

Гладышев А.И. и др. Метод обработки изображения неба с целью...

9. *Garfinkel R.S., Nembauser G.L.* The Set Partitioning Problem: Set Covering with Equality Constraints // *Operations Research*. 1969. Vol. 17. P. 848–856.
10. *Page E.W., Tagliarini G.A.* Algorithm Development for Neural Networks // *SPIE*. 1988. Vol. 880. P. 11–19.
11. *Pierce J.F.* Application of Combinatorial Programming to Class of All-Zero-One Integer Programming Problems // *Management Science*. 1968. Vol. 15. P. 191–209.
12. *Protzel P.W.* Comparative Performance Measure for Neural Networks Solving Optimization Problems // *International Joint Conference on Neural Networks: Proceedings*. Washington, 1990. Vol. 2. P. 523–526.

DOI: 10.25586/RNUV9187.19.01.P.147

УДК 681.5:629.78

А.И. Гладышев, А.В. Евенко, В.С. Гедзюн, А.О. Жуков,
А.И. Захаров, М.Е. Прохоров, Ю.А. Давидович, М.С. Тучин

МЕТОД ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ НЕБА С ЦЕЛЬЮ
ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗВЕЗД*

Представлен новый метод обработки изображения неба с целью идентификации звезд. Идея метода основана на том, чтобы в бортовом каталоге (малого объема) для каждой звезды записать некоторую дополнительную информацию из каталога большого размера, которая относится к сравнительно небольшой окрестности навигационной звезды.

Ключевые слова: идентификация звезд, изображение неба, навигационный паспорт звезд.

A.I. Gladyshev, A.V. Evenko, V.S. Gedzyun, A.O. Zhukov,
A.I. Zakharov, M.E. Prokhorov, Yu.A. Davidovich, M.S. Tuchin

IMAGE PROCESSING METHOD OF THE SKY
TO IDENTIFY STARS

A new method of processing images of the sky to identify stars is presented. The idea of the method is based on the fact that in the onboard catalog (small volume) for each star to record some additional information from the catalog of large size, which refers to a relatively small surrounding area of the navigation stars.

Keywords: identification of stars, sky, leather passport stars.

С появлением космических аппаратов активно разрабатываются и совершенствуются средства и методы навигации по наблюдениям звезд, Земли, Солнца, астероидов и др. [4; 8; 15; 18].

* Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта президента (проект МД-4052.2018.8 «Методы получения и обработки внеатмосферной информации для обнаружения и идентификации космических объектов в широком спектральном диапазоне»).

Высокие скорости перемещения космических аппаратов диктуют высокие требования к оперативности таких определений, особенно на начальном участке после выведения на орбиту, когда положение аппарата неизвестно.

В настоящее время приборы звездной ориентации стали основным средством космической навигации. Конструкция типичного звездного датчика ориентации содержит входную оптику, которая ограничивает поле зрения прибора, матричного фотоприемника и электронного блока определения ориентации с каталогом звезд [20].

Методы обеспечения ориентации космических аппаратов, принципы построения астроизмерительных систем, обзор их основных производителей и технических характеристик этих приборов, а также функциональная структура блоков звездного датчика описаны в статьях [9; 10].

Сложность определения ориентации заключается в том, что в поле зрения прибора звездной ориентации попадает только несколько звезд, а их привязка к координатной системе и положение космического аппарата в момент наблюдения неизвестны. Поэтому главными локальными признаками для определения звезд всегда было опознавание известных созвездий по их форме и нахождение звезд по месту в них. Традиционно для этого использовались известные навигационные созвездия [2].

Известны способы определения ориентации по наблюдениям звезд, реализуемые в навигационных приборах [11; 14; 19]. Сущность этих методов заключается в том, что наблюдают группу звезд, образующих треугольник, в поле зрения прибора звездной ориентации, измеряют расстояния между звездами и по величине этих расстояний находят в бортовом каталоге соответствующую группу звезд и их координаты, а относительно них определяют положение оптической оси прибора звездной ориентации. Сложность заключается в том, чтобы найти этот треугольник среди множества других на звездном небе.

Также при обработке полученных измерений негативную роль играет фоновая обстановка околоземного космического пространства [5; 6; 7].

Из всего многообразия алгоритмов идентификации как наиболее быстродействующие используют геометрические. Идея геометрических алгоритмов заключается в составлении из звезд, попавших в поле зрения объектива, различных геометрических фигур, в которых в качестве базовых характеристик для распознавания используются межзвездные угловые расстояния, сферические углы, образуемые звездами на небесной сфере, отношения сторон, периметры, площади и прочие характеристики, с последующим сравнением их с таковыми же, но полученными для звезд из каталога, заранее записанными в память компьютера [3].

Основным недостатком всех этих способов является именно необходимость перебора большого числа параметров в бортовом каталоге для нахождения требуемой конфигурации звезд. При большом числе звезд в бортовом каталоге, даже при большой скорости процессора, этот перебор занимает некоторое время, что может быть критично для космического аппарата.

Известны также различные способы, позволяющие повысить эффективность определения ориентации по звездам [13; 16; 17].

Однако эти способы не решают проблем необходимости перебора вариантов и ориентации на начальном этапе выведения, а также дополнительно увеличивают объем требуемых определений.

При рассмотрении перспектив развития приборов звездной ориентации отмечается, что подход к выбору оптики звездных приборов пока остается неизменным. Полагают целесообразным включение в состав звездных приборов ориентации миниатюрных трехосных датчиков угловой скорости, а в блоках электроники – использование высокопроизводительных микропроцессоров, программируемых логические интегральные схемы (ПЛИС) со специальным математическим обеспечением. Для эффективного определения ориентации значимым является требование многократного сокращения объема обрабатываемой информации. Прибор должен представлять собой функционально законченное устройство и иметь при этом весьма малые габариты и низкое энергопотребление. Улучшение эксплуатационных характеристик приборов возможно путем совершенствования схемных решений и программно-математического обеспечения [1; 12].

Идея предлагаемого метода заключается в том, чтобы в бортовом каталоге (малого объема) для каждой звезды записать некоторую дополнительную информацию из каталога большого размера, которая относится к сравнительно небольшой окрестности навигационной звезды. Будем называть такую дополнительную информацию паспортом звезды, рассчитанным по большому каталогу.

Поле паспорта звезды (ППЗ) – числовая характеристика, которая может быть рассчитана по заданному алгоритму для звезд при использовании конкретной числовой информации, которая, с одной стороны, содержится в каталогах, а с другой – может быть получена по измерениям кадра звездного датчика (ЗД).

ППЗ делятся на реальные и идеальные. Идеальные ППЗ могли бы быть рассчитаны исходя из данных гипотетического идеального каталога или измерений в идеальном кадре, содержащих информацию обо всех нужных звездах с их точными характеристиками. Значения реальных ППЗ могут отличаться от идеальных за счет разнообразных ошибок, неполноты реального каталога, из-за погрешностей измерений в кадре, наличия в реальном кадре звездообразных и протяженных помех.

От ППЗ требуется:

- локальность вычисления (т.е. возможность расчета ППЗ по небольшому участку кадра);
- большая вариабельность по небу и/или локальная;
- устойчивость к помехам;
- слабая чувствительность к погрешностям.

Тип ППЗ определяется значениями числовых характеристик (взятых из каталога или измеренных) и алгоритмом их обработки (условиями применения, весовыми коэффициентами и пр.).

Поле паспорта навигационной звезды (ППНЗ) – ППЗ, которое может быть рассчитано для навигационных звезд по большому каталогу, включающему информацию о звездах до необходимой величины. Идеальное ППНЗ можно рассчитать лишь по информации из гипотетического идеально полного и точного каталога.

Поле паспорта объекта кадра (ППОК) – ППЗ для почти любого звездообразного объекта в кадре ЗД, которое может быть рассчитано по информации, содержащейся только в самом кадре ЗД.

ППОК также делятся на реальные и идеальные. Идеальным назовем ППОК, рассчитанное при отсутствии погрешностей измерений и при 100%-м обнаружении объектов.

Значение реального ППОК может отличаться от идеального вследствие погрешностей измерений (случайных, систематических или связанных с физическими свойствами объекта, например переменностью) и наличия помех в кадре: постоянных (например, планет или астероидов) и переменных (например, яркая пылинка или след космической частицы).

Паспорт объекта кадра (ПОК) – многомерный вектор, координаты которого состоят из заранее определенных типов ППОК, рассчитанных для паспортизируемого звездообразного объекта в кадре. Идеальный ПОК составлен из идеальных ППОК. Реальный ПОК имеет координаты, образованные из реальных ППОК.

Паспорт навигационной звезды (ПНЗ) – многомерный вектор, координаты которого состоят из заранее определенных типов ППНЗ, рассчитанных для паспортизируемой навигационной звезды. Идеальный ПНЗ составлен из идеальных ППНЗ. Реальный ПНЗ имеет координаты, образованные реальными ППНЗ.

При правильной идентификации звезд идеальные паспорта навигационных звезд и идеальные паспорта соответствующих им объектов в кадре совпадут (обратное – неверно).

Поскольку каждое ППЗ (ППНЗ или ППОК) рассчитывается с ошибкой, следовательно, даже в том случае, когда объект в кадре является изображением навигационной звезды, их паспорта могут отличаться.

Назовем допустимым интервалом ППЗ совокупность его возможных значений с учетом ошибок и неполноты каталога, использованного для расчета (для ППНЗ), или погрешности измерения, недостатков обнаружения и помех в реальном кадре (для ППОК).

Будем считать, что ПНЗ и ПОК совпадают, если для допустимых интервалов всех ППНЗ обнаружено пересечение с допустимыми интервалами соответствующих ППОК.

В предложенном методе паспорт состоит из следующих 8 полей:

1-е поле – блеск паспортизируемой звезды;

2-е поле – число звезд, находящихся в окрестности 120 пикселей от паспортизируемой звезды;

3-е поле – число звезд, находящихся в окрестности 110 пикселей от паспортизируемой звезды;

4-е поле – число звезд, находящихся в окрестности 100 пикселей от паспортизируемой звезды;

5-е поле – число звезд, находящихся в окрестности 80 пикселей от паспортизируемой звезды;

6-е поле – число звезд, находящихся в окрестности 60 пикселей от паспортизируемой звезды;

7-е поле – число звезд, находящихся в окрестности 35 пикселей от паспортизируемой звезды;

8-е поле – расчетный средний (в условных единицах) поток от звезд с блеском, меньшим 10-й звездной величины, находящихся в окрестности 120 пикселей от паспортизируемой звезды.

Кроме паспорта, для каждой звезды в навигационный каталог еще записываются 8 индексов (номеров по бортовому каталогу навигационных звезд (БКНЗ) или смещений в каталоге) для навигационных звезд из соседних с ней секторов навигационного каталога (S1...S8). Отметим, что соседние сектора могут принадлежать разным зонам.

Гладышев А.И. и др. Метод обработки изображения неба с целью...

На каждого соседа надо 3 байта: номер зоны – 2 байта + 4 бита, номер сектора – 4 младших бита.

В целом комплекс алгоритмов первоначальной идентификации звезд по паспортам содержит три вновь созданных алгоритма: идентификация объекта, вычисление паспорта объекта, проверка идентификации.

Рассмотрен алгоритм идентификации объекта в кадре сравнением его паспорта с паспортом навигационной звезды. Назначение алгоритма: поиск и проверка идентификации объектов в кадре с навигационными звездами в каталоге. Входные данные: список объектов из кадра, отсортированный по уменьшению сигнала от объекта. Выходные данные: признак идентификации (состояния: «Идентификации нет» и «Идентификация успешна»), число идентифицированных пар (объект в кадре – звезда в БКНЗ), ссылка на матрицу преобразования координат, ссылка на список идентифицированных пар (каждая пара состоит из ссылки на навигационную звезду и ссылки на соответствующий ей объект).

Описание алгоритма идентификации объекта в псевдокоде по шагам приведено ниже.

1. Начальные инициализации переменных и списков.

2. Цикл по объектам:

2.1. Выбираем объект кадра – первый в списке в порядке очередности. Проверяем признаки «помеха» и «паспорт неполон»; если хотя бы один из них установлен, то перебор всех объектов в кадре закончен (выходим из алгоритма с признаком идентификации «идентификации нет»).

2.2. Проверяем «навигационность» выбранного объекта (т.е. может ли объект быть навигационной звездой: попадает ли он в интервал допустимых звездных величин и т.п.). Если объект не может быть навигационной звездой, устанавливаем признак «помеха», перемещаем текущий объект в конец списка объектов и переходим к шагу 2.1.

2.3. Вычисляем ПОК объекта из кадра и его допуски.

2.4. Если хотя бы один бит в признаке «паспорт неполон» установлен, то перемещаем объект в конец списка объектов и переходим к шагу 2.1.

2.5. Обращаемся к базе данных навигационного каталога звезд для поиска по паспортному индексу в допустимой окрестности. Получаем список навигационных звезд (кандидаты по паспорту), имеющих ПНЗ, который совпадает с ПОК. Выборка может оказаться пустой, так как объект в кадре мог не быть навигационной звездой. В этом случае мы помечаем текущий объект кадра признаком «помеха», перемещаем текущий объект в конец списка объектов и переходим к шагу 2.1.

2.6. Цикл по кандидатам по паспорту (если выборка кандидатов по паспорту не пуста):

2.6.1. Вызываем процедуру проверки идентификации.

2.6.2. Проверяем результат идентификации. Если результат положительный, то выходим из алгоритма идентификации (с флагом «идентификация удачна»).

2.7. Конец цикла 2.6 (по кандидатам по паспорту).

2.8. Помечаем текущий объект кадра признаком «помеха», перемещаем его в конец списка объектов и переходим к шагу 2.1.

3. Конец цикла 2 (по объектам).

4. Конец алгоритма.

Далее рассмотрим *алгоритм вычисления паспорта объекта*. Назначение алгоритма: вычисление паспорта объекта в кадре. Входные данные: ссылка на список объектов в кадре, ссылка на указатель текущего объекта. Выходные данные: ППОК для текущего объекта, установленные признаки.

В псевдокоде алгоритм приведен ниже.

1. Заполняем ППОК, зависящий только от самого объекта (функция потока). Инициализируем нулем биты в признаке «паспорт неполон».

2. Цикл по полям паспорта (кроме первого поля):

2.1. Проверяем условие вычислимости текущего ППОК. Если условия вычислимости не выполнены, то устанавливаем соответствующий ППОК бит в признаке «паспорт неполон» и переходим к следующему полю паспорта.

2.2. Инициализируем значение текущего ППОК.

2.3. Цикл по всем объектам кадра в списке объектов кадра (кроме первого элемента списка):

2.3.1. Вычисляем расстояние от первого объекта в списке до текущего.

2.3.2. Вычисляем текущее значение ППОК, зависящее от первого и текущего объектов, проверяя условия для данного ППОК (например, ограничения на расстояния, ограничения на поток от текущего объекта и т.п. ограничения). Вычисляем ошибки элемента ППОК.

2.4. Конец цикла 2.3.

2.5. Преобразуем текущее значение ППОК по алгоритму вычисления ППОК. Вычисляем оценку ошибку и ППОК.

3. Конец цикла 2.

4. Конец алгоритма.

Ниже в псевдокоде приведен *алгоритм проверки идентификации*. Назначение алгоритма: проверка предполагаемой идентификации объекта с навигационной звездой. Входные данные: ссылка на кандидата по паспорту, список объектов в кадре, ссылка на текущий объект. Выходные данные: признак идентификации, число отождествленных пар, ссылка на матрицу преобразования координат, ссылка на список отождествленных пар.

1. Инициализация переменных и списков.

2. Цикл по соседям кандидата по паспорту:

2.1. Вычисляем расстояние между кандидатом по паспорту и его текущим соседом.

2.2. Цикл по объектам кадра:

2.2.1. Проверяем совпадение ППНЗ, зависящего только от самой звезды (функцию потока), с соответствующим ППОК всех объектов списка. Если нет совпадения, переходим к следующему объекту.

2.2.2. Для совпадающего объекта сверяем расстояние между ним и текущим объектом (выбираем из таблицы или вычисляем, если еще не вычисляли) с расстоянием между кандидатом по паспорту и текущим соседом (по каталогу). Если совпадения нет, переходим к следующему объекту.

2.2.3. Если паспорта совпали, то вычисляем матрицу преобразования из координатной системы каталога в координатную систему кадра и обратную к ней.

2.2.4. Находим «предполагаемые» небесные координаты центра поля зрения. Обращаемся к алгоритму поиска по координатному индексу навигационного каталога звезд в одноградусном окружении центра кадра.

Гладышев А.И. и др. Метод обработки изображения неба с целью...

2.2.5. Инициализируем счетчик отождествленных пар.

2.2.6. Цикл по выбранным навигационным звездам (список не может быть пуст):

2.2.6.1. Вычисляем координаты в кадре для текущей выбранной навигационной звезды. Если координаты указывают вне кадра, переходим к следующей выбранной навигационной звезде.

2.2.6.2. Цикл по всем объектам в кадре:

2.2.6.2.1. Проверяем условия совпадения координат и блеска текущей выбранной звезды и текущего объекта в кадре. Если совпадения нет, переходим к следующему объекту.

2.2.6.2.2. Формируем из ссылок на текущий объект и текущую звезду запись в списке отождествленных пар. Увеличиваем счетчик отождествленных пар.

2.2.6.3. Конец цикла по объектам в кадре.

2.2.7. Конец цикла по выбранным навигационным звездам.

2.2.8. Если в кадре обнаруживается на требуемых координатах не менее 10 отождествлений навигационных звезд, то выходим из алгоритма с установленным признаком идентификации «идентификация успешна».

2.3. Конец цикла по объектам.

3. Конец цикла по соседям.

4. Установка признака идентификации «идентификации нет».

5. Выход.

6. Конец алгоритма.

Алгоритмы обладают следующими достоинствами:

- дополнительная информация пропорциональна числу навигационных звезд, входящих в бортовой каталог;
- сам алгоритм требует лишь одной проверки паспорта на каждый объект в кадре. Или меньше, если отождествление не будет найдено раньше, чем закончится список объектов в кадре.

Таким образом, возможно использование нескольких видов паспортов звезд (рис. 1).

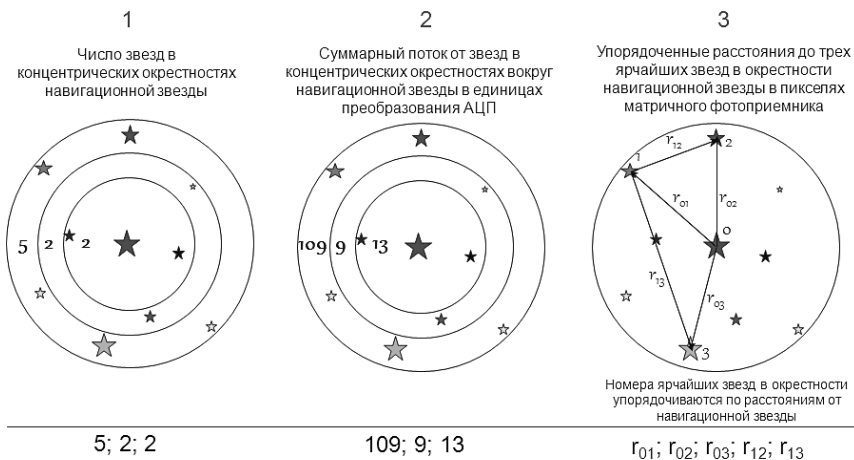


Рис. 1. Виды навигационных паспортов звезд

Проверку нахождения в кадре навигационной звезды по паспорту предлагается реализовать в следующем виде.

Пусть распределения погрешностей определения координат, выраженных в деципикселях, $-\Delta x_i$ и Δy_i , для объектов в кадре матричной ПЗС являются нормальными со средним 0 и дисперсией $\sigma_i^2 \leq 1$.

Введем ошибку расстояния:

$$\Delta r_{i,k} = r_{i,k} - r_{i,k,0} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} - \sqrt{(x_{i,0} - x_{k,0})^2 + (y_{i,0} - y_{k,0})^2}, \quad (1)$$

которая распределена нормально со средним 0 и дисперсией $\sigma_i^2 + \sigma_k^2$, если минимум каталожного расстояния между звездами $\min(r_{i,k,0}) \gg \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_k^2}$.

Если мы хотим, чтобы паспорта измеренной и каталожной звезд совпали с вероятностью α , то 5 полей паспортов должны совпадать в самом жестком случае с вероятностью $\alpha_5 = 1 - \frac{1-\alpha}{5}$ в пределах $|\Delta r_{i,k}| \leq \alpha$. При этом $2[F(\alpha) - 0,5] = a_5$, где $F(x)$ – интеграл вероятности.

В нашем случае $\min(r_{i,k,0}) = 50$ деципикселей (т.е. вокруг навигационной звезды на расстоянии 5 пикселей нет других звезд ярче 12,5 звездной величины), а $\alpha_5 = 0,9996$ ($\alpha = 0,997$), $a = 3,55$, следовательно, наш наиболее жесткий критерий проверки расстояний может быть сформулирован следующим образом:

при проверке расстояний должно выполняться неравенство

$$|\Delta r_{i,k}| \leq 3,55 \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_k^2}. \quad (2)$$

В самом худшем случае, если все 5 проверяемых расстояний являются расстояниями между звездами 12-й звездной величины ($\sigma_i = \sigma_k = 1$), то это неравенство дает ограничение $\Delta r_{i,k} \leq 5,02$ деципикселя. Другими словами, если при проверке все 5 расстояний удовлетворяют ограничению, то это означает совпадение паспортов с вероятностью не менее 0,997.

С целью оценки корректности и качества работы предлагаемого метода проведено моделирование идентификации навигационных звезд с использованием паспорта звезды. Было произведено 100 000 случайных выборов разных участков звездного неба. Моделирование производилось с введением шумов изображения до трех звездообразных помех на кадр. Из всего числа кадров получено 18 неопределившихся, при этом ложного распознавания не наблюдалось ни разу.

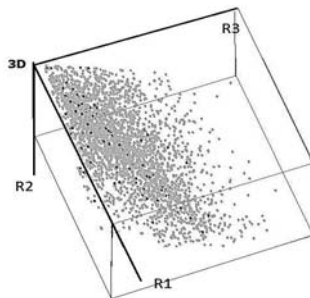


Рис. 2. Результаты моделирования с введением шумов изображения до трех звездообразных помех на кадр

Гладышев А.И. и др. Метод обработки изображения неба с целью...

На рисунке 2 показано полученное распределение из 3350 звезд $\leq 5,6$ звездной величины и с координатами, определенными с точностью до 1,0 пикселя звезд из каталога Tycho-2 в признаковом пространстве, построенном на координатах межзвездных расстояний.

В результате проведенного моделирования получены показатели корректности и качества предлагаемого метода (табл.).

Сравнение паспортов типов

Алгоритм	Эффективность			
	Вероятность ложного обнаружения	Вероятность верного обнаружения	Требуемый объем памяти каталога, слов	Быстродействие
Паспорт тип 1	0,02	0,95	$5N$	$\sim t^2 N$
Паспорт тип 2	0,03	0,94	$5N$	$\sim t^2 N$
Паспорт тип 3	$4 \cdot 10^{-7}$	0,99994	$5N$	$\sim t^2 N$
Перебор звезд из бортового каталога	0	0,99994	$Nk(k-1)$	$\sim k^2 t^2 N$

Примечание. N – число навигационных звезд; t – среднее число звезд в кадре; k – среднее число навигационных звезд в кадре.

Выводы

Предлагаемый метод обеспечивает эффективное определение глобальных пространственных координат звезд с использованием бортового каталога по измерениям локальных характеристик – расстояний между соседними звездами в поле зрения звездного датчика.

Выполнение алгоритмов метода позволяет непосредственно определять положение звезды в признаковом пространстве по результатам наблюдений.

Для реализации метода не требуется выполнять перебора данных каталога для идентификации звезды.

Описанный метод существенно упрощает выполнение, исключает необходимость использования циклических операций поиска и сокращает время, необходимое для определения ориентации.

Все операции предложенного метода легко реализуются в структуре блоков электроники современных звездных датчиков существующими средствами.

Метод обладает следующими достоинствами:

- дополнительная информация пропорциональна числу навигационных звезд, входящих в бортовой каталог;
- требуется лишь одна проверка паспорта на каждый объект в кадре или меньше, если отождествление будет найдено раньше, чем закончится список объектов в кадре;
- высокая помехоустойчивость и быстродействие.

Литература

1. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Форш А.А., Куделин М.И. Анализ современного состояния и перспектив развития приборов звездной ориентации семейства БОКЗ // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 1.
2. Воробьев Л.М. Астрономическая навигация летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1968.
3. Гайворонский С.В., Русина Е.В., Цодокова В.В. Идентификация звезд при определении астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15, № 1.
4. Жуков А.О., Захаров А.И., Прохоров М.Е., Бирюков А.В., Стекольников О.Ю., Тучин М.С., Шахов Н.И., Гладышев А.И. Комплексные системы ориентации космических аппаратов и контроль внутренней метрологии // Вторая Всероссийская научно-техническая конференция молодых конструкторов и инженеров, посвященная 120-летию со дня рождения академика А.Л. Минца и 60-летию аспирантуры Радиотехнического института: сборник трудов. М., 2015. С. 206–215. (Серия «Минцевские чтения»).
5. Жуков А.О., Захаров А.И., Прохоров М.Е., Мошкалева В.Г., Шахов Н.И., Зиновьев И.А. Моделирование фона неба в широком спектральном диапазоне в околоземном космическом пространстве // Механика, управление и информатика. 2015. Т. 7, № 2 (55). С. 235–245.
6. Жуков А.О., Захаров А.И., Прохоров М.Е., Шахов Н.И., Гедзюн В.С., Гладышев А.И. Моделирование фона неба в широком спектральном диапазоне в околоземном космическом пространстве // Вторая Всероссийская научно-техническая конференция молодых конструкторов и инженеров, посвященная 120-летию со дня рождения академика А.Л. Минца и 60-летию аспирантуры Радиотехнического института: сборник трудов. М., 2015. С. 222–233. (Серия «Минцевские чтения»).
7. Жуков А.О., Захаров А.И., Прохоров М.Е., Шахов Н.И., Гедзюн В.С., Гладышев А.И., Тучин М.С., Мошкалева В.Г., Крусанова Н.А. Моделирование фоновой обстановки околоземного космического пространства // Третья Всероссийская научно-техническая конференция молодых конструкторов и инженеров «Минцевские чтения», посвященная 70-летию Радиотехнического института имени академика А.Л. Минца и 70-летию ФИЗТЕХА: сборник трудов. М., 2016. С. 160–168.
8. Жуков А.О., Нароенков С.А., Николаев А.В. Информационная система хранения, обработки и распространения данных о малых телах Солнечной системы // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. 2011. № 11. С. 75–78.
9. Замирец О.Н., Замирец Я.О. Методы и компоненты построения астроизмерительных систем для космических аппаратов // Системи обробки інформації. 2016. Вип. 5.
10. Захаров А.И., Прохоров М.Е., Тучин М.С., Жуков А.О. Минимальные технические характеристики звездного датчика ориентации, необходимые для достижения заданной погрешности // Астрофизический бюллетень. 2013. Т. 68, № 4. С. 507–520.
11. Иванов А.В., Пашенцев Д.Ю., Тишкин Р.В. Алгоритмы идентификации звездных узоров в задаче уточнения элементов внутреннего ориентирования // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 4.
12. Калинин Т.В., Жуков А.О., Абраменко Е.В. Потенциальная разрешающая способность оптико-электронного прибора космического базирования // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2018. Вып. 3. С. 47–59.

13. Князев В.О., Поздняков А.А. Повышение вероятности распознавания звезд путем комплексирования звездного датчика и МЭМС-гироскопа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2014. № 1.
14. Кружилов И.С., Шамаев О.Ю. Алгоритм селекции звезд по постоянству угловых расстояний // Программные продукты и системы. 2009. № 3.
15. Никифоров М.Г., Захаров А.И., Прохоров М.Е., Галушина Т.Ю., Жуков А.О. Оценка возможности практической реализации автономной навигации космических аппаратов в дальнем космосе по астероидам // Механика, управление и информатика. 2015. Т. 7, № 2 (55). С. 311–322.
16. Патент РФ 2052188 Способ идентификации точечных объектов. МКИ G01N 21/25.
17. Патент РФ 2376213 Способ ориентации и автономной навигации космического аппарата системы мониторинга Земли и околоземного. МКИ G01C 21/02.
18. Прохоров М.Е., Захаров А.И., Жуков А.О., Миронов А.В., Стекольников О.Ю. Солнечный датчик на основе интерференционной оптической системы // Механика, управление и информатика. 2015. Т. 7, № 2 (55). С. 142–147.
19. Соловьев И.В. Алгоритмы оценки ориентации и угловой скорости космического аппарата с помощью звездного датчика // Авиакосмическое приборостроение. 2013. № 7.
20. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос, 2007.

Literatura

1. Avanesov G.A., Bessonov R.V., Forsh A.A., Kudelin M.I. Analiz sovremennogo sostoyaniya i perspektiv razvitiya priborov zvezdnoj orientacii semeystva BOKZ // Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye. 2015. Т. 58, № 1.
2. Vorob'ev L.M. Astronomicheskaya navigatsiya letatel'nyh apparatov. М.: Mashinostroyeniye, 1968.
3. Gajvoronskij S.V., Rusina E.V., Codokova V.V. Identifikatsiya zvezd pri opredelenii astronomicheskikh koordinat avtomatizirovannym zenitnym teleskopom // Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2015. Т. 15, № 1.
4. Zhukov A.O., Zaharov A.I., Prohorov M.E., Biryukov A.V., Stekol'shchikov O.Yu., Tuchin M.S., Shahov N.I., Gladyshev A.I. Kompleksnyye sistemy orientacii kosmicheskikh apparatov i kontrol' vnutrennej metrologii // Vtoraya Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh konstruktorov i inzhenerov, posvyashchennaya 120-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A.L. Mintsya i 60-letiyu aspirantury Radiotekhnicheskogo instituta: sbornik trudov. М., 2015. S. 206–215. (Seriya "Mintsevskie chteniya").
5. Zhukov A.O., Zaharov A.I., Prohorov M.E., Moshkalev V.G., Shahov N.I., Zinov'ev I.A. Modelirovaniye fona neba v shirokom spektral'nom diapazone v okolozemnom kosmicheskom prostranstve // Mekhanika, upravleniye i informatika. 2015. Т. 7, № 2 (55). S. 235–245.
6. Zhukov A.O., Zaharov A.I., Prohorov M.E., Shahov N.I., Gedzyun V.S., Gladyshev A.I. Modelirovaniye fona neba v shirokom spektral'nom diapazone v okolozemnom kosmicheskom prostranstve // Vtoraya Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh konstruktorov i inzhenerov, posvyashchennaya 120-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A.L. Mintsya i 60-letiyu aspirantury Radiotekhnicheskogo instituta: sbornik trudov. М., 2015. S. 222–233. (Seriya "Mintsevskie chteniya").
7. Zhukov A.O., Zaharov A.I., Prohorov M.E., Shahov N.I., Gedzyun V.S., Gladyshev A.I., Tuchin M.S., Moshkalev V.G., Krusanova N.L. Modelirovaniye fonovoy obstanovki okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva // Tre't'ya Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh konstruktorov i inzhenerov "Mincevskie chteniya", posvyashchennaya 70-letiyu

Radiotekhnicheskogo instituta imeni akademika A.L. Minca i 70-letiyu FIZTEKHA: sbornik trudov. M., 2016. S. 160–168.

8. Zhukov A.O., Naroenkov S.A., Nikolaev A.V. Informacionnaya sistema hraneniya, obrabotki i rasprostraneniya dannyh o mal'nykh telakh Solnechnoj sistemy // T-Comm – Telekommunikacii i transport. 2011. № 11. S. 75–78.

9. Zamirec O.N., Zamirec Ya.O. Metody i komponenty postroeniya astroizmeritel'nyh sistem dlya kosmicheskikh apparatov // Sistemi obrobki informacii. 2016. Vip. 5.

10. Zaharov A.I., Prohorov M.E., Tuchin M.S., Zhukov A.O. Minimal'nye tekhnicheskie karakteristiki zvezdnogo datchika orientacii, neobhodimye dlya dostizheniya zadannoj pogreshnosti // Astrofizicheskij byulleten'. 2013. T. 68, № 4. S. 507–520.

11. Ivanov A.V., Pashencev D.Yu., Tishkin R.V. Algoritmy identifikacii zvezdnyh uzorov v zadache utochneniya ehlementov vnutrennego orientirovaniya // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aehrosmicheskogo universiteta. 2012. № 4.

12. Kalinin T.V., Zhukov A.O., Abramenko E.V. Potencial'naya razreshayushchaya sposobnost' optiko-ehlektronnogo pribora kosmicheskogo bazirovaniya // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie. 2018. Vyp. 3. S. 47–59.

13. Knyazev V.O., Pozdnyakov A.A. Povyshenie veroyatnosti raspoznavaniya zvezd putem kompleksirovaniya zvezdnogo datchika i MEHMS-giroskopa // Vestnik MGTU im. N.Eh. Bauma-na. Seriya "Priborostroenie". 2014. № 1.

14. Kruzhilov I.S., Shamaev O.Yu. Algoritm selekcii zvezd po postoyanstvu uglovyh rastoyanij // Programmnye produkty i sistemy. 2009. № 3.

15. Nikiforov M.G., Zaharov A.I., Prohorov M.E., Galushina T.Yu., Zhukov A.O. Ocenka vozmozhnosti prakticheskoy realizacii avtonomnoj navigacii kosmicheskikh apparatov v dal'nem kosmose po asteroidam // Mekhanika, upravlenie i informatika. 2015. T. 7, № 2 (55). S. 311–322.

16. Patent RF 2052188 Sposob identifikacii tochechnykh ob'ektov. MKI G01N 21/25.

17. Patent RF 2376213 Sposob orientacii i avtonomnoj navigacii kosmicheskogo apparata sistemy monitoringa Zemli i okolozemnogo. MKI G01C 21/02.

18. Prohorov M.E., Zaharov A.I., Zhukov A.O., Mironov A.V., Stekol'shchikov O.Yu. Solnechnyj datchik na osnove interferencionnoj opticheskoy sistemy // Mekhanika, upravlenie i informatika. 2015. T. 7, № 2 (55). S. 142–147.

19. Solov'ev I.V. Algoritmy ocenki orientacii i uglovoj skorosti kosmicheskogo apparata s pomoshch'yu zvezdnogo datchika // Aviakosmicheskoe priborostroenie. 2013. № 7.

20. Fedoseev V.I., Kolosov M.P. Optiko-ehlektronnye pribory orientacii i navigacii kosmicheskikh apparatov. M.: Logos, 2007.