

В. В. БАРКЕ, А. А. ВЕНКСТЕРН, В. А. КОТЦОВ, А. В. ТАВРОВ, А. В. ЮДАЕВ

БЫСТРЫЙ АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ КАДРА ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА ПО ЗВЕЗДНЫМ КОНФИГУРАЦИЯМ, НЕ ТРЕБУЮЩИЙ ПЕРЕБОРА. ВАРИАНТ БОРТОВОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

В статье развивается метод идентификации кадра звездного датчика (ЗД), основанный на определении набора локальных признаков звезды, которые позволяют однозначно опознавать ее. Идентификаторы звезд при этом размещаются в многомерном целочисленном признаковом пространстве, а соответствующий ему признаковый каталог представлен разреженным массивом, что позволяет определять звезду без перебора. Приведены примеры бортовой реализации признаковых каталогов, состоящих из звезд до 6 звездной величины. Проведена оценка требуемой для них памяти и предложен механизм сжатия признакового каталога для размещения его в памяти бортового компьютера. Подробно описан алгоритм идентификации кадра с использованием признакового каталога уменьшенной размерности. Проверка алгоритма осуществлялась на реальных кадрах неба.

Ключевые слова: распознавание звезд, идентификация по звездным конфигурациям, признаковое пространство, целочисленный каталог, сжатие каталога, алгоритм, не требующий перебора.

1. Введение

При выводе космического аппарата (КА) на орбиту или при аварийной потере данных об ориентации КА во время полета – во всех случаях, когда отсутствует какая-либо априорная информация о его текущем положении, важным этапом является начальное определение соответствующих данных. В процессе решения этой задачи с использованием ЗД возникает важная подзадача определения координат звезд, попавших в его поле зрения. Несмотря на большое число разработок и широкое использование ЗД, продолжается поиск путей совершенствования и оптимизации применяемых методов идентификации кадра ЗД, для чего требуется комплексное рассмотрение характеристик ЗД и его ключевой составной части – бортового навигационного звездного каталога.

Определение состава и структуры этого каталога тесно связано с выбором поля зрения ЗД и количеством одновременно наблюдаемых звезд. При отборе звезд для такого каталога необходимо выполнить три противоречивых требования. С одной

Барке Виктор Владимирович. Ведущий программист, Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) (Москва).

Венкстерн Алла Алексеевна. Программист, ИКИ РАН.

Котцов Владимир Александрович. Научный сотрудник, ИКИ РАН.

Тавров Александр Викторович. Ведущий научный сотрудник, ИКИ РАН.

Юдаев Андрей Викторович. Аспирант, Московский физико-технический институт.

стороны, надо обеспечить равномерное распределение выбранных навигационных звезд по всей небесной сфере, с другой – минимизировать объем создаваемого каталога и время получения решения.

1.1. Постановка задачи

Для определения координат звезд, попавших в поле зрения ЗД, нужно установить соответствие между объектами, полученными на реальном изображении в кадре ЗД, и звездами бортового каталога. Это наиболее затратная по времени задача среди тех, которые решаются посредством вычислителя ЗД [20]. Учитывая значительные скорости перемещений космических КА, необходимо минимизировать время получения решения.

С этой целью предлагается использовать апробированный оптимизированный метод идентификации кадра. Его описание представлено в настоящей статье.

1.2. Подходы к решению задачи

Объекты, определяемые в кадре ЗД, далее называются «фотоцентрами». В бортовом каталоге, содержащем координаты навигационных звезд, звезды задаются своими номерами, или «идентификаторами». Процесс распознавания кадра заключается в том, что для некоторых фотоцентров находят соответствующие им звезды бортового навигационного каталога, это и позволяет определять их координаты. Минимально необходимое количество идентифицированных звезд для определения координат центра кадра и угла поворота вокруг оси визирования – две. Но при наличии помех для увеличения точности требуется больше звезд – чем больше, тем лучше.

Важное место при использовании ЗД занимает способ отождествления наблюдаемых в кадре фотоцентров со звездами каталога. Его выбор в значительной степени определяет оперативность получения навигационных данных.

Существуют различные типы алгоритмов распознавания групп звезд, в работах [1, 2, 3, 4] приводятся их классификация и соответствующие примеры со ссылками. Выделим из всего многообразия алгоритмов идентификации геометрические как наиболее быстродействующие. Они основаны на составлении различных геометрических фигур из звезд, попавших в поле зрения объектива ЗД. В геометрических алгоритмах в качестве базовых характеристик для распознавания используются межзвездные угловые расстояния, сферические углы, образуемые звездами на небесной сфере, отношения сторон, периметры, площади фигур, образованных звездами, и прочие характеристики с последующим сравнением их с таковыми же для звезд бортового каталога, заранее записанными в память компьютера. Такие алгоритмы описаны в работах [5, 6, 7], алгоритм сравнения подобных треугольников, образуемых звездами, – в [8]; алгоритмы поиска по попарным межзвездным расстояниям между опорными звездами предложены в [9].

Поиск по базе геометрических характеристик в процессе идентификации звезды занимает значительное время, во многих исследованиях предлагаются способы ускорения этого поиска. Например, в [10] для ускорения поиска небесная сфера и динамическая база характеристик разбиваются на 14 частей с учетом чувствительности и поля зрения ЗД. При отсутствии априорных данных об орбите, на которую

выведен объект, распознавание производится последовательно по всем 14 областям. Из значений угловых расстояний между ближайшими звездами формируются цепочки. Находится наилучшая цепочка как минимум некоторой функции, определяющей меру различия между двумя характеристиками фигур, образованных звездами. В работе [11] для ускорения поиска предлагается построение некоторого целочисленного «к-вектора», при помощи которого диапазон перебора значительно сокращается. В работе [1] вводится каталог звездных триплетов, позволяющий осуществлять его быстрый просмотр. В основе алгоритма лежит распознавание структуры из трех звезд без учета информации об их яркости. В [12] сравниваются алгоритмы распознавания, основанные на угловых расстояниях между звездами, и корреляционно-экстремальные алгоритмы. Все эти алгоритмы на каком-то этапе вычислений переходят к поиску в каталоге межзвездных расстояний путем перебора, так или иначе модифицированного различными приемами для его сокращения.

Мы продолжаем развивать метод идентификации по признаковому пространству, построенному на основе межзвездных расстояний [14], основным преимуществом которого является быстродействие. Оно достигается такой организацией признакового каталога, представляющего признаковое пространство в памяти бортового компьютера, которая не требует перебора при получении идентификатора звезды. Более того, даже при наличии погрешности измерений во время наблюдения предлагаемая организация признакового каталога позволяет отождествить наблюдаемые в кадре фотоцентры с навигационными звездами.

2. Основные идеи предложенного решения

Впервые метод начального распознавания кадра по локальным параметрам окрестности звезды был предложен в работах [13, 14]. В этом методе дополнительно к координатам каждой навигационной звезды в бортовую память 3Д записывается некоторая информация, характеризующая небольшую окрестность звезды из полного каталога. Эта информация представляет собой набор чисел, которые могут быть найдены на основе видимого изображения 3Д. В набор могут входить яркости, расстояния до ближайших звезд, отношения расстояний, количество обнаруживаемых звезд в небольшой окрестности данной звезды, ограниченной углом поля зрения конкретного 3Д. Такой набор чисел определяется заранее по полному каталогу для каждой навигационной звезды и записывается в память 3Д. В процессе обработки кадра 3Д для каждого фотоцентра определяется аналогичный набор чисел и фотоцентр отождествляется с навигационной звездой по сходству этого набора с набором, записанным в память 3Д. Ясно, что увеличением количества характеристик, т.е. чисел в наборе, можно добиться его уникальности. Это было проверено и подтверждено для нескольких вариантов наборов [13, 14]. После изучения различных наборов локальных характеристик мы выбрали только геометрические характеристики – некоторое количество попарных расстояний от определяемой звезды до ближайших звезд и расстояния между ними [14], вычисленные в пикселях кадра конкретного 3Д. Эти локальные характеристики (числа) далее называем признаками.

Количество признаков, достаточное для надежного отождествления фотоцентра со звездой каталога, зависит от параметров конкретного датчика: его поля зрения, чувствительности, числа звезд в каталоге. Оказалось, что во многих случаях для на-

дежного определения звезды достаточно небольшого числа расстояний, определяющих жесткую фигуру, включающую данную звезду. В работе [14] было предложено перейти к новому признаковому пространству для размещения в нем идентификаторов звезд навигационного каталога. Признаки в нашем случае – это межзвездные расстояния, которые рассматриваются как n -мерный вектор в признаковом пространстве R^n , где n – количество признаков (расстояний). Таким образом, в признаковом пространстве звезда с номером i получает координаты $(r_{i1}, \dots, r_{in})$, где r_{ij} – значение j -го расстояния для данной звезды [15, 16].

В данной статье мы делаем следующий шаг – переходим в заданных единицах (пикселях, долях пикселя кадра конкретного датчика) к целым числам. Целочисленные координаты $x_{i1} = \text{round}(r_{i1}), \dots, x_{in} = \text{round}(r_{in})$ позволяют рассматривать признаковое пространство как n -мерный массив размером $\max(r_{i1}) * \dots * \max(r_{in})$. В этом массиве в ячейке с индексами $(x_{i1}, \dots, x_{in})$ стоит идентификатор звезды по навигационному каталогу (см. рис. 1).

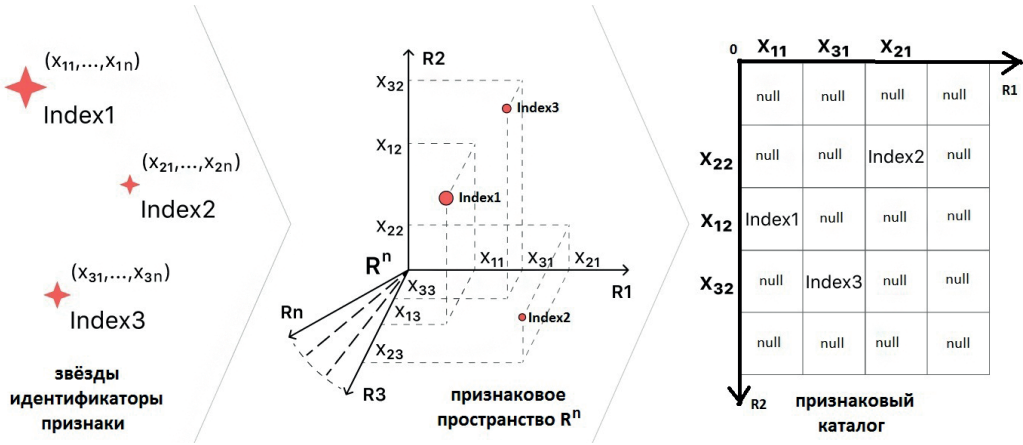


Рис. 1. Процесс построения признакового каталога.

Слева: **Index1**, **Index2**, **Index3** – идентификаторы звезд по навигационному каталогу; $(x_{i1}, \dots, x_{in})$ – вычисленные для них наборы целочисленных межзвездных расстояний, где i – номер звезды в навигационном каталоге.

В центре: признаковое пространство R^n – звезда **Indexi** находится в точке с координатами $(x_{i1}, \dots, x_{in})$. Координаты x_{ij} откладываются по оси R_j .

Справа: признаковый каталог, представленный n -мерным массивом, где в ячейке с индексами $(x_{i1}, \dots, x_{in})$ записан идентификатор звезды по навигационному каталогу **Indexi** (изображена проекция на плоскость $R_1 \wedge R_2$)

Для каждой звезды можно определить несколько наборов координат, тогда в признаковом пространстве появится несколько экземпляров звезды, а идентификатор звезды будет представлен в этом массиве несколько раз. В остальных ячейках массива стоят нули.

В дополнение к бортовому навигационному каталогу, содержащему координаты звезд, в память компьютера записывается полученный разреженный массив, содержащий идентификаторы звезд навигационного каталога. Этот массив представляет собой признаковый каталог в бортовой памяти.

Тогда идентификация фотоцентра в кадре не требует перебора и поиска по списку, а сводится к вычислению по заданному правилу значений $x_1, \dots, x_n$ для фотоцентра

и чтению идентификатора соответствующей ему звезды из ячейки $x_1, \dots, x_n$ признакового каталога. Дополнительно для учета погрешности определения расстояний можно рассматривать соседние клетки массива $x_i \pm 1, \dots, x_n \pm 1$. Требуется ли эта процедура, зависит от конкретного датчика и его бортового каталога. Если в массиве идентификатор звезды не найден ни для какого набора признаковых координат фотоцентра, то этот фотоцентр считается не определенным. Если найдено какое-то количество подходящих звезд, то проводятся дополнительные проверки, описанные в разделе 3.

Построенный таким образом признаковый каталог – это разреженный массив, заполненный значительно меньше, чем на 1%, за счет чего и достигается беспереборная идентификация.

3. Описание алгоритма

Для описания алгоритма введем обозначения:

- **T** – множество всех звезд некоторых исходных больших каталогов, например Hipparcos и Tycho-2;
- **B** – «базовое» множество звезд, которое рассматривается при создании каталога для данного датчика. Это некоторая выборка из **T** по яркости и другим параметрам;
- **B'** – аналог **B** для кадра. Множество фотоцентров, которые будут рассматриваться при идентификации кадра;
- **Nav** – множество звезд бортового навигационного каталога;
- s_i – звезда с идентификатором **Indexi**;
- **ph*** – фотоцентры (префикс ph используется для обозначения фотоцентров);
- **R** – радиус окрестности звезды, используемый для выбора звезд и вычисления расстояний. В окрестность входят звезды, находящиеся от нее на расстоянии менее чем **R** и более чем R_{min} , где R_{min} – минимальное расстояние до опорной звезды;
- r_j – значение j -го расстояния для **некоторой** звезды или фотоцентра;
- r_{ij} – значение j -го расстояния для i -й звезды или фотоцентра;
- **Indexi** – идентификатор i -й звезды в каталоге **Nav**;
- **NavTable** – массив признакового каталога, отображающий в памяти бортового компьютера расположение навигационных звезд в признаковом пространстве.

Построение массива подробно описано в разделе 3.1.

При построении признакового каталога и при идентификации кадра должны проводиться одни и те же действия, только в первом случае со звездами каталога, а во втором – с фотоцентрами кадра. Важно, чтобы эти действия приводили к одному и тому же результату для звезды каталога и соответствующего фотоцентра кадра. Это будет получаться не всегда из-за помех, погрешностей в определении яркостей и расстояний между фотоцентрами, поэтому надежность работы алгоритма обеспечивается за счет избыточности признакового каталога: идентификатор каждой звезды должен фигурировать в признаковом каталоге несколько раз (параметр алгоритма) и в кадре должно обнаруживаться достаточно много звезд из бортового каталога.

3.1. Предварительный этап – построение признакового каталога

От чувствительности конкретного датчика, размера его поля зрения при построении признакового каталога будут зависеть параметры алгоритма. В базовое

множество звезд внутри окрестности данной звезды, на основе которого строится признаковый каталог, могут быть включены только звезды ярче некоторой звездной величины m_0 , определяемой чувствительностью датчика. Кроме того, базовое множество может задаваться различными способами и содержать:

- все звезды окрестности звезды, определяемые датчиком;
- только навигационные звезды;
- звезды, определяемые более сложным критерием.

Под конкретный датчик также задаются:

- количество расстояний n – размерность признакового пространства R^n и правило их выбора;
- количество p наборов координат, определяющих каждую звезду. Идентификатор звезды будет представлен в каталоге p раз, p может быть разным для разных звезд;
- размер кольцевой окрестности, из которой выбираются звезды для вычисления координат $(x_1, \dots, x_n)$. Он может быть как один для всего каталога, так и зависеть от положения звезды на небе.

Для каждой звезды s_0 , содержащейся в навигационном каталоге с идентификатором $\text{Index}(s_0)$, из множества звезд B выбираются по заданному правилу k звезд (считая вместе с центральной), находящихся от нее на расстоянии, меньшем или равном R и большем $R_{\min}$. Для этих k звезд вычисляются n межзвездных расстояний. Вычисленные n расстояний переводятся в целые числа $x_{01} \dots x_{0n}$, которые будут служить координатами звезды s_0 в n -мерном признаковом пространстве. Признаковое пространство представляется n -мерным массивом признакового каталога **NavTable**. В массиве **NavTable** в ячейку с индексами $x_{01} \dots x_{0n}$ ставится идентификатор определяемой звезды $\text{Index}(s_0)$. Примеры наборов координат и соответствующих каталогов приведены на рис. 2 и 3.

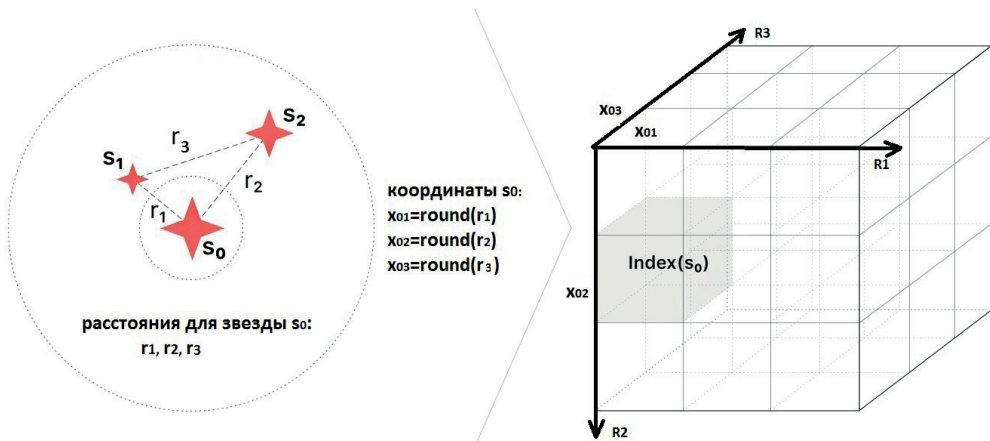


Рис. 2. Три звезды – центральная s_0 и две ближайшие к ней. Длины трех сторон треугольника определяют один набор координат в R^3 и, соответственно, одну ячейку в трехмерном массиве признакового каталога

Для бортового каталога, содержащего 2000–4000 ярчайших звезд, легко добиться уникальности координат в признаковом каталоге, если принять в качестве координат звезды три целочисленных расстояния до трех ближайших звезд и расстояния между ними. Эти шесть расстояний определяют признаковое пространство R^6 и 6-мерный массив признакового каталога **NavTable** (см. рис. 4).

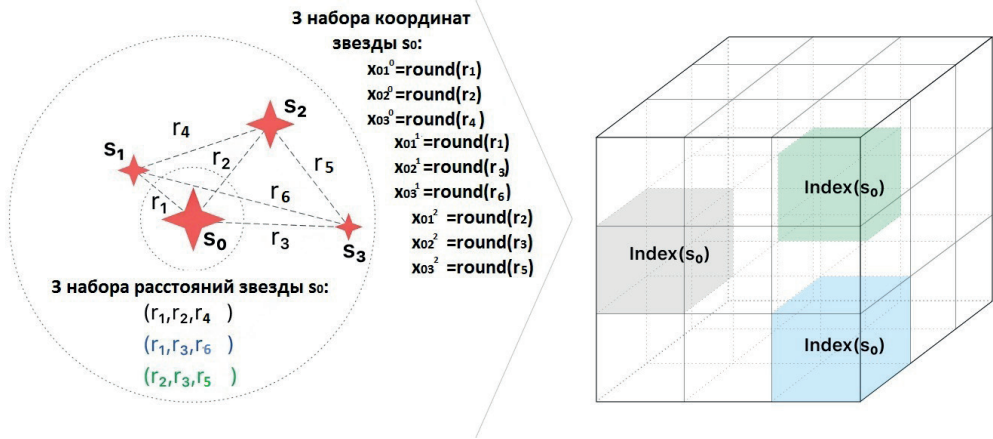


Рис. 3. Центральная и три ближайшие к ней звезды. Три треугольника – длины сторон каждого треугольника определяют один набор координат в R^3 . Всего три набора координат и, соответственно, три ячейки в трехмерном массиве признакового каталога. Верхним индексом обозначен номер набора

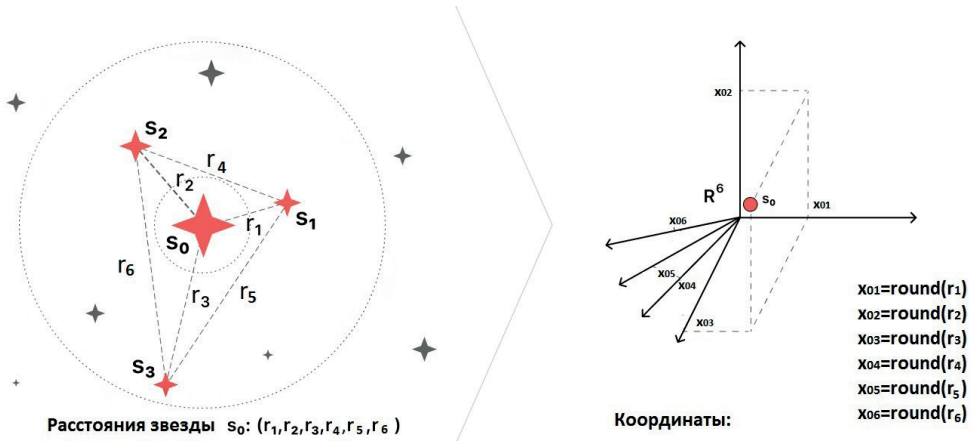


Рис. 4. Координаты вычисляются по длинам всех сторон тетраэдра, образованного определяемой звездой и тремя ближайшими к ней. Набор из 6 расстояний $(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6)$ определяет координаты $(x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{04}, x_{05}, x_{06})$ звезды s_0 в R^6 и, соответственно, шестимерный признаковый массив

Для такого каталога процесс идентификации кадра очень прост, он описан далее в разделе 3.2.1.

3.2. Идентификация кадра

3.2.1 Общая схема. Для каждого фотоцентра кадра вычисляем его координаты в признаковом пространстве и по этим координатам находим соответствующую ему звезду бортового каталога. Если список фотоцентров кадра, для которых найдены звезды бортового каталога, достаточно большой, то проводим сравнение всех остальных взаимных расстояний в кадре с соответствующими им расстояниями каталога с заданной точностью. Если проверка пройдена успешно, то кадр считается отождествленным. Поэтапно этот процесс изображен на прилагаемой схеме рис. 5.

Отметим, что ключевым моментом предлагаемого решения является построение списка идентификаторов видимых в кадре звезд без перебора каталога (см. раздел 3.3.2). Разрешение коллизий в случае появления нескольких вариантов идентификации возможно различными способами. Мы использовали при тестировании дополнительные каталоги и проверки расстояний (см. разделы 3.2.2, 3.3.3–3.3.4).

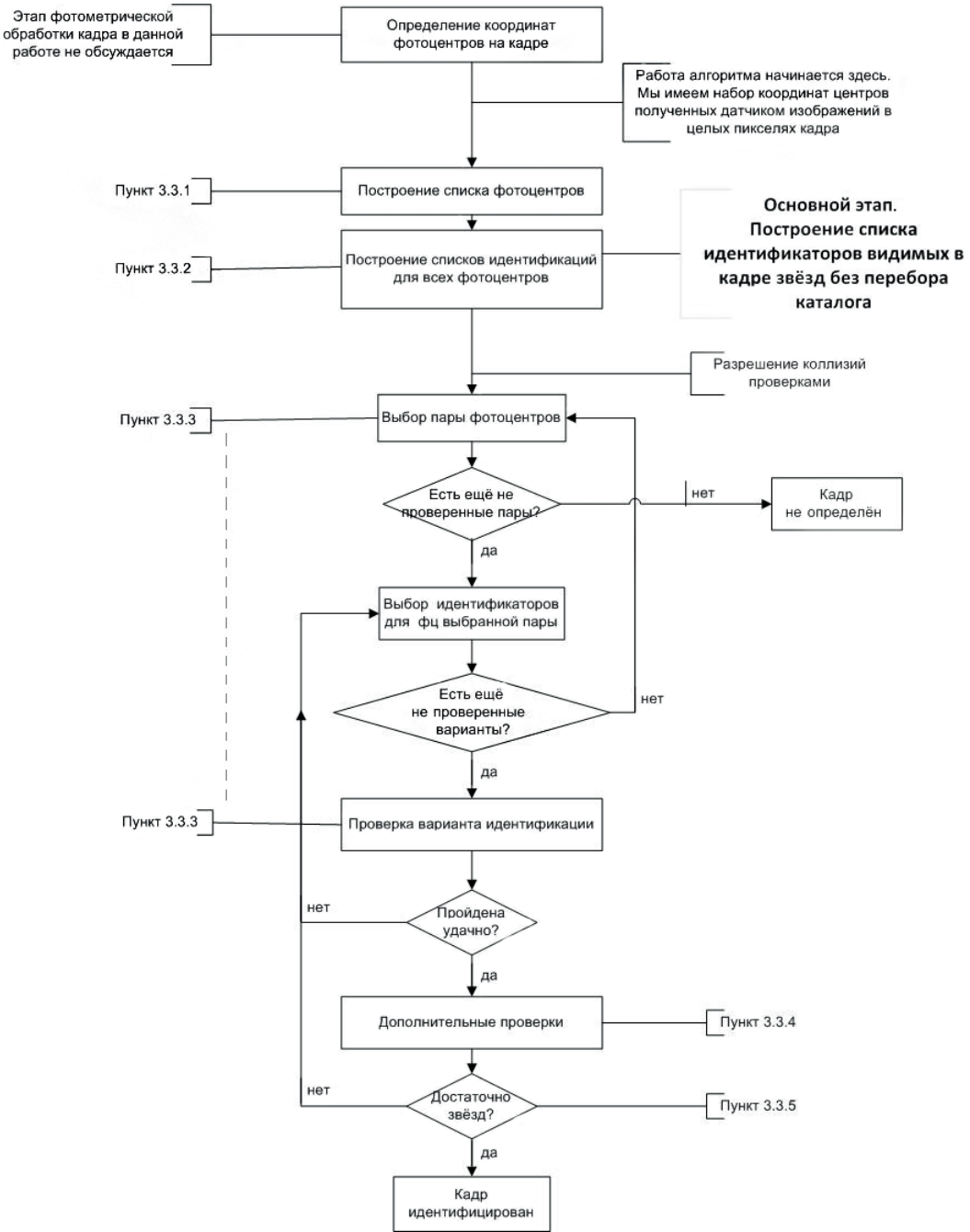


Рис. 5. Этапы идентификации кадра

3.2.2 Уменьшение размерности признакового каталога. Сформированный таким образом каталог будет сильно разрежен, в нем не окажется совпадений координат звезд, окрестности почти не будут пересекаться, и идентификация звезды произойдет быстро и надежно. Однако он требует довольно большого объема памяти, поэтому для бортового применения предлагается модификация каталога с уменьшением размерности n . Анализ показал, что при размерности признакового пространства $n=3$, то есть с набором локальных признаков, состоящим только из трех расстояний, можно добиться надежной идентификации и небольшого размера каталога. Конечно, такой набор признаков уже не будет уникальной характеристикой звезды – появятся одинаковые координаты в признаковом пространстве у разных звезд, а значит, и дубликаты в признаковом каталоге.

В этом случае для обработки совпадений координат используется еще один каталог – каталог дублей. Если в процессе построения признакового каталога обнаружится, что место в массиве уже занято (дубликат координат), то взамен идентификатора звезды на это место ставятся признак дубля и ссылка на номер строки в каталоге дублей **DublTable**, куда записываются два-три варианта идентификации для этого набора координат. Повторы большей кратности не включаем в каталог и не обрабатываем. Структура каталога показана на рис. 6.

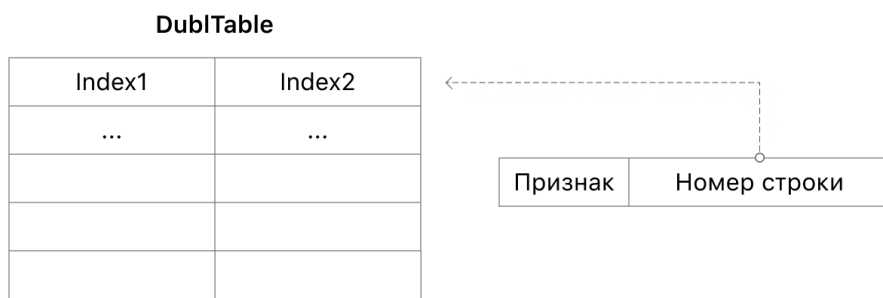


Рис. 6. Структура каталога дубликатов координат

Наличие дублей – нескольких вариантов идентификации для одного и того же набора координат – мы компенсируем за счет увеличения количества наборов координат, описывающих каждую звезду (параметр алгоритма p). Тогда каждый идентификатор появляется в массиве признакового каталога несколько раз, что увеличивает плотность его заполнения, но не приводит к увеличению его размера, который зависит только от максимальных расстояний в пикселях до ближайших звезд в кадре. Очевидно, что максимально возможное расстояние ограничено размером кадра конкретного датчика.

3.3. Этапы идентификации кадра

3.3.1 Построение списка фотоцентров кадра. При идентификации кадра мы находим координаты центров определившихся изображений объектов и строим список всех обнаруженных датчиком фотоцентров в порядке убывания яркости. От чувствительности и размера поля зрения датчика зависит, какой длины будет список. Обрезаем список по длине не более **Len**, где число **Len** – подбираемый параметр. Если список не

обрезать, то могут появиться коллизии, если же взять слишком маленький **Len**, то есть риск удаления из списка навигационных звезд. Мы брали **Len** = 25-30. Этот список фотоцентров составит базовое множество **B'** – множество объектов, которые будут рассматриваться при идентификации кадра. **B'** для кадра – аналог множества **B** для навигационного каталога. Между этими множествами нет полного взаимно однозначного соответствия, так как могут быть фотоцентры, которые не соответствуют никаким навигационным звездам, и наоборот.

3.3.2 Поиск вариантов идентификации одного фотоцентра. При идентификации фотоцентра мы повторяем те же действия, что и при вычислении признаков координат звезды при создании признакового каталога, но только с фотоцентрами кадра:

- 1) выбираем из кольцевой окрестности фотоцентра **ph0**, заданной радиусами **R** и **R_{min}**, все определившиеся фотоцентры из множества **B'**;
- 2) вычисляем на этом множестве все возможные расстояния;
- 3) переводим в целые в заданных единицах (пиксели, доли пикселя) и получаем все возможные наборы координат (**x_l^k, ..., x_n^k**) в признаковом пространстве, где **k** – номер набора;
- 4) из массива признакового каталога **NavTable** из ячеек (**x_l^k, ..., x_n^k**) считываем все возможные идентификаторы определяемого фотоцентра и получаем список вариантов отождествления фотоцентра **ph0** со звездой навигационного каталога.

Для учета погрешности в определении признаков координат в список вариантов отождествления можно добавить идентификаторы из всех соседних клеток (**x_l^k±1, ..., x_n^k±1**). Такой способ учета погрешности – извлечение данных по индексу – также не требует перебора и сравнений (см. рис. 7).

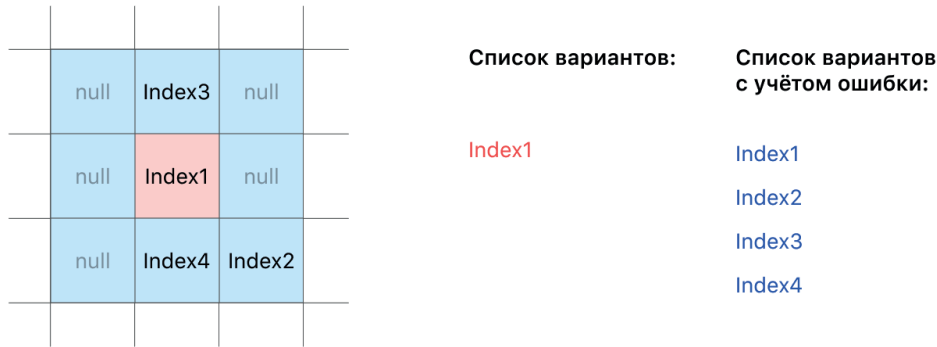


Рис. 7. Список вариантов идентификации без учета и с учетом погрешности.

При наличии нескольких вариантов отождествления фотоцентра со звездой навигационного каталога записываем их все в список звезд данного фотоцентра для обработки на следующем этапе

3.3.3 Выбор пары фотоцентров. Способом, описанным в разделе 3.3.2, для всех фотоцентров из списка находим соответствующие им звезды каталога. При наличии единственного решения для каждого фотоцентра переходим к проверке всех попарных расстояний и идентификации всего кадра (см. раздел 3.3.5).

При наличии коллизий переходим к выбору варианта идентификации фотоцентров кадра. Перебираем все возможные пары фотоцентров, начиная с наиболее ярких, и для каждой пары и каждого варианта идентификации ее фотоцентров проводим про-

цедуру проверки, описанную далее. Для пары фотоцентров **ph1** и **ph2** и варианта их идентификации **Index1** и **Index2** сравниваем расстояние в кадре между фотоцентрами **ph1** и **ph2** с расстоянием по каталогу между звездами **Index1** и **Index2**. Если разница расстояний больше или равна заданной возможной погрешности, то переходим к следующему варианту. Если разница расстояний меньше заданной погрешности, то выбираем эту пару с вариантом идентификации для дополнительной проверки.

3.3.4 Проверка варианта идентификации пары звезд. Для ускорения проверки варианта идентификации пары звезд на стадии создания каталогов вводится еще один дополнительный каталог. Назовем его «каталогом соседей» (см. рис. 8). В каталог соседей **NeibTable** для каждой звезды из навигационного каталога **Nav** записывается **L** расстояний от этой звезды до ближайших навигационных звезд с их идентификаторами. Параметр алгоритма **L** зависит от конкретного каталога и радиуса окрестности **R**. Он должен быть идентичен для всех звезд, чтобы их можно было извлекать из каталога по идентификатору звезды без поиска. Объем памяти, занимаемый каталогом соседей, $\text{sizeof}(\text{NeibTable}) = L * (\text{sizeof}(\mathbf{r}) + \text{sizeof}(\text{Index})) * \text{sizeof}(\text{Nav})$, где $\text{sizeof}(\text{Nav})$ – число звезд в бортовом каталоге, $\text{sizeof}(\mathbf{r})$ – размер поля для межзвездного расстояния, $\text{sizeof}(\text{Index})$ – размер поля идентификатора звезды в байтах.

NeibTable		
r_{01}	Index01	L
...	...	
r_{0L}	Index0L	
r_{11}	Index11	L
...	...	
r_{1L}	Index1L	

r_{ik} – расстояние от i-ой звезды до k-ой соседней

Index_{ik} – идентификатор k-ой соседней звезды

По L расстояний и идентификаторов для каждой звезды

Рис. 8. Структура каталога соседей – ближайших навигационных звезд

Сравниваем расстояния от всех остальных фотоцентров кадра до фотоцентров выбранной пары с соответствующими расстояниями их идентификаций. Для этого из каталога соседей извлекаем идентификаторы ближайших к этой паре навигационных звезд, а также соответствующие им расстояния и ищем совпадения с расстояниями в кадре. В завершение проверяем совпадение всех оставшихся взаимных расстояний в кадре с соответствующими им расстояниями в навигационном каталоге.

3.3.5 Идентификация всего кадра. Если удастся найти достаточное количество (согласно параметру алгоритма – не менее 5) таких фотоцентров (звезд) кадра, у которых все взаимные расстояния совпадают со взаимными расстояниями сопоставленных с ними звезд каталога, то дополнительная проверка считается успешной и кадр идентифицированным. В противном случае кадр считается не определенным.

4. Сжатие каталогов и оценка требуемой памяти на конкретном примере

Размер признакового каталога зависит от $\max(x_i)$ – максимально возможных расстояний до ближайших звезд в кадре данного датчика. В типичном случае он бу-

дет довольно велик. Для размещения в памяти бортового компьютера необходимо уменьшить его размер.

Массив признакового каталога сильно разрежен. Существуют различные способы сжатия таких массивов, однако они могут изменить структуру признакового пространства и тем самым свести на нет то преимущество, за счет которого достигается поиск без перебора. Мы сохраняем структуру и разреженность каталога, чтобы извлечение данных из него не усложнялось, но сжимаем его так, чтобы он помещался в бортовую память.

В качестве иллюстрации рассмотрим пример навигационного и соответствующего ему признакового каталогов для некоего датчика, описанных в работе [14]. Навигационный каталог содержит 3350 звезд со звездной величиной не более 5.6. Множество звезд для определения координат $\mathbf{B}$ в данном случае совпадает с навигационным каталогом. Кадр – 256×256 пикселей, окрестность для вычисления расстояний – $4 \leq \mathbf{R} \leq 150$ пикселей. Погрешность вычисления расстояний – 1 пиксель. Признаковый каталог строится так, как показано на рис. 2. Две ближайшие звезды вместе с центральной образуют треугольник, величины сторон которого r_1, r_2, r_3 , выраженные в пикселях кадра, определяют один набор координат звезды в $\mathbf{R}^3$: $x_1 = \text{round}(r_1)$, $x_2 = \text{round}(r_2)$, $x_3 = \text{round}(r_3)$ и, соответственно, одну запись в признаковом каталоге.

Трехмерный массив, представляющий признаковый каталог **NavTable**, в памяти 3Д занимает $\max(x_1) * \max(x_2) * \max(x_3) * \text{sizeof}(\text{Index})$ байтов, где $\text{sizeof}(\text{Index})$ – размер в байтах поля идентификатора звезды в навигационном каталоге.

Посмотрим, как будет выглядеть этот каталог в $\mathbf{R}^3$. Величины координат получают следующие: $4 \leq x_1 \leq 117$, $4 \leq x_2 \leq 127$, $0 \leq x_3 \leq 190$. Идентификатор звезды – число от 0 до 3349 и занимает 2 байта. Каталог **NavTable** в $\mathbf{R}^3$ помещается в параллелепипед с размерами $117 \times 127 \times 190$ и, соответственно, занимает $117 \times 127 \times 190 \times 2 = 5\,646\,420$ байтов. В нем содержится 110 дублей, 5 троек, 1 четверка, повторов координат большей кратности нет. На рис. 9 показано расположение звезд в признаковом пространстве этого каталога.

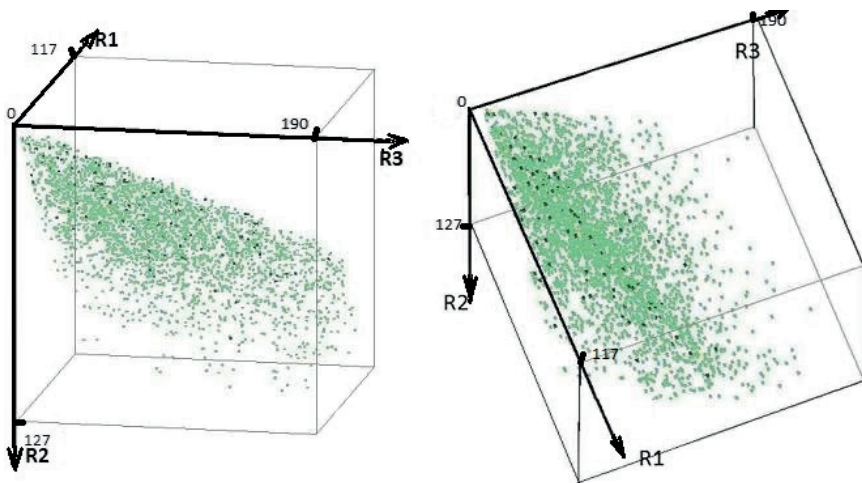


Рис. 9. Пример размещения звезд бортового каталога в признаковом пространстве. Координатные оси – $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3$, каждая точка с координатами (x_1, x_2, x_3) изображает звезду навигационного каталога с признаковыми координатами (x_1, x_2, x_3) . Без сжатия все навигационные звезды помещаются в параллелепипед с размерами по осям $117 \times 127 \times 190$. Цветом выделены дубли. Показаны две проекции для иллюстрации разреженности признакового пространства. Проекция справа приведена в работе [14]

Для уменьшения размера занимаемой признаковым каталогом памяти мы производим следующие действия.

Вместо x_1, x_2, x_3 по осям откладываем остатки от деления их на простые числа P_1, P_2, P_3 , соответственно, $x_1 \% P_1, x_2 \% P_2, x_3 \% P_3$. Для данного каталога мы взяли $P_1 = 41, P_2 = 47, P_3 = 67$. Числа выбираются на основе компьютерного моделирования и оптимизации. Теперь каталог **NavTable** помещается в параллелепипед $41 \times 47 \times 67$ и занимает всего $41 \times 47 \times 67 \times 2 = 258\,218$ байтов. Размер требуемой памяти после сжатия уменьшился в 21,8 раза, упаковка стала более плотной, следовательно, увеличилось число дублей, однако незначительно. Теперь в каталоге содержатся 125 дублей, 6 троек и 1 четверка, повторов координат большей кратности нет. Дубли мы обрабатываем при помощи каталога дублей, а тройки и четверки исключаем из обработки.

Объем памяти для каталога дублей $\text{Size of (DublTable)} = 2 * \text{Size of (Index)} * \text{DublCount}$ байтов, где **DublCount** – число дублей в каталоге. В этом примере он составляет $4 \times 125 = 500$ байтов.

Все межзвездные расстояния для данного кадра < 256 пикселей и требуют 1 байт памяти: $\text{sizeof}(x_i) = 1$.

Объем памяти каталога соседей, содержащего расстояния до соседних звезд и их идентификаторы, в этом примере будет составлять: $\text{sizeof(NeibTable)} = L * (\text{sizeof}(x) + \text{Sizeof(Index)}) * \text{sizeof(Nav)} = 10 * (1 + 2) * 3350 = 100\,500$ байтов, где $L = 10$ – количество соседних звезд для каждой звезды.

Всего на три дополнительных каталога потребуется: $258\,218 + 100\,500 + 500 = 359\,218$ байтов. Это очень небольшой объем, вполне приемлемый для размещения в памяти бортового компьютера.

На рис. 10 показано расположение звезд того же бортового каталога в R^3 после сжатия. Этот каталог мы используем только как пример для демонстрации эффективности сжатия. Для реальной работы требуются другие скорректированные каталоги, необходимо также увеличить число наборов координат, описывающих каждый идентификатор звезды (параметр алгоритма $p = 6-10$).

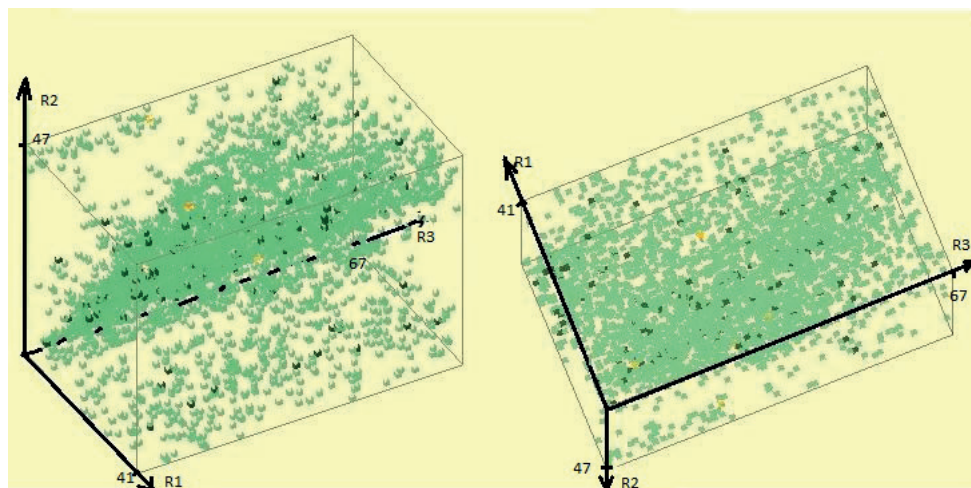


Рис. 10. Размещение звезд того же бортового каталога в признаковом пространстве после сжатия. Показан случай с одним набором координат для каждой навигационной звезды. Цветом выделены дубли. Показаны две проекции для иллюстрации разреженности признакового пространства

5. Коррекция признакового каталога

Многие авторы отмечают, что эффективный подход к задаче идентификации кадра предполагает одновременное развитие бортового каталога и алгоритма. Это отмечается в работах [1, 17, 18], где авторы приходят к выводу о необходимости корректировки каталога в процессе реальной работы датчика.

Для надежности работы предлагаемого алгоритма большое значение имеет и качество каталога. Его необходимо итеративно корректировать по результатам моделирования и обработки реальных кадров неба. Автоматически созданные каталоги по простым критериям: выборка по порогу звездной величины, затем построение всех треугольников на основе ближайших звезд – не получаются оптимальными. Мы корректировали каталоги полуавтоматически уже после их построения на стадии тестирования на смоделированных кадрах и реальных кадрах неба, стремясь к уменьшению числа дублей в массиве признакового каталога и выбору оптимальной плотности заполнения каталога.

От плотности заполнения массива признакового каталога зависит надежность работы алгоритма, а также количество вариантов идентификации фотоцентра при работе с учетом погрешности определения координат. Плотность заполнения, в свою очередь, зависит от количества наборов признаковых координат, определяющих каждую звезду, и от выбора делителей по осям, применяемых при сжатии каталога. Изменение делителей влияет на размер каталога, но не влияет (в разумном диапазоне) на скорость работы.

6. Результаты экспериментальной проверки

Проверка работы алгоритма проводилась на навигационном каталоге, составленном на базе некоторой выборки из каталогов Tycho-2 и Hipparcos ярких звезд до 6-й звездной величины, с признаковым каталогом уменьшенной размерности ($n = 3$, раздел 3.2), со сжатием, описанным в разделе 4, и с применением описанных в разделах 3.2–3.5 дополнительных приемов и каталогов. Погрешность при определении признаковых координат – 1 пиксель. При составлении списка вариантов отождествления фотоцентра со звездой навигационного каталога погрешности в определении признаковых координат не учитывались, то есть соседние ячейки в признаковом каталоге не рассматривались. Проверка на смоделированных кадрах показала надежную идентификацию, не определенных кадров не было.

Проверка на реальных снимках неба, снятых с Земли, показала, что при 6-10 наборах координат для звезды в признаковом каталоге идентификация кадра достаточно надежна: не определенных кадров меньше 5%, ложного распознавания не было¹.

Выводы

Рассмотренный в статье метод идентификации кадра работает в режиме реального времени без перебора каталога и имеет преимущество в быстродействии, так как время поиска перебором каталога исключено. Скорость его работы остается неизменной при увеличении количества звезд в каталоге, тогда как время работы алгоритма с перебором возрастает при увеличении их количества.

¹ В расчетах и тестировании принимал участие сотрудник ГАИШ МГУ М.С. Тучин.

Предложенные методы уменьшения размерности и механизм сжатия позволяют добиться размеров признакового каталога, приемлемого для размещения в памяти бортового компьютера.

Эффективность алгоритма была подтверждена для бортовых каталогов, состоящих из звезд до 6-й звездной величины. В результате испытаний было установлено надежное отождествление кадров, устойчивость к добавлению 1-2 помех и лучшие временные характеристики по сравнению с поиском при помощи перебора.

Авторы признательны Правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку работ по гранту РНФ 18-19-00452.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аккардо Д., Руфино Дж. Новое решение задачи получения начальных данных об ориентации при помощи астрономического датчика: алгоритм, реализация, испытания // Гироскопия и навигация. 2001. №1. С. 87–100.
2. Кружилов И.С., Шамаева О.Ю. Алгоритм селекции звезд по постоянству угловых расстояний // Программные продукты и системы. 2009. № 3. С. 82–85.
3. Jiazong, Yu., A Survey of Star Recognition Algorithms, *International Journal of Computer Techniques*, 2017, vol. 4, issue 3.
4. Spratling, B.B. IV and Mortari, D., A Survey on Star Identification Algorithms, *Algorithms*, 2009, 2, pp. 93–107.
5. Jiaqi Gong, Jie Ma and Jinwen Tian, A Flower Algorithm for Autonomous Star Pattern Recognition, *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 5–8 January 2009, Orlando, Florida.
6. Muhammad Arif Saifudin, Bib Paruhum Silalahi and Imas Sukaesih Sitanggang, Star Catalog Generation for Satellite Attitude Navigation Using Density Based Clustering, *Journal of Computer Science*, 2015, 11 (12): 1082–1089, doi: 10.3844/jcssp.2015.1082.1089.
7. Fuqiang Zhou and Tao Ye, Lost-in-Space Star Identification Using Planar Triangle Principal Component Analysis Algorithm, *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, article ID 982420.
8. Гайворонский С.В., Русин 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 (95). С. 22–29.
9. Peng Zhang, Qile Zhao, Jingnan Liu, and Ning Liu, A Brightness-Referenced Star Identification Algorithm for APS Star Trackers, *Sensors*, 2014, 14, pp. 18498–18514.
10. Данилова Т.В., Архипова М.А. Определение ориентации космического аппарата в геоцентрической экваториальной системе координат на основе астроизмерений при отсутствии данных о параметрах орбиты // Изв. Вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. №7. С. 13–20.
11. Mortari, D., Neta, B., K-Vector range searching techniques, *Calhoun: The NPS Institutional Archive*, 2014. URL: <http://hdl.handle.net/10945/41061>.
12. 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 (35).
13. Захаров А.И., Барке В.В., Венкстерн А.А. Начальное определение ориентации с помощью «паспортов» звезд // 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». 2012. С. 36–37. URL: http://ofo.ikiweb.ru/publ/conf_2012_tez.pdf.
14. Барке В.В., Венкстерн А.А., Захаров А.И., Котцов В.А. Способ определения ориентации по изображениям участков звездного неба. Патент РФ 2638077 от 14.12.2016.
15. Барке В.В., Венкстерн А.А., Котцов В.А. Новый подход к определению звездной ориентации при космических экспериментах // XV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тезисы докладов. Москва: ИКИ РАН, 2017. С. 330.

16. 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. С. 170–171.
17. Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Коган А.Ю., Хейфец В.Н., Красиков В.А. Способ определения координат звезд звездным датчиком, установленным на космическом аппарате, при каталогизации звездного неба. Патент РФ 1656323 от 15.06.1991.
18. Аванесов Г.А., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В. А., Эльяшев Я.Д. Адаптация звездных каталогов к условиям их применения в звездных датчиках ориентации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. №6. С. 69–81.
19. Барке В.В., Венкстерн А.А., Котцов В.А., Захаров А.И. Способ определения звездной ориентации, не требующий перебора бортового каталога // 6-я Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». Сборник трудов. М., 2019. С. 232–241. URL: http://ofo.ikiweb.ru/publ/conf_2018_st.pdf.
20. Прохоров М.Е., Захаров А.И. Ориентация и навигация в космосе – новые методы и перспективы. URL: <http://lyra.sai.msu.ru/spl2/wp-content/uploads/2014/01/Прохоров-Захаров-Екатеринбург-2011.pdf>.

Barke, V.V., Venkstern, A.A., Kottsov, V.A., Tavrov, A.V. (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia), and Yudaev, A.V. (Moscow Institute of Physics and Technology, Russia) A Fast Search-Free Algorithm for Star Sensor Frame Identification by Star Configurations. A Version of Onboard Implementation, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2021, vol. 29, no. 3 (114), pp. 80–95.

Abstract. The paper presents a method for identifying the frame of a star sensor (SS), based on determination of the star local features allowing its unique recognition. The star identifiers are located in a multidimensional integer feature space, and the relevant feature catalog presents a disperse array, which provides search-free star determination. Examples of onboard implementation of feature catalog are presented, containing the stars up to magnitude of six. The required memory is estimated, and a method is proposed for compressing the feature catalog to be recorded in the onboard computer memory. The frame identification algorithm using the reduced feature catalog is described in detail. The algorithm was tested on real sky frames.

Key words: star recognition, identification by star configurations, feature space, integer catalog, catalog compression, search-free algorithm.

Материал поступил 28.12.2020