



Спектрометр скрещенной дисперсии для анализа спектров отражения космических объектов

Ю.В. Бажанов^{1,2}, Е.И. Вяжанский^{1,2}✉, Г.А. Можаров¹,
И.И. Олейников^{1,2}, В.П. Савиных¹

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

² АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия

✉ 79163735866@yandex.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Бажанов Ю.В., Вяжанский Е.И., Можаров Г.А., Олейников И.И., Савиных В.П. Спектрометр скрещенной дисперсии для анализа спектров отражения космических объектов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2023. Т. 67. № 4. С. 139–145. DOI:10.30533/GiA-2023-037.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА спектрометр, скрещенная дисперсия, дифракционная решетка, схема Черни-Тернера

АННОТАЦИЯ В статье представлен расчет спектрометра скрещенной дисперсии для анализа спектров отражения космических объектов. Разработка данной системы дает дополнительный признак для идентификации космических объектов, т.к. позволит судить о составе их поверхности. Из-за короткого времени наблюдения слабого, быстро перемещающегося источника излучения требуется широкая щель спектрометра, в результате изображение с заданным спектральным разрешением значительно растягивается, а использование схемы скрещенной дисперсии позволяет распределить его по отдельным спектральным порядкам на матричном приемнике. За основу взята схема Черни-Тернера, где дифракционная решетка находится в параллельных пучках, а расстояние равно 0,85 от фокуса второго зеркала для минимизации поперечных аберраций. Используя приведенные в работе соотношения, получена предварительная схема, при этом оптимизация ведется с помощью программы ZEMAX при условии равенства радиусов зеркал. В работе рассмотрены различные виды поверхностей зеркала, включая поверхности с одной плоскостью симметрии. Лучшие результаты получены при использовании поверхности свободной формы. Использование оптической схемы скрещенной дисперсии с одним

зеркалом и одной дифракционной решеткой значительно упрощает компоновку, уменьшает габариты и увеличивает надежность. Отсутствие пропускающих оптических элементов позволяет в данной схеме использовать спектрометр в нескольких спектральных диапазонах путем замены дифракционной решетки. Это дает возможность вести наблюдения как в видимой, так и в ближней инфракрасной областях спектра, что будет способствовать более точным определением состава поверхности космического объекта.

1 Введение

В настоящее время на орбитах вокруг Земли по данным Европейского космического агентства (англ. — European Space Agency, ESA) находится около 33 тыс. фрагментов и обломков размером до 10 см, около 670 тыс. — размером менее 10 см и более 170 миллионов обломков размером от 1 см до 1 мм. Полная масса космических объектов на орбите Земли около 11 тысяч тонн. Они развивают скорость до 56000 км/ч, что при столкновении может привести как к серьезным повреждениям оборудования, так и к гибели космонавтов в результате пробития скафандра.

С увеличением числа космических объектов (КО) возникает более сложная проблема их отслеживания. При наблюдении в поле зрения может появиться несколько объектов, и их идентификация становится все более сложной. Таким образом целью спектроскопических наблюдений является получение дополнительного отличительного признака КО наряду с его пространственным положением и кривой блеска. При этом появляется возможность определения состава поверхности КО и выявления типа объекта (космический аппарат, разгонный блок, космический мусор).

Зарубежные исследования представлены достаточно широко. Для этой цели используются как астрономические приборы, так и специально разработанные инструменты для наблюдения КО [1–4].

В России отсутствуют наблюдения спектров отражения КО, имеется лишь несколько работ по лабораторному измерению спектров отражения материалов для КО.

2 Материалы и методы

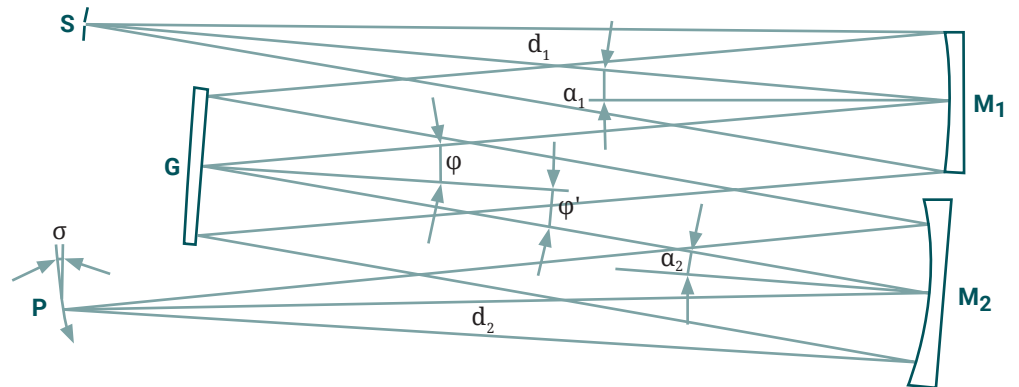
2.1 Выбор оптической схемы

Предметом данной работы является создание спектрометра, предназначенного для наблюдения спектров отражения КО. В отличие от звездных спектрометров за исключением неподвижных геостационарных КО наблюдение быстро перемещающихся объектов требует большего поля зрения спектрометра и короткого времени накопления. Все это приводит к широкой входной щели спектрометра. В результате для получения спектрального изображения заданного разрешения необходима его большая длина, которая не может быть реализована с использованием

приемника излучения в виде линейки. Наиболее перспективными для этой цели являются спектрометры скрещенной дисперсии, которые отображают информацию в виде отдельных спектров, построчно расположенных на приемной матрице.

Обычно спектрометры скрещенной дисперсии состоят из решетки и призмы, плоскость дисперсии которых расположены перпендикулярно или из двух перпендикулярно скрещенных решеток. В данной статье рассматривается возможность расчета спектрального устройства, основанного на двумерной решетке типа эшелетт. Спектры высоких порядков такой решетки расположены на датчике в виде строк, однако дополнительный дисперсионный элемент отсутствует. Наиболее подходящей для этого является схема Черны-Тернера, где плоская решетка расположена между двумя вогнутыми зеркалами. Для упрощения возьмем классическую схему Черны-Тернера, где дифракционная решетка находится в параллельных пучках, а расстояние от решетки равно 0,85 от фокуса второго зеркала. В этом случае спектральное изображение находится на плоскости с минимизацией поперечных aberrаций¹. Оптическая схема Черны-Тернера приведена на Рисунке 1.

Рис. 1 ➤
Оптическая схема Черны-Тернера.



2.2 Расчет aberrаций

Плоская классическая дифракционная решетка не вносит aberrаций, поэтому суммарные aberrации системы могут быть получены в виде¹:

$$1 \quad \delta y' = \delta \bar{y}'_1 \Gamma \frac{f_2}{f_1} + \delta y'_2,$$

$$2 \quad \delta z' = \delta \bar{z}'_1 \frac{f_2}{f_1} + \delta z'_2,$$

где $\delta y'_1, \delta z'_1, \delta \bar{y}'_1, \delta \bar{z}'_1$ – aberrации коллимирующего зеркала, M_1 с фокусным расстоянием f_1 и $\delta y'_2, \delta z'_2$ – aberrации фокусирующего зеркала M_2 с фокусным расстоянием f_2 (стрелка означает, что расчет зеркала M_1 производился в обратном ходе луча), $\Gamma = \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'}$ – меридиональное увеличение

решетки, где φ и φ' – углы падения и дифракции решетки. Аналогично выражениям для вогнутой решетки компоненты aberrации в мери-

¹ Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Машиностроение, 1975. 312 с.

- 3 ⬇️ диагональной и сагиттальной плоскостях отдельного зеркала могут быть записаны в виде рядов^{1,2}:

$$\delta y'_{1,2} = \frac{d}{\cos \alpha} (yM_{200} + \frac{3}{2}y^2M_{300} + \frac{1}{2}z^2M_{120} + \frac{1}{2}L_0^2M_{102} + zL_0'M_{111} + \frac{1}{2}y^3M_{400} + \frac{1}{2}yz^2M_{220}) + \dots$$

$$\delta z'_{1,2} = d(zM_{020} + yzM_{120} + yL_0'M_{111} + \frac{1}{2}y^2zM_{220} + \frac{1}{2}z^3M_{040}) + \dots$$

- 4 ⬆️ коэффициенты аберраций зеркала в параллельных пучках, падающих под углом α и фокусирующихся на расстоянии d , выражаются в виде:

5 ⬆️
$$M_{200} = T + T', \quad M_{020} = S + S',$$

6 ⬆️
$$M_{300} = -\frac{T'}{d} \sin \alpha - 4a_{30} \cos \alpha, \quad M_{120} = -\frac{S'}{d} \sin \alpha - 4a_{12} \cos \alpha,$$

7 ⬆️
$$M_{400} = 4\frac{T'}{d^2} \sin^2 \alpha - \frac{T'^2}{d} + 4a_{20}^2 \left(\frac{1}{d}\right) + 8a_{30} \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{d} - 16a_{40} \cos \alpha,$$

8 ⬆️
$$M_{220} = 2\frac{S'}{d^2} \sin^2 \alpha - \frac{T'S'}{d} + 4a_{20}a_{02} \left(\frac{1}{d}\right) - 8a_{22} (\cos \alpha) - 4a_{12} \left(\frac{\sin \alpha \cos \alpha}{d}\right),$$

9 ⬆️
$$M_{040} = 4a_{02}^2 \left(\frac{1}{d}\right) - 16a_{04} (\cos \alpha) - \frac{S'^2}{d},$$

где

10 ⬆️
$$T = -2a_{20} \cos \alpha, \quad T' = \frac{\cos^2 \alpha}{d} - 2a_{20} \cos \alpha,$$

$$S = -2a_{02} \cos \alpha, \quad S' = \frac{1}{d} - 2a_{02} \cos \alpha.$$

Для всех поверхностей коэффициенты $\alpha_{20} = \frac{1}{2r}$ и $\alpha_{02} = \frac{1}{2\bar{r}}$, где r и \bar{r} –

меридиональный и сагиттальный радиусы кривизны поверхности в ее вершине, значения коэффициентов для различных типов поверхностей приведены в [5]. Приравнивая коэффициенты M_{200} и M_{020} к нулю из уравнений (5)–(10), мы можем получить расстояние до точки фокусировки в меридиональном сечении и значение радиуса кривизны для сагиттального поперечного сечения для компенсации астигматизма 1-го порядка для каждого зеркала:

11 ⬆️
$$d = \frac{r \cos \alpha}{2}, \quad \bar{r} = r \cos^2 \alpha.$$

В работе [6] получено условие равенства нулю меридиональной комы M_{300} ,

12 ⬆️
$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \left(\frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha_1}\right)^3 \left(\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'}\right)^3,$$

2 Noda H., Namioka T., Seya M. Geometric theory of the grating // JOSA. 1974. Vol. 64. No. 8. С. 1031–1036.

13 ➔

а в работе [7] – сагиттальной комы M_{120} .

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \left(\frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} \right)^3 \left(\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'} \right).$$

Используя предыдущие соотношения получим предварительную схему, при этом берем радиусы зеркал одинаковыми и оптимизируем как одно зеркало. В результате получаем схему со следующими параметрами: радиус зеркала $r = 396$ мм, $\alpha_1 = 5^\circ$, $\alpha_2 = 5,5^\circ$. Эти значения используются в качестве исходных для оптимизации параметров оптической схемы.

3 Результаты и обсуждение

Расчет выполнен с использованием программного обеспечения ZEMAX. Оптическая схема представлена на Рисунке 2.

В качестве первичной решетки мы используем плоскую решетку с частотой штрихов $N_1 = 100 \text{ мм}^{-1}$ в порядках спектра от 10 до 18, а в качестве дополнительной решетки $N_2 = 100 \text{ мм}^{-1}$ в первом порядке спектра. Длины волн и соответствующие порядки спектра указаны в Таблице 1.

Рис. 2 ➔

Оптическая схема с одним зеркалом.

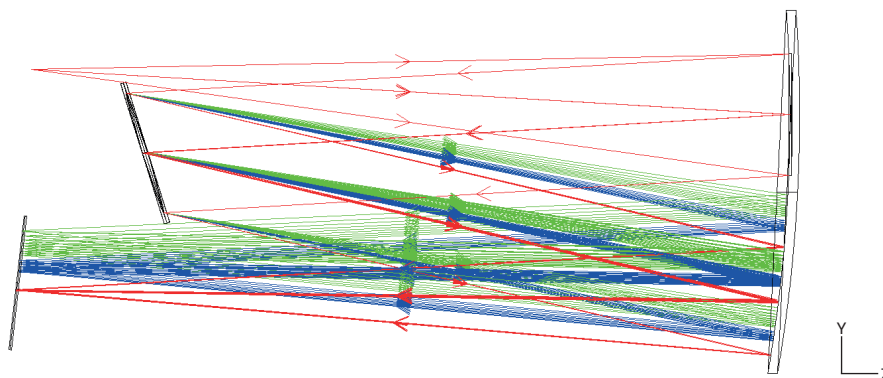


Таблица 1 ➔

Распределение длин волн по порядкам дифракции.

k	18	17	16	15	14	13	12	11	10
λ_{\min} , нм	395	417	441	469	500	556	577	625	682
λ_0 , нм	406	429	455	484	518	536	601	653	716
λ_{\max} , нм	417	441	469	500	536	577	625	682	750

Верхняя строка таблицы – спектральный порядок k , три следующие строки – длины волн. Их комплект составляет 9 конфигураций. Общей спектральной области 400–750 нм. Если порядки спектра поместить в линию, то его длина будет примерно в 9 раз больше, что затрудняет получение спектрального изображения высокого качества. Еще одним существенным преимуществом такого расположения спектров является то, что все порядки спектра могут находиться в области высокой дифракционной эффективности.

Пространственное расположение порядков спектра представлено на Рисунке 3.

Среднеквадратические значения радиуса пятна рассеяния при использовании зеркал круговой симметрии, мкм приведены в Таблицах 2 и 3.

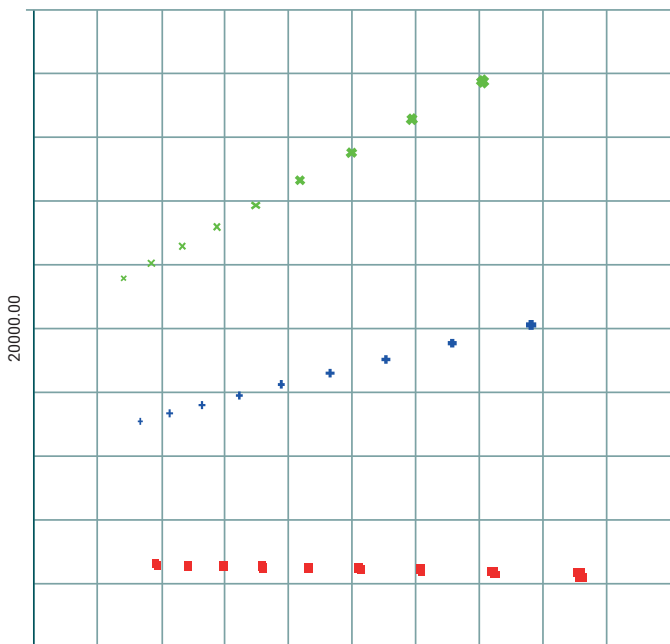


Рис. 3 Пространственное расположение порядков спектра.

Верхняя строка Таблиц 2 и 3 – порядки спектра (10, 14, 18), три последующие строки – значения СКО радиуса для длин волн в конфигурациях. Как видно из таблиц асферическое зеркало не приводит к улучшению качества изображения, в то время как торическое значительно улучшает, но использование дополнительной асферики на торическом зеркале дальнейшего улучшения не приносит. Лучший результат – использование поверхности свободной формы. Коэффициенты поверхности свободной формы a_{ij} получены, приравнивая коэффициенты аберраций M_{ijk} к нулю. Успехи в изготовлении оптических элементов произвольной формы позволяют нам надеяться на реализацию этого варианта. В виду того, что ширина щели спектрометра составляет 100–200 мкм использование торического зеркала также представляет интерес.

Тип	Сферическое зеркало			Асферическое зеркало		
	18	14	10	18	14	10
k	18	14	10	18	14	10
λ_{min}	56,5	50,7	42,6	36,1	30,7	29,3
λ_0	69,2	66,2	62,5	42,3	39,9	39,5
λ_{max}	83,1	83,6	86,7	42,9	42,6	44,3

Таблица 2 Среднеквадратические значения радиуса пятна рассеяния при использовании зеркал круговой симметрии, мкм.

Тип	Торическое зеркало			Торическое зеркало с асфер.			Зеркало свободной формы		
	18	14	10	18	14	10	18	14	10
k	18	14	10	18	14	10	18	14	10
λ_{min}	20,3	20,5	36,2	17,7	10,3	18,0	17,2	16,4	24,0
λ_0	16,7	11,9	29,7	19,6	15,3	29,2	17,3	15,7	19,2
λ_{max}	23,9	22,3	40,9	19,7	17,2	39,8	19,9	18,4	22,8

Таблица 3 Среднеквадратические значения радиуса пятна рассеяния при использовании зеркал с одной плоскостью симметрии, мкм.

4 Выводы

Использование простейшей оптической схемы, включающей скрещенную решетку и вогнутое зеркало, значительно упрощает компоновку и надежность устройства. Отсутствие пропускающих оптических элементов позволяет в данной схеме использовать спектрометр в нескольких спектральных диапазонах путем замены дифракционной решетки. В ультрафиолетовой области (267–500 нм) с решетками частотой 150 мм^{-1} , в ближней инфракрасной области (800–1500 нм) с решетками частотой 50 мм^{-1} . Это дает возможность вести наблюдения как в видимой, так и в ближней инфракрасной областях спектра, что будет способствовать более точным определением состава поверхности космического объекта.

Настоящая работа написана в развитии статьи [7], впоследствии опубликованы работы [8, 9], которые в несколько иной форме используют скрещенные решетки. Первые экспериментальные результаты позволяют надеяться на успешное использование скрещенных решеток в спектральных приборах.

БИБЛИОГРАФИЯ


1. Jorgensen K., et al. Physical properties of orbital debris from spectroscopic observations // *Advances in Space Research*. 2004. Vol. 34. No. 5. С. 1021–1025.
2. Pearce E.C., Weiner B., Krantz H. Examining the effects of on-orbit aging of SL-12 rocket bodies using visible band Spectra with the MMT Telescope // *Journal of Space Safety Engineering*. 2020. Vol. 7. No. 3. С. 376–380.
3. Reyes J.A., et al. Spectroscopic Behavior of Composite, Black Thermal Paint, Solar Cell, and Multi-layered Insulation Materials in a GEO Simulated Environment // *The First International Orbital Debris Conference (IOC)*. 2019. Article ID: JSC-E-DAA-TN74753.
4. Šilha J. Space debris: optical measurements // *Reviews in Frontiers of Modern Astrophysics: From Space Debris to Cosmology*. 2020. С. 1–21.
5. Бажанов Ю.В. Геометрические параметры вогнутых нарезных и голограммных дифракционных решеток с неравноотстоящими штрихами // *Оптический журнал*. 2003. Т. 70. №. 5. С. 31–34.
6. Shafer A.B., Megill L.R., Droppelman L. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer // *JOSA*. 1964. Т. 54. №. 7. С. 879–887.
7. Bazhanov Y., et al. Design of two-dimensional (crossed) grating calculation in Czerny-Turner spectrometer with usage of freeform mirrors // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2017. Article ID: 103750V-103750V.
8. Thomae D., et al. Compact echelle spectrometer employing a cross-grating. // *Applied Optics*. 2018. Vol. 57. No. 25. P. 7109–7116.
9. Kraus M., et al. Realization of a compact cross-grating spectrometer and validating experimental tests // *Applied Optics*. 2020. Vol. 59. Issue 5. P. 1338–1346.

АВТОРЫ

Бажанов Юрий Вадимович

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной оптики, факультет оптического приборостроения
д-р техн. наук, профессор

Вязанский Егор Игоревич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной оптики, факультет оптического приборостроения
 0009-0004-1882-4638


Можаров Григорий Афанасьевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной оптики, факультет оптического приборостроения
д-р техн. наук, профессор

Олейников Игорь Игоревич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной оптики, факультет оптического приборостроения
д-р техн. наук, профессор

Савиных Виктор Петрович

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра аэрокосмических съемок, геодезический факультет
д-р техн. наук, профессор
 0000-0002-3259-6721

Поступила 31.07.2023. Принята к публикации 21.08.2023. Опубликовано 28.08.2023.