

**МЕТОДИКА ГАБАРИТНОГО РАСЧЕТА
ЗЕРКАЛЬНОГО МОДУЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОЛЯ**

М. К. ОРЕХОВА*, А. В. БАХОЛДИН

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия***mkorekhova@corp.ifmo.ru*

Аннотация. Разработана методика габаритного расчета зеркального модуля интегрального поля. Предложено схемное решение на основе зеркальных элементов, рассмотрены особенности и предложен подход к проектированию. Представлен пример расчета оптической системы зеркального модуля интегрального поля солнечного телескопа-коронографа КСТ-3. Для достижения поставленной цели использованы методы расчета оптических систем, математического и компьютерного моделирования, а также методы оптимизации оптических систем. Практическая значимость работы заключается в достижении высокого временного разрешения солнечных телескопов при сохранении высокого пространственного и спектрального разрешения. Рассмотренные подходы могут быть расширены для использования при модернизации спектрометров и расширении инструментального парка обсерватории.

Ключевые слова: спектроскопия интегрального поля, модуль интегрального поля, деление поля, деление изображения, широкий спектральный диапазон, астрономическая оптика, солнечный телескоп

Ссылка для цитирования: Орехова М. К., Бахолдин А. В. Методика габаритного расчета зеркального модуля интегрального поля // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 8. С. 680—687. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-680-687.

METHOD FOR OVERALL CALCULATION OF AN INTEGRAL-FIELD MIRROR MODULE

M. K. Orekhova*, A. V. Bakholdin

*ITMO University, St. Petersburg, Russia***mkorekhova@corp.ifmo.ru*

Abstract. A method for overall calculation of an integral-field mirror module is developed. A schematic solution based on mirror elements is described, features are considered, and an approach to design is proposed. An example of calculating the optical system of the mirror module of the integral field of the KST-3 solar telescope-coronagraph is presented. To achieve the goal, methods for calculating optical systems, mathematical and computer modeling, as well as methods for optimizing optical systems are used. The practical significance of the result lies in achieving a high temporal resolution of solar telescopes while maintaining high spatial and spectral resolution. The considered approaches can be extended for use in the modernization of spectrometers and the expansion of the observatory instrumental park.

Keywords: integral field spectroscopy, integral field unit, image slicing, image slicer, wide spectral range, astronomical optics, solar telescope

For citation: Orekhova M. K., Bakholdin A. V. Method for overall calculation of an integral-field mirror module. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 8. P. 680—687 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-680-687.

Введение. Для проведения многих астрономических исследований требуются приборы с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением. Пространственное разрешение определяется размером апертурной диафрагмы (АД) телескопа. Важнейшим параметром, определяющим спектральное разрешение, являются характеристики диспергирующего элемента. Временное разрешение определяется, в первую очередь, приемником. В случае протяженных полей возникает необходимость оптимального сопряжения поля изображения объектива и входной щели последующего спектрометра. При сканировании возможно увеличить площадь одномоментной регистрации поля, однако сам процесс сканирова-

ния не позволяет получать информацию об объекте одновременно, и некоторые события становятся невозможно зарегистрировать в режиме реального времени.

Для сокращения времени фиксации и обработки изображений увеличенного размера щелевыми спектральными приборами целесообразно использовать в составе системы „телескоп—спектрометр“ модуль интегрального поля (МИП) — оптическую систему, позволяющую разделить и преобразовать поле телескопа прямоугольной формы в набор длинных щелей, которые „подаются“ на вход спектрометра. Инструменты, обеспечивающие проведение спектроскопического анализа на основе преобразования поля телескопа в щель, называются приборами, построенными по методу спектроскопии интегрального поля [1, 2].

На рис. 1 приведена принципиальная схема деления поля, построенная с применением плоских зеркал: 1 — световой пучок, выходящий из фокальной плоскости телескопа; 2 — массив плоских зеркал-делителей, расположенных под различными углами; 3 — массив фокусирующих зеркал; 4 — сформированная модулем интегрального поля щель, „подаваемая“ на вход спектрометра.

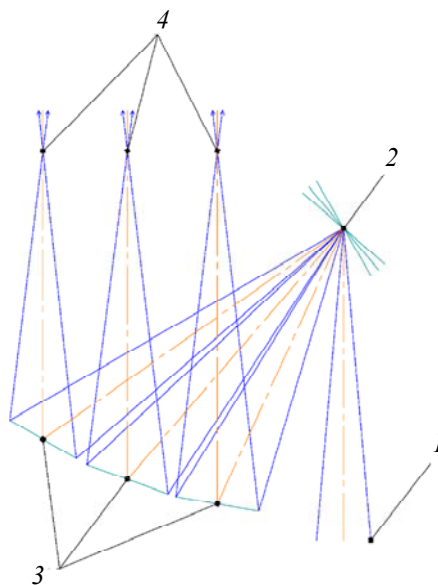


Рис. 1

В настоящей работе представлена методика габаритного расчета на примере оптической системы МИП для солнечного телескопа-коронографа КСТ-3 [3, 4]. Необходимо наиболее эффективно согласовать параметры МИП как с телескопом, так и со спектрометром. КСТ-3 разрабатывается для наблюдения участков поля Солнца ($6 \times 12''$) в широком спектральном диапазоне (0,39—1,60 мкм) с высоким пространственным разрешением (не более $0,1''$) и фиксацией параметров поляризации (восстановление параметров вектора Стокса в каждой точке поля).

В мире активно ведутся работы по модернизации спектрометров и оснащению их МИП [5—30]. К примеру, уже несколько лет данные для звездного Очень Большого Телескопа (VLT) собираются с помощью линзовой оптической системы MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer) [5—7], которая работает в спектральном диапазоне 0,465—0,930 мкм и имеет пространственное разрешение $0,2''$. Еще один близкий аналог МИП для КСТ-3 — находящийся в разработке MuSiCa, Multi-Slit Image Slicer based on collimator-Camera (0,39—2,30 мкм, Европейский Солнечный Телескоп) [8—10] с расчетным пространственным разрешением $0,05''$. В отличие от МИП для звездных телескопов, солнечный инструментарий нуждается в защите плоскости изображения от рассеянного излучения.

Методика габаритного расчета модуля интегрального поля. Основная функция модуля интегрального поля — деление и преобразование входного поля телескопа в необходи-

мое количество частей без ухудшения пространственного разрешения всей системы. Это деление может быть выполнено посредством оптического волокна, массива микролинз и массива плоских зеркал [1, 29]. В настоящей работе рассмотрено построение системы с помощью массива плоских зеркал.

Так как оптическая система (ОС) КСТ-3 работает в широком спектральном диапазоне, целесообразно построение МИП на зеркалах (плоские зеркала не вносят aberrаций, в отличие от волокна и микролинз). Методика расчета МИП состоит из следующих шагов.

Шаг 1 — Определение входных и выходных данных. Входными параметрами для МИП являются задняя апертура предшествующей системы (телескопа) A'_T , ее прямоугольное поле $2x' \times 2y'$, а также спектральный диапазон $\Delta\lambda$. Выходные параметры МИП — это передняя апертура спектрометра A_c и размеры щели (ширина b и длина c). Для МИП солнечного телескопа-коронатора КСТ-3 эти параметры: $A'_T = n \sin \sigma'_T = 0,075$ (n — показатель преломления среды, σ'_T — задний апертурный угол телескопа-коронатора), $2x' \times 2y' = 1,2 \times 2,3$ мм (соответствующее угловому размеру $6 \times 12''$ в пространстве предметов телескопа-коронатора), $\Delta\lambda = 0,3 — 1,60$ мкм, $A_c = n \sin \sigma_c = 0,0375$, $b = 0,1''$.

Шаг 2 — Определение структуры блока деления поля. На данном этапе рассчитывается минимальное число N элементов поля, разделенного массивом зеркал и соответственно плоских зеркал, необходимых для деления и преобразования поля $2x' \times 2y'$ в щель шириной b :

$$N = \begin{cases} 2x'/b, \\ 2y'/b. \end{cases}$$

Для КСТ-3 деление будет осуществляться по короткой стороне ввиду уменьшения числа элементов поля. $N = 6''/0,1'' = 60$ — это минимальное количество. В настоящей работе их число увеличено до 64 для снижения влияния остаточных aberrаций в оптической системе. Принципиальная схема МИП показана на рис. 2 (1 — коллимационный компонент МИП, 2 — фокусирующий компонент МИП) — деление осуществляется в плоскости полевой диафрагмы (ПД телескопа).

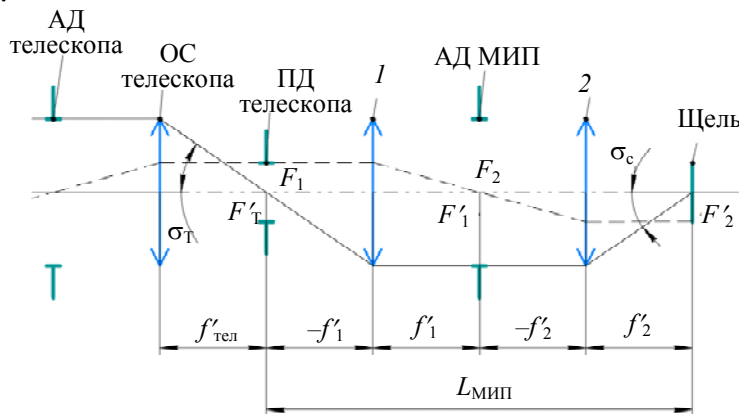


Рис. 2

Наиболее существенным недостатком использования плоских зеркал для деления поля является сложность их изготовления. Выше показано, что для преобразования поля телескопа $1,2 \times 2,3$ мм ($6 \times 12''$) в длинную щель при сохранении пространственного разрешения $0,1''$ необходимо использовать как минимум 64 плоских зеркала размером $0,02 \times 18,6$ мм ($0,1 \times 96''$). Зеркала таких размеров достаточно трудны для изготовления. На сегодняшний день уникальным технологическим результатом изготовления отдельных зеркал делителя поля является достижение размеров $0,25 \times 7$ мм [30]. В рамках настоящей работы ширина зеркала делителя из технологических соображений принята равной $0,25$ мм.

Шаг 3 — Определение масштаба. С учетом ограничений возможно ввести в МИП систему увеличения. Необходимый согласующий масштаб будет ограничиваться габаритами исходя из следующих известных соотношений (рис. 2):

$$\beta = -\frac{f'_1}{f'_2},$$

$$L_{\text{МИП}} = 2f'_1 + 2f'_2.$$

Таким образом, $L_{\text{МИП}}$ (без учета изламывающих ось зеркал) будет определять длину системы МИП в одном из измерений.

Возможно выполнить деление поля несколько раз, например, дважды (рис. 3). Число делений на первой N_1 и на второй ступени N_2 будет определять общее количество элементов поля $N_{\text{МИП}}$ следующим образом:

$$N_{\text{МИП}} = N_1 \cdot N_2.$$

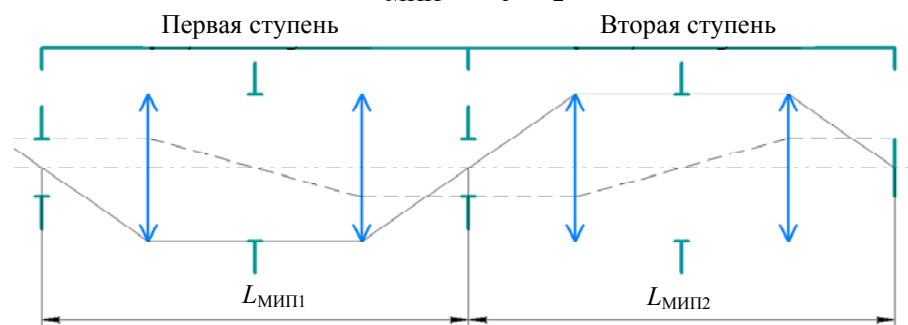


Рис. 3

Преимущество двухступенчатого разделения МИП заключается в том, что на второй ступени возможно уменьшить поле (в случае, если оно было увеличено на первой ступени). Тогда уменьшение апертуры на первой ступени нивелируется, и это приведет к ухудшению спектрального разрешения и увеличению габаритов спектрометра и приемников излучения. Недостатки введения второй ступени — существенное усложнение оптической системы МИП, а также потеря энергии при отражении.

Если с учетом всех примененных выше рекомендаций условия по габаритам по-прежнему не выполняются, возможно ввести систему увеличения перед МИП. Однако важно учитывать, что такая система увеличивает габариты оптической системы МИП, а также уменьшает апертуру.

В случае КСТ-3 согласование с нормальной щелью спектрометра [31] позволяет работать с выходной апертурой 0,0375 (исходная апертура — 0,075), что дает возможность разместить систему увеличения перед МИП.

Далее, для построения МИП, оптимального для КСТ-3, возможно поэтапно делить поле телескопа. Деление на первой ступени на 8 элементов поля, а на втором — еще на 8 обеспечит итоговые 64 элемента, необходимые для преобразования поля прямоугольной формы размером $6 \times 12''$ в длинную щель шириной $0,1''$.

Шаг 5 — Определение основных оптических характеристик. Если все ограничения были учтены, то можно приступить к определению оптической силы компонентов.

Шаг 6 — Оценка качества изображения. Критериями качества в случае оптической системы МИП являются размер освещаемой площадки (щели) и равномерность распределения светового потока в ней.

Схемное решение модуля интегрального поля. МИП для солнечного телескопа-коронографа осуществляет двухступенчатое деление изображения. Также перед МИП находится оптическая система с увеличением 2^{\times} . Все подсистемы МИП построены на параболических

зеркала, а для деления изображения используются узкие плоские зеркала, имеющие различный наклон.

На этапе увеличения полевая диафрагма „вырезает“ из всего поля телескопа прямоугольное изображение размером $1,2 \times 2,3$ мм ($6 \times 12''$) и увеличивает его до $2,4 \times 4,6$ мм ($12 \times 24''$). Входная апертура $0,075$ на данном этапе также преобразуется в $0,0375$. Система увеличения перед МИП показана на рис. 4 (1 — задняя фокальная плоскость телескопа КСТ-3, 2 — параболическое зеркало с $f = 100$ мм, 3 — плоское зеркало, используется для вывода светового потока в нужном направлении, 4 — параболическое зеркало с $f = 200$ мм, 5 — плоскость изображения).

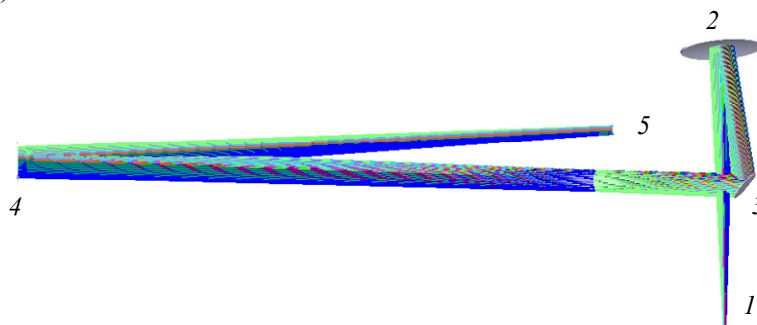


Рис. 4

Далее это изображение с помощью оптической системы МИП первой ступени делится на 8 фрагментов размером $0,3 \times 4,6$ мм ($1,5 \times 24''$). На рис. 5 представлен МИП первой ступени (показано 4 канала из 8): 1 — делитель поля (задняя фокальная плоскость системы увеличения), 2 — параболическое зеркало ($f = 150$ мм), 3 и 4 — массивы плоских зеркал, 5 — параболическое зеркало ($f = 900$ мм), 6 — плоскость изображения. Одновременно с делением изображения происходит его шестикратное увеличение. Итоговое поле составит $1,75 \times 27,93$ мм ($9 \times 144''$), а апертура уменьшится до $0,00313$.

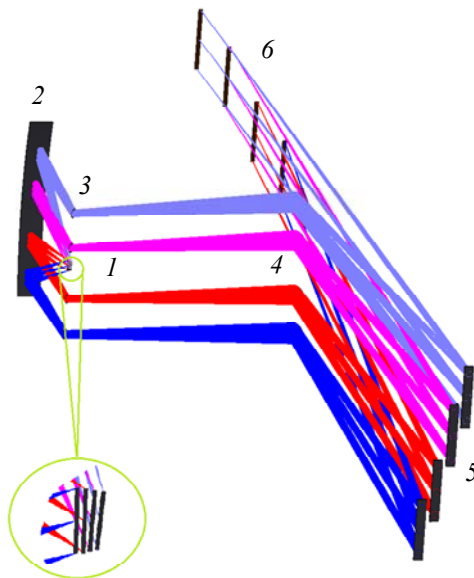


Рис. 5

На рис. 6 показан МИП второй ступени (4 канала из 8): 1 — делитель поля (задняя фокальная плоскость МИП первой ступени), 2 — параболическое зеркало ($f = 900$ мм), 3 и 4 — массивы плоских зеркал, 5 — параболическое зеркало ($f = 150$ мм), 6 — изображение щели (массив изображений). Однако после деления фрагмента еще на 8 частей размером $0,22 \times 27,93$ мм ($1,13 \times 144''$) оптическая система МИП дополнительно реорганизует их расположение. Также на второй ступени происходит шестикратное уменьшение. Таким образом,

итоговая щель, подаваемая на вход спектрометра, составит $0,036 \times 37,23$ мм ($0,18 \times 192''$), апертура $0,0375$.

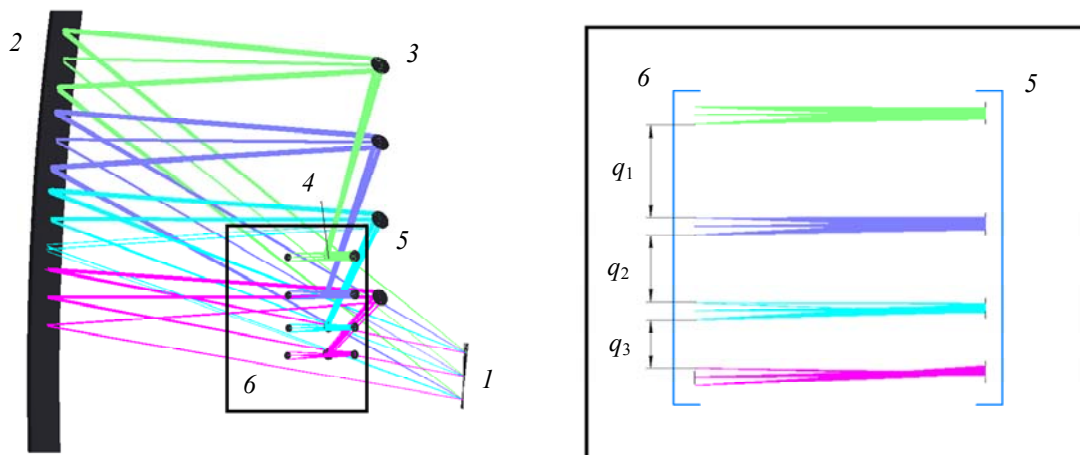


Рис. 6

С учетом системы увеличения, находящейся между телескопом и МИП, полученная ширина щели составит $0,09''$ в пространстве предметов системы, предшествующей МИП.

Таким образом, используя представленные схемные решения, возможно построить оптическую систему МИП и преобразовать поле прямоугольной формы в длинную узкую щель. Однако в изображении итоговой щели между элементами поля остаются пустые пространства, которые влияют на выбор размера используемого приемника. Так, с учетом разрывов (q_1, q_2, q_3) между элементами поля высота итоговой щели будет составлять 160 мм, расчетная высота без разрывов — 40 мм. Несмотря на то что разрывы в несколько раз увеличивают высоту итоговой щели, они могут быть использованы для снятия сигнала теневого поля приемника. Дальнейшая минимизация разрывов (q_1, q_2, q_3) возможна за счет поворота зеркал 3, 4 (рис. 6). Итоговая высота щели будет определяться размером приемника и характеристиками спектрометра.

Заключение. В настоящей работе представлена методика габаритного расчета оптической системы модуля интегрального поля. Предложен пошаговый алгоритм расчета таких систем, даны рекомендации. Показаны особенности согласования оптической системы телескопа и спектрометра и организации между ними преобразования прямоугольного поля в длинную щель. Предложенные подходы могут быть расширены при модернизации спектрометров и расширении инструментального парка обсерватории.

Представлен пример расчета МИП для телескопа КСТ-3 и его согласования с высоко-разрешающим спектрометром. С помощью показанного схемного решения МИП возможно преобразовать поле прямоугольной формы размером $1,2 \times 2,3$ мм ($6 \times 12''$) в щель размером $0,036 \times 160$ мм ($0,18 \times 768''$). С учетом введенной перед МИП системы двукратного увеличения сохраняется пространственное разрешение $0,1''$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bacon R. Optical 3D-Spectroscopy for Astronomy. NY: John Wiley & Sons, 2017. 296 p.
2. Mediavilla E. et al. 3D Spectroscopy in Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 271 p.
3. Григорьев В. М., Демидов М. Л., Колобов Д. Ю., Пуляев В. А., Скоморовский В. И., Чупраков С. А. Проект национального российского крупного солнечного телескопа с диаметром зеркала 3 м // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 19—36. <https://doi.org/10.12737/szf-62202002>.
4. Жеребцов Г. А. Комплекс гелиофизических инструментов нового поколения // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 6—18. <https://doi.org/10.12737/szf-62202001>.

5. Bacon R. et al. Slicing the universe at affordable cost: the quest for the MUSE image slicer // Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5249. <https://doi.org/10.1117/12.512397>.
6. Laurent F. et al. Optical design, manufacturing, and tests of the MUSE image slicer // Proc. of SPIE. 2005. Vol. 5965. <https://doi.org/10.1117/12.624836>.
7. Laurent F. et al. MUSE Integral Field Unit: Test results on the first out of 24 // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7739. <https://doi.org/10.1117/12.857004>.
8. Calcines A. et al. MuSiCa: the Multi-Slit Image Slicer for the EST Spectrograph // Journal of Astronomical Instrumentation. 2013. Vol. 2, N 1. P. 50009. DOI:10.1142/S2251171713500098.
9. Calcines A. et al. Feasibility study of high-resolution integral-field spectrographs for EST with multislit and multi-wavelength capabilities // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7735. <https://doi.org/10.1117/12.856725>.
10. Calcines A. et al. MuSiCa image slicer prototype at 1.5-m GREGOR solar telescope // Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9147. <https://doi.org/10.1117/12.2053577>.
11. Eikenberry S. et al. FISICA: the Florida image slicer for infrared cosmology and astrophysics // Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5492. <https://doi.org/10.1117/12.549150>.
12. Glenn P. et al. Design, fabrication, assembly, and testing of the Florida image slicer for infrared cosmology and astrophysics (FISICA) integral field unit // Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5492. <https://doi.org/10.1117/12.551661>.
13. Content R. Optical design of the KMOS slicer system // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6269. <https://doi.org/10.1117/12.672312>.
14. Surya A. et al. The Infrared Imaging Spectrograph (IRIS) for TMT: final design development of the data reduction system // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11452. <https://doi.org/10.1117/12.2561766>.
15. Kushibiki K. et al. Fabrication of mirror arrays with an ultra-precision cutting technique for a near-infrared integral field unit SWIMS-IFU // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11451. <https://doi.org/10.1117/12.2560431>.
16. Loupias M. et al. HARMONI - first light spectroscopy for the ELT: final design of the integral field unit // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11451. <https://doi.org/10.1117/12.2561374>.
17. Content R. et al. MAVIS IFU with AO for VLT: image slicer concept and design // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11451. <https://doi.org/10.1117/12.2562744>.
18. Chabot T. et al. Fabrication and characterization of aluminum image slicers // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11451. <https://doi.org/10.1117/12.2562458>.
19. McGurk R. et al. Development of the ROSIE integral field unit on the Magellan IMACS spectrograph // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11447. <https://doi.org/10.1117/12.2562950>.
20. Lawrence J. et al. The MANIFEST pre-concept design // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11447. <https://doi.org/10.1117/12.2563238>.
21. Content R. Optical design of MAAT: an IFU for the GTC OSIRIS spectrograph // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11447. <https://doi.org/10.1117/12.2563127>.
22. Ozaki S. et al. Performances of an integral field unit for FOCAS on the Subaru telescope // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11447. <https://doi.org/10.1117/12.2560602>.
23. Chen S. et al. Gemini IRMOS: preliminary optical design of a multi-object adaptive optics-fed infrared integral-field spectrograph // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11447. <https://doi.org/10.1117/12.2561942>.
24. Ozer Z. et al. HARMONI: First light spectroscopy for the ELT: final design and assembly plan of the spectrographs // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11447. <https://doi.org/10.1117/12.2560359>.
25. Nelson P. et al. The Visible Spectro-Polarimeter (ViSP) for the Advanced Technology Solar Telescope // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7735. <https://doi.org/10.1117/12.857610>.
26. Wijn A. et al. Preliminary design of the visible spectro-polarimeter for the Advanced Technology Solar Telescope // Proc. of SPIE. 2012. Vol. 8446. <https://doi.org/10.1117/12.926497>.
27. Rains A. Development of the single-mode fiber integral field unit for the RHEA Spectrograph // Proc. of SPIE. 2018. Vol. 10702. <https://doi.org/10.1117/12.2314336>.

28. Jarno A. et al. Developing an instrument simulator: experience feedback from the JWST/NIRSpec and VLT/MUSE simulators // Proc. of SPIE. 2012. Vol. 8449. <https://doi.org/10.1117/12.926420>.
29. Allington-Smith J. Basic principles of integral field spectroscopy // New Astronomy Reviews. 2006. Vol. 50, N 4—5. P. 244—251. <https://doi.org/10.1016/j.newar.2006.02.024>.
30. Witt E. INFUSE: a rocket-borne FUV integral field spectrograph // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11444. <https://doi.org/10.1117/12.2562537>.
31. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975.

Сведения об авторах

- Мария Кирилловна Орехова** — аспирант; Университет ИТМО, центр прикладной оптики; E-mail: marorekhova@gmail.com
- Алексей Валентинович Бахолдин** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, центр прикладной оптики; E-mail: bakholdin@itmo.ru

Поступила в редакцию 26.02.2023; одобрена после рецензирования 08.04.2023; принята к публикации 22.06.2023.

REFERENCES

- Bacon R. *Optical 3D-Spectroscopy for Astronomy*, NY, John Wiley & Sons, 2017, 296 p.
- Mediavilla E. et al. *3D Spectroscopy in Astronomy*, Cambridge, Cambridge University Press, 2010, 271 p.
- Grigoryev V.M., Demidov M.L., Kolobov D.Yu., Pulyaev V.A., Skomorovsky V.I., Chuprakov S.A. *Solar-Terrestrial Physics*, 2020, no. 2(6), pp. 14–29.
- Zherebtsov G.A. *Solar-Terrestrial Physics*, 2020, no. 2(6), pp. 3–13.
- Bacon R. et al. *Proceedings of SPIE*, 2004, vol. 5249, <https://doi.org/10.1117/12.512397>.
- Laurent F. et al. *Proceedings of SPIE*, 2005, vol. 5965, <https://doi.org/10.1117/12.624836>.
- Laurent F. et al. *Proceedings of SPIE*, 2010, vol. 7739, <https://doi.org/10.1117/12.857004>.
- Calcines A. et al. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2013, no. 1(2), pp. 50009, <https://doi.org/10.1142/S2251171713500098>.
- Calcines A. et al. *Proceedings of SPIE*, 2010, vol. 7735, <https://doi.org/10.1117/12.856725>.
- Calcines A. et al. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9147, <https://doi.org/10.1117/12.2053577>.
- Eikenberry S. et al. *Proceedings of SPIE*, 2004, vol. 5492, <https://doi.org/10.1117/12.549150>.
- Glenn P. et al. *Proceedings of SPIE*, 2004, vol. 5492, <https://doi.org/10.1117/12.551661>.
- Lawrence J. et al. *Proceedings of SPIE*, 2006, vol. 6269, <https://doi.org/10.1117/12.672312>.
- Surya A. et al. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11452, <https://doi.org/10.1117/12.2561766>.
- Kushibiki K. et al. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11451, <https://doi.org/10.1117/12.2560431>.
- Loupas M. et al. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11451, <https://doi.org/10.1117/12.2561374>.
- Content R. et al. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11451, <https://doi.org/10.1117/12.2562744>.
- Chabot T. et al. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11451, <https://doi.org/10.1117/12.2562458>.
- McGurk R. et al. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11447, <https://doi.org/10.1117/12.2562950>.
- Lawrence J. et al. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11447, <https://doi.org/10.1117/12.2563238>.
- Content R. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11447, <https://doi.org/10.1117/12.2563127>.
- Ozaki S. et al. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11447, <https://doi.org/10.1117/12.2560602>.
- Chen S. et al. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11447, <https://doi.org/10.1117/12.2561942>.
- Ozer Z. et al. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11447, <https://doi.org/10.1117/12.2560359>.
- Nelson P. et al. *Proceedings of SPIE*, 2010, vol. 7735, <https://doi.org/10.1117/12.857610>.
- Wijn A. et al. *Proceedings of SPIE*, 2012, vol. 8446, <https://doi.org/10.1117/12.926497>.
- Rains A. *Proceedings of SPIE*, 2018, vol. 10702, <https://doi.org/10.1117/12.2314336>.
- Jarno A. et al. *Proceedings of SPIE*, 2012, vol. 8449, <https://doi.org/10.1117/12.926420>.
- Allington-Smith J. *New Astronomy Reviews*, 2006, no. 4-5(50), pp. 244–251, <https://doi.org/10.1016/j.newar.2006.02.024>.
- Witt E. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11444, <https://doi.org/10.1117/12.2562537>.
- Peysakhson I.V. *Optika spektral'nykh priborov* (Optics of Spectral Instruments), Leningrad, 1975. (in Russ.)

Data on author

- Maria K. Orekhova** — Post-Graduate Student; ITMO University, The Center of Applied Optics; E-mail: marorekhova@gmail.com
- Alexey V. Bakholdin** — PhD, Associate Professor; ITMO University, The Center of Applied Optics; E-mail: bakholdin@itmo.ru

Received 26.02.2023; approved after reviewing 08.04.2023; accepted for publication 22.06.2023.