

ДАТЧИК СОЛНЕЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ДЛЯ МИКРОСПУТНИКА

Михаил Владов¹, Даниил Украинцев², Румен Недков³

¹ComTechPro-София, България

e-mail: vladov@komtechpro.com

²COMELPRO- Кишинев, Молдова

e-mail: office@comelpro.com

³Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките

e-mail: rnedkov@space.bas.bg

Ключевые слова: микроспутник, датчик солнечной ориентации, углы направления на Солнце

Резюме: Датчик солнечной ориентации (ДСО) предназначен для определения направления на центр видимого диска Солнца в приборной системе координат. В датчике солнечной ориентации в качестве приемника излучения используется ПЗС-линейка. Каждый элемент с зарядовой связью преобразует излучение Солнца в аналоговый сигнал. Цифровая обработка элементов ПЗС-линейки позволяет определять искомое направление. По принципу построения такой датчик можно отнести к датчикам с кодирующей маской и имеет достаточно высокую точность — среднеквадратическое отклонение погрешности определения направления на Солнце составляет 3-4 угловых минуты.

SOLAR ORIENTATION SENSOR FOR MICROSATELLITES

Mihail Vladov¹, Daniil Ukrainev², Roumen Nedkov³

¹ComTechPro-Sofia, Bulgaria

e-mail: vladov@komtechpro.com

²COMELPRO- Kishinev, Moldova

e-mail: office@comelpro.com

³Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

e-mail: rnedkov@space.bas.bg

Key words : microsattelites, solar orientation sensor, angles to the direction of the Sun

Abstract: Solar orientation sensor (VSS) is designed to determine direction towards the center of the visible solar disk in the device coordinate system. The sensor solar orientation as a radiation detector using a linear CCD array. Each element CCD converts solar radiation into an analog signal. Digital processing element CCD array allows you to define the desired direction. by the principle of construction of such a sensor can be attributed to the sensors to a coding mask and has sufficiently high accuracy - the standard deviation of error determine the direction of the sun angle is 3-4 minutes.

1. Введение

Солнце является основным навигационным ориентиром, а поэтому все спутники обязательно оснащаются приборами, получившими название солнечных датчиков (СД) или еще их называют датчиками солнечной ориентации. Первые упоминания о приборах ориентации по Солнцу в истории космонавтики относятся к первым запускам искусственных спутников Земли. Эти оптико-электронные приборы служат для поиска Солнца и формирования электрических сигналов, пропорциональных направлению на энергетический центр диска Солнца в связанной со спутником системе координат. Эти сигналы используются, затем бортовой системой управления либо для разворота спутника в процессе обеспечения его требуемой угловой ориентации на Солнце (например, для ориентации жестко закрепленных на корпусе спутника солнечных батарей или антенны радиопередатчика), либо для последующего расчета места положения спутника в пространстве. В первом случае прибор называется датчиком угловой

ориентации спутника, а во втором – датчиком углового положения Солнца. Оба типа приборов делятся еще на грубые и точные датчики [1].

Принято считать, что грубые - это датчики, с погрешностью более 5°, умеренной точности, с погрешностью от 0,5 до 5° и точные, с погрешностью менее 30 угл.мин.

Разработано множество вариантов схемотехнического исполнения СД, обеспечивающих как грубое, так и точное измерение направления на Солнце, использующих как статичные, так и подвижные элементы. Учитывая современные тенденции развития исследований Земли из космоса, включая и задачи дистанционного зондирования Земли, можно отметить что, все большее значение принимает концепция использования малых и наноспутников. Это заключение в первую очередь связано с успехами в создании высокоинтегрированной элементной базы с малыми массогабаритными показателями и энергопотреблением, которые открывают новые возможности, как для известных космических фирм, так и для многих академических вузов. Возможности по созданию малых космических аппаратов позволяющим решать сложные задачи по мониторингу околоземного пространства для различных ведомств.

Поэтому массогабаритные требования, предъявляемые к служебным системам, в том числе приборам астронавигации, становятся ключевыми при разработке таких устройств.

Особенно это характерно для аппаратуры наноспутников, микроспутников и малых аппаратов с собственной массой порядка десятков килограммов. Применение в таких спутниках традиционных высокоточных систем ориентации массой в килограмм и более становится проблематичным. Установка нескольких малогабаритных датчиков на космический аппарат снимает много проблем с режима управления и увеличивает надежность всего космического аппарата.

Во многих странах, которые имели неплохие позиции в развитии космических исследований в недавнем прошлом, сегодня имеют крайне ограниченное финансирование, которое приводит к серьезному отставанию в научных космических исследованиях в настоящее время и угрожает потерей данной отрасли вообще. Как восстановить этот паритет, не имея эквивалентного финансирования и научно-технического потенциала? Решение этой задачи при имеющихся ресурсах не позволит сравнительно в короткий срок снять эту проблему. Современные спутники имеют массу от сотен килограммов до нескольких тонн. Стоимость каждого составляет десятки и сотни миллионов долларов. Решение задачи возможно при создании недорогих малогабаритных спутников, наноспутников, имеющих массу до нескольких десятков килограммов при стоимости в 30...100 раз ниже стоимости современных спутников, но обеспечивающих такие же характеристики, что и современные космические аппараты.

Данная статья представляет собой результаты работы по созданию миниатюрного датчика солнечной ориентации, который предназначен для установки на микро- и наноспутники.

Работа базируется на исследованиях изложенных в [2] из Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, в котором в качестве приемника излучения используется ПЗС-линейка. К достоинствам этого выбора следует отнести высокие точностные характеристики и широкий угол поля зрения при относительной простоте аппаратных средств.

2. Современное состояние

На мировом рынке космического приборостроения, представлен широкий спектр приборов ориентации по Солнцу, где можно найти пример реализации солнечного датчика, относящегося к одному или нескольким из приведенных типов. Например, к датчикам грубой ориентации можно отнести солнечный датчик производства американской компании One Stop Satellite Solution (OSSS). Точность прибора составляет 10°. При этом прибор имеет сферическое поле зрения. Широкий спектр приборов ориентации по Солнцу представлен на зарубежном рынке компаниями: Ball Aerospace (США), Galileo Avionica (Италия), Draper Laboratory (США), Goodrich (США), Jena-Optronik (Германия), TNO-TPD (Нидерланды) и Sodern (Франция). Этими фирмами разработаны приборы ориентации по Солнцу различного назначения, относящиеся к каждому из приведенных классов точности.

Российский рынок приборов ориентации по Солнцу представляют оптические солнечные датчики (ОСД), разработанные и изготовленные ИКИ РАН, блоки определения координат Солнца (БОКС) производства ФГУП НПП «ОПТЭКС», а также приборы ориентации по Солнцу других российских производителей: предприятия «Геофизика – Космос» (г. Москва) и «Лэптон» (г. Зеленоград).

Направление на Солнце, как опорное, 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. Изначально

такие датчики статического типа представляли собой набор из простых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), размещенных на куполе, и давали возможность прибору ориентации на Солнце (ПОС) видеть едва ли не во всех направлениях одновременно, так называемая фасетка [3]. Базовым элементом любого фасеточного датчика солнечной ориентации является пара ФЭП планарного типа, которые размещены по бокам равнобочной трапеции под одинаковым наклоном к базовой плоскости симметрично друг другу. Угол поля зрения и точность определения направления на Солнце существенно зависели от количества и типа ФЭП. К преимуществам датчиков фасеточной конструкции можно отнести очень малые массу и энергопотребление; одновременный анализ результатов измерений и автономный контроль функционирования; отсутствие принципиальных ограничений по реализации двухкоординатных широкоугольных и автономных ПОС. Перспективность использования таких датчиков показана в [4].

Начиная с 1970 г., несмотря на усложнение конструкции ПОС, широкое применение получают системы «проекторного» типа, использующие ограничение светового потока диафрагмами разного вида [1, 5]. Отличительными особенностями нового поколения приборов солнечной ориентации можно назвать широкое внедрение последних достижений микроэлектроники и вычислительной техники:

- микропроцессоров, других ИМС большой степени интеграции, многоэлементных приемников - матрицы и линейки ПЗС;
- широкое использование в приборах программных методов обработки информации.

Благодаря реализации перечисленных технических решений и мероприятий приборы нового поколения в сравнении с предшествующими обладают в несколько раз лучшими показателями по таким основным характеристикам как точность, масса, срок службы.

Также следует отметить, что в последнее время использование системы глобального позиционирования (GPS) для низкоорбитальных спутников [6], позволяет дать чрезвычайно высокую точность в определении координат спутника.

3. Принцип работы

Принципы работы солнечного датчика с ПЗС-линейкой подробно описаны в статье [2]

Кратко изложим основные моменты. Каждый элемент с зарядовой связью преобразует излучение Солнца в аналоговый сигнал. Цифровая обработка элементов ПЗС-линейки позволяет определять искомое направление.

По принципу построения такой датчик можно отнести к датчикам с кодирующей маской. Датчик солнечной ориентации сочетает в себе преимущества датчиков точной ориентации — минутную точность и датчиков грубой ориентации — широкое поле зрения. Оптический солнечный датчик включает следующие составные части: оптический элемент, ПЗС-линейку, аналого-цифровой преобразователь, сигнальный процессор, устройство интерфейса и источник вторичного электропитания. Принцип работы прибора проще изложить, опираясь на модель датчика с кодирующей маской, состоящей из трех щелей. В оптическом элементе имеются три щели, расположение которых показано на рис. 1, при этом крайние щели образуют с центральной щелью угол 45° . Поверхность оптического элемента и центральная щель задают внутреннюю систему координат солнечного датчика. Солнечное излучение, проходя через оптический элемент, формирует изображение трех щелей на чувствительной поверхности ПЗС-линейки.

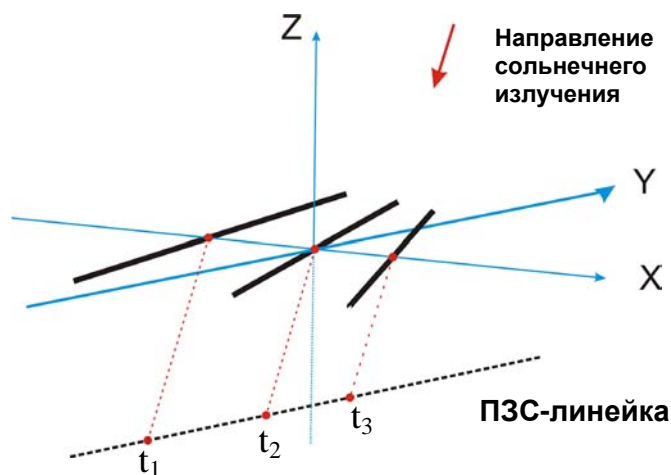


Рис. 1. Расположение щелей в оптическом элементе

По положению центральной группы щелей на ПЗС-линейке относительно центрального пиксела линейки можно определить угол Солнца в плоскости OZX (рис. 2), по расположению изображений крайних щелей относительно изображения центральной щели можно определить угол Солнца в плоскости OZY.

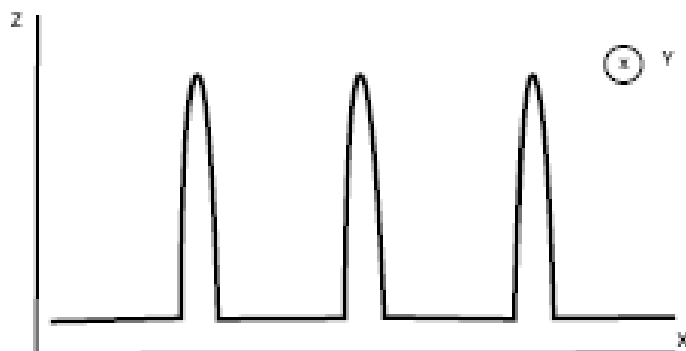


Рис. 2. Изображение щелей на ПЗС-линейке

Оптический солнечный датчик с использованием ПЗС-линейки и кодирующей маски обладает высокими точностными характеристиками и широким углом поля зрения при относительной простоте аппаратных средств. Два угла направления на Солнце ε_x и ε_y рассчитываются по следующим формулам:

$$(1) \quad \varepsilon_x = \arctg \frac{t_2}{f}; \quad \varepsilon_y = \arctg \frac{(t_1 + t_3) - 2t_2}{2f}$$

где f — расстояние от кодирующей маски до ПЗС-линейки;
 t_1, t_2, t_3 — абсцисса центров изображения щелей.

В принципе, для определения направления на Солнце достаточно изображений щелей одной крайней и центральной группы, но для увеличения угла поля зрения используют три щели. Далее изображение с ПЗС-линейки квантуется с помощью АЦП и записывается в память сигнального процессора. Процессор вычисляет направления на Солнце и передает полученную информацию в бортовой вычислительный комплекс спутника.

Объектами, влияющими на работоспособность ОСД при эксплуатации на борту космического аппарата (КА), являются частицы, подсвеченные Солнцем и протоны, образованные при солнечной вспышке на Солнце. Эти объекты могут привести либо к значительным погрешностям в определении углового положения Солнца, либо к потере ориентации. Для повышения помехозащищенности прибора используется троирование щелей, как показано на рис. 3.

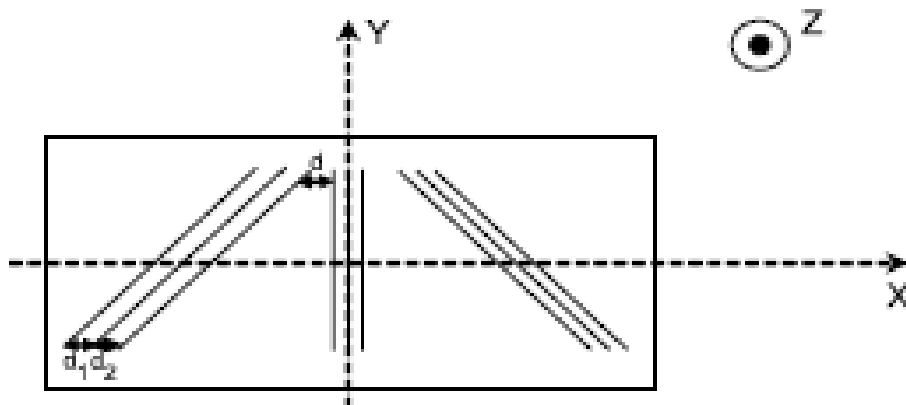


Рис. 3. Расположение щелей девятищелевого датчика: d — минимальное расстояние между группами щелей; d_1 — расстояние между левой и центральной щелями в группе; d_2 — расстояние между центральной и правой щелями в группе

4. Описание работы ДСО

Блок схема датчика солнечной ориентации представлена на рисунке 4.

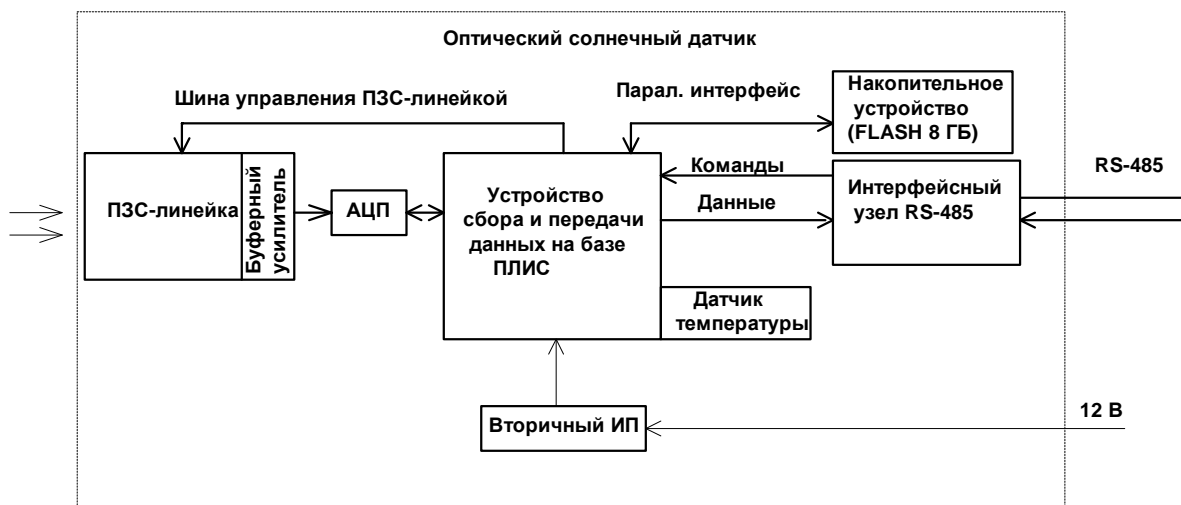


Рис. 4. Блок-схема оптического солнечного датчика

Основными составными частями ДСО являются:

- ПЗС-линейка;
- АЦП;
- Устройство сбора и передачи данных на базе ПЛИС;
- Накопительное устройство на базе ФЛЭШ
- Интерфейсный узел RS-422/RS-485;
- Вторичный источник питания;
- Датчик температуры.

Сопряжение с подсистемой управления спутника осуществляется через интерфейс RS-422/RS-485. Питающее напряжение на входе ДСО – 12 В. Реализованный в схеме оптического датчика вторичный источник формирует требуемые питающие напряжения: 5 В, 3,3 В, 1,5 В. В качестве ПЗС линейки выбрана KLI-2113. Линейные датчики ПЗС компании Kodak обладают высокой разрешающей способностью, широким динамическим диапазоном, высокой чувствительностью и минимальным темновым током. ПЛИС устройства сбора и передачи данных обеспечивает формирование сигналов управления и синхронизации KLI-2113. Результаты сбора данных могут накапливаться в накопительном устройстве для последующей обработки и передачи системе управления. Интерфейс сопряжения с системой управления реализуется на базе интерфейса RS-485 (микросхемы AD1485). Преобразование сигналов с каждого из каналов линейки осуществляется с помощью АЦП. Преобразование сигналов с каждого из каналов линейки осуществляется с помощью АЦП AD7276BRM ANALOG DEVICES. Данная микросхема АЦП осуществляет преобразование с частотой до 3 Мвыборок /с. Разрядность – 12 бит. Накопительное устройство реализовано с помощью микросхем FLASH памяти K9WAG08U1M SAMSUNG (2К Гбайт). Угол обзора ДСО составляет 60°x120°. Разработанная схема модуля управления ДСО обеспечивает возможность подключения одновременно 2-х трехканальных ПЗС-линейек, что позволяет реализовать ДСО с двумя головками и соответствующим расширением угла обзора до 120°x120°. На рисунках 5 и 6 показаны фотографии макета датчика солнечной ориентации в сборе и в разобранном виде.



Рис. 5. Фото макета ДСО в сборе



Рис. 6. Фото макета ДСО разобранном виде

Проект для ПЛИС (EP1С6Т144 I7-6 ALTERA) реализован на базе Программы OrCad и включает в себя следующие составные части:

- Схема формирования сигналов управления и синхронизации сбора данных и сопряжения с АЦП;
- Схема сопряжения с накопителем данных;
- Схема сопряжения с подсистемой управления;
- Схема сбора телеметрии.

Схема телеметрии обеспечивает сопряжение с многоканальным АЦП (микросхема AD7812YRU), преобразующим в цифровую форму сигналов от контролируемых источников напряжения: 12 В; 5 В; 3,3 В; 1,5 В. Для сопряжения с АЦП используется SPI-интерфейс.

В качестве датчика температуры используется микросхема LM73С1МК-0 NATIONAL SEMICONDUCTOR. Датчик температуры используется для контроля температурного режима линейки. Допустимый диапазон ее функционирования от -20°С до +80°С.

В случае несоответствия текущего температурного режима линейки допустимому диапазону осуществляется отключение питания датчика.

Кроме того показания датчика температуры используются для осуществления температурной коррекции результатов измерений, проводимых с помощью линейки с целью обеспечения повышения их точности.

5. Результаты экспериментальных работ с ДСО

Имитатор солнца размещается под различными углами по отношению к солнечному датчику в плоскости ХОZ с помощью поворотного устройства (углы $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$). В каждом варианте осуществляется запись информационного потока от ДСО через интерфейс RS-485 и Ethernet в ПК. В результате обработки с помощью ПО формируется файл графического изображения, на которых можно просмотреть изображение кластеров, полученных с ДСО. Пример графического изображения сигнала показан на рис.7.

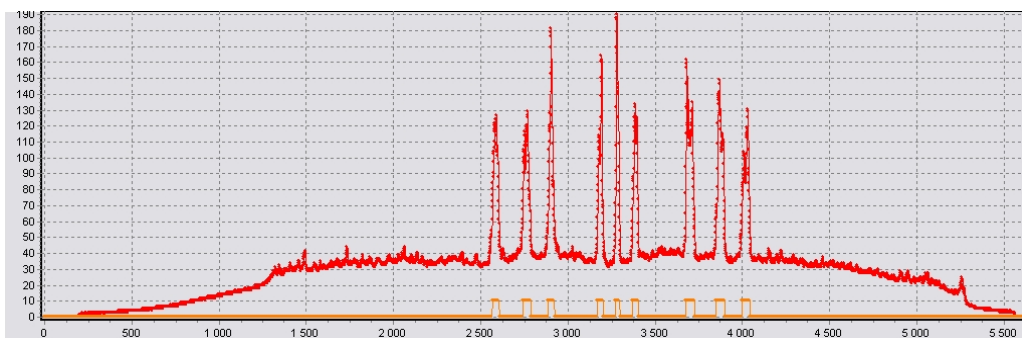


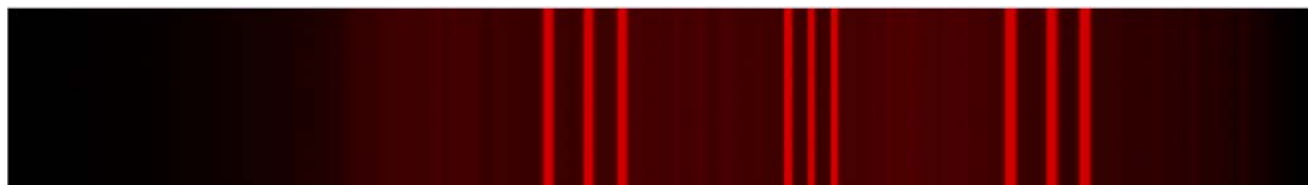
Рис. 7. Пример графического изображения сигнала зарегистрированного с помощью ПЗС-линейки

На втором этапе экспериментальных работ с помощью перемещения источника излучения в плоскости XOY осуществляется проверка работы ДСО при излучении под углами (0° , $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$, 30°). Далее аналогично с первым этапом осуществляется запись ИИ и ее обработка с помощью ПК. Сначала с помощью ПО для ДЗЗ, а затем, с помощью ПО для ОСД непосредственно.

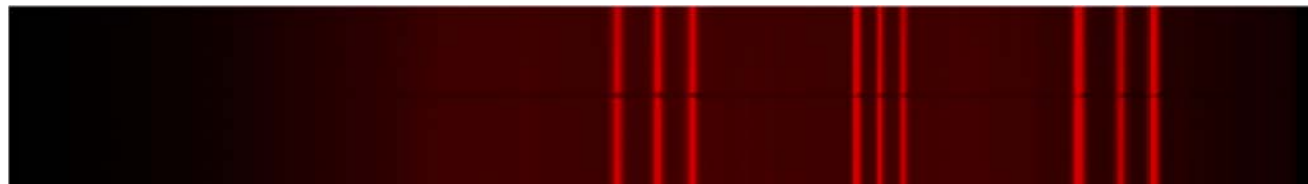
С помощью программного обеспечения (ПО), разработанного специально для ОСД, производится оценка угла расположения источника излучения в плоскости XOZ и формируется табличный протокол. Дополнительно регистрируются графические изображения сигналов, зафиксированных датчиком ОСД, а также изображения кластеров пикселей ПЗС-линейки в зависимости от интенсивности и угла освещения. На рис. 8 представлены изображения щелей, полученные в результате изменения угла освещения датчика ДСО в плоскости XOY (перемещение источника излучения вдоль оси Y). Наблюдается смещение изображений кластеров освещенных пикселей относительно центра датчика.



0°



$+30^\circ$



$+45^\circ$



$+60^\circ$

Рис. 8. Изображение щелей при изменении угла освещения в плоскости XOZ

В ходе проведенных экспериментальных работ, получены значения абсолютной погрешности порядка 15-20 угловых минут. Для дальнейшего улучшения точности измерения, позволяющего измерить среднеквадратическое отклонение погрешности определения направления на Солнце в 3-4 угловых минуты необходимо совершенствование рабочего места.

Выводы:

1. Проведенные экспериментальные исследования ДСО подтвердили возможность измерения углов ориентации по отношению к солнцу с использованием системы на базе одной ПЗС-линейки с достаточно высокой точностью. Прослеживается четкая зависимость изменения

размещения принимаемого сигнала в плоскостях XOZ и XOY в зависимости от угла поступления оптического сигнала.

2. Точность проводимых измерений решающим образом зависит от точности геометрической установки ПЗС-линейки, относительно оптической головки (щелевой маски). Наблюдающие в результатах проведенных экспериментов погрешности, как правило, вызваны недостаточной точностью установки углов для источника размещения и ДСО, обеспечиваемой используемыми на стенде техническими средствами.

3. Для обеспечения правильной обработки оптического сигнала должны быть учтены результаты энергетического расчета системы излучатель (солнце) – приемник (ПЗС-линейка). Слишком мощный оптический сигнал засвечивает изображение. Слишком слабый сигнал сложно корректно зарегистрировать и обработать. Для проведения измерений в области углов более 50° необходимы специальные алгоритмические решения.

4. Необходимо дополнительно выработать алгоритмические решения в части обеспечения надежности проведения измерений, для чего использовать:

- избыточность многощелевой системы, наличие информации от нескольких линеек;
- информацию о предварительной (менее точной) ориентации, например с помощью магнитной системы или от предшествующих этапов ориентации с помощью ДСО для выбора оптимального режима регистрации измерительной информации;
- результаты предварительного анализа измерительной информации для выбора оптимального режима обработки (величину порога по амплитуде сигнала и по ширине кластера).

Литература:

1. Чермухин, Г. С. Приборы ориентации на Солнце. М.: Техпромиздат, 1998.
2. Дроздова, Т. Ю., И. Ю. Катасонов, А. В. Никитин. Программно- алгоритмическое обеспечение оптического солнечного датчика// Сборник трудов первой Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов», Таруса, 2008. М. ИКИ РАН, 2009. с. 90-103.
3. Глиберман, А. Я., Бурмистров, Л. В. Использование кремниевых фотопреобразователей в солнечных датчиках ориентации // Гелеотехника. 1973. № 3. С. 7–15.
4. Котцов, В. А., Глазков В. Д. Солнечный датчик с интеллектуальными способностями // Космическое приборостроение. Координатно-временные системы с использованием космических технологий. Приборы для космических исследований планет и Земли: Сб. тр. по результатам выездного семинара / Под ред. Р.Р. Назирова, Таруса, 2006. М.: ИКИ РАН, 2007. С. 114–119.
5. Витриченко, Э. И., Щербаков В. В. Солнечный датчик. А. с. 1779932 СССР G 01 C 21/24. Бюл. изобретений. № 45. 1992.
6. Rossell, G. L., J. Vostel, B. Mazari, "Star recognition algorithm for APS start tracker", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine Vol.20, Issue 2, pp. 27-31, February 2005.