

УДК 520.6.05+629.78

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ СОЛНЦА С УВЕЛИЧЕННЫМ ПОЛЕМ ЗРЕНИЯ

© 2012 Р. С. Дюльдин, В. Д. Блинов

Филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - НПП «ОПТЭКС»
Москва, Зеленоград

Рассматриваются возможные подходы к разработке солнечного датчика нового поколения, отличающегося уменьшенными массогабаритными характеристиками и увеличенным полем зрения. Проведён анализ элементной базы, необходимой для создания прибора. Представлены результаты энергетического и точностного моделирования и проектный облик датчика.

Датчик положения Солнца, КМОП-матрица, поле зрения, радиационная стойкость, точностное моделирование, светотехническое моделирование.

Для определения ориентации космического аппарата (КА), как правило, используются инерциальные измерители угловых скоростей (гироскопы) и датчики положения относительно Солнца, звёзд или Земли. Солнце является наиболее мощным ориентиром, хотя его положение и не известно с той точностью, с которой известно положение звёзд [1]. Тем не менее для определения ориентации его используют практически все КА.

Приборы, определяющие положение КА по отношению к Солнцу, называют солнечными датчиками.

В НПП «ОПТЭКС» такие приборы разрабатываются и изготавливаются с 1998 года. В табл. 1 приведены основные характеристики БОКСа (блока определения координат Солнца), применяемого на КА серии «Ямал».

Таблица 1. Основные характеристики прибора БОКС

Рабочее поле	92°×48°
Предельная погрешность	±0,016°
Потребляемая мощность, Вт	7
Масса, кг	2,5
Габариты, мм	160x140x140

В настоящее время стоит задача разработать датчик определения углового положения Солнца для малых КА, обладающий такой же высокой точностью и значительно меньшей массой и габарита-

ми. Это возможно, в первую очередь, за счёт применения современной КМОП-матрицы со встроенным аналогово-цифровым преобразователем вместо приборов с зарядовой связью. В качестве таковой предлагается матрица STAR1000 производства фирмы Cypress. Матрицы серии STAR обладают высокой радиационной стойкостью и стойкостью к воздействию тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) [2, 3]. Характеристики матрицы приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики STAR1000

Количество пикселей	1024 x 1024
Размер пикселя, мкм ²	15x15
Динамический диапазон, дБ	69
Разрядность АЦП	10
Напряжение питания, В	5
Потребляемая мощность, Вт	0,35
Радиационная стойкость, Крад	250
Стойкость к ТЗЧ, МэВ см ² /мг	127,8

Использование этой матрицы позволяет исключить из блока плату формирования импульсного питания, необходимую для тактирования ПЗС, а также аналогово-цифровые преобразователи и согласующие элементы. При этом уменьшится и погрешность, вносимая электронным трактом, так как аналоговые сигналы не будут передаваться по проводам и печатным платам и подвергаться наводкам. Кроме того, STAR1000 полностью совместима как с 5 В, так и с 3,3 В

сигналами, что упрощает её интеграцию в солнечный датчик. С уменьшением разности номиналов питания упростится и схема вторичного источника питания. Функциональная схема нового датчика приведена на рис. 1.

В качестве вычислителя предполагается использовать цифровой сигнальный процессор, а для обмена информацией канал RS-485.

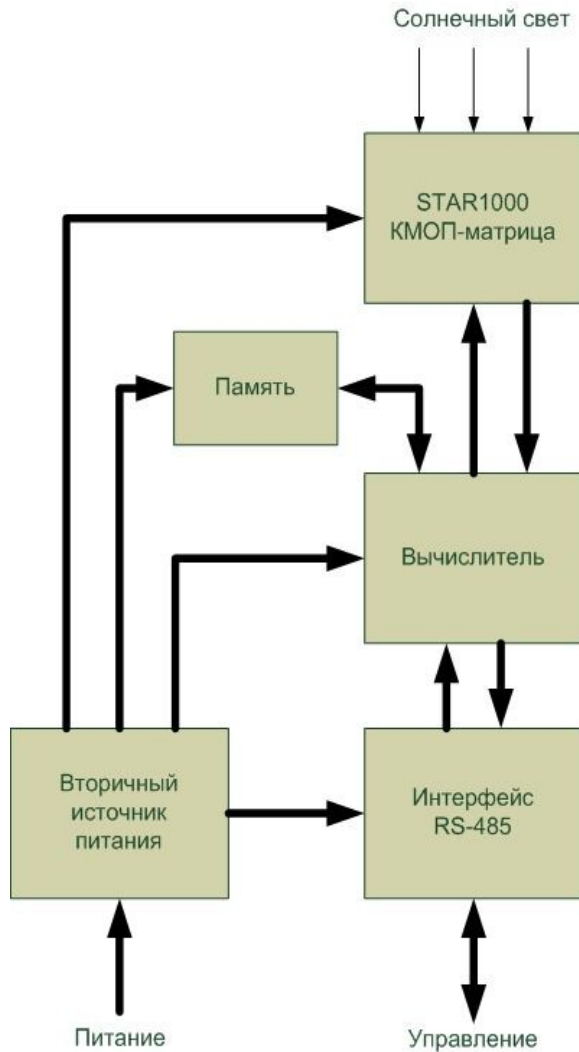


Рис. 1. Функциональная схема датчика

Определение координат центра Солнца в датчике основано на определении положения изображения щелевой маски. В зависимости от положения Солнца относительно прибора меняется угол падения лучей на маску и, следовательно, положение её проекции на плоскость фотоприёмника. Для увеличения рабочего поля зрения предлагается использовать решёткообразную щелевую

маску, изображённую на рис. 2. При определении координат Солнца в каждый конкретный момент времени используется изображение двух из четырёх щелей. Чтобы различать изображения верхней и нижней щелей, а также правой и левой, они выполнены разной ширины.

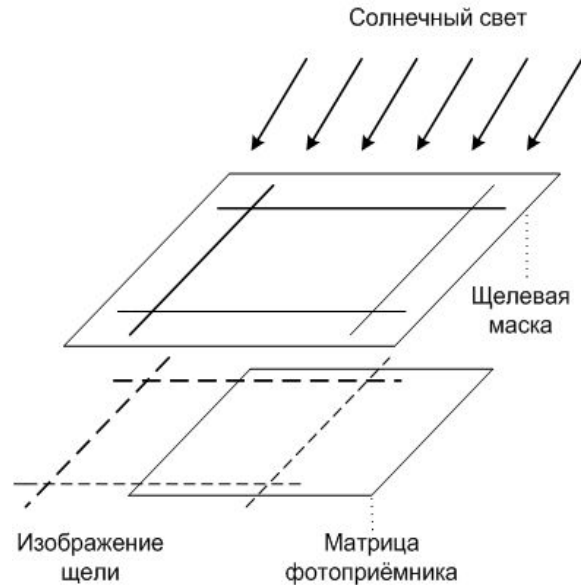


Рис. 2. Решёткообразная щелевая маска

Поле зрения разрабатываемого прибора должно быть не меньше $120^\circ \times 120^\circ$. Поскольку матрица STAR1000 имеет разрешение 1024×1024 активных пикселей размером 15×15 мкм, то длина фоточувствительной зоны равна $l_a = 15,36$ мм. Тогда оптимальное фокусное расстояние можно рассчитать по формуле

$$F = l_a \cdot \text{ctg}(a/2), \quad (1)$$

и оно будет равно $F = 8,8$ мм.

Величина сигнала на выходе КМОП-сенсора (V) связана со спектральной освещённостью в плоскости фотоприёмника ($E(\lambda)$) отношением

$$V = \int_{l_1}^{l_2} h(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $h(\lambda)$ – спектральная квантовая эффективность фотоприёмника.

Под квантовой эффективностью понимается отношение числа зарегистрированных зарядов к числу попавших фотонов на светочувствительную область кристалла.

Чтобы получить значение сигнала, выраженное в количестве сгенерированных электронов, следует применять формулу

$$S = \frac{t_{\text{нак}}}{hc} D^2 \int_{I_1}^{I_2} h(I) \cdot E(I) \cdot I dl . \quad (3)$$

Освещённость в плоскости КМОП-сенсора $E(\lambda)$ можно выразить через освещённость, создаваемую Солнцем на входе солнечного датчика $E_{\text{sun}}(\lambda)$, коэффициент пропускания светофильтра $k_{\text{сф}}$, отношение максимального сигнала во всех элементах I_{max} к полному сигналу в изображении щели I_{tot} и отношение ширины щели A к размеру элемента матрицы d :

$$E(I) = E_{\text{sun}}(I) \cdot k_{\text{нó}} \cdot \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{tot}}} \cdot \frac{A}{d} . \quad (4)$$

Объединив (4) и (5), получим расчётное выражение для определения коэффициента пропускания оптики:

$$k_{\text{нó}} = \frac{S \cdot h \cdot c}{t_{\text{нó}} \cdot \Delta^2 \cdot \frac{I_{\text{max}} \cdot A}{I_{\text{tot}} \cdot d} \cdot \int_{I_1}^{I_2} h(I) \cdot E_{\text{sun}}(I) \cdot I dl} , \quad (5)$$

где $I_{\text{tot}}/I_{\text{max}} = 11$, $S = 79200$ электронов, что составляет 80% от сигнала насыщения, $d = 15$ мкм, $A = 200$ мкм, $\tau_{\text{нак}} = 5$ мс.

Подставляя приведённые значения (5), получим, что коэффициент ослабления света должен приблизительно составлять 16000.

Для оценки погрешности измерений было проведёно точностное моделирование, при котором были учтены случайные и систематические погрешности, связанные с неточностью сборки, погрешностями изготовления щели, неравномерностью чувствительности матрицы.

Систематическая погрешность составила 15 угловых минут. После калибровки и коррекции устранимых систематических погрешностей точность прибора сильно возрастает. Погрешность прибора после калибровки должна определяться лишь случайной погрешностью и составляет на уровне 1σ 17 угловых секунд. Однако следует оговориться, что в реальности это не так. Существует ещё остаточ-

ная погрешность калибровки, вызванная погрешностью калибровочного стенда и несовершенством методики проведения калибровки.

В результате проделанной работы получен проект датчика углового положения Солнца на основе КМОП-матрицы, обладающий следующими характеристиками (табл. 3).

Таблица 3. Характеристики перспективного солнечного датчика

Рабочее поле	120°×120°
Предельная погрешность	±0,005°
Потребляемая мощность, Вт	1,2
Масса, кг	<0,25
Габариты, мм	70x70x60

Несмотря на использование радиационно-стойкой элементной базы, удалось значительно уменьшить габариты прибора. Внешний вид солнечного датчика показан на рис. 3.

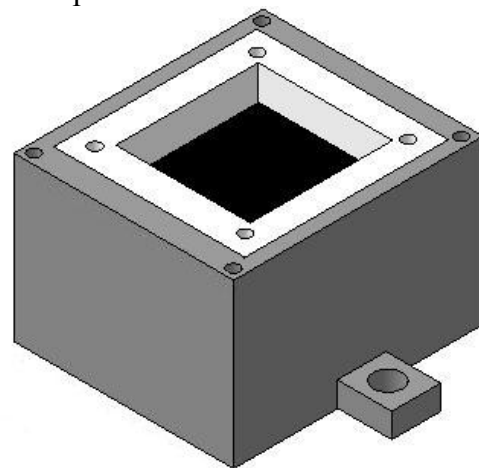


Рис. 3. Внешний вид нового солнечного датчика

Новый прибор предлагается изготавливать в одноканальном варианте. Если потребуется высокая надёжность, то возможен вариант установки на борт КА двух таких приборов. При этом можно установить датчики таким образом, чтобы их рабочие поля зрения перекрывались в 1°. Это позволит расширить вдвое поле зрения, а при отказе одного из приборов потеря функциональности сведётся к уменьшению рабочего поля в два раза. Как показывает практика, во многих слу-

чаях такая потеря функциональности является допустимой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009-2013г.» (ГК № 14.740.11.0327).

Библиографический список

1. Карпенко, С. О. Средства определения ориентации на борту малого КА [Текст]: обзор / С. О. Карпенко. - М., 2001.

2. Bogaerts, J. Total Dose Effects on CMOS Active Pixel Sensors [Text] / J. Bogaerts, B. Dierickx // Imec, Kapeldreef 75, 3001 Leuven, Belgium.

3. Total Dose and Displacement Damage Effects in a Radiation-Hardened CMOS APS [Text] / J. Bogaerts, B. Dierickx, G. Meynants [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices, VOL. 50, NO. 1, 2003.

SMALL-SIZED TWO-COORDINATE SENSOR OF THE SUN'S ANGULAR POSITION WITH ENLARGED FIELD OF VIEW

© 2012 R. S. Dyuldin, V. D. Blinov

Branch of State Research and Production Space Rocket Center «TsSKB-Progress» -
State Research and Production Enterprise «ОПТЕКС»,
Moscow, Zelenograd

Possible approaches to the designing of a new generation sensor of the Sun's position distinguished for its reduced mass-size specifications and an enlarged field of view are discussed in the paper. Brief analysis of the elemental basis necessary for the construction of the device is made. The results of power and precision modeling as well as the designed exterior view of a new generation sensor of the Sun's position are presented.

Sun's position sensor, CMOS matrix, field of view, radiation resistance, precision modeling, photometric modeling.

Информация об авторах

Дюльдин Руслан Сергеевич, ведущий специалист филиала ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - НПП «ОПТЭКС». E-mail: optecs@mail.ru. Область научных интересов: приборы с зарядовой связью, программируемые логические интегральные схемы, проектирование целевой аппаратуры КА ДЗЗ.

Блинов Валентин Дмитриевич, начальник лаборатории филиала ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - НПП «ОПТЭКС». E-mail: optecs@mail.ru. Область научных интересов: цифровая обработка изображений, методы обработки данных ДЗЗ, проектирование целевой аппаратуры КА ДЗЗ.

Dyuldin Ruslan Sergeevich, key specialist, Branch of State Research and Production Space-Rocket Center «TsSKB-Progress» - State Research and Production Enterprise «ОПТЕКС». E-mail: optecs@mail.ru. Area of research: CCD devices, programmable logic chips, designing Earth remote sensing spacecraft equipment.

Blinov Valentin Dmitryevich, head of laboratory, Branch of State Research and Production Space-Rocket Center «TsSKB-Progress» - State Research and Production Enterprise «ОПТЕКС». E-mail: optecs@mail.ru. Area of research: digital image processing, Earth remote sensing data processing methods, designing of Earth remote sensing spacecraft target equipment.