

Институт космических исследований РАН



**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПРОБЛЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ОРИЕНТАЦИИ ПО СНИМКАМ ЗВЕЗД**

Барке В.В., Венкстерн А.А., Котцов В.А



2022



Современные средства звездной ориентации

С развитием космической техники активно разрабатываются и совершенствуются методы и средства навигации по наблюдениям звезд. 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 и успешно обеспечивают ориентацию даже при отказе других систем.



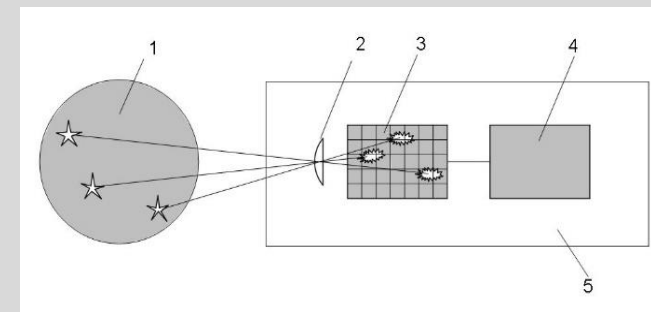
Конструкция типичного звездного датчика ориентации содержит входную оптику, которая ограничивает поле зрения прибора, матричного фотоприемника и электронного блока определения ориентации, который содержит в своей памяти бортовой каталог с координатами звезд. Разработано множество конструкций датчиков звездной ориентации для различных применений.

Федосеев В.И., Колосов М.П. Опτικο - электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов М. Логос, 2007 г.

Эффективность определения зависит от размера поля зрения звездного датчика, количества и звездных величин наблюдаемых звезд, разрешения фотоприемника, алгоритма определения ориентации, скорости выполнения операций, объема и организации бортового каталога.

Технология звездной ориентации

Сущность применяемых методов заключается в том, что наблюдают группу звезд в поле зрения прибора звездной ориентации, измеряют расстояния между парами звезд 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.



Важное достоинство звездных датчиков заключается в том, что один прибор по оценкам локальных параметров позволяет автономно производить ориентацию сразу по трем координатным осям.

Разработка программного обеспечения для определения ориентации по изображениям звездного неба, моделирование этой задачи, оптимизация и оценка возможностей началась еще задолго до появления самих звездных датчиков матричного типа.

Аванесов Г.А., Алексакин Е.П., Алексашина Г.А., Балебанов В.И., Зиман Я.Л., Красиков В.А., Снеткова Н.И. Математическое обеспечение определения ориентации КА по изображениям звездного неба. // Оптико-электронные приборы в космических экспериментах. М. Наука, 1983

Достаточно подробно процесс определения ориентации описан в работе, например, где используют измерения расстояний между звездами и подробно описан сам алгоритм определения ориентации.

Воробьев С. Н. и Лазарев И. В. Алгоритм распознавания конфигураций звезд, // Информационные управляющие системы, №2, 2008 г.

Попытки повышения эффективности

Предложены различные аналитические способы повышения эффективности распознавания звезд с помощью усложнения формулировки задачи. Известны **алгебраические и топологические** подходы.

Mortari D. Search-less algorithm for star pattern recognition // Journal of Astronautical Sciences.—1997, N.45 и Spratling B., Mortari D. Survey on Star Identification Algorithms // Algorithms 2009, 2.

Предлагалось также использование **дополнительной информации** от других систем ориентации, например, направление на Солнце, местной вертикали, линии горизонта, учет спектрального класса или яркости звезд. Однако, это существенно усложняет получение и обработку данных, а угловые определения другими методами имеют более низкую точность.

и решаемые проблемы

Главная проблема известных способов, которые основываются на сравнении расстояний между звездами в том, что все они приводят к необходимости перебора информации бортового каталога.

Вторая проблема заключается в необходимости иметь достаточно большой объем памяти для хранения необходимой информации о звездах в бортовом каталоге.

Третья проблема возникает из-за противоречия в необходимости наблюдения в широком поле зрения для гарантированного нахождения достаточного числа ярких звезд, тогда как для достижения высокой точности определений необходимо выполнять наблюдения с высоким разрешением, то есть в узком поле зрения.

Способ ориентации без перебора бортового каталога

Ключевое значение в опознавании созвездий имеет взаимное расположение составляющих их звезд. Этих локальных признаков оказалось достаточно для узнаваемости созвездий.

Сущность предложенного нами технического решения заключается в том, что вместо нахождения подобия конфигураций звездных узоров, **осуществляется переход от реального пространства наблюдаемых звездных координат к признаковому пространству расстояний между звездами**, в котором их реальные пространственные координаты выполняют роль имен этих звезд.

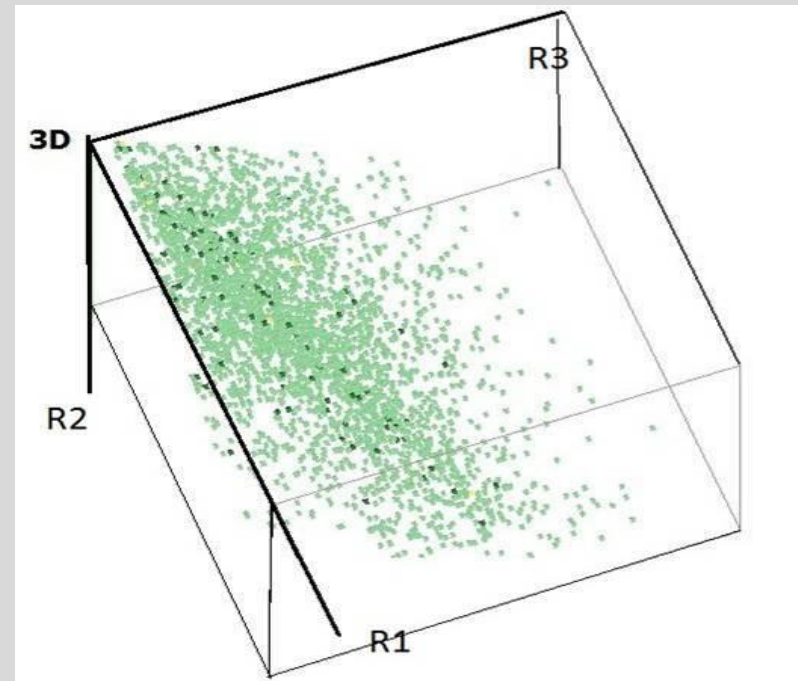
Минимальным созвездием является треугольник звезд.

R1 - расстояние от опорной звезды до первой ближайшей звезды,

R2 - расстояние от опорной звезды до второй ближайшей звезды,

R3 - расстояние между первой и второй ближайшими звездами

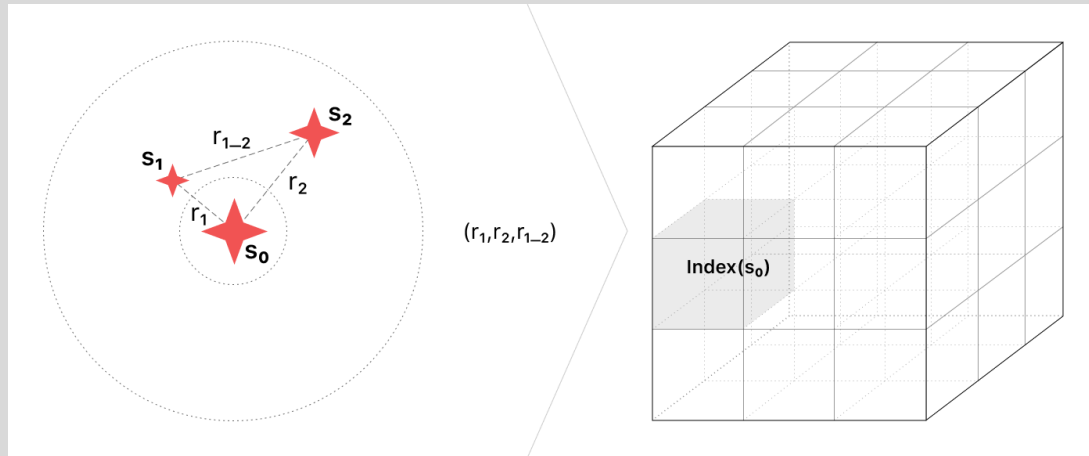
Каталог звезд для наших экспериментов содержит **3349** звёзд



Барке В.В., Венкстерн А.А., Захаров А.И., Котцов В.А. Способ определения ориентации по изображениям участков звездного неба: Патент РФ 638077 // Б.И. 2017. № 35.

Венкстерн А.А., Захаров А.И., Котцов В.А., Барке В.В. Быстрый поиск звезд при навигационных определениях // 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами». Тезисы докладов. Москва: Научтехлитиздат, 2017. Т. 1

О структуре бортового каталога звезд



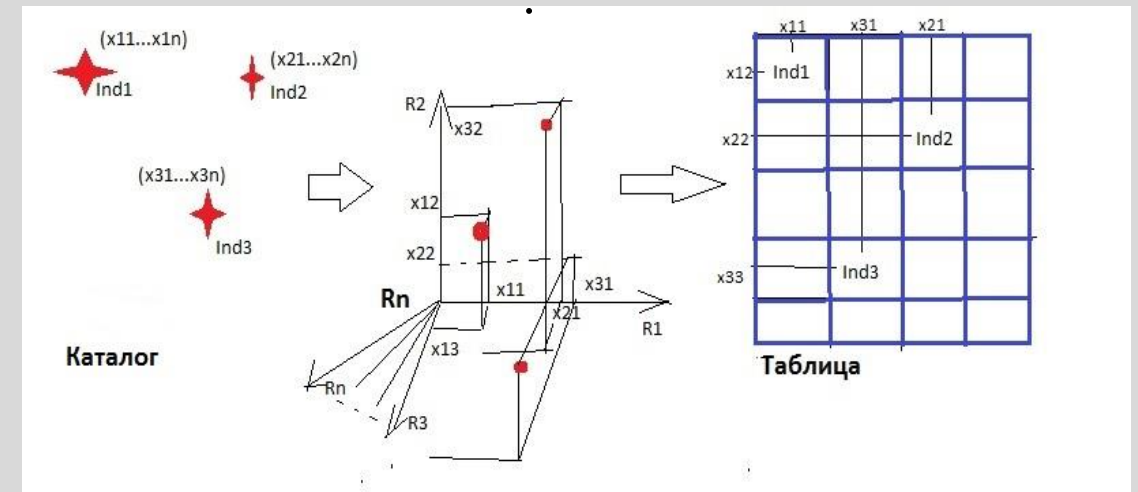
Центральная и две ближайших звезды образуют с ней треугольник.

Все стороны треугольника определяют один набор координат центральной звезды в \mathbf{R}^3 и задают одну ячейку в трёхмерном массиве признакового каталога.

Значения координат в каталоге пространства признаков ограничиваются максимальными расстояниями между наблюдаемыми в поле зрения звездами. То есть размер **признакового пространства ограничен**.

Барке В.В., Венкстерн А.А., Котцов В.А., Тавров А.В., Юдаев А.В. Быстрый алгоритм идентификации кадра звездного датчика по звездным конфигурациям, не требующий перебора. Вариант бортовой реализации // Гироскопия и навигация, 2021 том 29, № 3

Межзвёздные расстояния формируют признаковое пространство \mathbf{R}^n - признаковый бортовой каталог, представленный таблицей в целых числах



Технология сжатия бортового каталога звезд

В нашем эксперименте **максимальные размеры расстояний в треугольнике**, определяющем звезду, получаются следующие значения по координатным осям: **117, 127, 190**. Поле индекса для каждой из **3349** звёзд помещается в 2 байта. Оценка необходимого объема памяти для каталога для нашей модели звездного датчик составила **5 646 420** байтов. Это достаточно большой объем требуемый для хранения данных.

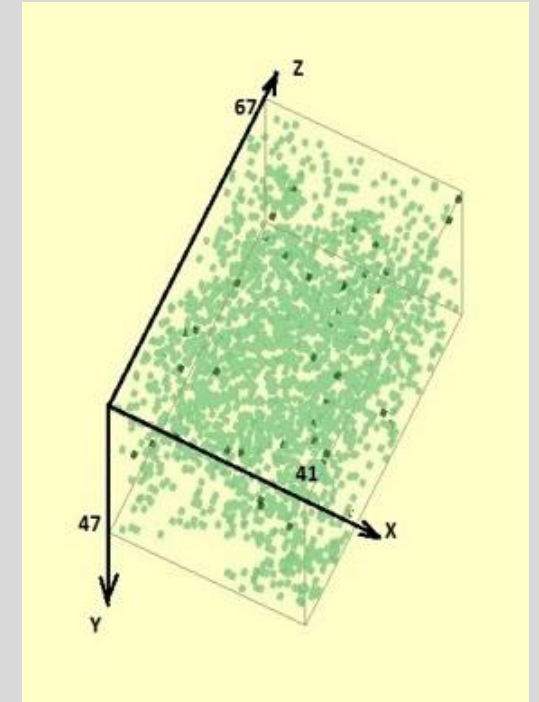
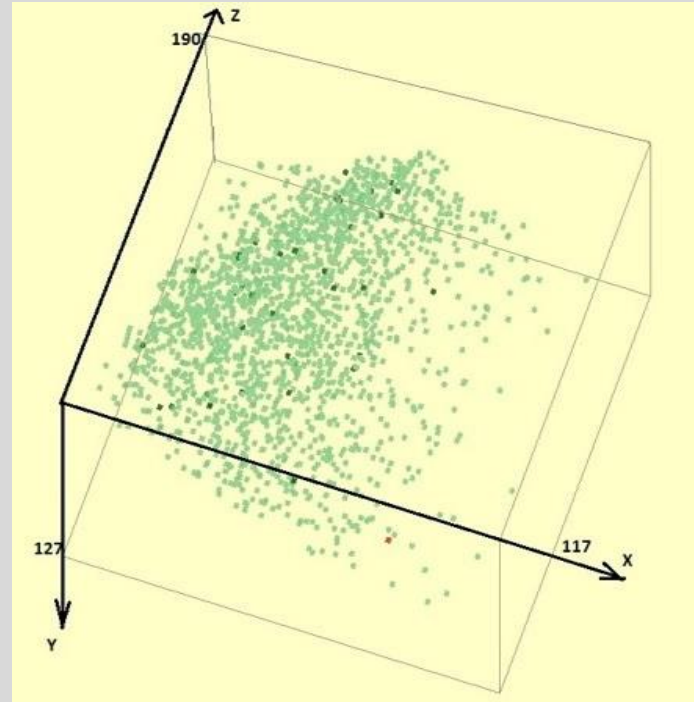
Предложено произвести уплотнение признакового пространства делением его размерности на целые числа, оставляя значимым только остаток от деления. Вариант применения модулярной арифметики

Соответствующие размеры полученные по координатным осям стали :**41, 47, 67**.

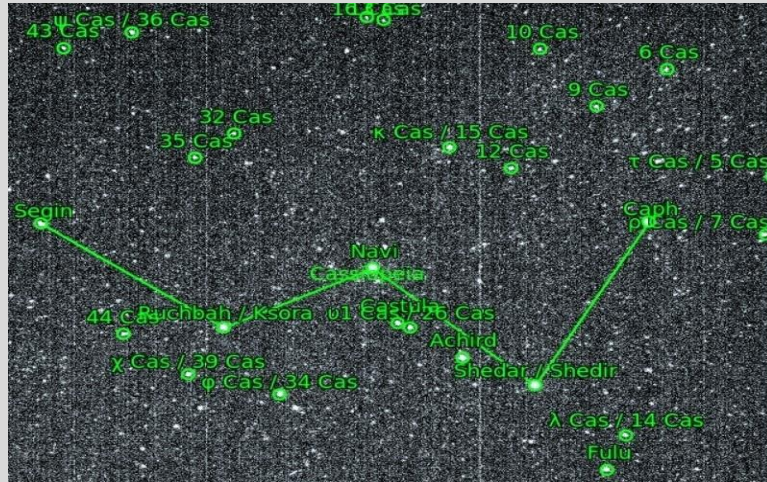
Такое преобразование для нашей модели позволило уменьшить **необходимый объем памяти** для нашего каталога до **258218** байтов.

Объем требуемой памяти для бортового звездного каталога уменьшился более чем в 20 раз.

Барке В.В., Венкстерн А.А., Котцов В.А. Способ определения ориентации по изображениям участков звездного неба: Патент РФ 2749580 // Б.И. 2021. №17.



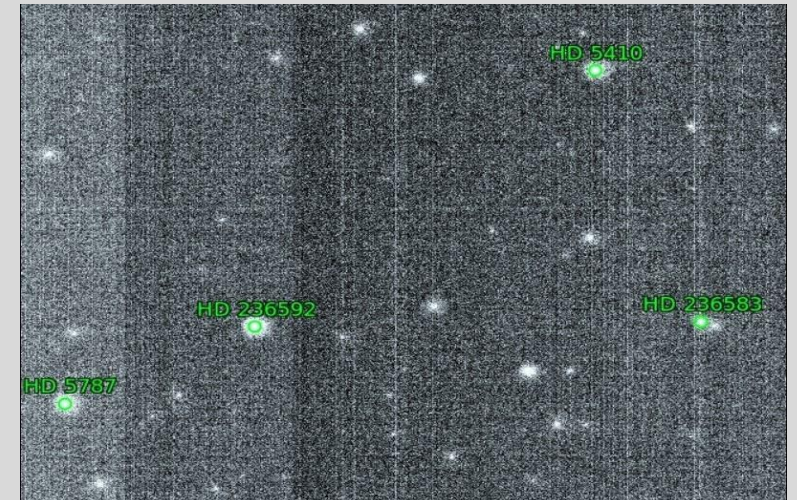
Выбор оптимального поля зрения и разрешения прибора



Для решения этой дилеммы предложен двухмасштабный способ определения ориентации по наблюдению участка звездного неба. С широким полем зрения для определения ориентации и с узким полем для уточнения этой ориентации.

Наблюдения звездного неба были выполнены с фотоприемной матрицей размером **1280x960** пикселей в области созвездия Кассиопея

Были получены два изображения одного и того же участка звездного неба в одном направлении визирования, первый с широким полем зрения, около 20 градусов, и второй узким полем зрения, около 0.7 градуса. Соответствие ориентации визирных осей двух кадров в эксперименте составило около **1.5** градусов, при этом область звездного неба узкопольного изображения целиком содержится внутри области широкопольного изображения.



Предлагаемый двухэтапный способ определения ориентации по наблюдению участка звездного неба обеспечивает существенное повышение точности ориентации, но при этом не требует введения новых сложных процедур

Барке В.В., Венкстерн А.А., Котцов В.А. Способ определения ориентации по изображениям участков звездного неба. Заявка на изобретение. 2022.

Заключение

Исключение необходимости перебора большого объема данных бортового каталога для нахождения наблюдаемых звезд при определении ориентации решается формированием трехмерного признакового пространства на основе межзвездных расстояний и прямого нахождения в нем звезды. В этом случае, измеряя межзвездные расстояния на полученном изображении, мы можем сразу найти необходимую информацию, не делая перебора каталога.

Для уменьшения необходимого значительного объема памяти для хранения данных о звездах в бортовом каталоге предложено использовать модулярную арифметику, переходя в используемом признаковом пространстве к представлению координат остатком по модулю выбранного оптимального числа.

Противоречие в необходимости наблюдения в широком поле зрения для гарантированного нахождения достаточного числа ярких звезд, тогда как для достижения высокой точности определений необходимо выполнять наблюдения с высоким разрешением, то есть в узком поле зрения, решается при одновременном наблюдении с широким и узким полем зрения. Изображение с широким полем зрения обеспечивает определение ориентации с необходимым числом ярких звезд, а изображение с узким полем зрения, но высоким разрешением, позволяет существенно повысить точность ориентации, опираясь на уже полученные результаты.

Эффективность всех предложенных решений подтверждаются результатами экспериментальной проверки при наблюдениях реальных звезд.

