**Звёздный датчик ASC-DTU-PRP-3000 (micro-ASC)  
разработки Национального космического института Дании   
при Техническом университете Дании.**

**Общее описание и конфигурация**

Прибор micro-ASC является новейшей модификацией прибора ASC (Advanced Stellar Compass) и представляет собой полностью автономный звёздный датчик (star tracker).

Датчик состоит из блока обработки данных (DPU – data processing unit) и камер (CHU – camera head unit). К блоку обработки данных можно подключить от 1 до 4 камер, в зависимости от потребностей миссии. Дополнительные камеры могут использоваться для повышения точности измерений и для сохранения возможности определения угловых координат при попадании солнца в одну из камер. Камеры снабжаются экранами (baffles) для предотвращения боковой засветки яркими небесными телами – внутренним и внешним.

Возможна установка двойного блока обработки данных для повышения надёжности. При этом, одна из половин двойного блока может просто резервировать вторую, но также их совместное использование может повысить точность и быстродействие при сложных манёврах по изменению углового положения. Также наличие двойного блока обработки данных позволяет гибко изменять конфигурацию датчика в целом в процессе полёта в зависимости от задачи, решаемой на конкретном этапе полёта (максимальная точность, максимальное быстродействие, минимальный расход энергии).

Предусмотрена радиационная защита, обеспечивающая работоспособность датчика на низких, средних и геостационарных орбитах, а также при межпланетных полётах, с учётом возможных солнечных вспышек. Для полётов, фазы которых предусматривают длительное пребывание в радиационных поясах Земли, предусмотрена возможность установки дополнительной радиационной защиты.

Максимальная частота обновления изображений, обрабатываемых блоком обработки данных – 32 снимка в секунду от каждой из подключенных камер (от одной до четырёх камер). По желанию, пользователь может уменьшить частоту.

Прибор ASC приобретался для 20 проектов в общем количестве 26 блоков обработки данных и 33 камер. Все основные космические агентства (ESA, CNES, NASA, DLR, JAXA) использовали прибор в своих проектах.

**Габариты**

камера 50х50х57,5 мм

блок обработки данных

- одинарный 100х75х41,2 мм

- двойной 124х100х41,5 мм

- габариты внутреннего и внешнего экранов (baffles) зависят от требований по эксплуатации.

**Масса**

камера (CHU) 260 г, включая радиационную защиту, без крепления.

блок обработки данных

- одинарный 310 г, включая радиационную защиту

- двойной 570 г, включая радиационную защиту

- внутренний экран (inner baffle) – зависит от требований, обычно 65 г

- внешний экран (outer baffle) – зависит от требований, обычно 400 г

- крепление 80 г/м

- разъемы 6 г/камеру

- кинематическое крепление 12 г

**Напряжение питания**. Блок обработки данных питается нерегулируемым напряжением от 17 до 60 вольт, предусмотрена защита от неправильной полярности и от перегрузки по току. Камеры получают питание от блока обработки данных.

**Потребляемая мощность.** Номинальная мощность одной камеры – 0,5 Вт, номинальная мощность блока обработки данных – 3,6 Вт. Пиковая мощность при четырёх камерах – до 6,2 Вт.

**Чувствительный элемент камеры** – ПЗС.

**Принцип действия.**

Камеры связываются с блоком обработки данных плетёными жгутами, что позволяет устанавливать камеры в желаемом месте космического аппарата. При необходимости, длина жгута может превышать 20 метров. Благодаря этому, даже на большом космическом аппарате камеры можно устанавливать ближе к тем приборам, для которых нужна максимальная точность определения углового положения.

Когда блок обработки данных получает изображение с камеры, он вычисляет общее направление оси визирования камеры и углы поворота камеры относительно этого направления. Совместно эти координаты определяют угловое положение камеры, которое затем пересчитывается для системы координат, выбранной пользователем для своего космического аппарата. Результат определения углового положения выводится в форме кватерниона.

Камера состоит из мощной оптической системы, чувствительного элемента с сопутствующей электроникой, опорной конструкции и радиационной защиты.

Конструкция камеры такова, что производство, поглощение и излучение тепловой энергии сбалансировано, и для большинства миссий нет потребности в установке дополнительных нагревающих/охлаждающих элементов.

Конструкция этой камеры использовалась, в том числе, на лунной экспедиции ESA SMART-1 и доказала свою надёжность как в плане радиационной устойчивости, так и в плане стабильности теплового баланса. Она обеспечивала определение угловых координат даже при прохождении радиационных поясов Земли во время самых сильных солнечных бурь.

**Программное обеспечение**

Хранится в ПЗУ, при запуске загружается в ОЗУ. Состоит из базовой операционной системы и модульного прикладного программного обеспечения с высокой степенью независимости модулей и чётко прописанным интерфейсом между ними. Это позволяет при необходимости менять каждый из модулей независимо от других.

Помимо выдачи результатов измерений, ПО может принимать 20-байтовые управляющие кадры, что позволяет изменять как режимы, так и настройку режимов работы датчика в процессе полёта.

Предусмотрены механизмы защиты программного обеспечения при возможной потере работоспособности вследствие изменения значения битов памяти космической радиацией. Они обнаруживают зацикливание или зависание программного обеспечения в результате изменения одного или нескольких битов памяти.

Страж (watchdog) – это аппаратно-программное устройство низкого уровня. Оно содержит в себе счётчик перезагрузки, который сбрасывается операционной системой по прерываниям от системного таймера. Если в результате сбоя операционная система перестаёт вырабатывать сигналы сброса счётчика стража, он запускает перезагрузку блока обработки данных.

Полицейская программа – это программа прикладного уровня. Она также ведёт отсчёт времени после последнего сброса по прерыванию от таймера, и также инициирует перезагрузку всего устройства, если время ожидания сигнала сброса превышено.

Совместно эти два компонента обеспечивают полную защиту от вхождения процессора в бесконечный цикл и от нарушений работы подсистемы прерываний.

Программа "промывки битов" выполняется в фоновом режиме параллельно с измерениями. Она читает ячейки оперативной памяти, выделенные под размещение программ, и сравнивает их значение со значением в постоянной памяти. При обнаружении несоответствия ошибка исправляется.

Программы, хранящиеся в FLASH-памяти, закодированы кодом с возможностью обнаружения и исправления одной ошибки и обнаружения двух ошибок без возможности исправления на каждые 16 битов памяти. Специальная программа периодически проверяет FLASH-память на наличие таких ошибок и исправляет их при обнаружении. Следует отметить, что на данный момент не был зафиксирован ни один случай изменения отдельного бита FLASH-памяти в космическом полёте.

Центральный процессор датчика работает в защищённом режиме. Каждому компоненту программы выделено определённое место в памяти, и его обращение к памяти, выделенной другим компонентам, вызывает аппаратное прерывание. Это позволяет обнаруживать и блокировать последствия случайных изменений битов памяти, не зафиксированных другими механизмами защиты.

**Режимы работы**

Режимы работы можно переключать управляющими пакетами данных в процессе полёта.

**Безопасный режим**, он же режим загрузки ядра. Проверяет аппаратуру, загружает ядро ОС, заданные компоненты ОС и прикладных программ.

**Дежурный режим**. В этом режиме датчик не определяет угловое положение. Этот режим можно использовать для скачивания изображений и содержимого памяти датчика на максимальной скорости.

**Режим углового положения.** В этот режим можно перейти из дежурного режима, и датчик начнёт выдавать угловое положение через секунду после получения команды перехода в этот режим. При включении датчика, он автоматически входит в этот режим в течение пяти секунд.

**Моделирующий режим.** Используется для наземного тестирования датчика и отработки его взаимодействия с бортовой аппаратурой.

**Режим тестового изображения.** В этом режиме изображение снимается с камеры, но замещается изображением, выбранным из специально отведенного места в FLASH-памяти.

**Обучающий имитатор.** Этот режим используется только для проверки датчика и отработки его взаимодействия с остальной аппаратурой. Для его реализации используются три коллиматора, каждый из которых проецирует изображение трёх ярких звёзд на линзу датчика.

**Свойства**

Датчик полностью автономен и не требует операций по его обслуживанию в полёте. После его включения, он автоматически входит в режим углового положения за 5 секунд. Изображения, снимаемые камерами датчика, могут быть получены из датчика и переданы на Землю либо в битовом несжатом формате, либо в формате jpeg. Съём изображений может выполняться в фоновом режиме при работе датчика в режиме углового положения, либо в основном режиме при работе датчика в дежурном режиме.

Также предусмотрен режим передачи фрагментов изображения в окрестностях звёзд и незвёздных объектов (планет, астероидов, искусственных спутников) и режим передачи только изображений незвёздных объектов. При этом объем передаваемого изображения резко уменьшается за счет высокой степени сжатия.

В датчике предусмотрена коррекция годовой аберрации, состоящей в том, что видимое положение звёзд на небе зависит от положения Земли на её орбите вокруг Солнца. Для такой коррекции датчику нужно сообщить текущую дату. Если эта коррекция не активирована, максимальная погрешность из-за этой аберрации не превышает 20 угл. секунд.

Предусмотрена коррекция орбитальной аберрации, вызванная различным положением спутника на околоземной орбите. Для её использования датчику нужно сообщить дату, время, положение спутника на орбите и его скорость. Без этой коррекции, погрешность из-за этой аберрации не превышает 5 углов. секунд.

Также предусмотрена коррекция прецессии и нутации Земли, если датчик должен выдавать угловое положение в координатах, связанных с Землёй. Для активирования этих коррекций датчику достаточно сообщить дату.

Стандартно датчик выдаёт координаты углового положения осей своей собственной системы координат. При необходимости, в датчик можно ввести поправки, чтобы он выдавал угловые положения осей координат спутника.

В датчике предусмотрена защита от повреждения камер при засветке их Солнцем. Даже длительная засветка не нарушает работоспособность камеры, и она нормально работает после окончания засветки. Следует учитывать, что когда Солнце находится в поле зрения камеры или рядом с ним, камера не может использоваться для определения углового положения. При засветке Солнцем на протяжении более суток, для восстановления работоспособности камеры может потребоваться время для охлаждения её чувствительного элемента. При более короткой засветке в большинстве случаев камера восстанавливает работоспособность в пределах 0,5-1 секунды после прекращения засветки.

При попадании незвёздных объектов в поле зрения камеры, они автоматически фильтруются и не влияют на определение углового положения. Однако, крупные яркие объекты (Земля, Луна, другие планеты и естественные спутники с близкого расстояния) могут вызывать её засветку. Луна вызывает засветку камеры, если её фаза превышает 75%, и если она находится на расстоянии до 7 градусов от оптической оси камеры. Дневная сторона Земли также вызывает засветку. Свечение атмосферы Земли на ночной стороне не вызывает засветку.

По умолчанию датчик настроен на определение звёзд с яркостью до звёздной величины 6,5 (m v 6,5). По желанию, пользователь может настроить чувствительность в диапазоне от 3 до 7 звёздной величины.

**Точность**

Определение понятия "точность определения углового положения звездного датчика" зависит от того, для чего используются данные этого датчика и от того, на какой участок неба он направлен.

Погрешности определения углового положения вносятся высокочастотными и низкочастотными шумами, а также систематическими погрешностями. К высокочастотным шумам относятся фотонные шумы, шумы считывания изображения и другие. Они слабо коррелированы, и их совместное влияние проявляется в шуме определения углового положения от считывания до считывания. Величина этого шума определяется как угол эквивалента шума (noise equivalent angle, NEA) – разброс определений углового положения при фактически неизменном угловом положении датчика, и это случайный шум.

Низкочастотные шумы обусловлены факторами, которые меняются очень медленно, например, как накопление результата влияния радиации. Такие шумы можно рассматривать как систематическую погрешность измерения. Систематические погрешности могут быть вызваны погрешностью установки датчика, а также изменением углов его установки на аппарате, измеренных на Земле, после выхода на орбиту и исчезновения напряжений в конструкции, обусловленной силой тяжести.

Определение NEA на Земле затруднено влиянием атмосферы (пыль, дымка, конвекционные потоки). Замеры при благоприятных атмосферных условиях показывали NEA в пределах 1,9 угл. секунды вблизи оптической оси и не более 19 угл.с. на периферии поля зрения, как для низких, так и для высоких галактических широт.

Также погрешность вносится изменением углового положения спутника, вызванным его движением по орбите по причине того, что проходит некоторое время от получения изображения до вычисления угловых координат по нему. В случае спутников ДЗЗ, оптическая ось датчика смещается на 100-300 угловых секунд за секунду времени. NEA для этого источника погрешностей определяется как 1-1,5 угл.с вблизи оптической оси и до 20 угл. с на периферии поля зрения. В конфигурации спутников, на которых использовались две камеры, закреплённые на общей жесткой платформе, NEA определялось на уровне менее 0,5 угл.с. для смежных измерений. Однако при измерении на двух витках орбиты, следующих друг за другом (интервал около 100 минут), NEA для этой конфигурации составил 1 угл.с.

**Время измерения**

Время определения углового положения спутника, "затерянного в космосе" от момента поступления изображения с камеры в блок обработки данных до получения координат составляет 80 мс. После первичного определения углового положения датчик переходит в режим слежения за угловым положением, и время от получения очередного изображения до получения координат уменьшается до 20 мс. При этом используется алгоритм слежения, который позволяет уточнять последующие измерения по предыдущим. Это обеспечивает низкую латентность и высокую точность.