Оптический журнал

Разработка приборов астроориентации в НПП «Геофизика-Космос». Часть II

УДК 520.6

Углоизмерительный прибор контроля геометрических параметров крупногабаритных трансформируемых антенн космических аппаратов

© 2017 г.

С. А. Герасимов; Н. М. Стрижова; А. Я. Гебгарт, канд. техн. наук; А. И. Соин; С. Я. Шмаков

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Геофизика-Космос»

E-mail: info@geofizika-cosmos.ru

Поступила в редакцию 13.06.2017

Рассматривается статический высокоточный углоизмерительный прибор с 90-градусной приёмо-передающей оптической системой, обеспечивающей измерение угловых координат направлений на контрольные элементы с погрешностью 13″ и фотографирование рефлектора антенны космического аппарата на любом участке орбиты. Приведена сравнительная оценка с аналогичными бортовыми системами контроля формы и положения. Отмечаются особенности построения оптической системы прибора. Описаны основные функциональные режимы работы.

Ключевые слова: *крупногабаритная трансформируемая антенна, углоизмерительный прибор, контрольный элемент, широкоугольный объектив, матричный приёмник излучения на активных пикселах, светодиод.*

Коды OCIS: *120.0120, 250.0250, 350.6090*

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для решения задачи высокоточной направленной космической радиотелевизионной связи ряд космических аппаратов (КА) оснащается крупногабаритными трансформируемыми антеннами (КТА). Качество радиотехнических характеристик КТА напрямую зависит от стабильности геометрических параметров элементов конструкции, входящих в состав КТА, прежде всего рефлектора и облучателя.

Рефлектор представляет собой складную сетчатую конструкцию с металлическим радиоотражающим сетеполотном. Рабочая поверхность рефлектора — внеосевой параболоид. При раскрытии антенны и последующей эксплуатации в условиях открытого космического пространства конструкция рефлектора подвергается температурным воздействиям в диапазоне от минус 170 °С до плюс 170 °С, вызывающим смещение и искажение формы его рабочей поверхности. Кроме нарушения геометрии рефлектора при раскрытии антенны также возможны смещения облучателя КТА относительно его номинального положения.

Взаимные смещения рефлектора и облучателя КТА и температурные деформации конструкции рефлектора влекут за собой снижение пространственного разрешения и точности координатной привязки рефлектора к поверхности Земли. В связи с этим возникла необходимость создания высокоточных оптико-электронных систем, предназначенных для измерения геометрических параметров взаимного положения рефлектора и облучателя.

Известные из литературы системы контроля геометрических параметров КТА [1–3] имеют два варианта исполнения — угломерный и угломерно-дальномерный. В угломерном варианте определяются две угловые координаты направления на контрольные элементы (КЭ), в угломерно-дальномерном — три координаты КЭ.

По результатам анализа информации по существующим приборам контроля раскрытия, формы, характера деформаций больших конструкций КА и предварительных конструкторских проработок в состав бортовой системы контроля геометрических параметров КТА был включен углоизмерительный прибор [4, 5], определяющий угловые координаты направлений на КЭ.

К углоизмерительному прибору (УП) предъявляется ряд специфических требований. Кроме соответствия основным параметрам и характеристикам — диапазону измеряемых угловых координат, точности определения угловых координат, энергетических характеристик излучателя и приёмника, качества оптической системы и др. — прибор должен обеспечивать проведение измерений в условиях широкого диапазона температур и воздействия световых помех от освещённых Солнцем элементов конструкции КА. В таких экстремальных условиях прибор должен сохранять работоспособность и обеспечивать сбор информации по всем контрольным элементам, расположенным на рефлекторе и облучателе КТА.

Применение УП для решения поставленной задачи продиктовано не только требованием улучшения рабочих характеристик и параметров устройства, в частности, точности измерений, обеспечения высокоскоростного слежения за множеством контрольных элементов, ресурса, а также необходимостью формирования качественного изображения исследуемого объекта с уровнем контраста, достаточного для его уверенной селекции системой обработки в сложных условиях светотехнической обстановки на орбите.

Для преодоления указанных трудностей в основу конструкции УП были положены широкоугольный высококачественный объектив, узкополосный светофильтр, КМОП-матрица на активных пикселах, широкоугольная осветительная система.

В настоящее время прибор находится на этапе экспериментальной отработки.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

Углоизмерительный прибор предназначен для определения угловых координат направлений на контрольные элементы, находящиеся в его поле зрения, в системе координат, связанной с фотоприёмной матрицей, и фотографирования рефлектора крупногабаритной трансформируемой антенны на этапе его раскрытия с сохранением фотоснимков в памяти прибора для последующей передачи их на Землю.

Контрольный элемент — световозвращающий элемент, располагаемый на рефлекторе и облучателе КТА, и находящийся в поле зрения прибора. Световозвращающий элемент предназначен для отражения падающего на него светового потока в направлении, обратном падению, и может быть выполнен в одном из следующих вариантов:

1) уголкового отражателя (триппель-призмы);
2) массива микроуголковых отражателей;
3) полого уголкового отражателя;
4) светоотражающей плёнки.

Наибольшей стойкостью к воздействию температуры в требуемом широком диапазоне ±170° обладают триппель-призмы. Исходя из конструктивных особенностей сетчатого рефлектора, масса такого КЭ весьма ограничена, световой диаметр не может превышать 15 мм.

Конструктивное исполнение прибора – негерметичный моноблок, устанавливаемый снаружи КА и функционирующий в условиях космического пространства, состоит из осветительного (передающего) канала и приёмного канала на основе двух фотоприёмных матриц. Прибор определяет угловые координаты направления на все КЭ, попадающие в поле зрения изделия, в системах координат прибора, связанных с фотоприёмными матрицами. Использование двух фотоприёмных матриц обеспечивает регистрацию отражённого от КЭ излучения во всём рабочем поле прибора.

Внешний вид прибора приведен на рис. 1, основные характеристики — в таблице (последний столбец).

В дополнение к данным таблицы укажем также следующие немаловажные характеристики прибора:

– интерфейс информационного обмена – по ГОСТ Р 52070-2003 (MIL-STD-1553B), SpaceWire по стандарту ECSS E-ST-50-12C;

– срок эксплуатации — не менее 10 лет;

– вероятность безотказной работы (ВБР) – не менее 0,98.

В табл. 1 характеристики прибора УП приведены в сравнении с характеристиками известных систем контроля смещений и формы больших конструкций КА RFT [1], SHAPES [2], ATS [3, 6, 7].

Данные, приведённые в таблице, показывают, что требования, которые предъявляются к углоизмерительному прибору, в целом соизмеримы

Рис. 1. Внешний вид углоизмерительного прибора.

Характеристики прибора УП в сравнении с характеристиками известных систем контроля смещений и формы больших конструкций КА

Характеристика	Система			
	RFT	SHAPES	ATS	Углоизмерительный прибор
Количество целей	23	от 50 до 150	1	≥ 50
Измеряемые координаты	2 угла	2 угла	3 угла**)	2 угла
Диапазон расстояний до КЭ	7,9–32 м	до 80 м	до 6 м	0,4–30 м
Поле зрения	19°×19°	38°×38°	±5′	90°×90°
Предельная погрешность измерения:				
– угловых координат,	19,3″	2″	3,9″	13″
– линейных смещений	3 мм*)	0,8 мм*)		
Частота выходных данных	2 Гц	10 Гц	–	10 Гц
Масса	23,6 кг	–	6,14 кг	2,3 кг
Потребляемая мощность	55 Вт	–	3,5 Вт	30 Вт
Диапазон рабочих температур	–15–+20 °С	–	–	–40–+50 °С

*) линейные смещения вычисляются на основе данных измерений и результатов наземной паспортизации.
**) третий угол определяется базовым методом на основе измерений двух приборов ATS, разнесённых в пространстве.

с характеристиками описанных в литературе бортовых систем контроля положения объектов, а по массе и полю зрения — в несколько раз более жёсткие.

3. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА И РЕЖИМЫ РАБОТЫ УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

Принцип действия прибора основан на засветке контрольных элементов и приёме отражённого от них излучения, преобразовании его в электрические сигналы с помощью матричного приёмника излучения на активных пикселах. По информации, содержащейся в выходных сигналах приёмника, в вычислительном устройстве прибора определяются угловые координаты направлений на КЭ в приборной системе координат.

Функциональная схема прибора приведена на рис. 2. На этой схеме термоэлементы (ТЭМО) представляют собой элементы Пельтье, осуществляющие охлаждение или подогрев фотоприёмных матриц и осветителей. Другие обозначения на схеме – SD — светодиод, ТД — термодатчик, ШИМ — широтно-импульсная модуляция, ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема, JTAG — технологический интерфейс JTAG.

Функциональная схема углоизмерительного прибора состоит из следующих узлов:

1) двух осветительных каналов;
2) двух приёмных каналов;
3) устройства управления осветительными каналами и поддержания температуры на КМОП-матрицах и светодиодах;
4) вычислительного устройства;
5) блока питания;
6) информационного интерфейса.

Осветитель *1* и осветитель *2* предназначены для освещения рефлектора и облучателя КТА, на поверхности которых размещены КЭ — уголковые отражатели в оправе в угловом поле 90°. Осветители установлены на корпусах объективов, каждый из которых состоит из семи светодиодов.

Устройства приёмные *1* и *2* выполнены на основе фотоприёмной КМОП-матрицы формата 1024×1024. В КМОП-матрице происходит накопление оптических сигналов, отражённых от КЭ, в течение заданного времени, считывание аналоговой информации с каждого пиксела и оцифровка сигналов внутренним 10-разрядным АЦП. При измерении температуры используются аналоговые входы АЦП фотоприёмной КМОП-матрицы, которые коммутатором поочередно подключаются для преобразования аналоговых сигналов схемы измерения в 10-разрядный параллельный код.

Устройство управления содержит ШИМ-регуляторы (модулятор ширины импульса) для регулировки питающего тока термоэлементов матриц и осветителей, генераторы тока для питания светодиодов осветителей.

Устройство вычислительное предназначено для управления работой, чтения и обработки информации с КМОП-матриц, формирования выходной информации об углах направления на КЭ, передачи её по интерфейсу МКО и интерфейсу Space Wire в бортовой вычислитель КА, фотографирования рефлектора, обработки фотографий для передачи или хранения, а также для приёма и выполнения команд управления прибором, поступающих от бортового вычислителя КА по интерфейсам МКО и Space Wire.

Блок питания преобразует напряжения бортовой сети 27 В во вторичные напряжения +5,0 В,

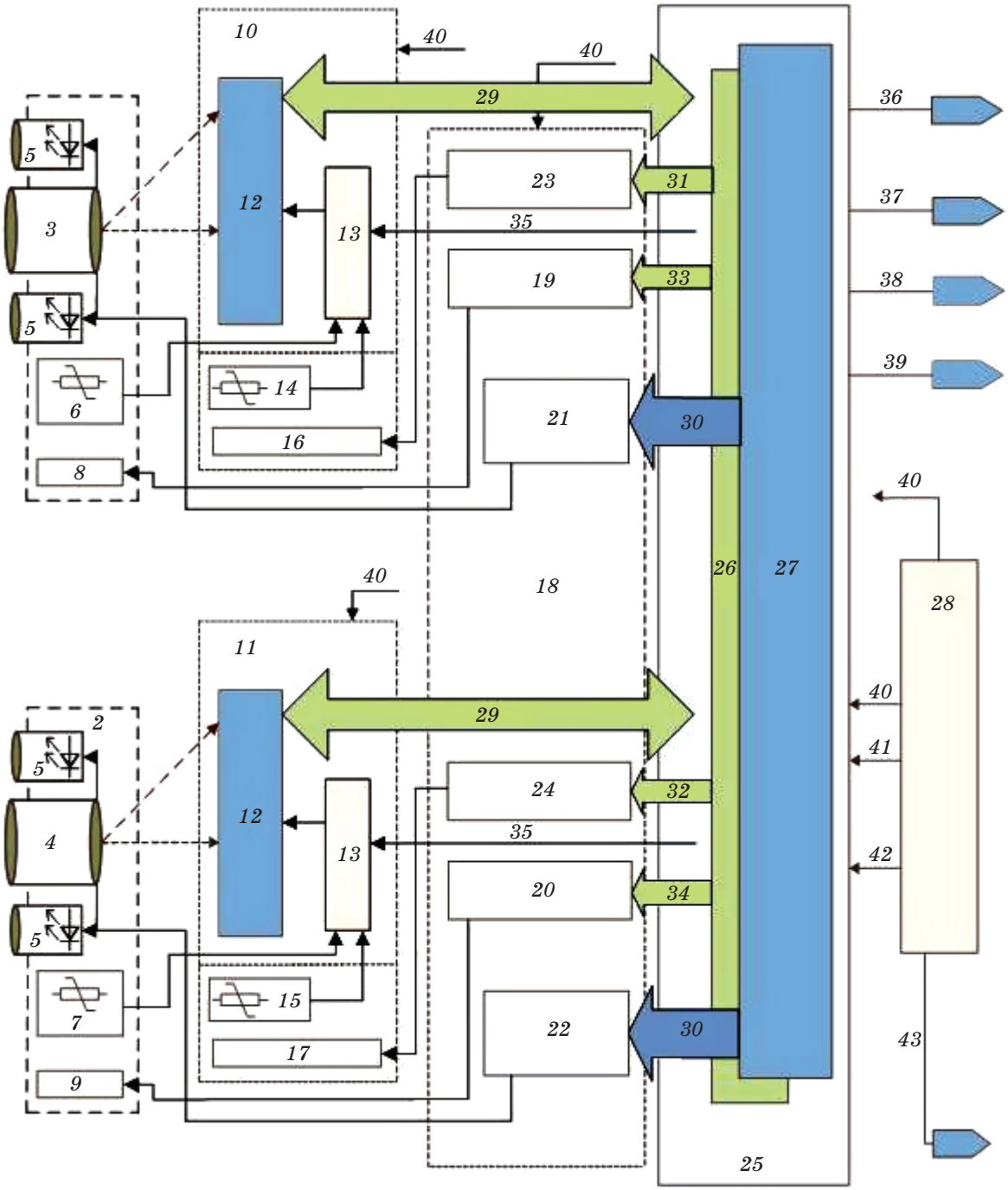

Рис. 2. Функциональная схема углоизмерительного прибора. *1* — осветитель 1; *2* — осветитель 2; *3* — объектив 1; *4* — объектив 2; *5* — SD; *6* — ТД_Осв.1; *7* — ТД_Осв.2 ; *8* — ТЭМО_Осв.1; *9* — ТЭМО_Осв.2; *10* — устройство приёмное_1; *11* — устройство приёмное_2; *12* — КМОП-матрица; *13* — схема опроса термодатчиков; *14* — ТД_М1; *15* — ТД_М2; *16* — ТЭМО_М1; *17* — ТЭМО_М2; *18* — устройство управления; *19* — терморегулятор осветителя_1; *20* — терморегулятор осветителя_2; *21* — устройство управления осветителем_1; *22* — устройство управления осветителем_2; *23* — терморегулятор_М1; *24* — терморегулятор_М2; *25* — устройство вычислительное; *26* — ПЛИС; *27* — микроконтроллер; *28* — блок питания; *29* — упр. сигн. матрицы; *30* — упр. сигн. освет.; *31* — ШИМ_М1; *32* — ШИМ_М2; *33* — ШИМ_Осв.1; *34* — ШИМ_Осв.2; *35* — опрос ТД; *36* — интерфейс МКО; *37* — интерфейс Space Wire_1; *38* — интерфейс Space Wire_2; *39* — JTAG; *40* — +5 В; *41* — +1,8 В; *42* — +3,3 В; *43* — питание 27 В. Термоэлементы представляют собой элементы Пельтье, осуществляющие охлаждение или подогрев матриц и осветителей.

3,3 В, 1,8 В для питания вычислителя, устройств приёмных, осветителей и терморегуляторов.

После включения прибора и завершения инициализации он переходит в режим готовности. В данном режиме изделие осуществляет только проверку внутренних систем прибора, выполняет операции, требуемые для поддержания нормальной работы прибора.

Одной из основных операций является операция измерения температуры матриц ТД_М1, ТД_М2 и посадочных мест ТД_Осв.1, ТД_Осв.2 светодиодов осветителей, если температура соответствует установленному диапазону, прибор переходит в режим готовности.

Если температура матриц и посадочных мест светодиодов осветителей находится не в заданном диапазоне, включаются терморегуляторы. При достижении температуры 35 °С на матрицах и посадочных местах светодиодов прибор, автоматически поддерживая установившуюся температуру, переходит в режим готовности и может переходить по командам бортового вычислителя в один из следующих режимов:

– режим обнаружения;
– режим измерения;
– режим автоизмерения;
– режим фотографирования;
– режим передачи фотоснимков.

В режиме обнаружения прибор осуществляет поиск и обнаружение КЭ в зоне измерения 90°. После завершения обнаружения прибор выдаёт по команде информацию о результатах поиска и предварительную информацию об угловых координатах направления на КЭ.

В режиме измерения прибор «одноразово» определяет и выдаёт по команде информацию об угловых координатах направления на КЭ в системе координат, связанной с фотоприёмными матрицами.

В режиме автоизмерения прибор циклически осуществляет автоматическое измерение угловых координат направления на КЭ в системе координат, связанной с фотоприёмными матрицами. Дополнительно выдаёт по команде информацию о координатах изображения КЭ в плоскости фотоприёмных КМОП-матриц на момент поступления команды.

В режиме фотографирования по команде прибором осуществляется фотографирование конструкции КА и сохранение фотоснимков в памяти прибора.

В режиме передачи фотоснимков осуществляется поблочная передача в бортовой вычислитель фотоснимков, полученных в режиме фотографирования. Режим организовывается в приборе при получении специальной команды из любого режима. Передача фотоснимков происходит по команде, содержащей адрес конкретного фотоснимка и подадрес передаваемой его части, хранящейся в памяти прибора.

4.ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты выполняемой в АО «НПП «Геофизика-Космос» разработки углоизмерительного прибора контроля геометрических параметров крупногабаритных антенн КА с полем зрения 90°, определяющего угловые координаты расположенных на антеннах КЭ с погрешностью не более 13″ при количестве контрольных элементов до 50 и расстоянии до них 30 м и обеспечивающего фотографирование антенны на любом участке орбиты. Разработка прибора находится на этапе экспериментальной отработки изготовленных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Wargocki F., Ray A., Hall G.* Retroreflector field tracker // Proc. SPIE. 1984. V. 501. P. 283.
2. *Wang S.J., Cameron J.M.* Dynamics and control of a large space antenna // Journal of Guidance, Control and Dynamics. 1984. V. 7. № 1. P. 69–76.
3. *Schenkel F.W., Heins R.J.* The Magsat three axis arc second precision altitude transfec system // J.B.I.S. 1981. V. 34. P. 539–546.
4. *Дорофеев М.О., Титов Г.П., Матыленко М.Г., Бикеев Е.В.* Выбор приборного состава системы определения геометрии крупногабритной трансформируемой антенны // Решетневские чтения: материалы XV Междунар. науч. конф. (10–12 нояб. 2011. г. Красноярск) в 2 ч / Под общ. ред. Ю.Ю. Логинова. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2011. С. 98–99.
5. *Дорофеев М.О.* Методика определения пространственного положения недеформируемой конструкции космического аппарата // Авиационная и ракетно-космическая техника. Вестник СибГАУ. Т. 16. № 2. С. 395–399.
6. *Collyer P.W., Schenkel F.W.* A three-axis angular monitoring system for the magnetic field satellite (Magsat) mission // SPIE. 1980. V. 251. P. 179–189.
7. *Hinkal S.W.* Magnetic field satellite (Magsat) spacecraft vector magnetometer calibration // SPIE. 1980. V. 251. P. 190.