

**МНОГОГОЛОВЫЙ ЗВЕЗДНЫЙ ДАТЧИК 348К.
РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ**

А. Ю. Карелин, Ю. Н. Зыбин, В. О. Князев, А. А. Поздняков, Н. И. Фомичев

ОАО «Научно-производственное предприятие «Геофизика–Космос»
Российская Федерация, 107497, г. Москва, ул. Иркутская, д. 11, корп. 1
E-mail: 1102@geocos.su

Рассмотрен многоголовый звездный датчик 348К, разработка которого завершилась в ОАО «НПП «Геофизика–Космос» в 2013 году. Даны описание конструкции, состав и основные характеристики прибора. Из особенностей конструкции стоит выделить монолитный корпус объектива, реализующий одновременно и посадочную плоскость. Также в приборе 348К применена специальная система – канал геометрического эталона, которая является нерасстраиваемой оптической системой и формирует на фотоприемной матрице шесть изображений для автономной оценки и компенсации систематических погрешностей определения ориентации, вызванных термомеханическими воздействиями. Приведена укрупненная программа наземной экспериментальной отработки (НЭО) и подробности наиболее важных испытаний. При испытаниях прибора 348К впервые была внедрена проверка погрешностей в условиях подвижного основания. Испытания на воздействие протонов с энергиями 50, 100 и 200 МэВ под различными углами падения на фотоприемную матрицу (ФПМ) проводились с целью количественной и качественной оценки влияния падающих протонов на изображение. По результатам анализа возникающих устойчивых дефектных пикселей на ФМП было определено, что наибольший прирост дефектов возникает при энергии 200 МэВ. В ходе натурных испытаний были проведены измерения времени построения начальной ориентации. По результатам натурных испытаний были оценены случайные составляющие погрешностей определения ориентации одним блоком оптическим (БО) и двумя БО за 15 мин работы. Задачей натурных испытаний являлось подтверждение работоспособности прибора по реальным звездам, т. е. подтверждение правильности выбранных алгоритмических решений, а также методов обеспечения точности и чувствительности. Вся программа НЭО была выполнена успешно, результаты всех испытаний положительные. По результатам испытаний был выпущен итоговый отчет о НЭО. После проведения наземных испытаний первого штатного прибора 348К в составе космического аппарата было получено заключение о допуске к летным испытаниям, начало которых состоялось в 2014 году. По первой телеметрической информации видно, что прибор 348К работает и функционирует нормально, выдаёт кватернион ориентации и следит за звёздами в штатном режиме.

Ключевые слова: звездный датчик, наземная экспериментальная отработка, точностные испытания, протоны, звездное небо.

Vestnik SibGAU
2014, No. 4(56), P. 167–172**MULTI-HEADED STAR TRACKER 348K. FINAL IN-EARTH VALIDATION RESULTS**

A. Y. Kareiln, Y. N. Zybin, V. O. Knyazev, A. A. Pozdniakov, N. I. Fomichev

Joint Stock Company Scientific & Production Enterprise «Geofizika–Cosmos»
11-1, Irkutskaya str., Moscow, 107497, Russian Federation
E-mail: 1102@geocos.su

This paper is about multi-headed star tracker 348K, which was developed by JSC “SPE “Geofizika-Cosmos” in 2013. Concept, design and key features are described. The design features are to provide a monolithic body of the lens, which implements both the seating surfaces. Moreover, in the device 348K a special system - channel geometric standard, which is high stability optical system and forms on the APS-based camera six images for self-supporting estimation and compensation of systematic errors in the determination of orientation caused by the thermo-mechanical effect is employed. Also test program during the manufacturing and in-Earth validation as well as some tests details are presented. In tests, the star tracker 348K was first introduced check errors in a movable base. Testing the effect of protons with energies of 50, 100 and 200 MeV at different angles of incidence on the APS-based camera conducted to quantitatively and qualitatively assess the impact of the incident protons on the image. According to the analysis of emerging sustainable defective pixels on APS-based camera, it was determined that the greatest increase in defect occurs when

the energy is 200 MeV. During the full-scale tests measuring the time of construction of the initial orientation was conducted. According to the results of full-scale tests random error components determination of the orientation of one of the optical head and two optical head for 15 minutes of work were evaluated. The purpose of full-scale tests was to confirm the unit validation of availability on the real star, rather validation of the chosen algorithmic solutions, and methods to assurance of accuracy and sensitivity. The whole test program during the manufacturing and in-Earth validation was successful, the results of all tests are positive. According to the test results the final report on the ground-experimental testing was released. After the ground tests of the first flight unit 348K on board the spacecraft was obtained on admission to the conclusion of flight testing, the beginning of which is expected in 2014.

Keywords: star tracker, in-Earth validation, accuracy tests, protons, real sky tests.

Введение. Концепция многоголового звездного датчика 348K состоит в объединении информации от малогабаритных и малопотребляющих блоков оптических (БО) в общем блоке электронном (БЭ) с целью повышения точности, помехозащищенности и надежности. Однако в отличие от других подобных систем, БО прибора 348K являются автономными звездными датчиками, которые передают кватернион ориентации и угловую скорость по гальванически развязанному интерфейсу RS-485 в БЭ.

Такое решение позволяет обеспечить гибкость и простоту работы с прибором 348K со стороны системы ориентации и стабилизации космического аппарата (СОС КА). От СОС КА не требуется управление БО, контроль их работоспособности, адекватности получаемой информации и расчета равноточной ориентации. Все эти задачи решает малогабаритный резервированный БЭ, одинаковый для любого количества БО (до четырех).

К некоторому недостатку концепции построения многоголового звездного датчика можно отнести большую (по сравнению с моноблочным прибором) сложность наземной экспериментальной отработки (НЭО). НЭО такого прибора подразумевает больший объем проверок, а значит, требует большего количества рабочих мест и технологического оборудования, а также более сложных методик подтверждения характеристик.

1. Конструкция БО звездного датчика 348K.

Состав БО следующий:

- объектив в монолитном корпусе, поле зрения 19° ;
- канал геометрического эталона (КГЭ) [1];
- бленда;
- фотоприемная матрица (ФПМ) APS STAR-1000 [2; 3] с термоэлектрическим модулем охлаждения (ТЭМО);
- платы вычислительного устройства БО;
- вторичные источники питания (ВИП);
- куб-призма для привязки БО к системе координат КА.

На рис. 1 приведена трехмерная модель БО в разрезе.

Из особенностей конструкции стоит выделить монолитный корпус объектива, реализующий одновременно и посадочную плоскость. Также в БО прибора 348K применена специальная система – канал геометрического эталона. КГЭ является нерасстраиваемой оптической системой, состоящей из осветителя (светодиодов) и оптического элемента (пластина-призма), и формирует на фотоприемной матрице БО шесть изображений [4; 5]. При изменении температуры прибора или в результате механических воздействий по-

ложение КГЭ в приборной системе координат (определяемой посадочной плоскостью) остается неизменным. Изменение положения изображений КГЭ на ФПМ указывает в таком случае на изменение положения самой ФПМ – ее возможный сдвиг поперек поля зрения, угловое перемещение и изменение фокусного расстояния объектива. Таким образом, реализуется автономная оценка и компенсация систематических погрешностей определения ориентации, вызванная термомеханическими воздействиями. Система КГЭ применяется и в других приборах [6] ОАО «НПП «Геофизика-Космос» и защищена двумя патентами [7; 8].

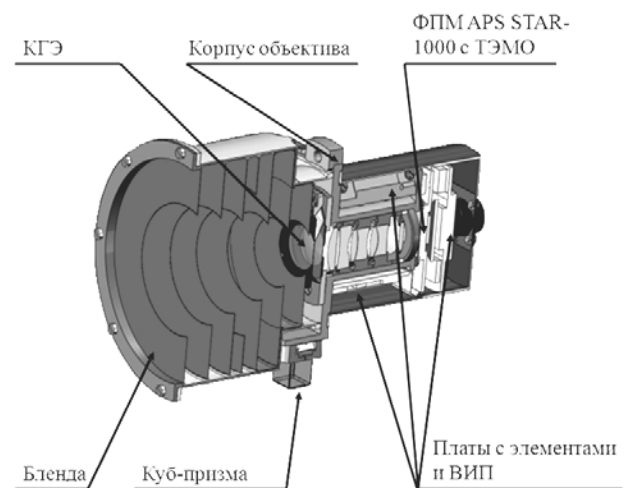


Рис. 1. Блок оптический прибора 348K в разрезе

Масса БО составляет 1,2 кг, включая светозащитную бленду с углом защиты 40° от Солнца и 34° от Земли. Имеются также бленды с углами защиты от Солнца 30° (24° от Земли) и 25° (21° от Земли).

При напряжении питания 27 В потребляемая мощность БО без ТЭМО 3 Вт (температура посадочной плоскости от -40 до $+5^\circ\text{C}$). Потребляемая мощность с включенным ТЭМО менее 5,5 Вт (температура посадочной плоскости от $+5$ до $+50^\circ\text{C}$).

2. Конструкция БЭ звездного датчика 348K. БЭ состоит из двух независимых одинаковых вычислительных устройств. К БЭ может быть подключено до 4 БО. Длина кабелей между БЭ и БО до 10 м. БЭ имеет дублированный интерфейс обмена с СОС КА MIL STD 1553B (ГОСТ Р52070–2003). На рис. 2 приведена трехмерная модель БО в разборе.

Масса резервированного БЭ составляет 1,0 кг. Потребляемая мощность БЭ 1,5 Вт (27 В). Допустимая температура посадочной плоскости от -40 до $+50$ °C задается гарантированной температурой основания.

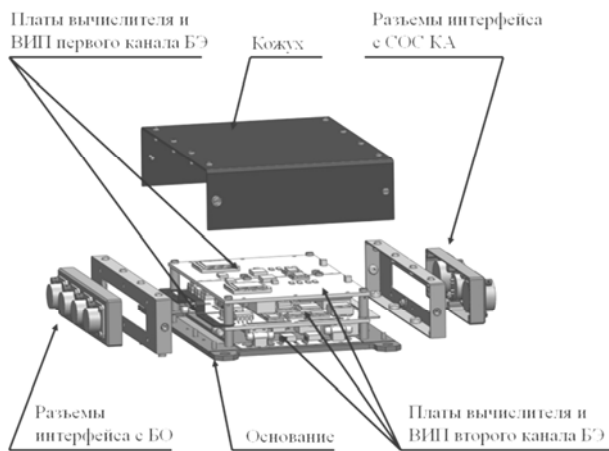


Рис. 2. Резервированный блок электронный прибора 348К

3. Основные технические характеристики звездного датчика 348К:

- 1) состав поставки:
 - 4 БО + резервированный БЭ (базовый вариант);
 - 3 варианта КПА;
 - набор светозащитных бленд: 25° , 30° , 40° ;
- 2) габариты и масса:
 - БО с блендой 40° : $\varnothing 132 \times 210$ мм, 1,2 кг;
 - резервированный БЭ: $166 \times 94 \times 37$ мм, 1,0 кг;
- 3) длина кабелей БО–БЭ: 10 м (базовый вариант);
- 4) частота обновления информации: 5 Гц;
- 5) погрешность по трем осям (при активных 2 БО с углом между визирными линиями $\sim 90^\circ$):
 - 15 угл. с (максимальная);
 - 3 угл. с (1σ случайная);
- 6) предельная угловая скорость с сохранением точности и вероятности распознавания:
 - для 1 БО $0,2$ °/с;
 - для 2...4 БО – больше $0,25$ °/с (зависит от взаимного расположения);
- 7) потребляемая мощность (27 В):
 - 1 БО: 3,0 Вт (ТЭМО выключен) или 5,5 Вт (ТЭМО включен);
 - БЭ: 1,5Вт;
- 8) ресурс: 150 000 часов для варианта 4 БО + резервированный БЭ;
- 9) температурный диапазон: $-40...+50$ °C (задается температурой посадочной плоскости);
- 10) интерфейсы:
 - БЭ–БЦВК: MIL STD 1553B (ГОСТ P52070–2003);
 - БО–БЭ: RS-485;
- 11) помехозащищенность и некоторые особенности:
 - БЭ автономно управляет включением-выключением БО и осуществляет контроль данных от БО;
 - 2 постоянно работающих БО, остальные в холодном резерве;
 - Луна в поле зрения БО не влияет на функционирование;

– специальные алгоритмы для парирования помех (протоны, частицы, звездоподобные объекты, дефектные пиксели и др.) [9–11];

– только радиационно стойкие электронные компоненты.

4. Наземная экспериментальная отработка.

Все работы по подтверждению характеристик прибора можно условно разделить на две части – проверки, которым подвергается каждый изготавливаемый прибор, и расширенный набор проверок, которым подвергается первый образец серии или образец для предварительных испытаний.

К основным проверкам каждого прибора относятся следующие виды испытаний:

- а) проверки точности и чувствительности:
 - при неподвижном основании;
 - при подвижном основании (до $0,2$ °/с);
 - в условиях вакуума и температур от -40 до $+50$ °C;
- б) проверка времени распознавания;
- в) проверка слежения – 4 ч;
- г) механические испытания:
 - термовиброциклирование;
 - широкополосная случайная вибрация;
 - синусоидальная вибрация;
- д) наработка:
 - 200 ч в условиях термоциклов;
 - 100 ч в условиях вакуума и термоциклов;
- е) проверки функционирования в условиях помех по цепям питания;
- ж) проверки уровня помех, создаваемых прибором;
- з) проверка светонепроницаемости конструкции.

В ходе наземной экспериментальной отработки был также проведен расширенный набор испытаний, включавший:

- 1) проверки программно-алгоритмического обеспечения:
 - длительные проверки слежения – до 50 ч подряд;
 - проверки функционирования при угловых скоростях и ускорениях, превышающих требования ТЗ;
 - проверки функционирования и на отсутствие сбоев обмена в условиях термоциклов;
- 2) механические испытания в расширенном объеме:
 - удар;
 - широкополосная случайная вибрация с повышенным уровнем воздействий;
 - синусоидальная вибрация;
 - транспортировочная тряска;
- 3) ускоренные ресурсные испытания;
- 4) проверки на воздействие электростатического разряда;
- 5) проверки на электромагнитную совместимость;
- 6) проверки на воздействие синфазных помех (совместно с разработчиком КА);
- 7) проверки на влияние постоянного магнитного поля (совместно с разработчиком КА);
- 8) натурные испытания:
 - испытания при неподвижном основании;
 - испытания на подвижном основании, в том числе при угловых скоростях, превышающих требования ТЗ;
 - подтверждение отсутствия влияния Луны в поле зрения на характеристики распознавания и слежения;
- 9) проверки на боковую засветку в условиях вакуума с полноценным имитатором Солнца;

10) испытания на воздействие протонов с энергиями от 50 до 200 МэВ.

Вся программа НЭО была успешно выполнена, результаты испытаний положительные. По результатам был выпущен итоговый отчет о НЭО. Далее остановимся на результатах наиболее интересных проверок.

5. Особенности точностных испытаний. Для проведения паспортизации систематических погрешностей определения ориентации и для проверки точностных характеристик был разработан специальный высокоточный оптико-механический стенд. В состав стенда входит гранитное развязанное основание, на котором установлен высокоточный имитатор звезды, и специальная призмная система, которая разделяет световой пучок от имитатора звезды на пять треков. Взаимное угловое расстояние между имитируемыми звездами аттестуется с помощью гониометра с погрешностью менее 1 угл. с. Также имеется возможность разворота призмной системы вокруг оси, параллельной визирной линии имитатора на произвольный угол с точностью ~ 1 угл. с. Таким образом, в поле зрения БО формируется группа звезд.

БО прибора 348К устанавливается на высокостабильное посадочное место, закрепленное на высокоточном поворотном столе с электроприводом. Стенд оснащен системой из трех автоколлиматоров для взаимной привязки систем координат БО и стенда (связанной с визирной линией имитатора и осью вращения поворотного стола).

Температура помещения, в котором находится стенд, поддерживается в диапазоне $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Класс чистоты помещения 3-й (количество пылинок в 1 м^3 не более 1000).

Главная особенность методики подтверждения точностных характеристик заключается в проверке максимальных суммарных погрешностей определения ориентации системы координат БО в системе координат стенда (имитируемой геоцентрической системе координат). Такой подход реализует проверку абсолютных погрешностей, а не отдельных их составляющих, как, например, погрешность определения координат одиночной звезды или оценки случайной составляющей погрешности определения ориентации.

При испытаниях прибора 348К впервые была внедрена проверка погрешностей в условиях подвижного основания. В этом случае производится программный разворот БО с угловой скоростью $0,2^\circ/\text{с}$ и фиксируется кватернион ориентации, выдаваемый БО, а также показания датчика угла разворота поворотного стола. На основе этих данных проводится расчет погрешностей определения ориентации на каждом такте получения информации. Одна контрольная задача выполняется ~ 50 с, разворот составляет не более 10° , так как при дальнейшем развороте поворотного стола звезды покинут поле зрения и слежение прекратится.

Величины суммарных погрешностей стенда удобнее всего выразить как максимальную ошибку в знании положения системы координат БО в системе координат стенда. С учетом инструментальных и методических погрешностей такие оценки составляют порядка 2...3 угл. с при неподвижном основании и 5...6 угл. с в условиях динамики.

6. Результаты испытаний на воздействие протонов. Испытания проводились с целью количественной и качественной оценки влияния падающих протонов на изображение с ФПМ APS STAR-1000 [2; 3] в составе БО прибора 348К. Причем оценка проводилась по двум критериям: первый – оценка количества помеховых изображений от падающих на ФПМ протонов и проверка методов парирования их влияния; второй – оценка количества устойчивых дефектных пикселей ФПМ, вызываемых протонами, на конец срока жизни прибора.

На рис. 3 показан БО прибора 348К в ходе испытаний на протонном ускорителе ФГУП ГНЦ ИТЭФ (г. Москва).

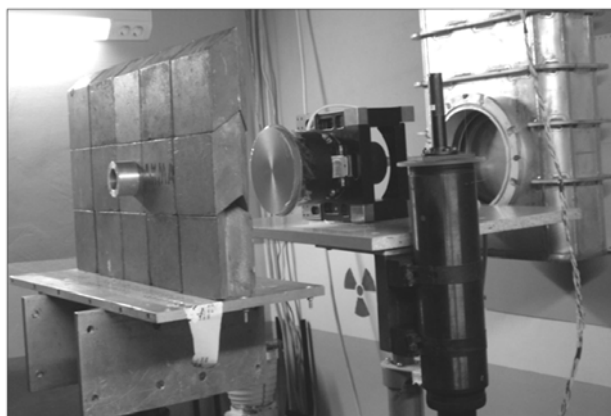


Рис. 3. Блок оптический прибора 348К при испытаниях на протонном ускорителе

Испытания проводились для случая воздействия протонов с энергиями 50, 100 и 200 МэВ под различными углами падения на ФПМ. По результатам исследования характера изображений от падающих на ФПМ протонов были доработаны алгоритмы парирования влияния протонов при поиске, распознавании и слежении за звездами.

По результатам анализа возникающих устойчивых дефектных пикселей на ФМП было определено, что наибольший прирост дефектов возникает при энергии 200 МэВ. Дальнейшие испытания по набору суммарного флюенса протонов проводились на энергии 200 МэВ. За время проведения испытаний БО набрал суммарный флюенс $1,43 \cdot 10^{10}$ протон/см². Используя специальные методики пересчета и математическое моделирование, было оценено, что количество образовавшихся дефектных пикселей к концу срока активного существования на ГСО не повлияет на характеристики распознавания и слежения.

7. Результаты натурных испытаний. Задачей натурных испытаний, прежде всего, являлось подтверждение работоспособности прибора по реальным звездам, т. е. подтверждение правильности выбранных алгоритмических решений [12–14], а также методов обеспечения точности и чувствительности (приборный каталог звезд насчитывает более 2200 звезд [15–18]).

На рис. 4 приведены оценки случайных составляющих погрешностей определения ориентации одним БО и двумя БО за 15 мин работы.

Как видно из рис. 4, по показаниям двух БО прибор 348К проводит расчет равноточной ориентации, а СКО погрешностей составляют менее 3 угл. с по всем трем осям.

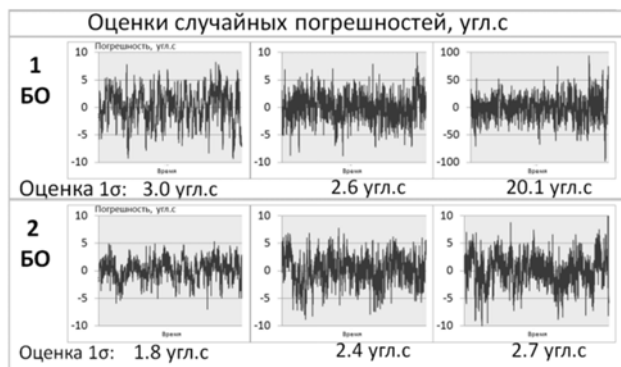


Рис. 4. Оценки случайных погрешностей определения ориентации

В ходе натурных испытаний были проведены измерения времени построения начальной ориентации, причем началом отсчета времени являлся момент подачи питания на БЭ. Таким образом, время построения начальной ориентации включает в себя:

- время инициализации, конфигурирования и самопроверки БЭ;
- время последовательного включения БО;
- время инициализации, конфигурирования и самопроверки БО;
- время проведения калибровки БО по КГЭ;
- время поиска и селекции световых источников;
- время распознавания звезд и расчета кватернио-ориентации.

Всего было проведено 30 замеров (при различных ориентациях БО, направлениях вращения и угловых скоростях), причем 10 замеров были проведены при наличии Луны в поле зрения БО. Результаты приведены в таблице.

Время построения начальной ориентации

Время построения начальной ориентации, с	
$ \omega = 15^\circ/\text{с}$	
Среднее	8,6
Максимальное	11,2
Минимальное	7,8
$ \omega = 0,215^\circ/\text{с}$	
Среднее	9,4
Максимальное	14,5
Минимальное	7,8

Отметим, что температура посадочной плоскости во время проведения испытаний составляла около $+5^\circ\text{C}$. В реальных условиях эксплуатации ко времени построения начальной ориентации может добавиться время охлаждения ФПМ (не более 60 с при температуре посадочной плоскости 50°C).

Заключение. Все испытания из состава НЭО были успешно проведены на специально изготовленном образце прибора 348К. В ходе НЭО были подтверждены все требования ТЗ на прибор, отработаны ме-

тодики наземной отработки, а также была откорректирована документация. После проведения наземных испытаний первого штатного прибора 348К в составе КА было получено заключение о допуске к летным испытаниям, начало которых состоялось в 2014 году.

Библиографические ссылки

1. Колосов М. П. Оптика адаптивных угломеров. Введение в проектирование : монография. М. : Логос, 2011. 256 с.
2. Schmidt U., Michel K., Airey S. P. Active pixel sensor technology applied in autonomous star sensors – advantages and challenges // AAS 07-063.
3. Leparge G. Expected outcome of APS developments for astrophysics instrumentation, Astrophysics detector workshop. 2008.
4. Гебгарт А. Я., Колосов М. П. Нерасстраиваемые оптические системы угломеров с неподвижной линией визирования // Оптический журнал. 2010. Т. 77, № 10. С. 48–53.
5. Федосеев В. И., Карелин А. Ю., Короткова Е. Л. Калибровка угломерных оптических приборов КА по звездам // Оптический журнал. 1995. № 9. С. 26–32.
6. Результаты летной отработки прибора звездной ориентации 329К и пути решения проблем создания аппаратуры с длительным сроком активного существования / Федосеев В. И. [и др.] // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. 382 с.
7. Пат. 2399871 С1 Российская Федерация. Углоизмерительный звездный прибор / Гебгарт А. Я., Колосов М. П., Гусев М. Е. 2009.
8. Пат. 2442109 С1 Российская Федерация. Углоизмерительный звездный прибор / Колосов М. П., Гебгарт А. Я. 2010.
9. Accardo D. Tracing algorithm for star sensors using CMOS devices // IAA~2003.
10. Fast tracking predictive centroiding scheme. / M. U. Pehman [et al.] // Proc. of SPIE. 2008. Vol. 7128.
11. Quine B. Determination star – image location. A new subpixel interpolation techniques to process image centroids // Computer Physics Communication. 2007. № 177.
12. Пат. 2408849 С1 Российская Федерация. Способ и устройство измерения угловых координат звезд / Абакумов В. М., Герасимов С. А., Исаков А. Н., Федосеев В. И. 2009.
13. Пат. 2408898 С1 Российская Федерация. Способ поиска и обнаружения точечных целей оптико-электронными приборами / Абакумов В. М., Герасимов С. А., Исаков А. Н., Федосеев В. И. 2009.
14. Пат. 2420761 С1 Российская Федерация. Способ измерения угловых координат точечной цели оптико-электронным прибором / Абакумов В. М., Герасимов С. А., Исаков А. Н., Федосеев В. И. 2009.
15. Алексеев А. А., Мамаев В. Я. Использование нейросетевых технологий в задаче астронавигации // Аэрокосмические приборы и системы. 77 с.
16. Кружилов И. С. Методы и программные средства повышения эффективности распознавания

групп звезд в автономной астронавигации : автореф. дис. ... к-та техн. наук : 05.13.11 / Моск. энерг. ин-т (Техн. ун-т). М., 2010. 22 с.

17. Liebe C. C. Star sensor for attitude determination // IEEE AES system magazine. 1995.

18. Review. A survey on star identification algorithms / B. B. Spratling [et al.] // Algorithms. 2009. № 2.

References

1. Kolosov M. P. *Optika adaptivnykh uglomeroz. Vvedeniye v proektirovaniye* [Adaptive optics goniometers. Introduction to engineering]. Moscow, Logos Publ., 2011, 256 p.

2. Schmidt U., Michel K., Airey S. P. Active pixel sensor technology applied in autonomous star sensors – advantages and challenges. *AAS 07-063*.

3. Leparge G. Expected outcome of APS developments for astrophysics instrumentation, Astrophysics detector workshop. 2008.

4. Gebgart A. Ya., Kolosov M. P. [Nerasstraivaniye opticheskoy sistemy goniometrov s fiksnym liniei zreniya]. *Optical magazine*. 2010. Vol. 77, no. 10, p. 48–53. (In Russ.).

5. Fedoseev V. I., Karelin A. Yu., Korotkova E. L. [Calibration of angle optical devices spacecraft star]. *Optical magazine*. 1995, no. 9, p. 26–32. (In Russ.).

6. Fedoseev V. I., Kunyayev V. V., Isakov A. N., Ovchinnikov V. A., Knyazev V. O., Krugilov I. S., Titov G. P., Shevlyakov O. V. [The results of flight testing stellar star sensor 329K and solution to the problems of creating instruments with a long active life]. *Navigatsionnyye sputnikovyye sistemy, ikh rol' i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka* [Navigation satellite systems, their role and importance in the life of modern man]. SibSAU, Krasnoyarsk, 2012, 382 p.

7. Gebgart A. Ya., Kolosov M. P., Gusev M. E. *Ugloizmeritel'nyi zvezdnyi pribor* [Angle measuring stellar sensor]. Patent RF № 2 399 871 C1. 2009.

8. Kolosov M. P., Gebgart A. Ya. *Ugloizmeritel'nyi zvezdnyi pribor* [Angle measuring stellar sensor]. Patent RF № 2442109 C1, 2010.

9. Accardo D. [Tracing algorithm for star sensors using CMOS devices]. *IAA-2003*.

10. Pehman M. U. et al. [Fast tracking predictive centroiding scheme]. *Proc. of SPIE*. 2008, vol. 7128.

11. Quine B. [Determination star – image location. A new subpixel interpolation techniques to process image centroids]. *Computer Physics Communication*. 2007, 177 p.

12. Abakumov V. M., Gerasimov S. A., Isakov A. N., Fedoseev V. I. *Sposob i ustroystvo izmereniya uglovykh koordinat zvezd* [Method of measuring the angular coordinates of stars]. Patent RF № 2 408 849 C1, 2009.

13. Абакумов Abakumov V. M., Gerasimov S. A., Isakov A. N., Fedoseev V. I. *Sposob poiska i obnaruzheniya tochechnykh tselei optiko-elektronnykh priborami* [A method of searching and detecting point targets optoelectronic devices]. Patent RF № 2 408 898 C1, 2009.

14. Abakumov V. M., Gerasimov S. A., Isakov A. N., Fedoseev V. I. *Sposob izmereniya uglovykh koordinat tochechnoi tseli optiko-elektronnykh priborom* [A method for measuring the angular coordinates point target optoelectronic devices]. Patent RF № 2 420 761 C1, 2009.

15. Alekseev A. A., Mamaev V. Ya. [The use of neural network technology in the problem of celestial navigation] *Aerokosmicheskie pribori i sistemy*, 77 p. (In Russ.).

16. Krugilov I. S. *Metody i programmnyye sredstva povysheniya effektivnosti raspoznavaniya grupp zvezd v avtonomnoi astronavigatsii: avtorefer. dis. k-ta tekhnicheskikh nauk* [Methods and software improve the efficiency of detection of groups of stars in autonomous celestial navigation: Author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences] Moscow MEI (Tehn. univ.), 2010, 22 p.

17. Liebe C. C. [Star sensor for attitude determination]. *IEEE AES system magazine*. 1995.

18. Spratling B. B. et al. [Review. A survey on star identification algorithms]. *Algorithms*, 2009, 2.

© Карелин А. Ю., Зыбин Ю. Н., Князев В. О., Поздняков А. А., Фомичев Н. И., 2014