

Задача создания построителей местной вертикали высокой точности и навигационных систем на основе визирования линии горизонта

В.А. Гришин

*Институт космических исследований Российской академии наук,
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32,
e-mail: vgrishin@iki.rssi.ru*

В статье поставлена задача создания построителей местной вертикали высокой точности и навигационных систем на основе визирования линии горизонта для летательных аппаратов. Указанные задачи в настоящее время решаются для робототехнических систем, перемещающихся по поверхности Земли или иных планет. Навигационные системы на основе визирования линии горизонта для авиационного применения сейчас находятся в стадии исследований. Возможно применение таких систем и для решения задач навигации космических аппаратов в случаях, когда требуется высокая точность, а самое главное — устойчивость к попыткам подавления средств навигации. Отмечены проблемы, которые возникают при разработке указанных систем.

Ключевые слова: построители местной вертикали, изображение линии горизонта, профилометрическая информация, корреляционно-экстремальные методы навигации.

Введение

В связи с развитием систем дистанционного зондирования Земли высокого разрешения (детального оптикоэлектронного наблюдения поверхности Земли) с высокоточной топографической привязкой получаемых изображений, а также для решения задач прицельной съемки заданных объектов с высоким разрешением, возникает необходимость существенного повышения точности и надежности определения текущего положения космического аппарата (КА) и его угловой ориентации. Рассмотрим возможности решения этой задачи при использовании информации о наблюдаемой форме линии горизонта.

Измерение местной вертикали

Известные оптические построители местной вертикали широко используются в космических аппаратах на высотах приблизительно от 200 до 36 000 км и более. Точность таких измерителей имеет порядок 1...10 угл.мин. В качестве примера можно привести приборы, изготавливаемые ОАО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна» (http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=77:7201&catid=37:spaceprograms&Itemid=62), изделия фирмы Sodern, Франция, http://www.sodern.com/sites/docs_wsw/RUB_52/STD15.pdf, http://www.sodern.com/sites/docs_wsw/RUB_52/STD16.pdf). Для перспективных систем высокой точности и высокого разрешения желательное повысить точность измерений местной вертикали до величин порядка 0,05–0,3 угл.мин.

Следует отметить, что для работы обычных построителей вертикали используется ИК-диапазон электромагнитных волн, на отдельных участках которого происходит заметное поглощение и излучение атмосферных газов, в частности паров воды. При этом построитель вертикали обнаруживает контраст яркости между различными слоями атмосферы, т. е. для построения местной вертикали используется не изображение края Земли, а линия контраста между слоями атмосферы (Phenneger et al., 1985; Тучин и др., 2011). Визирование реального

профиля поверхности Земли, известного с достаточно высокой точностью, позволяет повысить точность измерений. Однако при этом возникают проблемы, связанные с поглощением и рассеиванием излучения в атмосфере и соответственно, с распознаванием видимой линии горизонта.

Известно большое количество датчиков горизонта, используемых для решения задач угловой стабилизации беспилотных летательных аппаратов (ЛА). Указанные датчики анализируют в режиме реального времени изображение линии горизонта в видимом или ИК диапазоне и оценивают углы тангажа и крена летательного аппарата. В качестве примера можно привести работу (Cornall, Egan, 2004). Однако, точность указанных датчиков совершенно неудовлетворительна. В работах (Gupta, Brennan, 2007, 2008) используется изображение линии горизонта и цифровая карта профиля местности для коррекции ошибок угловой ориентации инерциальной навигационной системы, установленной на мобильном роботе (автомобиле). Для синтеза изображения линии горизонта используется оценка текущих координат на основе данных от GPS и инерциальной навигационной системы. Однако заявленная точность указанной коррекции существенно хуже требуемых 0,05...0,3 угл.мин.

Навигация на основе высокоточных датчиков звездной ориентации, местной вертикали и точных бортовых часов

Помимо повышения точности измерения местной вертикали весьма актуальной является задача создания автономных систем определения орбиты КА на основе высокоточных датчиков звездной ориентации, местной вертикали и точных бортовых часов. Дело в том, что широко используемые в настоящее время системы определения положения КА на основе GPS/ГЛОНАСС очень уязвимы для активных помех. Это объясняется большим расстоянием до навигационных спутников и малой мощностью их бортовых передатчиков. Указанное обстоятельство позволяет легко блокировать работу навигационных приемников на значительных площадях (что неоднократно подтверждено практически). Причем, если маскирующие помехи способны просто сделать невозможным измерение текущих координат, то имитирующие помехи способны создать контролируруемую ошибку измерения текущих координат. Уязвимость приемников системы GPS, установленных на беспилотных ЛА, отмечается в отчете (Operating..., 2011). Возможности создания имитационных помех экспериментально исследованы в статье (Tirrenhauer et al., 2011). Есть некоторые основания предполагать, что новейший секретный беспилотный ЛА RQ-170 был потерян американцами в Иране под воздействием имитирующих помех, обеспечивших посадку аппарата на территории Ирана. Повышение устойчивости бортовых приемников к искусственным помехам недопустимо ухудшает массогабаритные характеристики навигационных приемников.

Автор не располагает информацией, свидетельствующей об экспериментах по подавлению систем GPS/ГЛОНАСС для КА, однако возможность такого подавления не подлежит никакому сомнению. Подавление спутниковых навигационных систем может быть реализовано для заданных целей (спутников или самолетов), пролетающих над обширной территорией.

При этом все остальные потребители смогут пользоваться системами GPS/ГЛОНАСС в нормальном режиме без каких-либо ограничений (рис. 1). Стоимость разработки и изготовления подобной системы одновременного прицельного подавления заданного количества приемников GPS/ГЛОНАСС весьма невелика.

При использовании автономных систем определения орбиты КА и построения местной вертикали достигается как повышение надежности навигации (в случае подавления систем GPS/ГЛОНАСС активными помехами с Земли) так и её точности за счет комплексирования информации в случае, когда бортовые приемники систем GPS/ГЛОНАСС функционируют штатно.

Упомянутые выше автономные навигационные системы на основе высокоточных датчиков звездной ориентации, местной вертикали и точных бортовых часов могут быть реализованы также для пилотируемых и беспилотных ЛА в атмосфере Земли. На больших высотах (10 км и выше) возможно круглосуточное наблюдение звездного неба. На меньших высотах на функционирование таких систем накладываются ограничения, связанные с видимостью звездного неба (облачность, рассеивание солнечного излучения в атмосфере, маскирующее излучение звезд). Подавить такую навигационную систему крайне сложно (если вообще возможно). Работы в этом направлении сейчас ведутся, в частности в Optical Physics Company, Калифорния (<http://opci.com/ocns.htm>). В настоящее время создан прототип прибора. Насколько можно судить по имеющимся данным, использование профилиметрической информации в данном проекте не предусматривается. Поэтому точность системы ограничена.



Рис. 1. Прицельное подавление заданных целей с помощью постановщика помех, формирующего необходимое количество лучей

Навигация на основе наблюдаемой формы линии горизонта

Уже около 50 лет успешно применяются методы корреляционно-экстремальной навигации по естественным геофизическим полям. Основной вклад в развитие этого направления в Советском Союзе сделали академик Красовский А.А., профессора Белоглазов И.Н., Тарасенко В.П., а также их ученики и коллеги. Классическим примером корреляционно-экстремальной профилиметрической навигационной системы является система Terrain Contour Matching (TERCOM). Она описана, например, в книге (Siouris, 2004). Эта система успешно используется на протяжении многих десятилетий. Широкое использование рельефа поверхности для задач навигации обусловлено тем, что рельеф поверхности достаточно стабилен и на результаты измерений слабое влияние оказывают сезонные изменения (например, образование снежного покрова). Для измерения рельефа обычно используются радиолокационные средства — высотомеры (наклонные дальномеры) а также лазерные сканеры.

Однако необходимо отметить, что профиль поверхности вдоль некоторой замкнутой линии можно получить и без лазерного сканера (или радиолокационного высотомера), а имен-

но — чисто пассивными средствами. При этом используется тот факт, что видимая форма линии горизонта жестко связана с текущими координатами летательного аппарата. Отличие состоит лишь в том, что в системе TERCOM используется профиль поверхности по трассе полета (обычно используются участки длиной порядка 8 км), а в данном случае используется профиль поверхности по некоторой замкнутой линии достаточно большого радиуса, окружающей ЛА.

Следует отметить, что в уже рассмотренных задачах построение местной вертикали по результатам визирования линии горизонта осуществляется с малыми вычислительными затратами в случае, когда текущее положение камеры известно с высокой точностью. Если же точность определения текущего положения камеры невелика, то положение камеры должно быть предварительно уточнено путем решения навигационной задачи. В этом случае вся область неопределенности положения КА или ЛА (в общем случае в пространстве шести измерений) покрывается дискретной сеткой, для каждого узла которой производится синтез эталонного изображения. Текущее положение КА определяется по тому эталону, который оказался наиболее близким к наблюдаемой форме линии горизонта. Очевидно, что вычислительные затраты в последнем случае значительно возрастают.

В работах (Talluri, Aggarwal, 1993; Cozman et al., 2000; Oiri et al., 2010) рассмотрена возможность навигации по изображению линии горизонта. В работе (Rushant, Spacek, 1998) предлагается для навигации использовать наборы особенностей (features) на линии горизонта. Такой подход существенно ускоряет решение навигационной задачи, но снижает надежность и точность навигации. Следует отметить, что хотя эксперименты подтвердили возможность навигации по изображению линии видимого горизонта, указанные эксперименты проводились для наземных роботов. Это существенно, поскольку в этом случае расстояние до линии горизонта имеет величину порядка 3...5 км, и особых проблем с видимостью линии горизонта, как правило, не возникает. Однако, при размещении камеры на борту летательного аппарата величина расстояния до линии горизонта существенно возрастает, что существенно уменьшает контраст этой линии, разделяющей изображение Земли и неба. Это требует использования ИК-камер и существенного совершенствования алгоритмов сопоставления эталонных и реальных изображений линии горизонта. Кроме того, на больших расстояниях отдельного анализа требует оценка влияния нестабильности оптической атмосферной рефракции на точность измерений.

Информационное обеспечение

Для реализации построителей вертикали и решения навигационных задач принципиальное значение имеет наличие профилиметрической информации. Профиль поверхности Земли известен достаточно хорошо. Большой объем такой информации был получен в результате осуществления миссии Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), выполненной в 2000 г. Абсолютная ошибка полученных карт по высоте не превышает 10 м, абсолютная ошибка в плане не превышает 15 м. Профилиметрические данные имеются также для Луны и Марса. Горизонтальное разрешение этих карт — 50...100 м, вертикальное — 0,1...1 м (Carle et al., 2010). Поскольку профиль поверхности известен для Земли, Луны и Марса, то и навигация возможна в окрестности этих планет и спутника Земли.

Выбор спектрального диапазона

Выбор рабочего диапазона длин волн камеры также является сложной задачей, особенно при наличии атмосферы. Должен быть обеспечен достаточный контраст изображения

линии горизонта при всех условиях наблюдения, вне зависимости от сезона, времени суток, азимута наблюдения линии горизонта. Нетрудно подсчитать, что при высоте полета 10 км расстояние до линии горизонта будет порядка 356,7 км. При такой длине оптической трассы очень важную роль играют атмосферные аэрозоли, на которых происходит рассеивание света. Если рассматривается построение вертикали для КА, то линия горизонта должна наблюдаться сквозь всю толщину атмосферы.

Влияние молекулярного рассеивания пренебрежимо мало в ИК-диапазоне. Влияние поглощения излучения атмосферными газами можно свести к приемлемой величине выбором подходящего диапазона в пределах одного из окон прозрачности атмосферы. Использование соответствующего участка ИК-диапазона позволяет существенно уменьшить влияние времени суток на работу системы (поскольку собственное тепловое излучение Земли становится сопоставимым с величиной излучения Солнца, отраженной поверхностью Земли). Отрицательное влияние атмосферных аэрозолей с малым размером частиц (порядка длины волны излучения и меньших) также заметно уменьшается в ИК-диапазоне. Однако ИК-камеры имеют пониженное разрешение (в зависимости от рабочего диапазона длин волн). Были сделаны предварительные оценки видимости линии горизонта **при отсутствии дождя, облаков и тумана**. Учитывалось рассеивание на атмосферных аэрозолях. При этом для ЛА, летящего на высоте 10 км, в диапазоне 2,02...2,4 мкм при пороговой контрастности не менее 2 % линия горизонта визируется в течение порядка 20 ч. Для КА при высоте полета 300 км получены сходные результаты. Как и следовало ожидать, контраст линии горизонта весьма невелик. Кроме того, приблизительно 50 % площади Земли покрыто облаками, что делает невозможным наблюдение линии горизонта. Указанные проблемы полностью снимаются при решении навигационных задач на Луне (атмосфера отсутствует). На Марсе атмосфера существенно менее плотная, чем на Земле, поэтому условия наблюдения линии горизонта должны быть существенно лучше.

Конструкция камеры

При создании камеры соответствующего диапазона волн основной проблемой является получение достаточно высоких метрологических характеристик. Для получения снимка всего горизонта требуется поле зрения несколько большее, чем 180° при размещении камеры на борту атмосферного ЛА и несколько меньше 180° при размещении датчика на борту КА. Следует отметить, что камера для КА оказывается по конструкции проще, так как в вакууме нет необходимости использовать прозрачный обтекатель. Для получения большого поля зрения могут быть использованы камеры с объективами типа fish-eye («рыбий глаз»). Однако такие объективы, как правило, имеют значительную дисторсию. Широкое применение находят зеркально-линзовые катадиоптрические всенаправленные камеры (catadioptric omnidirectional camera) с различными профилями поверхности зеркал, например — (Gutin et al., 2006) и др. Точность изготовления такого зеркала, а также ошибки юстировки оказывают очень сильное влияние на метрологические характеристики камеры и, следовательно — ошибки всей системы. Существенно более простым решением является использование нескольких камер с перекрывающимся полем зрения, охватывающим весь горизонт. В этом случае требуется точная привязка к системе координат прибора всех используемых камер.

В настоящее время светочувствительные матрицы позволяют получить в спектральном диапазоне 8...12 мкм изображение размером 640×480 пикселей (Волков и др., 2001; Gutin et al., 2006), а в более коротковолновом диапазоне — 0,5...5,4 мкм изображения размером 1024×1024 и даже 2048×2048 пикселей.

Алгоритмическое обеспечение

Алгоритмы, которые обеспечивают решение задачи построения местной вертикали и навигации, можно разделить на три группы. Во-первых, это алгоритмы синтеза эталонных изображений линии горизонта для произвольного положения КА или ЛА. Во-вторых, это алгоритмы предварительной обработки изображений, поступающих от камер, выделяющих линию горизонта. В-третьих, это алгоритмы корреляционно-экстремальной навигации по изображению линии горизонта (рис. 2).



Рис. 2. Алгоритмическое обеспечение навигационных систем

Основной проблемой, особенно для решения навигационной задачи, является синтез эталонных изображений, который должен осуществляться с высокой скоростью в реальном времени для сетки возможных положений КА (ЛА), покрывающей область неопределенности. Известные методы компьютерной графики имеют удовлетворительную скорость синтеза изображений (десятки-сотни кадров в секунду), однако точность синтеза изображений совершенно неприемлема. А именно, значительное сокращение вычислительных затрат в алгоритмах компьютерной графики достигается как раз за счет потерь точности синтеза наиболее удаленных объектов, к которым и относится линия горизонта. Более того, уравнения, описывающие формирование изображений во всенаправленных камерах существенно сложнее, чем в обычных камерах (pin-hole camera model), что повышает вычислительную сложность.

Алгоритмы предварительной обработки изображений должны обеспечить наиболее эффективную работу корреляционно-экстремальных алгоритмов. Проблемой при этом является то, что локальные вариации яркости поверхности Земли могут существенно превосходить контраст между областями изображения поверхности Земли и неба. Аналогично, облака могут давать заметные вариации яркости неба, превышающие контраст между областями изображения неба и поверхности. Этот контраст и яркость могут существенно изменяться в зависимости от времени суток, направления визирования горизонта и высоты полета. Существенно снижает контраст наличие в атмосфере различных аэрозолей (линия горизонта размывается). Известные алгоритмы (Cornall, Egan, 2004; Minwalla et al., 2011) предназначены для выделения линии горизонта на реальном изображении для сравнительно небольших высот (а, следовательно, и дальностей до линии горизонта), характерных для легких беспилотных ЛА.

В качестве алгоритмов определения текущих координат предполагается использовать поисковые корреляционно-экстремальные алгоритмы. Поскольку контраст линии горизонта (вид Земли на фоне неба) может быть очень мал (2...5 %), то для процесса установления соответствия необходимо использовать оптимальные или близкие к оптимальным статистические алгоритмы распознавания и измерения.

Заключение

В статье рассмотрены возможности повышения точности навигации и угловой ориентации КА и атмосферных ЛА путем использования информации о форме наблюдаемой линии горизонта при использовании информации о профиле поверхности Земли, Марса, Луны. Отмечена высокая стойкость указанных систем к преднамеренным помехам.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 12-08-00863-а.

Литература

1. Волков В.Г., Ковалев А.В., Федчишин В.Г. Тепловизионные приборы нового поколения // Специальная техника. 2001. № 6. С. 16–21 (начало); 2002. № 1. С. 18–24, 26.
2. Тучин М.С., Захаров А.И., Прохоров М.Е. Определение геовертикали по наблюдению лимба Земли // 2-я Всерос. научно-технич. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космич. аппаратов»: Сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 100–110.
3. Carle P., Furgale P., Barfoot T. Long-Range Rover Localization by Matching LIDAR Scans to Orbital Elevation Maps // J. Field Robotics. 2010. V. 27. Iss. 3. P. 344–370.
4. Cornall T., Egan G. Measuring Horizon Angle from Video Onboard a UAV // Proc. IEEE Intern. Conf. Autonomous Robots and Agents. Palmerston North, New Zealand. 2004. P. 339–344.
5. Cozman F., Krotkov E., Guestrin C. Outdoor Visual Position Estimation for Planetary Rovers // Autonomous Robots. 2000. V. 9. N. 2. P. 135–150.
6. Gupta V., Brennan S. Vehicle State Estimation Using Vision and Inertial Measurements // 5th IFAC Symp. Advances in Automotive Control. Monterey Coast. CA. 2007.
7. Gupta V., Brennan S. Terrain-Based Vehicle Orientation Estimation Combining Vision and Inertial Measurements // J. Field Robotics. 2008. V. 25. Iss. 3. P. 181–202.
8. Gutin M., Tsui E., Gutin O., Wang X.-M., Gutin A. Automatic Thermal Infrared Panoramic Imaging Sensor // Report of Applied Science Innovations. 2006.
9. Minwalla C., Watters K., Thomas P., Hornsey R., Ellis K., Jennings S. Horizon Extraction in an Optical Collision Avoidance Sensor // Proc. 24th Canadian Conf. Electrical and Computer Engineering. Niagara Falls. Ontario. 2011. P. 210–214.
10. Oiri A., Nagatani K., Yoshida K. Global positioning for Planetary Rovers based on Panoramic Skyline Image // Proc. 2010 JSME Conf. Robotics and Mechatronics. Japan. 2010.
11. Operating Next-Generation Remotely Piloted Aircraft for Irregular Warfare: Report of United States Air Force Scientific Advisory Board. SAB-TR-10-03. 2011.
12. Phenneger M., Singhal S., Lee T., Stengle T. Infrared Horizon Sensor Modeling for Attitude Determination and Control: Analysis and Mission Experience. Washington, D.C.: Books LLC, 1985. 470 p.
13. Rushant K., Spacek L. An Autonomous Vehicle Navigation System using Panoramic Machine Vision Techniques // Proc. Intern. Symp. Intelligent Robotic Systems ISIRS'98. 1998.
14. Siouris G. Missile Guidance and Control Systems. N. Y.: Springer-Verlag, 2004. 666 p.
15. Talluri R., Aggarwal J. Image/Map Correspondence for Mobile Robot Self-Location Using Computer Graphics // IEEE Trans. PAMI. Special Issue on 3D Modeling in Image Analysis and Synthesis. 1993. V. 15. N. 6. P. 597–601.
16. Tippenhauer N., Pöpper C., Rasmussen K., Capkun S. On the Requirements for Successful GPS Spoofing Attacks // Proc. 18th ACM Conf. Computer and Communications Security (CCS'11). Chicago. Illinois. 2011. P. 75–86.

Development of High Precision Earth Sensors and Navigation Systems based on Horizon Line Observation

V.A. Grishin

*Space Research Institute
117997, Moscow, Profsoyuznaya, 84/32,
e-mail: vgrishin@iki.rssi.ru*

Development of high-precision earth sensors and navigation systems based on horizon line observation is discussed in this article. Such systems are developing for the mobile robots and planet rovers. As for aerial vehicles, the similar systems development is on the stage of investigation. The possible area of horizon-based high precision earth sensors and navigation systems is high resolution observation and reconnaissance satellites. High resistance to jamming is inherent to such navigation systems. Some problems which prevent to develop such navigation systems are marked in this article. **Keywords:** Earth sensors, horizon line image, digital elevation maps, correlation-extremal navigation systems.