Внутренний облик прибора звёздной ориентации, адаптированного к решению целевой задачи при высоких угловых скоростях

Б. А. Юматов, И. А. Метельков, А. В. Кононенко, В. К. Сударикова

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

Расширение областей применения звёздных приборов зачастую формирует дополнительные требования к ключевым характеристикам, удовлетворение которым необходимо для успешного решения целевой задачи — поиска ориентации. Эксплуатация астродатчиков на блоке выведения накладывает одно из таких требований — обеспечение широкого диапазона угловых скоростей, в котором прибор может с высокой вероятность определять ориентацию. Стандартное программно-математическое обеспечение звёздного прибора рассчитано на решение задачи начального поиска ориентации при угловых скоростях, не превышающих 2–2,5°/с. Вероятность решения целевой задачи при наличии априорной информации находится в допустимых пределах лишь в диапазоне скоростей, не достигающих 5°/с. Таким образом, алгоритмы прибора требуют модернизации для обеспечения функционирования при высоких угловых скоростях. В статье рассматривается алгоритм и циклограмма работы прибора, адаптированного к решению обозначенной задачи. В заключении представлены результаты апробации математической модели изделия, экспериментального образца, а также сравнительный анализ с другими звёздными приборами.

Ключевые слова: звёздный датчик, высокая угловая скорость, блок выведения, параметры угловой ориентации

Одобрена к печати: 07.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-185-194

Введение

Расширение областей применения звёздных приборов зачастую формирует дополнительные требования к ключевым характеристикам, удовлетворение которых необходимо для успешного решения целевой задачи — поиска ориентации. Одним из таких требований является обеспечение широкого диапазона угловых скоростей, в котором прибор может с высокой вероятность определять ориентацию.

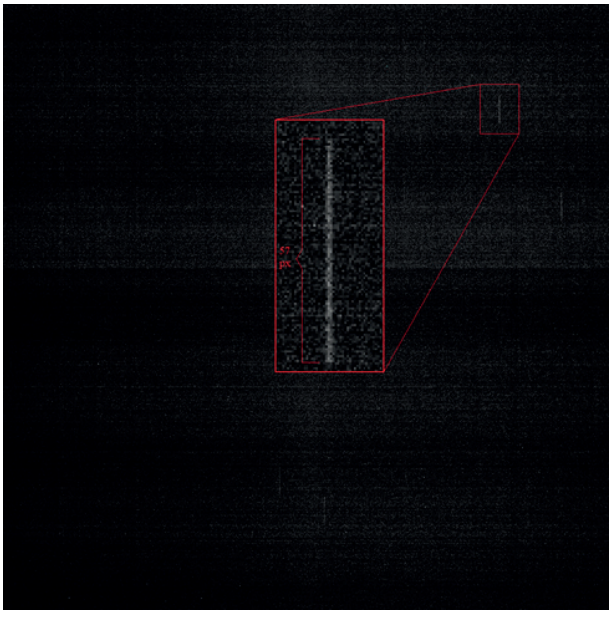


Рис. 1. Изображение звезды при угловой скорости 10°/с

Стандартное программно-математическое обеспечение (ПМО) звёздного прибора рассчитано на решение задачи безаприорного поиска ориентации при угловых скоростях, не превышающих 2–2,5°/с (Ning et al., 2021). Вероятность решения целевой задачи при наличии априорной информации находится в допустимых пределах лишь в диапазоне скоростей, не достигающих 5–10°/с (Crassidis et al., 2002). Таким образом, ПМО требует модернизации для обеспечения функционирования при высоких угловых скоростях.

Проблема решения задачи поиска ориентации при больших угловых скоростях

осложнена тем фактом, что изображение звезды распределяется по большой площади фотоприёмного устройства. Пример изображения со звёздного датчика при работе на столь высоких угловых скоростях представлен на *рис. 1.*

Таким образом, на каждый пиксель звезды приходится малая доля полезного сигнала, что в свою очередь означает малую величину отношения сигнал/шум. Это обстоятельство препятствует корректному выделению пикселей, принадлежащих звёздам, на этапе фильтрации изображения. Далее, если звезда была достаточно яркой, составляющие её пиксели не слились с шумом и была успешно проведена процедура локализации (определение средневзвешенного центра яркости кластера пикселей, представляющих собой звезду), средневзвешенный центр яркости почти наверняка окажется смещён настолько, что расчёт ориентации будет проведён с большими погрешностями.

Парирование описанной ситуации возможно в том случае, если известны проекции угловой скорости на оси внутренней системы координат прибора. Наличие этой информации позволяет осуществлять свёртку изображения с необходимым размером ядра по обеим осям системы координат снимка. Длина смаза изображения звезды может быть рассчитана с помощью выражения

$$L_{track} = \frac{\omega_n}{p_s / f} t_Э \,, \tag{1}$$

где ω_n — величина угловой скорости; p_s — размер пикселя; f — фокусное расстояние; $t_Э$ — время экспонирования.

Коэффициент свёртки может быть определён по следующей формуле:

$$S = \frac{L_{track}}{L_{optimal}} \,, \tag{2}$$

где $L_{optimal}$ — требуемая длина трека звезды.

В ходе свёртки осуществляется аккумуляция пикселей звезды вдоль направления смаза, что приводит к росту отношения сигнал/шум, так как полезный сигнал в результирующих пикселях вырастет в N раз, а шум в $\sqrt{N}$ раз в соответствии со свойством сложения дисперсий набора независимых случайных величин.

Длинный смаз изображения звезды требует аккуратного подхода к предварительной обработке изображения, в связи с чем необходимо разработать и внедрить подходящий алгоритм фильтрации. В совокупности с процедурой свёртки с большим размером ядра, а также осуществлением прочих дополнительных процедур, таких как отбраковка одиночных ярких пикселей изображения, необходимо тщательно подойти к оптимизации алгоритмов предварительной обработки изображения с целью обеспечения адекватной частоты обновления информации.

В исследовании рассматриваются алгоритмы и циклограмма работы прибора, разработанного в ИКИ РАН и адаптированного к решению задачи функционирования при высоких угловых скоростях.

В заключении представлены результаты апробации математической модели изделия, экспериментального образца, а также сравнительный анализ с другими звёздными приборами.

Циклограмма работы

Циклограмма работы прибора представлена на *рис. 2.*

Основной режим работы прибора «ОО» — определение ориентации — является автономным, что подразумевает автоматическое управление переключением между безаприорным (поиск ориентации в отсутствии информации об ориентации на известный момент времени) и априорным режимами функционирования.

Продолжительность такта работы прибора определяется временем между серединами экспонирований соседних изображений (T_n) и составляет 262,144 мс.

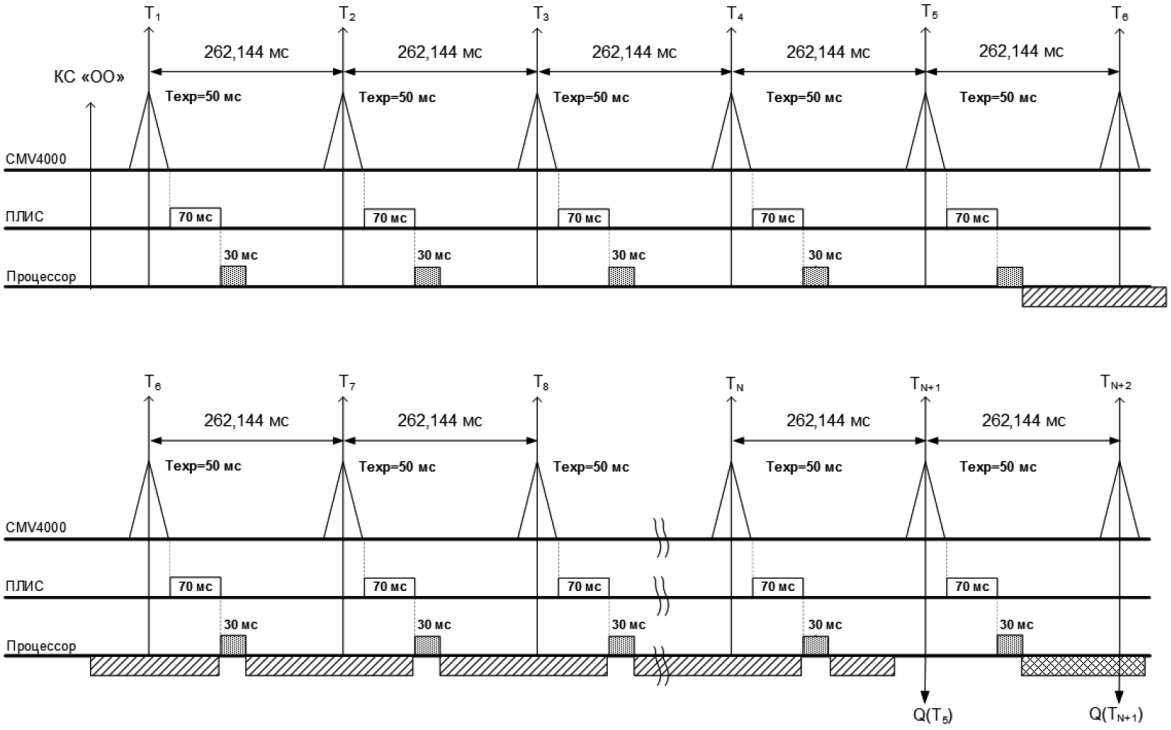


Рис. 2. Циклограмма работы прибора

При поступлении на вход прибора командного слова (КС) «ОО» в начале следующего такта производится выдача команды экспонирования на фотоприёмное устройство. Длительность экспозиции (T_{exp}) постоянна и имеет продолжительность 50 мс.

По завершении экспонирования изображения начинается вынос кадра в память вычислительного устройства. Продолжительность операции выноса составляет 70 мс. Для цели экономии памяти и вычислительных ресурсов микроконтроллера дополнительно на этапе выноса с помощью программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) производится полный цикл предварительной обработки изображения. По завершении предварительной обработки формируется набор пикселей, прошедших все этапы отбраковки. Далее полученное множество пикселей попадает на вход алгоритмов ПМО, исполняемых на микроконтроллере.

Первые пять изображений подвергаются сокращённой обработке, заключающейся в локализации пикселей и попытке определения параметров угловой скорости по паре наборов локализованных объектов с соседних кадров. Далее прибор переходит к этапу распознавания и поиска ориентации по паре изображений, полученных с первого и пятого тактов. Этот этап может затянуться на несколько тактов, в рамках которых экспонирование, вынос и локализация новых изображений не прекращается. Непрерывный вынос и локализация осуществляются для того, чтобы при неуспешном завершении процедуры распознавания по первому и пятому кадру, процедура повторилась для пар 2-6, 3-7 и так далее без дополнительных задержек. При успешной обработке одной из пар прибор переходит к режиму «Слежение», в рамках которого как и ранее осуществляется локализация и поиск параметров угловой скорости, а так же формирование кватерниона ориентации ($Q(T_n)$). Процедура выполнения последующего этапа распознавания ускоряется и упрощается за счёт прогнозирования будущего положения звёзд на изображении, что в свою очередь позволяет функционировать прибору на штатной частоте.

Предварительная обработка изображения

Наиболее вычислительно затратная операция в звёздном приборе — предварительная обработка изображения (ПОИ). Блок-схема этапа предобработки в рассматриваемом приборе представлена на *рис. 3*.

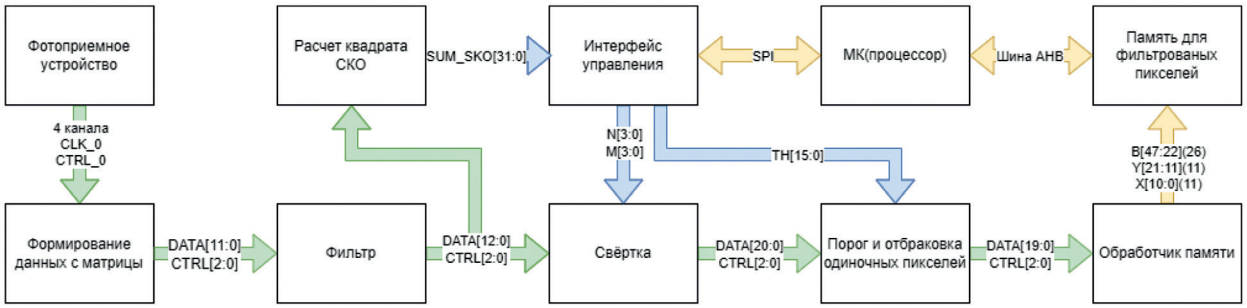


Рис. 3. Блок-схема предварительной обработки изображения

На *рис. 3* CLK — тактовая частота, МК — микроконтроллер, CTRL — идентификатор данных, АНВ — высокопроизводительная системная шина (*англ.* advanced high-perfomance bus), SPI — последовательный синхронный стандарт передачи данных (*англ.* serial peripheral interface), СКО — среднеквадратичное отклонение. Наличие ПЛИС в микроконтроллере даёт возможность обрабатывать изображение в темпе выноса с пикселей с матрицы, что позволяет на порядок снизить требования к объёму оперативной памяти (на хранение отправляются только фильтрованные пиксели) и разгрузить центральный процессор, который во время предварительной обработки может заниматься прочими задачами.

Кадр передаётся в ПЛИС по четырём каналам со скоростью 15 Мпикс/с на канал. По первому каналу передаются пиксели с индексами от 0 до 511, по второму с 512 до 1023, по третьему с 1024 до 1535 и по четвёртому с 1536 по 2047. Четырёхканальный формат выноса кадра с матрицы не очень удобен для построчной обработки, поэтому первый этап заключается в преобразовании в одноканальный формат, состоящий из двух сигнальных линий (*рис. 4*). По первой передаются значения яркости каждого пикселя построчно от верхнего левого угла к правому нижнему, по второй — сигнал о типе пикселя (обычный, последний в строке или последний в кадре). Такой формат позволят определить координаты каждого пикселя вне зависимости от количества строк и элементов в строке.

Следующим этапом происходит фильтрация низкочастотной составляющей на изображении строчным фильтром, маска которого представлена на *рис. 5*.

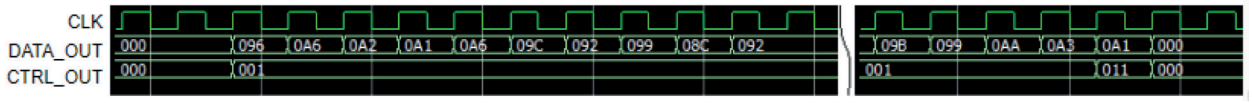


Рис. 4. Осциллограмма одноканального формата выноса пикселей

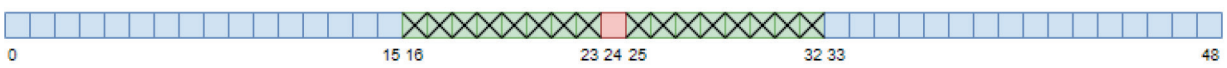


Рис. 5. Маска фильтра

Рассчитывается значение локального среднего по пикселям с индексами 0–15 и 33–48 и из центрального пикселя с индексом 24 вычитается это значение. Выбор конфигурации фильтра был осуществлён исходя из следующих критериев:

1) применение фильтра с высотой маски, превышающей единицу, потребовало бы наличия буферной памяти на все дополнительные строки, поэтому в целях экономии памяти фильтр был выбран однострочным;

2) неиспользуемая часть маски необходима для сохранения корректного соотношения яркости всех пикселей звезды;
3) сложность операции деления на ПЛИС. Её можно заменить побитовым сдвигом вправо, что накладывает ограничение, заключающееся в том, что количество пикселей для расчёта среднего должно быть кратно двойке. В используемой маске это условие удовлетворяется и применяется 16 пикселей в левом крыле и 16 в правом.

По завершении этапа фильтрации изображение поступает в блок свёртки. Исходя из условий технического задания и формул (1) и (2) было получено, что необходимый диапазон свёртки должен составлять от 1 до 16.

Нетрудно заметить, что рассмотренная маска фильтра должна давать корректные результаты лишь в том случае, когда направление трека звезды вертикальное или близко к вертикальному, в противном случае фильтр может искажать соотношение яркости в звезде. Кроме того, необходимо учитывать, что при направлениях треков, близких к диагональным, симметричные маски свёртки захватывают большое количество пикселей фона, что также негативно сказывается на точности последующей локализации. Для оценки влияния направления трека звезды на точность локализации проведём следующий эксперимент. Смоделируем серию изображений с разными проекциями угловой скорости на оси внутренней системы координат прибора таким образом, чтобы треки звёзд изменяли своё направление от вертикальных до горизонтальных с шагом 10°. Далее локализуем каждое изображение, оценим количество локализованных объектов, а также СКО (среднеквадратического отклонения) ошибки локализации. Объект будет считаться локализованным в том случае, когда величина отклонения локализованного центра отстаёт от истинного не более чем на 5 пикселей. Результаты эксперимента сведём в *таблицу*.

Результаты эксперимента

Угол между направлением скорости и осью *Y* системы координат снимка, град	Количество локализованных объектов, прошедших порог точности локализации	СКО отклонений центров локализованных объектов от истинных центров, пиксель
0	8	2,19
10	7	1,75
20	3	0,40
30	3	1,34
40	3	0,39
50	3	1,84
60	3	0,63
70	3	1,55
80	5	1,14
90	0	–

Как можно видеть, количество объектов с приемлемой точностью локализации падает более чем в два раза при изменении направления трека. Так как основное назначение разрабатываемого изделия — работа в режиме закрутки, при которой заранее известны проекции угловой скорости на оси внутренней системы координат прибора, наиболее рациональным подходом считается установка звёздного прибора на посадочное место космического аппарата-эксплуатанта таким образом, чтобы проекция угловой скорости была максимально сонаправлена с вертикальной осью системы координат снимка. Пример свёртки изображения с вертикальным направлением треков звёзд представлен на *рис. 6*.

После свёртки пиксели попадают в блоки отбраковки по величине порога и исключения одиночных пикселей. Если величина пикселя выше порогового значения и он имеет хотя бы

1 соседа из 8, так же преодолевшего порог, то такой пиксель передаётся далее и записывается в память. Непрошедший проверку пиксель исключается из дальнейшего рассмотрения. Цель отбраковки одиночных пикселей заключается в экономии памяти, занимаемой буфером фильтрованных пикселей, так как оценка средневзвешенного центра яркости объекта, состоящего из одного пикселя, не представляется возможной. Отбракованные пиксели записываются в память в формате координата x, координата y и яркость.

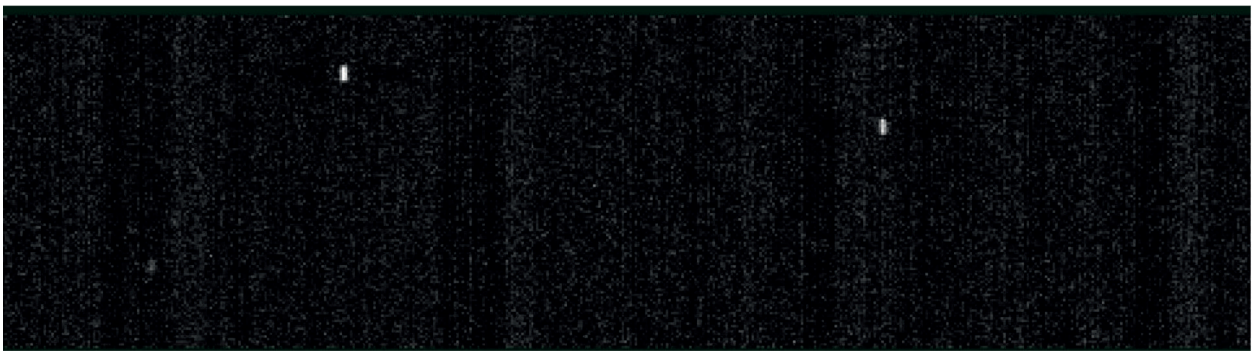


Рис. 6. Фрагмент изображения с вертикальным направлением треков звёзд при угловой скорости 10°/с после процедуры свёртки

Параллельно описанной последовательности этапов ПОИ в ПЛИС рассчитывается СКО по фильтрованному кадру и гистограмма распределения яркости по исходному кадру. Эти значения необходимы для расчёта порога и определения наличия засветки на изображении.

По окончании работы микроконтроллеру подаётся сигнал о завершении ПОИ, чтобы запустить локализацию записанных пикселей.

Решение задачи определения ориентации на микроконтроллере

В данном разделе рассматривается и сравнивается последовательность действий при выполнении процедуры определения ориентации в безаприорном режиме в стандартном звёздном приборе и приборе, нацеленном на работу при высокой угловой скорости (*рис. 7*). Ключевым нововведением в модернизированной циклограмме становится добавление алгоритма определения угловой скорости посредством анализа локализованных объектов на паре соседних изображений.

В ПМО предыдущей модификации производится экспонирование двух ключевых кадров, между которыми выдерживается интервал в несколько секунд для обеспечения возможности отбраковки статичных помех. В текущей модификации кадры экспонируются на всём интервале между ключевыми кадрами. Это делается для того, чтобы как можно больше кадров было обработано алгоритмом определения угловой скорости, являющимся накопительным. Накопительное свойство алгоритма обуславливается тем, что чем больше угловая скорость, тем меньше звёзд при стандартной величине свёртки будет локализовано. Следовательно, тем менее надёжна оценка угловой скорости, полученная лишь по одной или нескольким парам кадров. Чем больше пар изображений будет обработано до перехода к распознаванию, тем больше вероятность того, что будет определена корректная угловая скорость, которая будет передана в блок ПОИ с целью установки соответствующей величины свёртки.

Ещё одна особенность текущей модификации заключается в непрерывности обработки изображений. В предыдущей модификации при неуспешном завершении распознавания прибор переходил в режим ожидания следующей команды. При высоких угловых скоростях локализованные объекты на изображении могут оказаться неразличимыми в течение некоторого интервала времени, в ходе которого звёздный прибор визирует часть небесной сферы с недостаточно яркими звёздами.

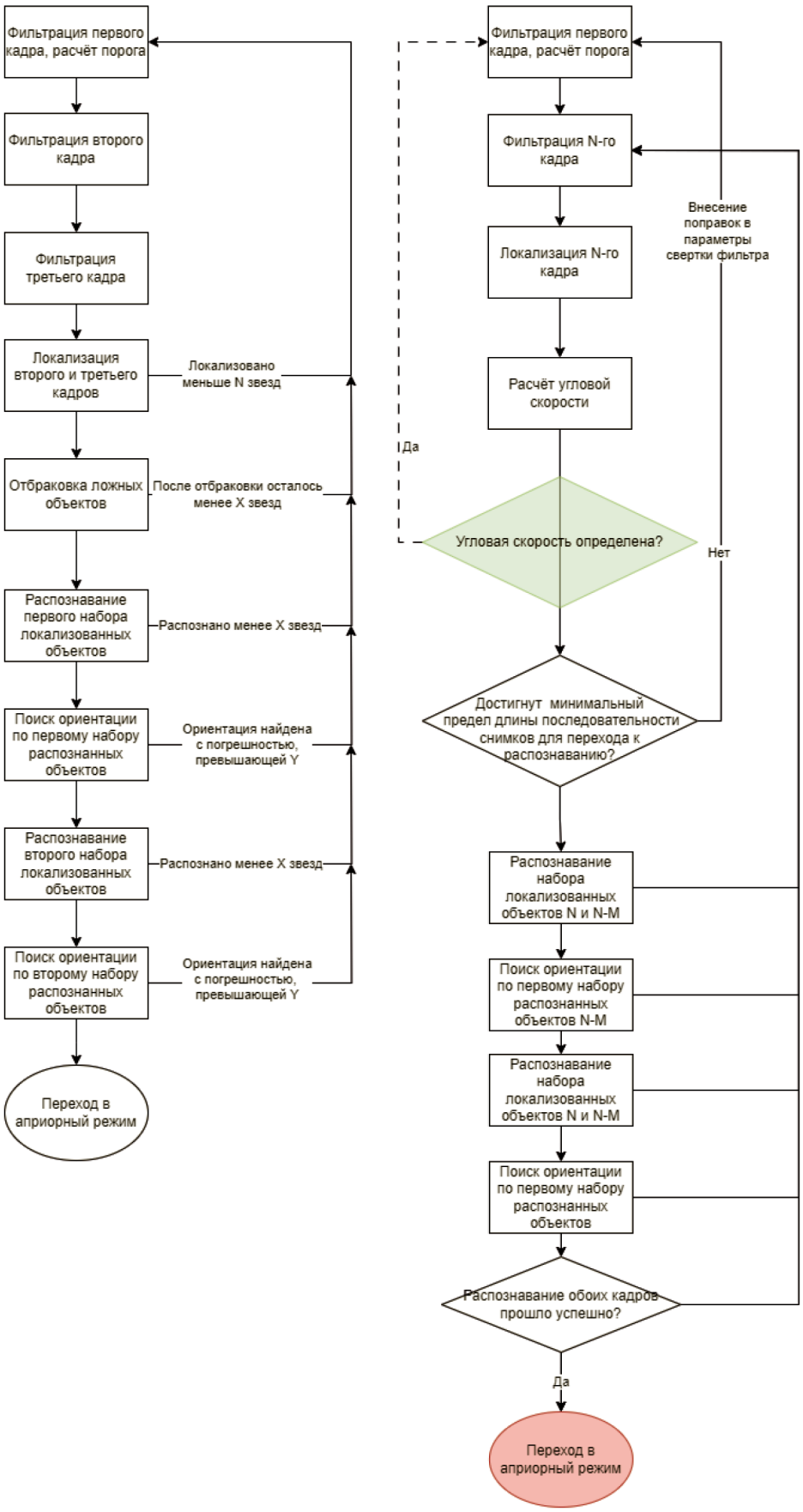


Рис. 7. Сравнение блок-схемы режимов безаприорного поиска ориентации предыдущей (*слева*) и текущей (*справа*) модификации

Этот интервал времени может заметно превышать интервал времени между ключевыми кадрами. Поэтому для повышения вероятности определения ориентации в текущей модификации экспонирование кадров продолжается до тех пор, пока не будет определена достоверная оценка угловой скорости, позволяющая осуществить свёртку изображения и локализовать достаточное количество объектов.

Результаты модельной и натурной апробации

Апробация звёздного прибора проводилась посредством тестирования ПМО на синтетических изображениях, моделирующих величину угловой скорости в диапазоне от 0 до 10°/с, и отработке опытного образца прибора на поворотной платформе. Результаты тестирования на смоделированных кадрах представлены на *рис. 8*.

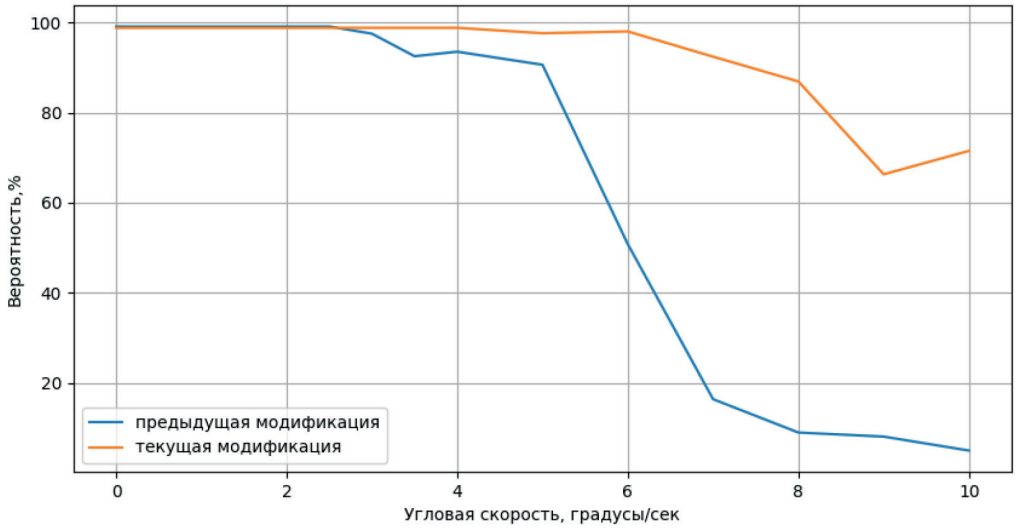


Рис. 8. Результаты тестирования ПМО на модельных изображениях

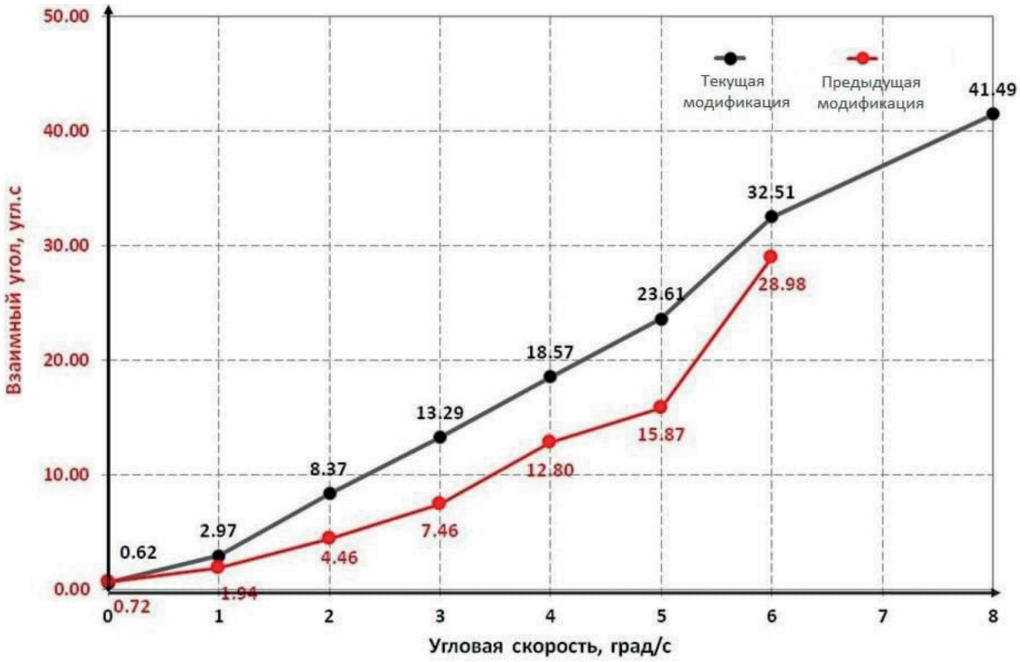


Рис. 9. Результаты натурных испытаний опытного образца

На графике приводятся вероятности определения ориентации для приборов с программным обеспечением предыдущей и текущей модификации. Как можно видеть, вероятность определения ориентации программным обеспечением предыдущей модификации прибора уже при скорости 6°/с опускается ниже 25 %. Для прибора с текущей модернизацией программного обеспечения вероятность входа в ориентацию сохраняется на уровне 70 % даже при угловой скорости в 10°/с.

Возможности наземной апробации опытного образца прибора ограничены конструкцией поворотной платформы, поэтому достоверные оценки при натурных испытаниях были получены для более узкого диапазон угловых скоростей, от 0 до 8°/с (*рис. 9*).

На графике по оси ординат отложены СКО взаимных углов между парой образцов, которые участвовали в натурных испытаниях. Эта величина характеризует точность работы приборов. Несмотря на то, что точность работы описываемого в исследовании изделия уступает предыдущей модификации, оно более успешно функционирует при высоких угловых скоростях. В то время как звёздный прибор предыдущей модификации фактически перестаёт действовать начиная с угловой скорости 6°/с, а прибор текущей модификации продолжает успешно работать вплоть до величины угловой скорости 8°/с.

Заключение

Рассмотренные в работе нововведения, затронувшие первичную обработку изображения на ПЛИС, ПМО и циклограмму работы звёздного датчика, помогли создать опытный образец прибора, который полностью удовлетворяет условиям, необходимым для успешного функционирования звёздного датчика в качестве вспомогательного элемента контура управления космических аппаратов. Выполнение ключевого требования — решения целевой задачи в диапазоне скоростей от 0 до 10°/с — было подтверждено в рамках отработки программно-математического обеспечения, а также апробации опытного образца изделия на стенде натурных испытаний.

Литература

1. *Crassidis J. L.* Angular velocity determination directly from star tracker measurements // J. Guidance, Control, and Dynamics. 2002. V. 25. No. 6. P. 1165–1168. DOI: 10.2514/2.4999.
2. *Ning X.*, *Chen P.*, *Huang Y. et al.* Angular velocity estimation using characteristics of star trails obtained by star sensor for spacecraft // Science China Information Sciences. 2021. V. 64. No. 1. Article 112209. DOI: 10.1007/s11432-019-2824-y.

The internal structure of a stellar orientation device adapted to perform measurements at high angular velocities

B. A. Yumatov, I. A. Metelkov, A. V. Kononenko, V. K. Sudarikova

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

The expansion of application areas for star trackers often imposes additional requirements on key performance characteristics; meeting these requirements is essential for successfully accomplishing the primary mission — determining spacecraft orientation. Operating star trackers on an upper stage creates one such requirement: the need to support a wide range of angular rates within which the device can determine orientation with high probability. Standard star tracker software is designed to perform

initial orientation acquisition at angular rates not exceeding 2–2.5°/s. The probability of successfully completing this task — even with the benefit of a priori information — remains within acceptable limits only at rates up to 5°/s. Consequently, the device's algorithms require upgrading to ensure functionality at high angular rates. The article examines the algorithm and operational sequence of a star tracker adapted to meet these requirements. Finally, the paper presents results from testing the device's mathematical model and an experimental prototype, along with a comparative analysis against other star trackers.

Keywords: star tracker, high angular velocity, launch unit, angular orientation parameters

Accepted: 07.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-185-194

References

1. Crassidis J. L., Angular velocity determination directly from star tracker measurements, *J. Guidance, Control, and Dynamics*, 2002, V. 25, No. 6. P. 1165–1168, DOI: 10.2514/2.4999.
2. Ning X., Chen P., Huang Y. et al., Angular velocity estimation using characteristics of star trails obtained by star sensor for spacecraft, *Science China Information Sciences*, 2021, V. 64, No. 1, Article 112209, DOI: 10.1007/s11432-019-2824-y.