

## Грубая оценка местной вертикали по видимой линии горизонта

В. А. Гришин

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mail: vgrishin@cosmos.ru*

Работа посвящена оценке возможностей создания простого и дешёвого оптического измерителя местной вертикали с использованием только отечественных компонентов. Измеритель вертикали предназначен для установки на борт мини- и микроспутников. Ошибка оценки местной вертикали не должна превышать  $1^\circ$ . Измеритель должен работать в видимом диапазоне электромагнитных волн. В качестве фотодатчиков предполагается использование отечественных линеек фотодиодов. Были предложены две методики оценки углов ориентации измерителя относительно Земли. Первая методика потенциально имеет более высокую точность измерений, вторая методика проще и допускает обработку изображений, формируемых специальным моделирующим стендом. Стенд содержит макет измерителя, выполненный на основе fish-eye камеры. Моделирование показало возможность получения максимальных ошибок оценки углов порядка  $0,66^\circ$  и среднеквадратических ошибок в интервале  $0,162\text{--}0,184^\circ$ . Эти оценки не учитывают нестабильность линии горизонта, обусловленную нестационарностью характеристик атмосферы (в частности изменением облачного слоя Земли), а также изменением условий освещения при изменении положения Солнца.

**Ключевые слова:** простой измеритель местной вертикали, дешёвый измеритель местной вертикали, видимый диапазон электромагнитных волн, мини- и микроспутники

Одобрена к печати: 01.07.2024  
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-63-71

### Введение

На борту космических аппаратов устанавливаются построители местной вертикали. Информация о направлении на центр Земли используется в системах управления ориентацией и угловой стабилизацией космических аппаратов. В качестве построителей местной вертикали могут быть использованы различные приборы, но наиболее распространёнными являются измерители, работающие в инфракрасном диапазоне длин волн. Это обусловлено тем, что влияние сезонности и времени суток на погрешность измерения местной вертикали в инфракрасном диапазоне меньше, чем в видимом. Кроме того, в инфракрасном диапазоне длин волн проще вводить поправки для компенсации влияния указанных факторов.

При высоких требованиях к точности и достаточно больших высотах чаще всего используются оптико-механические сканирующие измерители. Примером может служить инфракрасный датчик вертикали фирмы Leonardo ([https://space.leonardo.com/documents/16277711/19573585/IRENE\\_NE\\_Attitude\\_Control\\_Sensors\\_LQ\\_mm07787\\_.pdf](https://space.leonardo.com/documents/16277711/19573585/IRENE_NE_Attitude_Control_Sensors_LQ_mm07787_.pdf)), предназначенный для работы в интервале высот от 15 300 до 53 000 км. Ошибка измерений этого прибора не превосходит  $0,05^\circ$  ( $3\sigma$ ). Такие измерители, однако, имеют достаточно большой вес и габариты. Измеритель STD 16 фирмы Sodern (<https://www.satnow.com/products/earth-horizon-sensors/sodern/44-1193-std-16>) имеет схожие по точности характеристики.

Измеритель MiDES-G фирмы Servo Corporation of America ([https://servo.com/index\\_html/files/MidesG.pdf](https://servo.com/index_html/files/MidesG.pdf)) имеет более высокую точность —  $0,025^\circ$  ( $3\sigma$ ) — и использует в качестве датчиков линейки из 16 дискретных пикселей. Вообще говоря, использование матричных или линейных фотодатчиков позволяет создавать весьма лёгкие малогабаритные измерители, не имеющие движущихся механических частей. Однако точность таких приборов, как правило, ниже, чем у измерителя MiDES-G. Указанные выше три измерителя характеризуются достаточно большими габаритами и весом 1,5–3,5 кг.

Другим примером использования линейных фотодатчиков является измеритель Earth Sensor for Satellite фирмы Meisei Electric Co. Ltd. (<https://www.meisei.co.jp/english/wp-content/uploads/2020/07/Earth-Sensor-for-Satellite.pdf>). Он работает в инфракрасном диапазоне, не имеет движущихся частей, содержит четыре линейных фотодатчика с объективами, имеет малые габариты ( $40 \times 40 \times 55$  мм) и массу (250 г). Ошибка измерений углов по диску Земли —  $1,5^\circ$ .

Измеритель HSNS (*англ.* Horizon Sensor for Nano Satellites) фирмы Solar MEMS Technologies (<https://solar-mems.com/wp-content/uploads/2024/01/HSNS.pdf>) также оснащён четырьмя объективами для наблюдения горизонта и имеет массу 120 г. Он предназначен для установки на микро- и наноспутниках. Ошибка измерений —  $1^\circ$  ( $3\sigma$ ).

Измеритель CubeSense Earth фирмы Cubespace Satellite Systems (<https://www.cubespace.co.za/downloads/gen2-sensors.pdf>) оснащён одним объективом для наблюдения горизонта и имеет массу 18 г. Ошибка измерений такая же —  $1^\circ$  ( $3\sigma$ ).

Построители местной вертикали, предназначенные для установки на борт мини- и микроспутников, характеризуются довольно большим разнообразием технических решений, зависящим, кроме всего прочего, от высоты орбиты, на которой находится спутник. Общим требованием, предъявляемым к таким измерителям, являются малый вес, габариты и потребляемая мощность. В то же время невысокая точность измерений не является критически важной, поскольку устанавливаемые на таких спутниках научные приборы, включая различные системы дистанционного зондирования, как правило, не обладают высоким разрешением и не требуют высокой точности ориентации.

## Конструктивные особенности датчика местной вертикали

Рассмотрим возможности создания простого датчика горизонта, использующего линейные фотодатчики отечественного производства, работающие в видимом диапазоне электромагнитных волн, и имеющего ошибку не более  $1^\circ$ . Зададим высоту над поверхностью Земли, равную, например, 800 км. С такой высоты Земля видна под углом порядка  $125,356^\circ$  (без учёта атмосферы).

Для проведения имитационного моделирования процессов построения местной вертикали были использованы параметры линейки отечественных фотодиодов ФД-148 (*рис. 1*, см. с. 65), которые имеют 11 фоточувствительных площадок размером  $3 \times 0,9$  мм. Промежуток между фоточувствительными площадками равен 0,3 мм. Сейчас доступны более совершенные варианты линеек фотодиодов, например, фирмы OSI Optoelectronics. Однако они производятся вне пределов России.

На *рис. 2* (см. с. 65) условно изображены построители местной вертикали, содержащие от трёх до восьми линейных фотодатчиков. Земля условно обозначена окружностью. Можно считать, что минимальное количество линейных фотодатчиков, необходимое для проведения измерений, равно трём.

На практике чаще всего встречается конфигурация с четырьмя линейными фотодатчиками. Очевидно, что увеличение их количества улучшает точность измерений, однако при этом растёт сложность построителя местной вертикали, потребляемая мощность, несколько увеличивается вес прибора. Ещё одно преимущество использования большего количества линейных фотодатчиков состоит в том, что при этом уменьшается разброс максимальных углов, при котором прибор ещё способен формировать оценки уклонения линии визирования от направления на центр Земли (*рис. 3*, см. с. 65). Например, при числе линеек, равном четырём, этот разброс лежит в пределах приблизительно от  $119^\circ$  (когда Земля расположена на диагонали между линейками) до  $136^\circ$  (когда Земля расположена на продольной оси одной из линеек). При числе линеек фотодатчиков, равном восьми, разброс максимальных углов лежит в пределах приблизительно от  $133^\circ$  до  $136^\circ$  соответственно. Расчёты сделаны для высоты 800 км, видимому угловому размеру Земли (без учёта атмосферы), равному  $2 \times 62,678^\circ = 125,356^\circ$ , и такой ориентации линеек, когда направление на горизонт соответ-

ствует середине диапазона углов, воспринимаемых линейкой фотодиодов. Этот диапазон принят равным  $22^\circ$ . Далее рассматривается вариант с восемью линейными фотодатчиками для повышения точности измерений.

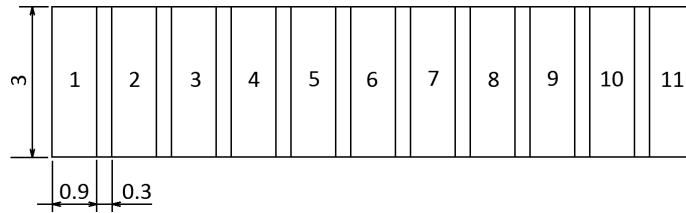


Рис. 1. Фоточувствительные площадки линейки фотодиодов

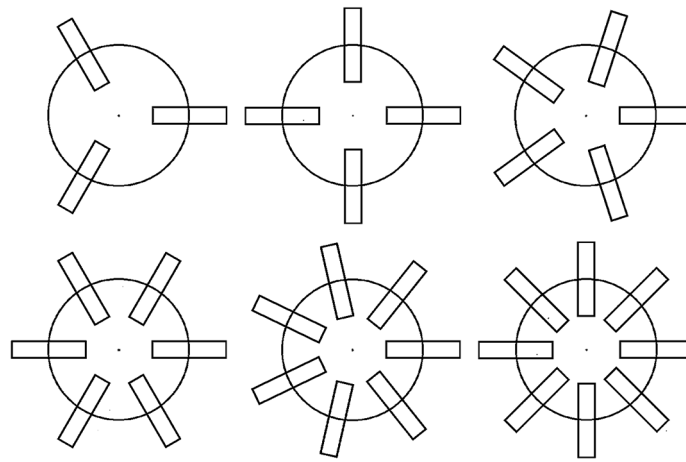


Рис. 2. Различное количество линейных фотодатчиков в составе построителя местной вертикали

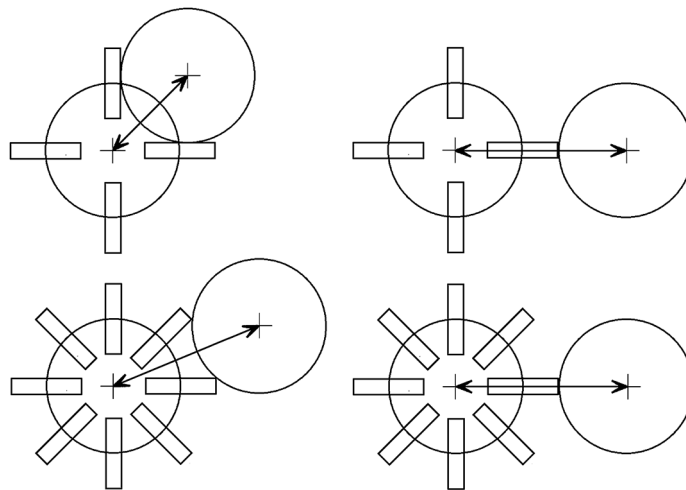


Рис. 3. Разброс максимальных углов, при которых прибор ещё способен формировать оценки уклонения линии визирования от направления на центр Земли для четырёх и восьми линеек фотодатчиков

На рис. 4 (см. с. 66) условно изображён процесс «наведения» датчика горизонта на изображение Земли при использовании построителя местной вертикали с восемью линейными фотодатчиками. При этом наведение возможно только тогда, когда хотя бы один линейный фотодатчик попадает хотя бы одним пикселем (фотодиодом) на Землю. Например, в случае, показанном на верхнем левом рисунке, наведение невозможно. В остальных случаях

можно сформировать направления разворотов измерителя вместе с космическим аппаратом, на котором он установлен, при которых уменьшается отклонение направления оси визирования от местной вертикали. Возможное направление перемещения оси прибора (зависящее от конкретной реализации алгоритмов оценки угла отклонения) показано на рисунках стрелками.

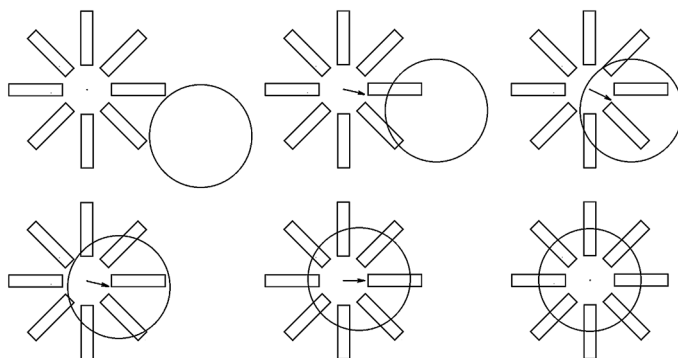


Рис. 4. Процесс наведения датчика горизонта на изображение Земли



Рис. 5. Стеклоцилиндрическая линза и линейка фотодиодов в составе линейного фотодатчика; бленда не показана

Рассмотрим модель диаграммы направленности линейки фотодиодов ФД-148. Ограничим поле зрения линейки углами  $22^\circ$  (вдоль линейки) и  $5^\circ$  (перпендикулярно линейке). Поскольку плоская площадка фотодиода способна принимать излучение во всей полусфере пространства, считаем, что поле зрения модели линейного фотодатчика перпендикулярно линейке фотодиодов ограничено специальной блендой, а поле зрения вдоль линейки формируется цилиндрической линзой (рис. 5).

Для определения интервала высот, в котором способен работать датчик горизонта, рассчитанный на высоту орбиты 800 км, введём следующее условие. Датчик считается работоспособным, если хотя бы один из 11 фотодиодов каждой линейки «смотрит» на Землю и хотя бы один из 11 фотодиодов каждой линейки смотрит в космос. Это условие выполняется в интервале высот от 340 до 1536 км. При отклонении высоты от расчётного значения, равного 800 км, уменьшается диапазон углов, в котором датчик линейен.

Указанное поле зрения ( $22 \times 5^\circ$ ) моделируется массивом из  $220 \times 50 = 11\,000$  парциальных лучей (диаграмм направленности), взвешенных по закону косинуса угла между направлением луча и нормали к поверхности фоточувствительной площадки. Поле зрения каждого пикселя ограничено величиной  $5 \times 1,5^\circ$ . При этом в массиве парциальных лучей те лучи, которые соответствуют промежуткам между фоточувствительными площадками, формируются, но потом они не участвуют в обработке. Сначала формируется система парциальных лучей для одной из восьми линеек. Затем путём поворотов формируются системы парциальных лучей для оставшихся семи линеек.

## Требования к изображениям Земли, используемым для моделирования процесса измерения

Для моделирования процесса измерения необходимо использовать изображение Земли, а точнее — всего земного шара. Вообще говоря, таких изображений в настоящее время очень много. Однако проблема в том, что в абсолютном большинстве случаев у этих изображений «обрезана» атмосфера.

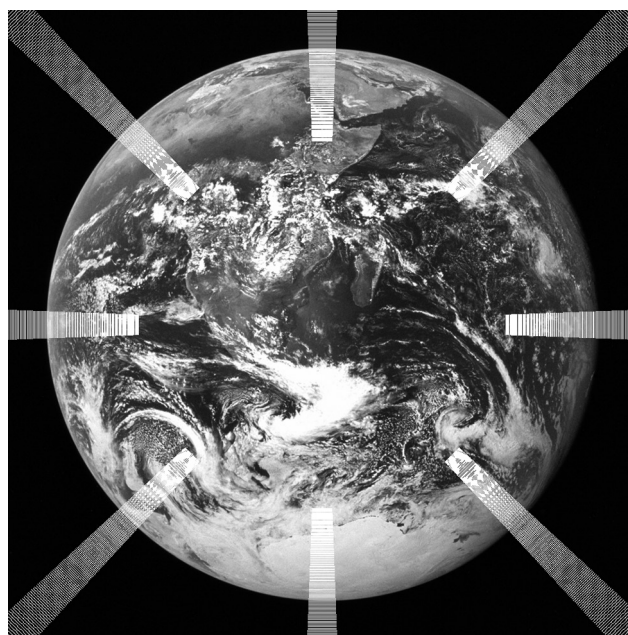
Именно атмосфера непосредственно участвует в формировании видимой линии горизонта, поскольку в атмосфере существенно проявляются процессы рассеяния и поглощения электромагнитного излучения. В частности, это рэлеевское рассеяние в атмосфере, а именно — рассеивание света на объектах, размеры которых меньше его длины волны (субмикронные аэрозоли и микрофлюктуации плотности воздуха, по своим размерам сопоставимые с размерами молекул воздуха). На процессы распространения излучения в атмосфере также влияет молекулярное рассеивание и поглощение излучения в атмосфере. И, наконец, наибольшее влияние оказывает аэрозольное рассеяние и поглощение излучения в атмосфере. Можно считать, что верхняя граница области наибольшего влияния аэрозольного рассеяния и поглощения приблизительно соответствует максимальной высоте облаков, которые простираются, в основном, до высот порядка 6–13 км (перистые, перисто-кучевые, перисто-слоистые). Сравнительно редко наблюдаются перламутровые облака (20–25 км) и серебристые облака (70–80 км). Выше этой области концентрация аэрозольных частиц существенно уменьшается и, соответственно, резко уменьшается рассеяние и поглощение электромагнитных волн оптического диапазона. Был проведён анализ, подтвердивший, что изменчивость профилей яркости видимого изображения Земли проявляется до высот порядка 20 км.

В случае когда изменяется взаимное положение Земли, Солнца и строителя местной вертикали, дополнительное увеличение ошибок измерений будет происходить из-за неравномерности засветки атмосферы Земли Солнцем и потерь при распространении этого излучения в атмосфере.

По указанным причинам обрезка атмосферы на изображениях Земли, которые используются для оценки точности измерения местной вертикали, чаще всего снижает величину ошибок измерения по сравнению со случаем, когда атмосфера не обрезана.

После длительных поисков были найдено изображение, полученное во время выполнения миссии Apollo-17 за 7 декабря 1972 г., на котором сохранилось изображение атмосферы. Изображение масштабировано таким образом, чтобы видимое изображение Земли имело диаметр порядка 900 пикселей. Размер всего изображения 1024×1024 пикселя. Пример одного из изображений, полученных в процессе моделирования, показан на *рис. 6*. Массивы белых точек на изображении — это точки пересечения лучей с плоскостью изображения Земли.

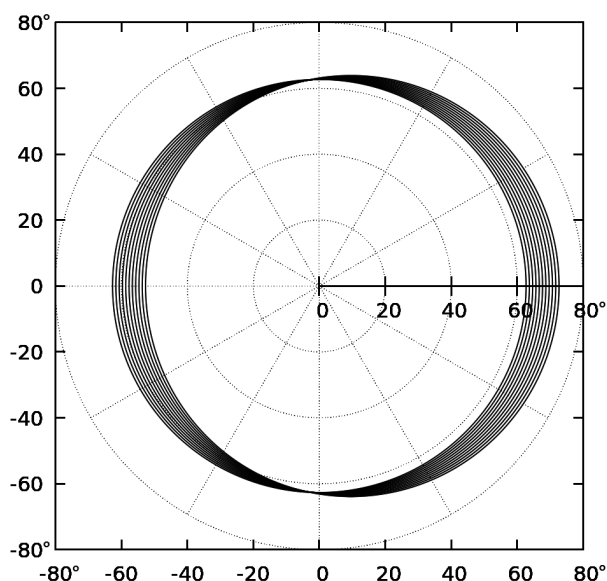
Линейные датчики ориентировались таким образом, чтобы линия горизонта проектировалась на середину шестой светочувствительной площадки каждой линейки фотодиодов.



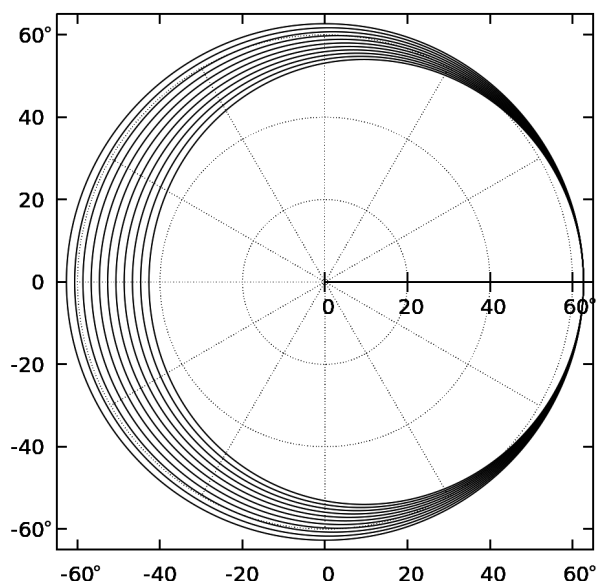
*Рис. 6.* Использованное изображение Земли с наложенными на это изображение точками, соответствующими лучам парциальных диаграмм направленности

### Метод измерения углов, основанный на характере изменения видимой формы линии горизонта при изменении ориентации измерителя

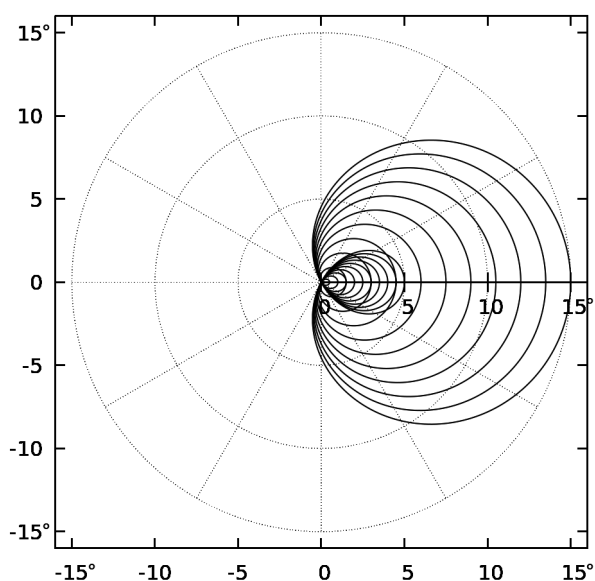
Кратко изложим метод измерения ориентации местной нормали. Очевидно, что линия горизонта Земли при ориентации оси прибора строго по направлению местной вертикали будет представлять собой окружность. Например, для высоты над поверхностью Земли, равной 800 км, и радиуса Земли, равного 6371 км, это будет окружность радиуса  $62,678^\circ$ . Здесь не учитываются отклонения фигуры Земли от сферы и оптические эффекты в атмосфере Земли (рассеяние и поглощение излучения, неравномерность засветки со стороны Солнца, преломление света в атмосфере). Рассмотрим, как изменяется форма линии горизонта в зависимости от величины угла отклонения оптической оси прибора от вертикали. На *рис. 7* изображены линии горизонта для отклонения оси прибора от вертикали на углы  $0, 1, 2, \dots, 10^\circ$ . Поворот прибора осуществлялся вокруг вертикальной оси  $OY$ , лежащей в плоскости рисунка.



*Рис. 7.* Линии горизонта в полярных координатах для отклонений датчика от местной вертикали на углы  $0-10^\circ$



*Рис. 8.* Те же самые линии горизонта, что и на *рис. 7*, но смещённые на  $0, 1, 2, \dots, 10^\circ$  по горизонтали



Визуально линии горизонта кажутся окружностям, смещёнными в направлении горизонтальной оси на углы  $0, 1, 2, \dots, 10^\circ$  соответственно. Скомпенсируем это смещение. *Рисунок 8* показывает, что при смещении линии горизонта не накладываются друг на друга.

Вычтем из углов направлений на точки горизонта, представленных на *рис. 7*, величину угла направления на линию горизонта для нулевого отклонения оси прибора от местной вертикали и сместим их вдоль горизонтальной оси на  $0, 1, \dots, 10^\circ$ .

*Рис. 9.* Графики отклонения формы линии горизонта от окружности в полярной системе координат

Результаты такой трансформации представлены на *рис. 9*. На этом рисунке мы можем наблюдать кривые, очень похожие на такую классическую кривую, как «Улитка Паскаля». Однако отклонение линий, представленных на *рис. 9* (см. с. 68), от улитки Паскаля достигает 2 %.

Таким образом, установлено, что форма линии горизонта при отклонении оси прибора от вертикали достаточно сложна. Поэтому для оценки угла разворота оптической оси прибора были использованы табличные значения, построенные как проекции линии горизонта, а не их аппроксимации окружностями с коррекциями по кривой улитки Паскаля и дополнительными поправочными членами. Таблицы были построены для одной ориентации оси поворота прибора и 11 значений угла поворота: 0, 1, 2, ..., 10°.

Оценка ориентации оси поворота и угла поворота датчика горизонта осуществлялась поиском наилучшего соответствия восьми измеренных направлений на линию горизонта по двум углам — ориентации оси поворота с шагом 1° и величины угла поворота также с шагом 1°. После поиска наилучшего соответствия значения углов уточнялись путём интерполяции.

Для оценки точности измерений построитель вертикали разворачивался относительно изображения Земли на дискретное множество углов: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8°. Разворот проводился относительно восьми осей, расположенных параллельно плоскости изображения и развёрнутых относительно оси *OY* на 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 и 315° против часовой стрелки. Величины ошибок измерения представлены в *таблице*.

Ошибки измерения ориентации построителя вертикали

Ориентация оси поворота, град	Ошибки для значений углов, на которые разворачивался построитель вертикали, град								
	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
0	0	0,197	0,261	0,122	0,210	0,266	0,287	0,657	0,289
45,0		0,264	0,180	0,346	0,111	0,088	0,250	0,114	0,146
90,0		0,139	0,280	0,177	0,107	0,464	0,115	0,190	0,226
135,0		0,017	0,450	0,394	0,285	0,321	0,163	0,225	0,465
180,0		0,088	0,344	0,359	0,213	0,271	0,477	0,283	0,343
225,0		0,123	0,254	0,250	0,152	0,394	0,210	0,188	0,195
270,0		0,271	0,174	0,195	0,216	0,175	0,180	0,252	0,169
315,0		0,243	0,129	0,217	0,140	0,137	0,238	0,167	0,080

Как следует из таблицы, максимальная ошибка измерения угла поворота равна 0,657°. Величину 0,4° превышают ошибки пяти измерений. Оставшиеся измерения имеют ошибку менее 0,4°.

### Метод измерения углов, основанный на измерении смещения фрагментов изображения Земли

Поскольку найти достаточное количество изображений Земли, у которых атмосфера не обрезана, весьма проблематично, то для накопления более представительной статистики была предложена другая, упрощённая, методика оценки погрешностей измерений датчиком вертикали. Эта методика допускает использование специального контрольно-измерительного стенда, с которого можно получить любое количество изображений, необходимое для набора представительной статистики. При этом поле зрения линеек датчика вертикали моделируется путём «вырезки» и усреднения яркости фрагментов изображения, формируемого камерой с широкоугольным или сверхширокоугольным объективом (fish-eye) (*рис. 10*). Угловые развороты построителя вертикали моделируются угловыми разворотами этой камеры.

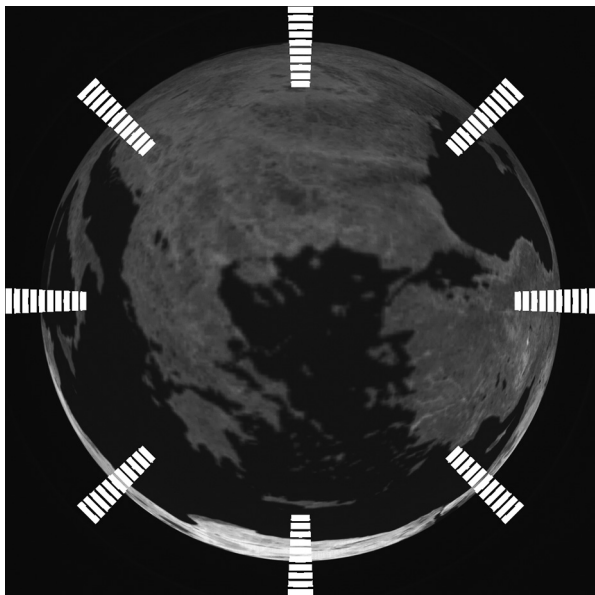


Рис. 10. Иллюстрация метода моделирования поля зрения каждого фотодиода линеек фотодатчиков путём вырезки фрагментов изображения Земли, формируемого камерой с широкоугольным или сверхширокоугольным объективом

Рассмотрим более подробно приведённую методику. Воспользуемся тем свойством, что для отдалённых объектов угловые развороты измерителя ориентации с приемлемой степенью точности можно аппроксимировать линейными перемещениями наблюдаемого объекта в поле зрения измерителя, что существенно упрощает процесс измерений. При этом, однако, игнорируются изменения формы линии горизонта, показанные на рис. 7–9. Это приводит к уменьшению потенциальной точности измерений по сравнению с первым методом измерений.

По выборке из 500 случайных сдвигов оценивались максимальные ошибки, средние значения ошибок оценивания и средние квадратические отклонения ошибок оценивания. Использовались результаты с коррекцией нуля датчика. Величина случайных сдвигов не превосходила  $4^\circ$ .

Были получены следующие результаты:

- максимальная (по модулю) ошибка по координате  $X$ :  $0,66^\circ$ , по координате  $Y$ :  $0,54^\circ$ ;
- средняя ошибка по координате  $X$ :  $-0,12^\circ$ , по координате  $Y$ :  $0,012^\circ$ ;
- средняя квадратическая ошибка по координате  $X$ :  $0,184^\circ$ , по координате  $Y$ :  $0,162^\circ$ .

Также по выборке из 500 случайных сдвигов оценивалось влияние сдвига по одной из осей координат, в пределах  $4^\circ$  на оценку сдвига по второй (ортогональной) оси. Это влияние в идеальном случае должно быть равно нулю. Во всех случаях это влияние не превосходило  $0,27^\circ$ .

Полученные по обоим методам измерения оценки углов не учитывают нестабильность линии горизонта, обусловленную нестационарностью характеристик атмосферы (в частности изменением облачного слоя Земли), а также изменением условий освещения при изменении положения Солнца. При наличии указанных факторов ошибки оценивания ориентации местной вертикали несколько увеличатся. Однако использование даже простейших методов фильтрации (например скользящего усреднения) позволит существенно уменьшить случайные ошибки измерения углов, что в итоге позволит уменьшить суммарные (случайные и систематические) ошибки измерения углов ориентации до величин, не превосходящих  $1^\circ$ . Некоторое увеличение точности измерений может дать учёт несферичности Земли.

## Заключение

Для оценки точности датчика местной вертикали были использованы два подхода. Первый предусматривал достаточно точное моделирование оптического датчика с формированием диаграмм направленности каждого элемента светочувствительной линейки фотодиодов в виде совокупности парциальных диаграмм с шагом  $0,1^\circ$ . Кроме того, при измерениях учитывалось искажение формы наблюдаемой линии горизонта при углах ориентации датчика, отличных от местной вертикали.

Второй подход был существенно проще и использовал то свойство, что при достаточно большом расстоянии до объекта наблюдения небольшие угловые повороты датчика могут



быть приближены линейным смещением изображения объекта в поле зрения. При этом из изображения вырезались фрагменты, соответствующие проекциям каждого элемента светочувствительной линейки фотодиодов, с последующим усреднением яркости соответствующих пикселей фрагментов изображения. Указанный подход также применим при стендовой отработке алгоритмов измерения при моделировании линеек фотодиодов датчика вертикали одной камерой со сверхширокоугольным (fish-eye) объективом.

Полученные результаты показывают возможность создания простых датчиков горизонта, использующих отечественные комплектующие. Результаты оценки величины ошибок, полученные по двум методикам, не являются противоречащими друг другу. При этом максимальная ошибка измерений не превосходит  $0,66^\circ$ , а средняя квадратическая ошибка находится в пределах  $0,162-0,184^\circ$ . Фильтрация результатов измерений позволит существенно уменьшить случайные ошибки измерения углов ориентации местной вертикали.

Хотя отдельные фотодиоды линеек имеют разброс чувствительности (порядка 10 %), но чувствительность фотодиодов достаточно легко калибруется, поэтому погрешности, обусловленные разбросом чувствительности, можно не учитывать при моделировании.

Таким образом, в случае не слишком высоких требований к точности возможно создание датчиков местной вертикали полностью из отечественных компонентов.

## Rough estimation of the local vertical using the visible horizon line

V. A. Grishin

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

*E-mail: vgrishin@cosmos.ru*

The work is devoted to assessing the possibilities of creating a simple and cheap optical local vertical sensor using only domestic components. The local vertical sensor is designed for installation on board mini- and microsatellites. The error in estimating the local vertical should not exceed  $1^\circ$ . The sensor must operate in the visible range of electromagnetic waves. It is supposed to use domestic lines of photodiodes as photo sensors. Two methods have been proposed for estimating the orientation angles of the sensor relative to the Earth. The first method potentially has a higher measurement accuracy. The second method is simpler and allows processing of images generated by a special modeling test-bed containing a sensor model made on the basis of a fish-eye camera. Simulation showed the possibility of obtaining maximum angle estimation errors of the order of  $0.66^\circ$  and root mean square errors in the range of  $0.162-0.184^\circ$ . These estimates do not take into account instability of the horizon line, caused by non-stationary characteristics of the atmosphere (in particular, changes in the Earth's cloud layer), as well as changes in lighting conditions when the position of the Sun changes.

**Keywords:** a simple, cheap local vertical sensor in the visible range of electromagnetic waves for mini- and microsatellites

Accepted: 01.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-63-71