

ФАСЕТОЧНЫЕ ДАТЧИКИ СОЛНЕЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

В.Д. Глазков, В.А Котцов

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Изложены основные положения построения фасеточных датчиков солнечной ориентации, каждая грань которых ориентирована в определенном направлении, что позволяет реализовать широкий обзор и получить низкую угловую погрешность измерений по всему полю зрения. Двухкоординатные приборы ориентации на Солнце статического типа, выполненные на основе фасеточных датчиков, могут иметь ультрамалую массу, энергопотребление и объем. Кроме того, нет принципиальных ограничений на пути создания быстродействующих и высоконадежных солнечных датчиков с полусферическим полем зрения и элементами самоконтроля результатов измерений в направлениях наблюдения. Используя ультрафиолетовые фотоэлектрические преобразователи, нечувствительные к видимому и инфракрасному свету Солнца, можно исключить влияние отраженной от Земли радиации на выходные данные, а также реализовать приборы ориентации на Солнце.

Essentials of the multi-faceted solar sensors' design are presented. This sensor's each facet is pointed towards the certain direction, what provides for a wide field of view and low measurements' angular error within the whole field of view. Two-dimensional solar sensors of static type based on the multi-faceted sensors may have ultra small mass, power consumption and dimensions. In addition there are no principal restrictions for creating high-speed and highly reliable solar sensors with a hemispheric field of view and measurement self-control within the observation directions. Using UV photoelectric converters being insensitive to the Sun visible and UV light it is possible to eliminate influence of the radiation reflected from the Earth on the output data as well as to create the stand-alone solar sensors.

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 фасетку — 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 [1]. Угол поля зрения и точность определения направления на Солнце существенно зависели от количества и типа ФЭП. Начиная с 1970 г., несмотря на усложнение конструкции ПОС, широкое применение получают системы «проекционного» типа, использующие ограничение светового потока диафрагмами разного вида [2, 3]. Однако существуют следующие важные преимущества фасеточных конструкций перед последними: очень малые масса и энергопотребление; одновременный анализ результатов измерений и автономный контроль функционирования; отсутствие принципиальных ограничений по реализации двухкоординатных широкоугольных и автономных ПОС. Перспективность использования таких датчиков была показана в [4].

С каждым годом всё чаще возникает потребность в более эффективном, компактном и высоконадежном ПОС для всех типов КА, включая и малые спутники — их мини-, микро- и нановарианты — основу завтрашнего дня. Во многих случаях фасеточные датчики могут быть оптимальными. Рассмотрим основные принципы построения фасеточных датчиков солнечной ориентации.

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. Можно считать их датчиками косинуса, как это показано на рис. 1а, для однокоординатного случая.

Датчики косинуса характеризуются «косинусоидальной» зависимостью выходного сигнала от угла падения излучения Θ . Если взять дифференциальную (встречную) схему включения пары ФЭП и обеспечить короткозамкнутый режим их работы (вариант генератора тока), можно получить линейную характеристику выходных данных от падающего солнечного излучения в определенной части угла поля зрения датчика (рис. 1б). При этом реальные характеристики «коси-

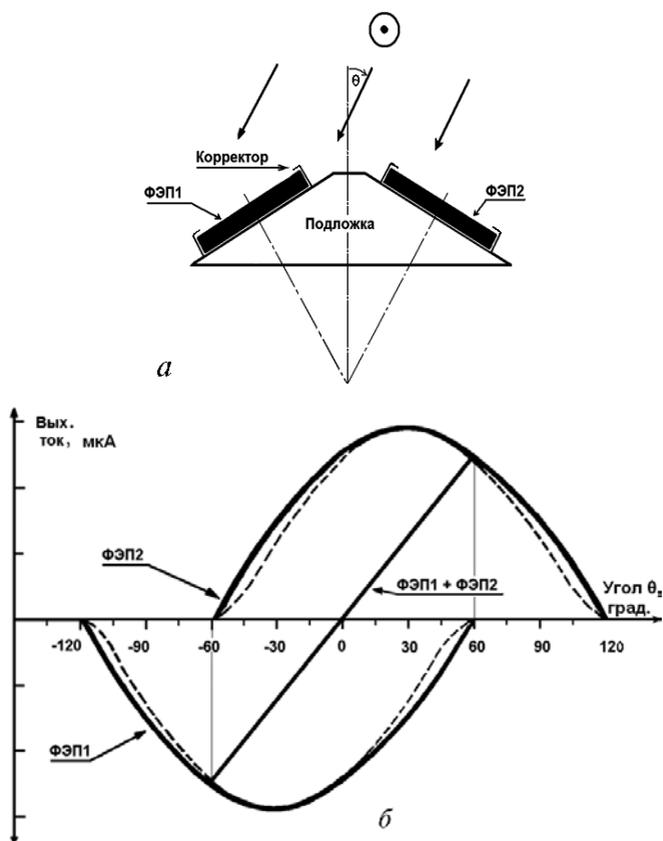


Рис. 1. Конструкция (а) и графики выходных токов (б) однокоординатного солнечного датчика

нусоидальных» ФЭП (рис. 1б, штрих) отличаются от идеальных. Отклонение этих характеристик от «косинусоидальной» зависимости у реальных ФЭП вызвано как наложением эффектов, обусловленных изменением величины коэффициента отражения по мере увеличения угла падения солнечного потока на фотоприемную поверхность, так и работой ФЭП в режиме, отличном от режима короткого замыкания. Это требует введения корректора (например, в виде диафрагмы с отверстием), расположенного перед ФЭП, который частично

компенсирует нелинейность выходного сигнала. Кроме того, устанавливая вместо одного «корректированного» ФЭП линейку или матрицу на N «косинусоидальных» элементов, можно в корень из N раз уменьшить случайные погрешности результатов измерения за счет их усреднения. Изменение углов наклона ФЭП позволяет увеличивать или уменьшать угол обзора датчика в определенных пределах, одновременно изменяя при этом и его чувствительность. Отсутствие оптических элементов, электрически встречное включение ФЭП при работе их в режиме генератора тока, в принципе, не требующие наличия внешнего питания и какой-либо обработки выходного сигнала, обеспечивает минимальные массу и габариты датчика, а также его высокую надежность.

Для двухкоординатного ПОС определения положения Солнца необходимо задействовать два однокоординатных фасеточных датчика солнечной ориентации, ориентированных перпендикулярно друг к другу. Двухкоординатный ПОС конструктивно может представлять собой четырехгранную пирамиду, на гранях которой расположены корректированные ФЭП. Пирамидальная конструкция двухкоординатного фасеточного датчика солнечной ориентации, в отличие от двухгранного варианта, наделена интеллектуальными способностями в части контроля достоверности результатов измерения, определяющих направление на Солнце. Фотометрический баланс — равенство сумм сигналов нечетной и четной пар ФЭП — является условием правильности функционирования. Уход Солнца из рабочей области фасеточного датчика солнечной ориентации, несимметричное затенение или подсветка ФЭП, несимметричная деградация фотоэлементов или их отдельное разрушение ведет к нарушению этого баланса. Отсутствие баланса является основанием для исключения недостоверных результатов измерения из информационного потока в реальном масштабе времени [4]. Кроме того, вводя дополнительные фотоприемные элементы в конструкцию ПОС, можно восстанавливать баланс пар ФЭП за счет уточнения параметров, используя для этого всё то же солнечное излучение. Это существенно увеличивает надежность фасеточного датчика солнечной ориентации и ресурс его работы.

Поле обзора пирамидального ПОС в варианте с одноэлементными ФЭП, как правило, ограничивают $\pm 70^\circ$ по каждой координате при погрешности измерения угла $0,05^\circ$, что соизмеримо с параметрами датчика, выполненного на профилированных ФЭП [5]. Нарращивание числа граней пирамидальных структур с разной крутизной граней позволяет создавать приборы с необходимыми полями зрения. ПОС с большим числом граней в пирамиде характеризуются меньшей погрешностью измерения.

На рис. 2,3 представлены вариант двухкоординатного фасеточного датчика солнечной ориентации с полусферическим полем зрения и графики выходных токов солнечного датчика для одной координаты.

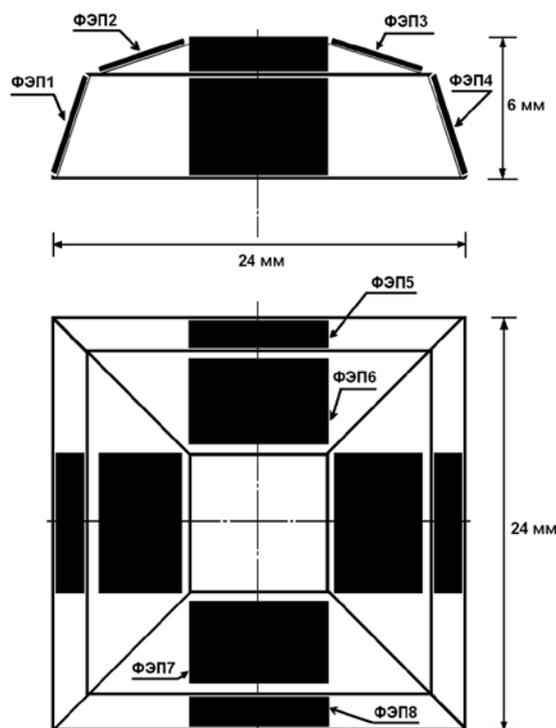


Рис. 2. Конструкция двухкоординатного солнечного датчика с полусферическим полем зрения

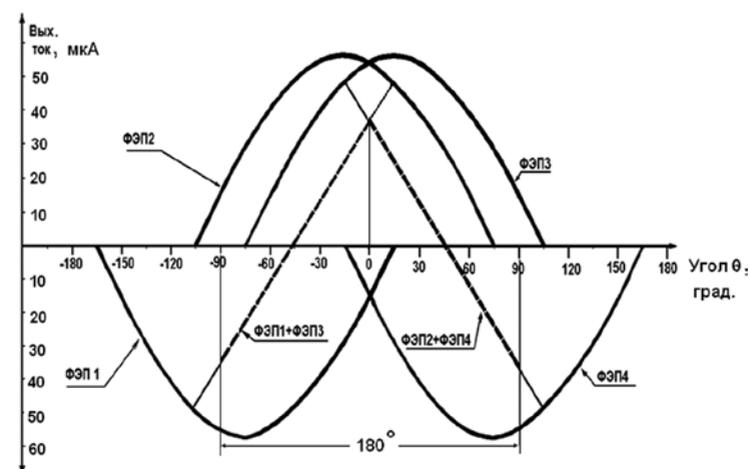


Рис. 3. Графики выходных токов солнечного датчика для одной координаты

Построение датчиков солнечной ориентации немислимо без знания характеристик Солнца как источника излучения.

Диск фотосферы Солнца представляет собой круг, имеющий при наблюдении с Земли угловой диаметр, равный примерно $32''$ с точностью $\pm 0,01''$. Точность модели расчета положения Солнца — $0,006^\circ$ [6]. Спектральное распределение плотности потока энергии излучения в условиях минимума и максимума солнечной активности, а также во время вспышки показывает, что диапазон длин волн от $0,2$ до 4 мкм является стабильным. В этой части спектра влияние солнечной активности на изменение потока энергии очень незначительно [7]. Солнце не является абсолютно черным телом при температуре 6000 К [8]. 7 % энергии Солнца — это ультрафиолетовые (УФ) лучи ($0,2...0,4$ мкм), 46 % — видимый диапазон длин волн ($0,4...0,75$ мкм) и 47 % — инфракрасные лучи ($0,75...4$ мкм). Интенсивность солнечной радиации за верхней границей атмосферы Земли — величина постоянная, зависящая только от излучательной способности Солнца и от расстояния между Землей и Солнцем. На верхней границе атмосферы Земли её значение 1368 ± 7 Вт/м² и очень слабо — в пределах $\pm 2,5$ % — зависит от среднего числа солнечных

пятен (солнечная постоянная в первой половине прошлого столетия изменялась в пределах $\pm 1\%$). Это и послужило основанием для выбора солнечного излучения в качестве опоры при калибровке параметров ФЭП, меняющихся в приборах со временем в условиях интенсивных внешних воздействий (ионизирующего излучения, температурных изменений, микроударов).

Общий недостаток всех датчиков солнечной ориентации — они не работают в тени, а также их выходные сигналы зависят от посторонних засветок. Есть два способа борьбы с последним явлением: исключение недостоверных результатов измерений (например используя фотометрический баланс, как было показано выше) или работа в одной из теллурических полос спектров планет. Рассмотрим подробнее второй способ.

Известно, что полное исчезновение планеты как излучающего небесного тела происходит в теллурических полосах спектров планет.

Для Земли — основного источника засветки — подходящие из этих полос имеют длины волн: 0,23...0,29 мкм (озон); 1,35...1,41; 1,8...1,9; 2,57...2,77 мкм (вода, углекислый газ). Исходя из того, что фасеточные датчики солнечной ориентации должны функционировать в условиях интенсивных внешних космических воздействий, рациональной является полоса 0,23...0,29 мкм. Это возможно при использовании ультрафиолетовых ФЭП — полупроводниковых фотоприемников, не чувствительных к видимому и инфракрасному излучению. При размерах входного окна датчика 1 см^2 в полосе спектра 0,23...0,29 мкм поток от Солнца — 0,402 мВт. В той же полосе поток излучения от Земли — $0,1884 \cdot 10^{-2}$ мВт, что в 213 раз меньше [9]. Длинноволновая граница ультрафиолетовых ФЭП должна соответствовать границе видимой и УФ-областей излучения Солнца, то есть коэффициент поглощения света в полупроводнике должен быть как можно меньшим при длинах волн, больших этой границы, и как можно большим при длинах волн, меньших этой границы. Требуемая спектральная область достигается, как правило, путем использования полупроводников, таких как GaN, AlGaIn, 6C-SiC, 4H-SiC, возможно, также непрямозонных —

например, GaP или Si и GaAs, но с применением УФ-светофильтров.

СССР в 1960–1970 гг. являлся лидером по созданию и исследованию структур с потенциальным барьером на основе GaP и SiC. В частности, впервые в мире были изготовлены GaP-приемники, начаты исследования SiC — основы для создания ФЭП, которые устойчивы к экстремальным внешним воздействиям, что позволило отказаться от Si-, GaAs-приемников и светофильтров.

Разработанная в НПО «Орион» технология позволила создавать одноэлементные фотодиоды с размерами чувствительных площадок 150×150 мкм, диаметром — 0,3; 1,0; 1,5; 2; 3; 5; 8 мм, многоэлементные — в виде линейки с размером элементов 150×150 мкм и зазором между ними 30 мкм, а также с размером элементов 400×400 мкм и зазором 100 мкм [10]. Выпускаемые в НПО фотодиоды с барьером Шоттки на основе GaP обладают фоточувствительностью в диапазоне 200...510 нм. Токовая фоточувствительность таких структур достигает 0,15 А/Вт в максимуме (430...440 нм) и 0,06 А/Вт при 300 нм. Высокое дифференциальное сопротивление в нуле напряжений (>100 ГОм) обеспечивает низкие шумы и высокую стабильность. Порог фоточувствительности достигает 10^{-15} Вт·Гц $^{-1/2}$. Использование пленок ITO (оксид In и Sn) вместо полупрозрачного слоя Au позволяет увеличить токовую чувствительность фотодиодов с барьером Шоттки на основе GaP до 0,3...0,4 А/Вт [11]. Фотоприемники на основе GaP обладают широким динамическим диапазоном: линейность сохраняется от 10^{-12} до 10^{-2} Вт/см 2 . Инерционность фотодиодов составляет несколько десятков наносекунд. Параметры ФЭП из GaP не изменяются после длительного воздействия повышенной засветки мощностью $\sim 10^{-2}$ Вт/см 2 . Фотодиоды способны работать в широком температурном диапазоне: ± 200 °С. Их чувствительность в области 250...410 нм практически остается постоянной вплоть до +300 °С.

Интересны также фотодиоды на основе SiC. Спектральная область фоточувствительности приемников из карбида кремния — 0,2...0,4 мкм. Длинноволновый край фоточувствительности ФЭП — 0,435 мкм в случае 6H-SiC и

0,410 мкм в случае 4H-SiC. Важными достоинствами SiC является устойчивость к температурным перепадам, отсутствие деградации в условиях интенсивных внешних воздействий и нечувствительность к видимому и инфракрасному излучению Солнца. Токовая чувствительность фотодиодов — 0,15...0,175 А/Вт при 0,27 мкм, а их порог fotocувствительности достигает 10^{-14} Вт·Гц^{-1/2}.

Очень заманчивы структуры на основе полупроводниковых нитридов, позволяющих создавать фотоприемники с резким длинноволновым краем чувствительности, расположенным в любом месте УФ-области излучения Солнца.

Кроме того, в последние годы появился интерес к фотоприемникам на основе алмаза, которые ещё только начинают развиваться [11].

Изложенные конструктивные принципы построения датчиков солнечной ориентации фасеточного типа, технологические возможности применения различных типов изготавливаемых фотоприемников открывают путь к созданию ПОС нового поколения, особенно необходимых для малых спутников.

Литература

1. Глиберман А.Я., Бурмистрова Л.В. Использование кремниевых фотопреобразователей в солнечных датчиках ориентации // Гелотехника. 1973. № 3. С. 7–15.
2. Черемухин Г.С. Приборы ориентации на Солнце. М.: Техпромиздат. 1998. 342 с.
3. Витриченко Э.И., Шербаков В.В. Солнечный датчик. А. с. 1779932 СССР G 01 C 21/24. Бюл. изобретений. № 45. 1992.
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. Hales J.H., Pedersen M. Two-Axis MOEMS Sun Sensor for Pico Satellites // Proc. 16th Annu. AIAA/USU Conf. on Small Satellites. Aug. 12–15, 2002. Utah State University.
6. Mark L. Autonomous LEO Orbit Determination from Magnetometer and Sun Sensor Data. Psiaki. Cornell University, Ithaca. N. Y. 14853–75.
7. Наблюдения и прогноз солнечной активности / Под ред. Мак-Интош П., Драйер М. М.: Мир, 1976. 280 с.
8. Хромов С.П., Петросяни С.А. Метеорология и климатология. 4-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1994.
9. Малкевич М.С. Оптические исследования атмосферы со спутников. М.: Наука, 1973. 303 с.
10. Анисимова И.Д., Стафеев В.И. Фотоприемники ультрафиолетового диапазона на основе широкозонных соединений АЗВ5 // Прикладная физика. 1999. № 2.
11. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. Полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи для ультрафиолетовой области спектра // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 9. С. 1025–1055.