

Структурно-топологический алгоритм идентификации звёзд и обнаружения объектов околоземного космического пространства

И.Г. Журкин¹, Л.Н. Чабан¹, П.Ю. Орлов¹

¹Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК),
105064, Россия, г. Москва, Гороховский пер., д. 4

Аннотация

При решении ряда задач космической навигации возникает вопрос об определении параметров движения космического аппарата и элементов ориентирования целевой аппаратуры, установленной на борту, по получаемым координатам зарегистрированных изображений звёзд. При этом в поле зрения съёмочной системы могут попадать посторонние объекты, снижающие вероятность правильного распознавания: активные спутники, естественный и искусственный космический мусор. Отсюда возникает необходимость фильтрации изображений звёздного неба от подобных помех. Если же объектами распознавания являются находящиеся в околоземном пространстве тела, то в данном случае сами изображения звёзд выступают в роли помех. Кроме того, поскольку обнаружение и каталогизация этих объектов с Земли затрудняется их малыми размерами, влиянием атмосферы, а также другими техническими трудностями, целесообразно использовать уже имеющуюся аппаратуру на борту космических аппаратов для решения подобной задачи. В работе представлены существующие алгоритмы распознавания групп звёзд, а также их классификация. Предложен структурно-топологический подход идентификации групп небесных светил, основанный на свойствах огибающих многоугольников, используемых при построении топологических конфигураций звёзд. Описаны особенности при построении топологических конфигураций на анализируемом множестве точек, а также принципы обнаружения динамического космического объекта в их пределах. Показаны результаты численных экспериментов, выполненные с применением разработанного алгоритма на картах звёздного неба и модельных сценах.

Ключевые слова: распознавание звёзд, звёздная конфигурация, цифровая обработка изображений, автономная навигация, дистанционное зондирование Земли, околоземное космическое пространство, космический объект, космический мусор.

Цитирование: Журкин, И.Г. Структурно-топологический алгоритм идентификации звёзд и обнаружения объектов околоземного космического пространства / И.Г. Журкин, Л.Н. Чабан, П.Ю. Орлов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 3. – С. 375-384. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-597.

Citation: Zhurkin IG, Chaban LN, Orlov PYu. Structurally topological algorithm for star recognition and near-Earth space' object detection. Computer Optics 2020; 44(3): 375-384. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-597.

Введение

Вопрос распознавания звёздных конфигураций по-прежнему актуален для автономной навигации космических аппаратов (КА) и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). При решении этой задачи в поле зрения камеры могут попадать как группы небесных светил, так и посторонние объекты, включая космический мусор (КМ) антропогенного происхождения, в результате чего вероятность правильного распознавания будет снижена. С другой стороны, в качестве объектов распознавания могут выступать и сами объекты околоземного космического пространства (ОКП), включающие КА и КМ. В этом случае уже изображения звёзд будут являться помехой при их идентификации. Задача поиска и привязки космических объектов (КО) требует максимально большого поля зрения датчика. Современные звёздные датчики с ПЗС- и КМОП-матрицами обладают различной уг-

ловой шириной поля зрения, например: 11° у БОКЗ-М60, 22° у перспективного датчика для микро- и наноспутников АЗДК-1 с заявленным весом не более 200 грамм [23] и 28° у МБОКЗ-2. При этом в их рабочем звёздном каталоге содержится в среднем от 2000 (до 5^m) до 8000 (до 7^m) звёзд [24]. Кроме того, звёздные датчики используются именно для ориентации космических аппаратов, а данные после обработки остаются на борту. В настоящее время не существует орбитальных средств для поиска, привязки и слежения за КА и КМ. Возникает необходимость использования широкоугольной камеры, установленной на борту КА и захватывающей большой участок звёздного неба [15]. Возможное универсальное решение – это использование в качестве звёздного датчика целевой аппаратуры (ЦА) ДЗЗ центрального проектирования, которую можно ориентировать как на земную поверхность, так и на небесную сферу, либо размещение на борту дополнительной ЦА ДЗЗ для непо-

средственной съёмки звёзд и поиска космических объектов. В работе [1] уже описывалось применение аппаратуры ДЗЗ для слежения и инспектирования состояния космических аппаратов. В тактико-техническом задании на перспективный космический аппарат «Ресурс-ПМ» [2] заявлено решение задачи обнаружения и идентификации космических объектов естественного и искусственного происхождения на фоне звёздного неба с помощью аппаратуры ДЗЗ посредством переориентирования аппарата по команде с Земли. В случае малых космических аппаратов (МКА) в качестве звёздного датчика может выступать стандартная ПЗС-камера мобильного телефона. Примером тому может служить демонстрационный КА NUDT-PhoneSat, разработанный Оборонным научно-техническим университетом Народно-освободительной армии Китая (*National University of Defense Technology, NUDT*), аппаратная платформа которого представляет собой смартфон, адаптированный для работы в жёстких условиях космической среды [3].

При распознавании звёзд на изображении большие динамические объекты могут быть легко отфильтрованы. Напротив, попавший в поле зрения камеры мелкий мусор может мешать идентификации их конфигураций. Возникает двойная задача: исключить влияние космических объектов в околосреднем пространстве, включая космический мусор, а также естественных объектов, таких как астероиды и метеориты, на распознавание звёздных конфигураций, отделив их в отдельные классы объектов с последующей привязкой к звёздам. Вторая задача особенно актуальна ввиду ряда технических трудностей при слежении традиционными наземными средствами [6]. Также нужно учитывать и космические аппараты на геостационарной орбите, поскольку их можно ошибочно идентифицировать как звёзды.

В научно-технической литературе представлены различные классификации алгоритмов распознавания групп звёзд [22]. Так, в работе [8] представлена следующая классификация, основанная на разных подходах к регистрируемым изображениям небесных светил (дополнена авторами пятой категорией):

1. Геометрические алгоритмы – поиск в каталоге групп звёзд, зафиксированных в поле зрения съёмочной системы, по характеристикам (площадь, периметр и т.д.) составленных из них сферических многоугольников. В данную группу входит алгоритм сравнения подобных треугольников [4].
2. Графовые алгоритмы – поиск изоморфного подграфа в графе, при наличии погрешности в весах рёбер подграфа. Особенность данного класса: в бортовом каталоге хранятся все взаимные угловые расстояния опорных звёзд, попадающих одновременно в поле зрения прибора. В эту группу входят так называемые «алгоритмы ограниченного поиска» или “Search-Less Algorithm” (SLA), обеспечивающие более быстрый способ поиска по базе

данных опорных звёзд. Так, в алгоритме, представленном в работах [18–20], предложено использовать «*k*-вектор», также известный как поливектор или *p*-вектор, для поиска в базе данных в течение времени, не зависящего от размера самой базы данных. Впоследствии алгоритм был усовершенствован в работе [17]. Из отечественной литературы к данной категории следует относить алгоритм сравнения межзвёздных угловых расстояний между точечными объектами известной яркости [4, 7, 9]. В данном методе предполагается, что яркости точечных объектов заранее известны. Такая модель наиболее экономична, однако в ней наибольшую трудность представляет поиск первых опорных звёзд, тем более, если в сцене присутствуют один или несколько динамических объектов: как действующих космических аппаратов, так и объектов космического мусора искусственного или естественного происхождения.

3. Сеточные алгоритмы – определение местоположения соседних звёзд как элементов на свободной координатной сетке. В алгоритме, представленном в работе [21], устранена неоднозначность с угловыми признаками путём вращения наблюдаемых звёзд относительно фиксированного светила до тех пор, пока ближайшая к нему звезда не выставится на ось *x*. Ячейки в пределах сетки считаются задействованными, если в них находятся звёзды, и незадействованными, если звёзд в них не оказалось. После этого местоположения используемых ячеек становятся признаками, при этом индексы этих ячеек перечисляются в качестве элементов вектора.
4. Нейросетевые алгоритмы – использование искусственных нейронных сетей для решения навигационных задач КА [14]. В алгоритме [16], использующем принципы нечёткой логики в рамках модели логической нейронной сети NLN (*Neural Logic Network*), применяется упорядоченная тройка, основанная на яркости звезды. Полученные угловые расстояния подаются на обработку в нейронную сеть. Слабой стороной данного алгоритма является использование массивной параллельной архитектуры для реализации нейронной сети, которую трудно развернуть на борту космического аппарата ввиду его вычислительных и энергетических ограничений.
5. Алгоритмы распознавания образов – построение ассоциированного сплошного образа групп точек путём низкочастотной фильтрации (расфокусировки) изображения, затем анализ характеристик полученного ассоциированного сплошного образа (образов). В работе [12] рассмотрено несколько таких алгоритмов с использованием практически всех известных подходов к распознаванию образов: максимума правдоподобия, потенциальных функций, корреляционного и кластерного анализа.

В отечественной литературе в основном представлены алгоритмы, имеющие достаточно узкое назначение, так как их разработка была непосредственно привязана к конструктивным параметрам и особенностям съёмочных систем (звёздных датчиков), устанавливаемых на борту космических аппаратов. В результате эти алгоритмы становятся неустойчивыми при попадании в поле обзора съёмочной камеры «ложных» звёзд – светил, не входящих в рабочий (бортовой) каталог, либо других космических объектов. Кроме того, в ней, как, впрочем, и в зарубежных публикациях, не рассматривается вопрос обнаружения посторонних космических объектов как естественного, так и искусственного происхождения на фоне звёздных образований.

Так, в работе [10] представлена теория многомерного гиперкомплексного анализа контуров изображений и обработки плоских изображений групповых точечных объектов по сигналам в виде пучков комплекснозначных векторов. Однако в ней не рассмотрены вопросы идентификации посторонних объектов на фоне естественных звёздных конфигураций. При решении задач идентификации звёзд использовались только уникальные вторичные созвездия, образуемые звёздами из диапазона светимостей от $-1,5$ до $4,5$, тогда как при каталогизации объектов ОКП светимость таких искусственных объектов, как фрагменты КМ, ввиду их размеров и формы, может быть значительно меньше (например, доходить до 15 звёздной величины). В работе [13] применяется аппарат кватернионов, который может быть использован для трёхмерного анализа объектов в околоземном космическом пространстве, а именно при распознавании космических аппаратов и фрагментов космического мусора, т.е. при работе с пространственными объектами, находящимися относительно близко к оптической системе наблюдения, в то время как звёздные образования находятся на бесконечно удалённом расстоянии от системы наблюдения, а, следовательно, в задачах их распознавания не требуется трёхмерный контурный анализ. Таким образом, в этих работах предложена совершенно другая постановка задачи и другой математический аппарат для её решения. Авторы настоящей работы рассматривали вопрос распознавания только плоских изображений объектов: как динамических, расположенных в ОКП, так и неподвижных, представленных в виде совокупности звёзд.

На основании проведённого анализа было принято решение разработать структурно-топологический алгоритм идентификации звёзд, относящийся к классу структурно-графовых, лингвистических методов распознавания образов [11, 17]. При таком подходе изображения звёздных образований рассматриваются как образ проективно-аффинного отображения участка небесной сферы на плоскость. Затем по полученному в плоскости облаку точечных объектов строится геометрическая конфигурация, идентичная конфигу-

рации, построенной по соответствующей совокупности звёзд, входящих в широко используемые, апробированные звёздные каталоги.

1. Структурные методы для распознавания групп звёзд

Рассмотрим конечное множество точек на плоскости, положение каждой из которых строго определено в некоторой системе координат. Будем называть такие точки позиционированными точками, а их множество – позиционированным множеством. Отображение участка небесной сферы на плоскость можно рассматривать как позиционированное множество точек.

Пусть в некоторой рассматриваемой (рабочей) области (в нашем случае – на участке небесной сферы) задано позиционированное множество помеченных точек A_0 . Пусть также известно, что попавшее в поле зрения аппаратуры наблюдения множество точек A_1 состоит как из точек подмножества $A_0 \subseteq A_1$, так и посторонних точек, не принадлежащих A_0 . Рассматриваемая задача включает два аспекта: 1) распознавание подмножества A_0 , то есть идентификация его элементов с элементами из множества A_0 ; 2) выявление во множестве A_1 элементов, не принадлежащих множеству A_0 .

Первая из указанных задач распознавания множества точек, или групповых точечных объектов, неоднократно рассматривалась в литературе [7, 9]. Она встречается не только при идентификации звёзд, но и при тематическом дешифрировании цифровых изображений.

Вероятностный подход к решению данной задачи требует большого объёма статистических исследований для выделения информативных признаков объектов распознавания. Структурные методы анализа позиционированного множества точек путём построения графовых конструкций более рациональны. Но как те, так и другие методы ориентированы на распознавание группы точечных объектов, а не отдельных её элементов и тем более выделение в группе постороннего элемента.

Предлагаемый структурно-топологический алгоритм включает элементы как графовых алгоритмов, так и алгоритмов построения ассоциированного сплошного образа для распознавания групповых точечных объектов [12]. Систему признаков, на основе которой выполняется распознавание, образуют структуры, описывающие пространственные (топологические) отношения между точками множества A_0 . В соответствии с терминологией распознавания образов [11], будем называть такие структуры конфигурациями, а её элементы – образующими. Строго говоря, конфигурацией K назовём пару $K = \{A, R\}$, где $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ – множество пространственно позиционированных точек (образующих), R – заданное на нём семейство отношений (связей) $R = \{R_1, \dots, R_m\}$. В случае, когда отношение R_k является бинарным, оно мо-

жет быть задано графом $G = \{V, E\}$, где $V = A$, $E = R_k$. Для задачи распознавания позиционированного множества точек семейство отношений $R = \{R_1, \dots, R_m\}$ есть набор признаков объекта распознавания.

Конфигурация называется регулярной, если она инвариантна к некоторой группе преобразований и изменение какой-то её части не приводит к изменению остальных частей [11]. Это подразумевает, в частности, независимость хотя бы отдельных частей конфигурации от начальных условий её построения. В поставленной нами задаче условие регулярности является наиболее важным, так как, во-первых, поле зрения включает только некоторую часть конфигурации, построенной на опорном (статическом) множестве A_0 , во-вторых, предполагается присутствие в конфигурации постороннего (динамического) объекта, который требуется обнаружить.

Группа преобразований, относительно которой рассматривается условие инвариантности, определяется методом анализа образов. В нашей задаче отсутствие элементов взаимного ориентирования рабочей области и поля зрения требует инвариантности используемых конструктивных элементов к проективно-аффинным преобразованиям. Так как проективно-аффинное преобразование сохраняет порядок положения любых трёх точек на прямой, для построения конфигураций можно использовать следующие отношения: «справа-слева», «внутри-снаружи», отношения «дальше-ближе» в определённом направлении. Кроме того, в некоторых случаях допустимо использование отношений площадей геометрических фигур и относительных положений их центров тяжести, которые также инвариантны к аффинным преобразованиям.

Наиболее подходящим аппаратом анализа конфигураций, с учётом необходимости обнаружения постороннего объекта, представляется разбор с помощью известных правил их порождения, как это делается в синтаксических методах распознавания [5]. В нашем случае совокупность правил порождения задаёт алгоритм построения конфигураций. При этом необходимо, чтобы применение определённой последовательности правил построения и, соответственно, обратного разбора конфигурации приводило к единственно возможному результату. С этой целью следует ввести понятие топологической однозначности тех конструкций, которые будут использоваться в процессе распознавания.

Топологически однозначной будем называть конфигурацию K , такую, что изменение положения любой точки $a_i \in A$ приводит к нарушению хотя бы одного из отношений $R_k \subset R$.

Топологическая однозначность конфигурации при известном алгоритме её порождения обеспечивает независимость её вида от начальных условий построения, что также существенно для поставленной нами задачи.

2. Огибающие многоугольники

Любая система выпуклых многоугольников на множестве A является инвариантной к перспективно-аффинному преобразованию относительно свойства выпуклости. Действительно, по определению выпуклости любой отрезок (a, b) , концы которого принадлежат многоугольнику M , также принадлежит M . Так как перспективно-аффинное преобразование сохраняет топологическое отношение «внутри-снаружи», то условие выпуклости будет сохраняться при любом таком преобразовании.

Выпуклые многоугольники – удобная конструкция для описания дискретных конфигураций точек. Однако для выбора подходящей системы выпуклых многоугольников необходимо сначала получить условия, которым должна удовлетворять такая система.

Назовём выпуклый многоугольник $P(A)$ огибающим множеством точек A , если любая его точка является крайней точкой множества. Если множество A состоит из единственной точки a_0 , то многоугольник $P(a_0)$ будем называть огибающим точку a_0 . В дальнейшем изложении огибающий многоугольник будем называть огибающей.

Рассмотрим некоторые свойства огибающих многоугольников, которые будут полезны при построении топологических конфигураций на анализируемом множестве точек:

1. По отношению к любой вершине p_i выпуклого многоугольника P все остальные вершины лежат внутри угла, образованного лучами, проходящими через инцидентные этой вершине стороны (p_i, p_{i-1}) и (p_i, p_{i+1}) . Данное условие будет выполняться и для любой внешней по отношению к многоугольнику P точки a' , лежащей внутри такого угла (рис. 1). При этом точка a' может занимать любое положение внутри закрашенного на рис. 1 треугольника. Отсюда следует, что использование при распознавании топологических отношений, основанных только на одном свойстве выпуклости, может приводить к неоднозначным результатам. В дальнейшем такие области, образуемые стороной выпуклого многоугольника и продолжениями смежных с ней сторон, будем называть внешними областями топологической неоднозначности.

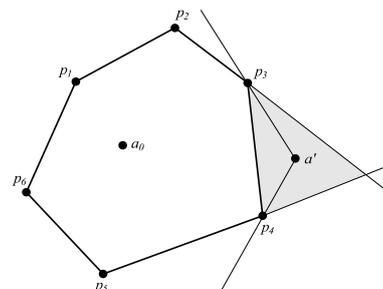


Рис. 1. Область топологической неоднозначности для стороны (p_3, p_4) многоугольника $P(a_0)$

2. Назовём выпуклый огибающий многоугольник $P(Q)$ любого подмножества $Q \subset A$ топологически однозначной огибающей, если во всех его внешних областях топологической неоднозначности не содержится ни одной точки множества A . Для заданной точки $a_0 \in A$ назовём минимальной топологически однозначной огибающей или просто минимальной огибающей выпуклый многоугольник $P(a_0)$ с минимальным числом вершин (рис. 2), такой, что:

- точка a_0 является единственной внутренней точкой, то есть $Q \setminus P(a_0) = \{a_0\}$;
- все внешние области топологической неоднозначности конечны;
- все внешние области топологической неоднозначности пусты.

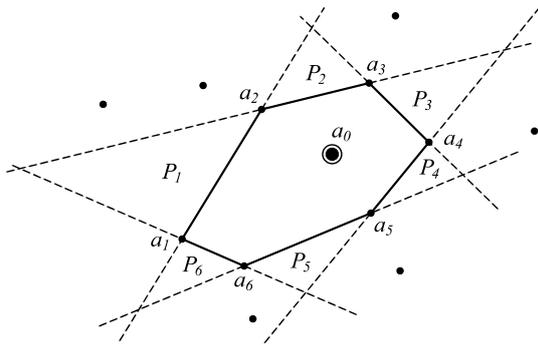


Рис. 2. Пример минимальной огибающей для фиксированной точки a_0 на позиционированном множестве точек. Внешние области топологической неоднозначности P_i конечны и пусты

В соответствии с данным определением, минимальная огибающая содержит как минимум пять вершин, так как для четырёхугольника хотя бы две внешние области топологической неоднозначности всегда бесконечны. При этом каждая вершина $a_i \in P(a_0)$ является ближайшей к точке a_0 в направлении луча $[a_0, a_i]$. Поэтому построение огибающей начинаем с ближайших к a_0 точек.

В общем случае для каждой точки a_0 позиционированного множества минимальных (равномощных по числу вершин) многоугольников может оказаться несколько. Поэтому имеет смысл рассматривать всё семейство таких многоугольников, так как это увеличивает количество полезной для распознавания информации.

Заметим, что крайние точки множества A не могут иметь огибающих, удовлетворяющих введённому определению, поэтому в дальнейшем под множеством A будет подразумеваться множество $A \setminus P(A)$, где $P(A)$ – множество граничных точек, образующих выпуклую огибающую исходного множества.

3. Принципы обнаружения динамического космического объекта

Пусть в рабочей области, определяющей позиционированное множество A в его статическом состоя-

нии, заданы минимальные огибающие для всех N звёзд до k -й звёздной величины включительно. Построим на N вершинах множества точек A ориентированный граф $G(V, E) = \{V=A, E = \{(a_i, a_j) | a_j \in P(a_i)\}, I=1, \dots, N\}$. Каждый огибающий многоугольник $P(a_i)$ задаёт множество смежности $\Gamma^+(a_i)$ i -й вершины графа $G(V, E)$. Поскольку множество A конечно, то его крайние точки в графе $G(V, E)$ будут висячими вершинами с нулевой полустепенью исхода.

Если вершина a_i принадлежит какому-то множеству смежности $\Gamma^+(a_j)$ одной из смежных с ней вершин, то между вершинами образуется «сильная связь», как это показано на рис. 3 для точек a_1 и a_2 с помощью пунктирной линии.

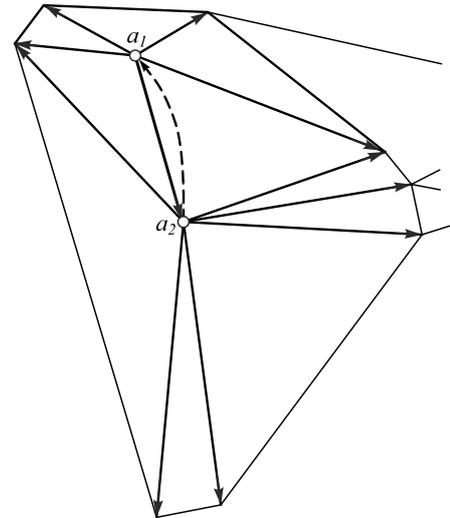


Рис. 3. Пример «сильной связи» между точкой a_1 и точкой a_2 из её огибающей. Огибающая точки a_1 показана жирной линией, огибающая точки a_2 – тонкой. Сильная связь между точками a_1 и a_2 обозначена пунктирной линией

Наличие сильной связи означает, что точки a_i и a_j являются «взаимно крайними», то есть существует направление, относительно которого все вершины из $P(a_j)$ будут лежать по одну сторону от a_i . И наоборот, существует направление, относительно которого все вершины из $P(a_i)$ будут лежать по одну сторону от a_j . Это означает, что появление в конфигурации постороннего объекта приведёт к изменению только части конфигурации, и она может быть восстановлена по своей ненарушенной части. В этом смысле рассматриваемая конфигурация из минимальных огибающих удовлетворяет упомянутому выше условию регулярности.

Ясно, что если для двух сравниваемых статических конфигураций (не содержащих динамических объектов), представленных графами $G(A_1, E_1)$ и $G(A_0, E_0)$ соответственно, $A_1 \subset A_0$, то найдётся подграф $G(A', E') \subset G(A_0, E_0)$, в точности совпадающий с графом $G(A_1, E_1)$.

Будем называть двухуровневой конфигурацией $P(a_0)$ множество огибающих

$$P = \bigcup_{i=0}^n P(a_i), \tag{1}$$

где n – число вершин в минимальной огибающей точки a_0 . То есть, кроме самой огибающей $P(a_0)$, двухуровневая конфигурация включает также все огибающие вершин из $P(a_0)$. Будем называть число n степенью двухуровневой конфигурации.

Покажем, что в двухуровневой конфигурации степени n существует не менее n сильных связей.

Рассмотрим минимальный огибающий многоугольник $P(a_0)$ и огибающий его многоугольник $P(Q)$, где $Q = P(a_0) \cup a_0$. Проведём из всех вершин b_1, b_m многоугольника $P(Q)$ линии видимости к вершинам $P(a_0)$. По условию построения минимальной огибающей все внешние области топологической неоднозначности $P(a_0)$ пусты, из чего следует, что из любой вершины b_i «видны» не менее трёх вершин многоугольника $P(a_0)$ (рис. 4). Это означает, что если из вершины b_i видны вершины a_{j-1}, a_j, a_{j+1} , то точка a_j лежит внутри треугольника $\Delta b_i a_{j-1} a_{j+1}$, который можно достроить до выпуклой огибающей этой точки. При этом на сторону (a_{j-1}, a_{j+1}) данного треугольника опирается остальная часть огибающей $P(a_0) \setminus \{a_{j-1}, a_j, a_{j+1}\}$. Точки из этой части огибающей полностью «закрывают» всё данное направление, поскольку, по определению, все области топологической неоднозначности $P(a_0)$ пусты. Следовательно, хотя бы одна точка из этой части огибающей или сама точка a_0 принадлежит минимальной огибающей $P(a_j)$, откуда и следует наличие хотя бы одной сильной связи для каждой точки из двухуровневой конфигурации.

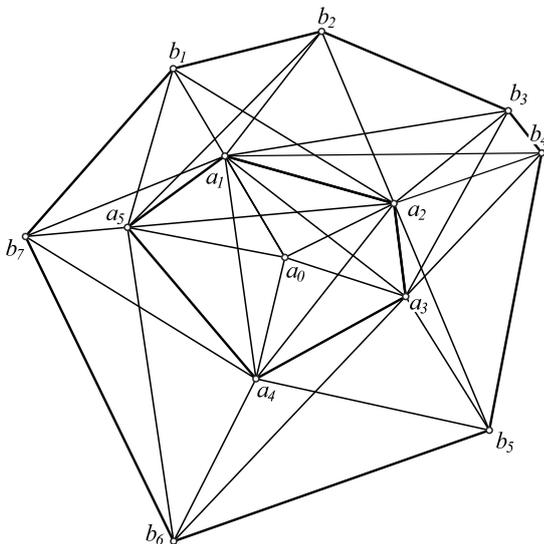


Рис. 4. Пример двухуровневой конфигурации степени n

Из данного утверждения следует, что если в двухуровневой статической конфигурации появляется посторонний (динамический) объект, то этот объект разрушает только часть имеющихся в конфигурации связей, поскольку «взаимно крайние» точки ограни-

чивают изменение данной конструкции хотя бы в некоторых направлениях (рис. 5).

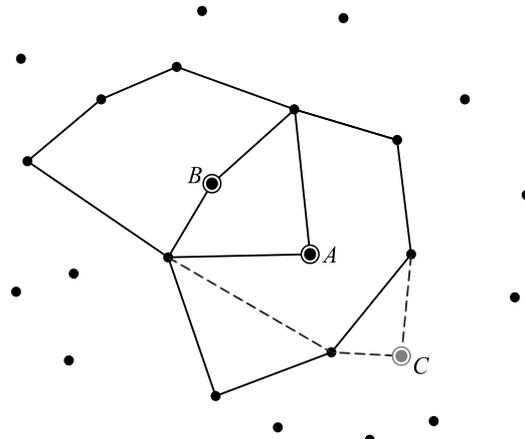


Рис. 5. Пример взаимно крайних точек A и B : появление постороннего объекта C изменяет огибающую точки A , но не меняет огибающую точки B и, по крайней мере, части точек, взаимно крайних с точкой B

Для выяснения возможностей применения разработанного подхода на различных типах изображений рассмотрим ограничения по количеству точек N в анализируемом множестве A_0 в предположении, что для распознавания динамического объекта необходимо наличие хотя бы одной полной двухуровневой конфигурации степени n . Такая конфигурация, с учётом «сильных» связей, то есть взаимно крайних точек, должна включать не менее

$$N = n + \sum_{i=1}^n (k_i - 2)$$

опознанных звёзд. При минимальном количестве точек в каждой огибающей ($n = k_1 = k_2 = \dots = k_n = 5$) общее минимальное число точек в такой конфигурации $N = 20$. Приняв предположение, что для каждой точки найдётся минимальная огибающая, состоящая не более чем из 8 точек, можно предположить, что максимальная величина $N < 60$ точек. Следовательно, размер произвольной двухуровневой конфигурации $20 < N < 60$. Как показали численные эксперименты на звёздном поле, среднее количество звёзд в минимальной огибающей при любом нижнем ограничении по яркости (звёздной величине) $n_{cp} = 6$.

Таким образом, алгоритм обнаружения на тестируемом множестве точек A_1 будет включать следующие этапы:

1. Построение границ (внешней огибающей) $B(A_0)$ и $B(A_1)$ для опорного и тестируемого множеств и определение множества центров конфигураций $P(A_0) \setminus B(A_0), P(A_1) \setminus B(A_1)$.
2. Построение огибающих внутренних точек опорного множества A_0 .
3. Построение огибающих внутренних точек тестируемого множества A .

4. Сопоставимое описание конфигураций $K_0 = \{A_0, R_0\}$, $K_1 = \{A_1, R_1\}$.
5. Поиск аналогов на множествах K_0 и K_1 и пометка входящих в них элементов.
6. Восстановление неопознанной (нарушенной) части на основе исходных условий построения конфигураций и выявление постороннего объекта.

Заметим сразу, что из-за ограниченности поля зрения тестируемой сцены, соответствующей множеству A_1 , условия построения конфигураций вблизи границы множества могут оказаться неадекватными условиям построения опорных конфигураций. Кроме того, количество внутренних точек может быть недостаточным для образования полной двухуровневой конфигурации. Поэтому правила анализа конфигураций в процессе распознавания будут несколько отличаться от правил построения, хотя и в том, и в другом случае конфигурация, прежде всего, должна удовлетворять данному определению топологически однозначной огибающей.

4. Результаты численных экспериментов

Как показали численные эксперименты, выполненные на картах звёздного неба ещё на этапе теоретической проработки алгоритма, среди факторов, влияющих на устойчивость рассматриваемых топологических конструкций и их инвариантность к условиям построения, наибольшее значение имеют следующие:

1. Особенности распределения точек по полю анализируемой сцены.
2. Погрешности при определении инцидентности точки и прямой.
3. Количество точек, участвующих в процессе построения огибающих.

Для тестирования разработанной программы, функционирующей на основе запросов к трём базовым классам («Точка», «Область» и «Конфигурация») и исследования перечисленных факторов было сформировано несколько модельных изображений (полей позиционированных точек), объединяющих наиболее характерные, в том числе наиболее сложные ситуации, которые были выявлены в процессе проведения экспериментов по построению огибающих на участках карты звёздного неба. Модельные сцены включали до ста точек с заведомо неравномерным распределением по рабочей области и с наличием ряда точек, лежащих на одной прямой (для тестирования обработки подобных ситуаций при заданном условии строгой выпуклости).

Для проведения исследований модуль построения конфигураций был выполнен в нескольких вариантах, реализующих три стратегии построения огибающих.

1. Построение в заданной окрестности точки (круге радиуса R).
2. Построение на заданном количестве точек N .
3. Построение до образования первых k замкнутых конфигураций. Процесс осуществляется путём по-

степенного добавления в конфигурацию по одной точке. Процесс начинался с 8 исходных точек, ближайших к центру конфигурации.

В результате проведённых экспериментов, как уже было сказано, был выбран третий метод построения, при котором наблюдалось наибольшее количество совпадений конфигураций на тестируемом и опорном множествах при ограниченном поле зрения.

В целом результаты проведённого тестирования и численных экспериментов практически полностью подтвердили предварительные теоретические оценки по числу точек, необходимых для построения одноуровневых и хотя бы одной полной двухуровневой конфигурации (25 и 60 точек соответственно). Практически при любом, сколь угодно неравномерном распределении точек для любой внутренней точки множества первая замкнутая конфигурация образовывалась менее чем на 30 ближайших точках. Среднее количество точек до появления первой замкнутой конфигурации по всем тестируемым моделям составляло около 15.

Анализ факторов, влияющих на образование замкнутых конфигураций, показал, что наилучшие условия для быстрого формирования замкнутых огибающих соответствуют как раз равномерному распределению точек, то есть ситуации, когда во всех трёх внешних областях P_i первого же огибающего треугольника имеются одна или несколько точек, за счёт которых он может быть достроен. Если же в ближайшей окрестности точки существуют «пустоты», а в других, напротив, сосредоточено относительно большое количество точек, то образование замкнутой огибающей происходит более медленно. Процесс построения огибающих с постепенным добавлением по одной точке на показанном на рис. 6 множестве наихудший результат показал для точки с номером 1 (28 точек до образования первой огибающей). Наилучшие же результаты, кроме точки «0», из представленных на рисунке получались для точек с номерами 5, 6, 10, 16, 18, 19, 20.

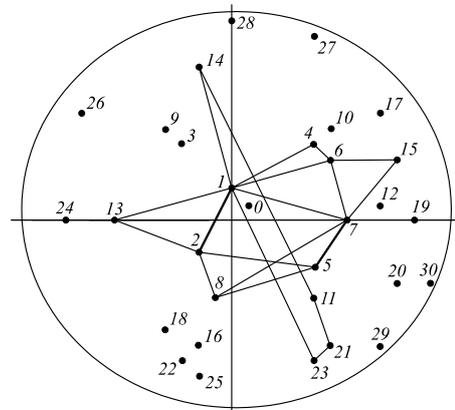


Рис. 6. Фрагмент модели, использовавшейся для тестирования алгоритма построения огибающих, и результат построения огибающих точки 0 на 30 точках множества

Выбор размера тестируемого множества (рабочей модели) для распознавания динамического объекта производился с учётом ранее проведённых оценок минимального необходимого количества звёзд для распознавания постороннего объекта. Изначально рассматривался вариант $n_0 = 15$. При количестве звёзд $n_0 = 15$ хотя бы одна конфигурация всегда сохранялась, поэтому во всех случаях успешно выполнялось распознавание статической конфигурации, но при внесении посторонней точки полное нарушение конфигурации происходило в 50% случаев. При этом добавление 1–2 точек практически не отражалось на результате. По-настоящему устойчивые результаты распознавания обеспечивались при $n_0 \geq 20$. Поэтому в качестве минимального количества звёзд на изображении, необходимого для распознавания посторонне-

го объекта, следует принять $n_0 = 20$, хотя идентификация постороннего объекта возможна и при меньшем количестве звёзд (показано на модельных сценах ниже). Кроме того, ограничение на значение звёздной величины как для изображений звёзд, так и для динамических объектов околоземного пространства в данном алгоритме не накладывается.

На рис. 7 показаны протестированные положения для одной из моделей на 20 точках статической конфигурации. Все 3 представленных на рисунке случая были успешно распознаны программой. Таким образом, можно не без основания предполагать, что при любом количестве звёзд $n_0 > 20$ посторонний объект на изображении звёздного неба будет обнаружен разработанным алгоритмом.

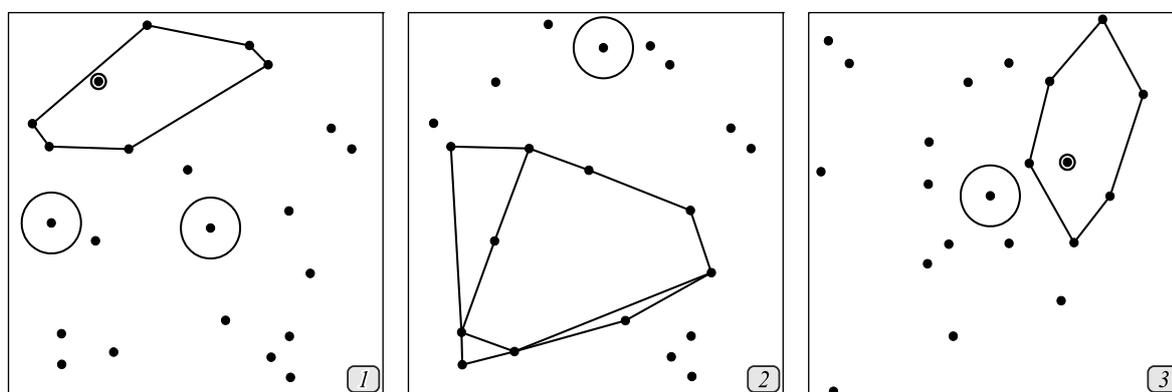


Рис. 7. Примеры модельных сцен на 20 точках с внесением посторонних объектов (обведены кружками). Показаны сохраняющиеся при этом статические конфигурации

Проведённые эксперименты, тем не менее, показали, что для разных положений динамического объекта в конкретной сцене возможности его распознавания будут не одинаковы, и наиболее сложной ситуацией представляется его попадание в центр рассматриваемой сцены (случай 3). В случаях 1 и 2 на рис. 7 для обнаружения динамического объекта может потребоваться меньшее количество звёзд. Однако даже при меньшем количестве звёзд задача может быть решена путём выбора определённой стратегии наблюдения. Тем более что разработанный алгоритм не требует взаимной координатной привязки анализируемых сцен, независимо от времени и способа их получения.

Однако следует отметить, что данный алгоритм, служащий для нахождения посторонних космических объектов, может оказаться менее эффективным, чем бортовые алгоритмы распознавания звёзд, созданные для работы со специальной аппаратурой – звёздными датчиками, предназначенными в основном для определения элементов ориентирования космических аппаратов. Оценка его эффективности при бортовой обработке требует дополнительных исследований, не укладывающихся в рамки данной работы.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (№5.6680.2017/8.9).

Литература

1. Алтухов, А.И. Требования к качеству изображений аварийных космических аппаратов / А.И. Алтухов, Д.С. Коршунов, Е.И. Шабаков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 405-410. – DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-3-405-410.
2. Бакланов, А.И. Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата «Ресурс-ПМ» / А.И. Бакланов, В.Д. Блинов, И.А. Горбунов, А.С. Забиякин, И.А. Малахов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2016. – Т. 15, № 2. – С. 30-35. – DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-30-35.
3. Малые космические аппараты : справ. пособие / В.Н. Блинов, Ю.Н. Сеченов, В.В. Шалай. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. – 264 с.
4. Гайворонский, С.В. Идентификация звезд при определении астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом / С.В. Гайворонский, Е.В. Русин, В.В. Цодокова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. –

2015. – Т. 15, № 1. – С. 22-29. – DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-22-29.
5. **Гренандер, У.** Лекции по теории образов. Синтез образов / У. Гренандер; пер. с англ.; под ред. Ю.И. Журавлева. – М.: Мир, 1979. – Т. 1. – 384 с.
 6. **Груздев, С.С.** Анализ состояния и перспектив по созданию электронного каталога объектов околоземного космического пространства / С.С. Груздев, И.Г. Журкин, П.Ю. Орлов, А.В. Панкин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 6. – С. 51-59. – DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-51-59.
 7. **Журкин, И.Г.** Алгоритм опознавания звезд на паре перекрывающихся изображений звездного неба / И.Г. Журкин, П.Б. Толкачев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1991. – № 2. – С. 59-65.
 8. **Кружилов, И.С.** Методы и программные средства повышения эффективности распознавания групп звезд в автономной астронавигации : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.11 / Кружилов Иван Сергеевич. – М.: МЭИ (ТУ), 2010. – 141 с.
 9. **Кузнецов, В.И.** Алгоритмы распознавания «рабочих» звезд по звездному полю / В.И. Кузнецов, Т.В. Данилова // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2003. – Т. 46, № 4. – С. 17-23.
 10. **Леухин, А.Н.** Многомерный гиперкомплексный контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов : дис. ... доктора физ.-мат. наук : 05.13.17 / Леухин Анатолий Николаевич. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2004. – 389 с.
 11. **Фу, К.** Структурные методы в распознавании образов / К. Фу; пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 322 с.
 12. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов / Я.А. Фурман, А.В. Кревецкий, А.К. Передреев, А.А. Роженцов, Р.Г. Хафизов, И.Л. Егошина, А.Н. Леухин. – изд. 2-е, испр. – М.: Физматлит, 2003. – 592 с.
 13. Комплекснозначные и гиперкомплексные системы в задачах обработки многомерных сигналов / Я.А. Фурман, А.В. Кревецкий, А.А. Роженцов, Р.Г. Хафизов, А.Н. Леухин, И.Л. Егошина. – М.: Физматлит, 2004. – 456 с.
 14. **Alvelda, P.** Neural network star pattern recognition for spacecraft attitude determination and control / P. Alvelda, A.M. San Martin // Advances in Neural Information Processing Systems 1: Proceedings of the 1988 Conference. – 1989. – P. 314-322.
 15. **Duan, Y.** A star pattern recognition algorithm for cameras with large FOV / Y. Duan, M. Li, Z. Niu, P. Jing, Z. Chen // Journal of Modern Optics. – 2018. – Vol. 65, Issue (1). – P. 85-97. – DOI: 10.1080/09500340.2017.1377304.
 16. **Hong, J.** Neural-network-based autonomous star identification algorithm / J. Hong, J.A. Dickerson // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2000. – No. 23. – P. 728-735. – DOI: 10.2514/2.4589.
 17. **Kolomenkin, M.** Geometric voting algorithm for star trackers / M. Kolomenkin, S. Pollak, I. Shimshoni, M. Lindenbaum // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2008. – Vol. 44, Issue 2. – P. 441-456. – DOI: 10.1109/TAES.2008.4560198.
 18. **Mortari, D.** A fast on-board autonomous attitude determination system based on a new star-id technique for a wide FOV star tracker / D. Mortari // Advances in the Astronautical Sciences. – 1996. – Vol. 93. – P. 893-903.
 19. **Mortari, D.** Search-less algorithm for star pattern recognition / Daniele Mortari // Advances in the Astronautical Sciences. – 1997. – Vol. 45. – P. 179-194.
 20. **Mortari, D.** K-vector range searching techniques / D. Mortari // Advances in the Astronautical Sciences. – 2000. – Vol. 105. – P. 449-464.
 21. **Padgett, C.** A grid algorithm for autonomous star identification / C. Padgett, K.K. Delgado // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1997. – Vol. 33. – P. 202-213. – DOI: 10.1109/7.570743.
 22. **Spratling, B.B. IV.** A survey on star identification algorithms / B.B. Spratling IV, D. Mortari // Algorithms. – 2009. – Vol. 2, Issue 1. – P. 93-107. – DOI: 10.3390/a2010093.
 23. Азмерит. Датчик звездной ориентации АЗДК-1 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.azmerit.ru/project.html> (дата обращения 31.01.2019).
 24. ИКИ. Отдел оптико-физических исследований. Приборы ориентации по звездам и Солнцу [Электронный ресурс]. – URL: <http://ofo.ikiweb.ru/razrabotki/orientaciya.html> (дата обращения 31.01.2019).

Сведения об авторах

Журкин Игорь Георгиевич, 1940 года рождения, в 1964 году окончил факультет экспериментальной и теоретической физики Московского инженерно-физического института (ныне НИЯУ МИФИ) по специальности 0608 «Электронные вычислительные машины». Доктор технических наук (1979 год) по специальности «Аэрокосмические съёмки, фотограмметрия, фототопография». В 1981 году присвоено учёное звание профессора. Заслуженный деятель науки Российской Федерации (1998 год). Заведующий кафедрой вычислительной техники и автоматизированной обработки аэрокосмической информации (ВТиАОИ) Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК). Область научных интересов: автоматизация фотограмметрических процессов, геоинформатика, математические методы синтеза, обработки и анализа изображений и сигналов, математическое моделирование в науках о Земле, дистанционное зондирование. Автор и соавтор более 150 научных статей, монографий и учебных пособий, а также свидетельств на изобретения и программы для ЭВМ. E-mail: zhurkin@miigaik.ru.

Чабан Людмила Николаевна, 1953 года рождения, в 1977 году окончила факультет управления и прикладной математики Московского физико-технического института (МФТИ) по специальности 0646 «Автоматизированные системы управления». Кандидат технических наук (1993 год) по специальности «Аэрокосмические съёмки, фотограмметрия, фототопография». В 2016 году присвоено учёное звание доцента по специальности «Геоинформатика». Работает доцентом кафедры вычислительной техники и автоматизированной обработки

аэрокосмической информации (ВТиАОАИ) Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК). Область научных интересов: дистанционное зондирование, тематическое дешифрирование, геоинформационный анализ, распознавание образов, методы обработки мульти- и гиперспектральных изображений. Автор и соавтор более 50 научных работ и учебных пособий. E-mail: lusychaban@mail.ru.

Орлов Павел Юрьевич, 1992 года рождения, в 2014 году окончил факультет прикладной космонавтики и фотограмметрии Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК) по специальности 230201.65 «Информационные системы и технологии». В настоящий момент является соискателем МИИГАиК по специальности 25.00.35 «Геоинформатика», а также преподавателем кафедры вычислительной техники и автоматизированной обработки аэрокосмической информации (ВТиАОАИ) Московского государственного университета геодезии и картографии. Область научных интересов: дистанционное зондирование, методы обработки изображений, web-ГИС, моделирование околоземного пространства, библиотека Cesium, модель SGP4. Автор и соавтор двух десятков печатных работ. E-mail: knight rider3e0@gmail.com.

ГРНТИ: 28.23.15

Поступила в редакцию 12 июля 2019 г. Окончательный вариант – 3 апреля 2020 г.

Structurally topological algorithm for star recognition and near-Earth space' object detection

I.G. Zhurkin¹, L.N. Chaban¹, P.Yu. Orlov¹

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK),
105064, Moscow, Russia, Gorokhovskii pereulok 4

Abstract

When solving a variety of celestial navigation tasks there is a problem of determining parameters of spacecraft motion and onboard primary payload orientation based on the coordinates of registered star images. Furthermore, unwanted objects, like active satellites, natural and artificial space debris, that reduce the probability of correct recognition may get into the field of view of a satellite sensor. This prompts the necessity to filter out such interference from the star field images. However, if the objects under recognition are bodies located in near-Earth space, in this case, the star images themselves will act as interferences. In addition, since the detection and cataloging of these objects from the Earth's surface is complicated by their small size, the atmospheric effects, as well as other technical difficulties, it is worthwhile to use the existing equipment onboard spacecrafts to solve this task. The existing recognition algorithms for star groups, as well as their classification, are presented in this paper. Moreover, a structurally topological approach for identifying groups of stars based on the properties of enveloping polygons used in constructing topological star patterns is proposed. Specific features in the construction of topological configurations on the analyzed set of points, as well as the principles of dynamic space object detection within their limits are described. Results of the numerical experiments performed using the developed algorithm on the star field maps and model scenes are presented.

Keywords: star recognition, star pattern, digital image processing, autonomous navigation, remote sensing, near-Earth space, space debris, space object.

Citation: Zhurkin IG, Chaban LN, Orlov PYu. Structurally topological algorithm for star recognition and near-Earth space' object detection. *Computer Optics* 2020; 44(3): 375-384. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-597.

Acknowledgements: The research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 5.6680.2017/8.9)

References

- [1] Altukhov AI, Korshunov DS, Shabakov EI. Requirements for image quality of emergency spacecrafts [In Russian]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 2015; 15(3): 405-410. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-3-405-410.
 - [2] Baklanov AI, Blinov VD, Gorbunov IA, Zabiyaikin AS, Malakhov IA. High resolution equipment for the future spacecraft "Resource-PM" [In Russian]. *Vestnik of the Samara State Aerospace University* 2016; 15(2): 30-35. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-30-35.
 - [3] Blinov VN, Sechenov YuN, Shalai VV. Small satellites [In Russian]. Omsk: OmSTU Publisher; 2016.
 - [4] Gaivoronskii SV, Rusin EV, Tsodokova VV. Stars identification at the astronomical coordinates determination by means of an automated zenith telescope [In Russian]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 2015; 15(1): 22-29. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-22-29.
 - [5] Grenander U. Lectures in pattern theory. Vol. 1: Pattern synthesis. New York: Springer-Verlag; 1976. ISBN: 978-0-387-90174-9.
 - [6] Gruzdev SS, Zhurkin IG, Orlov PYu, Pankin AV. Analysis of the current state and prospects for the development of a digital catalog of objects in near-Earth space [In Russian]. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* 2016; 13(6): 51-59. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-51-59.
 - [7] Zhurkin IG, Tolkachev PB. An algorithm for identifying stars on a pair of overlapping star field's images [In Russian]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii: Geodeziya i Aerofotosjemka* 1991; 2: 59-65.
 - [8] Kruzhirov IS. Methods and software tools to improve the efficiency of stars' groups recognition in autonomous star tracking [In Russian]. The thesis for the Candidate's degree in Technical Sciences. Moscow: MPEI; 2010.
 - [9] Kuznetsov VI, Danilova TV. Identification algorithms of "operational" stars on a sidereal field [In Russian]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* 2003; 46(4): 17-23.
 - [10] Leukhin AN. Multidimensional hypercomplex contour analysis and its applications to image and signal processing [In Russian]. Dr phys-math sci thesis. Yoshkar-Ola: Mari State Technical University Publisher; 2004.
 - [11] Fu KS. Syntactic methods in pattern recognition. New York: Academic Press; 1974.
 - [12] Furman YaA, Krevetskii AV, Peredreev AK, Rozhentsov AA, Khafizov RG, Egoshina IL, Leukhin AN. Introduction to contour analysis; applications for image and signal processing [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit"; 2003.
 - [13] Furman YaA, Krevetskii AV, Rozhentsov AA, Khafizov RG, Leukhin AN, Egoshina IL. Complex-valued and hypercomplex systems in the tasks of multidimensional signals processing [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2004.
 - [14] Alvelda P, San Martin AM. Neural network star pattern recognition for spacecraft attitude determination and con-
-

-
- trol. Advances in Neural Information Processing Systems 1: Proceedings of the 1988 conference 1989; 314-322.
- [15] Duan Y, Li M, Niu Z, Jing P, Chen Z. A star pattern recognition algorithm for cameras with large FOV. Journal of Modern Optics 2018; 65(1): 85-97. DOI: 10.1080/09500340.2017.1377304.
- [16] Hong J, Dickerson JA. Neural-network-based autonomous star identification algorithm. Journal of Guidance, Control, and Dynamics 2000; 23: 728-735. DOI: 10.2514/2.4589.
- [17] Kolomenkin M, Pollak S, Shimshoni I, Lindenbaum M. Geometric voting algorithm for star trackers. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 2008; 44: 441-456. DOI: 10.1109/TAES.2008.4560198.
- [18] Mortari D. A fast on-board autonomous attitude determination system based on a new star-id technique for a wide FOV star tracker. Advances in the Astronautical Sciences 1996; 93: 893-903.
- [19] Mortari D. Search-less algorithm for star pattern recognition. Advances in the Astronautical Sciences 1997; 45: 179-194.
- [20] Mortari D. K-vector range searching techniques. Advances in the Astronautical Sciences 2000; 105: 449-464.
- [21] Padgett C, Delgado KK. A grid algorithm for autonomous star identification. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 1997; 33: 202-213. DOI: 10.1109/7.570743
- [22] Spratling BB IV, Mortari D. A Survey on Star Identification Algorithms. Algorithms 2009; 2(1): 93-107. DOI: 10.3390/a2010093.
- [23] Azmerit. Compact Star Trackers. Source: (<http://www.azmerit.ru/project.html>).
- [24] Optico-physical department. Family of BOKZ star trackers. Source: (<http://ofo.ikiweb.ru/en/bokz.php>).
-

Author's information

Igor' Georgievich Zhurkin (b. 1940), graduated from Experimental and Theoretical Physics faculty of Moscow Engineering Physics Institute (now National Research Nuclear University MEPhI) in 1964, specialty "Electronic Computing Machines". Doctor of Sciences (1979) in Aerospace Surveys, Photogrammetry and Phototopography. In 1981 he was awarded the academic title of professor. Honored Scientist of the Russian Federation (1998). He is Head of Computer Engineering and Automatic Processing department of Aerospace Information at the Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK). His research interests are automation of photogrammetric processes, geoinformatics, mathematical methods of image and signal synthesis, processing and analysis, mathematical modeling in Earth sciences, remote sensing. He is author and co-author of more than 150 scientific articles, monographies and study guides, as well as certificates for inventions and computer programs. E-mail: zhurkin@miigaik.ru.

Lyudmila Nikolaevna Chaban (b. 1953), graduated from Management and Applied Mathematics faculty of Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT) in 1977, specialty "Automated Control Systems". Candidate of Technical Sciences (1993) in Aerospace Surveys, Photogrammetry and Phototopography. In 2016 she was awarded the academic title of associate professor in Geoinformatics. She works as an associate professor of Computer Engineering and Automatic Processing department of Aerospace Information of the Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK). Her research interests are: remote sensing, thematic interpretation, GIS analysis, pattern recognition, multi- and hyperspectral images processing methods. She is author and co-author of more than 50 research articles and study guides. E-mail: lusychaban@mail.ru.

Pavel Yur'evich Orlov (b. 1992), graduated from faculty of Applied Cosmonautics and Photogrammetry of Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK) in 2014, specialty "Information Systems and Technologies". Currently he is a degree-seeking student at MIIGAiK on the specialty 25.00.35 "Geoinformatics" and works as a lecturer of Computer Engineering and Automatic Processing department of Aerospace Information of MIIGAiK. His research interests are: remote sensing, image processing methods, web-GIS, near-Earth space modeling, Cesium graphics library, SGP4. He is author and co-author of 20 published articles. E-mail: knightrider3e0@gmail.com.

Received July 12, 2019. The final version – April 3, 2020.
