

04

Солнечный телескоп мягкого рентгеновского диапазона для наноспутника на основе камеры-обскуры

© С.В. Кузин,¹ А.С. Кириченко,^{2,3} А.А. Перцов,^{1,3} С.А. Богачев,^{2,3} Н.Ф. Ерхова⁴

¹ Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033 Иркутск, Россия

² Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия

³ Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, 443086 Самара, Россия

⁴ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия
e-mail: kuzin@iszf.irk.ru

Поступило в Редакцию 19 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 19 апреля 2022 г.

Принято к публикации 19 апреля 2022 г.

Представлен проект солнечного телескопа мягкого рентгеновского диапазона на основе камеры-обскуры. Инструмент предназначен для мониторинга вспышечной активности и позволяет получать изображения солнечного диска с угловым разрешением до $40''$, а также строить временные профили вспышек и определять спектральный состав излучения. Конструкция телескопа включает выносную диафрагму диаметром 0.1 mm, тонкопленочный майларовый фильтр и детектор изображения на основе CMOS-матрицы с обратной засветкой. Прибор предназначен для установки на космическом аппарате формата кубсат размером 6 U. Размер прибора составляет 0.5 U с раскладываемой фермой диафрагмы размером 20 см в сложенном состоянии и 50 см в раскрытом.

Ключевые слова: мягкий рентгеновский диапазон, солнечная корона, камера-обскура, кубсат.

DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52769.88-22

Введение

В настоящее время стремительно растет интерес к проведению научных и прикладных исследований на космических аппаратах типа кубсат с массой несколько килограмм. Такие платформы имеют характерную составную конструкцию, которая образуется из простейших юнитов 1 U с размером примерно $10 \times 10 \times 10$ см. Этот формат был предложен более 20 лет назад и с тех пор не претерпел существенных изменений [1]. Размеры спутников при этом растут. Если вначале в основном запускались кубсаты форматом 1 U, то уже в 2020 году в запусках преобладали наноспутники форматом 3 U и более. Одновременно происходит коммерциализация рынка кубсатов и их узлов, что позволяет собирать спутники из серийно производимых компонент под конкретные потребности научных и прикладных экспериментов. Широкое распространение в последние 2–3 года получили кубсаты формата 6 U, которые позволяют размещать сравнительно габаритную научную аппаратуру ($30 \times 10 \times 10$ см и более), а также обычно оснащены более точной системой ориентации и стабилизации, а кроме того, позволяют передавать на Землю существенные объемы научной информации.

Интерес к кубсатам вызван также высокой стоимостью и долгими сроками подготовки экспериментов на больших космических аппаратах. Особенно это акту-

ально для изучения и мониторинга солнечной активности. Несмотря на огромный научный и прикладной интерес к результатам наблюдения Солнца, количество новых космических солнечных обсерваторий очень мало. По этой причине есть существенный интерес к разработкам малоразмерных научных инструментов, способных работать на наноспутниках и кубсатах. В настоящей работе представлен проект солнечного телескопа мягкого рентгеновского диапазона на основе камеры-обскуры, который адаптирован для работы на кубсате.

1. Применение рентгеновской камеры-обскуры в солнечной астрономии

Вопросы постановки экспериментов с области физики Солнца на кубсатах активно исследуются. В частности, в последние годы проведены эксперименты по фотометрии рентгеновского солнечного излучения [2] и его спектральному составу. Разрабатываются также проекты телескопов ВУФ диапазона [3].

Одним из актуальных направлений исследований короны Солнца является получение изображений и спектров в мягкой рентгеновской (МР) области спектра — 1–10 keV. Линии ионов плазмы в этом диапазоне возбуждаются при температурах в несколько миллионов

градусов, что соответствует вспышечным процессам. До настоящего времени для регистрации солнечных изображений в МР диапазоне применялись телескопы скользящего падения [4] или изображающие спектрометры на основе брэгговских кристаллических зеркал. Оба типа инструментов имеют значительные размеры в силу особенностей оптической системы. Поскольку на аппаратуру, разрабатываемую для наноспутников, накладываются серьезные ограничения по весу, габаритам, энергопотреблению и информативности, то традиционные оптические системы использованы быть не могут. Для получения изображений в МР диапазоне на наноспутниках предлагается использовать камеру-обскуру, которая представляет собой небольшую диафрагму в непрозрачном экране (рис. 1).

Размер изображения обскуры D определяется угловым размером изображения T и расстоянием от диафрагмы до плоскости приемника, а разрешение, без учета дифракции, размером диафрагмы d . Таким образом, линейное разрешение в плоскости приемника определяется отношением d/D .

Исторически, первыми экспериментами по регистрации рентгеновских изображений в космосе были американский и советский эксперименты по наблюдению Солнца в начале 60-х годов прошлого века [5,6]. Поскольку в то время не было эффективной оптики рент-

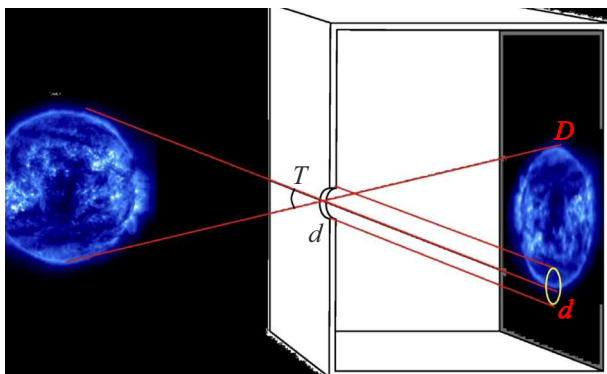


Рис. 1. Принцип действия камеры-обскуры.

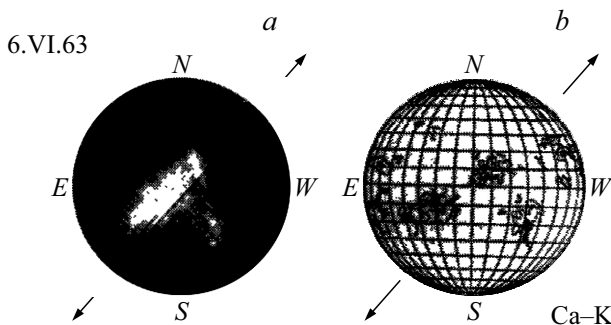


Рис. 2. Изображение Солнца, полученное в диапазоне 170–400 Å с помощью камеры-обскуры в ФИАН в 1963 г. (а); полученное в тот же период наземным телескопом в линии Ca–K (b).

геновского диапазона, построение изображений проводилось с помощью камеры-обскуры, оснащенной тонкоплочным фильтром для блокировки видимого излучения (рис. 2). Недостатки такого метода наблюдений заключаются в низкой светосиле, разрешении, определяемом отношением диаметра диафрагмы к расстоянию до фокальной плоскости, а также в полихроматичности регистрируемых изображений, так как спектральный диапазон такого инструмента определяется, в первую очередь, используемым фильтром. В то же время камера-обскура имеет большое поле зрения и простоту юстировки и эксплуатации. В настоящее время появились новые проекты солнечных телескопов с использованием камеры-обскуры [7–9]. Это связано с развитием двухкоординатных кремниевых детекторов, которые позволяют резко увеличить информативность инструмента и получать, помимо пространственного, спектральное разрешение.

2. Краткое описание аппаратуры

Изображение формируется в плоскости двухкоординатного кремниевых детектора после прохождения излучения через отверстие в непрозрачной диафрагме из вольфрама толщиной 0.4 mm. Для фильтрации оптического излучения на диафрагме установлен тонкоплочный фильтр из алюминированного майлара толщиной 10 μm.

Для реализации инструмента были выбраны следующие основные характеристики камеры-обскуры: диаметр диафрагмы 0.2 mm, расстояние от диафрагмы до плоскости приемника 500 mm. Это позволяет получить размер изображения Солнца на детекторе размером примерно 5 mm. При выбранных параметрах разрешение составляет около 40". Регистрация изображения проводится с помощью двухкоординатного кремниевых детектора. При малых потоках излучения (в отсутствие мощных вспышек и при малом времени экспозиции) возможно выделение единичных фотонных событий на матрице и построение соответствующего спектра.

В телескопе будет использован приемник изображения на основе CMOS-матрицы с обратной засветкой типа Gpixel GSENSE2020BSI форматом 2048 × 2048 активных пикселей [10]. Размер пикселя 6.5 × 6.5 μm. Динамический диапазон составляет 67.5 dB. Амплитудное разрешение при регистрации отдельных фотонов в диапазоне 1 keV–60 eV.

Приемник имеет два режима работы: режим регистрации изображения и режим счета отдельных фотонов. В режиме счета фотонов возможен амплитудный (спектральный) анализ энергии фотона. В режиме регистрации изображений производится биннинг (объединение) пикселей в квадрате от 2 × 2 до 16 × 16. Соответственно эффективный размер элемента изображения составляет от 13 × 13 до 124 × 124 μm. Для передачи в канал сброса информации реализовано программное сжатие

Характеристики рентгеновской камеры-обскуры

Параметр	Значение
Энергетический диапазон, keV	1–20
Энергетическое разрешение, eV	60–150
Угловое разрешение, "	40
Размер изображения, cells	700 × 700
Объем изображения, Kbyte	10
Время экспозиции при получении изображения, s	10–100
Минимальное время экспозиции в режиме спектроскопии, s	0.1

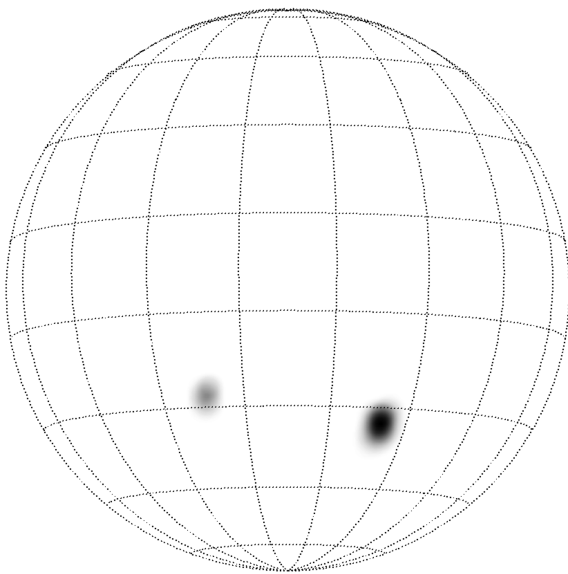


Рис. 3. Модельное изображение Солнца по данным рентгеновской камеры-обскуры.

на основе дискретного вэйвлет-преобразования с последующим арифметическим кодированием. Коэффициент сжатия информации достигает 1:100, что позволяет получать полноценные изображения Солнца размером не более 10 Kbyte. Мощность потребления приемника ожидается не более 1.5 W в активном и не более 0.5 W в режиме ожидания. Интерфейс связи с бортовыми системами спутника будет осуществляться по интерфейсам RS485 или CAN. Характеристики инструмента указаны в таблице.

На рис. 3 представлено модельное изображение Солнца в МР диапазоне в том виде, в котором его бы зарегистрировала разрабатываемая камера-обскура. В целом, пространственное разрешение камеры-обскуры хуже, чем у приборов с более сложными оптическими схемами, что, однако, не критично, так как изучение структуры источников излучения не входит в список приоритетных задач прибора. Также, можно заметить, что изображение по данным камеры-обскуры переверну-

то относительно оригинала, что является особенностью принципа построения самого изображения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *CDS. CubeSat Design Specification. Rev. 13* (California Polytechnic State University, 2015), 42 p.
- [2] J.P. Mason, T.N. Woods, A. Caspi, P.C. Chamberlin, C. Moore, A. Jones, R. Kohnert, X. Li, S. Palo, S.C. Solomon. *J. Spacecraft Rockets*, **53** (2), 328–339 (2016). DOI: 10.2514/1.A33351
- [3] С.В. Кузин, С.А. Богачев, Н.Ф. Ерхова, А.А. Перцов, И.П. Лобода, А.А. Рева, А.А. Холодилов, А.С. Ульянов, А.С. Кириченко, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, М.Н. Торопов, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало, В.А. Крюковский, В.Н. Горев, А.А. Дорошкин, А.М. Задорожный, В.Ю. Прокопьев. *ЖТФ*, **91** (10), 1441 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51355.115-21
- [4] S. Tsuneta, L. Acton, M. Bruner, J. Lemen, W. Brown, R. Carvalho, R. Catura, S. Freeland, B. Jurcevich, M. Morrison, Y. Ogawara, T. Hirayama, J. Owens. *Sol. Phys.*, **136** (1), 37 (1991). DOI: 10.1007/BF00151694
- [5] R.L. Blake, T.A. Chubb, H. Friedman, A.E. Unzicker. *Astrophys. J.*, **137**, 3 (1963). DOI: 10.1086/147479
- [6] S.L. Mandelstam. *Space Sci. Rev.*, **4**, 587 (1965). DOI: 10.1007/BF00216272
- [7] J. Sylwester, S. Płoceniak, J. Bakała, Ż. Szaforz, M. Stęślicki, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, P. Podgórski, J. Hernandez, S. Shestov. *Proc. Int. Astron. Union*, **305**, 114 (2015). DOI: 10.1017/S1743921315004627
- [8] A. Caspi, A.Y. Shih, H. Warren, A.R. Winebarger, T.N. Woods, C.M.M. Cheung, C. DeForest, J.A. Klimchuk, G.T. Laurent, J.P. Mason, S.E. Palo, R. Schwartz, D.B. Seaton, M. Steslicki, S. Gburek, J. Sylwester, T. Mrozek, M. Kowaliński, M. Schattenburg. *American Geophysical Union* (2020) #SH048-0007.
- [9] A. Kirichenko, S. Kuzin, S. Shestov, A. Ulyanov, A. Pertsov, S. Bogachev, A. Reva, I. Loboda, E. Vishnyakov, S. Dyatkov, N. Erkhova, M. Stęślicki, J. Sylwester, S. Płoceniak, P. Podgórski, M. Kowaliński, J. Bakała, Ż. Szaforz, M. Siarkowski, D. Ścisłowski, T. Mrozek, B. Sylwester, I. Malyshev, A. Pestov, V. Polkovnikov, M. Tоропов, N. Salashchenko, N. Tsybin, N. Chkhalo. *Front. Astron. Space Sci.*, **8**, 66 (2021). DOI: 10.3389/fspas.2021.646895
- [10] *Gpixel products* [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.gpixel.com/products/area-scan-en/gse-nse/gsense2020bsi>