

Расчетная оценка суточных вариаций местной вертикали, построенной по результатам наблюдения видимой линии горизонта

В. А. Гришин

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: vgrishin@iki.rssi.ru

Видимая в различных участках оптического диапазона линия горизонта используется для решения навигационных задач. В частности, по линии горизонта определяется местная вертикаль, которая в сочетании со звездными датчиками используется для расчета широты и долготы. При этом необходимо различать два случая. В первом случае линия горизонта формируется вследствие контраста между Землей и атмосферой. Это возможно, если затухание и рассеивание излучения в атмосфере не слишком велики. Во втором случае затухание и рассеивание излучения в атмосфере настолько велики, что делают невозможным наблюдение линии, разделяющей изображение Земли и неба. И в этом случае то, что мы воспринимаем как линию горизонта, формируется вследствие контраста между различными слоями атмосферы. Указанный контраст является результатом достаточно сложных процессов распространения излучения Солнца в атмосфере Земли, поглощения и рассеивания этого излучения, а также отражения излучения от поверхности Земли. В ИК-диапазонах добавляется также собственное излучение Земли. Перемещение Солнца, как мощного источника излучения, по небосводу в течение суток оказывает влияние на все эти процессы. Для их анализа рассчитывались потоки излучения для различных азимутов и углов места. По результатам расчетов определялось положение линии горизонта как точки, в которой вертикальный контраст достигает экстремальных значений. По 36 направлениям по азимуту определялась ориентация местной вертикали для различных моментов времени в течение суток, на разных высотах и разных участках оптического диапазона.

Ключевые слова: изображение линии горизонта, затухание и рассеивание света в атмосфере, влияние движения Солнца на оценку местной вертикали.

Введение

Датчики местной вертикали находят достаточно широкое применение. Во-первых, это системы ориентации космических аппаратов. Обычно такие датчики работают в ИК-диапазоне (Phenneger et al., 1985). Во-вторых, это беспилотные летательные аппараты, где местная вертикаль определяется по линии горизонта и используется, в основном, для решения задач угловой стабилизации аппаратов (Cornall, Egan, 2004; Shabayek et al., 2012; Nogiuchi, 2009; Demonceaux, Vasseur, Pegard, 2006). Ведутся разработки и в области решения навигационных задач для беспилотных летательных аппаратов с использованием изображения видимой линии горизонта (Sabatini et al., 2012). Проводились также эксперименты по использованию датчика горизонта для коррекции ухода осей инерциальных навигационных систем мобильных объектов, перемещающихся по поверхности Земли, а также для решения задач навигации по форме линии горизонта на Марсе и Луне (Cozman, Krotkov, Guestrin, 2000; Gupta, Brennan, 2007, 2008; Oiri, Nagatani, Yoshida, 2010). Фирма Optical Physics Company, Калифорния, США (<http://opci.com/ocns.htm>) ведет разработку системы навигации, использующей датчик горизонта для построения местной вертикали и звездный датчик. Такая система навигации

может быть установлена на широкий круг летательных аппаратов, для которых критически важным требованием является высокая устойчивость к искусственным помехам.

Влияние условий наблюдения на формирование видимой линии горизонта

Основной проблемой при использовании датчиков местной вертикали, работающих по изображению линии горизонта, на борту летательных аппаратов является поглощение и рассеивание электромагнитных волн в атмосфере при очень больших длинах оптических трасс. В работах (Гришин, 2013; Маслов, Гришин, 2013) показано, что наиболее перспективными диапазонами для наблюдения линии горизонта на больших дистанциях являются диапазоны 2,0-2,4 мкм днем и 3,05-4,17 и 4,44-5,05 мкм круглосуточно. В этом случае возможна работа системы как в режиме корреляционно-экстремальной навигации по профилю поверхности Земли, так и в режиме оценки местной вертикали. При полете над океаном возможна только оценка местной вертикали. Однако, использование указанных диапазонов сопряжено с рядом проблем. В частности, это необходимость охлаждения матриц до достаточно низких температур, невысокое по сравнению с видимым диапазоном разрешение матриц, высокая стоимость, габариты и вес. Все это стимулирует исследования возможностей работы приборов в видимом и ближнем ИК-диапазонах (Тучин, Захаров, Прохоров, 2011). Одной из возможных прикладных областей использования таких датчиков являются наноспутники (Meller, Sripruetkiat, Makovec, 2000).

При этом даже на сравнительно небольших высотах вследствие аэрозольного поглощения и рассеивания прибор уже не способен фиксировать реальный горизонт как линию, отделяющую изображение Земли от изображения неба. Прибор способен фиксировать линию максимального градиента яркости, которая и принимается за линию горизонта. Однако эта линия не имеет отношения к поверхности Земли а лишь только к процессам распространения излучения в рассеивающей и поглощающей среде - атмосфере Земли. Тем не менее, с точки зрения практических задач представляет несомненный интерес оценка точности измеренной таким способом вертикали. Одним из факторов, влияющих на ошибки измерений, является в этом случае положение мощного источника света - Солнца и его перемещение в течение суток. Целью работы является оценка степени этого влияния.

Методика проведения эксперимента

Оценка ошибок измерения местной вертикали производилась для разных высот полета летательного аппарата в семи спектральных диапазонах. Дополнительно к трем диапазонам 2,0-2,4 мкм, 3,05-4,17 и 4,44-5,05 мкм, рассмотренным ранее в работах (Гришин, 2013; Маслов, Гришин, 2013), были рассмотрены еще четыре диапазона, а именно: 0,762–0,783 мкм, 0,859–0,876 мкм, 0,911–0,959 мкм и 0,58–1,2 мкм. Эти диапазоны соответствуют полосам пропускания светофильтров, с которыми производилась съемка линии горизонта над морем в Крыму. Диапазон 0,762–0,783 мкм включает в себя одну из слабых полос поглощения кислорода воздуха, а диапазон 0,911–0,959 мкм приблизительно соответствуют полосе поглощения водяных паров. В диапазоне 0,859–0,876 мкм нет заметных полос поглощения атмосферных газов. Диапазон 0,58–1,2 мкм - это диапазон светофильтра Meade Red. Этот светофильтр не пропускает синюю часть спектра, которая сильно рассеивается в атмосфере и не несет полезной информации. Расчеты были сделаны для разных высот, в том числе для высоты в 374 м (высота точки съемки горизонта над морем). Местная вертикаль определялась для точки с координатами 44,413° с.ш. и 33,991° в.д. и положения Земли относительно Солнца по состоянию на 9 мая. Для исключения влияния азимутальных вариаций альбедо поверхности Земли для всех азимутов оно было задано одинаковым и равным альбедо океана.

Кроме того, был сделан контрольный расчет для высоты 30 м. При такой высоте расстояние до горизонта не превосходит метеорологической дальности видимости, которая для хороших условий наблюдения принимается равной 23 км. При этом для всех диапазонов (кроме, может быть, диапазона 0,911–0,959 мкм) горизонт должен хорошо наблюдаться и результаты измерения в разных диапазонах должны быть близкими.

При суточном движении Земли конец вектора оценки местной вертикали описывает достаточно сложную кривую, имеющую различный вид в разных участках оптического диапазона длин волн. Оценивалось максимальное отклонение вектора оценки местной вертикали от точного направления. Для этого в течение суток с шагом в 1 час рассчитывались профили яркости в вертикальном направлении в пределах $\pm 6^\circ$, отсчитываемых от направления на горизонт с шагом $0,1^\circ$ (φ_i , $i=1\dots 120$). Профили яркости рассчитывались для 36 направлений по азимуту (с шагом 10°).

Можно показать, что с вполне приемлемой погрешностью оценку отклонения местной вертикали β можно определить по приближенной формуле:

$$\beta \approx \sqrt{B^2 + C^2},$$

где B и C определяются как коэффициенты перед синусом и косинусом в тригонометрической аппроксимации зависимости угла φ^* направления на экстремум яркости по углу

места как функции от угла азимута. Т. е. используется только первая гармоника соответствующего ряда Фурье. Погрешность формулы возрастает с высотой и достигает 1,5% на высоте 100 км над поверхностью Земли, что вполне приемлемо в данном случае.

Поскольку датчик (камера) предназначен для установки на борту летательного аппарата, т. е. движущегося объекта, то это накладывает определенные ограничения на возможности накопления сигнала и, соответственно, увеличения выдержки при малых уровнях освещения. Поэтому для каждой высоты полета определялась средняя величина яркости приблизительно в полдень и был установлен максимально допустимый интервал яркости в течение суток, в котором датчик способен нормально функционировать. Этот диапазон был выбран равный 1:1000.

Кроме того, поскольку оптика не является идеальной, то вследствие рассеивания и переотражений яркие участки объекта засвечивают темные участки изображения, снижая тем самым контраст и увеличивая ошибки измерений. Этот диапазон (максимально допустимый перепад яркости между самыми яркими и самыми темными участками линии горизонта для каждого конкретного момента времени, для которых выполнялся расчет) был выбран равным 1:100. Если яркость в найденном экстремуме меньше 0,01 от яркости самого яркого экстремума по азимуту, то такой экстремум не используется для оценки местной вертикали.

Поскольку Солнце, в случае попадания его в поле зрения, может вызывать серьезные ошибки, то в случае, когда Солнце находится в пределах 23° над горизонтом, все экстремумы яркости, находящиеся на расстоянии не более 17° от направления на Солнце, не используются для оценки местной вертикали.

В результате расчетов, которые проводились в течение трех месяцев, получено довольно большое количество результатов (более 250 Гб), характеризующих процессы распространения излучения в атмосфере для разных высот в различных спектральных диапазонах. Даже после обработки этих данных и расчета ошибок измерения местной вертикали привести в статье все полученные результаты не представляется возможным. По этой причине здесь будут представлены наиболее интересные, по мнению автора, результаты.

Полученные результаты и их анализ

Результаты расчетов сведены в обобщенную *таблицу*, в которой указана длительность в часах непрерывного отрезка времени, включающего полдень, на протяжении которого ошибка оценивания местной вертикали мала. В данном случае малость ошибки понимается в том смысле, что при расчете вертикального профиля яркости с дискретностью

0,1° отклонение оценки вертикали не превышает 0,1 угловой минуты. Кроме того, в скобках указано, какой экстремум градиента яркости использован для определения линии горизонта и расчета вертикали. Знак «+» обозначает, что использовано максимальное значение градиента яркости. Знак «-» обозначает, что использовано максимальное значение антиградиента яркости (т. е. градиента, взятого с обратным знаком). Иными словами, рассматриваются точки, где достигается максимальная скорость, как возрастания яркости, так и максимальная скорость убывания яркости в вертикальном направлении.

Таблица 1. Интервалы измерений местной вертикали с малыми ошибками

Высота, км	Спектральные диапазоны, мкм						
	Диапазон 1	Диапазон 2	Диапазон 3	Диапазон 4	Диапазон 5	Диапазон 6	Диапазон 7
	0,58-1,2	0,762-0,783	0,859-0,876	0,911-0,959	2,0-2,4	3,05-4,17	4,44-5,05
0,03	14 (+)	14 (+)	14 (+)	8 (+)	14 (+)	24 (+)	24 (+) 24 (-)
0,374	0	0	0	4 (-)	0	24 (+)	24 (+)
1	3 (-)	6 (-)	6 (-)	11 (-)	4 (-)	24 (+)	24 (+)
3	14 (-)	14 (-)	13 (+) 14 (-)	14 (-)	14 (-)	24 (+)	24 (+)
10	13 (+)	13 (+)	14 (+)	11 (+)	14 (+) 14 (-)	8 (+) 7 (-)	24 (+) 24 (-)
100	0	0	0	4 (+)	11 (-)	5 (+)	24 (-)

Высота 0,03 км. При такой высоте расстояние до горизонта меньше, чем метеорологическая дальность видимости. Результаты проверочного расчета ожидаемо показали, что на всех диапазонах, кроме диапазона 4, имеются малые ошибки измерения. Указанный диапазон соответствует диапазону поглощения паров воды. На *рис. 1* представлены графики ошибок измерения вертикали по максимуму градиента (сплошная линия) и по максимуму антиградиента (штрихпунктирная линия) для этого диапазона. На этом и последующих графиках по горизонтальной оси отложено время в часах, а по вертикальной оси - ошибка измерения вертикали в угловых минутах.

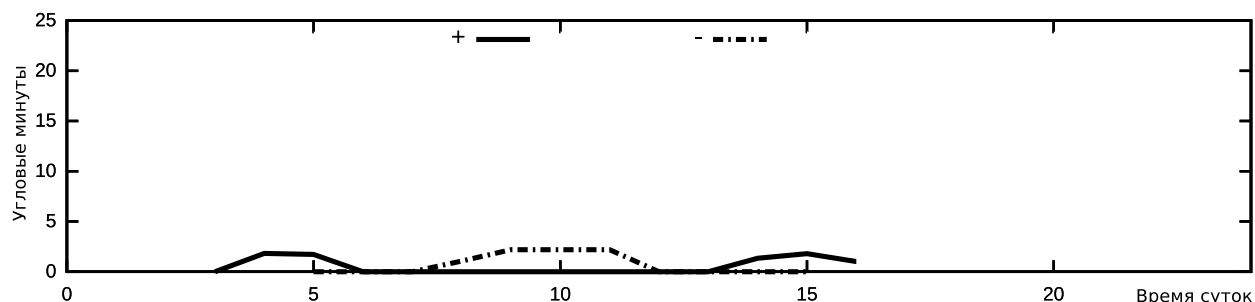


Рис. 1. Графики ошибки измерения вертикали в диапазоне 4 (высота 0,03 км)

Высота 0,374 км. При такой высоте расстояние до горизонта существенно превосходит величину метеорологической дальности видимости в видимом и ближнем ИК-диапазонах. При этом условия наблюдения наиболее неблагоприятны, поскольку камера окружена рассеивающей средой. По этой причине даже в диапазоне 5 ошибка измерения вертикали имеет величину порядка 38-39 угловых минут. И только в 6 и 7 диапазонах ошибка измерения мала на протяжении всех суток. Интересно отметить, что в полосе поглощения паров воды ситуация с ошибками измерения лучше, чем в диапазонах 1, 2, 3 и 5 (рис. 2).

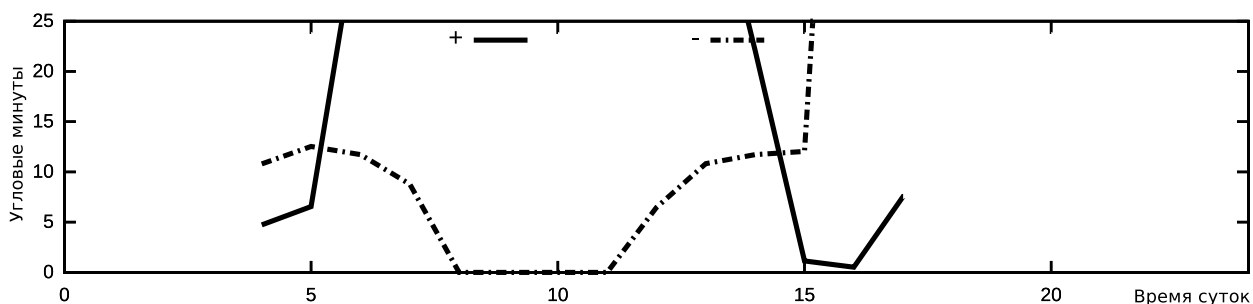


Рис. 2. Графики ошибки измерения вертикали в диапазоне 4 (высота 0,374 км)

Высота 1 км. При увеличении высоты улучшается ситуация с рассеянным излучением, поскольку падает плотность аэрозолей, окружающих камеру. И здесь также из первых пяти диапазонов наилучшие результаты показывает диапазон 4 (рис. 3) при использовании максимума антиградиента яркости. В диапазонах 6 и 7 ошибка определения вертикали ожидаемо была малой в течение всех суток.

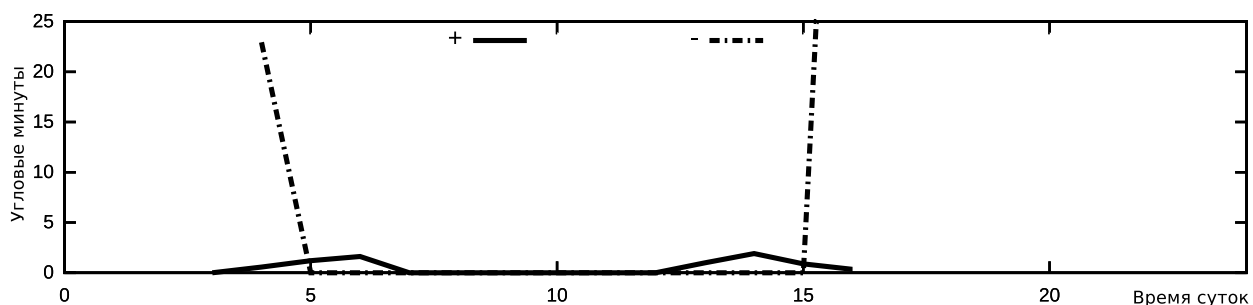


Рис. 3. Графики ошибки измерения вертикали в диапазоне 4 (высота 1 км)

Высота 3 км. Несмотря на увеличение расстояния до линии горизонта условия наблюдения на этой высоте продолжают улучшаться. При этом увеличиваются интервалы времени, в течение которых ошибка оценки вертикали по максимуму антиградиента яркости мала, а также уменьшаются ошибки оценивания вертикали по максимуму градиента. В 1, 2, 4 и 5 диапазонах эти ошибки не превышают 2,4, 3,2, 4,3, 3,9 угловых

минут соответственно (интервал времени 12-14 часов). В диапазоне 3 ошибки эти ошибки малы на протяжении 13 часов (рис. 4). В 6 и 7 диапазонах ошибки измерения малы на протяжении всех суток.

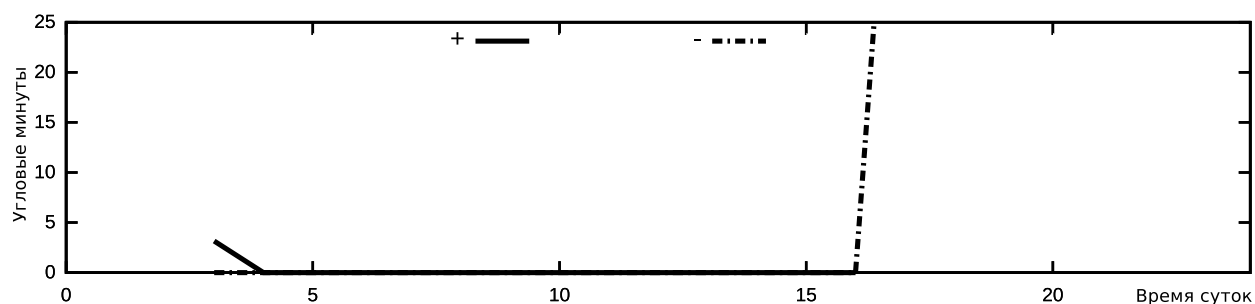


Рис. 4. Графики ошибки измерения вертикали в диапазоне 3 (высота 3 км)

Высота 10 км. Неожиданным является наличие заметных ошибок в диапазоне 6 в течение значительной части суток, чего не наблюдалось на меньших высотах (рис. 5).

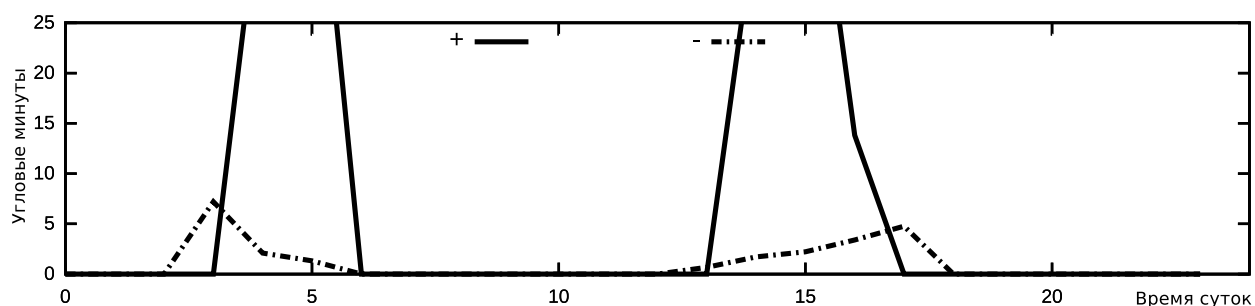


Рис. 5. Графики ошибки измерения вертикали в диапазоне 6 (высота 10 км)

Высота 100 км. Представляет большой интерес оценка ошибок визирования линии горизонта с больших высот, соответствующих высотам полета ИСЗ. Однако, использованная программа MODTRAN имеет ограничения по максимальной высоте точки, для которой рассчитывается принимаемое излучение. Указанная высота не должна превосходить 100 км. Поэтому были сделаны расчеты для этой высоты. В диапазонах 1-3 ошибка достигала 3-6 угловых минут. Диапазон 5 показал приемлемые результаты. Условия измерения в диапазоне 6 еще более ухудшились. И только диапазон 7 показал наилучшие результаты.

Заключение

Как следует из результатов проведенных экспериментов, наилучшие условия измерения обеспечивает диапазон 4,44-5,05 мкм, в котором возможно круглосуточное измерение вертикали на всех высотах. Несколько худшие результаты показал диапазон

3,05-4,17 мкм, который не обеспечивает всесуточности измерений на высотах 10-100 км. В этом диапазоне выше уровень аэрозольного рассеивания излучения (что становится заметным на оптических трассах в сотни км) и меньше уровень собственного теплового излучения Земли. Что касается диапазона 2,0-2,4 мкм, то в целом он не обеспечивает существенных преимуществ по сравнению с другими диапазонами, по крайней мере, при шаге дискретизации угла места в $0,1^\circ$. Если ограничить диапазон рабочих высот, то возможно использование диапазонов видимого, а также ближнего ИК-излучения для определения местной вертикали в дневных условиях

Необходимо только отметить, что диапазоны 2,0-2,4, 3,05-4,17 и 4,44-5,05 мкм позволяют регистрировать контраст между поверхностью Земли и небом, что обеспечивает *потенциально* более надежные результаты. Использование же видимого и ближнего ИК-диапазонов на высотах, которые не позволяют регистрировать контраст между поверхностью Земли и небом, порождает возможность появления ошибок измерений, обусловленных неоднородностью атмосферы в пределах видимого горизонта. Например, это может быть неоднородная по азимуту атмосферная дымка. Влияние таких факторов, однако, существенно зависит от высоты и плохо поддается прогнозированию. Возможно, что на каких-то высотах такие эффекты будут проявляться не слишком сильно.

Работа выполнена при поддержке РФФИ - грант 12-08-00863-а.

Литература

1. *Гришин В. А.* Анализ видимости линии горизонта при различных условиях наблюдения для решения задач оптической навигации летательных аппаратов // Третья Всероссийская научно-техническая конференция “Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов”. М.: ИКИ РАН, 2013. С. 345-352.
2. *Маслов И. А., Гришин В. А.* Выбор оптимального спектрального диапазона для наблюдения горизонта Земли // Техническое зрение. 2013. № 1. С. 2-4.
http://magazine.technicalvision.ru/public_ftp/%D0%A2%D0%B5%D1%85.%D0%B7%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_1.pdf
3. *Тучин М. С., Захаров А. И., Прохоров М. Е.* Определение геовертикали по наблюдению лимба Земли // Вторая Всероссийская научно-техническая конференция “Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов”. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 100-110.
4. *Cornall T., Egan G.* Measuring Horizon Angle from Video Onboard a UAV // Proceedings of the IEEE International Conference on 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. Vol. 9. No. 2. P. 135-150.
6. *Demonceaux C., Vasseur P., Pegard C.* Omnidirectional vision on UAV for attitude computation // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006). Orlando, FL. 2006. P. 2842-2847.
7. *Gupta V., Brennan S.* Vehicle State Estimation Using Vision and Inertial Measurements // Fifth IFAC Symposium on Advances in Automotive Control. Monterey Coast. CA. 2007. Vol. 5. Part 1. P. 65-70.
8. *Gupta V., Brennan S.* Terrain-Based Vehicle Orientation Estimation Combining Vision and Inertial Measurements // Journal of Field Robotics. 2008. Vol. 25. Issue 3. P. 181-202.
9. *Horiuchi T.* A Low-Power Visual Horizon Estimation Chip // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 2009. Vol. 56. Issue 8. P. 1566-1575.

10. Meller D., Sriprietkiat P., Makovec K. Digital CMOS Cameras for Attitude Determination // Proceedings of the 14th AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah. 2000. P. 1–12.
11. Oiri A., Nagatani K., Yoshida K. Global Positioning for Planetary Rovers based on Panoramic Skyline Image // Proceedings of the 2010 JSME Conference on Robotics and Mechatronics. Japan. 2010.
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. Sabatini R., Bartel C., Shaid T., Kaharkar A. Low-cost Vision Sensors and Integrated Systems for Unmanned Aerial Vehicle Navigation // ARPN Journal of Systems and Software. 2012. Vol. 2. Issue 11. P. 323-349.
14. Shabayek Abd El R., Demonceaux C., Morel O., Fofi D. Vision Based UAV Attitude Estimation: Progress and Insights // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2012. Vol. 65. Issue 1-4. P. 295-308.

Computational estimation of daily variations of local vertical direction derived from horizon line observation

V.A. Grishin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: vgrishin@iki.rssi.ru

The horizon line which can be observed in different optical bands is used for navigation. In particular, local vertical is determined on horizon line. Local vertical together with star sensor are used to calculate latitude and longitude. It is necessary to distinguish two cases. In the first case, the horizon line is formed by the contrast between Earth and the atmosphere. It is possible only if absorption and dissipation are not too large. In the second case, absorption and dissipation are so large that we cannot observe the line which separates images of Earth and sky. In this case, the line which we see as the horizon really is generated by the contrast between different atmospheric layers. The contrast is formed as the result of complicated processes of sunlight propagation in the Earth atmosphere, absorption and dissipation of this sunlight, as well as sunlight reflection from the Earth surface. Intrinsic Earth radiation is added in the infrared bands. Daily movement of the sun, as a powerful radiation source, across the sky influences all these processes. Incoming radiation for different angles of elevation and azimuth were calculated. From the results, the elevation angle of the horizon line was determined as the direction of extremal contrast. Local vertical orientation was calculated on the elevation angles in 36 directions on the azimuth. These calculations were performed for various times during day and night, for different altitudes and for different strips of the optical wavelength band.

Keywords: horizon line image, light absorption and dissipation in atmosphere, influence the Sun daily movement to the local vertical calculation errors.

References

1. Grishin V.A., Analiz vidimosti linii gorizonta pri razlichnykh usloviyakh nablyudeniya dlya resheniya zadach opticheskoi navigatsii letatel'nykh apparatov (Horizon line visibility analysis on different observation condition for the task of optical navigation for aircraft), *Tret'ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (Proc. 3d All-Russian Scientific and Technological Conference "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"), Moscow, IKI RAN, 2013, pp. 345-352, available at: <http://www.iki.rssi.ru/books/2013avanesov.pdf>.
2. Maslov I.A., Grishin V.A., Vybora optimal'nogo spektral'nogo diapazona dlya nablyudeniya gorizonta Zemli (The Choice of the Optimal Spectral Range for Observation of the Earth Horizon), *Tekhnicheskoe zrenie*, 2013, No. 1, pp. 2-4, available at: http://magazine.technicalvision.ru/public_ftp/%D0%A2%D0%B5%D1%85.%D0%B7%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_1.pdf.
3. Tuchin M.S., Zakharov A.I., Prokhorov M.E., Opredelenie geovertikali po nablyudeniyu limba Zemli (Geovetical Determination from Observation of Earth's Limb), *Vtoraya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (Proc. 2d All-Russian Scientific and Technological Conference "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"), Moscow, IKI RAN, 2011, pp. 100-110, available at: <http://www.iki.rssi.ru/books/2011avanesov.pdf>.

4. Cornall T., Egan G., Measuring Horizon Angle from Video Onboard a UAV, *Proceedings of the IEEE International Conference on Autonomous Robots and Agents*, Palmerston North, New Zealand, 2004, pp. 339-344.
5. Cozman F., Krotkov E., Guestrin C., Outdoor Visual Position Estimation for Planetary Rovers, *Autonomous Robots*, 2000, Vol. 9, No. 2, pp. 135–150.
6. Demonceaux C., Vasseur P., Pegard C., Omnidirectional Vision on UAV for Attitude Computation, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006)*, Orlando, FL, 2006, pp. 2842-2847.
7. Gupta V., Brennan S., Vehicle State Estimation Using Vision and Inertial Measurements, *Fifth IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*, Monterey Coast, CA, 2007, Vol. 5, Part 1, pp. 65-70.
8. Gupta V., Brennan S., Terrain-Based Vehicle Orientation Estimation Combining Vision and Inertial Measurements, *Journal of Field Robotics*, 2008, Vol. 25, Issue 3, pp. 181–202.
9. Horiuchi T., A Low-Power Visual Horizon Estimation Chip, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2009, Vol. 56, Issue 8, pp. 1566-1575.
10. Meller D., Sripruetkiat P., Makovec K., Digital CMOS Cameras for Attitude Determination, *Proceedings of the 14th AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Logan, Utah, 2000, pp. 1–12.
11. Oiri A., Nagatani K., Yoshida K., Global Positioning for Planetary Rovers Based on Panoramic Skyline Image, *Proceedings of the 2010 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, Japan, 2010.
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. Sabatini R., Bartel C., Shaid T., Kaharkar A., Low-cost Vision Sensors and Integrated Systems for Unmanned Aerial Vehicle Navigation, *ARPN Journal of Systems and Software*, 2012, Vol. 2, Issue 11, pp. 323-349.
14. Shabayek Abd El R., Demonceaux C., Morel O., Fofi D., Vision Based UAV Attitude Estimation: Progress and Insights, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2012, Vol. 65, Issue 1-4, pp. 295-308.