
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 520.6: 629.78

Г. А. Аванесов, Р. В. Бессонов, А. А. Форш, М. И. Куделин

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ПРИБОРОВ ЗВЕЗДНОЙ ОРИЕНТАЦИИ СЕМЕЙСТВА БОКЗ

Приводится краткое описание истории развития созданных в Институте космических исследований РАН приборов звездной ориентации семейства БОКЗ и рассматриваются дальнейшие пути их совершенствования с применением КМОП-матриц и ПЛИС. Представлены различные конфигурации звездных датчиков ориентации с выносными оптическими головками. Обоснована целесообразность включения в состав звездных приборов ориентации трехосных датчиков угловой скорости на основе технологий МЭМС.

Ключевые слова: космический аппарат, звездный датчик ориентации, БОКЗ, ПЗС-матрица, КМОП-матрица, оптическая головка, датчик угловой скорости, МЭМС.

В последнее десятилетие в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН, Москва) накоплен значительный опыт по разработке, наземным испытаниям и эксплуатации на борту космических аппаратов (КА) приборов звездной ориентации, получивших название „Блок определения координат звезд“ (БОКЗ). Первое поколение приборов БОКЗ в течение 10 лет функционировало на КА „Ямал-100“, начиная с 2000 г. функционирует на МКС [1] и с 2003 г. — на КА „Ямал-200“.

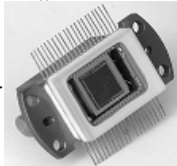
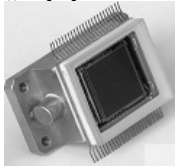
Следующее поколение приборов, получивших название БОКЗ-М [2—4], эксплуатируется в космосе с 2004 г. На данный момент в ИКИ РАН создано более 120 звездных приборов, 51 из которых запущены в космос на 25 КА с суммарной наработкой в космическом пространстве более 1,2 млн. ч. Кроме того, на разных стадиях наземной отработки находятся еще не менее 10 КА, укомплектованных различными модификациями приборов БОКЗ.

Следуя за возрастающими потребностями космической техники, на протяжении этих лет в Институте ведется последовательная модернизация аппаратных и программных средств приборов БОКЗ. Это позволяет повысить помехозащищенность приборов к воздействию факторов космического пространства [5] по сравнению с первыми образцами примерно на три порядка. Время начального распознавания звезд при априори неизвестной ориентации сократилось со 100 до 8 с. Более чем в 10 раз возросла частота обновления информации об ориентации. Диапазон угловых скоростей КА, при которых приборы сохраняют работоспособность, расширился в 25 раз и составил величину $6^\circ/\text{с}$.

Для наземной отработки приборов в ИКИ РАН создана и постоянно совершенствуется стендовая база [6—9]. Кроме того, созданы средства для отработки звездных приборов в составе КА.

В существующем виде приборы семейства БОКЗ пригодны для длительной непрерывной эксплуатации практически на всех типах отечественных КА, что подтверждено рядом космических проектов.

Во всех приборах семейства БОКЗ используются в качестве фотоприемных устройств отечественные ПЗС-матрицы „Лев“ и „Лев-3“ производства ОАО ЦНИИ „Электрон“ (Санкт-Петербург) и матрица „Сфера-1000“ производства ЗАО НПП „Элар“ (Санкт-Петербург). Основные параметры этих ПЗС-матриц приведены ниже.

	„Лев-3“	„Сфера-1000“
Внешний вид ПЗС-матрицы.....		
Размер фотозоны, пкс.....	512×512	1024×1024
Размер фотозоны, мм.....	8,2×8,2	16,4×16,4
Размер пиксела, мкм.....	16×16	16×16
Зарядовая вместимость, тыс. эл.....	280	180
Крутизна преобразования выходного устройства, мкВ/эл, не менее.....	3,5	5
Динамический диапазон, не менее.....	7000	8000
Рабочая частота типовая/максимальная, МГц.....	2/3	1/12
Квантовая эффективность, %, не менее, на длинах волн, нм:		
550.....	45	34
700.....	45	45
950.....	10	13
Корпус.....	Металлокерамический, газонаполненный со встроенной термоэлектрической батареей (ТЭБ)	
Максимальная мощность ТЭБ, Вт.....	4	10

Данные ПЗС-матрицы представляют собой высоконадежные полнокадровые приборы, выпускаемые в охлаждаемых корпусах и предназначенные специально для использования в звездных датчиках ориентации КА. Такие приборы и их прототипы успешно применяются в отечественной космической технике начиная с 1980-х гг. На их основе были созданы съемочные устройства для проектов „ВЕГА (1984—1986 гг.) и „ФОБОС“ (1988—1989 гг.). Кроме того, несколько позже, для проекта „МАРС-96“ была разработана „навигационная камера“, входившая в состав научного комплекса и представлявшая собой полностью автономный широкопольный звездный датчик ориентации. Впоследствии он и стал прототипом приборов семейства БОКЗ.

В соответствии с первоначальным замыслом на базе двух типов ПЗС-матриц с одинаковым размером элементов (16×16 мкм), но разным форматом (8×8 мм — „Лев“, 16×16 мм — „Сфера-1000“) предполагалось построить четыре типа звездных датчиков, различающихся по точности измерений, быстродействию и габаритам. В табл. 1 приведены ключевые параметры звездных датчиков [9—12], которые планировались к разработке на старте программы около 15 лет назад.

Как видно из табл. 1, наиболее востребованными оказались приборы с полем зрения 8×8° на основе ПЗС-матрицы форматом 8×8 мм. Потребность в малогабаритных и менее точных приборах типа БОКЗ-МФ оказалась ниже, чем ожидалось. Приборы типа БОКЗ-М60/1000 на основе матрицы форматом 16×16 мм только начинают применяться, а потребность в более точном приборе БОКЗ-М120/1000 в настоящее время лишь формируется.

В какой-то степени потребность в более точном приборе на некоторое время снизилась в результате того, что уже в 2000—2001 гг. был реализован алгоритм совместной обработки данных, поступающих от двух синхронно работающих датчиков, устанавливаемых на борту ортогонально. При этом по каждому из приборов берутся показания по углам вращения вокруг осей X и Y , измеряемые с высокой точностью, и исключаются данные о вращении вокруг оси Z , измеряемые с низкой точностью. В результате удалось получить равноточные измерения параметров ориентации КА по всем трем осям. Например, в проекте „Ресурс-П“ точность привязки каждого элемента снимков к координатам земной поверхности [13—16] составила примерно 10 м, что соответствует точности угловых измерений на уровне 2".

Таблица 1

Параметр	Звездный датчик			
	БОКЗ-МФ	БОКЗ, БОКЗ-У, БОКЗ-М, БОКЗ-М60	БОКЗ-М60/1000	БОКЗ-М120/1000
	На ПЗС-матрице „Лев“		На ПЗС-матрице „Сфера-1000“	
Фокусное расстояние объектива, мм	32	60	60	120
Относительное отверстие объектива	1:1,7	1:2	1:2	1:3
Угол поля зрения, ...°	15×15	8×8	16×16	8×8
Угловая разрешающая способность, ..."/элемент	100	55	55	27
Предельная звездная величина	5,8	7,5	5,8	7,5
Случайная составляющая погрешности измерений*, ...":				
— $\sigma_{x,y}$	5—7	1,5—2,5	1,5—2,5	0,7—1,2
— σ_z	20—30	25—30	15—25	15—25
Частота обновления информации, Гц	1—4	0,3—1	4	1—4
Масса, кг	1,8	4,5	4,5	6

Пр и м е ч а н и е . *Параметр измеряется в наземных условиях при наблюдении естественного движения звезд небесной сферы.

Таким образом, намеченная 15 лет назад программа создания и развития приборов семейства БОКЗ в целом выполнена, хотя возможности дальнейшего совершенствования и развития звездных датчиков ориентации на основе ПЗС-матриц типа „Лев“ и „Сфера-1000“ до сих пор не исчерпаны [17], а их реализация лишь вопрос времени и наличия потребности. Однако пришло время наметить новые рубежи, исходя из возможностей современной элементной базы.

Развитие звездных датчиков ориентации неизменно идет по пути повышения помехозащищенности приборов к воздействию факторов космического пространства, увеличения частоты и точности измерений, расширения диапазона допустимых угловых скоростей и ускорений движения КА при одновременном снижении массы, габаритов и энергопотребления. Вместе с тем, перечисленные параметры звездных датчиков ориентации должны соответствовать требованиям конкретных типов изделий космической техники, исходя из их назначения. Иными словами, существующий ряд звездных датчиков ориентации семейства БОКЗ должен быть со временем замещен другими приборами, построенными на основе новейшей элементной базы.

Прежде чем перейти к рассмотрению путей дальнейшего развития приборов семейства БОКЗ, следует отметить, что за последнее десятилетие не произошло событий, способных радикально изменить подход к построению звездных датчиков ориентации. Так, например, для наблюдения звезд необходимость ухода из видимой и ближней ИК-областей спектра в какой-либо иной спектральный диапазон отсутствует. Это значит, что подход к выбору оптики звездных приборов пока остается неизменным. В то же время появились новые, более эффективные, чем ПЗС-матрицы, фотоприемные устройства, основанные на КМОП-технологии,

получили дальнейшее развитие программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), высокопроизводительные микропроцессоры, а также миниатюрные датчики угловых скоростей на основе микроэлектромеханики.

Использование новейших достижений в области микроэлектроники позволяет сделать следующий шаг на пути оптимизации основных параметров звездных датчиков ориентации, достичь более высоких их эксплуатационных характеристик при одновременном снижении массы и энергопотребления.

Целесообразность использования современных КМОП-матриц в звездных датчиках ориентации объясняется, в первую очередь, их высоким быстродействием, наличием электронного затвора, относительной простотой формирования окон для слежения за гидирующими звездами. Они широко применяются в наземной видеотехнике и уже используются в звездных приборах фирм “Sodern” (Франция) и “Jena-Optronic” (Германия). Матрицы “Star-1000” и HAS сертифицированы для применения Европейским космическим агентством. На очереди сертификация матриц HAS-2 и HAS-3.

КМОП-матрицы, пригодные для космического применения, на сегодня отсутствуют в отечественном производстве, но должны появиться в не столь отдаленной перспективе, что делает актуальным макетирование приборов на их основе.

По своему быстродействию ПЛИС соответствуют КМОП-матрицам. Сочетание этих двух элементов в одном устройстве образует видеокамеру, специализация которой для решения тех или иных задач наблюдения определяется установленным в ПЛИС специальным математическим обеспечением и использованием соответствующей оптики. Таким образом, появляется возможность построения многоцелевых видеокамер (МЦВК) прикладного назначения, обеспечивающих решение широкого круга задач на основе использования ограниченного числа электронных компонентов.

Выполненное в ИКИ РАН макетирование многоцелевой видеокамеры на основе КМОП-матрицы в сочетании с ПЛИС показало возможность построения малогабаритного устройства с низким энергопотреблением, в равной степени пригодного для использования при решении, казалось бы, весьма разнородных задач:

- наблюдения лунной поверхности с посадочного космического аппарата,
- наблюдения Солнца в целях определения параметров ориентации,
- наблюдения звезд в целях определения параметров ориентации.

Не останавливаясь на рассмотрении специфических особенностей решения первых двух задач, выходящих за рамки темы данной статьи, отметим лишь, что необходимое для них математическое обеспечение ПЛИС было создано с относительно малыми затратами труда.

Задача наблюдения звезд в целях определения ориентации была усложнена требованием многократного сокращения объема информации, поступающей от КМОП-матрицы для последующей обработки. Правомерность этого требования связана с тем, что независимо от размерности используемого матричного приемника излучения в сочетании с оптимизированным для него объективом изображение каждой наблюдаемой звезды содержит не более нескольких десятков пикселей. При определении параметров ориентации для дальнейшей обработки обычно выбираются не более 20—30 наиболее ярких звезд. Таким образом, в процессор, осуществляющий обработку, должно поступать порядка 1000 пикселей. Все остальные должны отсеиваться на этапе предварительного анализа исходных изображений участков небесной сферы в реальном масштабе времени.

Поставленная задача была успешно решена с помощью специального фильтра пространственных частот (ФПЧ), установленного в ПЛИС. При этом фильтр эффективно „парирует“ как неоднородность светового фона изображения, так и точечные объекты, возникающие на матрице под воздействием протонной бомбардировки.

Различные виды ФПЧ используются во всех приборах семейства БОКЗ. В первых образцах приборов, в том числе используемых до настоящего времени на МКС и КА „Ямал-200“, где звездные датчики представляют собой выносные оптические головки (ОГ), а обработка данных ведется в бортовой вычислительной машине (БВМ), реализация фильтра осуществлялась аппаратно-программным путем на большом матричном кристалле. В дальнейшем ФПЧ был усложнен и включен в состав математического обеспечения процессора звездного датчика ориентации в моноблочном исполнении. Теперь ФПЧ снова выводится из процессора и реализуется в ПЛИС. Обработка данных ведется в реальном времени в темпе считывания информации с КМОП-матрицы со скоростью 64 Мпкс/с, что соответствует 16 кадрам/с. Указанная частота обновления информации при этом не является предельной, предельная частота определяется временем накопления полезного сигнала. В рассматриваемом примере при использовании КМОП-матрицы CMV-4000 фирмы CMOSIS (Бельгия) с числом пикселей 2048×2048 размером $5,5 \times 5,5$ мкм и форматом матрицы 11×11 мм, а также объективом с фокусным расстоянием 36 мм и относительным отверстием 1:1,2 время накопления может составлять 30 мс.

Здесь необходимо пояснить, что ФПЧ используется в приборах БОКЗ только на этапе решения задачи начальной ориентации, для чего в обработку принимается всего 2—4 кадра. Далее прибор переходит в режим слежения, используя рассчитываемые процессором прогнозируемые параметры углового движения КА, формирует „окна“ вокруг ожидаемых положений гидирующих звезд на очередном кадре и считывает с матрицы значительно меньший объем информации, чем содержится в полном кадре. Предельная частота обновления информации об ориентации в приведенном примере составляет 25—30 Гц. При этом угловая разрешающая способность составляет величину около $30''$ в поле зрения $17 \times 17^\circ$, а необходимая предельная звездная величина — 5,8.

Обратимся вновь к табл. 1. Угловая разрешающая способность всех приведенных в ней приборов лежит в пределах от 100 до $27''$. Таким образом, оптическая головка с приведенными выше параметрами способна заместить все четыре варианта созданных ранее приборов, имея при этом значительные преимущества как по быстродействию, так и по энергетическим и массогабаритным характеристикам. В то же время ничто не мешает сделать на базе той же МЦВК оптическую головку с более длиннофокусным объективом, увеличив тем самым угловую разрешающую способность. Потребность в более высокоточных приборах невелика, однако она существует, например, для использования в составе систем управления астрономическими обсерваториями космического базирования, таких как „Спектр-УФТ“ и „Спектр-М“.

Опуская промежуточные рассуждения, отметим, что в рамках проводимых разработок перспективных звездных приборов планируется создание не менее двух типов МЦВК на основе КМОП-матриц форматом 11×11 мм, что фактически уже сделано, и матрицы форматом не менее 22×22 мм. Оптические головки на базе этих МЦВК могут иметь объективы с фокусным расстоянием до 200 мм. Ожидаемые ключевые параметры перспективных оптических головок приведены в табл. 2.

Как уже упоминалось, МЦВК, состоящая из КМОП-матрицы и ПЛИС с установленным специальным математическим обеспечением, может представлять собой функционально законченное устройство и иметь при этом весьма малые габариты и низкое энергопотребление. В реализованном в ИКИ РАН макете многоцелевая видеокамера — это бескорпусное устройство массой менее 100 г с энергопотреблением около 1 Вт. Дополненное объективом и свето-защитной блендой устройство представляет собой выносную оптическую головку звездного датчика ориентации. При этом масса ОГ определяется в основном массой корпуса и оптических элементов.

По аналогичному пути идет и мировая практика. Так, например, компанией “Sodern” разработана система “Hydra”, в которой резервированный вычислительный блок обрабатывает показания нескольких выносных оптических головок, по показаниям любых двух из них строится равноточная трехосная ориентация и принимается решение о включении в работу оптических головок требуемой конфигурации.

Таблица 2

Параметр	Оптическая головка			
	ОГ36/2000	ОГ80/2000	ОГ90/5000	ОГ200/5000
Число пикселей КМОП-матрицы ¹	2048×2048	2048×2048	5120×3840	5120×3840
Фокусное расстояние объектива, мм	36	80	90	200
Относительное отверстие объектива	1:1,2	1:2	1:2	1:2
Угол поля зрения, ...°	17,5×17,5	8×8	21×14	9×6
Угловая разрешающая способность, ..."/элемент	32	15	15	7
Предельная звездная величина	5,8	7,5	5,8	7,5
Случайная составляющая погрешности измерений ² , ...":				
— $\sigma_{x,y}$	0,7—1,2	0,4—0,5	0,3—0,4	0,1—0,2
— σ_z	7—10	4—6	2—3	2—3
Максимальная частота обновления информации, Гц	30	20	100	50
Масса ³ , кг	0,5—0,8	0,7—0,9	1,2—1,5	2,5—3,2

Примечания.

1. В макете МЦВК использована КМОП-матрица CMV 4000 фирмы CMOSIS. Для расчета параметров ОГ90/5000 и ОГ200/5000 взяты данные КМОП-матрицы CMV-20000 той же фирмы.

2. Параметр измеряется в наземных условиях при наблюдении естественного движения реальной небесной сферы макетом ОГ36/2000. Данные по остальным оптическим головкам получены расчетным путем.

3. Ожидаемая масса всех оптических головок определена с учетом массы объектива, светозащитной бленды, корпусных и крепежных элементов. Масса электронных узлов принята равной 0,1 кг.

На рис. 1 показаны три варианта конфигурации звездных датчиков ориентации на основе оптических головок.

Классический звездный датчик в моноблочном исполнении (рис. 1, а) позволяет получить надежное решение задачи определения ориентации в случаях, когда для данного типа КА достаточной является точность измерений, производимых одним работающим прибором, либо когда непосредственно БВМ осуществляет обработку данных, поступающих от нескольких приборов, в целях повышения точности.

Свои преимущества имеет схема (рис. 1, б) из нескольких выносных оптических головок, подключенных к резервированному блоку обработки данных (БОД). В этой схеме БВМ использует готовые результаты расчетов, так как БОД самостоятельно анализирует работу ОГ и управляет ими, при этом решается задача равноточной трехосной ориентации. В то же время БОД может формировать априорные данные для одной оптической головки по показаниям других, повышая тем самым помехозащищенность системы. Блок обработки данных может быть реализован как в „холодном“, так и в „горячем“ резерве и может использовать от одной до четырех оптических головок. Схема БОД-ОГ является наиболее гибкой в настройке при адаптации к использованию на разных КА.

Схема непосредственного подключения оптических головок к БВМ представляется наиболее надежной и перспективной (рис. 1, в). Однако ее использование возможно только в случае, когда БВМ располагает достаточными вычислительными ресурсами. Кроме того, следует учитывать, что при этом возникают дополнительные трудности при отработке программно-математического обеспечения анализа данных оптических головок.

Нет смысла отдавать предпочтение одному из рассмотренных вариантов: в зависимости от условий применения каждый из них может оказаться востребованным. Соответственно для конструирования звездных датчиков нового поколения выбирается блочно-модульная архитектура, состоящая из оптических головок и блоков обработки данных, что позволяет создавать требуемую конфигурацию.

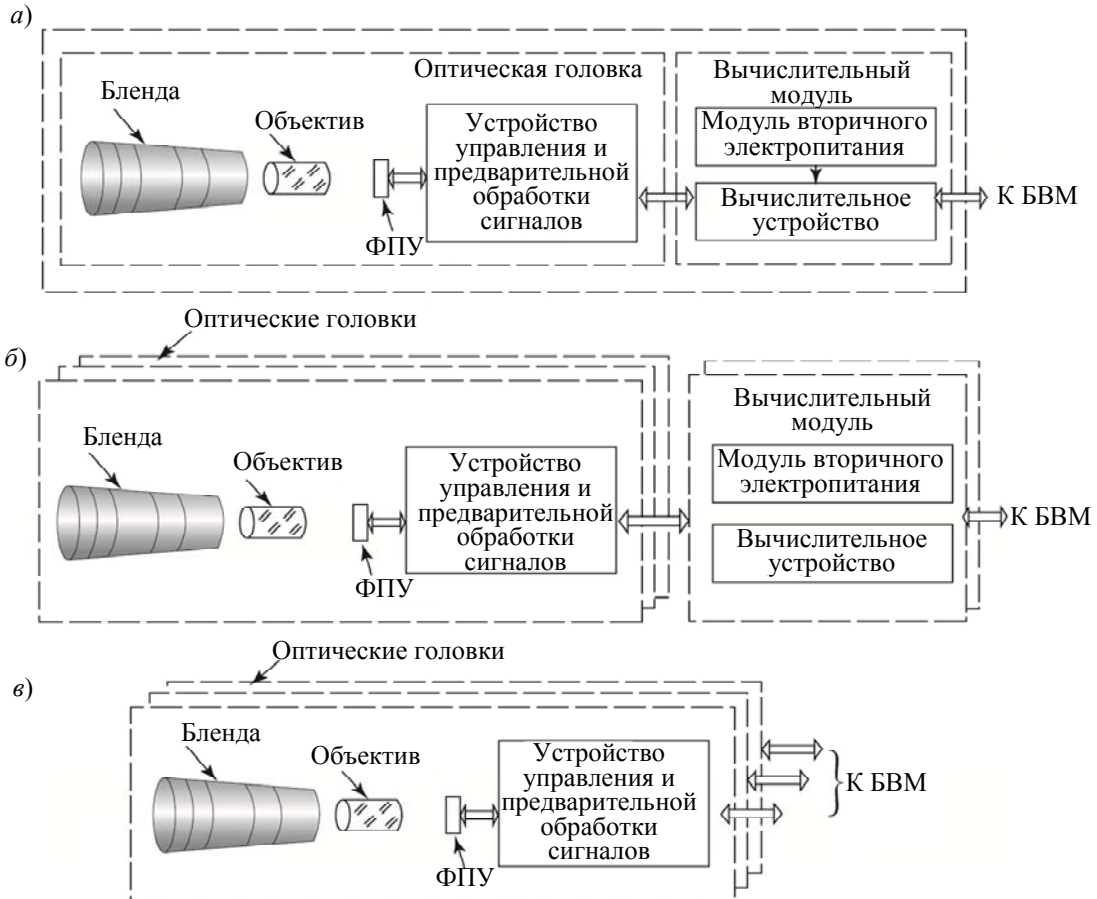


Рис. 1

Следует также учитывать, что появление новейших быстродействующих радиационно-стойких ПЛИС со встроенным вычислительным ядром позволит в ближайшей перспективе превратить оптические головки в моноблочные звездные датчики ориентации, что станет следующим шагом в эволюции этого класса приборов.

При разработке программно-математического обеспечения звездных датчиков большое внимание уделяется мерам по исключению возможности ложного определения параметров ориентации. Как правило, эта цель достигается — в приборах семейства БОКЗ вероятность ложного определения ориентации доведена до пренебрежимо малой величины. Однако при непрерывной работе приборов на борту КА в течение многих лет все же фиксируются единичные случаи появления ложных измерений. Анализ таких случаев показывает, что они происходят во время повышенной солнечной активности, когда фотоприемное устройство бомбардируется потоком протонов с высокой плотностью, эквивалентным светооптическим помехам. Картина звездного неба нарушается и может быть неверно интерпретирована прибором.

Возможность появления подобных событий обычно предусматривается заранее, и они „парируются“ системой управления КА, имеющей, как правило, несколько источников информации о его угловом движении. Вместе с тем, задача исключения возможности ложных измерений непосредственно в звездном датчике ориентации остается актуальной. Один из способов ее решения заключается в установке в звездный датчик малогабаритных датчиков угловой скорости (ДУС) на основе технологий микроэлектромеханики (МЭМС).

Работы в этом направлении ведутся в ИКИ РАН на протяжении нескольких лет [18—21]. В частности, был создан и исследован трехосный ДУС, который впоследствии был установлен в макет звездного датчика ориентации типа БОКЗ-МФ. На макете отрабатывались следующие функции ДУС:

- определение начальных условий движения КА при включении звездного датчика;
- „парирование“ ложных измерений путем сравнения показаний оптического и инерциального каналов измерений;
- замещение показаний оптического канала измерений данными, поступающими от ДУС, при кратковременных засветках.

Макетирование трехосного узла ДУС показало, что устройство с приемлемыми для эксплуатации параметрами может иметь массу около 30 г, энергопотребление 0,5 Вт при весьма малых габаритах, допускающих его установку в многоцелевую видеокамеру практически без изменения ее массогабаритных характеристик. Обработка данных ДУС осуществляется в основном в ПЛИС.

Эксперименты дали положительные результаты, однако при отработке прибора возникли значительные трудности. Для одновременной работы оптического и инерциального каналов измерений необходимо наличие звезд в поле зрения прибора и реальное угловое движение КА. Потребовалось создание специального стенда, работа над которым в настоящее время завершена. Схема и фотоизображение стенда приведены на рис. 2.

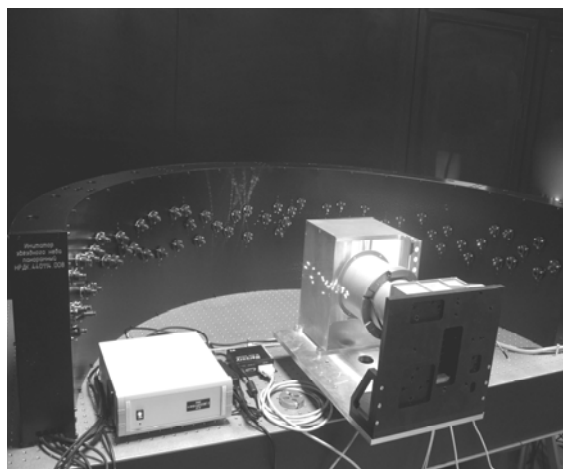
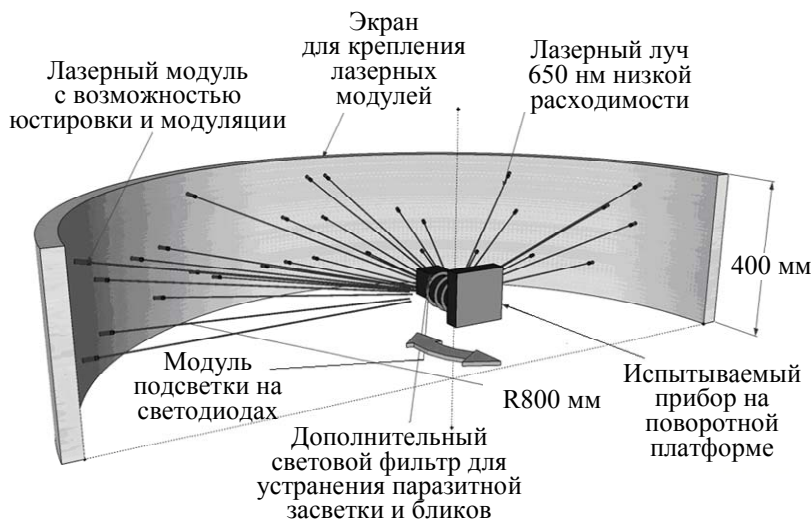


Рис. 2

Представляется целесообразным внедрение трехосного узла ДУС в базовую конфигурацию многоцелевой видеокамеры, что позволит получать дополнительную информацию при различных вариантах ее использования: при съемке объектов наблюдения с борта КА, имею-

шего высокую скорость углового движения, с помощью ДУС можно определить оптимальное время экспозиции; использование ДУС в составе солнечного датчика позволит дополнить информацию об ориентации параметрами углового движения.

На рис. 3 показан действующий макет звездного датчика ориентации, состоящий из двух оптических головок и резервированного блока обработки данных.

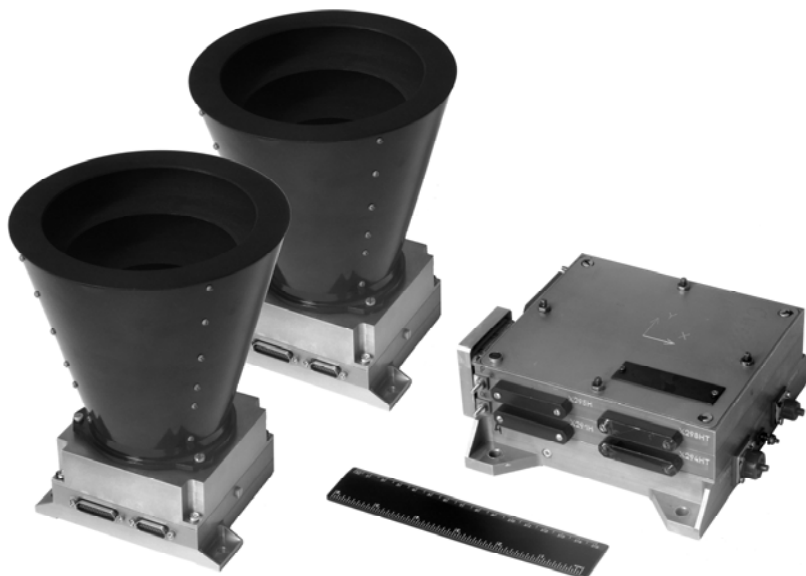


Рис. 3

Завершая рассмотрение перспектив развития звездных датчиков ориентации семейства БОКЗ, подведем некоторые итоги.

1. Приборы звездной ориентации семейства БОКЗ, разработанные ИКИ РАН и эксплуатируемые на многих отечественных КА, имеют перспективы дальнейшего практического использования в существующем виде. Кроме того, возможно их дальнейшее развитие, ведущее к улучшению эксплуатационных характеристик путем совершенствования схемных решений, программно-математического обеспечения и замены отдельных электронных компонентов на более современные.

2. Появление новых электронных компонентов, таких как фотоприемные устройства на основе КМОП-матриц, ПЛИС, высокопроизводительные микропроцессоры и датчики угловой скорости на базе технологий микроэлектромеханики, позволяет создать новое поколение звездных датчиков ориентации с существенно более высокими эксплуатационными характеристиками при значительно меньших габаритах, массе и энергопотреблении.

3. Выполненные в ИКИ РАН экспериментальные разработки дают основание предложить к использованию в составе звездных датчиков ориентации современные КМОП-матрицы в сочетании с ПЛИС, которые образуют многоцелевую видеокамеру, пригодную для решения и других задач наблюдения. Специализация МЦВК для решения тех или иных задач осуществляется путем использования соответствующей оптики и установленного в ПЛИС программно-математического обеспечения.

4. Звездный датчик на базе МЦВК с объективом, определяющим угловые параметры прибора, и программно-математическим обеспечением, осуществляющим фильтрацию пространственных частот в целях выделения звезд на изображении участка небесной сферы и формирование „окон“ для слежения за гидирующими звездами, представляет собой выносную оптическую головку. Происходящее в процессе указанных видов обработки глубокое сжатие исходных данных позволяет использовать для определения ориентации как специальные вычислительные устройства, так и БВМ системы управления движением КА.

5. Исследования показывают целесообразность включения в состав МЦВК трехосных датчиков угловой скорости на основе технологий микроэлектромеханики. Показания датчиков позволяют упростить определение начальных условий работы звездного датчика ориентации и повысить его помехозащищенность при воздействии факторов космического пространства. Полезны они и при использовании МЦВК для других целей.

6. При конструировании перспективных звездных датчиков ориентации предполагается использовать блочно-модульную архитектуру, что позволит создавать как моноблочные компоновки приборов, так и использовать разное число оптических головок в сочетании с резервированными блоками обработки данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аванесов Г. А., Дунаев Б. С., Красиков В. А., Куделин М. И., Форш А. А. Датчики звездной ориентации семейства БОКЗ. Опыт 11-летней эксплуатации в космосе // Тез. докл. II Всерос. науч.-техн. конф. „Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов“, Таруса, 13—16 сент. 2010 г. М.: ИКИ РАН, 2010.
2. Аванесов Г. А., Форш А. А., Бессонов Р. В., Зиман Я. Л., Куделин М. И., Залялова Р. Г. Звездный координатор БОКЗ-М и перспективы его развития // Материалы XIV Санкт-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 28—30 мая 2007 г. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2007. С. 199—205.
3. Аванесов Г. А., Воронков С. В., Форш А. А., Куделин М. И. Звездные координаторы систем ориентации космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 4. С. 66—69.
4. Определение вращательного движения космического аппарата в режиме астрокоррекции по измерениям звездного датчика БОКЗ-М / Г. А. Аванесов, В. А. Красиков, А. В. Никитин, В. В. Сазонов. М., 2010. Препринт / ИПМ им. М. В. Келдыша, № 30.
5. Аванесов Г. А., Акимов В. В., Воронков С. В. Исследование влияния заряженных частиц на функционирование астронавигационных приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 4. С. 79—83.
6. Аванесов Г. А., Воронков С. В., Форш А. А. Стенд для динамических испытаний и геометрической калибровки астронавигационных приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 4. С. 74—79.
7. Аванесов Г. А., Зиман Я. Л., Форш А. А. Динамические испытания систем управления полетом искусственных спутников Земли // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2005. № 9.
8. Аванесов Г. А., Кондратьева Т. В., Никитин А. В., Шамис В. А. Моделирование работы приборов звездной ориентации в наземных условиях // Материалы выездного семинара ИКИ РАН „Космическое приборостроение“, Таруса, 7—9 июня 2006 г. М.: ИКИ РАН, 2006. С. 16—17.
9. Аванесов Г. А., Дементьев В. Ю., Мыслик Е. А. Результаты проведения лабораторных испытаний датчика звездной ориентации БОКЗ-МФ на динамическом стенде // Тез. докл. Второй Всерос. науч.-техн. конф. „Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов“, Таруса, 13—16 сент. 2010 г. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 41—42.
10. Аванесов Г. А., Красиков В. А., Никитин А. В. Исследование точностных характеристик датчиков астроориентации КА семейства БОКЗ-М // Материалы выездного семинара ИКИ РАН „Космическое приборостроение“, Таруса, 7—9 июня 2006 г. М.: ИКИ РАН, 2006. С. 71—83.
11. Оценка точности определения параметров ориентации осей систем координат астроизмерительных приборов семейства БОКЗ / Г. А. Аванесов, В. А. Красиков, А. В. Никитин, В. В. Сазонов. М., 2009. Препринт / ИПМ им. М. В. Келдыша, № 70.
12. Оценка точности определения параметров ориентации осей систем координат астроизмерительного прибора БОКЗ-М по экспериментальным данным / Г. А. Аванесов, В. А. Красиков, А. В. Никитин, В. В. Сазонов. М., 2010. Препринт / ИПМ им. М. В. Келдыша, № 74.
13. Аванесов Г. А., Зиман Я. Л., Куделин М. И., Новиков Б. С., Форш А. А. Комплекс координатно-временного обеспечения оперативной географической координатной привязки видеоданных, получаемых с КА „Метеор-М“ // Тез. докл. III Открытой Всерос. конф. „Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса“, Москва, 14—17 ноября 2005 г. М.: ИКИ РАН, 2005.

14. *Аванесов Г. А., Зиман Я. Л., Фори А. А.* Аппаратное обеспечение географической координатной привязки данных ДЗЗ по бортовым навигационным измерениям // *Материалы 2-й науч.-техн. конф. „Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли“*, Адлер, 12—16 сент. 2005 г. М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2005.
15. *Аванесов Г. А.* Оптико-электронные приборы для ориентации КА и съемки земной поверхности // *Тез. докл. IV Открытой Всерос. конф. „Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса“*, Москва, 13—17 ноября 2006 г. М.: ИКИ РАН, 2006.
16. *Никитин А. В.* Использование данных навигационных приборов с целью получения и координатной привязки видеоданных дистанционного зондирования Земли высокого разрешения // *Сб. трудов Всерос. науч.-техн. конф. „Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов“*, Таруса, 22—25 сент. 2008 г. М.: ИКИ РАН, 2009.
17. *Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Куркина А. Н., Мыслик Е. А., Лискив А. С., Людомирский М. Б., Каютин И. С., Ямщиков Н. Е.* Разработка автономной бесплатформенной астроинерциальной навигационной системы // *Сб. трудов Третьей Всерос. науч.-техн. конф. „Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов“*, Таруса, 10—13 сент. 2012 г. М.: ИКИ РАН, 2013. С. 9—29.
18. *Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Дятлов С. А.* Интегрированные приборы определения параметров движения космического аппарата // *Тез. докл. Второй Всерос. науч.-техн. конф. „Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов“*, Таруса, 13—16 сент. 2010 г. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 6—7.
19. *Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Куркина А. Н., Сазонов В. В.* Алгоритмы совместной обработки данных измерений звездных координаторов и датчиков угловой скорости // *Сб. трудов Второй Всерос. науч.-техн. конф. „Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов“*, Таруса, 13—16 сент. 2010 г. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 36—48.
20. *Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Куркина А. Н.* Опыт использования микромеханических датчиков угловой скорости в составе приборов звездной ориентации // *Тез. докл. Третьей Всерос. науч.-техн. конф. „Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов“*, Таруса, 10—13 сент. 2012 г. М.: ИКИ РАН, 2012. С. 10—11.
21. *Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Дятлов С. А., Куркина А. Н., Сазонов В. В.* Вопросы применения микромеханических гироскопов для космических проектов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10, № 4. С. 51—63.

Сведения об авторах

- Генрих Аронович Аванесов** — д-р техн. наук, профессор; Институт космических исследований Российской академии наук, Москва; гл. научный сотрудник;
E-mail: genrikh-avanesov@yandex.ru
- Роман Валерьевич Бессонов** — канд. техн. наук; Институт космических исследований Российской академии наук, Москва; заведующий отделом;
E-mail: besson777@rambler.ru
- Анатолий Анатольевич Фори** — канд. физ.-мат. наук; Институт космических исследований Российской академии наук, Москва; ведущий научный сотрудник;
E-mail: forsh@ofo.iki.rssi.ru
- Михаил Иванович Куделин** — Институт космических исследований Российской академии наук, Москва; гл. конструктор проекта; E-mail: mkudelin@nserv.iki.rssi.ru

Рекомендована Институтом

Поступила в редакцию
26.05.14 г.