

Определение собственного положения лунного посадочного модуля по видеоизображению с использованием метода сигнатур

© А.В. Бобков, Сюй Ян

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрена задача разработки системы визуальной навигации для определения собственного положения лунного посадочного модуля. Предложен новый метод сравнения наблюдаемого кадра изображения с векторной картой Луны на основе сопоставления сигнатур. Эксперименты показали, что предложенный метод способен работать в реальном времени, устойчив к условиям освещенности, небольшим изменениям ракурса съемки и воздействию шума, а также может работать при большом количестве пропусков и ложных срабатываний детектора кратеров. Предложенный метод можно использовать в современных отечественных и международных космических программах освоения Луны для обеспечения мягкой высокоточной безопасной посадки спускаемого аппарата в заданную область Луны.

Ключевые слова: визуальная навигация, автоматическая посадка, высокоточная посадка на Луну, обзорно-сравнительная навигация

Введение. Освоение космического пространства — одно из ключевых направлений развития человечества. С покорением космоса связаны не только давние заветные мечты, это — мощный локомотив, способный тянуть за собой развитие науки, техники, экономики и других отраслей, а также побуждать самого человека к развитию и восхождению.

Современный этап освоения космоса связан с созданием и развертыванием долговременных автоматических или обитаемых баз на поверхности ближайших небесных тел, и прежде всего, на Луне. Эти базы не только служат научными лабораториями и центрами изучения технологий, но и выступают в качестве форпостов для дальнейшего покорения космического пространства.

Задача мягкой посадки на Луну была успешно решена еще в XX в. в рамках программ «Аполлон» и «Луна». Современные задачи освоения Луны связаны с посадкой в выбранную область полярных регионов, развертыванием и последующей поддержкой лунных баз. Они требуют на порядки более высокой точности посадки — десятки метров по положению и единицы градусов по наклону посадочной площадки. Данная задача не может быть решена с использованием какого-либо одного измерительного средства, для этого потребуются комплексирование показаний различных навигационных средств и, соответственно, разработка методов интеллектуального синтеза законов управления.

Повысить точность определения собственного положения посадочного модуля можно либо с использованием искусственных маркеров, положение которых легко обнаружить, либо по естественным признакам и ориентирам в месте посадки. В качестве искусственных маркеров могут выступать системы радиомаяков, спутников глобального позиционирования на орбите Луны или псевдоспутников на ее поверхности. Однако их развертывание, обслуживание и топологическая привязка представляют собой отдельную сложную техническую задачу, в настоящее время еще не решенную. Поэтому необходимо рассматривать альтернативу — систему автоматической визуальной ориентации, использующей для определения положения объекта наблюдаемые ориентиры (кратеры, горы, разломы) и сравнивающей их положение с бортовой картой местности.

Системы технического зрения в автоматических космических миссиях применяются довольно редко. Это связано как с отсутствием достаточно производительных и надежных алгоритмов распознавания изображений, так и с относительно низкой производительностью бортовых вычислителей, недостаточной для реализации имеющихся методов в реальном времени. Однако сейчас методы технического зрения активно развиваются и наряду с этим появляются высокопроизводительные радиационно-стойкие бортовые вычислители, пригодные для их реализации. В этом случае основной проблемой на пути широкого применения систем технического зрения остается сложность решаемой задачи. Именно эту сложность и требуется преодолеть: автоматические станции не должны садиться вслепую. Аппарат должен соотносить показатели наблюдаемой поверхности с результатами других измерений — дальнометрических, инерциальных, радионавигационных, делать на их основе разумные и обоснованные выводы, планировать и реализовывать управление для точной и мягкой посадки в заданную область.

Цель данной работы — разработка алгоритма определения собственного положения лунного посадочного модуля по видеоизображению на основе сравнения наблюдаемого кадра изображения лунной поверхности с бортовой электронной картой в векторном представлении (в виде списка кратеров). Разрабатываемый алгоритм должен быть способен работать в режиме реального времени, в том числе и при небольших искажениях ракурса съемки, а также быть нечувствительным к изменениям условий освещенности из-за различия в положении Солнца.

Методы визуальной навигации. За последние полсотни лет методы визуальной навигации прошли долгий путь развития и совершенствования, и уже появилось их значительное количество [1–5]. Для классификации и оценки применимости этих методов можно использовать следующие классификационные признаки: по типу

используемых датчиков и сенсоров; абсолютному или относительно определению положения; типу используемых признаков; по определяемым параметрам; по мере близости; по стратегии оптимизации; по выбранному математическому аппарату. Ниже будут представлены несколько приведенных методов и их варианты.

По типу используемых датчиков подходы можно подразделить на пассивное видеонаблюдение и на активное дальнометрическое сканирование. Преимущество пассивного видеонаблюдения заключается в том, что применяемые датчики (камеры видимого диапазона) — технически достаточно совершенные устройства, которые легко разместить на посадочном модуле. Они имеют низкую потребляемую мощность, небольшие массу и габариты, а также могут осуществлять навигационные измерения с любой высоты. Однако у пассивных видеокамер есть явный недостаток — они не способны работать в темноте, поскольку им требуется солнечное освещение или источник освещения на посадочном модуле. Большая высота необходима для работы навигации по рельефу (Terrain Relative Navigation, TRN), но тогда подход с искусственным освещением будет непрактичным, а необходимость в солнечном освещении накладывает чрезмерные ограничения на место и время посадки в течение светового дня. В этом случае для алгоритмов определения положения необходимо обеспечить нечувствительность к условиям освещенности, обусловленным различным положением Солнца относительно лунной поверхности [6, 7].

Подходы с активным дальнометрическим сканированием подходят при любых условиях освещения. Кроме того, форма поверхности Луны в этом случае измеряется в явном виде и не требуется алгоритмического восстановления, что очень важно для районов со сложным рельефом. Однако технологии разработки датчиков активной дальнометрии для использования в космосе гораздо менее развиты, и к тому же датчики также имеют ограниченный высотный диапазон.

По типу используемых признаков методы поиска положения кадра на карте можно подразделить на следующие группы [8, 9]:

– *площадные методы* — в качестве признака используются яркости сразу всех точек на изображении;

– *контурные методы* — признаком выступают точки границ и линии контуров;

– *методы ключевых точек* — используются лишь некоторые, особенные точки изображения: угловые точки, точки с локальным экстремумом яркости, точки с высокой кривизной линий контура, центры пятен и специфических объектов;

– *методы с применением специфических объектов* (в качестве признаков используются ударные кратеры и их геометрические параметры).

Каждый из методов и другие методы с соответствующей указанной группой признаков предполагает свои сопоставления, а также имеет определенные преимущества и недостатки, влияющие на степень его применимости для решения задачи визуальной навигации на Луне.

Площадные методы — это методы, при которых в качестве признака для сравнения кадра и карты используются либо яркости сразу всех точек обоих изображений, либо расстояния для активных датчиков. Такое решение позволяет, с одной стороны, применять все доступную информацию на изображении, ничего не отбрасывая, с другой — полностью избежать детектирования более сложных признаков. Процесс поиска по площадным признакам можно условно представить как последовательное прикладывание кадра к карте во всех возможных положениях с расчетом степени схожести наблюдаемого кадра и карты. В качестве меры близости здесь можно выбрать либо минимум суммарного квадратичного отклонения точек кадра от карты (квадратичная ошибка), либо (чаще) максимум взаимно-корреляционной функции кадра и карты. Отсюда произошло еще одно название данной группы методов — корреляционно-экстремальная навигация.

В основе практически всех значимых площадных методов лежит, как правило, *метод спектральной корреляции* [10]. Для определения положения кадра на карте рассчитывается двумерная функция корреляции кадра и карты и ищется ее максимум. Положение найденного максимума является искомым положением кадра на карте. Расчет корреляции обычно проводят в спектральной области с помощью дискретного преобразования Фурье. Такой подход называют спектральной корреляцией.

Существенный недостаток корреляционного подхода — повышенная чувствительность к разным уровням освещенности кадра и карты. Для того чтобы преодолеть этот недостаток, прибегают к различным вариантам нормирования исходных сигналов, а также к методам фазовой и градиентной корреляции. Поскольку корреляция является типовой операцией обработки двумерных сигналов, возможна очень быстрая ее реализация с помощью микросхем FPGA и DSP. Корреляционные подходы не требуют наличия отчетливых ориентиров вблизи места посадки, однако они, как правило, более чувствительны к различиям между данными карты и поверхности, а значит, требуют точной коррекции ракурса съемки.

Несколько примеров практической реализации ряда корреляционных методов приведено ниже.

1. *Бортовая реконструкция изображения для оптической навигации (OBIRON)* представляет собой гибридный метод сравнения признаков и корреляции, разработанный для навигации вблизи астероидов. При этом используются предыдущие полученные изображения

для создания 3D-моделей участков поверхности. Во время посадки 3D-модель визуализируется с учетом текущего солнечного освещения для создания изображений ориентиров. Затем эти ориентиры сопоставляются с изображениями, сделанными во время посадки, чтобы оценить отклонения от текущей оценки положения и ориентации посадочного модуля. OBIRON — это общий знаковый подход, который был протестирован в автономном режиме с помощью изображений, полученных в ходе миссий NEAR и MUSES-C по изучению астероидов.

2. *Корреляция изображения с картой для оценки положения* заключается в том, что изображение спуска сравнивается непосредственно с орбитальным изображением места посадки. Сначала изображение спуска корректируется до тех же масштаба и ориентации, что и карта, а затем фрагмент изображения сопоставляется с картой. Данный подход использовали на земле для наведения крылатых ракет (DSMAC). В научно-исследовательском центре НАСА (JPL) был разработан и протестирован подход, адаптированный к посадке на Луну и Марс, который затем был проверен на снимках с Луны и других тел Солнечной системы. Он также был успешно протестирован с помощью изображений и инерционных измерений во время испытательного полета ракеты-зонда.

3. *Корреляция дальнометрического изображения с цифровой моделью рельефа (DEM)* помогает построить цифровую карту высот из одного или нескольких дальнометрических изображений, полученных во время спуска. Встроенная оценка пространственного положения используется для поворота измерений дальности во фрейм карты для построения карты высот. Затем эта модель рельефа спуска сопоставляется с глобальной картой, предоставленной орбитальными датчиками, для определения местоположения. Такой подход был протестирован с помощью смоделированных изображений Луны.

4. *Корреляция альтиметра и цифровой модели рельефа (DEM)* аналогична подходу, описанному выше, за исключением того, что при спуске DEM сводится к одному столбцу, который заполняется данными высоты с помощью альтиметра. Такой подход применяли для наведения наземных крылатых ракет (TERCOM), а для использования с целью исследования Луны он был протестирован с имитацией альтиметрии.

5. *Последовательная корреляция дальнометрических изображений*, при которой выбираются два дальнометрических изображения и преобразуются с использованием бортовой оценки пространственного положения во фрагменты локальной карты, а затем сопоставляются друг с другом, осуществляется для того, чтобы определилось изменение положения. Данный подход был протестирован на наземных изображениях и реализован на радиационно-стойком микропроцессоре,

пригодном для работы в космосе (RAD 3000). В случае выбора варианта этого подхода, который снижает чувствительность к начальной оценке движения, используется программируемый шаблон сканирования для отображения локальных участков поверхности. Затем получается оценка движения с учетом изменения диапазона нескольких участков поверхности.

Контурные методы помогают находить положение кадра на карте, сравнивая их контуры путем расчета взаимно-корреляционной функции или ее аналога. Контурные методы представляют собой промежуточное звено между корреляционными и ориентирными методами. С одной стороны, они не требуют явного выделения ориентиров и способны работать при любом их количестве (и качестве), с другой — положение точек контура существенно меньше зависит от условий освещенности, нежели в корреляционных методах. Также контурные методы способны работать с векторной картой, элементы которой не зависят от условий освещенности.

Основой контурных методов служат либо варианты контурной корреляции, либо обобщенное преобразование Хафа, позволяющее стянуть точки искомого кадра на карте в одну точку (отклик), положение которой соответствует положению кадра на карте. Таким образом, задача поиска контура кадра сводится к более простой задаче поиска яркой точки-отклика в пространстве откликов.

Методы ключевых точек используют такие детекторы, как SURF, SIFT, FAST, ORB и аналогичные. Большинство из них обеспечивают инвариантность детектирования к масштабу и повороту [11].

Масштабно-инвариантное преобразование признаков (SIFT) — это такой же подход к сопоставлению с образцом, как подход с кратером, за исключением того, что используется другое представление ориентиров, называемое SIFT, разработанное Дэвидом Лоу из Университета Британской Колумбии. Ориентиры SIFT очень общие, поскольку их можно извлечь из изображений, на которых нет кратеров. Такая общность обусловлена некоторой чувствительностью к освещению и углу обзора.

В работах [13, 14] в качестве признаков сопоставления используются сигнатуры формы. Они представляют собой ориентиры поверхности, основанные на локальной форме поверхности, которые можно сопоставлять с образцом для подхода к TRN. Цифровая карта высот (DEM) места посадки обрабатывается для извлечения сигнатур. Во время посадки получают изображения дальности, из которых извлекаются подписи. Затем сигнатуры сопоставляются между DEM и изображением дальности, после чего вычисляются оценка положения и оценка пространственного положения. Спин-изображения в работе [14] были протестированы на наземных изображениях пустынной местности.

Методы сравнения ориентиров основаны на сопоставлении ориентиров вместо корреляции участков [12]. Ориентиры — это места, которые можно надежно извлечь из карты и данных о поверхности. Они имеют определенные характеристики (т. е. шаблон), которые позволяют сравнивать их с другими ориентирами. Для сопоставления можно выбрать не только сами ориентиры, но и относительные расстояния и углы между ними. Ориентирами могут служить угловые точки, точки минимальной и максимальной яркости, а также положения специфических объектов — кратеров, гор, трещин и т. д.

В методах сравнения ориентиров используется следующий типовой процесс. Сначала на основе имеющихся фотоснимков предполагаемого места посадки строится карта ориентиров, характеристики и координаты которых сохраняются в базе данных. Во время посадки ориентиры возникают на кадрах бортовой камеры, после чего сравниваются характеристики наблюдаемых ориентиров и ориентиров на карте. Если их характеристики схожи, то предполагается, что они совпадают. Подход со сравнением характеристик отличается от корреляционных подходов, при которых данные поверхности и карта сравниваются непосредственно друг с другом. Следующий шаг — верификация, когда рассматриваются группы совпадающих ориентиров, чтобы убедиться, что расстояние и углы между ориентирами на карте такие же, как и на кадре. Если это так, то набор совпадений ориентиров геометрически непротиворечив. Следовательно, положение и, возможно, ориентация, посадочного модуля могут быть определены путем сопоставления положения ориентиров на карте с положением ориентиров в данных о поверхности.

Сопоставление по ориентирам, как правило, не требует преобразования карты под текущую освещенность и ракурс съемки, чем выгодно отличаются от корреляционных методов. Однако данная группа методов критически зависит от качества детектирования ориентиров и от их количества в кадре: при малом их количестве (из-за пропуска детектором или физического отсутствия) поиск положения будет невозможен, а при избыточном — катастрофически возрастает время поиска правильного положения.

Методы с использованием детектора кратеров предполагают использование в качестве ориентиров ударных кратеров [16–23]. Кратеры — это достаточно регулярные образования практически на всех типах поверхности Луны. Пример практической реализации этого метода представлен в [16, 17, 21]. Кратеры обнаруживаются на карте места посадки и сохраняются в базе данных. Во время посадки кратеры наблюдаются на снимках спуска и сопоставляются с кратерами в базе данных. Такой подход к оценке положения был протестирован на изображениях Луны, Марса и астероидов. Было отмечено, что при использовании данных миссии «Сближение с околоземным астероидом»

результаты оценки местоположения так же точны, как и результаты, полученные с помощью методов ручной идентификации кратеров. Этот подход можно также применять для локальной оценки местоположения путем обнаружения и отслеживания кратера (кратеров) на нескольких изображениях спуска.

Для детектирования кратеров можно использовать следующие методы:

- контурные — кратер детектируется как окружность или эллипс;
- морфологические — кратер детектируется как близко расположенная пара темных и ярких областей (освещенный и противоположный неосвещенный склон);
- машинного обучения и сети глубокого обучения — описание кратера формируется сетью на основе анализа обучающей выборки неочевидным и сложно формализуемым образом.

Метод сигнатур. Рассмотрим метод, позволяющий определять собственное положение аппарата на основе сравнения наблюдаемых кратеров и кратеров электронной карты. Он предполагает, что кратеры могут быть найдены в кадре в количестве, достаточном для определения положения кадра. Кроме того, этот метод должен обладать возможностью работать в широком диапазоне ракурсов и расстояний, используя ориентиры в виде кратеров. Следует отметить, что в данной статье задача разработки детектора не ставилась, просто был взят детектор с открытым исходным кодом.

Молодые ударные кратеры, которыми изобилует рельеф Луны, относительно схожи, они различаются только размером, глубиной и положением. Но этих характеристик недостаточно для их однозначной идентификации, поэтому ориентиром должны служить не отдельные кратеры, а их группы. Однако здесь возникает проблема: вариантов формирования группы очень много, в связи с чем объем перебора групп резко возрастает. Например, при классическом подходе с использованием троек кратеров количество возможных групп составляет N^3 , где N — количество кратеров в районе посадки, обычно превышающее 1000. Поэтому группа должна формироваться единообразно, в ней не должно быть большого количества вариантов, но при этом она должна быть устойчива к пропуску и ложному обнаружению кратеров, искажениям их характеристик, изменениям высоты и ракурса съемки. Кроме того, необходимо иметь возможность заранее просчитать параметры групп кратеров при наземной подготовке карты, а также возможность компактного хранения и быстрого поиска нужной группы.

Таким образом, метод построения группы кратеров должен отвечать следующим требованиям:

- простота расчета;
- простота поиска группы в базе;

- стабильность, т. е. нечувствительность поисковых характеристик к небольшим изменениям состава группы;
- инвариантность характеристик групп к положению, масштабу, ракурсу съемки;
- различимость, а именно возможность отличить одни группы от других на основе выбранных характеристик.

Описание предлагаемого подхода. Сигнатурой кратера назовем набор из N радиус-векторов, пущенных из центра кратера в центры ближайших соседних кратеров (рис. 1). Сигнатура как характеристика кратера будет обладать определенной инвариантностью: она не изменяется при сдвигах и при поворотах (не изменяются длины радиус-векторов и углы между ними), а при масштабировании сохраняются углы и отношения длины векторов к радиусу кратера. Это позволяет использовать сигнатуру как своего рода ключ для быстрого поиска кратера в базе.

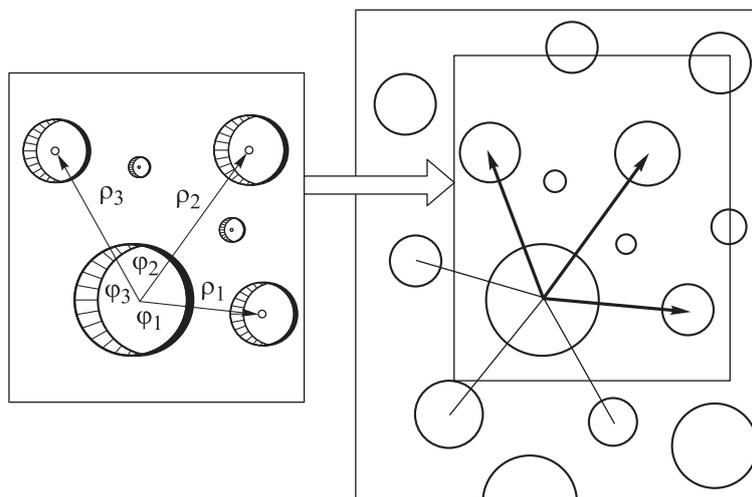


Рис. 1. Метод сравнения сигнатур:
a — кадр; *b* — векторная карта

Поиск положения осуществляется следующим образом. Сигнатуры кратеров на карте рассчитываются заранее и помещаются в базу с индексацией по координатам и радиусу кратера. При получении кадра на нем детектируются кратеры (любым из современных методов, например, с использованием нейросетевого детектора). Среди найденных кратеров отбираются $n = 5 \dots 10$ наиболее крупных и для каждого из них строятся сигнатуры.

Далее проводится поиск в базе кратеров со схожей сигнатурой. В поиске участвуют только те кратеры, которые схожи с текущим по радиусу и находятся в поле зрения. Для них выполняется поэлементное сравнение векторов сигнатуры. Вектора считаются совпавшими,

если они с допустимой погрешностью совпали по направлению, длине и радиусу дочернего кратера. Кратер, давший наибольшее количество совпавших элементов, считается наилучшим кандидатом. Таким образом, на этапе поиска для каждого из n крупных кратеров кадра будет найден наиболее похожий кратер карты.

Следующий этап — верификация совпадений. Найденная пара кратеров и их сигнатуры позволяют найти параметры сдвига, поворота и масштаба кадра относительно карты. Выполнив данные преобразования, можно найти количество совпавших кратеров кадра и фрагмента карты. Верификация нескольких пар кратеров, давших одинаковый сдвиг, выполняется одновременно. Преобразование, которое привело к наибольшему числу совпадений, дало наиболее правдоподобное положение и ориентацию аппарата.

На этапе верификации можно также определить значение угла поворота и масштаб кадра относительно карты. Для этого вычисляются разность углов и разность расстояний до родительского кратера для каждой потенциально совпавшей пары. Масштаб и поворот кадра определяются как медиана этих значений.

Методика оценки качества работы алгоритмов. Целью экспериментов было проверить работоспособность метода сигнатур и возможность его использования при мешающих факторах:

- наличие заранее неизвестного поворота камеры и изменение масштаба из-за неопределенности при расчете высоты съемки;
- неточности определения координат и радиусов кратеров в кадре;
- пропуск кратеров;
- ошибочное детектирование несуществующих кратеров.

Для того чтобы определить эксперименты, генерировалась случайная карта кратеров. Распределение кратеров по координате — равномерное, по радиусу — логарифмическое. Для исследования каждого фактора из сгенерированной карты случайно выбиралось около 200 фрагментов, которые подвергались воздействию изучаемого фактора. После этого алгоритм сигнатур заново отыскивал их положение на карте, и вычислялась ошибка между рассчитанным и реальным положением. Если полученная ошибка превышала порог в 100 точек, фиксировался сбой алгоритма. Пример фрагмента карты и найденное положение кадра показаны на рис. 2.

В экспериментах учитывались следующие особенности:

- при детектировании любой из кратеров может быть с заданной вероятностью пропущен;
- положение и радиус найденного кратера могут быть искажены шумом с заданным распределением;
- возможно ложное срабатывание детектора, генерирующее с заданной вероятностью любые кратеры с произвольными параметрами;
- количество кратеров в кадре может меняться от 3 до 20.

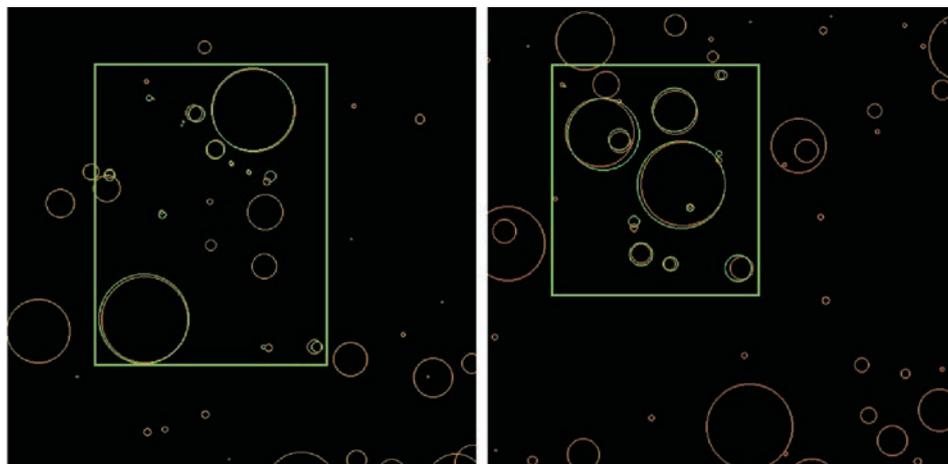


Рис. 2. Примеры работы алгоритма поиска с использованием метода сигнатур

Результаты экспериментов. Пример работы алгоритма при наличии поворота кадра относительно карты представлен на рис. 3, на графике которого видно, что сначала ошибка определения положения равномерно возрастает примерно до $7,5^\circ$, а затем резко увеличивается. Равномерный рост ошибки при малых углах поворота (в левой части графика) обусловлен невозможностью точно сопоставить кратеры кадра и карты при наличии поворота. Эту ошибку можно уменьшить, если проводить дополнительный расчет угла поворота по частично совпавшим кратерам на этапе верификации.

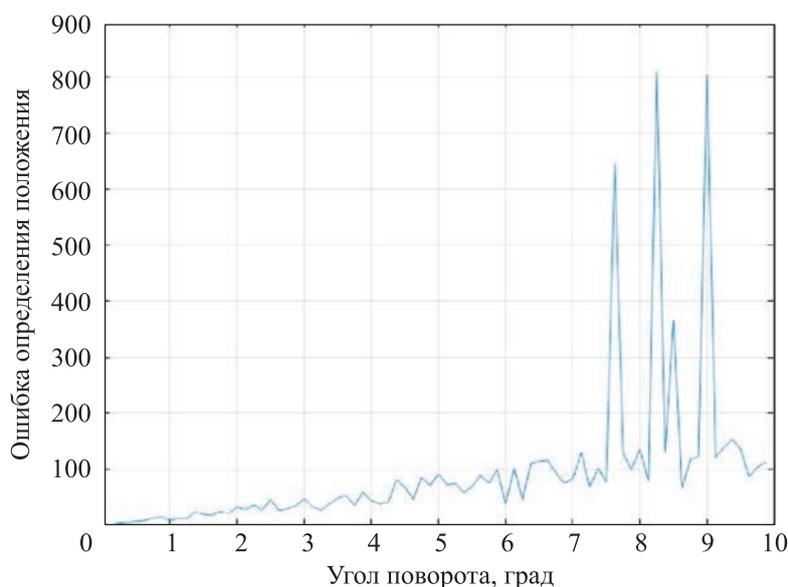


Рис. 3. Исследование влияния угла поворота на определение положения

Скачкообразный рост ошибки в правой части графика показывает невозможность алгоритма найти положение кадра при наличии поворота. Таким образом, критическим углом поворота для данного алгоритма является угол примерно в 7° . Если ошибка определения угла поворота превышает этот угол, то потребуется несколько сопоставлений с перебором возможных углов поворота.

В качестве примера на рис. 4 показано, как работает алгоритм при рассогласовании масштаба кадра и карты. На графике видно, что диапазон масштабов, в которых алгоритм работает без ошибки, составляет от 0,8 до 1,2, а это является вполне приемлемым для рассматриваемой задачи. Так же, как и в случае с поворотом, существует возможность уточнить величину масштаба по частично совпавшим кратерам кадра и карты.

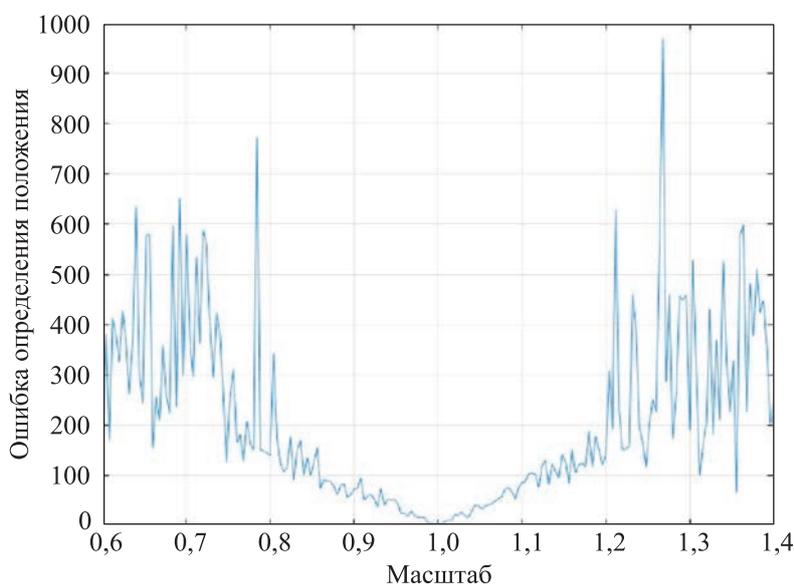


Рис. 4. Исследование влияния масштаба на определение положения

Пример совместного влияния масштаба и поворота на определение положения показан на рис. 5. Изменение масштаба и изменение поворота оказывают суммарный эффект, снижая порог по углу до 4° и по масштабу до 8 %.

На рис. 6 показан пример работы алгоритма при наличии ошибки определения координат кратеров в случае влияния шума. Координаты и радиус кратера искажались на равномерно распределенную величину от 0 до 100 для координат и от 0 до 25 для кратеров. В этом эксперименте генерация ложных кратеров была отключена. Критический уровень шума составил 50 %.

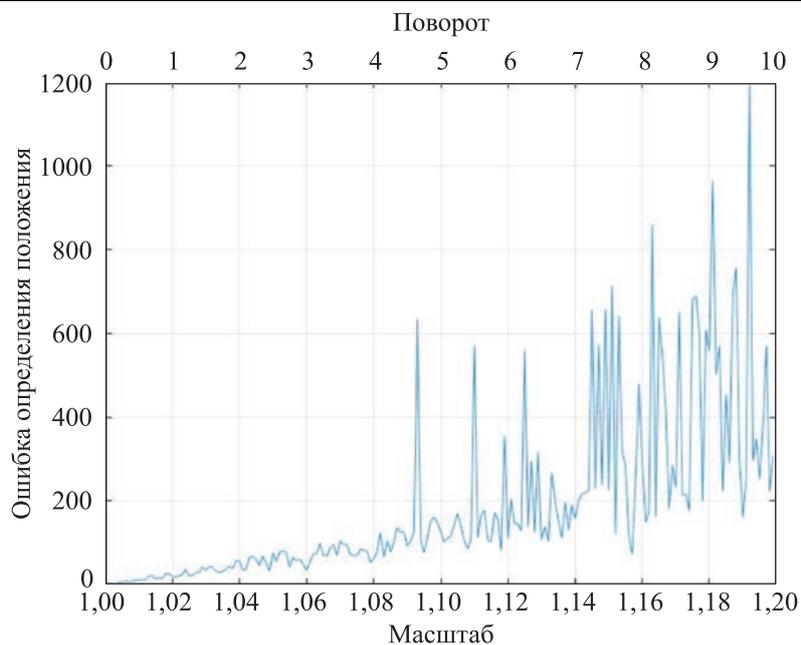


Рис. 5. Исследование совместного влияния масштаба и поворота на определение положения

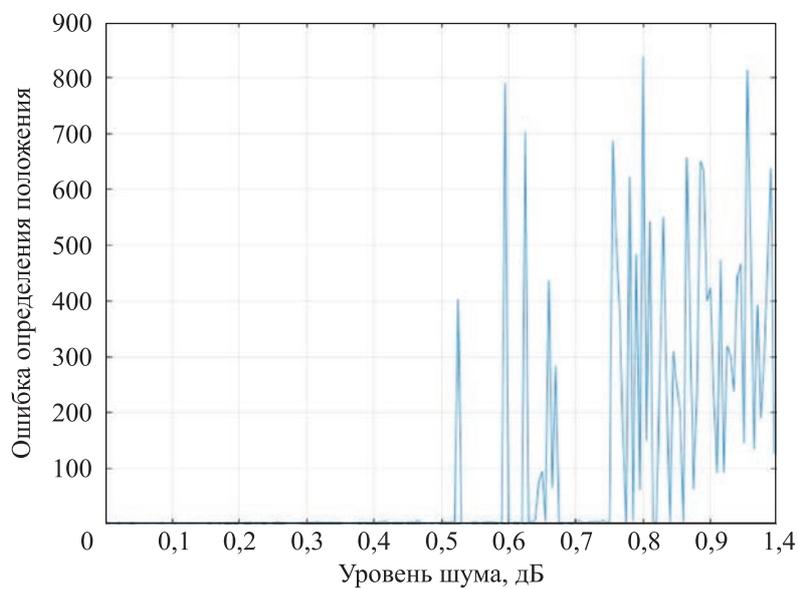


Рис. 6. Исследование влияния шума на определение положения

Вычисленное распределение ошибки определения положения показано на рис. 7. Математическое ожидание ошибки составило 1,5, дисперсия — 2,2, среднее время обработки кадра — 11 мс.

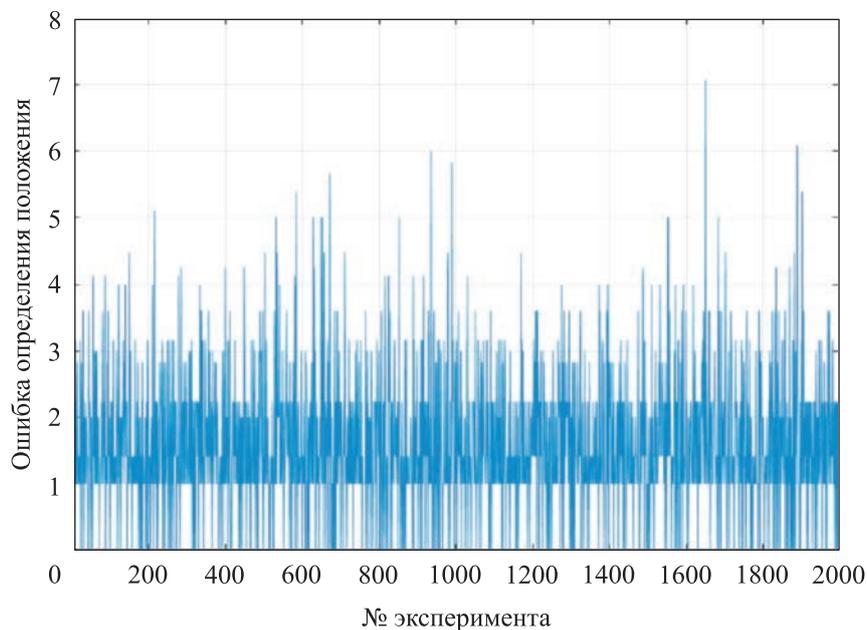


Рис. 7. Исследование точности определения положения

Были также проведены эксперименты с реальными картами лунной поверхности (Robbins-2018), в которых использовались полярные регионы (кратеры фон Карман и Рождественский). Данные области несколько отличаются от сгенерированных существенным преобладанием мелких молодых кратеров на грани видимости, однако полученные результаты были аналогичны.

Таким образом, используя метод сигнатур, можно достичь следующих характеристик. Разработанный алгоритм позволяет устойчиво находить положение кадра на карте даже при пропуске до половины кратеров, искажении положения и радиуса кратеров в пределах 20 %, наличии ложно найденных кратеров (до 25 %). Алгоритм сохраняет работоспособность при воздействии шума и искажений ракурса съемки: уровень шума до 50 %, угол поворота до $7,5^\circ$, изменение масштаба до 20 %. Он позволяет определять не только положение, но и ракурс съемки.

Производительность алгоритма оказалась достаточно высокой — 11 мс на модели в среде MATLAB, однако время поиска кратеров с использованием стандартной библиотеки даже на небольших изображениях составило несколько секунд. Поэтому в данном случае остается открытым вопрос о возможности разработки производительного и надежного детектора кратеров, пригодного для бортовой реализации.

Заключение. В работе представлен новый метод определения собственного положения посадочного модуля по векторной карте местности с использованием метода сигнатур. Этот метод характеризуется приемлемыми скоростью и надежностью, в случае его применения

не требуется актуализация карты, его можно применять в районах со сложными условиями освещенности.

В экспериментах использовали как фрагменты реальных карт полярных районов Луны, так и случайно сгенерированные карты (с учетом вероятности распределения радиусов). При генерации радиус кратеров задавался логарифмической плотностью распределения. Эксперименты показали, что алгоритм сохраняет работоспособность при потере до 25 % кратеров в кадре и искажении размеров остальных как на реальных, так и на сгенерированных картах. Алгоритм, позволяющий находить как положение, так и ориентацию, оказался устойчивым к небольшим геометрическим искажениям. При количестве кратеров во фрагменте карты порядка 1000 алгоритм был способен работать в режиме реального времени, затрачивая менее 1 с на поиск.

Таким образом, выбранный алгоритм, обладающий приемлемыми характеристиками по точности и быстродействию, можно использовать в практических приложениях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Salamuniccara G., Loncaric S. Open framework for objective evaluation of crater detection algorithms with first test-field subsystem based on MOLA data. *Advances in Space Research*, 2008, vol. 42 (1), 1 July, pp. 6–19. DOI: 10.1016/j.asr.2007.04.028
- [2] Carr J.R., Sobek J.S. Digital Scene Matching Area Correlator (DSMAC). In: *Image Processing for Missile Guidance, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1980, 238, pp. 36–41.
- [3] Hu Tao, He Liang. Review of planetary crater detection algorithms (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2020, vol. 26 (5). DOI: 10.16329/j.cnki.zrht.2020.05.018
- [4] Feng Junhua, Cui Hutao. Autonomous crater detection and matching on planetary surface (in Chinese). *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, vol. 31 (9), pp. 1858–1863.
- [5] Li J.F., Cui W., Baoyin H.X. A survey of autonomous navigation for deep space exploration (in Chinese). *Mech. Eng.*, 2012, vol. 34, pp. 1–9.
- [6] Johnson A., Ansar A., Matthies L., Trawny N., Mourikis A.I., Roumeliotis S.I. A general approach to terrain relative navigation for planetary landing. In: *Proc. 2007 AIAA Infotech at Aerospace Conference*, 2007, May, pp. 7–10.
- [7] Woicke S., et al. Comparison of crater-detection algorithms for terrain-relative navigation. In: *2018 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. 2018, pp. 1601. DOI: 10.2514/6.2018-1601
- [8] Ansar A. 2004 small body GN&C research report: Feature recognition algorithms. In: *Small Body Guidance Navigation and Control FY 2004 RTD Annual Report (Internal Document)*. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, no. D-30282 / D-30714, 2004, pp. 151–171.
- [9] Singh L., Lim S. On lunar on-orbit vision-based navigation: Terrain mapping, feature tracking driven EKF. In: *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2008, pp. 6834. DOI: 10.2514/6.2008-6834
- [10] Сырямкин В.И., Шидловский В.С. Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы. Томск, Изд-во Томского университета, 2010, 316 с.

- [11] Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 60 (2), pp. 91–110.
- [12] Maass B., Krüger H., Theil S. An edge-free, scale-, pose- and illumination-invariant approach to crater detection for spacecraft navigation. In: *2011 7th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA)*. Dubrovnik, Croatia, 2011, pp. 603–608.
- [13] Frome A., Huber D., Kolluri R., Bulow T., Malik J. Recognizing Objects in Range Data Using Regional Point Descriptors. In: *Proc. European Conf. on Computer Vision (ECCV)*, 2004. DOI: 10.1007/978-3-540-24672-5_18
- [14] Johnson A., Hebert M. Using Spin Images for efficient multiple model recognition in cluttered 3-D scenes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, vol. 21 (5), pp. 433–449.
- [15] Johnson A.E., Montgomery J.F. Overview of terrain relative navigation approaches for precise lunar landing. In: *2008 IEEE Aerospace Conference*, 2008, pp. 1–10. DOI: 10.1109/AERO.2008.4526302
- [16] Cheng Y., Ansar A. Landmark based Position Estimation for Pinpoint Landing on Mars. In: *Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, 2005, pp. 4470–4475. DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570808
- [17] Cheng Y., Johnson A., Olson C., Matthies L. Optical landmark detection for spacecraft navigation. In: *Proc. 13th Annual AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*. American Astronautical Society, 2003.
- [18] Малинников В.А., Учаев Д.В., Оберст Ю. Методика автоматизированного обнаружения кратеров на поверхности небесных тел по их оптическим изображениям. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотоъемка*, 2012, № 6, с. 12–18.
- [19] Gaskell R. Automated Landmark Identification for Spacecraft Navigation. In: *Proc. AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conf., AAS Paper no. 01-422*. American Astronautical Society, 2001.
- [20] Gaskell R. Determination of landmark topography from imaging data. In: *Proc. AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conf.* Paper no. AAS 02-021, American Astronautical Society, 2002.
- [21] Wetzler P.G., Honda R., Enke B., Merline W.J., Chapman C.R., Burl M.C. Learning to detect small impact craters. In: *Proc. 7th IEEE Wrksp. on Application of Computer Vision*, 2005. DOI: 10.1109/ACVMOT.2005.68
- [22] Kamarudin N., et al. An overview of crater analyses, tests and various methods of crater detection algorithm. *Frontiers in Environmental Engineering*, 2012, vol. 1 (1), pp. 1–7.
- [23] Wang Dong, Xing Shuai. A Planetary Image Based Automatic Impact Crater Extraction Method (in Chinese). *Journal of Astronautics*, 2015, vol. 36 (10), DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.10.010

Статья поступила в редакцию 03.03.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бобков А.В., Сюй Ян. Определение собственного положения лунного посадочного модуля по видеоизображению с использованием метода сигнатур. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 5.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-5-2278>

Бобков Александр Валентинович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: Alexander.Bobkov@bmstu.ru

Сюй Ян — аспирантка кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: xuyang785506380@gmail.com

Signature method for determination of the lunar lander position by video image

© A.V. Bobkov, Xu Yang

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper considers the problem of developing a visual navigation system to determine the proper position of the lunar lander. The paper proposes a new method for comparing the observed image frame with a vector map of the Moon based on the comparison of signatures. Experiments show that the proposed method is able to work in real time, is resistant to lighting conditions, small changes in the camera angle, scale and noise, and is able to work with a large number of gaps and false positives of the crater detector. The proposed method can be used in modern domestic and international space programs for the exploration of the Moon to ensure a soft high-precision safe landing of the lunar lander in a given area of the Moon.

Keywords: visual navigation, automatic landing, precise Moon landing, review and comparison navigation

REFERENCES

- [1] Salamuniccara G., Loncaric S. Open framework for objective evaluation of crater detection algorithms with first test-field subsystem based on MOLA data. *Advances in Space Research*, 2008, vol. 42 (1), pp. 6–19. DOI: 10.1016/j.asr.2007.04.028
- [2] Carr J.R., Sobek J.S. Digital scene matching area correlator (DSMAC). In: *Image Processing for Missile Guidance, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1980, 238, pp. 36–41.
- [3] Hu Tao, He Liang. Review of planetary crater detection algorithms (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2020, vol. 26 (5). <https://doi.org/10.16329/j.cnki.zrht.2020.05.018>
- [4] Feng Junhua, Cui Hutao. Autonomous crater detection and matching on planetary surface (in Chinese). *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, vol. 31 (9), pp. 1858–1863.
- [5] Li J.F., Cui W., Baoyin H.X. A survey of autonomous navigation for deep space exploration (in Chinese). *Mech. Eng.*, 2012, vol. 34, pp. 1–9.
- [6] Johnson A., Ansar A., Matthies L., Trawny N., Mourikis A.I., Roumeliotis S.I.. A general approach to terrain relative navigation for planetary landing. In: *Proc. 2007 AIAA Infotech at Aerospace Conference*, 2007, May, pp. 7–10.
- [7] Woicke S., et al. Comparison of crater-detection algorithms for terrain-relative navigation. In: *2018 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2018, pp. 1601. <https://doi.org/10.2514/6.2018-1601>
- [8] Ansar A. 2004 small body GN&C research report: Feature recognition algorithms. *Small Body Guidance Navigation and Control FY 2004 RTD Annual Report (Internal Document)*. Pasadena, CA, Jet Propulsion Laboratory, no. D-30282 / D-30714, 2004, pp. 151–171.
- [9] Singh L., Lim S. On lunar on-orbit vision-based navigation: Terrain mapping, feature tracking driven EKF. In: *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2008, pp. 6834. <https://doi.org/10.2514/6.2008-6834>
- [10] Syryamkin V.I., Shidlovsky V.S. *Korrelyatsionno-ekstremalnye radionavigatsionnye sistemy* [Correlation-extreme radio navigation systems]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2010, 316 p.

- [11] Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 60 (2), pp. 91–110.
- [12] Maass B., Krüger H., Theil S. An edge-free, scale-, pose- and illumination-invariant approach to crater detection for spacecraft navigation. In: *2011 7th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA)*. Dubrovnik, Croatia, 2011, pp. 603–608.
- [13] Frome A., Huber D., Kolluri R., Bulow T., Malik J. Recognizing objects in range data using regional point descriptors. In: *Proc. European Conf. on Computer Vision (ECCV)*, 2004. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24672-5_18
- [14] Johnson A., Hebert M. Using spin images for efficient multiple model recognition in cluttered 3D scenes. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, vol. 21 (5), pp. 433–449.
- [15] Johnson A.E., Montgomery J.F. Overview of terrain relative navigation approaches for precise lunar landing. In: *2008 IEEE Aerospace Conference*, 2008, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1109/AERO.2008.4526302>
- [16] Cheng Y., Ansar A. Landmark based position estimation for pinpoint landing on Mars. In: *Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, 2005, pp. 4470–4475. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570808>
- [17] Cheng Y., Johnson A., Olson C., Matthies L. Optical landmark detection for spacecraft navigation. In: *Proc. 13th Annual AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*. American Astronautical Society, 2003.
- [18] Malinnikov V.A., Uchaev D.V., Oberst Yu. Metodika avtomatizirovannogo obnaruzheniya kraterov na poverkhnosti nebesnykh tel po ikh opticheskim izobrazheniyam [Technique for automated detection of craters on the surface of celestial bodies from their optical images]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka — Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2012, no. 6, pp. 12–18.
- [19] Gaskell R. Automated landmark identification for spacecraft navigation. In: *Proc. AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conf., AAS Paper no. 01-422*. American Astronautical Society, 2001.
- [20] Gaskell R. Determination of landmark topography from imaging data. In: *Proc. AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conf.* American Astronautical Society, 2002, Paper no. AAS 02-021.
- [21] Wetzler P.G., Honda R., Enke B., Merline W.J., Chapman C.R., Burl M.C. Learning to detect small impact craters. In: *Proc. 7th IEEE Wrksp. on Application of Computer Vision*, 2005. <https://doi.org/10.1109/ACVMOT.2005.68>
- [22] Kamarudin N., et al. An overview of crater analyses, tests and various methods of crater detection algorithm. *Frontiers in Environmental Engineering*, 2012, vol. 1 (1), pp. 1–7.
- [23] Wang Dong, Xing Shuai. A planetary image based automatic impact crater extraction method (in Chinese). *Journal of Astronautics*, 2015, vol. 36 (10). <https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2015.10.010>

Bobkov A.V., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: Alexander.Bobkov@bmstu.ru

Xu Yang, Postgraduate, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: xuyang785506380@gmail.com