpl.nasa.gov: website*.
Available at: <https://www.jpl.nasa.gov/missions/spitzer-space-telescope>
(accessed: 28.01.2020).
- [4] JWST Telescope. *hwst-docs.stsci.edu: website*.
Available at: <https://hwst-docs.stsci.edu/hwst-observatory-hardware/hwst-telescope>
(accessed: 27.08.2019).
- [5] Sychev V.V. Adaptivnye opticheskie sistemy v krupnogabaritnom teleskopostroenii [Adaptive optical systems in large-scale telescope production]. Staryy Oskol, Tonkie naukoemkie tekhnologii Publ., 2005.

- [6] Millimetron space laboratory. *millimetron.ru: website*. Available at: <http://www.millimetron.ru/en> (accessed 27.08.2019).
- [7] Sychev V.V., Klem A.I. Adaptation problems in the space telescope of “Millimetron” observatory. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2017, vol. 30, no. 1, pp. 93–102 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.15372/AOO20170113>
- [8] Artal P., ed. Handbook of visual optics. Vol. 2. Instrumentation and vision correction. CRC Press, 2017.
- [9] Klebanov Ya.M., Karsakov A.V., Khonina S.N., et al. Wave front aberration compensation of space telescopes with telescope temperature field adjustment. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2017, vol. 41, no. 1, pp. 30–36 (in Russ.).
- [10] Kozhevnikov A.V. [Study on aberration effect on image quality in optical systems]. *Sb. tr. III mezhdunar. konf. i molodezhnoy shkoly ITNT-2017* [Proc. III Int. Conf. and Youth School ITNT-2017]. Samara, Novaya tekhnika Publ., 2017, pp. 344–348 (in Russ.).
- [11] Kulakova N.N., Kaledin S.B., Sazonov V.N. Error analysis of IR lens focal length measured by a goniometric method. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2017, no. 4 (115), pp. 17–26 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-4-17-26>
- [12] Timashova L.N., Kulakova N.N., Sazonov V.N. Opto-electronic system for measurement of spherical aberration. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2018, no. 6 (123), pp. 112–122 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-6-112-122>
- [13] Levin I.A. Thermo-optical aberrations of radially symmetric diffractive optical elements. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2016, vol. 40, no. 1, pp. 51–56 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-1-51-56>
- [14] Seliverstova E.V., Shcherbina G.A., Shurygin B.M. Algorithm of finding aberration coefficients for space opto-electronic devices. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2017, no. 12 (in Russ.). Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/dec17/8/abstract.html>
- [15] Sokolskiy M.N. Dopuski i kachestvo opticheskogo izobrazheniya [Tolerances and quality of an optical image]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989.
- [16] Feinberg L., Dean B., Hayden W.L., et al. Space telescope design considerations. *Opt. Eng.*, 2012, vol. 51, no. 1, art. 011006-1-10. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.1.011006>
- [17] Born M., Wolf E. Principles of optics. Pergamon Press, 1970.

Sychev V.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Metrology and Interchangeability, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Klem A.I. — Post-Graduate Student, Department of Metrology and Interchangeability, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Design Engineer, Public Joint Stock Company Aviation Holding Company Sukhoi (Polikarpova ul. 23B, p/b 604, Moscow, 125284 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Sychev V.V., Klem A.I. Information and metrology-driven optimisation of wavefront error in telescope-detected radiation. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2020, no. 3 (132), pp. 37–51 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-3-37-51>



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов
Е.А. Микрина, М.В. Михайлова

**«Навигация космических аппаратов
по измерениям от глобальных спутнико-
вых навигационных систем»**

Рассмотрены вопросы проектирования и разработки сложных многофункциональных систем космической навигации на базе глобальных спутниковых навигационных систем для широкого класса низкоорбитальных, высокоорбитальных и высокоэллиптических космических аппаратов, а также круг вопросов, связанных с созданием бортовых средств навигации для автономного определения орбиты космического аппарата.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
<https://bmstu.press>