

Разработка алгоритма работы широкоугольного солнечного датчика на основе матричного фотоприёмника

А. В. Сведе-Швец, С. А. Прохорова, Н. А. Строилов, Я. Д. Эльяшев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: arinka.sv@mail.ru

С самого начала существования космических аппаратов (КА) направление на Солнце в системах ориентации КА используется как основное. Почти во всех спутниках и межпланетных аппаратах в составе навигационного оборудования присутствуют датчики солнечной ориентации. Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН) имеет большой задел по разработке и изготовлению датчиков солнечной ориентации. Первые разработки, выполненные ИКИ РАН в 70-х гг. прошлого века, использовались в составе комплексов научной аппаратуры. Ранние солнечные приборы обладали весьма низкой точностью измерений, порядка 1° — больше тогда не требовалось. Задача создания значительно более точного солнечного датчика появилась в начале 1990-х гг. для геостационарного связного КА, к которому предъявлялись достаточно жёсткие требования по позиционированию антенн транспондеров. Выполнять эти требования предполагалось в основном с помощью звёздных датчиков ориентации, но в качестве функционального резерва на борту КА планировалось использование солнечного датчика в паре с датчиком земного горизонта. Соответственно, к точности измерения положения Солнца требования возросли до $1'$ в поле зрения прибора $60 \times 120^\circ$. В настоящее время ИКИ РАН производит и поставляет предприятиям отечественной космической промышленности оптические солнечные датчики (ОСД и ОСД-М) на основе ПЗС-линейки и кодирующей маски. Но в ближайшем будущем номенклатура созданных в ИКИ РАН солнечных датчиков ориентации может пополниться новым прибором на основе матричного фотоприёмника и широкоугольного объектива. В статье рассматриваются вопросы использования встроенной функции КМОП-матрицы под названием «Чёрное Солнце». Приведено описание алгоритма, разработанного с учётом особенностей использования встроенной функции «Чёрное Солнце», а также рассмотрена и подтверждена натурными испытаниями возможность реализации алгоритма для построения широкоугольного матричного солнечного датчика.

Ключевые слова: солнечный датчик, матричное фотоприёмное устройство, алгоритм обработки изображения

Одобрена к печати: 04.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-60-68

Введение

Направление на Солнце используется в системах ориентации космических аппаратов (КА) с самого начала их существования. Практически все спутники и межпланетные КА имеют в составе навигационного оборудования датчики солнечной ориентации. Они используются для построения начальной ориентации сразу после выведения КА на орбиту, при выводе КА из дежурного режима, а также в аварийных режимах или при возникновении на борту нестандартных ситуаций.

Существует довольно много конструкций солнечных датчиков. Наиболее распространёнными сегодня считаются фотодиодные датчики, щелевые солнечные датчики и датчики с объективом типа «рыбий глаз» (Гладышев и др., 2017).

Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН) имеет большой задел по разработке и изготовлению датчиков солнечной ориентации. В начале 70-х гг. прошлого века в ИКИ РАН на основе фрагментов солнечной панели был разработан простейший солнечный датчик. Прибор представлял собой правильную четырёхгранную усечённую пирамиду с углом при основании 45° . На каждую грань пирамиды были наклеены фрагменты солнечной панели размером 30×30 мм. Прибор не имел электропитания. Генерируемое под воздействием солнечного света напряжение с каждого фрагмента панели по каналам аналоговой телеме-

трии передавалось с борта космического аппарата на наземные пункты приёма данных, где по ним определялось направление на Солнце. Прибор изготавливался специальным конструкторским бюро космического приборостроения ИКИ РАН в г. Фрунзе, Киргизия, в нескольких модификациях и использовался в составе научных комплексов на КА серии АУОС (автоматическая универсальная орбитальная станция).

Позднее, в 80-х гг. прошлого века, фотодиоды использовались в проекте «Вега» в приборе АДН (аналоговый датчик наведения). Он применялся в качестве резервного инструмента для наведения платформы с научными приборами на ядро кометы Галлея. В качестве чувствительного элемента в нём использовался квадрантный 8-площадочный фотодиод, разработанный и изготовленный в Физико-техническом институте имени академика А. Ф. Иоффе. В 1986 г. прибор прекрасно справился со своей задачей при пролёте КА «Вега-2» мимо ядра кометы Галлея. Сигналы, получаемые с площадок фотодиода, обрабатывались на борту аналоговыми средствами (Телевизионная..., 1989).

Задача создания значительно более точного солнечного датчика, предназначенного для эксплуатации в составе системы управления угловым движением космического аппарата, появилась в начале 1990-х гг. Выполнять требования по ориентации КА предполагалось в основном с помощью звёздных датчиков, но в качестве функционального резерва на борту планировалось использование солнечного датчика в паре с датчиком земного горизонта. Соответственно, возросли требования к точности измерения положения Солнца до $1'$ (среднеквадратическое отклонение (СКО)) в поле зрения прибора $60 \times 120^\circ$. Поставленная задача была решена с помощью оптического солнечного датчика (ОСД), который в дальнейшем использовался на ряде отечественных КА (Аванесов и др., 2009; Дроздова, Никитин, 2009).

В настоящее время ИКИ РАН производит и поставляет предприятиям отечественной космической промышленности солнечные датчики ОСД и ОСД-М на основе ПЗС-линейки (прибор с зарядовой связью, *англ.* CCD — Charge-Coupled Device) и кодирующей маски (Дроздова и др., 2009). Также испытывался и исследовался солнечный датчик с объективом Pinhole на основе КМОП-матрицы (комплементарная структура «металл-оксид-полупроводник», *англ.* CMOS — complementary metal-oxide-semiconductor).

Номенклатура созданных в ИКИ РАН солнечных датчиков ориентации в ближайшем будущем может пополниться новым прибором на основе матричного приёмника фотоприёмника и широкоугольного объектива.

Солнечный датчик, построенный на широкоугольном объективе типа «рыбий глаз», КМОП-матрице и мощном процессоре, может совмещать в себе функции солнечного датчика и датчика горизонта планеты. Кроме того, замена объектива и математического обеспечения может превратить солнечный прибор в звёздный датчик или в съёмочную систему с большими вычислительными возможностями.

Алгоритм поиска Солнца на кадре с использованием функции «Чёрное Солнце»

Изображение Солнца через широкоугольный объектив проецируется на КМОП-матрицу. Площадь, занятая изображением Солнца, зависит от выбранного угла поля зрения объектива. КМОП-матрица — высокоинтегрированное устройство, предназначенное для регистрации оптического изображения и передачи его в виде цифровых видеоданных на внешние устройства. Кроме фоточувствительных элементов, которые преобразуют световой поток в электрический заряд, в состав КМОП-матрицы входят электронные схемы преобразования электрического заряда в напряжение, усиления сигнала, аналого-цифрового преобразования и формирования выходного цифрового потока.

Алгоритм выделения Солнца на широкоугольной камере, приведённый в данной статье, основан на использовании встроенной функции КМОП-матрицы «Чёрное Солнце». При включении этой функции повышается опорный уровень аналого-цифрового преобразователя для очень ярких объектов, из-за чего на кадре они не уходят в насыщение, а выглядят как слабые объекты на тёмном фоне (Holst, 2014) (*рис. 1, 2, см. с. 62*).

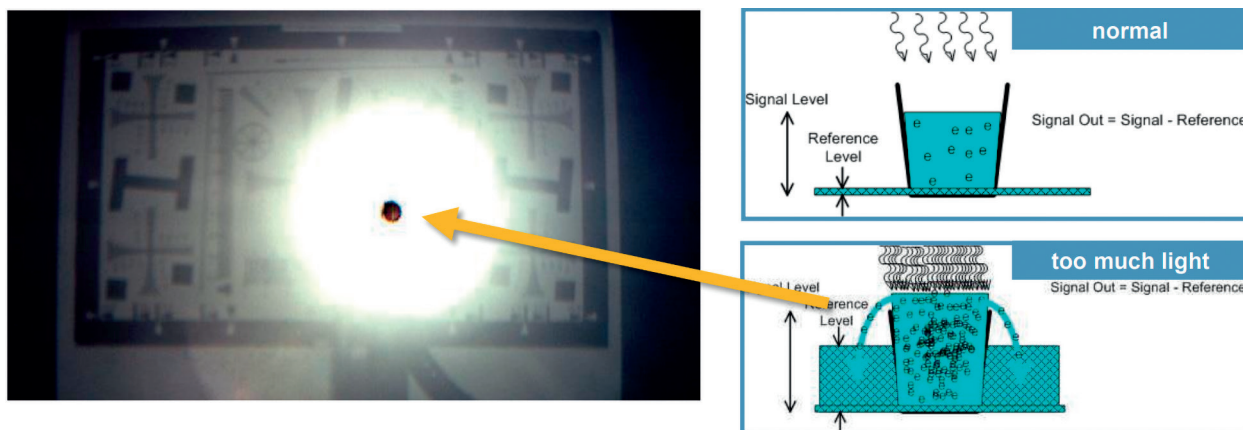


Рис. 1. Принцип действия функции «Чёрное Солнце»: *вверху справа* — принцип работы матрицы в нормальном состоянии; *внизу справа* — при засветке матрицы. Длинные двойные стрелки обозначают уровень сигнала, короткие — уровень опорного сигнала. Выход сигнала равен разнице сигнала и опорного сигнала (Holst, 2014)



Рис. 2. Изображение Солнца с выключенной и включённой функцией «Чёрное Солнце»

Поскольку широкоугольная камера может представлять изображение не по всему полю матрицы, а также из-за того, что в кадр могут попадать элементы конструкции космического аппарата, всю дальнейшую обработку необходимо вести внутри заранее определённой области на кадре. Эта область может быть задана расстоянием от центра матрицы (радиус отрисованного объективом изображения) и кусочно-линейной кривой, отрезающей элементы конструкции космического аппарата.

Ниже представлена блок-схема алгоритма поиска Солнца на кадре (рис. 3, см. с. 63).

Для выделения Солнца на кадре принимается пара кадров: обычный кадр и кадр с включённой функцией «Чёрное Солнце».

Первый кадр принимается без использования функции «Чёрное Солнце» (кадр 1). Для уменьшения размера используемой памяти его можно принимать в бинированном формате. Также при наличии априорной информации о положении Солнца можно считать не полный кадр, а только окно с центром в предполагаемых координатах Солнца.

В процессе считывания запоминаются координаты всех пикселей, значения которых строго равны уровню насыщения (4095 ЕМР (единицы младшего разряда) для небинирован-

ного кадра). Затем полученный список пикселей подвергается процедуре локализации с запоминанием информации о самом большом локализованном объекте — координаты его центра и координаты пикселей, принадлежащих ему.

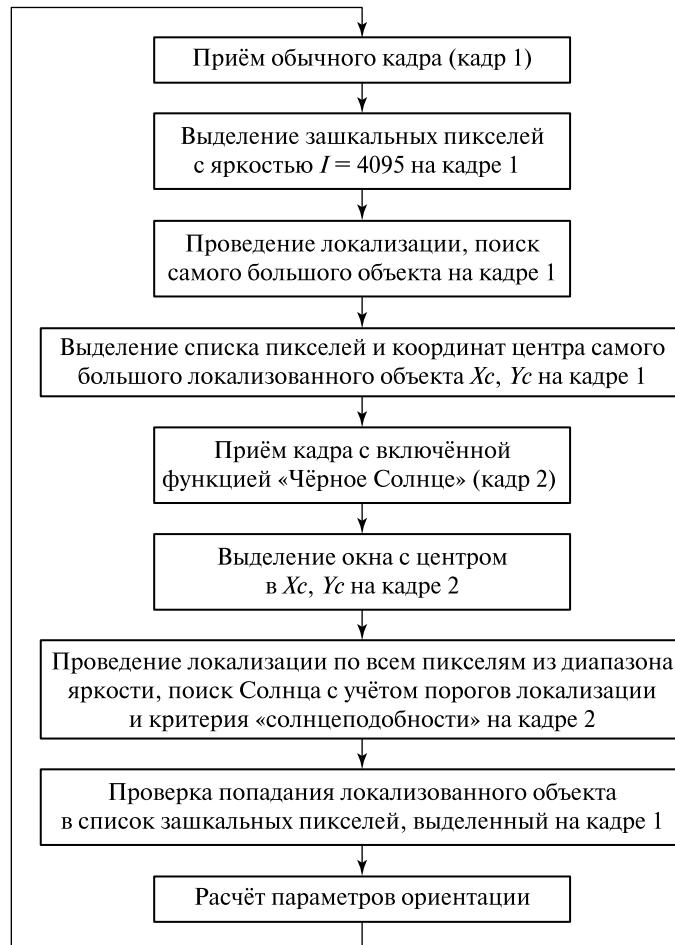


Рис. 3. Блок-схема алгоритма поиска Солнца на кадрах

Второй кадр, с включённой функцией «Чёрное Солнце» (кадр 2), принимается после проведения обработки первого. При этом принимается не полный кадр, а лишь окно заданного размера (например, 100×100 пикселей) с центром в определённых на первом этапе координатах. В этом окне проводится локализация объектов. В локализации участвуют только те пиксели, значения которых лежат между нижним и верхним порогом. Нижний порог выбирается таким образом, чтобы отрезать темную подложку и темновые шумы матрицы (обычно он равен среднему значению темного плюс ЗСКО темного), а верхний порог должен быть строго ниже уровня насыщения. По результатам предварительных экспериментов можно установить верхний порог на уровне 800–1000 ЕМР.

Полученный локализованный объект надо проверить на «солнцеподобность». Существует множество критериев похожести объекта на Солнце. В экспериментах использовалось ограничение на число пикселей (зависит от используемого объектива) и критерий «круглости» объекта — отношение числа пикселей в объекте к его ширине и высоте, которое в случае идеального круга должно равняться $\pi(D^2/4)$.

Последним этапом локализации становится проверка принадлежности объекта, локализованного на кадре 2, области, выделенной на кадре 1. Это будет означать, что локализованный объект достаточно яркий, чтобы сработала функция «Чёрное Солнце». Для этой проверки координаты локализованного объекта на кадре 2 сверяются со списком зашкальных

пикселей, принадлежащих самому большому объекту на кадре 1. При успешной проверке найденный объект считается Солнцем и его координаты пересчитываются в ориентацию с использованием калибровочных параметров.

На кадрах могут быть более крупные объекты, чем Солнце, достаточно яркие, чтобы уйти в насыщение без функции «Чёрное Солнце». Примером таких объектов выступает освещённая Солнцем поверхность Земли, Луна и явление рассеяния света в атмосфере Земли при восходе и заходе Солнца.

На короткое время, порядка 20–40 с, солнечные лучи, рассеиваясь в атмосфере, образуют полосу шириной в несколько тысяч километров, яркость которой может быть близка к яркости самого Солнца. Описанный эффект иллюстрируется серией фотографий, сделанных с международной космической станции, которые приведены на *рис. 4*.



Рис. 4. Горизонт Земли при восходе Солнца

Луна и Солнце имеют близкие угловые размеры, но существенно отличаются друг от друга по яркости — на 14 звёздных величин.

Солнечный датчик должен надёжно работать, как только Солнце поднимется над горизонтом на 2–5°. Это значит, что Солнце и освещённая им земная поверхность окажутся в поле зрения прибора одновременно.

При появлении таких объектов алгоритм не даст ложного срабатывания, однако и координаты Солнца определены не будут. Для обхода этого случая требуется локализация не одного самого большого объекта, а нескольких. Предполагаемая к использованию КМОП-матрица позволяет считывать одновременно до 8 окон. Можно применять алгоритм к 8 самым большим объектам, в большинстве случаев только один объект будет идентифицирован как Солнце. Если же таких объектов будет несколько, можно выбрать самый «солнцеподобный» из них.

Натурные испытания

Для проверки алгоритма и подтверждения возможности построения солнечного датчика (СД) на базе КМОП-матрицы и широкоугольного объектива были проведены натурные испытания на реальном Солнце макета СД с объективом Fujinon 2,7 mm f/1,8.

Макет СД устанавливался неподвижно, таким образом, чтобы Солнце во время своего суточного перемещения по небу проходило через наибольшую область кадра. На протяжении всего дня проводилась съёмка пар кадров с использованием функции «Чёрное Солнце» и без неё. Интервал между парами кадров составлял около 5 с.

В результате было получено ~2000 пар кадров, которые затем были обработаны в соответствии с алгоритмом, представленном выше. В процессе испытаний оценивалась равномерность движения Солнца по кадру от времени.

Для этого полученные в результате локализации координаты Солнца на матрице накладывались на график в зависимости от времени, затем этот график аппроксимировался полиномом 2-й степени для устранения дисторсии. Полученные отклонения координат от аппроксимирующих кривых характеризуют величину случайной погрешности точности измерения этим макетом координат Солнца.

В результате обработки кадров Солнце было локализовано на ~1600 из 2000 кадрах. На остальных кадрах Солнце было экранировано различными объектами на местности. Ошибочных локализаций не зафиксировано.

На *рис. 5* изображена зависимость координат X и Y Солнца на кадре от времени. На *рис. 6* показаны отклонения измеренных координат от аппроксимирующих кривых.

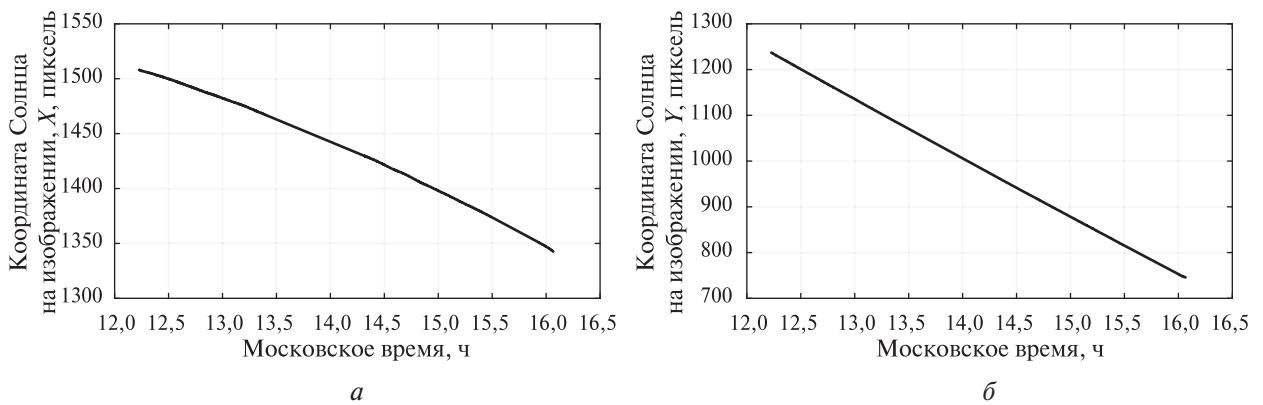


Рис. 5. Зависимость измеренных координат X (а) и Y (б) Солнца на изображении от времени

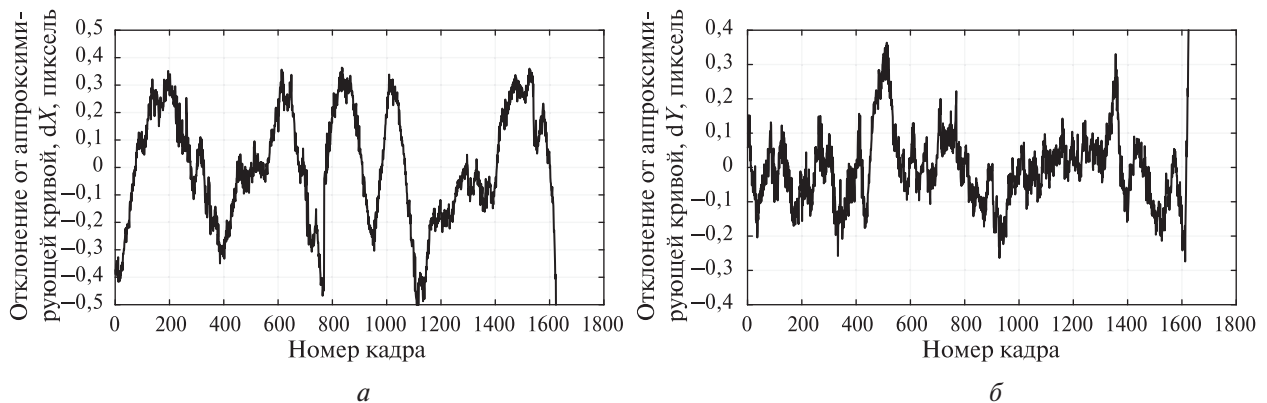


Рис. 6. Остаточные рассогласования после аппроксимации полиномом координат X (а) и Y (б)

На получившихся графиках остаточных рассогласований локализованных координат присутствуют низкочастотные колебания. Они могут быть вызваны как внешними факторами — изменением температуры окружающей среды или колебаниями основания, на котором стоит макет СД, так и внутренними — полинома 2-й степени недостаточно для устранения всей дисторсии камеры. Для определения реальной точности прибора необходимо устранить низкочастотную составляющую.

Полученные графики дополнительно обрабатывались оконным фильтром размером 13 элементов. Обработка оконным фильтром заключается в свёртке сигнала со строкой M длиной 13 элементов. При этом из центрального элемента исходного сигнала вычитается среднее значение его окружения. В результате все низкочастотные сигналы устраняются и остаются только сигналы с периодом, не превышающим 13 элементов, что во временном эквиваленте равняется 1 мин.

Получившиеся графики представлены на *рис. 7, 8*.

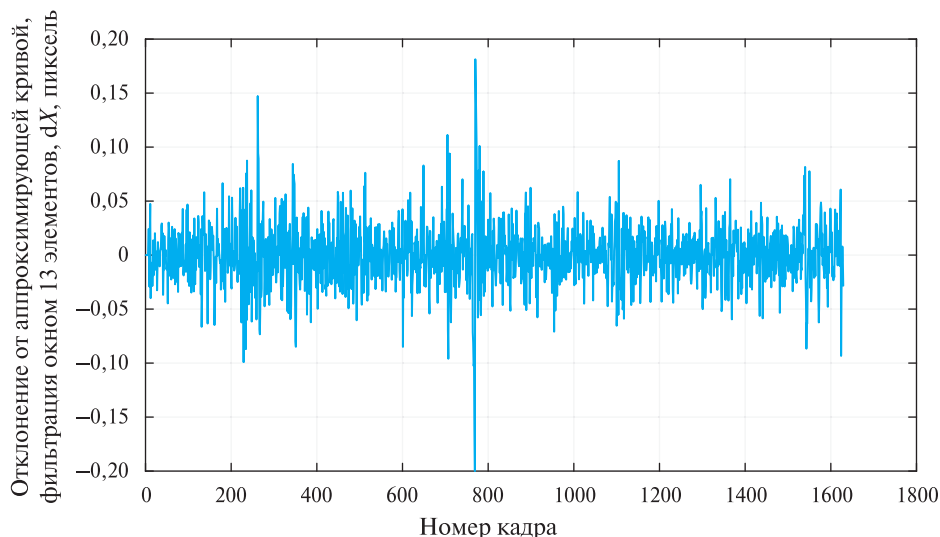


Рис. 7. Фильтрованный окном в 13 элементов график остаточных рассогласований координаты X

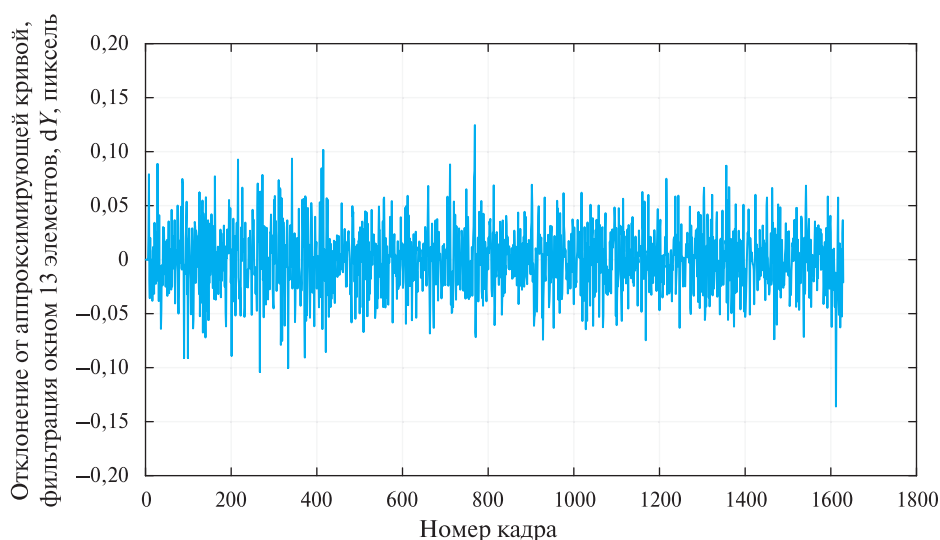


Рис. 8. Фильтрованный окном в 13 элементов график остаточных рассогласований координаты Y

После фильтрации все низкочастотные составляющие устранились. Оставшиеся отклонения соответствуют точности измерений координат самим макетом СД, что и стало целью данного эксперимента. Для численной оценки точности рассчитывается величина СКО полученных остаточных рассогласований.

Итоговые значения остаточных рассогласований приведены в *таблице*.

С учётом предварительной калибровки макета солнечного датчика остаточные рассогласования после фильтрации соответствуют точности прибора на уровне 10–12" СКО.

Остаточные рассогласования

Характеристика	СКО X, пиксели	СКО Y, пиксели
Отклонение от полинома 2-й степени	0,214	0,119
Отклонение после фильтрации	0,028	0,030

Заключение

Проведённые натурные испытания макета широкоугольного солнечного датчика на базе КМОП-матрицы показали возможность использования встроенной функции «Чёрное Солнце» для локализации ярких объектов. Разработанный алгоритм решает задачу поиска Солнца на кадре, обладает высокой защищённостью от ложного срабатывания и достаточной точностью для применения в датчике солнечной ориентации.

Литература

1. Аванесов Г. А., Зиман Я. Л., Зарецкая Е. В., Куделин М. И., Никитин А. В., Форш А. А. Оптический солнечный датчик: Особенности конструкции и испытательного оборудования // Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса, 22–25 сент. 2008. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 78–89.
2. Гладышев А. И., Жуков А. О., Захаров А. И., Москатиньев И. В., Прохоров М. Е., Сысоев В. К., Ширшаков А. Е., Юдин А. Д. К вопросу совершенствования высокоточных солнечных датчиков и возможных путей его решения // Вестн. ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина». 2017. № 4(38). С. 41–46.
3. Дроздова Т. Ю., Никитин А. В. Методика и результаты отработки программно-алгоритмического обеспечения оптических солнечных датчиков // Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса, 22–25 сент. 2008. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 409–420.
4. Дроздова Т. Ю., Катасонов И. Ю., Никитин А. В. Программно-алгоритмическое обеспечение оптического солнечного датчика // Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса, 22–25 сент. 2008. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 90–103.
5. Телевизионная съемка кометы Галлея / ред. Р. З. Сагдеев. М.: Наука, 1989. 295 с.
6. Holst G. Camera Tutorial — How to choose and use the right camera for a microscopy application — part 1. Yearly conf. series Focus on microscopy. 2014. 103 p. https://www.pco.de/fileadmin/user_upload/pco-knowledge_base/20140412_FOM_CameraTutorial_PCO_fin_pdf.pdf.

Development of an algorithm for operation of a wide-angle solar sensor based on a matrix photodetector

A. V. Svede-Shvets, S. A. Prokhorova, N. A. Stroilov, Ya. D. Elyashev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: arinka.sv@mail.ru

From the very beginning of the existence of spacecraft (SC), the direction to the Sun in the orientation systems of the SC has been used as the main one. Almost all satellites and interplanetary vehicles contain solar orientation sensors as part of navigation equipment. The Space Research Institute RAS (IKI RAS) has a large groundwork for the development and production of solar orientation sensors. The first developments made by IKI RAS in the 1970s were used as part of scientific instrumentation complexes. Early solar instruments had a very low accuracy of measurements, about 1°, no more was required at that time. The task of creating a much more accurate solar sensor appeared in the early

1990s for geostationary communication spacecraft, where there were rather strict requirements for positioning of transponder antennas. It was supposed to fulfill these requirements, mainly, with the help of stellar orientation sensors, but as the functional reserve onboard the spacecraft it was planned to use the solar sensor in pair with the terrestrial horizon sensor. Accordingly, the requirements for the accuracy of measuring the Sun's position to 1' in the instrument's field of view of $60 \times 120^\circ$ have increased. Currently IKI RAS produces and supplies to the domestic space industry optical solar sensors (OSS and OSS-M) based on the CCD-line and coding mask. But in the near future the nomenclature of solar orientation sensors created in IKI RAS may be supplemented by a new device based on matrix photodetector and wide-angle lens. The article discusses the use of a built-in CMOS-matrix function called "Black Sun". A description of an algorithm, which was developed taking into account the peculiarities of using the built-in function "Black Sun", is given and the possibility of implementing the algorithm for building a wide-angle matrix solar sensor is considered and confirmed by field tests.

Keywords: solar sensor, matrix photodetector, image processing algorithm

Accepted: 04.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-60-68

References

1. Avanesov G. A., Ziman Ya. L., Zaretskaya E. V., Kudelin M. I., Nikitin A. V., Forsh A. A., Optical solar sensor. Features of design and test equipment, *Vserossyiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Proc., Tarusa, 22–25 Sept., 2008, Moscow: IKI RAS, 2009, pp. 78–89 (in Russian).
2. Gladyshev A. I., Zhukov A. O., Zakharov A. I., Moskatiniyev I. V., Prokhorov M. E., Sysoev V. K., Shirshakov A. E., Yudin A. D., The question of upgrade of high-precision solar sensors and practicable solution, *Vestnik FGUP "NPO im. S. A. Lavochkina"*, 2017, No. 4(38), pp. 41–46 (in Russian).
3. Drozdova T. Yu., Nikitin A. V., Methodology and results of development of software and algorithmic support for optical solar sensors, *Vserossyiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Proc., Tarusa, 22–25 Sept., 2008, Moscow: IKI RAS, 2009, pp. 409–420 (in Russian).
4. Drozdova T. Yu., Katasonov I. Yu., Nikitin A. V., Software and algorithmic support of the optical solar sensor, *Vserossyiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Proc., Tarusa, 22–25 Sept., 2008, Moscow: IKI RAS, 2009, pp. 90–103 (in Russian).
5. *Televizionnaya s'emka komety Galleya* (TV footage of Halley's Comet), R. Z. Sagdeev (ed.), Moscow: Nauka, 1989, 295 p. (in Russian).
6. Holst G., *Camera Tutorial — How to choose and use the right camera for a microscopy application — part 1*, Yearly conf. series Focus on microscopy, 2014, 103 p., https://www.pco.de/fileadmin/user_upload/pco-knowledge_base/20140412_FOM_CameraTutorial_PCO_fin_pdf.pdf.