Алгоритм коррекции дефектных пикселей в априорном режиме работы звёздного датчика

Б. А. Юматов

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: bumatov@cosmos.ru

Длительная эксплуатации приборов звёздной ориентации приводит к неизбежной деградации их электронных компонентов. Продолжительное радиационное воздействие на фотоприёмное устройство прибора влечёт за собой возрастание структурного шума, превращая множество пикселей в дефекты, сопоставимые по яркости с пикселями, содержащими в себе полезный сигнал от звёзд. При работе в априорном режиме звёздному прибору известны параметры угловой скорости и время следующего измерения, что позволяет прогнозировать ограниченные области изображения, содержащие звёзды, и концентрироваться на их обработке. Прогноз нивелирует негативное влиянии дефектов, выражающееся в конкуренции с изображениями реальных звёзд в ходе выполнения алгоритма распознавания без наличия априорной информации. В такой ситуации изображения звёзд могут затеряться в преобладающем количестве ложных объектов. Негативный эффект, оказывающий влияние в априорном режиме, возникает при попадании части изображения звезды на дефекты и приводит к искажению средневзвешенного центра яркости звезды, что негативно сказывается на качестве решения целевой задачи. В ходе многолетней эксплуатации звёздного датчика величина ошибок определения параметров может возрасти на порядок. Кроме того, неизбежно будет падать вероятность решения целевой задачи, которая при высоких угловых скоростях может упасть до нуля. Для решения этих проблем был разработан алгоритм коррекции дефектных пикселей для априорного режима работы, который будет рассмотрен в этой работе.

Ключевые слова: звёздный датчик, повышение точности параметров ориентации, устранение дефектных пикселей

Одобрена к печати: 07.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-112-120

Введение

Отбраковка помех в режиме начальной ориентации прибора звёздной ориентации необходима для повышения вероятности решения задачи определения ориентации. В режиме «Слежение», когда заранее известны местоположения звёзд в плоскости снимка на момент измерений, эта проблема не так остра — в обработку попадают области, заведомо содержащие звёзды (Аванесов и др., 2020). В этом режиме отбраковка помех важна в ином аспекте — повышения точности решения целевой задачи. Яркий дефектный пиксель, причисленный к кластеру звезды, может оказать негативное влияния на точность определения средневзвешенного центра яркости звезды (Lee, 2023). Исключать же звезду, содержащую дефект, не всегда допустимое решение (Cui et al., 2023). Более предпочтительным вариантом решения проблемы считается коррекция этого пикселя, предваряющая локализацию звезды. Качественная коррекция требует постоянной актуализации параметров дефектных пикселей, яркость которых может меняться в ходе движения космического аппарата-эксплуатанта звёздного датчика по орбите из-за изменения характеристик внешних воздействий, влияющих на прибор звёздной ориентации (Бессонов и др., 2019). В работе рассматривается алгоритм коррекции дефектных пикселей для режима Слежение, учитывающий все описанные выше особенности.

Описание алгоритма

Обобщённая блок-схема алгоритма накопления и отбраковки дефектных пикселей представлена на *рис. 1.*

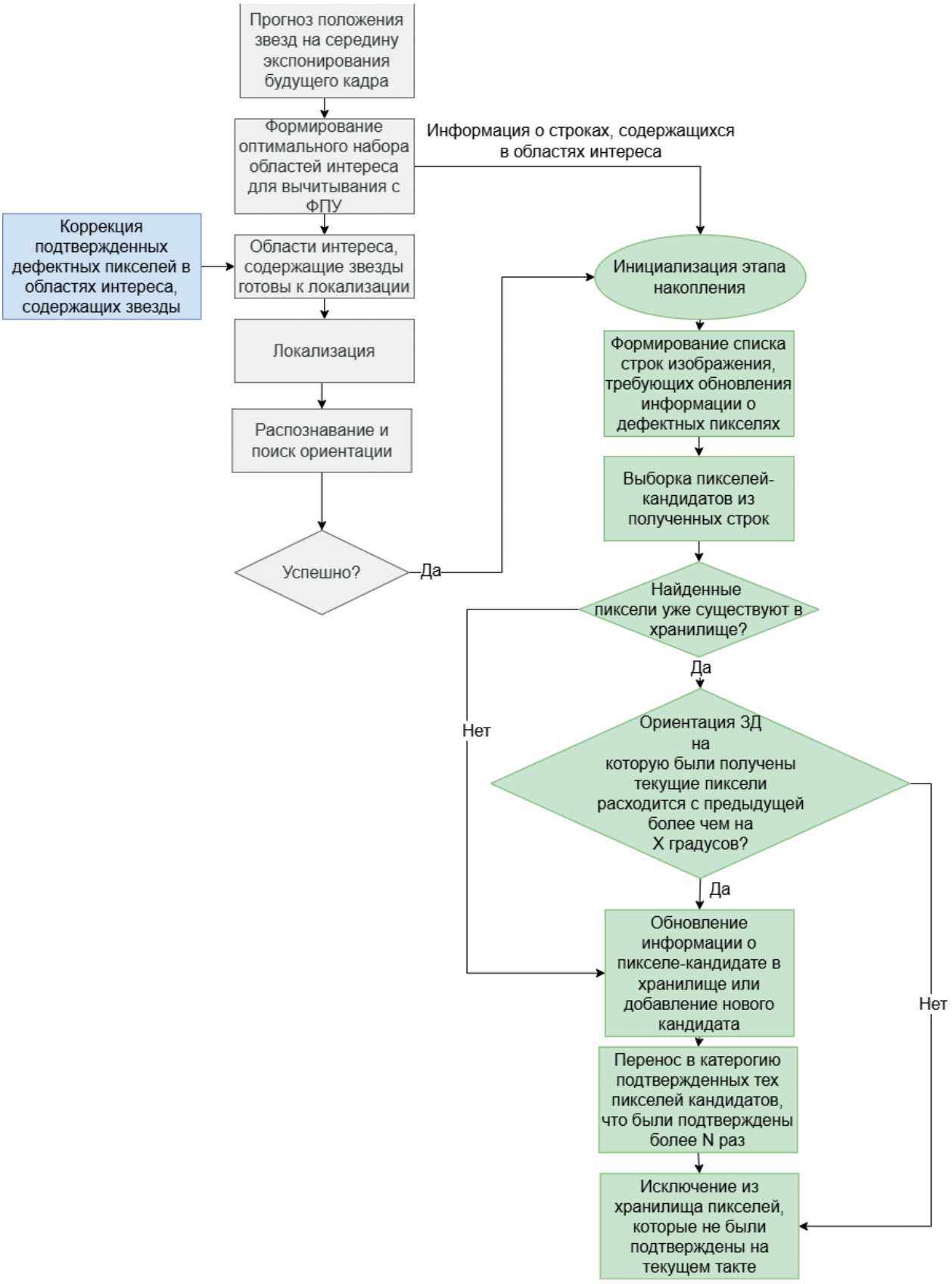


Рис. 1. Блок-схема алгоритма накопления и отбраковки дефектных пикселей

Серым цветом отмечены блоки, представляющие собой этапы основного алгоритма работы звёздного прибора в режиме Слежение, зелёным — блоки, отражающие этапы накопления дефектных пикселей рассматриваемого алгоритма, голубым — этапы коррекции уже накопленных дефектных пикселей.

Этапы работы алгоритма, относящиеся к накоплению дефектных пикселей, следующие:

1) формирование списка приоритетных строк;
2) выборка пикселей-кандидатов;
3) обновление хранилища.

Выполнение первого этапа накопления дефектных пикселей начинается в случае успешного распознавания последнего кадра. На вход алгоритма передаются координаты выбранных для вычитывания посредством прогноза строк, а также информация о рассчитанной ориентации.

Метаданные строк хранятся в массиве, размер которого равен числу строк фотоприёмного устройства (ФПУ). Состав метаданных перечислен ниже:

- счётчик обновлений строки ($counter_{upd}$);
- вектор Oz приборной системы координат в инерциальной системе координат (oz).

Анализируя полученный набор строк изображения, алгоритм осуществляет их ранжирование, отдавая предпочтение строкам, которые имеют наименьшее количество обновлений.

Информация об ориентации используется для парирования ситуаций, когда угловая скорость между двумя последовательными изображениями невелика. В этом случае за дефектные пиксели могут быть приняты пиксели звезды, не успевшей изменить своё местоположение в плоскости снимка.

Таким образом, ранг строки R_y рассчитывается с учётом двух вышеописанных характеристик следующим образом:

$$\begin{cases} R_y = R_{\min}, \text{если } \cos(oz_{cur}, oz_{prev}) < 5'', \\ R_y = counter_{upd} \cdot height + y_{line}, \end{cases}$$

где R_{min} — число, характеризующее минимально возможный приоритет; oz_{cur} и oz_{prev} — вектор Oz приборной системы координат в инерциальной системе координат для текущего и предыдущего кадра соответственно; y_{line} — координата линии вдоль оси Oy системы координат снимка; $height$ — число строк изображения; $counter_{upd}$ — счётчик обновлений строки.

Далее с помощью рассчитанных рангов проводится упорядочивание строк по убыванию их ранга. Строки с рангом, равным R_{min}, исключаются из упорядоченного списка.

На следующем этапе алгоритма проводится выборка дефектных пикселей-кандидатов из приоритетных строк. Пикселями-кандидатами становятся те пиксели, чья яркость превышает величину порога. При первом вызове алгоритма величина этого порога рассчитывается по формуле, значения для которой формируются в рамках алгоритма фильтрации, выполнявшегося в режиме начальной ориентации:

$$threshold = mean + k \cdot sigma,$$

где $mean$ — среднее значение по кадру; $sigma$ — среднеквадратичное отклонение (СКО) по кадру; k — коэффициент по СКО.

При каждом последующем вызове порог корректируется алгоритмом градиентного спуска. Таким образом обеспечивается оптимальное заполнение хранилища прецедентов и реакция на изменение внешних условий. Для осуществления коррекции порога вычисляется разница доли выбранных пикселей (ДВП) (число выбранных пикселей в запрошенных строках к общему числу пикселей в запрошенных строках) и относительной вместимости хранилища (ОВХ) (максимально возможное число пикселей в хранилище к числу пикселей в кадре). Дополнительно учитывается относительное число отклонений (ОЧО) — отношение числа незаписанных выбранных пикселей к общему числу выбранных пикселей. Таким образом, градиентный шаг осуществляется по следующей формуле:

$$threshold += 100 \cdot (\text{ДВП} - \text{ОВХ}) + 50 \cdot \text{ОЧО}.$$

Пиксели-кандидаты, полученные по результатам выборки из строк, попадают на вход этапа обновления хранилища. На этом этапе производится сохранение новых кандидатов в хранилище, оценка яркости пикселей-кандидатов по серии последовательных наблюдений, а также исключение кандидатов, не подтвердившихся повторно в течение допустимого периода времени.

Хранение пикселей-кандидатов производится с помощью хэш-таблицы для каждой строки изображения. Хэш-таблица организована как набор из N массивов фиксированного размера (зависит от ресурса памяти, см. *табл. 1*). Хэш вычисляется на основе *x*-координаты пикселя как

$$H = \frac{x \cdot N}{width},$$

где *width* — количество столбцов изображения.

При вставке нового значения пиксели соответствующей колонки упорядочиваются алгоритмом сортировки по возрастанию *x*-координаты.

Таблица 1. Пример структуры хэш-таблицы с 4 колонками, хранящей 12 прецедентов

0. x∈[0, 512)	1. x∈[512, 1028)	2. x∈[1028, 1540)	3. x∈[1540, 2048)

x = 2
val = 1000
class = 1
acc = 4
skip = 0
	x = 513
	val = 2000
	class = 2
	acc = 6
	skip = 0
		//нулевая запись
		x = 0
		val = 0
		class = 0
		acc = 0
		skip = 0
			x = 1500
			val = 1100
			class = 1
			acc = 2
			skip = 0

x = 58, ...	x = 577, ...	x = 0, class = 0...	x = 1666, ...
x = 419, ...	x = 0, class = 0...	x = 0, class = 0...	x = 1777, ...
Размер: 3	**Размер: 2**	**Размер: 0**	**Размер: 3**

Структура данных для хранения информации о пикселях в рамках хэш-таблицы представлена в *табл. 2.*

Таблица 2. Структура данных для хранения информации о пикселях

Наименование поля	Описание	Число занимаемых бит
x	Координата *x* пикселя в рамках строки	11
val	Текущая оценка яркости пикселя	12
class	Тип пикселя (пиксель отсутствует, пиксель-кандидат, подтверждающий пиксель)	2
acc	Число наблюдений пикселя	5
skip	Число пропусков в наблюдении пикселя	2

При наличии свободных ячеек для пикселей в хэш-таблице для нового пикселя проводится поиск соответствующей колонки и инициализация в ней структуры для хранения в соответствии с *табл. 2.*

При нехватке места (текущее число хранимых пикселей в колонке равно максимальной её вместимости) функция вставки завершается не успешно, пропускает текущий пиксель-кандидат и инкрементирует счётчик пропусков вставки, который в последствии будет использован при коррекции величины порога. Подобная ситуация может возникать при малом пороговом значении, вследствие чего на этапе выборки пикселей-кандидатов их количество оказывается чрезмерно большим.

В случае отсутствия пикселя-кандидата для пикселя, уже находящегося в хранилище, для него инкрементируется число пропусков. Если число пропусков превышает задаваемое пороговое значение, пиксель исключается из хранилища.

В том случае, когда информация о пикселе уже присутствует в хранилище и для него найден соответствующий кандидат, производится накопление информации о яркости пикселя.

Для оценки яркости пикселя используется алгоритм экспоненциального скользящего среднего — EMA. Основная формула выражается следующим образом:

$$B_{n+1} = (1-\alpha)B_n + \alpha b_{n+1}, \tag{1}$$

где B_n — оценка яркости горячего пикселя после n подтверждений; α — сглаживающая константа $\in(0,1)$; b_{n+1} — яркость пикселя на $(n+1)$-м подтверждении.

Постепенное накопление яркости пикселя необходимо, во-первых, потому что это позволяет снизить долю шумовой составляющей в яркости пикселя за счёт производимого усреднения, а во-вторых, с целью поддержания яркости пикселя в актуальном состоянии при длительном нахождение прибора звёздной ориентации в режиме Слежение. Яркость пикселя может изменяться на больших временных интервалах из-за изменения температуры ФПУ, вызванного в свою очередь переходом прибора из тени в освещённую часть пространства и обратно вследствие движения аппарата по орбите.

Из яркости пикселя, используемой при накоплении, вычитается среднее значение сигнала по изображению. Исключение этой операции в случае резкого изменения величины засветки, приходящейся на входной зрачок объектива звёздного прибора, а следовательно, резкого изменения величины фона на изображении, приведёт к некорректной оценке яркости пикселя.

Яркость пикселей, попадающих в хэш-таблицу, хранится в целочисленном формате с целью экономии памяти. Эта оптимизация может привести к ситуации, когда в результате округления близкая к истинной оценка яркости пикселя никогда не будет получена. Ситуация на примере будет выглядеть так. Пусть $\alpha = 0{,}1, b_{n+1} = B(\infty) = 104$, $B_n = 100$. Тогда $B_{n+1} = 0{,}9\cdot 100 + 0{,}1\cdot 104 = 90 + 10{,}4 \cong 100$, поскольку B_n — беззнаковое целое. По индукции получаем $B_\infty = 100$, что отличается от реального значения на 4 градации.

Для того чтобы избежать проблем, связанных с неизбежным округлением, используется следующая эвристика:

$$d_{n+1} = \alpha(b_{n+1} - B_n), \tag{2}$$

$$D_{n+1} = d_{n+1} \text{ если } \left|d_{n+1}\right| > 1 \text{ иначе } sign(d_{n+1}), \tag{3}$$

$$B_{n+1} = B_n + D_{n+1}, \tag{4}$$

где d — исходная величина изменения яркости пикселя с учётом коэффициента сглаживания; D — скорректированная величина изменения яркости пикселя с учётом коэффициента сглаживания.

Как видно из выражений (2–4), при $\left|d_{n+1}\right| > 1$ после всех подстановок получается формула (1). Для малых d выполняется аппроксимация по одной градации либо вверх, либо вниз в зависимости от знака.

Далее проводится оценка числа подтверждений пикселя, необходимого для перехода пикселя в подтверждённое состояние. Можно предположить, что число накоплений считается достаточным, когда остаточный вклад ещё неучтённых будущих значений пикселя не превышает ε.

Разложение рекурсии EMA проводится следующим образом:

$$B_n = \alpha b_n + (1-\alpha)\left(\alpha b_{n-1} + (1-\alpha)B_{n-2}\right),$$

$$B_n = \alpha b_n + \alpha(1-\alpha)b_{n-1} + \alpha(1-\alpha)^2 b_{n-2} + \ldots$$

Тогда вес элемента b_{n-k} при $k = 0, 1, 2$ рассчитывается как

$$w_k = \alpha(1-\alpha)^k .$$

Суммарный вес — это частичная сумма геометрической прогрессии:

$$W(K) = \sum_{K=0}^{K-1} \alpha(1-\alpha)^k ,$$

рассчитываемая по формуле

$$W(K) = \alpha \cdot \frac{1-(1-\alpha)^K}{1-(1-\alpha)} .$$

Тогда суммарный вес уже накопленных элементов будет выглядеть так:

$$W(K) = 1-(1-\alpha)^K .$$

Суммарный вес не накопленных элементов

$$R(K) = 1-W(K) = (1-\alpha)^K .$$

Чтобы доля не накопленных весов не превышала ε, необходимо выполнение неравенства

$$(1-\alpha)^K \leqslant \varepsilon .$$

Из которого можно выразить число требуемых накоплений:

$$K \geqslant \frac{\ln(\varepsilon)}{\ln(1-\alpha)} .$$

Таким образом, выбрав ε равным 0,01 (что обеспечивает накопление 99,9 %) сигнала и αравным 0,15, для накопления сигнала потребуется около 29 подтверждений пикселя. В предположении, что алгоритм за один период работы обрабатывает около 100 строк и угловая скорость между вызовами алгоритма превышает порог в 5″, нетрудно рассчитать, что на накопление потребуется около 600 последовательных изображений или около 75 с для прибора с частотой работы 8 Гц.

На этапе коррекции уже накопленных дефектных пикселей проводится коррекция дефектных пикселей в спрогнозированных окнах, содержащих звёзды. Для каждого окна выполняется поиск подтверждённых дефектных пикселей из хэш-таблицы. Яркость найденных дефектных пикселей вычитается из соответствующего пикселя окна.

Результаты апробации

Для оценки качества работы алгоритма была проведена его апробация на смоделированных выборках изображений с угловыми скоростями от 15″/с до 4°/с и количеством изображений в каждой выборке, равном тысяче. Формирование выборок происходило в двух вариантах — с фоновой составляющей в отсутствии продолжительного радиационного воздействия и при его наличии. Во втором случае для моделирования фона использовались темновые изображения с реального ФПУ, подвергшегося облучению, эквивалентному десятилетию эксплуатации прибора на орбите, проходящей через радиационные пояса Земли. В рамках моделирования учитывался худший случай, при котором в звёздном приборе отсутствуют электрические элементы, позволяющие охлаждать ФПУ. Таким образом перед съёмом темновых изображений ФПУ было нагрето до максимально возможной температуры, которая может быть достигнута в ходе эксплуатации.

Отработка алгоритма проводилась при параметре ε, равном 0,01, и параметре α, равном 0,15. Размер хранилища был ограничен 122 880 пикселями или 60 пикселями на одну строку изображения.

Оценка скорости накопления дефектных пикселей при угловой скорости 4′/с представлена на *рис. 2*.

На *рис. 3* приводится зависимость числа успешных кадров (для которых были определены параметры ориентации) при различных условиях эксплуатации звёздного датчика:

- в отсутствии дефектов на изображениях (эталонный результат) — синяя линия;
- при наличии дефектов на изображениях и отключённом алгоритме коррекции — зелёная линия;
- при наличии дефектов и включённом алгоритме коррекции — красная линия.

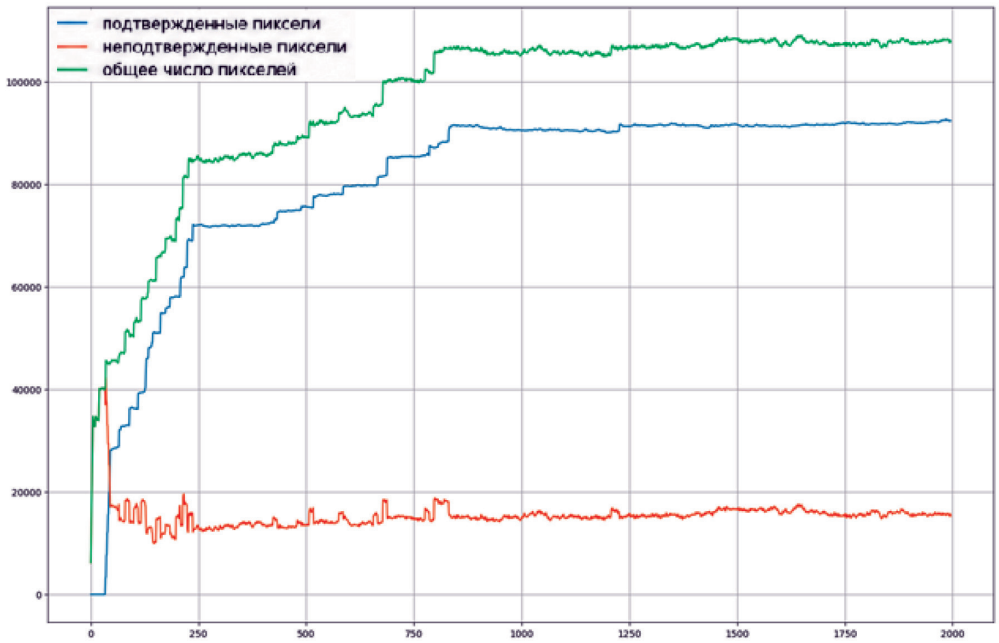


Рис. 2. Число накопленных дефектных пикселей от номера изображения. Зелёным цветом показано общее число пикселей; красным — число неподтверждённых пикселей; синим — число подтверждённых пикселей

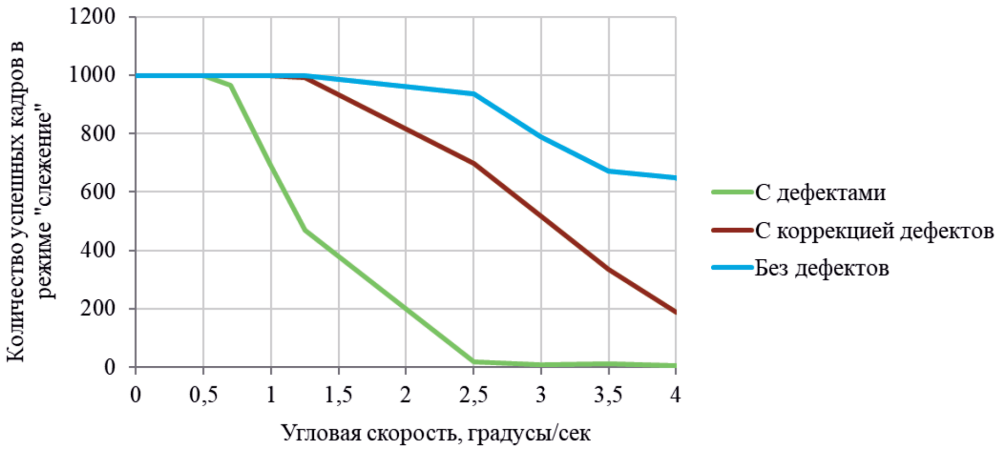


Рис. 3. Зависимость количества успешных кадров в априорном режиме работы от угловой скорости

В отсутствии алгоритма коррекции дефектов вероятность решения задачи ориентации уменьшается практически в два раза при скорости 1,25°/с, при достижении угловой скорости в 2,5°/с падает практически до нуля. Коррекция дефектов в свою очередь приводит к тому, что хоть и вероятность решения целевой задачи снижается приблизительно на 20 %, начиная с угловой скорости 1,25°/с, относительно эталонного варианта моделирования, однако вплоть до угловой скорости 4°/с прибор остаётся работоспособным.

На *рис. 4* представлена зависимость СКО угла прямого восхождения при аналогичных вышерассмотренным условиях эксплуатации.

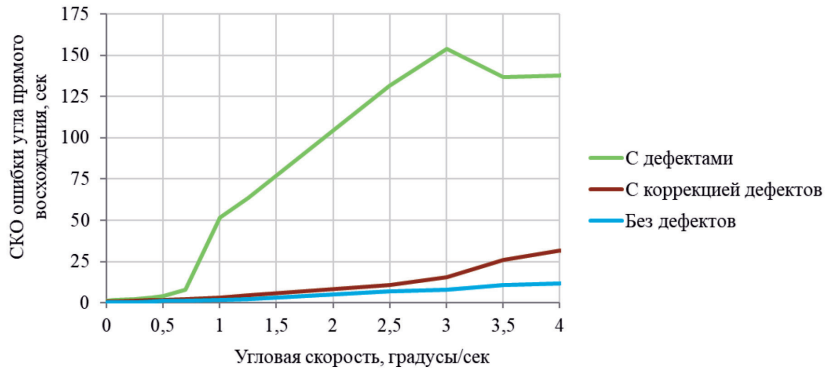


Рис. 4. Зависимость СКО угла прямого восхождения в априорном режиме работы от угловой скорости

В отсутствии алгоритмов коррекции, при достижении угловой скорости, равной 0,75°/с, ошибка СКО возрастает до 50″, а уже при скорости 3,5–4°/с достигает 150″. В это же время вариант моделирования с интегрированным алгоритмом коррекции вплоть до 1°/с демонстрирует результаты практически идентичные эталонному варианту моделирования. В пике расхождение с эталонным вариантом моделирования, при 4°/с, достигает 12″, что всё ещё на порядок меньше, чем в варианте моделирования без коррекции. Наличие расхождения с эталонной и корректируемой моделью можно объяснить двумя факторами. Из-за ограничений по объёму памяти для хранения дефектных пикселей, наименее яркие из них могут не попасть в хранилище, но и их влияние на точность локализации не так велико при малых угловых скоростях. При высоких угловых скоростях, когда интегральная яркость звёзд более распределена по плоскости снимка, недоучтённые дефекты начинают играть свою роль, существенно искажая координаты звёзд на снимке.

В качестве второго фактора можно выделить недостаточное или недостаточно частое число накоплений дефектных пикселей, которые могут быстро изменять свою яркость в следствие динамически изменяющихся внешних условий, что в свою очередь приводит к неполноценному их устранению, которое начинает сказываться при высоких величинах угловой скорости.

Заключение

Представленные результаты апробации демонстрируют высокую эффективность разработанного алгоритма в аспекте снижения влияния статических помех на точность и вероятность решения целевой задачи. Алгоритм позволил снизить СКО оценок параметров ориентации по серии измерений на порядок при малых угловых скоростях (до 1°/с), практически сравняв величину СКО с той, которая соответствует работе прибора в отсутствии помех, и в несколько раз при высоких угловых скоростях (от 1 до 4°/с). Вероятность решения целевой задачи возросла в несколько раз в диапазоне угловых скоростей от 0,5 до 2,5°/с. При наличии коррекции в диапазоне угловых скоростей от 2,5 до 4°/с прибор сохранил работоспособность, в то время как в отсутствии коррекции дефектных пикселей не было зафиксировано ни одного успешного решения задачи поиска ориентации.

Литература

1. *Аванесов Г. А.*, *Бессонов Р. В.*, *Белинская Е. В. и др.* Исследование и компенсация методической погрешности измерения координат звёзд датчиков ориентации при лётной эксплуатации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 68–79. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-68-79.
2. *Бессонов Р. В.*, *Кобелева А. А.*, *Куркина А. Н. и др.* Воздействие радиации космического пространства на функционирование приборов БОКЗ при их длительной эксплуатации // Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 85–96. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-85-96.
3. *Cui Y.*, *Feng J.*, *Li Y. et al.* Proton radiation effects of CMOS image sensors on different star map recognition algorithms for star sensors // Electronics. 2023. V. 12. No. 7. Article 1629. DOI: 10.3390/electronics12071629.
4. *Lee A.* Star tracker algorithm improvements to restore performance after radiation exposure // Proc. 37th Annual Small Satellite Conf. Utah State University, 2023. SSC23-XII-02. 11 p. DOI: 10.26077/nnk9-3969.

Correction algorithm of defective pixels in a priori operation mode of star trackers

B. A. Yumatov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: bumatov@cosmos.ru

Long-term operation of stellar orientation devices inevitably leads to degradation of their electronic components. Prolonged exposure to radiation on the device's photodetector leads to an increase in the structural noise of a large number of pixels, transforming them into defects comparable in brightness to pixels containing the useful signal from the stars. When operating in a priori mode, the stellar device knows the angular velocity parameters and the time of the next measurement, which allows predicting limited image areas containing stars and focusing on their processing. This prediction eliminates the negative impact of defects, which occurs when they compete with real stars during execution of the recognition algorithm without prior information, potentially obscuring real stars among a large number of false objects. A negative effect relevant to the a priori mode occurs when the useful signal from a star hits the aforementioned defects resulting in a distortion of the weighted average brightness center of the star, which in turn negatively impacts the performance of the device. Over the course of many years of operation of a star tracker, the magnitude of parameter determination errors can increase by an order of magnitude. Furthermore, the probability of orientation determination will inevitably decrease, potentially reaching zero at high angular velocities. To address these issues, an algorithm for correcting defective pixels for the a priori operating mode is developed and discussed in this paper.

Keywords: star tracker, improved orientation parameter accuracy, elimination of defective pixels

Accepted: 07.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-112-120

References

1. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Belinskaya E. V. et al., Research and compensation for the methodological error in measuring the coordinates of stars by orientation sensors during flight operation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 1, pp. 68–79 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-68-79.
2. Bessonov R. V., Kobeleva A. A., Kurkina A. N. et al., The effect of outer space radiation on the operation of BOKZ devices during their long-term operation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 5, pp. 85–96 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-85-96.
3. Cui Y., Feng J., Li Y. et al., Proton radiation effects of CMOS image sensors on different star map recognition algorithms for star sensors, *Electronics*, 2023, V. 12, No. 7, Article 1629, DOI: 10.3390/electronics12071629.
4. Lee A., Star tracker algorithm improvements to restore performance after radiation exposure, *Proc. 37th Annual Small Satellite Conf.*, Utah State University, 2023, SSC23-XII-02, 11 p., DOI: 10.26077/nnk9-3969.