

Развитие алгоритмов фильтрации первичных данных в звёздном датчике ориентации

С. А. Прохорова, П. С. Сметанин, А. А. Форш

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: guldthen@gmail.com

В статье приводится краткий обзор фильтров первичных данных, используемых в звёздных датчиках ориентации семейства БОКЗ. Подробно изучается алгоритм строчной фильтрации и варианты механизма выбора порога. Рассматривается необходимость модификации процедуры расчёта порога для парирования структурных дефектов, возникающих вследствие облучения матрицы в космическом пространстве. Обосновывается выбор однострочного скользящего фильтра для оптической головки звёздного датчика на базе фотоприёмной КМОП-матрицы. Приводится краткое описание экспериментов по облучению матрицы и её последующего исследования в климатической камере. В конце статьи описывается эксперимент по моделированию и сравнению строчных фильтров с различными вариантами задания порога. Сравняется эффективность работы строчных фильтров по количеству отфильтрованных пикселей, локализованных объектов и числу распознанных звёзд на выходе модуля фильтрации. В заключение делается вывод о возможности парирования с помощью фильтров значительной части помех, вызванных радиацией.

Ключевые слова: звёздный датчик, первичная фильтрация, строчный фильтр, фотоприёмное устройство, температура, нейтроны, протонные события, структурные эффекты, радиационные испытания

Одобрена к печати: 25.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-106-118

Введение

Звёздный датчик, решая задачу вычисления параметров ориентации, обычно использует не менее четырёх звёзд. Максимальное число звёзд, принимаемых в обработку звёздным датчиком, как правило, ограничивается 15–25. Каждая звезда содержит не более 25–30 пикселей, несущих информацию о ней. Следовательно, максимальное число полезных пикселей обычно не превышает 1000, причём это число не зависит от оптических параметров прибора и размерности используемого в нём фотоприёмного устройства (ФПУ). С учётом того, что в большинстве современных датчиков ориентации используются ФПУ с числом пикселей от $0,25 \cdot 10^6$ до $4 \cdot 10^6$, у разработчиков появляется естественное желание освободить вычислительное звено прибора от избыточной информации. Эта задача — сжатие данных путём выделения полезной составляющей сигнала — возлагается на модуль предварительной обработки, который обычно реализуется в ПЛИС (программируемой логической интегральной схеме). Количество пикселей, полученное после обработки кадра, может заметно возрасти из-за различных неравномерностей входного сигнала — на два-три порядка. Поэтому, помимо основных функций, предварительная фильтрация должна решать задачи устранения помеховых составляющих входного сигнала, возникающих в результате паразитных засветок фотоприёмной матрицы Солнцем, Луной, подсвеченным краем Земли и элементами конструкции КА, а также структурных повреждений ФПУ под воздействием радиации.

В простейшем случае фильтр представляет собой устройство, пропускающее на выход только те пиксели, которые превышают некоторую заданную величину — «порог». Прошедшему через фильтр пикселю присваиваются его координаты в системе координат ФПУ — номер в строке и в столбце. Подобные устройства с середины 90-х гг. прошлого века успешно применяются на практике в звёздных датчиках. Используются они и в наше время, например на Международной космической станции, где с 2000 г. работают звёздные датчики БОКЗ. Порог обычно определяется окрестностью анализируемого пикселя — средним значением и СКО соседних пикселей по всему кадру или же ограниченной его части — «окну».

Величина и форма окна могут варьироваться в зависимости от особенностей анализируемого изображения, формы и размера звезды, её трека.

В упрощённом варианте фильтра по кадру рассчитывается среднее значение яркости и вычитается из каждого пикселя. Эта операция удаляет постоянную составляющую сигнала. Далее пиксели проверяются на «порог» — превышение нескольких СКО по кадру либо заранее заданного значения. Данный вид обработки при нормальных условиях эксплуатации хорошо справляется с основной задачей — сжатием и выделением полезного сигнала. Но при появлении на кадре динамично меняющихся засветок, росте числа «горячих» пикселей и прочих неравномерностей такой фильтр может реагировать неадекватно, что приводит к значительному увеличению объёма помеховых объектов на выходе. Поэтому существует ряд алгоритмов, использующих оценку скользящего по кадру среднего и порога, что позволяет своевременно реагировать на локальные неравномерности сигнала. Например, в ряде приборов используется хорошо зарекомендовавший себя «оконный» фильтр. Он представляет собой скользящее окно, производящее адаптивную пороговую оценку яркости окрестностей каждого пикселя. В этом случае кадр, отображающий участок звёздного неба, сканируется двумерным окном размером $N \times M$ пикселей (в текущей работе имеет размерность 13×13). Вычисляется средняя яркость по окну и соответствующий порог прохождения элементов (как среднеквадратическое отклонение в окне или по всему кадру). Процедуры выполняются для каждого пикселя матрицы. Если пиксель превышает порог, он сохраняется за вычетом порога, в противном случае — отбрасывается. Таким образом, звёздopodobные объекты отделяются от фона.

Необходимость строчной фильтрации

Первичная фильтрация, так или иначе, присутствует во всех приборах семейства БОКЗ. В данной статье рассматривается линейка приборов мБОКЗ-2, где блок обработки данных (БОД) управляет несколькими оптическими головками (ОГ), в каждой из которых реализован фильтр. ФПУ CMV-4000, установленное в этих приборах, с размером исходного кадра 4 Мпикселей имеет скоростной интерфейс выноса данных — до 180 кадров в секунду. В приборе мБОКЗ-2В частота обновления информации — 4 кадра в секунду. При этом скорость выноса с матрицы составляет 16 Мпиксель/с. Модуль предварительной обработки, реализованный на ПЛИС, может производить сжатие, фильтрацию или выделение фрагментов изображения (прямоугольное окно вокруг звезды), тем самым уменьшая объём информации до нескольких килопикселей. На *рис. 1* приведена функциональная схема обработки данных в ОГ мБОКЗ-2В.

При построении оконного фильтра на ПЛИС важна ресурсоёмкость алгоритма. Например, в ОГ мБОКЗ-2В установленный ПЛИС АЗРЕ600 имеет ОЗУ объёмом 108 Кбит. В нём происходит первичная обработка данных, полученных с КМОП-матрицы. При размере строки в 2048 пикселей разрядностью 12 бит/пиксель в ОЗУ можно накопить не более четырёх строк, в то время как для реализации оконного фильтра необходимо накопить 13 строк (~53 Кбайт), не считая прочих данных в памяти ПЛИС. Также при скорости выноса одной строки пикселей из матрицы порядка 64 мкс время накопления всех строк в ОЗУ ПЛИС составит около 832 мкс.

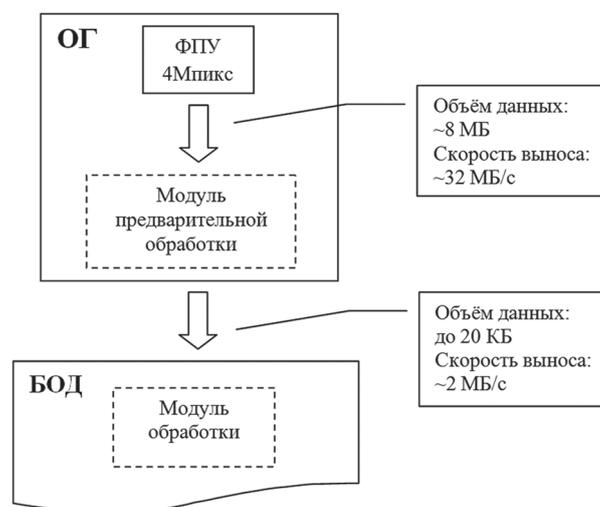


Рис. 1. Функциональная схема обработки данных в 3Д мБОКЗ-2

С учётом времени накопления каждой последующей строки, времени бинирования кадра, расчёта среднего для каждого пикселя (~20 нс на операцию сложения в данном ПЛИС) получаются миллисекундные задержки, критичные для решения текущей задачи. Поэтому в ОГ звёздного датчика принят оптимизированный вариант предварительного фильтра. Количество анализируемых строк при этом уменьшено до одной. В работе (Аванесов и др., 2015) приведено описание строчного фильтра, который впоследствии был реализован в макете ОГ мБОКЗ-2В, а также двухстрочного фильтра, промоделированного на ПК.

Различные варианты однострочных фильтров сравнивались между собой и с оконным фильтром по влиянию на точностные характеристики прибора, проверялась их способность к устранению засветок и помеховых объектов на изображении. Фильтры имели табличный, заранее заданный порог.

Особенности выбора порога

Как уже упоминалось, фильтр должен парировать вызванные паразитной засветкой неравномерности фона и структурные повреждения ФПУ, возникающие в результате радиации, проявляющиеся в виде «горячих» пикселей. При нормальных условиях эксплуатации на матрице CMV-4000 присутствует порядка 1000–10000 «горячих» пикселей, их яркость и количество также зависят от рабочей температуры матрицы.

В ОГ мБОКЗ-2 используется строчный фильтр с табличным порогом. Это означает, что после расчёта и отсекаемого среднего значения пикселей по строке их яркости сравниваются с табличным значением. Таблица составляется заранее и строится на основе измеренной зависимости СКО яркости по кадру от её среднего значения. Также фильтр имеет механизм отбраковки объектов по их размеру — однопиксельные объекты не пропускаются. Такой фильтр успешно справляется с «горячими» пикселями, но в процессе эксплуатации ОГ в космосе число структурных повреждений может расти, что приводит к незначительному увеличению среднего значения яркости по кадру, но ощутимому изменению СКО кадра. Следовательно, заранее записанные табличные значения порога со временем становятся неадекватными оценками СКО. Эта задача может решаться за счёт введения механизма обратной связи:

- значение порога рассчитывается по предварительно принятому кадру и изменяется по внешней команде от БОД;
- значение порога рассчитывается по скользящей строке и изменяется на каждом шаге фильтра.

Сравнение эффективности фильтров в данной работе проводится путём обработки кадров, полученных с ранее облучённой (весной 2016 г.) матрицы CMV-4000. Матрица была подвергнута облучению нейтронами с флюенсом потока $5e^{10}$ нейтрон с целью моделирования структурных повреждений ФПУ в космическом пространстве в конце срока эксплуатации.

В эксперименте участвовало ФПУ со следующими характеристиками:

- КМОП-матрица CMOSIS 4000 (2048×2048 пикселей);
- размер пикселя — 5,5 мкм.

В ходе эксперимента облучённая матрица была установлена в интерфейсный блок, повторяющий интерфейсы ОГ, и исследована в климатической камере при различных температурах. Были получены темновые кадры и кадры с равномерной засветкой. В момент съёмки при помощи имитатора оптического сигнала (ИОС) среднее значение по кадру изменялось от темного до максимального (4095 епр). На полученные кадры были наложены звёзды с размерами и яркостями, соответствующими звёздам реального неба, полученным с прибора мБОКЗ-2В. Характеристики и условия получения групп кадров приведены в *таблице*. К этим кадрам были применены оконный и строчные фильтры, проведены процедуры локализации и распознавания объектов, а также сравнение полученных точностных характеристик.

Сводная таблица параметров серий кадров, использованных в экспериментах. Дата съёмки: 07.12.2017

Параметры	Количество кадров		
	45	39	38
Температура, град	0	15	25
Время между кадрами, с	1		
Время экспозиции, мс	250		

Парирование структурных повреждений КМОП-сенсора

В работе (Аванесов и др., 2015) рассматривается парирование строчными фильтрами различных видов неравномерностей первичного сигнала — засветок поля зрения, неоднородностей яркости пикселей, горячих пикселей. В текущей статье определяется возможность парирования структурных повреждений КМОП-матрицы, возникающих после её облучения в космическом пространстве при различных температурах и уровнях засветки.

Одним из важнейших требований, предъявляемых к ФПУ, используемым на борту КА, является стойкость к воздействию ионизирующего излучения космического пространства (ИИ КП). В околоземном пространстве к ИИ КП относятся электроны и протоны естественного радиационного пояса Земли (ЕРПЗ), а также протоны и тяжёлые заряженные частицы (ТЗЧ) космических лучей. Вследствие воздействия ИИ КП могут наблюдаться дозовые и одиночные радиационные эффекты, которые могут привести к параметрическому, функциональному или катастрофическому отказу. Требования по стойкости к эффектам смещения заданы в виде эквивалентного флюенса протонов с энергией 10 МэВ.

К эффектам смещения (структурным эффектам) относится образование множественных дефектов в светочувствительной области. Данные дефекты приводят к ухудшению фотометрических характеристик фотосенсора (Кобелева и др., 2017), а именно:

- 1) значительному росту темнового тока в отдельных пикселях;
- 2) появлению большого количества «горячих» пикселей;
- 3) значительному росту СКО темнового сигнала;
- 4) росту всех вышеперечисленных параметров в процессе активной работы фотосенсора.

Для аппаратуры, укомплектованной КМОП-матрицами, необратимые изменения её параметров при воздействии электронов и протонов моделируют последовательным облучением аппаратуры нейтронным излучением. КМОП-матрица CMV4000 испытывалась на стойкость к эффектам смещения в пассивном режиме на моделирующей установке. Матрица облучалась потоком нейтронов с флюенсом $5e^{10}$ нейтрон в выключенном состоянии, контроль параметров осуществлялся после облучения.

В итоге число «горячих» пикселей на исходном кадре после облучения может достигать порядка 400 000 при рабочей экспозиции 250 мс и температуре +25 °С, СКО — ~200 емп. Это на один-два порядка больше значений для необлучённой матрицы. На *рис. 2* (см. с. 110) приведено сравнение кадров с матрицы до и после облучения.

Необходимо отметить, что данное количество дефектов будет получено прибором не одномоментно, а в течение 10–20 лет в зависимости от заданной орбиты и может быть нивелировано, помимо процедуры фильтрации, при помощи температурного отжига, охлаждения ФПУ или же работе при меньших временах экспозиции.

Ранее разработанный строчный фильтр имеет встроенный механизм отбраковки одиночных «горячих» пикселей, но при таком объёме дефектов существенней становится их вклад в расчёт скользящего среднего и СКО. Кроме того, «горячие» пиксели начинают объединяться в более крупные объекты. Эти факторы определяют необходимость рассмотреть различные варианты выбора порога скользящего фильтра.



Рис. 2. Фрагменты кадров с ФПУ СМV4000 до и после облучения при температуре +25 °С и времени экспозиции 250 мс: *слева* — до облучения, СКО 24 емр; среднее 332 емр; *справа* — после облучения, СКО 204 емр, среднее 498 емр

Особенности строчного алгоритма фильтрации

В строчном алгоритме фильтрация производится с помощью окна длиной N элементов в строке для бинированного или исходного изображения. Например, в ОГ мБОКЗ-2В длина окна фильтра составляет 16 пикселей для бинированного кадра. В оптической головке мБОКЗ-2Р производится фильтрация полного кадра и длина окна фильтрации составляет 32 пикселя. Ниже приведён пример адаптивного фильтра для мБОКЗ-2Р.

Из строки A_{ij} ($j = 1, 2, \dots, N$) последовательно выбираются 32 соседних элемента (14 из них пропускаются), и их значения суммируются. На первом шаге (*рис. 3*) вычисляется среднее:

$$\bar{A}_{ij} = \frac{\left(\sum_{i=0}^{N=7} A_{ij} \right) + \left(\sum_{i=24}^{N=31} A_{ij} \right)}{16}. \tag{1}$$

Если значение пикселя $A_{ij+15} > \bar{A}_{ij} + T$, то устанавливается в единицу флаг FL = 1. Если же и значение последующего пикселя $A_{ij+16} > \bar{A}_{ij} + T$, и FL = 1, то записываем значения $A_{ij+15} = A_{ij+15} - \bar{A}_{ij}$, $A_{ij+16} = A_{ij+16} - \bar{A}_{ij}$ в соответствующие элементы сглаженного изображения, иначе FL = 0.

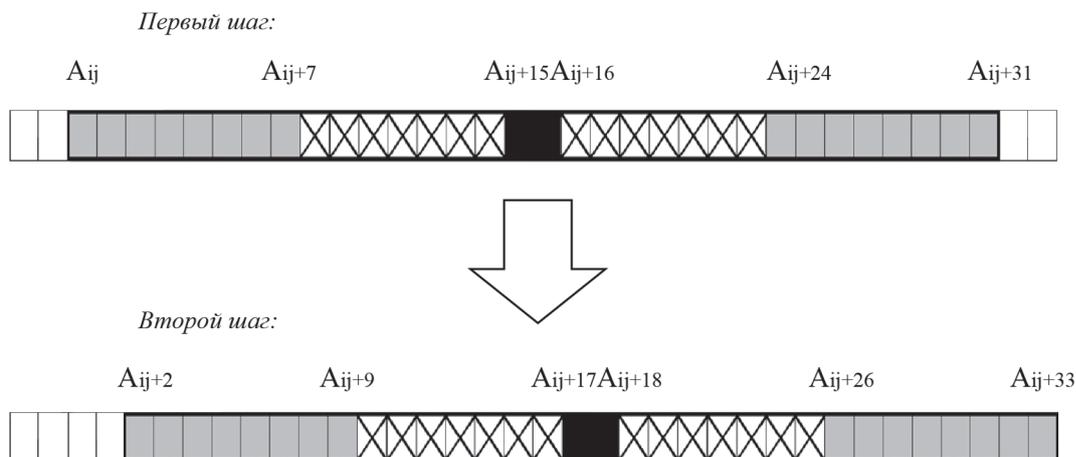


Рис. 3. Принадлежность пикселей строки к суммам (чёрные — проверяемые, серые — для расчёта среднего \bar{A}_{ij} , X — пропущенные); положение окна фильтра на первом и втором шагах вычисления среднего

Далее происходит сдвиг на два элемента и повтор процедуры с учётом предыдущего результата.

Порог проверки пикселей T , как правило, равен трём СКО. Этот порог может быть определён различными методами:

- задаётся при помощи табличных значений, записанных в памяти. Таблица составляется заранее и строится на основе измеренной зависимости СКО яркости по кадру от её среднего значения. Соответственно, при вычислении среднего по строке фильтра из таблицы порогов извлекается необходимое значение;
- задаётся извне от БОД, значение рассчитывается по полученным ранее кадрам или фрагментам кадров от ОГ;
- рассчитывается на каждом шаге скользящего окна.

Наиболее затратным в плане используемых ресурсов является третий вариант — скользящее вычисление порога. Однако он лучше реагирует на динамично меняющиеся засветки фона и в меньшей мере искажает звёзды. При обработке на персональном компьютере ресурсов быстрогодействия достаточно, чтобы на каждом шаге к значению среднего \bar{A}_{ij} рассчитывать соответствующее значение порога из формулы:

$$T = 3\sigma = 3\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N=7} (A_{ij} - \bar{A}_{ij})^2 + \sum_{i=24}^{N=31} (A_{ij} - \bar{A}_{ij})^2}{N-1}}. \quad (2)$$

При обработке кадра на ПЛИС проблемы вызывают затратные в плане количества системных циклов операции извлечения корня и возведения в квадрат. Также для обработки данных в темпе их считывания с матрицы формула (2) расчёта порога не подходит — необходимо преобразовать её до однопроходного алгоритма. Преобразованная формула вычисления порога имеет вид (Chan et al., 1983):

$$T = 3\sqrt{\sigma_i^2} = 3\sqrt{\frac{\left(\sum_{i=0}^{N=7} A_{ij}^2\right) + \left(\sum_{i=24}^{N=31} A_{ij}^2\right)}{N-1} - \bar{A}_{ij}^2}. \quad (3)$$

Остаётся избавиться от операции извлечения корня или заменить её. Преобразование может быть произведено по приведённому далее алгоритму.

Первоначальное вычисленное значение σ_i^2 формата float (4 байта – /1 бит знака/ + /8 бит порядка/ + /23 бита мантисы/, стандарт IEEE 754) переводится в формат integer (4 байта, беззнаковое целое) побайтовым копированием. Далее результат подставляется в формулу (4) и после преобразования снова побайтово копируется в переменную float (Hain, Mercer, 2005):

$$T = \sqrt{\sigma_i^2} = \text{float}\left\{0x20000000 + \left(\text{integer}\{\sigma_i^2\}/2\right) - 0x400000\right\}. \quad (4)$$

В таком случае величина ошибки приближения к реальному значению корня составляет до 6 %. Этого уже достаточно для решения нашей задачи фильтрации.

Тем не менее можно ещё повысить точность, добавив корректирующую константу:

$$T = \sqrt{\sigma_i^2} = \text{float}\left\{0x20000000 + \left(\text{integer}\{\sigma_i^2\}/2\right) - 0x400000 - 0x4B0D2\right\}. \quad (5)$$

При работе с целочисленной арифметикой и при невозможности поддержания формата float можно преобразовать число в формат псевдо-float (не учитывать смещение на 127 в степени числа). Формула примет следующий вид:

$$T = \sqrt{\sigma_i^2} = \text{integer}\left\{\left(\text{float}_p\{\sigma_i^2\}\right)/2 - 0x4B0D2\right\}. \quad (6)$$

Сравнение различных типов фильтров

Предварительная обработка изображений в автономной ОГ требует соблюдения баланса между затратностью алгоритма фильтрации и качеством полученного результата.

Выбор типа фильтра (длины его окна, способа вычисления порога) зависит от следующих факторов:

- возможность засветок поля зрения, их типы (равномерные, неравномерные), частота их возникновения;
- наличие неравномерностей сигнала на поле ФПУ;
- интенсивность космического излучения;
- необходимая частота обновления информации в данном режиме работы;
- диапазон рабочих температур ОГ;
- рабочие экспозиции прибора;
- диапазон рабочих скоростей прибора;
- доступные аппаратные ресурсы — объём памяти, быстродействие.

Для сравнения характеристик различных фильтров был проведён эксперимент: обработка кадров, полученных с ФПУ CMV4000, ранее облучённого нейтронами в рабочем диапазоне температур. График зависимости СКО пикселей от температуры на темновых кадрах приведён на *рис. 4*. Видно, что СКО испытывает флуктуации и начинает приходить в норму на отрезке 0–5 °С.

Затем были отобраны группы кадров при трёх температурах: 0, 15, 25 °С — и штатном времени экспозиции 250 мс. При этом средняя яркость на кадрах для каждой температуры менялась от темнового значения до полной засветки. Рассматривалось влияние вида скользящего фильтра (механизма расчёта среднего и порога) на количество получаемых пикселей, локализованных объектов и распознанных звёзд.

На каждый кадр были добавлены звёзды с размерами и яркостями, соответствующими звёздам реального неба, полученным с прибора мБОКЗ-2В.

Кадры со звёздами были отфильтрованы четырьмя различными фильтрами:

- фильтр строчный, длина 32 пикселя, отбраковка однопиксельных объектов, *расчёт порога по строке* — величина 3 СКО;
- фильтр строчный, длина 32 пикселя, отбраковка однопиксельных объектов, *расчёт порога по кадру* — величина 3 СКО;
- фильтр строчный, длина 32 пикселя, отбраковка однопиксельных объектов, *расчёт порога по таблице*;
- фильтр оконный, 13×13 пикселей, *расчёт порога по кадру* — величина 3 СКО.

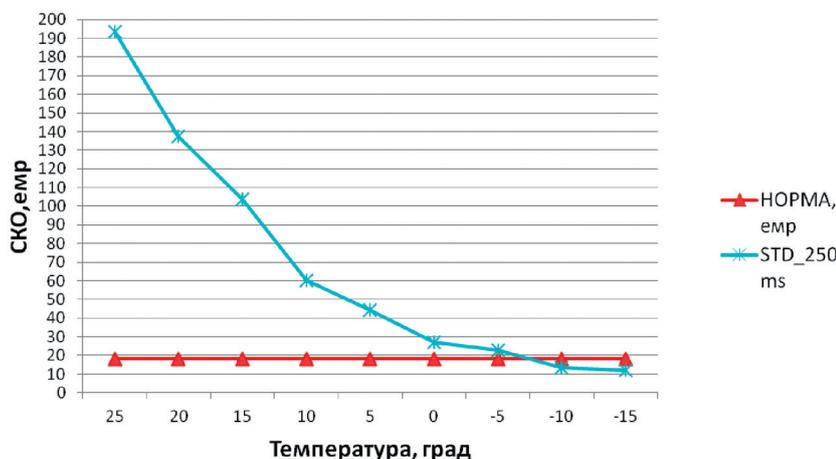


Рис. 4. График зависимости СКО яркости пикселей ФПУ, облучённого нейтронами, от температуры

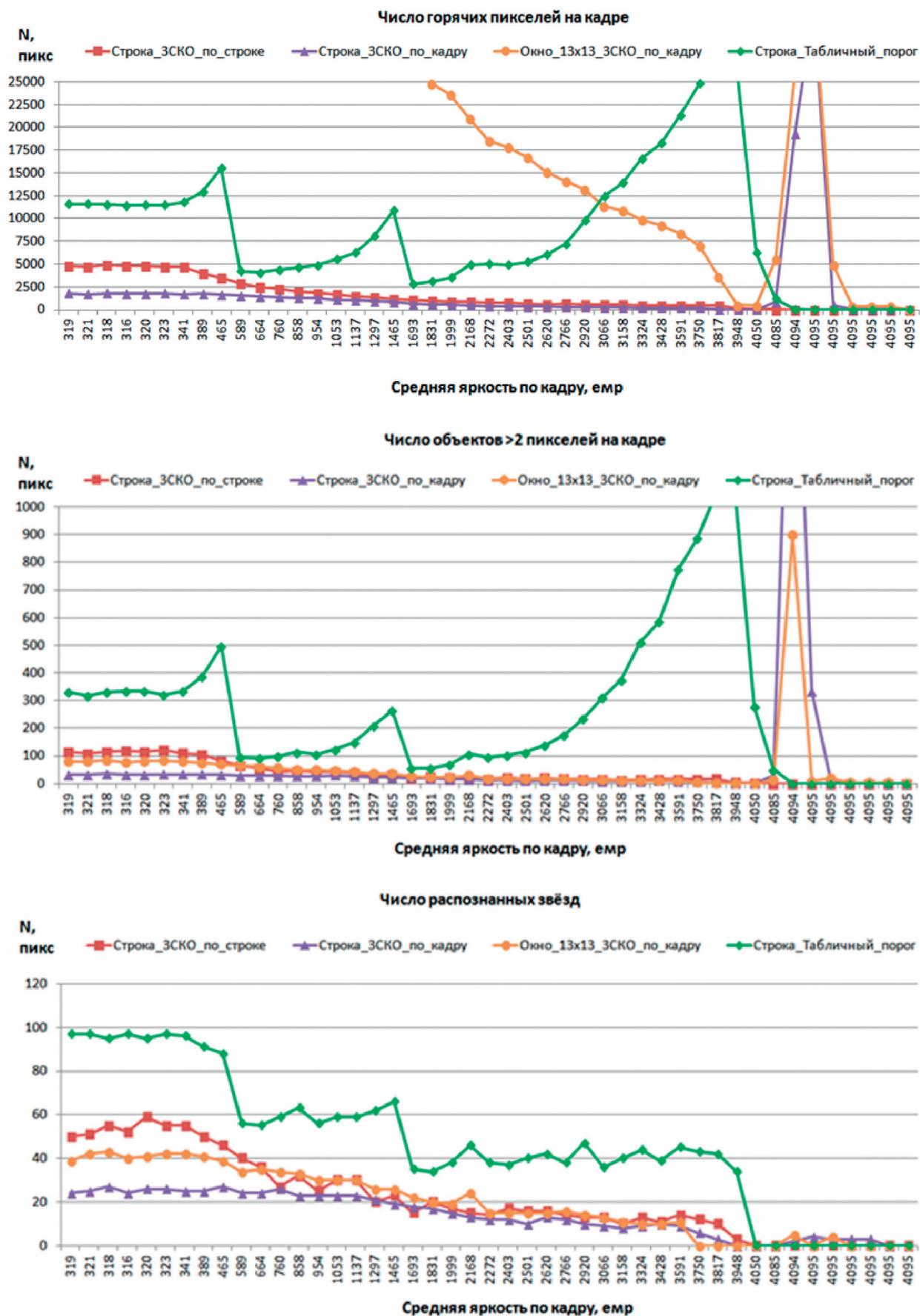


Рис. 6. Зависимость числа пикселей, объектов и звёзд от засветки (среднего значения фона по кадру). Температура 0 °С, экспозиция 250 мс, локализация объектов ≥ 3 пикселей

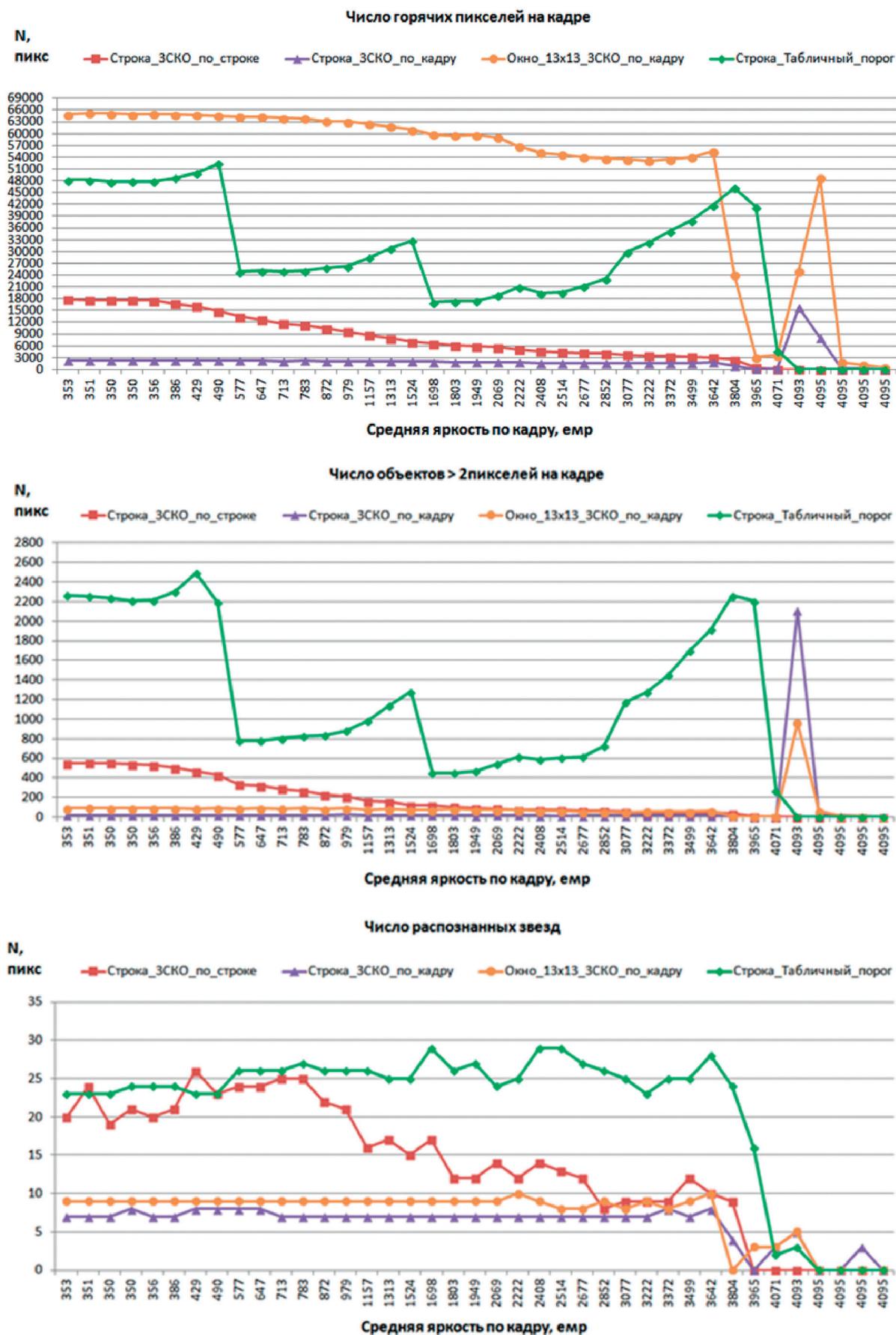


Рис. 7. Зависимость числа пикселей, объектов и звёзд от засветки (среднего значения фона по кадру).
Температура 15 °С, экспозиция 250 мс, локализация объектов ≥ 3 пикселей

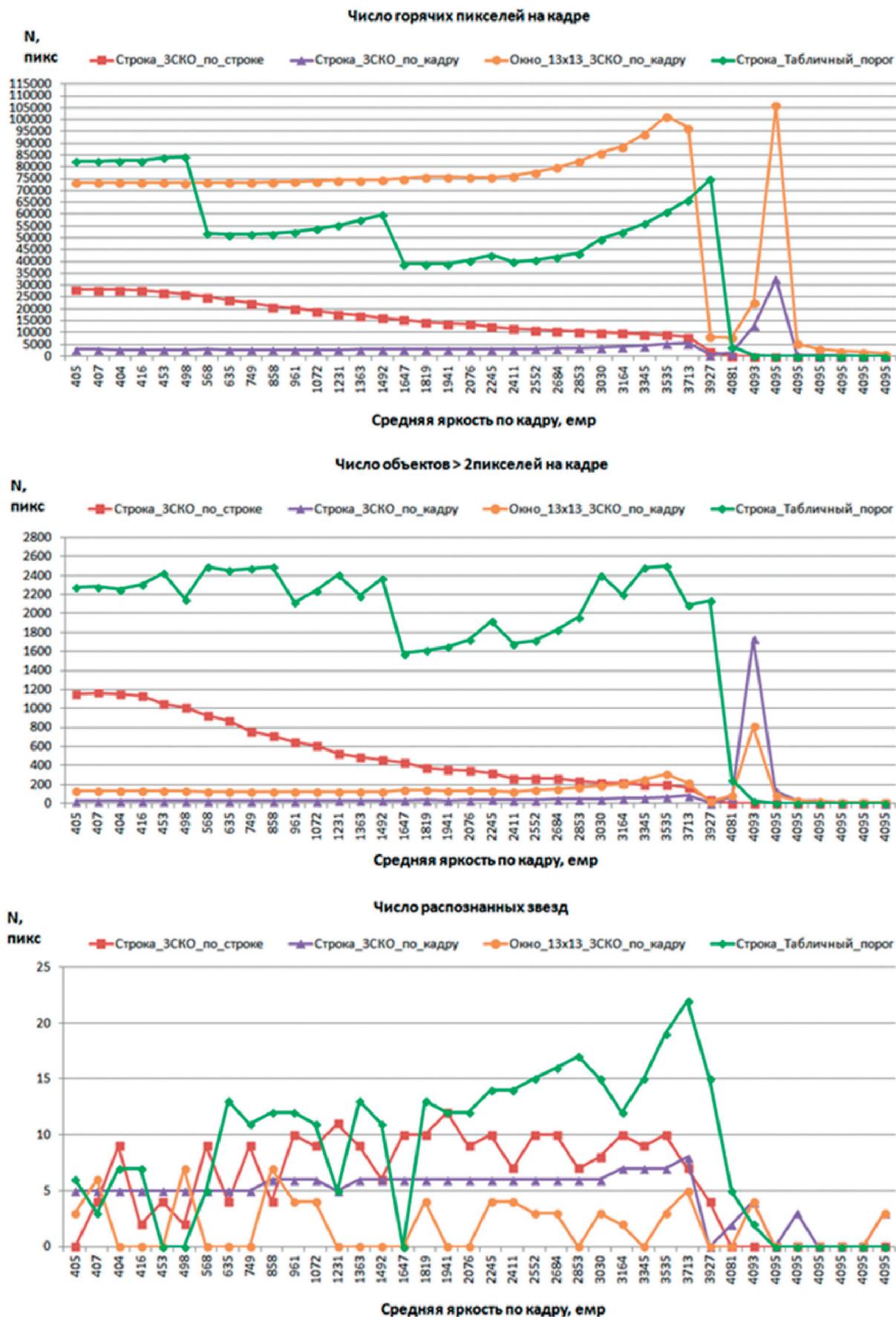


Рис. 8. Зависимость числа пикселей, объектов и звёзд от засветки (среднего значения фона по кадру).
 Температура 25 °С, экспозиция 250 мс, локализация объектов ≥ 3 пикселей

По количеству локализованных объектов и распознанных звёзд выигрывают строчные фильтры с табличным и скользящим порогами. В среднем наиболее равномерной характеристикой обладает строчный фильтр с расчётом порога по кадру.

Можно сделать вывод, что по совокупности характеристик в лучшую сторону выделяют строчные фильтры со скользящим расчётом порога и расчётом порога по кадру. Причём, хотя первый и выигрывает в количестве распознанных звёзд, он требует больших ресурсов в реализации.

Выводы

1. Эксперимент по облучению матрицы CMV4000 и последующая работа в термокамере показали, что количество структурных дефектов «горячих» пикселей на кадре может достигать существенных величин — порядка 400 000 (около 10 % от всех пикселей кадра). Это приводит к значительному росту СКО яркости по кадру (в разы) и относительно небольшому росту среднего значения (доли).

2. Такое количество дефектов в большинстве случаев будет накоплено матрицей ближе к концу срока эксплуатации прибора. Оно может быть нивелировано при помощи температурного отжига, охлаждения ФПУ (до 0...–5 °С) или же при работе с меньшими временами экспозиции. Тем не менее необходимо предусмотреть механизм обратной связи для коррекции значения порога фильтра.

3. В ходе работы был протестирован ряд алгоритмов выбора порога фильтрации. Структурные дефекты ФПУ лучше всего парируются строчными фильтрами со скользящим порогом или расчётом порога по кадру. Оба алгоритма обеспечивают необходимое сжатие информации даже при самых неблагоприятных условиях (экспозиции 250 мс и температуре +25 °С). После данных фильтров остаётся около 5000–20 000 пикселей полезной информации. В обоих случаях распознаётся необходимое для определения ориентации число звёзд.

4. Стоит отметить, что фильтр со скользящим расчётом порога лучше парирует динамичные засветки на кадре, но более сложен в реализации и требователен к аппаратным ресурсам 3Д.

Литература

1. *Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Сметанин П. С.* Первичная обработка информации в звёздном датчике ориентации // 4-я Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса, 8–11 сент. 2014. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 159–174.
2. *Кобелева А. А., Эльяшев Я. Д., Бессонов Р. В., Куделин М. И., Аванесов Г. А., Форш А. А.* Результаты испытаний фотосенсоров CMV20000 на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства // 5-я Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса, 5–8 сент. 2016. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 154–162.
3. *Chan T. F., Golub G. H., LeVeque R. J.*, Algorithms for computing the sample variance: analysis and recommendations // *The American Statistician*. V. 37. No. 3. University of California, 1983. P. 242–247.
4. *Hain T. F., Mercer D. B.* Fast Floating Point Square Root / Information and reference portal “Semantic Scholar”. 2005. 7 p. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/5060/4e9aff0e37089c4ab9a376c3f35761ffe28b.pdf> (accessed 28.06.2018).

Development of algorithms for filtering primary data in a star tracker

S. A. Prokhorova, P. S. Smetanin, A. A. Forsh

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: guldthen@gmail.com

The paper provides a brief overview of the primary data filters used in the star trackers of the BOKZ family. The algorithm of line filtration as well as the threshold selection mechanism are described in detail. The need to modify the threshold calculation procedure for parrying structural defects arising from the image sensor irradiation in space is considered. The choice of a single-line sliding filter for the optical head of the star tracker based on the CMOS sensor is substantiated. A brief description of the experiments on image sensor irradiation and its subsequent study in the climatic chamber is given. Finally, an experiment on modeling and comparison of line filters with different threshold setting options is described. The efficiency of line filters is compared by the number of filtered pixels, localized objects and the number of recognized stars at the output of the filter module. We conclude that it is possible to parry a significant part of the noise with filters.

Keywords: star tracker, primary filtration, line filter, photodetector, temperature, neutrons, proton events, structural effects, radiation tests

Accepted: 25.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-106-118

References

1. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Smetanin P. S., Pervichnaya obrabotka informatsii v zvezdnom datchike orientatsii (Primary data processing in the star tracker), *4-ya Vserossyiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (4th All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"), Proc., Tarusa, 8–11 Sept. 2014, Moscow: IKI RAN, 2015, pp. 159–174.
2. Kobeleva A. A., Elyashev Ja. D., Bessonov R. V., Kudelin M. I., Avanesov G. A., Forsh A. A., Rezultaty ispytaniy fotosensirov CMV20000 na stoikost' k vozdeistviyu ioniziruyushchikh izluchenii kosmicheskogo prostranstva (The results of CMV20000 photosensors tests for resistance to ionizing radiation of outer space), *5-ya Vserossyiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problem orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (5th All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"), Proc., Tarusa, 5–8 Sept. 2016, Moscow: IKI RAS, 2017, pp. 154–162.
3. Chan T. F., Golub G. H., LeVeque R. J., Algorithms for computing the sample variance: analysis and recommendations, *The American Statistician*, Vol. 37, No. 3, University of California, 1983, pp. 242–247.
4. Hain T. F., Mercer D. B., Fast Floating Point Square Root, *Information and reference portal "Semantic Scholar"*, 2005, 7 p., URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/5060/4e9aff0e37089c4ab9a376c3f35761ffe28b.pdf> (accessed 28.06.2018).