

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ**

УДК 520.344.2 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.20.1.10.20 EDN RNFRKB

**Создание прототипа охлаждаемой
мозаичной фокальной плоскости**

В. Е. Квитка, к. т. н., kva-vasja@yandex.ru

Филиал АО «РКЦ “Прогресс”»–НПП «ОПТЭКС», г. Москва, Зеленоград, Российская Федерация
Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация

В. А. Лавренов, к. т. н., optecs@samspace.ru

Филиал АО «РКЦ “Прогресс”»–НПП «ОПТЭКС», г. Москва, Зеленоград, Российская Федерация
Московский институт электронной техники, г. Москва, Зеленоград, Российская Федерация

С. М. Мастюгин, optecs@samspace.ru

Филиал АО «РКЦ “Прогресс”»–НПП «ОПТЭКС», г. Москва, Зеленоград, Российская Федерация

В. Д. Блинов, v_blinov@mail.ru

Филиал АО «РКЦ “Прогресс”»–НПП «ОПТЭКС», г. Москва, Зеленоград, Российская Федерация

А. С. Шепелев, a.shepelev@npp-elar.ru

АО «НПП “ЭЛАР”», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

В. В. Петров, vvp@npp-elar.ru

АО «НПП “ЭЛАР”», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

А. А. Никитин, аспирант МФТИ, andrei.naa@yandex.ru

Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация

Р. О. Кукушкин, студент МФТИ, roma20989@gmail.com

Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрена задача построения мозаичного фотоприемного устройства для оптико-электронного преобразователя астрономических телескопов наземного базирования. Описана необходимость минимизации темнового сигнала путем охлаждения матричных фотоприемников. Обоснована температура охлаждения. Определен облик оптико-электронного преобразователя, способ охлаждения, конфигурация теплообменника. Предложена «сухая» посадка фотоприемников, обеспечивающая высокую ремонтпригодность аппаратуры. Проведены расчеты ключевой характеристики перспективного телескопа — проникающей способности и связанной с ней дальности обнаружения астероида для перспективной системы контроля космического пространства.

Ключевые слова: астрономический телескоп, мозаичное фотоприемное устройство, наблюдение астероидов, охлаждение фотоприемников

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Prototyping a Cooled Mosaic Focal Photodetector

V. E. Kvitka, *Cand. Sci. (Engineering)*, kva-vasja@yandex.ru

*Joint Stock Company “Space Rocket Centre «Progress»–Scientific and Production Enterprise «ОПТЕКС»”,
Zelenograd, Moscow, Russian Federation*

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation

V. A. Lavrenov, *Cand. Sci. (Engineering)*, optecs@samspace.ru

*Joint Stock Company “Space Rocket Centre “Progress”–Scientific and Production Enterprise «ОПТЕКС»”,
Zelenograd, Moscow, Russian Federation*

National Research University of Electronic Technology — MIET, Zelenograd, Moscow, Russian Federation

S. M. Mastiugin, optecs@samspace.ru

*Joint Stock Company “Space Rocket Centre “Progress”–Scientific and Production Enterprise «ОПТЕКС»”,
Zelenograd, Moscow, Russian Federation*

V. D. Blinov, v_blinov@mail.ru

*Joint Stock Company “Space Rocket Centre “Progress”–Scientific and Production Enterprise «ОПТЕКС»”,
Zelenograd, Moscow, Russian Federation*

A. S. Shepelev, a.shepelev@npp-elar.ru

Joint Stock Company “Research and Production Enterprise “ELAR””, Saint-Petersburg, Russian Federation

V. V. Petrov, vvp@npp-elar.ru

Joint Stock Company “Research and Production Enterprise “ELAR””, Saint-Petersburg, Russian Federation

A. A. Nikitin, *PhD student*, andrei.naa@yandex.ru

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation

R. O. Kukushkin, *student*, roma20989@gmail.com

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation

Abstract. The article considers the problem of constructing a mosaic photodetector array, which is one of the main components of ground-based astronomical telescopes. The necessity of minimizing dark signal by cooling matrix photodetectors is described, and the cooling temperature is substantiated. The shape of the optoelectronic converter, the cooling method, and the configuration of the heat exchanger are determined. A “dry” pinning of photodetectors is proposed to ensure high maintainability of the equipment. The text contains a calculation of the key characteristic of a promising telescope — the maximum detected apparent magnitude. This characteristic is also used to determine the associated asteroid detection range for a future space monitoring system.

Keywords: astronomical telescope, mosaic photodetector, observation of asteroids, cooling of photodetectors

Состояние проблемы

Одним из основных направлений развития астрономических телескопов как наземного, так и космического базирования является увеличение проникающей способности, то есть максимально возможной звездной величины наблюдаемого объекта. Каждый новый телескоп способен различать все более тусклые объекты. Технически проникающая способность может быть повышена за счет увеличения диаметра входного зрачка телескопа, чувствительности фотоприемников и времени накопления сигнала. Рост первых двух параметров ограничен как физическими пределами (квантовый выход фотоприемника не может превышать 100%), так и сугубо техническими ограничениями (изготовление высокоточных зеркал диаметром 5–6 м требует колоссальных затрат). С учетом этих обстоятельств основным способом повышения проникающей способности является максимизация времени накопления.

Описанный путь также содержит в себе немало трудностей. Прежде всего это необходимость высокоточной стабилизации телескопа по углам и угловым скоростям. Еще одной важной проблемой является появление значительного темнового сигнала и, соответственно, шумовой составляющей.

Современные матричные ПЗС-фотоприемники имеют большое количество реализаций. С учетом особенностей проектируемой аппаратуры основным показателем для анализа качества системы является темновой сигнал ПЗС-фотоприемника.

Темновой сигнал, накопленный в пикселе ПЗС, возникает из-за так называемого темнового тока. Темновой ток генерируется тепловым возбуждением валентных электронов в зону проводимости и одновременным или последующим сбором этих электронов в потенциальную яму пикселя. Его называют темновым, потому что он возникает даже тогда, когда на ПЗС не поступает свет, например когда механизм затвора закрыт.

В практических расчетах можно считать, что темновой сигнал растет линейно со временем накопления сигнала в ПЗС и арифметически добавляется к фотоэлектронам, порожденным падающим на пиксели светом. Существуют три типа темнового тока: поверхностный, обедненный и диффузионный.

Поверхностный темновой ток возникает на границе между кремнием и оксидом, ниже электродов. Для его сдерживания обычно реализуется метод multi-pinned phase (МРР). Для ФПЗС со скрытым каналом n -типа это заключается в отрицательном смещении фаз электродов и добавлении импланта закрепления под некоторые из них.

Обедненный, или объемный, темновой ток создается непосредственно в обедненной зоне, где электрическое поле соответствующего электрода определяет потенциальную яму пикселя.

Диффузионный темновой ток генерируется в бесполовой области ниже зоны обеднения. В ПЗС типа МРР только две последние составляющие вносят существенный вклад в общий темновой сигнал, но в разных пропорциях [1].

Иногда в фотоприемниках применяются специальные режимы тактирования, позволяющие сократить влияние темнового сигнала на получаемое изображение в съемочных системах без охладителя или с термоэлектрическим охладителем [2].

Характерная зависимость темнового сигнала $U_{\text{темн}}$, накопленного в пикселе фотоприемника, описывается формулой (1) для температуры T [3,4]:

$$U_{\text{темн}}(T) = A \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{B}{T}} \cdot U_0, \quad (1)$$

где A , B — эмпирические параметры: например, для разных модификаций кадровых фотоприемников CCD42-40 фирмы «E2V» $A = 122 \text{ K}^{-3}$; $B = 6400 \text{ K}$ или $A = 1,14 \cdot 10^6 \text{ K}^{-3}$; $B = 9080 \text{ K}$;

U_0 — темновой сигнал [электроны], накопленный в пикселе при температуре $T_0 = 293 \text{ K}$.

Подробнее о температурных зависимостях темнового сигнала можно узнать в статьях [5–8]. В дальнейших расчетах примем данные из формулы (1) как характеристики типового ПЗС-фотоприемника.

Необходимость охлаждения фотоприемников в телескопах

Для ПЗС при комнатной температуре характерные скорости накопления темнового сигнала составляют от 10^3 до 10^5 электронов/(с · пиксель) [3, 9]. Времена накопления, применяемые в современных астрономических приборах, могут достигать сотен

секунд. Например, расчетное время накопления для наблюдения звезды 25-й величины составляет 120 с и 55 с для телескопов диаметром 1 м и 1,5 м соответственно [10]. Таким образом, при комнатной температуре большая часть сигнала в пикселе будет создана темновой генерацией. Вред вносит не только сам темновой сигнал, но и его шум, равный квадратному корню из величины накопленных электронов [11]. Так, при зарядовой емкости пикселя $200 \cdot 10^3$ электронов и времени накопления 20 с, типичном для практической астрономии, получим темновой сигнал не менее $20 \cdot 10^3$ электронов (10% зарядовой емкости) и его шум 141 электрон. Именно поэтому многие крупные телескопы как наземного, так и космического базирования имеют охлаждаемую фокальную плоскость.

Выбор рабочей температуры

Исследуем возможность создания сборных охлаждаемых фокальных плоскостей на основе кадровых фотоприемников.

Выбор способа охлаждения и рабочей температуры сборной фокальной плоскости делается на основе зависимости темнового сигнала и его шума от рабочей температуры. Существующие сверхбольшие фокальные плоскости как наземного, так и космического базирования имеют рабочую температуру от -120 °С до -70 °С, что, как правило, достигается применением жидкого азота в системе охлаждения [12]. Поэтому температура -100 °С (173 К) принята как рабочая в прорабатываемой системе.

Тем не менее оценки по формуле (1) показывают, что при скорости накопления темнового сигнала 10^4 электрон/(пиксель·с) относительно небольшое охлаждение (до -40 °С) снизит темновой сигнал до 1090 электронов для времени накопления 60 с. При температуре -100 °С темновой сигнал 1 электрон сформируется за полчаса. Таким образом, при зарядовой емкости пикселя от 100 до 200 тысяч электронов применение охлаждения до 173 К может оказаться избыточным. Накопленные 1090 темновых электронов заполняют не более 1% зарядовой емкости пикселя и порождают шум 33 электрона. Выявленный эффект может стать основанием для применения элементов Пельтье для охлаждения будущих серийных опти-

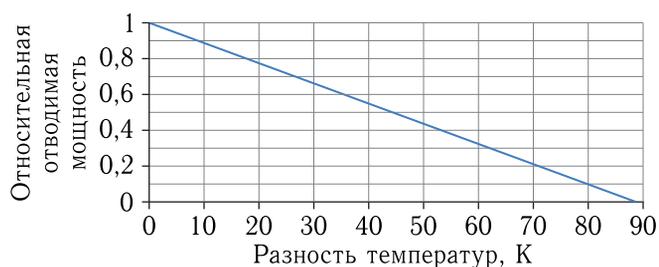


Рис. 1. Типовая зависимость относительной отводимой мощности от разности температур для элемента Пельтье

ко-электронных преобразователей, построенных на основе разработанной технологии. Такое решение способно кардинально упростить конструкцию аппаратуры, но оно работоспособно только при разнице температур не более 70 К, что показано на графике (рис. 1), построенном по данным работы [13]. При перепадах температур 85 К характерный КПД элементов Пельтье падает почти до нуля, что ограничивает область их практического применения. Подробная проработка и обоснование данного решения будет проводиться на этапе испытаний создаваемого оптико-электронного преобразователя.

Проблемы создания макетной «мозаики»

В процессе проработки оптико-электронного преобразователя (ОЭП) со сборной фокальной плоскостью-«мозаикой» выявлены следующие проблемы:

- выбор принципа охлаждения фотоприемных матриц;
- теплоизоляция основания фокальной плоскости;
- специфические требования к фотоприемнику;
- ремонтпригодность фокальной плоскости, т. е. замена одного фотоприемника не должна требовать снятия соседних.

Рассмотрим каждый из этих вопросов подробнее. Проработан облик кадрового ПЗС-фотоприемника со следующими особенностями:

- минимальное значение темнового сигнала и шума считывания;
- широкий диапазон частот считывания;

- реализация полнокадрового считывания в два переключаемых выхода — малозумящий и высокоскоростной;
- возможность работы в вакууме;
- минимальное расстояние между фотозонами соседних матриц в сборке;
- возможность замены матрицы в фокальной плоскости без снятия соседних.

Характеристики предлагаемого фотоприемника показаны в табл. 1, а его общий вид — на рис. 2.

Таблица 1. Характеристики фотоприемника

Параметр	Значение
Формат, пиксели	2048 × 2048
Размер пикселя, мкм	15
Максимальная частота считывания, МГц	1 (малозумящий выход) 12 (высокоскоростной выход)
Шум считывания, электрон	10 (малозумящий выход)

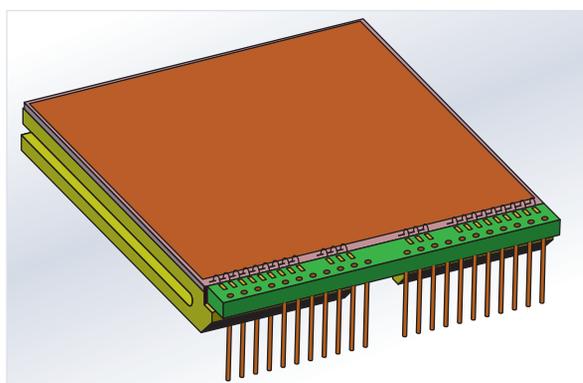


Рис. 2. Общий вид фотоприемника

Ключевой особенностью конструкции фотоприемника является «сухая» реализация посадки на два штифта. В предшествующих разработках матрицы закрепляются на инваровом основании на клее, закачиваемом в специальные канавки. В охлаждаемой фокальной плоскости технология приклейки неприменима по двум причинам: свойства клея непредсказуемы для температуры $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и затруднена замена фотоприемников, расположенных не на краю фокальной плоскости. Подобное технологическое решение использовано в оптико-элек-

тронных преобразователях как крупных наземных (Pan-STARRS, JPCam) [14, 15] так и космических (Euclid, Gaia) зарубежных телескопов [16, 17] и показано на рис. 3 по данным [16].

Сборные фокальные плоскости могут быть применены в телескопах как для съемки очень тусклых объектов с большим временем накопления, так и для наблюдения за космическими аппаратами и космическим мусором на околоземной орбите. Если в первой задаче приоритетом является обеспечение низких шумов, то второе направление работы требует относительно высокой кадровой частоты (не менее 0,5 кадр/с), необходимой для прогноза орбитального движения искусственных спутников Земли и космического мусора. Описанные требования являются в значительной степени противоречивыми. Для разрешения этой дилеммы фотоприемник разрабатывается с двумя переключаемыми выходными устройствами, каждое из которых способно выполнять считывание полного кадра. Малозумящий выход работает на частотах считывания от 0,3 до 1 МГц и используется при съемке тусклых объектов, когда приоритетное значение имеет уменьшение шумов. Высокоскоростной выход применяется при работе на кадровой частоте от 0,24 до 2,8 кадр/с, что соответствует диапазону частот считывания от 1 до 12 МГц.

Основание фокальной плоскости вместе с фотоприемниками размещается в вакуумированном объеме оптико-электронного преобразователя (ОЭП). Такое конструктивное решение позволяет исключить конвективные теплопритоки при работе ОЭП в наземной аппаратуре. Дополнительно к этому фокальную плоскость защищает от теплового излучения корпуса охлаждаемый экран. Отметим, что фотоприемники устанавливаются не на само основание напрямую, а рядами на линейки-держатели, что позволяет избежать снятия периферийных матриц при замене центральных. Основные характеристики созданного макетного оптико-электронного преобразователя и его фокальной плоскости приведены в табл. 2.

В сборной фокальной плоскости значительно возрастает сложность задачи минимизации шумов тракта. Для ее решения плата предусилителя должна находиться как можно ближе к выходному устройству фотоприемника. Такое требование идет



Рис. 3. Общий вид фотоприемника (слева) системы Euclid и его штифтового крепления (справа). Хорошо видно выходное устройство в виде боковых шлейфов

Т а б л и ц а 2. Характеристики фокальной плоскости

Параметр	Значение
Размер фотозоны, мм	225,7 × 247,32
Количество фотоприемных матриц	49 (7 × 7)
Расстояние между фотозонами соседних матриц по оси X, мм	1,78
Расстояние между фотозонами соседних матриц по оси Y, мм	5,38
Рабочая температура, К	173
Неравномерность температурного поля по плоскости, К	±5
Отклонение от плоскостности, мкм	±30
Коэффициент заполнения (fill factor)	0,828

вразрез с принятой компоновкой ОЭП: при наличии гермопереходов из вакуумной части ОЭП в наружную часть от считывающего регистра до устройства обработки сигнала составит не менее 100 мм, что недопустимо много при работе с высокоскоростным выходом. В результате комплексного анализа было принято решение о размещении плат предусилителя на боковых поверхностях держателей матриц. Для предотвращения нагрева фотоприемников от предусилителей их платы установлены на терморазвязках и покрыты теплозащитным экраном, защищающим от теплового излучения. На рис. 4 показано размещение матриц и плат предусилителей на линейках-держателях.

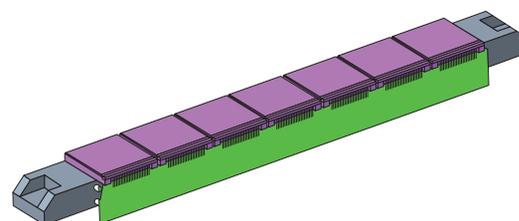


Рис. 4. Общий вид линейки-держателя с установленными фотоприемниками и предусилителями

Проведена проработка азотной системы охлаждения. Охлаждение фотоприемников осуществляется холодным газообразным азотом, протекающим по трубкам коллектора. Сеть трубок сваривается и устанавливается на основание фокальной плоскости, а на нее, в свою очередь, монтируются линейки-держатели матриц. Альтернативным вариантом изготовления теплообменника является 3D-печать из металла. Регулировка температуры фокальной плоскости обеспечивается двумя способами: изменением сечения трубки вентилем азотной магистрали и — для опытного наземного образца — изменением мощности нагревателя жидкого азота в сосуде Дьюара (азотного питателя). Общий вид коллектора показан на рис. 5. Для обеспечения равномерности охлаждения по полю фокальной плоскости коллектор выполнен в виде двух встречных контуров, по которым протекает холодный газообразный азот.

Все 7 держателей матриц устанавливаются на общее основание и соединяются с коллектором системы охлаждения, как показано на рис. 6.

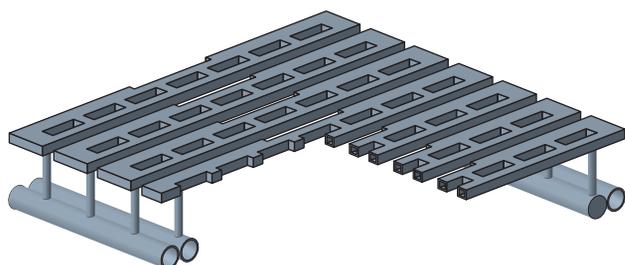


Рис. 5. Общий вид коллектора системы охлаждения

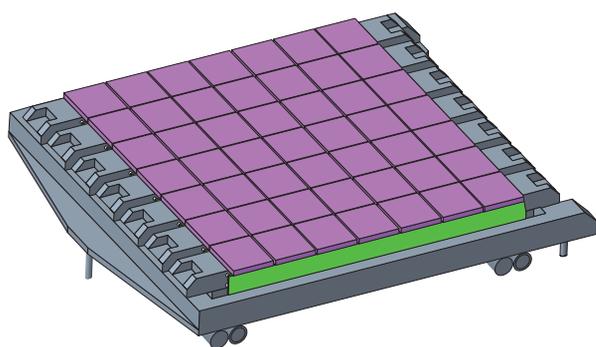


Рис. 6. Фокальная плоскость в сборе с коллектором системы охлаждения

Минимизация термосопротивления на переходе «линейка–коллектор» обеспечивается точной притиркой поверхностей и стягивающими винтами. Термопасты не применяются, так как их поведение при криогенных температурах и отсутствии атмосферы труднопредсказуемо. Эскиз общего вида ОЭП показан на рис. 7.

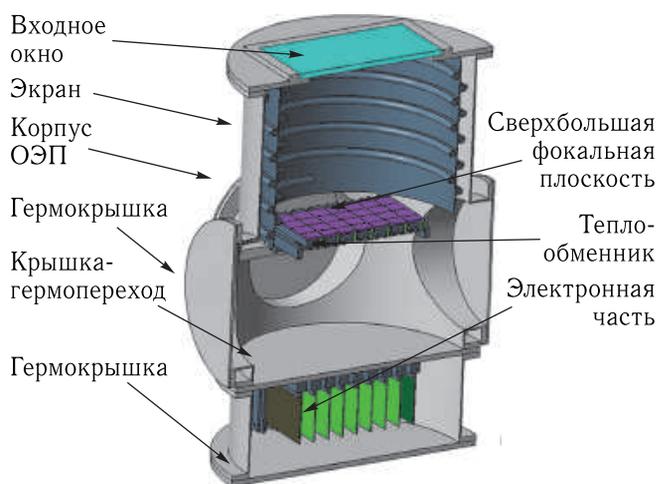


Рис. 7. Эскиз оптико-электронного преобразователя

Возможности применения фокальных плоскостей на базе описанной технологии

Проведен анализ перспектив применимости технологии создания охлаждаемых ОЭП в наземных телескопах. Вопрос о выборе и обосновании рабочей температуры следует рассмотреть с физической точки зрения при описании области применения системы в наземных телескопах. Выполним расчеты соотношения сигнал/шум для разных рабочих температур. Для оценок возьмем следующие исходные данные:

- телескоп $D/f = 1/2$ и диаметром $D = 1000$ мм;
- квантовая эффективность ФПЗС 40% в максимуме ($\lambda = 0,79$ мкм), 20% на 0,54 мкм и на 0,93 мкм, 10% на 0,47 мкм и на 0,98 мкм;
- небесное тело величины +22 со спектром, аналогичным звезде Вега (радиационная температура 10 125 К).

Для расчетов нужно получить спектральную плотность потока [Вт/(м²·мкм)], создаваемого звездой на верхней границе атмосферы (ВГА). Процедура расчета аналогична [18] и имеет следующие основные этапы.

1. Выполним пересчет от звезды Веги, взятой за точку отсчета яркостей звезд. Она имеет величину $M_0 = 0$ и создает освещенность $2,54 \times 10^{-6}$ люкс на ВГА. Примем Вегу абсолютно черным телом (АЧТ) и звездой белого спектрального класса (показатель цвета $B - V = 0$); ее температуру оценим как 10 125 К по [19].

2. По формуле Планка находим для света от Веги спектральную плотность потока $E(M_0, T_{\text{Веги}}, \lambda)$ [Вт/(м²·мкм)], облучающего входной зрачок телескопа (пренебрегаем атмосферным поглощением). Результаты сходятся с фактическими данными: спектральная плотность света Веги $3,44 \cdot 10^{-2}$ мкВт/(м²·мкм) на $\lambda = 0,556$ мкм [20].

3. Для спектральной плотности потока $E(m, T_{\text{зв}}, \lambda)$ от звезды величины m и температурой $T_{\text{зв}}$ имеем уравнение перехода (2), учитывающее кривую видности глаза $V(\lambda)$. Его физический

смысл — звезда величины $m = 5$ дает освещенность в 100 раз меньше, чем Вега:

$$\int_0^{\infty} E(m, T_{зв}, \lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda = 10^{-0,4 \cdot m} \int_0^{\infty} E(M_0, T_{веги}, \lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

4. Находим информативный (полезный) сигнал $U_{инф}$ [электроны], созданный светом от звезды и накопленный в пикселе.

На основе полученных данных найдем соотношение сигнал/шум (ОСШ) для температуры фотоприемников T и шуме считывания $N_{счит}$ (для нашей ФПЗС $N_{счит} = 10$ электронов при работе на маломощном выходе) по формуле (3):

$$SNR(m, T) = \frac{U_{инф}(m)}{\sqrt{U_{инф}(m) + U_{темн}(T) + N_{счит}^2}} = \frac{U_{инф}(m)}{\sqrt{U_{инф}(m) + A \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{B}{T}} \cdot U_0 + N_{счит}^2}}, \quad (3)$$

где $A = 122 \text{ К}^{-3}$ и $B = 6400 \text{ К}$ — эмпирические параметры, для оценки взяты по [3].

При относительном отверстии телескопа $D/f = 1/2$ и характерной длине волны $\lambda_{хар} = 0,7 \text{ мкм}$ для идеального телескопа радиус кружка рассеяния Эйри составляет $1,22 \cdot \lambda_{хар} \cdot f/D = 1,22 \cdot 0,7 \cdot 2 = 1,7 \text{ мкм}$, что намного меньше размера пикселя (15 мкм). Тогда примем, что весь свет от звезды попал в один пиксель. Результаты расчетов для звезды величины +22 со спектром свечения, аналогичным Веге, представлены на рис. 8–10:

- 1) информативный сигнал от времени накопления;
- 2) накопленный темновой сигнал от рабочей температуры;
- 3) соотношение сигнал/шум от рабочей температуры.

Полученные результаты можно обобщить и перейти к обнаружительным характеристикам телескопа (проницающей способности), построенного на основе разрабатываемого ОЭП (рис. 11). Расчеты выполнены для двух критериев обнаружения: по величине сигнал/шум $SNR = 5$ и $SNR = 10$.

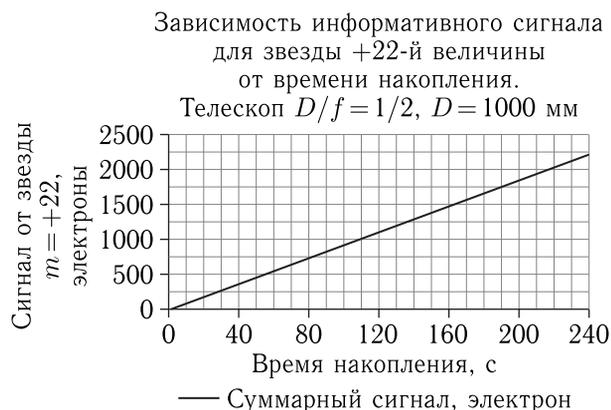


Рис. 8. Зависимость информативного сигнала от времени накопления

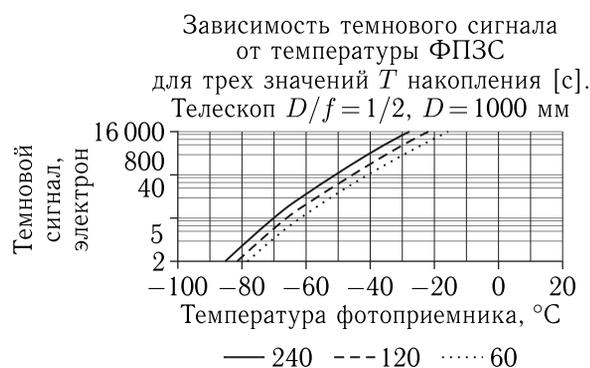


Рис. 9. Характерная зависимость темнового сигнала от температуры

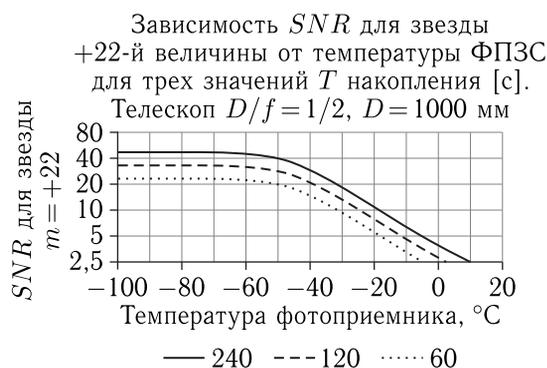


Рис. 10. Зависимость соотношения сигнал/шум от температуры

Анализ расчетов позволяет сделать следующие выводы:

- значительное возрастание темнового сигнала появляется при рабочих температурах, больших $-40 \text{ }^\circ\text{C}$;

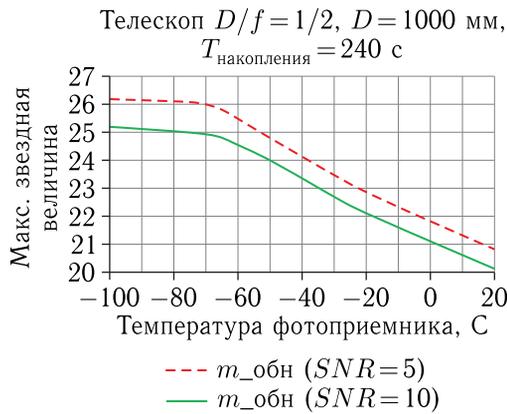


Рис. 11. Зависимость предельной наблюдаемой звездной величины объекта от температуры фокальной плоскости при двух критериях обнаружения

- соотношение сигнал/шум и проникающая способность почти не зависят от рабочей температуры при ее значениях менее -70 °С;
- наибольшее влияние температуры на соотношение сигнал/шум и проникающую способность имеет место в диапазоне от -45 °С до -20 °С: проникающая способность возрастает на 0,6 звездной величины на каждые 10 °С дополнительного охлаждения;
- при повышении рабочей температуры с -100 °С до -40 °С проникающая способность ухудшается на 2 звездные величины: с +25 до +23.

Кроме наблюдения звезд, телескопы могут применяться и для прогнозов движения астероидов. Проведем расчеты дальности обнаружения астероида для разных его размеров и температуры охлаждения фотоприемников.

Астероиды, как и все тела Солнечной системы, кроме Солнца, светят отраженным светом. Характеристикой интенсивности свечения астероидов является их блеск, выражаемый в звездных величинах: чем ярче астероид, тем меньше его звездная величина. С 1986 г. для вычислений *видимой* звездной величины m астероидов в лучах V (визуальная полоса спектра фотометрической системы UBV) применяется полуэмпирическая формула (4), позволяющая описать изменение блеска в диапазоне фазовых углов от 0° до 120° [21]:

$$m = H + 5 \cdot \lg(r \cdot \Delta) - 2,5 \cdot \lg((1-G) \cdot \Phi_1 - G \cdot \Phi_2), \quad (4)$$

где H — абсолютная звездная величина астероида в лучах V (видимого диапазона), r и Δ — расстояние от Солнца и Земли до астероида соответственно [астрономические единицы], G — так называемый параметр наклона, Φ_1 и Φ_2 — функции угла фазы, определяемые (5)–(6):

$$\Phi_i = \exp \left\{ -A_i \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) \right]^{B_i} \right\}, \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

$$A_1 = 3,33, \quad A_2 = 1,87, \quad B_1 = 0,63, \quad B_2 = 1,22. \quad (6)$$

После того, как элементы орбиты определены и, следовательно, r , Δ и β могут быть вычислены, данная формула позволяет найти абсолютную звездную величину, если имеются наблюдения видимой звездной величины. Для определения параметра G требуются наблюдения *видимой* звездной величины при различных углах фазы. В настоящее время значение параметра G определено из наблюдений только для 114 астероидов. Найденные значения G варьируются в пределах от $-0,12$ до $+0,60$. Для прочих астероидов значение G принимается равным 0,15.

Под *абсолютной* звездной величиной астероида понимается звездная величина, которую имел бы астероид, находясь на расстоянии 1 а. е. от Солнца и Земли и при нулевом угле фазы (углом фазы называется угол при астероиде между направлениями на Землю и на Солнце). Формула для вычисления абсолютной звездной величины [21] имеет вид (7):

$$H = -5 \cdot \lg \left(\frac{d \cdot \sqrt{\rho}}{1329} \right), \quad (7)$$

где H — абсолютная звездная величина объекта, ρ — его геометрическое альbedo, а d — его диаметр [километр]. Очевидно, что в природе подобная конфигурация трех тел осуществиться не может: при одинаковом расстоянии в 1 а. е. «астероид–Земля» и «Солнце–астероид» угол фазы составит 60° .

Ниже приведены рассчитанные графики зависимости соотношения сигнал/шум от размера астероида и расстояния от него до Земли при угле фазы, равном $5,73^\circ$ (графики на рис. 12 для температур охлаждения фотоприемника 173, 233, 293 К). Диаметр телескопа $D = 1,5$ м. Величина $\lg(SNR) = 1$

соответствует соотношению сигнал/шум 10, являющемуся минимально необходимым для уверенного обнаружения астероида.

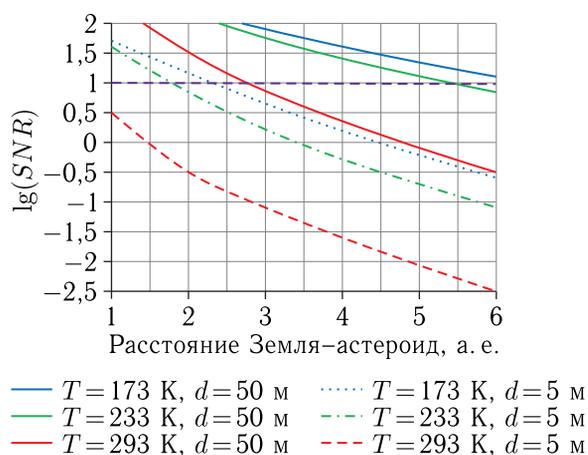


Рис. 12. Зависимость $\lg(SNR)$ от расстояния «Земля–астероид» в астрономических единицах при температурах фотоприемника $-100\text{ }^\circ\text{C}$, $-40\text{ }^\circ\text{C}$, $20\text{ }^\circ\text{C}$ (173 К, 233 К, 293 К)

Из графиков на рис. 12 видно, что понижение температуры фотоприемников с $-40\text{ }^\circ\text{C}$ до $-100\text{ }^\circ\text{C}$ улучшает дальность обнаружения телескопом с диаметром 1,5 м только на 15–20% (с 5,5 а. е. до 6,5 а. е. для астероида диаметром $d = 50\text{ м}$).

Выводы

По результатам работы и проведенного анализа применимости можно выявить следующие направления развития:

- температура ФПЗС $-100\text{ }^\circ\text{C}$ необходима только при построении телескопа с *предельными характеристиками* (проницающая способность лучше +25). При отсутствии такого требования переход с рабочей температуры 173 К ($-100\text{ }^\circ\text{C}$) на 233 К ($-40\text{ }^\circ\text{C}$) позволит применить элементы Пельтье, в разы улучшить габаритные характеристики ОЭП и исключить наличие расходного тела (жидкого азота) при обеспечении проницающей способности не хуже +22 для телескопа с диаметром 1 м. Это сравнимо с мировыми аналогами: наземный телескоп J-PAS с ОЭП JPCam при темпе-

ратуре охлаждения фотоприемников $-100\text{ }^\circ\text{C}$ и существенно большем диаметре (апертуре входного зрачка) 2,55 м имеет проницающую способность около +23,5 при $SNR = 5$ [15];

- реализация неквадратных компоновочных схем фокальной плоскости. Предложенная архитектура держателей фотоприемников в ОЭП позволяет реализовать не только фокальные плоскости формата 3×3 , 5×5 , 7×7 и др., но и более сложные компоновочные схемы. Например, для отечественных ОКР в области телескопостроения, выполняемых ИНАСАН, представляет потенциальный интерес вариант, где установлены 32 матрицы 6×6 (с изъятыми углами), что позволяет плотно заполнить круглое поле зрения телескопа и при этом исключить неполное использование фоточувствительных областей матриц;
- реализация системы из двух ОЭП, установленных в телескоп с устройством оптической сшивки на основе светоделиителя. Такое решение позволит увеличить коэффициент заполнения поля зрения мозаики (fill factor) с 0,85 до 0,92.

По результатам проведенной проработки можно утверждать, что задача создания крупноформатных фокальных плоскостей на основе охлаждаемых фотоприемников принципиально решается с применением только отечественных комплектующих. Отметим, что реализация азотного охлаждения с доведением рабочей температуры фокальной плоскости до $-100\text{ }^\circ\text{C}$ существенно усложняет конструкцию ОЭП и его применение в составе телескопа значительно увеличивает массу и габариты аппаратуры. Это порождает необходимость проведения испытаний для уточнения рабочей температуры, достаточной для выполнения целевых задач.

Список литературы

1. Hochedez J.-F., Timmermans C., Hauchecorne A., and Meftah M. Dark signal correction for a lukewarm frame-transfer CCD // *Astronomy and Astrophysics*, 2013.
2. Djazovski O., Daigle O., Laurin D., Bedirian M., Ducharme M.-E., Artigau É. and Doyon R. Electron-

- Multiplying CCDs for Future Space Instruments, Proceedings of SPIE // The International Society for Optical Engineering, 2013.
3. CCD42-40 Front Illuminated NIMO Ceramic Compact Pack. Large Area Sensor for Scientific Applications. Teledyne e2v. 2003.
 4. CCD42-40 Ceramic AIMO Front Illuminated. Large Area Sensor for Scientific Applications Teledyne e2v. 2017.
 5. *Widenhorn R., Blouke M., Weber A., Rest A., Bodegom E.* Temperature dependence of dark current in a CCD. Proceedings of SPIE // The International Society for Optical Engineering, 2002.
 6. *Bogaart E. W., Hoekstra W., Peters I. M., Kleimann A. C. M. and Bosiers J. T.* Very Low Dark Current CCD Image Sensor // IEEE Transactions on electron devices, november 2009, vol. 56, № 11.
 7. *Barry E. Burke and Stephanie A. Gajar.* Dynamic Suppression of Interface-State Dark Current in Buried-Channel CCD's // IEEE Transactions on electron devices, february 1991, vol. 38, № 2.
 8. *Yue Pan, Xuewu Fan, Hui Zhao, Yulei Qiu, Wei Gao and Jian Zhang.* Fast Dark Signal Measurements of SVOM VT CCDs Using the Vertical Gradient of Dark Field Images // Photonics, 2021, 8, 132.
 9. CCD30-11 Back Illuminated High Performance CCD Sensor. E2V technologies, 2005.
 10. *Чубей М. С., Куприянов В. В., Львов В. Н., Бахолдин А. В., Цуканова Г. И., Маркелов С. В.* Система регистрации изображений и проницание астрографа для орбитальной звездной стереоскопической обсерватории. Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов. Сб. трудов конференции. Москва, 2013.
 11. *Бакланов А. И.* Системы наблюдения и мониторинга: Учеб. пособ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 234 с.
 12. *Левко Г. В.* Крупноформатные ПЗС и ПЗС-мозаики (обзор) // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения, 2013, вып. 1. С. 34-48.
 13. *Белозерцев В. Н., Некрасова С. О., Сармин Д. В., Угланов Д. А., Шиманов А. А.* Исследование основных характеристик термоэлектрического охладителя и генератора. Лаб. практикум. Самара: Изд-во СГАУ, 2015. 76 с.
 14. *Onaka P., Rae C., Isani S., Tonry J. L., Lee A., Uyeshiro R., Robertson L., Chin G.* GPC1 and GPC2, the Pan-STARRS 1.4 gigapixel mosaic focal plane CCD cameras with an on-sky, on-CCD, tip-tilt image compensation. Institute for Astronomy, University of Hawaii, 2680 Woodlawn Drive Honolulu HI 96822, 2012.
 15. *Taylor K., Laporte R. et al.* JPCam: A 1.2Gpixel camera for the J-PAS survey // Journal of Astronomical Instrumentation, January 2013.
 16. *Cropper M., Pottingera S., Niemia S.-M. et al.* VIS: the visible imager for Euclid. Durham Research Online, 2015.
 17. *Short A. D.* Gaia astronomic CCDs and focal plane. Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering, August 2005.
 18. *Квитка В. Е., Никитин А. А., Блинов В. Д., Забиякин А. С., Прасолов В. О.* Радиометрическая калибровка мультиспектральной аппаратуры ДЗЗ по Луне и звездам // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2022, т. 9, вып. 2. С. 44-55.
 19. *Аванесов Г. А., Строилов Н. А., Филиппова О. В., Шамис В. А., Эльязев Я. Д.* Фотометрическая модель звездного датчика ориентации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019, т. 16, № 5. С. 75-84.
 20. *Бурнашев В. И., Бурнашева Б. А.* Фотометрия и спектрофотометрия звезд и галактик. Симферополь: Антиква, 2016. 384 с.
 21. *Шустов Б. М., Рыхлова Л. В.* Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.

Дата поступления рукописи
в редакцию 22.01.2023
Дата принятия рукописи
в печать 27.02.2023