РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНО-ОТРАБОТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ СТАТИЧЕСКОГО ПРИБОРА ОРИЕНТАЦИИ ПО СОЛНЦУ 347К

М. Г. Пирогов, В. И. Варламов, Г. Л. Цымбал, Н. М. Стрижова, С. А. Демешко, Д. Н. Гальчинский, К. П. Сафронов, В. А. Полкунов, А. Я. Гебгарт

ОАО «НПП «Геофизика-Космос» Россия, 107497, Москва, ул. Иркутская, 11, корп. 1. E-mail: galchinsky@gmail.com

Представлено описание статического прибора ориентации по Солнцу 347К на основе особо широкоугольного объектива, матричного приемника излучения на активных пикселях и микроконтроллера с перепрограммируемым ПЗУ.

Описаны результаты лабораторно-отработочных испытаний прибора, подтверждающие обеспечение ориентации по двум координатам с суммарной погрешностью 1', а также устойчивую работу при частичном экранировании поля зрения прибора элементами конструкции космического аппарата и попадании отраженных солнечных лучей от конструкции и от поверхности Земли.

Для снижения влияния температурных воздействий на погрешности измерений угловых координат Солнца был применен титановый сплав в оправах объектива и введена алгоритмическая коррекция координат, учитывающая информацию термодатчика фотоприемника.

Ключевые слова: прибор ориентации на Солнце, космический аппарат, фотоприемная матрица.

RESULTS OF 347K STATIC SUN SENSOR LABORATORY TESTING

M. G. Pirogov, V. I. Varlamov, G. L. Tsymbal, N. M. Strizhova, S. A. Demeshko, D. N. Galchinskiy, K. P. Safronov, B. A. Polkunov, A. Y. Gebgart

JSC "NPP "Geofizika-Kosmos"

11 Irkutskaya str., bldg. 1, Moscow, 107497, Russia. E-mail: galchinsky@gmail.com

This work provides the 347K static sun sensor description based on the CMOS active pixel sensor and the superwide-angle imaging system.

The articledescribes the laboratory testing results for the sensor confirming the 2-axis orientation accuracy with the total error of 1', and the sensor steady operation when there were observed the partial screening of the sensor field of view by the SV structure elements as well as sunrays reflected from the SV structure or the Earth surface.

To reduce the temperature effect for Sun angular coordinates measurement errors the titanium alloy was used for leans mount and algorithmic coordinate correction was introduced which take into account temperature sensor data of photodetector.

Keywords: Sun orientation sensor, space vehicle, photodetector matrix.

Статический прибор ориентации по Солнцу 347К разрабатывается по техническому заданию (ТЗ) ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» для использования в составе системы ориентации и стабилизации космических аппаратов (КА) на орбитах высотой от 500 км до 40 000 км. Прибор предназначен для измерения двух угловых координат направления на центр Солнца в приборной системе координат, связанной с посадочной плоскостью прибора [1]. Общий вид прибора представлен на рис. 1.

Конструктивно прибор состоит из объектива, фотоприемного устройства, устройства логического, блока питания, канала функционального контроля.

Особенностью конструкции прибора 347К является новая особо широкоугольная оптическая система, обеспечивающая измерение углового положения Солнца в поле зрения, большем полусферы.



Рис. 1. Прибор ориентации по Солнцу 347К

Оптическая схема представлена на рис. 2 и содержит объектив поз. 1, 2, 3, 4, узкополосный светофильтр поз. 5..7, фотоприемное устройство поз. 11 и канал функционирования поз. 8...10 в виде светодиода поз. 9 и зеркально-призменной системы поз. 8, 10 с двумя прозрачными отверстиями.



Рис. 2. Оптическая схема прибора 347К

Следует отметить, что в данной схеме для реализации углового поля $2\omega = 180^{\circ}$ была разработана четырехлинзовая система [2], которая обеспечивает:

– практическое постоянство диаметра кружка рассеяния для источника углового размера $2\omega = 32'$ в пределах углового поля $2\omega = 182^{\circ}$ (\emptyset 0,12 мм \pm 0,03 мм), что дает возможность минимизировать случайную погрешность определения энергетического центра изображения;

 телецентрический ход лучей в пространстве изображений, вследствие чего минимизируется влияние дефокусировок, вызванных, например, термодеформациями, на положение энергетических центров изображений;

 незначительное изменение освещенности по полю (не более 15 %).

Оптическая схема допускает наличие в поле зрения прибора элементов конструкции КА с любым, в том числе зеркальным, отражением. Такие элементы конструкции КА должны быть описаны в «карте теней», которая хранится в перепрограммируемом ПЗУ прибора (производства компании «3D-plus») для дальнейшего программного запрета на обработку информации от упомянутых элементов.

Наличие освещенной Солнцем Земли в поле зрения этого прибора не влияет на его работоспособность и характеристики. Принцип действия прибора заключается в проецировании изображения Солнца через специальную оптическую систему на многоэлементный фотоприемник – датчик с активными пикселями (производства компании «Сургезз» [3]). После считывания электрических сигналов с указанного приемника и обработки его информации, в приборе определяются углы отклонения направления на центр Солнца в приборной системе координат. Информация об угловом положении Солнца в приборной системе координат, связанной с посадочной плоскостью изделия, формируется в виде направляющих косинусов в пределах рабочего поля зрения, имеющего значение от 0° до (91+2)° по зенитному углу и от 0° до 360° по азимутальному углу.

Работа прибора характеризуется пятью режимами: инициализация, самотестирование, поиск, захват, слежение.

При инициализации выполняется загрузка программ, установка параметров работы микроконтроллера, конфигурирование ПЛИС, загрузка паспортных параметров. В режиме поиска производится поиск источников излучения в поле зрения изделия. Если объектов больше 0, прибор переходит в режим захвата. В случае неудачного обнаружения изменяется порог и поиск производится снова. В режиме захвата выполняется отбор найденных объектов по критериям размера изображения и амплитуды. Если таких объектов нет или их более одного, корректируется время накопления с переходом в режим поиска. После выбора Солнца среди объектов устанавливается окно слежения. Затем устанавливается время накопления для обеспечения работы матрицы в линейном диапазоне сигналов. В режиме слежения выполняется цикл обработки «получение окна слежения; вычисление координат в приборной системе координат; коррекция времени накопления». Размер окна слежения -32×32 пикселя. В случае потери объекта происходит возврат в режим поиска. Самотестирование прибора выполняется после инициализации прибора или при неудачном обнаружении объектов в режиме поиска, а также по команде бортового цифрового вычислительного комплекса (БЦВК). В этом режиме контролируется исправность модуля обмена с БЦВК, проверяются ПЗУ и ОЗУ устройства логического. Включается встроенный имитатор. Окно слежения устанавливается в точку наблюдения имитатора. Вычисляются параметры изображения имитатора. Опрашиваются датчики температуры. По результатам опроса датчиков устанавливается минимальное и максимальное время накопления.

Далее приведены основные характеристики прибора.

••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	
Фокусное расстояние объектива f'	5,66 мм
Угловое поле 2W	182°
Спектральный диапазон	0,85–0,87 мкм
Диаметр входного зрачка	1,19 мм
Размер пятна рассеяния в пределах углового поля, мм	0,12±0,03
Изменение освещенности от центра к краю углового поля	15%

Информационный интерфейс прибора – по ГОСТ Р 52070–2003 (МІL 1553). Период обновления выходной информации:

 – 1 сек в режиме поиска, при отсутствии Солнца в поле зрения;

 – 0,2 сек в режиме слежения, при наличии Солнца в поле зрения.

В режиме начальной солнечной ориентации, при угловых скоростях вращения КА до 0,6°/с по всем трем осям, расчетная суммарная погрешность измерения координат не превышает 4 угл. мин., в режиме закрутки, при угловых скоростях вращения КА до 4°/с по всем трем осям, – 6 угл. мин. Ожидаемая погрешность измерения угловых координат с учетом параметров геометрической калибровки в режиме угловой стабилизации КА – не более 1 угл. мин. (3σ) в пределах рабочего поля зрения.

Прибор должен функционировать с сохранением всех характеристик при температуре от -30 до 40 °C, а также после воздействия на него (в выключенном состоянии) температуры на посадочном месте в диапазоне от -40 до 50 °C.

Диапазон рабочего напряжения электропитания – от 25 до 28 В при потреблении не более 4 Вт.

Все конструкционные материалы и элементная база прибора – отечественные, за исключением двух вышеупомянутых элементов.

Конструктивные меры, принятые в приборе, обеспечивают его радиационную стойкость к дозовым эффектам и воздействию тяжелых заряженных частиц, соответствующую пригодности прибора для эксплуатации в составе КА на любых околоземных орбитах в диапазоне высот от 500 до 40 000 км в течение 15 лет.

Целью лабораторно-отработочных испытаний являлось подтверждение правильности принятых при разработке прибора 347К конструктивных, схемотехнических решений для реализации требований технического задания и конструкторской документации.

Испытания проводились в соответствии с программой ЛОИ в три этапа. На первом этапе проверялось функционирование сборочных единиц, отрабатывались методики настройки и проверки плат электронного блока прибора. Второй этап ЛОИ предусматривал проведение следующих работ с прибором:

- отработка программного обеспечения изделия;

проверка работоспособности изделия при изменении напряжения питания;

 измерение реального токопотребления изделия, а также величин пускового тока и помех, создаваемых изделием по цепи питания;

 отработка взаимодействия изделия с бортовым цифровым вычислительным комплексом (БЦВК), проверка правильности функционирования изделия в соответствии с «Протоколом информационного обмена между изделием 347К и БЦВК КА»;

 отработка взаимодействия изделия с системой контроля автоматизированного оптического стенда в части измерения и выдачи информации о координатах источника излучения. Экспериментальные работы по исследованию энергетических и точностных характеристик прибора 347 К в рабочем диапазоне температур и освещённостей проводились на третьем этапе ЛОИ. Проверки выполнялись на автоматизированном точностном оптическом стенде. Целью проводимых экспериментальных работ являлось:

 определение размеров, формы и энергетических параметров изображения имитатора Солнца на фотоприемной матрице в пределах поля зрения;

 определения рабочих параметров фотоприемной матрицы (времени накопления и коэффициента усиления) для приёма сигналов от имитатора Солнца во всём рабочем диапазоне освещённостей;

исследование погрешностей измерения координат в рабочем диапазоне температур от -30 до 40°С.

Приведем наиболее значимые результаты исследований прибора 347 К, полученные на третьем этапе ЛОИ.

Исследования распределения сигналов в изображении имитатора Солнца проводились с целью определение геометрических и энергетических параметров изображения Солнца в плоскости фотоприемной матрицы. На основании полученных данных были определены оптимальные режимы работы матрицы, а также необходимость доработки оптической системы и программного обеспечения изделия 347 К. На рис. 3 приведены распределения сигналов в изображении имитатора Солнца с уровнем освещенности Е = 60000 лк для центра поля зрения. Для заданного уровня освещенности оптимальный режим работы матрицы достигался при коэффициенте усиления $K_{vc} = 2$ и времени накопления $t_{Hak} = 4$ строки. Для освещенностей Е = 120 000 лк и 180 000 лк оптимальный режим работы матрицы достигался соответственно при времени накопления $t_{\text{нак}} = 2,5$ строки и $t_{\text{нак}} = 1,5$ строки.



Рис. 3. Распределение сигналов в изображении имитатора Солнца с уровнем освещенности Е = 60 000 лк для следующих параметров фотоприемной матрицы:

 $2 - t_{\text{нак}} = 2$ строки, $K_{\text{yc}} = 2$ – недостаточное (слабое) усиление; $4 - t_{\text{нак}} = 4$ строки, $K_{\text{yc}} = 2$ – оптимальный (линейный) режим, $8 - t_{\text{нак}} = 8$ строк, $K_{\text{yc}} = 2$ – насыщение; $10 - t_{\text{нак}} = 10$ строк, $K_{\text{yc}} = 2$ – сильное насыщение Следует отметить, что время накопления матрицы может задаваться целым числом строк, что для малых значений этого параметра приводит к «грубому» управлению формой и распределением сигналов в пятне изображения: так для освещенности 120 000 лк вместо $t_{\text{нак}} = 2,5$ можно установить $t_{\text{нак}} = 2$ или $t_{\text{нак}} = 3$ строки, что вызовет или недостаточное усиление или насыщение сигнала в пятне изображения.

При условии уменьшения коэффициента пропускания оптической системы в 5 раз оптимальному режиму работы матрицы $K_{yc} = 2$ будет соответствовать диапазон времени экспозиции 6–20 строк, что позволит более точно управлять формой и распределением сигналов в пятне изображения, автоматически подстраиваясь под возможные изменения факторов эксплуатации. По результатам выполненных исследований было предложено провести доработку оптической схемы с целью уменьшения коэффициента пропускания.

Для отработки параметров селекции изображения были проведены исследования изменения сигналов в изображении имитатора Солнца в пределах всего поля зрения прибора. На рис. 4 приведены результаты измерения максимальных сигналов в изображении имитатора Солнца с уровнем освещенности E = 137000 лк для углов поля зрения α от -90° до 90° и для следующих параметров работы матрицы: коэффициент усиления К_{ус} = 2, время накопления $t_{\text{нак}} = 2$ строки.



Рис. 4. Изменение сигналов в изображении имитатора Солнца по полю зрения прибора 347К

Из результатов измерений видно, что изменение освещенности не превосходит 20 % в угловом поле – 80...+85°, что хорошо согласуется с расчетными оценками 15 %.

Программа экспериментальных исследований предусматривала проведение исследований распределения сигналов в изображении имитатора Солнца при воздействии повышенной (+40 °C) и пониженной (-30°C) температуры окружающей среды. В программном обеспечении прибора 347 К одним из параметров селекции изображений является сумма значений амплитуд в окне слежения. Результаты измерений, приведенные на рис. 5, отражают зависимость изменения суммарной амплитуды сигналов от температуры окружающей среды.



В связи с этим в программное обеспечение прибора была введена коррекция времени накопления фотоприемной матрицы по результатам опроса температурных датчиков, входящих в состав прибора.

Основной задачей третьего этапа ЛОИ прибора 347 К было проведение испытаний по определению влияния температурных воздействий на погрешности измерений угловых координат имитатора Солнца в приборной системе координат. По результатам испытаний было установлено, что шумовая погрешность измерения координат не превышает 27" (по уровню 3σ) в температурном диапазоне −30...+40 °С, значения дополнительных температурных погрешностей не превышают ~2,5' для температуры +40°С и ~3,8' для температуры -30 °С. В соответствии с расчетами применение титанового сплава в оправах объектива позволит примерно в 5 раз уменьшить температурную составляющую погрешности измерения. Остаточная температурная погрешность компенсируется введением алгоритмической коррекции координат, учитывающей информацию термодатчика, установленного на фотоприемнике.

Результаты лабораторно-отработочных испытаний статического прибора ориентации по Солнцу 347К подтвердили правильность принятых конструктивных и схемных решений, обеспечивающих его работоспособность в соответствии с требованиями технического задания.

Библиографические ссылки

1. Результаты лабораторно-отработочных испытаний статического прибора ориентации по Солнцу 347 К / М. Г. Пирогов, В. И. Варламов, Г. Л. Цымбал и др. // Навигационные спутниковые системы, их роль и назначение в жизни современного человека : тез. докл. 2 Междунар. науч.-техн. конф. ОАО «ИСС». Железногорск, 2012. 2. Гебгарт А. Я. Особенности проектирования некоторых типов особоширокоугольных объективов // Оптический журнал. 2010. Т. 77, № 9. С. 17–21.

3. Stefan Cos, Dirk Uwaerts, Jan Bogaerts, Werner Ogiers. Active pixels for star trackers: final report. Cypress. Doc. №: APS-FF-SC-05-023. Date: 24-03-2006.

References

1. Pirogov M. G., Varlamov V. I, Tsymbal G. L., Strizhova N. M., Demeshko S. A., Galchinskiy D. N., Safronov K. P., Polkunov V. A., Gebgart A. Y. *Tez. dokl.* 2 mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Navigatsionnyye sputnikovyye sistemy, ikh rol' i naznacheniye v zhizni sovremennogo cheloveka" (Abstract of the "Navigation Satellite Systems, their role and function in the human life" 2-nd International Scientific and Technical Conference). JSC "ISS", Zheleznogorsk, 2012.

2. Gebgart A. Y. *Opticheskiy zhurnal*. 2010, vol. 77, no. 9, p. 17–21.

3. Stefan Cos, Dirk Uwaerts, Jan Bogaerts, Werner Ogiers. Active pixels for star trackers: final report. Cypress. Doc. №: APS-FF-SC-05-023. Date: 24-03-2006.

© Пирогов М. Г., Варламов В. И., Цымбал Г. Л., Стрижова Н. М., Демешко С. А., Гальчинский Д. Н., Сафронов К. П., Полкунов В. А., Гебгарт А. Я., 2013

УДК 629.78.064:681.5

ОПТИМИЗАЦИЯ МАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ «АКАБ»

Ю. В. Кочев, С. В. Ефремов, А. В. Овчинников

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: koch@iss-reshetnev.ru

Рассматривается вопрос по реализации возможного способа проведения оптимизации габаритно-массовых показателей бортовой кабельной сети космического аппарата (БКС КА) с помощью разработанной системы «АКАБ». Разработанная САПР «АКАБ» успешно решает поставленные перед ней задачи по разработке электрических общих и принципиальных схем разъемных соединений бортовой радиоэлектронной аппаратуры и подсистем КА, перечней применяемых элементов и преобразования исходных схемных данных для дальнейшего 3-D моделирования бортовой кабельной сети КА. Решение крайне важных задач по реконфигурации разработанных схем подсистем вновь проектируемых КА с целью проведения максимально возможной оптимизации габаритно-массовых характеристик бортовой кабельной сети космического аппарата должно стать следующим важным шагом в необходимом развитии отечественной космической отрасли.

Ключевые слова: Кабельная сеть КА, 3-D моделирование ботовой кабельной сети КА, оптимизация.

SATELLITE MASS CRITERIA OPTIMIZATION WITH THE USE OF CAD "ACAB"

Y. V. Kochev, S. V. Efremov, A. V. Ovchinnikov

JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems" 52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: koch@iss-reshetnev.ru

Possible optimization of overall and mass criteria of the onboard cable network system with the developed ACAB system is studied. The developed CAD system called "ACAB" successfully solves problems related to development of electrical block plans and electrical schematic diagrams of detachable joints used in radio-electronics and sub-systems of spacecrafts, preferred parts lists and conversion of input circuit data to allow further 3-D modeling of onboard cable network system. The solution of the utmost critical tasks dedicated to reconfiguration of developed subsystem circuits to be used in newly developed satellites with the aim of implementation of the possible optimization of the onboard cable network system overall and mass criteria is to become the next step forward in development of the national space industry.

Keywords: spacecraft onboard cable network system, 3-D modeling of onboard cable network system, optimization.

Решение задачи разработки космических аппаратов со сроком активного существования 15 лет неразрывно связано с вопросами оптимизации массовых характеристик подсистем и конструкции КА, поскольку длительное функционирование космического аппарата на орбите влечет неизбежное увеличение необходимого количества рабочего тела подсистемы коррекции.

Существует несколько аспектов оптимизации массовых характеристик кабельной сети КА: