

© 2022 г. В.А. ГРИШИН, канд. техн. наук (vgrishin@cosmos.ru)
(Институт космических исследований РАН, Москва)

ЗАДАЧА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ ОБЛАСТИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЭТАЛОНАМИ ДЛЯ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ

Процесс управления стыковкой некооперируемых космических аппаратов требует информации о взаимном положении активного и пассивного аппаратов. Такую задачу решают оптические системы относительной навигации, анализирующие видимые изображения, идентифицирующие (распознающие) наблюдаемый аппарат и выполняющие измерение относительных линейных и угловых координат. Поскольку ракурс, с которого наблюдается пассивный аппарат, может изменяться в широких пределах (вплоть до полной сферы), соответственно в широких пределах меняется и само изображение пассивного космического аппарата. Поэтому для решения задач идентификации и измерения требуется наличие достаточно большого количества эталонов. В статье предложен способ существенного сокращения количества эталонов, используемых для формирования покрытия области неопределенности.

Ключевые слова: некооперируемая стыковка космических аппаратов, оптическая относительная навигация, распознавание, эталонные изображения.

DOI: 10.31857/S0005231022120066, EDN: KRWINC

1. Введение

В настоящее время существенно расширяется круг задач, в которых используется стыковка с беспилотными космическими аппаратами. Новые задачи связаны с обслуживанием космических аппаратов, пополнением запасов топлива/окислителя, заменой вышедших из строя компонентов космического аппарата, изменением орбиты и др.

В процессе стыковки система управления активного космического аппарата использует информацию о своих координатах относительно пассивного аппарата. В качестве основного источника такой информации сейчас рассматриваются системы оптической навигации, решающие взаимосвязанные задачи идентификации (распознавания) объекта и измерения относительных координат. Основной проблемой является стыковка с некооперируемыми космическими аппаратами. На таких космических аппаратах отсутствует специальная мишень, которая устанавливается на кооперируемых космических аппаратах, изначально предназначенных для выполнения стыковок. Мишень

позволяет производить измерение относительных координат с высокой точностью и надежностью. При некооперируемой стыковке алгоритмы работы оптико-электронных систем по сравнению с алгоритмами, предназначенными для навигации при стыковке с кооперируемыми космическими аппаратами, многократно усложняются. Соответственно, возникает необходимость решения задачи информационного обеспечения процесса стыковки, а именно, подготовки эталонной информации для решения задач распознавания и измерения [1].

В общем случае ракурс наблюдения пассивного аппарата может быть любым (т.е. пассивный аппарат может наблюдаться с любого направления), а расстояние до него изменяться в очень широких пределах. Космический аппарат является конструктивно сложным трехмерным (3D) объектом. Рассмотрим некоторые вопросы отображения (в частности, центральной проекции) точек поверхности 3D объекта на плоскость (в которой располагается фотоприемная матрица). При этом будет введено важное понятие классов эквивалентности отображений. Интересно, что происходит при изменении ракурса наблюдения 3D объекта. Во-первых, при изменении ракурса наблюдения в определенных пределах на плоскость могут проектироваться одни и те же точки 3D объекта. Такие проекции можно назвать топологически эквивалентными, поскольку между ними существует взаимно однозначное взаимно обратимое непрерывное отображение. В качестве примера можно привести наблюдение кубика вдоль линии, проходящей через центр кубика и одну из его вершин. При изменении ракурса наблюдения в окрестности этой линии в довольно широких пределах будем наблюдать те же самые три грани кубика, и любые два таких изображения могут быть преобразованы одно в другое. Более того, если наблюдать этот же кубик вдоль линии, проходящей через центр кубика и противоположную вершину, то можно наблюдать три другие грани кубика. Важно отметить, что эти две проекции задают два класса топологической эквивалентности проекций кубика и несут в себе информацию о множестве **всех возможных проекций** изображения этого кубика. А это множество является несчетным и имеет мощность континуума. Подход, связанный с классами эквивалентности отображений, рассматривается в книге [2]. В этой книге классы эквивалентности формируются при использовании групп преобразований. Следует отметить, что в данном случае речь идет не о яркости точек, а о соответствии образов точек 3D объекта на различных его отображениях (проекциях). Это соответствие ни в коей мере не зависит ни от источников освещения, ни от теней, ни от двухлучевых функций отражательной способности (bidirectional reflectance distribution function) поверхности 3D объекта в каждой точке его поверхности и т.д.

Во-вторых, при изменении ракурса наблюдения 3D объекта проекции одних элементов этого объекта могут перекрывать проекции других элементов. В этом случае эти два отображения уже не будут содержать отображения (проекции) в точности совпадающих множеств точек 3D объекта и не будут являться топологически эквивалентными, поскольку между ними уже

не будет существовать **во всех точках** взаимно однозначного взаимно обратимого непрерывного отображения, а будет наблюдаться топологическая перестройка изображения.

Существует еще и третий случай, когда при изменении ракурса наблюдения точки 3D объекта, расположенные вблизи от границ проекций его точек, “уходят за горизонт” либо “появляются из-за горизонта”. В качестве примера можно привести точки поверхности шара. Формально этот случай можно рассматривать как второй случай. Однако, исключив точки, находящиеся близко от “горизонта”, этот случай можно свести к первому случаю с классами эквивалентности.

Вообще говоря, для анализа топологических перестроек изображений объекта используется аппарат дифференциальной геометрии и теории особенностей (теории катастроф). Достаточно подробно и строго с математической точки зрения данные вопросы изложены в книге [3]. Для описания топологической перестройки изображений (в частности, видимых и невидимых контуров) могут быть использованы так называемые аспектные графы (aspect graphs) [4–7], предложенные Koenderink и van Doorn в 1979 г.

В принципе, количество эталонов, необходимых для распознавания/измерения, должно соответствовать числу топологически не эквивалентных проекций объекта. Однако дискретное представление изображений, которое формируется фотоприемной матрицей, ограничивает возможности по их трансформации. Поэтому требуется некоторое увеличение количества эталонов.

2. Частная форма представления эталонной информации

Существенного упрощения задачи подготовки эталонной информации можно добиться путем использования эталонов специального вида. А именно, предлагается использовать эталоны, состоящие из набора информативных (особых) точек изображения (interest points) с их привязкой к трехмерным координатам пассивного космического аппарата. Трехмерные координаты особых точек получаются из трехмерной конструкторской модели объекта, формируемой в системах автоматизированного проектирования (computer-aided design — CAD), а особые точки формируются при обработке синтезированных системой визуализации изображений объекта в процессе подготовки миссии на Земле. В этом случае топологическая перестройка изображения, возникающая при изменении ракурса, приводит к исчезновению одних особых точек на изображении и к появлению других особых точек.

Указанные преобразования эталонов, состоящих из особых точек, гораздо проще выявлять и оценивать, чем выявлять и оценивать топологические перестройки всего изображения. А самое главное — число эталонов, необходимых для покрытия всей области неопределенности, радикально сокращается.

Остановимся на понятии области неопределенности. Собственно, навигация — это определение местоположения и ориентации движущегося объекта. Соответственно, если требуется решить такую задачу, то, по крайней мере,

один из указанных параметров не определен, либо определен с недостаточной точностью.

Вообще говоря, в практически важных случаях искомые параметры не могут принимать абсолютно произвольные значения. То есть всегда можно указать некую область, в которой может находиться рассматриваемый объект, координаты которого требуется определить. В реальных ситуациях размер таких областей может определяться по данным, поступающим от различных источников навигационной информации. В частности, это могут быть инерциальные навигационные системы, радионавигационные системы, система звездной навигации, спутниковые навигационные системы и др. Таким образом, область неопределенности — это та область, в которой может находиться объект. Решение навигационной задачи приводит к уменьшению области неопределенности.

Для оптических навигационных систем важным параметром является соотношение размера области пространства, в которой эталонное изображение способно обеспечить решение задачи навигации, и размера области неопределенности положения объекта. Если размер области пространства, в которой эталонное изображение способно обеспечить решение задачи навигации, меньше области неопределенности положения объекта, то приходится строить сетку гипотез о возможных положениях объекта, покрывающую область неопределенности, и рассматривать все возможные гипотезы положения объекта в этой области неопределенности. Для каждой гипотезы необходимо наличие, по крайней мере, одного эталонного изображения. Область неопределенности лежит в пространстве той системы координат, которая используется для навигации и управления.

Для описания относительного положения в статье использована сферическая система координат, связанная с корпусом пассивного космического аппарата. По аналогии со сферической географической системой координат используются термины «долгота» и «широта». Начало координат может располагаться на плоскости, на которой располагается либо стыковочная мишень для случая кооперируемой стыковки, либо стыковочный узел, либо иные компоненты, важные для проведения стыковки. Нулевые значения «долготы» и «широты» соответствуют нормали к указанной плоскости. Для описания углового положения активного космического аппарата использовались различные матрицы поворота относительно системы координат, в которой два вектора лежат в указанной плоскости пассивного космического аппарата, а третий — ортогонален к ней.

В тексте уже неоднократно использовался термин «ракурс наблюдения». Уточним этот термин. Ракурс — это направление, с которого наблюдается пассивный космический аппарат в системе координат, связанной с этим самым пассивным космическим аппаратом. В данном случае это сферическая система координат. Активный космический аппарат определяет свое положение также в этой системе координат, поскольку решается задача стыковки с

пассивным аппаратом. Множество ракурсов наблюдения в данном случае параметризовано двумя углами «долготой» и «широтой». С этого направления активный космический аппарат ведет наблюдение пассивного космического аппарата.

Разворот камеры относительно ее оптической оси не учитывается, поскольку дескрипторы, использованные для описания эталонов, инвариантны к повороту. На малых расстояниях до пассивного космического аппарата приходится вводить параметризацию эталонов в зависимости от расстояния по причине влияния перспективных искажений.

Собственно, совокупность таких эталонов для различных ракурсов и используется для распознавания пассивного аппарата. Каждая особая точка снабжается специальным дескриптором, который обеспечивает правильную идентификацию точки на реальном изображении, формируемом камерой на борту активного космического аппарата. К дескриптору предъявляются достаточно жесткие требования по устойчивости к характеру освещения, устойчивости к изменению ракурса наблюдения, ориентации в поле зрения и к изменению масштаба изображения. Удовлетворительными характеристиками обладают дескрипторы особых точек, используемые, например, в алгоритмах SIFT (scale-invariant feature transform) и SURF (speeded-up robust features). Использование эталонов изображений, состоящих из особых точек, как показывает практика, позволяет достаточно успешно решать задачи распознавания изображений, включая задачи навигации [8–10].

Вторым преимуществом такого подхода является то, что особые точки, хорошо локализуемые на изображении и используемые для решения задачи распознавания, также могут быть использованы и для решения задачи относительной навигации, поскольку заданы их трехмерные координаты.

Необходимо отметить, что в процессе создания эталонов оператор должен производить жесткий отбор информативных (особых) точек (interest points), используемых для распознавания и навигации. Это связано с тем, что на изображении космического аппарата присутствует большое количество информативных точек, которые легко обнаруживаются алгоритмами поиска, но не могут быть использованы для навигации, поскольку не имеют жесткой привязки в системе координат, связанной с космическим аппаратом. В первую очередь к ним относятся очень яркие блики на поверхностях с большим коэффициентом отражения. Это, в частности, зеркальная экранно-вакуумная изоляция (multi-layer insulation — MLI), которая покрывает большую часть поверхности корпуса, и ее форма не является стабильной, а также различные полированные металлические элементы, границы очень резких теней на корпусе аппарата от выступающих элементов конструкции, наложение изображений контрастных элементов конструкции, имеющих различное пространственное положение. Реально указанные факторы приводят к тому, что практически для решения задачи навигации пригодно очень небольшое количество точек поверхности космического аппарата. Все это является причиной того,

что процесс формирования эталонных изображений является весьма трудоемким и должен обязательно выполняться под непосредственным контролем квалифицированного оператора.

3. Формирование покрытия как выборки из множества ракурсов с высокой избыточностью

При использовании эталонов, состоящих из набора особых точек изображения, возможно существенное упрощение процедуры формирования минимального покрытия эталонами области неопределенности. Для формирования покрытия области неопределенности сначала покрываем всю область неопределенности достаточно частой сеткой эталонов, например с шагом порядка 1° . Сетка может быть неравномерной, например, как в случае покрытия сферы. Затем необходимо отобрать те эталоны, которые удовлетворяют указанным ниже условиям.

1. Покрытие должно обеспечивать для каждого ракурса наблюдение и распознавание числа информативных точек не меньше заданной величины.
2. Матрица ошибок измерения для каждого ракурса должна удовлетворять заданным требованиям по точности и корреляционным связям между ошибками измерения. Матрица ошибок измерений может быть рассчитана для любой фиксированной конфигурации особых точек.

Теоретически для решения задачи относительной навигации достаточно трех точек. Однако для увеличения точности навигации, снижения коэффициентов корреляции ошибок линейных и угловых координат, а также повышения надежности измерений желательно иметь не менее 7–10 точек.

Если дополнительно построить изображения при разных положениях Солнца, то при такой частой сетке, покрывающей всю область неопределенности, возможно реализовать полуавтоматическую селекцию информативных точек, которые не могут быть использованы для навигации, что обеспечит существенную помощь оператору при формировании эталонных изображений.

При формировании минимального покрытия области неопределенности проблемой является то, что область применимости каждого эталона по ракурсам наблюдения определяется множеством точек, в которых удовлетворяются ограничения, указанные выше. Форма этих областей не является постоянной, зависит от многих факторов и индивидуальна для каждого конкретного эталона. Поэтому получение оптимального покрытия весьма проблематично.

Следует отметить, что прямой перебор вариантов всех возможных покрытий практически невозможен даже для $11 \times 11 = 121$ отсчетов углов ракурса. В [11] показано, что в этом случае число вариантов покрытия, которые необходимо рассмотреть и сравнить, будет равно $2,658 \cdot 10^{36}$. Если принять, что на формирование одного покрытия и оценку его качества требуется всего 1 микросекунда (что очень быстро), тогда на полный перебор потребуется $8,429 \cdot 10^{22}$. Очевидно, что прямой перебор невозможен.

Исходя из технической сущности задачи следует рассматривать только такие покрытия, которые обеспечивают полное покрытие области неопределенности, т.е. когда любая точка области неопределенности покрывается хотя бы одним эталоном. Имеется большое число теоретических работ, относящихся к задачам покрытия. Например, в классической работе [12] получена оценка плотности системы равных кругов, покрывающей бесконечную плоскость. В [13] построены покрытия квадрата равными кругами и даны оценки плотности таких покрытий. В [14] построены покрытия плоскости кругами двух радиусов. В общем, полученные разными авторами теоретические результаты синтеза оптимальных покрытий относятся к покрытиям регулярными фигурами, чаще всего кругами одного радиуса или кругами нескольких заданных радиусов. В рассматриваемом здесь случае и форма областей применимости эталонов может существенно различаться, и размеры этих областей зависят от ракурса формирования эталона.

Остается только численное решение, которое может быть получено путем перебора с возвратами и большим количеством специально разработанных эвристик для сокращения этого перебора. Такой вариант решения представляется неоправданно сложным и трудоемким, тем более что создание такого покрытия является далеко не единственным этапом, которые должны быть реализованы при формировании эталонной информации.

4. Упрощенная процедура формирования выборки

Поскольку синтез покрытия, связанный с перебором вариантов, является достаточно сложным в плане создания набора эвристик, отбрасывающих бесперспективные варианты, поэтому предлагается искать решение задачи синтеза покрытия существенно более простыми средствами, хотя и с возможно меньшей эффективностью, что выразится в использовании несколько большего числа эталонных изображений. Предлагаемый подход также является эвристическим.

Для упрощения задачи разработан алгоритм синтеза покрытия, использующий частую сетку ракурсов (например, с шагом 1°), имеющую регулярную структуру (рис. 1). В качестве такой структуры целесообразно использовать прямоугольную в некоторой, возможно нелинейной, системе координат сетку. Узлы этой сетки соответствуют ракурсам, для которых строятся изображения и формируются соответствующие эталоны. Для определенности будем рассматривать сетку 51×51 углов, охватывающую область $50^\circ \times 50^\circ$ по «долготе» и «широте». Ракурс, оптимальный для стыковки, соответствует нулевым углам «долготы» и «широты».

Для построения сетки эталонов целесообразно использовать введенную ранее сферическую систему координат. Сетка эталонов может быть задана для некоторого пространственного угла, а также легко распространена на всю сферу сферической системы координат, если возникает необходимость распознавать и измерять относительные координаты для любого ракурса на-

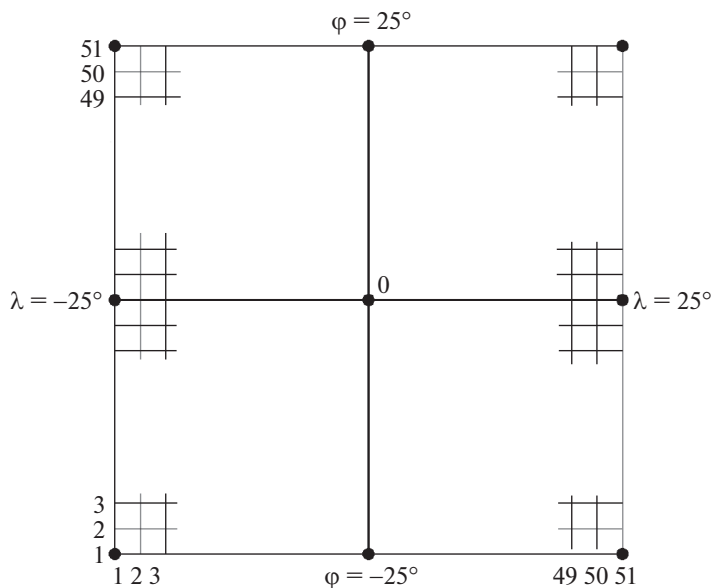


Рис. 1. Формирование сетки эталонов по ракурсам наблюдения, покрывающей всю область неопределенности.

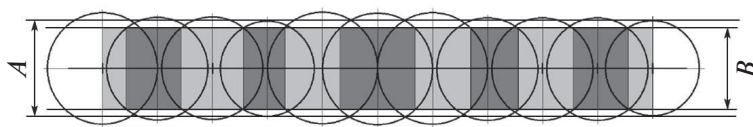


Рис. 2. Формирование горизонтальной полосы покрытия.

блюдения пассивного аппарата. Поскольку наибольший интерес представляет обычно только один пространственный (телесный) угол, в центре которого находится либо стыковочная мишень, либо стыковочный узел, либо иной конструктивный элемент пассивного космического аппарата, используемый для стыковки, то набор эталонов строится для четырехгранного телесного угла сферы.

На рис. 2 показаны условные области применимости эталонов для значения «широты», равной 0° . Областью применимости для каждого эталона является то множество ракурсов, для которых эталон может быть использован, поскольку в этих точках удовлетворяются указанные ранее два условия. Поскольку рисунок является иллюстративным, то форма областей применимости выбрана круговой. Реально и конфигурация, и размеры этих областей зависят от ракурса, для которого синтезирован эталон. На рисунке для упрощения показаны области применимости 11 эталонов, а реально для нашей сетки их количество равно 51 для одной полосы. Кроме того, реальные эталоны в полосе имеют гораздо большее перекрытие областей применимости, которые имеют размер порядка $10\text{--}30^\circ$.

На рисунке показаны два размера. Первый размер — A — соответствует наименьшему вертикальному размеру области применимости из всех эталонов, находящихся в полосе. Второй размер — B — соответствует минимальному вертикальному размеру **объединения областей** применимости всех эталонов, находящихся в полосе.

Для упрощения задачи построения перейдем от задачи покрытия к задаче замощения, т.е. созданию покрытия без пробелов и двойных покрытий. При замощении будем рассматривать прямоугольные фрагменты областей покрытия, полностью находящиеся в области применимости каждого эталона. При этом прямоугольные фрагменты, из которых строится замощение, укладываются стык в стык (без перекрытия), а полные области применимости перекрываются.

Для упрощения процедуры замощение строится горизонтальными полосами. Вертикальный размер прямоугольных фрагментов в каждой полосе один и тот же, горизонтальный размер может отличаться в пределах одной полосы. Вертикальный размер различных полос также может быть различным.

Построение замощения начинаем из центра, т.е. из области покрытия для ракурса с равными нулю обоими углами, что соответствует индексам решетки $(26, 26)$. Целью является удаление максимального числа эталонов из этой полосы для обеспечения минимального покрытия. При удалении части эталонов минимальный вертикальный размер объединения B при этом неизбежно уменьшится. Поэтому задаем новое значение вертикального размера B , уменьшенное на $\Delta = 2 - 4^\circ$. Теперь строим замощение полосы, последовательно перебирая эталоны и строя для каждого прямоугольник максимального размера по горизонтали. Вертикальный размер всех прямоугольников один и тот же, на $\Delta = 2 - 4^\circ$ меньше начального значения размера B . Замощение строим в положительном направлении от центрального эталона и в отрицательном направлении. Если на каком-то этапе при переборе эталонов по строке с шагом 1° получилась «щель» между прямоугольными областями замощения, делаем возврат на один шаг и уменьшаем ширину прямоугольной области, чтобы избежать двойного покрытия. Если дошли до границ сетки, то проверяем количество точек привязки на этих границах. Если оно меньше заданной величины, то вставляем дополнительные эталонные изображения. Может так получиться, что на одном крае полосы или на обоих краях пара эталонов расположена слишком близко. Поэтому может возникнуть соблазн разместить точки более равномерно, улучшив тем самым покрытие. Однако такие попытки чаще всего требуют многократных перестановок, и более эффективным методом получения более равномерного распределения эталонов является небольшое изменение величины Δ и повторное построение замощения полосы. Ширина построенных прямоугольных областей может меняться в зависимости от положения в полосе. Как правило, при движении к концам полосы ширина прямоугольных областей уменьшается.

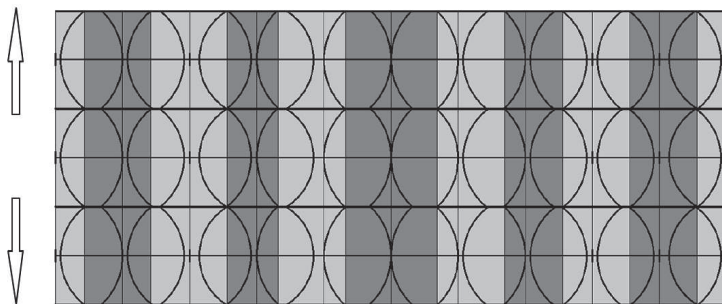


Рис. 3. Последовательное построение полос покрытия вверх и вниз от первой построенной полосы.

Далее по такому же алгоритму последовательно строятся полосы выше и ниже уже построенной полосы — рис. 3.

Если строим полосу, лежащую выше уже построенной полосы, то добиваемся, чтобы нижняя граница новой полосы вплотную примыкала к верхней границе уже построенной полосы. Аналогично, если строим полосу, лежащую ниже уже построенной полосы, то добиваемся того, чтобы верхняя граница новой полосы вплотную примыкала к нижней границе уже построенной полосы. Если на верхней или нижней границе всей области $50^\circ \times 50^\circ$ не выполнены условия применимости, то вставляем дополнительную полосу с центрами, расположенными на соответствующей границе. Ширина этих полос может уменьшаться по мере отдаления от центральной полосы. На рис. 3 для упрощения ширина прямоугольных областей в разных полосах показана одинаковой. На практике они обычно различаются.

Далее строим таблицу, связывающую ракурс в пределах $\pm 25^\circ$ по каждому из углов с конкретным эталоном, который должен быть использован для распознавания и навигации. Оценка ракурса формируется на этапе грубого распознавания пассивного космического аппарата.

Для отработки алгоритма синтеза покрытия области неопределенности была разработана простая модель области применимости. Эта модель построена на основании проведенных экспериментов для сетки эталонов малой размерности — 11×11 с шагом 5° . Модель числа точек, для которых устанавливается соответствие, имеет вид

$$K(i, i_0, j, j_0) = [(\eta_{i_0, j_0} + A_0 - \mu_{i, j}) * \exp(-(\alpha(i - i_0)^2 + \beta(j - j_0)^2))].$$

Здесь квадратные скобки обозначают целую часть числа;

i_0, j_0 — индексы, соответствующие ракурсу наблюдения, для которого сформирован эталон;

i, j — индексы, соответствующие направлению, для которого определяется число точек, для которых устанавливается соответствие;

$\mu_{i, j}$ — случайная величина с равномерным распределением в интервале $[0, 1]$;

η_{i_0, j_0} — случайная величина с равномерным распределением на отрезке $[0, 3]$;

A_0 — минимальное число особых точек, которым должен обладать эталон; установлено значение $A_0 = 20$.

При использовании этой формулы в каждой точке (i, j) проверяется условие

$$K(i_0, i_0, j_0, j_0) \geq K(i, i_0, j, j_0).$$

Если это условие в какой-то точке области применимости эталона нарушено, то значение $K(i, i_0, j, j_0)$ заменяется на $K(i_0, i_0, j_0, j_0)$. Коэффициенты α, β отражают зависимость области применимости эталонов от ракурса визирования. Это обычно происходит, когда большая часть наблюдаемой поверхности для ракурса i_0, j_0 приблизительно ортогональна направлению визирования.

Таким образом, следующие выражения имитируют распределение точек привязки, которое приблизительно изотропное для нулевого ракурса (26, 26) и имеет тенденцию к сжатию носителя при отклонении от нулевого ракурса:

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 + a \frac{|i_0 - 26|}{25} \right),$$
$$\beta = \beta_0 \left(1 + b \frac{|j_0 - 26|}{25} \right).$$

Заданы следующие параметры $\alpha_0 = 0,01, a = 1, \beta_0 = 0,01, b = 1$.

На рис. 4 приведены профили области применимости девяти эталонов в линиях уровня. На рис. 5 приведен профиль построенного покрытия также в линиях уровня. Минимальное количество визируемых особых точек, удовлетворяющих указанным выше двум условиям для любого ракурса в пределах $50^\circ \times 50^\circ$, было задано равным 7.

Таким образом, чтобы покрыть область неопределенности размером $50^\circ \times 50^\circ$ из общего количества 2601, были отобраны 28 эталонов, или 1,076%. Качество построенного покрытия можно приблизительно определить как отношение суммы площадей областей применимости использованных эталонов к площади покрываемого пространства, равной $51 \times 51 = 2601$. У построенного покрытия это отношение равно 1,772. Для оптимального покрытия бесконечной плоскости кругами в [10] получена оценка эффективности покрытия, которая имеет вид

$$D \leq \frac{\pi}{\sqrt{27}} = 1,209 \dots$$

D — это отношение суммарной площади всех кругов, покрывающих область, к площади всей области. Таким образом, построенное покрытие можно считать приемлемым с учетом простоты использованного алгоритма, а также того, что покрывается ограниченная область, а не бесконечная плоскость.

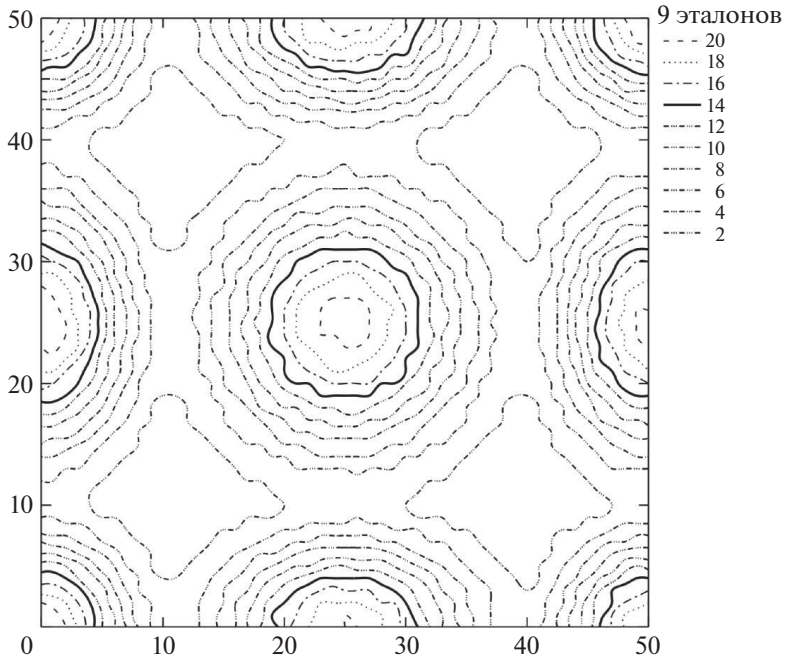


Рис. 4. Профиль применимости девяти эталонов в линиях уровня для девяти точек, выделенных на рис. 1.

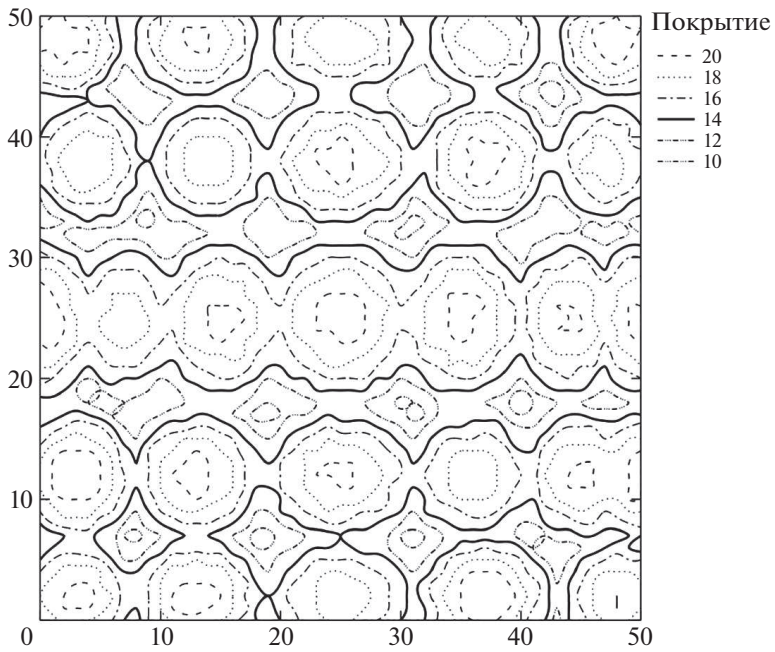


Рис. 5. Профиль применимости построенного покрытия области неопределенности.

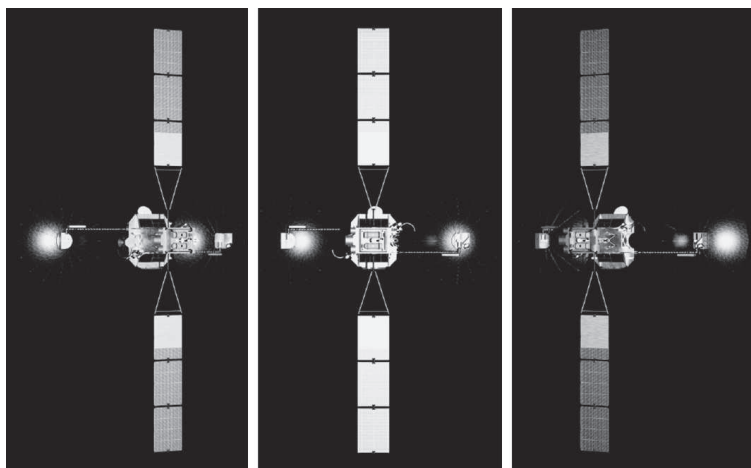


Рис. 6. Синтезированное изображение космического аппарата при трех различных значениях угла «долготы».

Рассмотрим несколько иллюстраций. На рис. 6 представлены три синтезированных изображения некоторого абстрактного космического аппарата. Слева и справа от корпуса аппарата видны солнечные блики на поверхности больших параболических антенн. Сами параболические антенны при таком освещении не просматриваются.

Вариации яркости панелей солнечных батарей на левом и правом изображениях обусловлены, скорее всего, геометрическими и фотометрическими погрешностями синтеза изображений программой рендеринга общего назначения. Для визуализации космических аппаратов в ряде стран разработаны специализированные программы рендеринга с гораздо более жесткими требованиями к величине геометрических и фотометрических ошибок, чем те, которые установлены для программ рендеринга общего назначения. Иллюстрации показывают, насколько сильно изменяется вид центральной части (корпуса космического аппарата) при изменении ракурса наблюдения на $\pm 25^\circ$ только по одной координате («долготе»). Очевидно, что для перекрытия области изменения ракурсов по двум координатам $50^\circ \times 50^\circ$ потребуется значительное число эталонов.

Иллюстративное изображение результатов установления соответствия особых точек представлено на рис. 7. Это изображение иллюстративное в том смысле, что оно позволяет понять, как произошло установление соответствия.

На рисунке показан результат установления соответствия для шести особых точек эталона. Реально, при благоприятной ситуации, происходит установление соответствия нескольких десятков точек (что делает визуальный анализ результатов установления соответствия особых точек достаточно сложным и требует нескольких итераций). На рисунке только для одной из шести особых точек соответствие установлено неправильно. Обычно доля ошибочно установленных соответствий больше чем $1/6$. Одной из причин

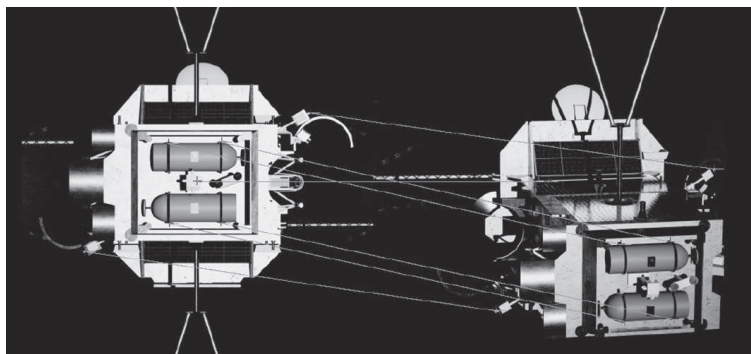


Рис. 7. Установление соответствия особых точек эталона (слева) и изображения полученного для другого ракурса (справа).

этого является то, что дескрипторы особых точек, построенные на основе широко распространенных дескрипторов SIFT и SURF, на высококонтрастных изображениях склонны к вырождению. Поэтому их эффективность снижается.

Для автоматического выявления точек, для которых соответствие установлено неправильно, используются специальные алгоритмы. Кроме того, на рис. 7 особые точки располагаются симметрично, что на практике при работе в автоматическом режиме наблюдается крайне редко. Характер расположения особых точек и степень их симметричности оказывают очень сильное влияние на точность измерений. Приведенное изображение как раз и было получено при экспериментальной оценке степени влияния симметрии положения особых точек на ошибки измерения.

5. Заключение

В работе представлен простой способ формирования покрытия области неопределенности эталонами для решения задач относительной навигации при стыковке с некооперируемыми космическими аппаратами. Качество синтезированных покрытий может считаться приемлемым для практических приложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гришин В.А., Бережков А.В.* Информационное обеспечение задач стыковки космических аппаратов (подготовка эталонов и отработка алгоритмов распознавания и измерения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 50–57.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-50-57>
2. *Файн В.С.* Опознавание изображений. Основы непрерывно-групповой теории ее приложения. М.: Наука, 1970.

3. *Форсайт Д., Понс Ж.* Компьютерное зрение. Современный подход. Пер. с англ. М.: Издательский дом “Вильямс”, 2004.
4. *Bowyer K.W., Dyer C.R.* Aspect graphs: an introduction and survey of recent results // Proc. of the SPIE 1395, Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, 13950R. Zurich, Switzerland, 1990. <https://doi.org/10.1117/12.2294270>
5. *Eggert D.W., Bowyer K.W., Dyer C.R.* Aspect graphs: State-of-the-art and applications in digital photogrammetry // Proc. of the ISPRS 17th Congress: Int. Archives Photogrammetry Remote Sensing. 1992. Pt. 5. P. 633–645.
6. *Van Efferterre T.* Aspect graphs for visual recognition of three-dimensional objects // Perception. 1994. V. 23. No. 5. P. 563–582. <https://doi.org/10.1068/p230563>
7. *Yang C.C., Marefat M.M., Johnson E.J.* Entity-based aspect graphs: Making viewer centered representations more efficient // Pattern Recogn. Lett. 1998. V. 19. No. 3–4. P. 265–277. [https://doi.org/10.1016/S0167-8655\(98\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8655(98)00006-3)
8. *Lowe D.G.* Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // Int. J. Comput. Vision. 2004. V. 60. P. 91–110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
9. *Chen Yu-lang, Gao Jing-min.* SURF-Based Image Matching Method for Landing on Small Celestial Bodies // Proc. of the 2019 International Conference on Modeling, Analysis, Simulation Technologies and Applications (MASTA 2019). Hangzhou, China, 2019. P. 401–407. <https://doi.org/10.2991/masta-19.2019.68>
10. *Qu X., Soheilian B., Habets E., Paparoditis N.* Evaluation of SIFT and SURF for vision based localization // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. V. XLI-B3. P. 685–692. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B3-685-2016>
11. *Гришин В.А.* Постановка задачи формирования оптимального покрытия области неопределенности эталонами для систем оптической навигации // Математические методы распознавания образов: Тез. докл. 20-й Всеросс. конф. с международным участием, г. Москва 2021 г. М.: РАН, 2021. С. 187–189. URL: http://machinelearning.ru/wiki/images/0/02/Mmpr_2021.pdf.
12. *Том Л.Ф.* Расположения на плоскости, на сфере и в пространстве. Пер. с немецкого И.М. Макаровой. М.: Физматлит, 1958.
13. *Tarnai T., Gáspár Z.* Covering a square by equal circles // Elemente der Mathematik. 1995. V. 50. No. 4. P. 167–170. <https://doi.org/10.5169/seals-46351>
14. *Kennedy T.* Compact packings of the plane with two sizes of discs // Discret. Comput. Geometry. 2006. V. 35. No. 2. P. 255–267. <https://doi.org/10.1007/s00454-005-1172-4>

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 21.01.2022

После доработки 14.06.2022

Принята к публикации 29.06.2022