

Х. ХАНАДА, С. ЦУРУТА, К. АСАРИ, Х. АРАКИ, Х. НОДА, С. ТАДЗАВА, С. КАСИМА,
К. ФУНАДЗАКИ, А. САТО, Х. ТАНИГУЧИ, Х. КАТО, М. КИКУЧИ, Х. САСАКИ,
Т. ХАСЕГАВА, Т. ЯНО, Н. ГОУДА, Ю. КОБАЯСИ, Ё. ЯМАДА, Т. ИВАТА, А. ГУСЕВ

РАЗРАБОТКА КОМПАКТНОГО ЗЕНИТНОГО ТЕЛЕСКОПА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ РТУТНОГО ЗЕРКАЛА И ФОНОВОГО ШУМА

Разработан зенитный телескоп для наблюдения градиента силы тяжести и вращения луны, а также создана опытная модель для наземных экспериментов. Для опытной модели были разработаны, в частности, штатив с системой контроля углового положения, устойчивый ртутный горизонт, методика получения показателей вибрационных воздействий. В августе–сентябре 2014 года были проведены лабораторные эксперименты и натурные наблюдения с целью испытания системы телескопа и программного обеспечения в целом. Полученные результаты сопоставлены с результатами экспериментов, направленных на повышение точности нахождения центров изображений звезд с помощью простой оптической системы. Кроме того, было изучено влияние вибраций ртутного зеркала на положение центроида на приборе с зарядовой связью (ПЗС).

Результаты экспериментов показали, что эффекты вибрации практически одинаковы для звезд в одном и том же поле зрения и могут быть скорректированы путем вычитания среднего значения; вибрации ртутного зеркала вызывают погрешности в определении центроида до 0,2"; при этом существует сильная корреляция между среднеквадратическим отклонением положения центроида и отношением «сигнал–шум» для изображений звезд. Существует возможность достичь погрешности 0,01" при достаточно высоком показателе отношения «сигнал–шум» и при условии коррекции вибрационных воздействий.

Ключевые слова: зенитный телескоп, фотографическая зенитная труба, градиент силы тяжести, центроид.

Ханада Хидео. Национальная астрономическая обсерватория (Митака/Ошу, Япония), Университет последиипломного образования и углубленных исследований SOKENDAI, (Митака/Сагамихара, Япония).

Цурута Сейцу; **Асари** Кадзуёси; **Тадзава** Сэйичи; **Касима** Синго. Национальная астрономическая обсерватория.

Араки Хироси; **Нода** Хиротоми; **Яно** Тайхэй; **Года** Наотеру; **Кобаяси** Юкиясу. Национальная астрономическая обсерватория, Университет последиипломного образования и углубленных исследований SOKENDAI.

Фунадзаки Кэньичи; **Са**то Ацуси; **Танигучи** Хидео; **Ка**то Хиромаса; **Кикучи** Мамору; **Са**саки Хирокадзу; **Хасега**ва Томоясу. Иватский университет (Мориока, Япония).

Ямада Ёсиюки. Киотский университет (Киото, Япония).

Ивата Такахио. Институт космоса и аэрокосмических исследований JAXA (Сагамиахара, Япония), Университет последиипломного образования и углубленных исследований SOKENDAI.

Гусев Александр. Казанский федеральный университет (Казань, Россия).

Статья по докладу на IV Симпозиуме международной ассоциации по геодезии (IAG) «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных и подвижных основаниях», 2016 г.

Научный редактор перевода к.т.н. С. В. Гайворонский.

Введение

Фотографическая зенитная труба (ФЗТ) представляет собой разновидность позиционного телескопа, созданного более 100 лет назад и способного определять не только широту, но и долготу за счет измерения как зенитного расстояния, так и часового угла звезд, проходящих меридиан рядом с зенитом. Таким образом, фотографическая зенитная труба уже давно использовалась Международной службой широты (ILS) и Международной службой движения полюса (IPMS) в качестве одного из основных инструментов для наблюдений вращения Земли [1]. После того как вместо фотографической пластинки в качестве датчика начали применять ПЗС-матрицу, фотографическая зенитная труба вновь привлекла к себе внимание ученых. Хирт и Бюрки (Hirt and Bürki) [2] разработали портативную цифровую зенитную камеру, схожую с фотографической зенитной трубой, для автоматического определения уклонов отвесной линии (УОЛ) и добились погрешности в ходе натурных наблюдений от 0,1 до 0,15". Данный уровень точности сопоставим с точностью измерений вращения Земли с помощью больших стационарных телескопов [1]. Было также показано, что зенитную трубу можно использовать для натурных наблюдений благодаря наличию в ней механизма компенсации наклона.

Широтные (ψ) и долготные (λ) составляющие УОЛ (ξ , η) получены путем дифференцирования высоты геоида (N)

$$\xi = -(1/r)(\partial N / \partial \psi), \quad (1)$$

$$\eta = -(1/r \cos \psi)(\partial N / \partial \lambda) \quad (2)$$

и использования географической широты ψ [3]. Данные уравнения показывают, что высоту геоида можно получить из величины УОЛ и наоборот. Ли и соавторы (Li et al.) [4] в ходе масштабных гравиметрических съемок в Пекине успешно определили изменение УОЛ с погрешностью менее 0,05". Представляется, что изменение силы тяжести можно точно так же определить путем наблюдений за УОЛ при условии их достаточно высокой точности.

Национальная астрономическая обсерватория Японии (НАОЯ) в своем проекте исследования геодезии Луны (RISE) предложила осуществлять наблюдение вращения Луны в телескоп типа фотографической зенитной трубы, установленный на Луне [5]. Это другая разновидность наблюдений, не имеющих отношения к лазерной локации Луны (LLR). Моделирование показало, что можно определить параметры флуктуаций вращения Луны с погрешностью 0,01" на основе наблюдений, выполненных с погрешностью 0,01", в течение более одного года [6]. Полученные данные могут быть полезны для исследования частично расплавленной зоны вокруг жидкого ядра или самого жидкого ядра Луны, поскольку параметры либрации, связанные с уменьшением плотности внутри Луны, имеют амплитуду не более нескольких 0,01" [7].

Авторы данной статьи с целью достичь более высокой точности наблюдений работали над созданием телескопа типа фотографической зенитной трубы около 10 лет. Вначале была создана опытная модель и проведены базовые эксперименты в лаборатории, чтобы подтвердить работоспособность приводного механизма; кроме того, были смоделированы траектории лучей для определения оптических характеристик телескопа [8]. После этого проводились лабораторные эксперименты для достижения максимальной точности позиционирования,

а также наблюдения с Земли для подтверждения точности прибора в условиях наблюдения реальных звезд. По ряду экспериментов уже опубликованы официальные данные [9]. Проведен повторный анализ результатов экспериментов, особенно в части вибрации ртутного зеркала, и в настоящей работе точность некоторых видов экспериментов оценена заново.

Разработка телескопа

Разрабатываемый телескоп представляет собой компактный прибор диаметром 10 см с фокусным расстоянием 1 м (рис. 1). Длина трубы составляет примерно 0,5 м, при этом падающие лучи отражаются ртутным горизонтом, установленным на середине фокусного расстояния, что является характерным отличием фотографической зенитной трубы (рис. 2). Исследования были направлены на решение следующих основных технологических задач:

- 1) предотвращение наклона трубы, связанного с перепадом температуры;
- 2) повышение точности определения центроида;
- 3) предотвращение изменения положения звезд, связанного с колебаниями температуры;
- 4) предотвращение влияния вибраций телескопа и ртутного зеркала на положение звезд;
- 5) обеспечение чистоты ртутного зеркала на длительный срок.

Дополнительные задачи были связаны со спецификой наблюдений на Луне:

- 6) обеспечение нормальной эксплуатации приводного механизма трубы в условиях вакуума и запыленности;
- 7) обеспечение устойчивой установки телескопа на лунном грунте.

В настоящей работе представлены реализованные и потенциальные решения перечисленных задач.

1. Под действием солнечного излучения в определенном направлении труба может наклониться вследствие асимметричного теплового расширения, и если такой наклон достаточно велик, то есть вероятность, что координаты звезды на ПЗС-матрице сместятся. Зенитный телескоп может компенсировать эффект такого наклона за счет ртутного горизонта, расположенного в середине фокусного

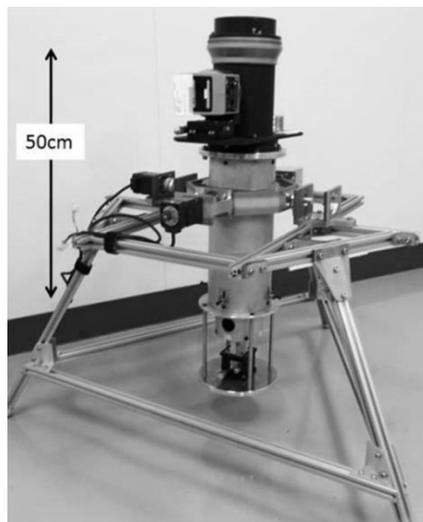


Рис. 1. Опытная модель зенитного телескопа

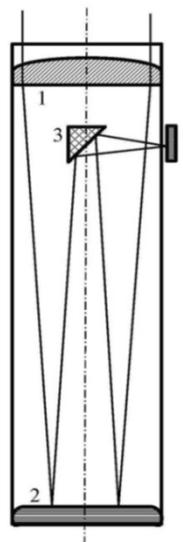


Рис. 2. Оптическая система телескопа.

- 1 – объектив; 2 – ртутное зеркало; 3 – призма; 4 – ПЗС-матрица

расстояния объектива. Световой поток, падающий вертикально, всегда фокусируется в одной и той же точке на ПЗС-матрице даже во время вращения трубы, поскольку ртутное зеркало всегда параллельно плоскости горизонта. В соответствии с моделированием траекторий лучей допускается наклон на 80" для обеспечения точности позиционирования в 0,01".

С помощью компьютерной программы TAS Нода (Noda) [10] был проведен тепловой анализ цилиндрической трубы, изготовленной из углепластика (CFRP) – материала с низким коэффициентом теплового расширения – и установленной вертикально на лунной поверхности. При моделировании на одну из сторон трубы падали горизонтальные лучи Солнца. В результате было получено практически симметричное распределение температуры по оси, то есть разница температур на противоположных сторонах трубы оказалась минимальной за счет многослойного изоляционного покрытия (рис. 3). Данная закономерность была подтверждена тепловыми испытаниями углепластиковой трубы меньшего размера (диаметром 80 мм и высотой 300 мм) в условиях вакуума (рис. 4) [11]. Скорее всего, наклон трубы на Луне под действием солнечных лучей составит не более 80".

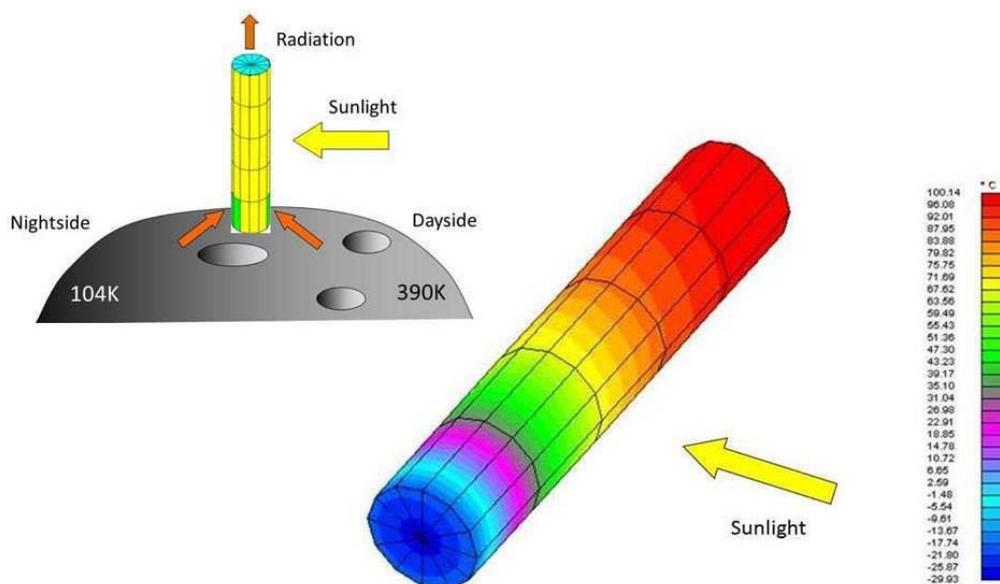


Рис. 3. Тепловая модель телескопа на Луне (вверху слева) и распределение температур на трубе с многослойным изоляционным покрытием (внизу справа).

Телескоп состоит из трубы (углепластик, теплопроводность 5 Вт/м/К, удельная теплоемкость 1,256 Дж/г/К, масса 5120 г, теплоемкость 6543 Дж/К, плотность 1,6 г/см³), линзы объектива (0,95 Вт/м/К, 0,838 Дж/г/К, 3750 г, 3,140 Дж/К, 2,5 г/см³) и многослойного изоляционного покрытия (коэффициент поглощения 0,8, эффективный коэффициент излучения 0,6) [10].

Radiation – излучение;
Nightside – ночная сторона;
Sunlight – солнечный свет;
Dayside – дневная сторона



Рис. 4. Тепловые испытания трубы в вакуумной камере [11]

2. Для достижения точности при определении изображений звезд были проведены эксперименты с центроидами в сотрудничестве с проектом НАОЯ JASMINE, в результате которых была достигнута погрешность около $1/300$ пиксела. Оценка центраида проводилась с помощью алгоритма, в соответствии с которым разница между расчетным и фактическим центром изображения звезды зависит от координаты ПЗС [12].

Добиться такого уровня точности во время натуральных наблюдений в телескоп, вероятно, будет сложнее ввиду большего количества помех по сравнению с условиями проведения экспериментов с центроидами. К таким помехам относятся атмосферная турбулентность, вибрации грунта, вибрации ртутного зеркала и перепады температуры. Вместе с тем конфигурация устройств при проведении эксперимента с центроидом проста: она включает только ПЗС-камеру, линзу объектива и точечный источник света, как показано на рис. 5. При сравнении результатов лабораторных экспериментов и результатов натуральных наблюдений условия экспериментов с центроидом были приняты за эталон.



Рис. 5. Устройство для экспериментов с центроидами, включающее ПЗС-камеру, объектив и пластину с точечными отверстиями, установленную спереди на оптическом рельсе

3. В результате изменения температуры могут деформироваться как сами оптические приборы, так и элементы конструкции телескопа, в частности труба. Ожидается, что изменение температуры за период примерно 27 дней составит около 50 К даже в области полюса, а в области низких широт Луны перепад температур достигнет 300 К. Моделирование траекторий лучей позволяет определить характер температурных деформаций. Касима с соавт. (Kashima et al.) [13] предложил применить дифракционные оптические элементы (ДОЭ) для линзы объектива телескопа, чтобы уменьшить воздействие температурных изменений. Оптические характеристики ДОЭ определяются не радиусом кривизны, а дифракционными решетками, поэтому воздействие температурных изменений можно снизить за счет использования материалов с низким коэффициентом теплового расширения или с низким коэффициентом преломления; при этом оптические характеристики останутся неизменными. Как показало моделирование, линза объектива с ДОЭ, по всей вероятности, уменьшает воздействие температурных изменений примерно до одной пятой показателя обычной линзы, в результате допускается изменение температуры до примерно 10° (рис. 6) [14].

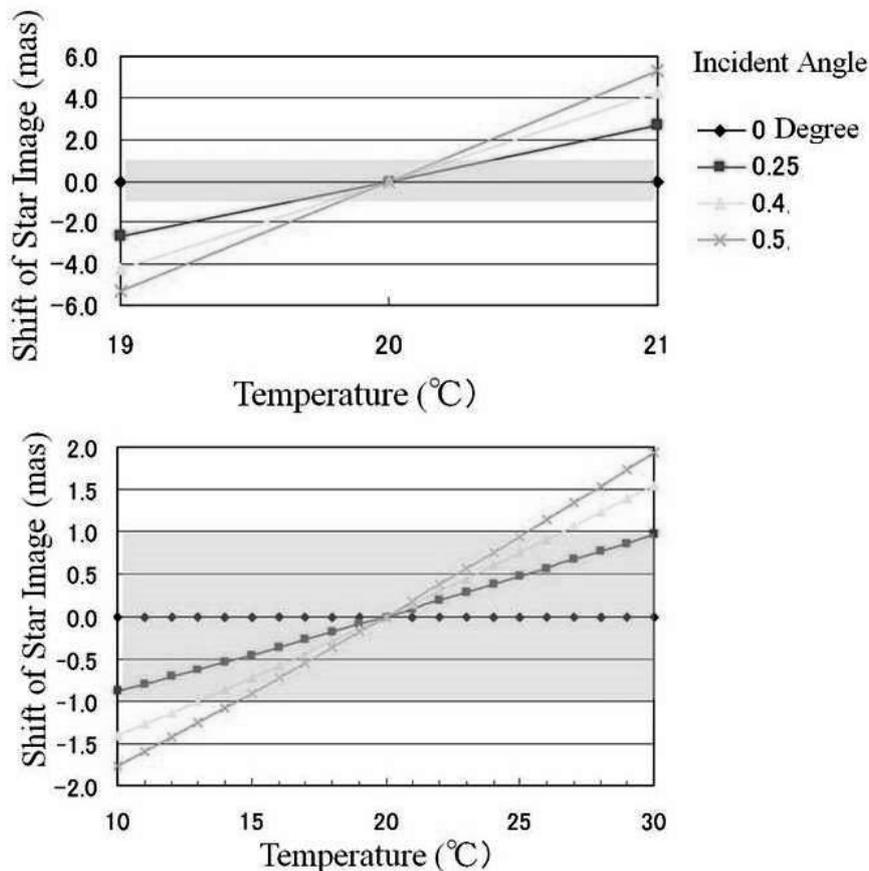


Рис. 6. Зависимость сдвига центра изображения звезды (*shift of star image*) от изменения температуры для обычной линзы (*вверху*) и линзы с ДОЭ (*внизу*). Области, выделенные серым цветом, обозначают диапазон, в котором сдвиг составляет менее 0,01" [14].

Incident angle – угол падения;
Degree – градусы

В то же время, если в поле зрения находится определенное количество звезд, мы можем определить характер сдвига изображений вследствие либо равномерного, либо аксиально-симметричного изменения температуры и ввести соответствующие поправки [8].

4. Ртутный горизонт является элементом телескопа, которому вибрации при-сущи в наибольшей степени. Для обеспечения высокой точности наблюдений важной задачей является создание такого ртутного горизонта, который был бы устойчив к вибрациям и в котором не возникал бы резонанс. Как правило, ртутный горизонт имеет неглубокое основание с почти треугольным сечением. Это связано с тем, что более мелкое коническое основание быстрее гасит поверхностные волны, а треугольное сечение обеспечивает более длительный период собственных колебаний по сравнению с прямоугольным сечением при одинаковой максимальной глубине [15]. Более длительный период собственных колебаний сужает диапазон частот внешних вибраций, индуцирующих поверхностную вибрацию ртутного горизонта, поскольку вызывать вибрации горизонта могут только внешние вибрации с частотой, превышающей частоту его собственных колебаний. Кроме того, треугольное сечение основания является предпочтительным, поскольку для него требуется меньшее количество ртути. Таким образом, необходимо выбрать только оптимальный диаметр и глубину основания для соответствующего телескопа.

Требуемый диаметр ртутного горизонта определяется с учетом калибра, угла поля зрения и внутреннего диаметра трубы. Калибр телескопа, рассматриваемого в данной работе, составляет 100 мм, угол поля зрения – $0,5^\circ$, а внутренний диаметр трубы – 100 мм; следовательно, диаметр ртутного горизонта должен быть более 80 мм. С учетом сказанного в данной работе принят диаметр 84 мм [16].

Что касается глубины ртутного горизонта, для ее определения были выбраны три величины: 0,25, 0,5 и 1,0 мм. Глубина ртутного горизонта менее 0,25 мм и более 1,0 мм оказалась нецелесообразной, поскольку в первом случае было невозможно обеспечить покрытие всей площади, а во втором – поверхность горизонта была постоянно покрыта рябью. Точность поверхности ртутного горизонта измерялась при наклонах в диапазоне от -270° до 270° с помощью интерферометра Zygo (GPI-XP) в Центре передовых технологий НАОЯ. При сравнении ртутных горизонтов глубиной 0,5 и 1,0 мм было обнаружено, что первый горизонт более устойчив и имеет более высокую точность поверхности при отсутствии наклона ($0,53 \lambda$ по высоте неровностей профиля и $0,09 \lambda$ по среднеквадратичному отклонению (rms) при глубине 0,5 мм и $1,63 \lambda$ по высоте неровностей профиля и $0,11 \lambda$ по среднеквадратичному отклонению при глубине 1,0 мм). В свою очередь, при сравнении ртутных горизонтов глубиной 0,5 и 0,25 мм первый горизонт оказался стабильнее, хотя разница между величинами точности поверхности при этом была незначительной (рис. 7). На основании полученных результатов для текущих экспериментов и наблюдений был выбран ртутный горизонт диаметром 84 мм и глубиной 0,5 мм [16]. Воздействие вибраций ртутного зеркала, вызванных вибрациями основания, исследовано в ходе лабораторных экспериментов, описанных ниже. Кроме того, предложен метод устранения воздействия вибраций.

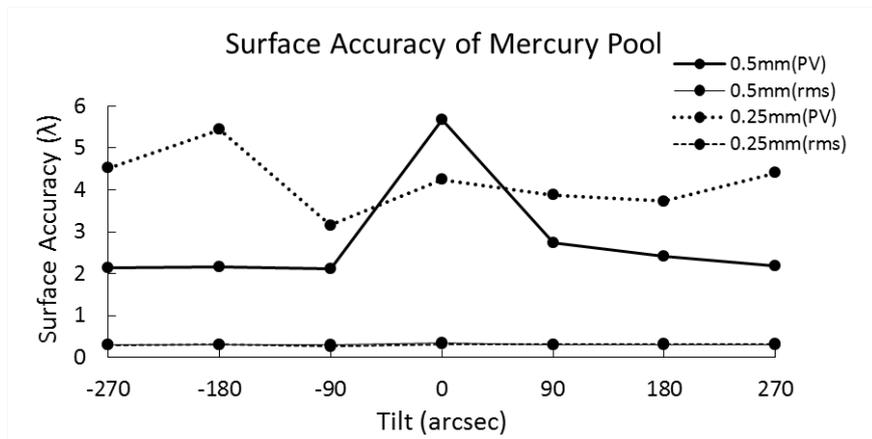


Рис. 7. Изменение точности поверхности ртутного горизонта (*surface accuracy of mercury pool*) глубиной 0,5 и 1,0 мм при различных наклонах, угл. α (*tilt, arcsec*). *PV* – высота неровностей профиля; *rms* – среднеквадратичное отклонение

5. Ртуть легко вступает в реакции с металлами и загрязняется взвешенными веществами из воздуха. Важной задачей является поддержание чистоты ртутного зеркала в течение длительного времени. Цурута с соавт. (Tsuruta et al.) [17] разработал ртутный горизонт, представленный на рис. 8. Ртуть находится в герметичной вакуумной емкости из нержавеющей стали, оснащенной оптическим окном, для поддержания определенного давления в условиях вакуумной среды на Луне; при этом ртуть контактирует только с тарелкой основания, изготовленной из медной амальгамы. На емкости с ртутью имеется защитное кольцо для предотвращения ее разлива. Зеркало остается чистым минимум несколько суток.



Рис. 8. Поперечный разрез ртутного горизонта, установленного в опытной модели телескопа (*вверху*), и его внешний вид (*внизу*) [17]

6. Вертикальное положение трубы телескопа обеспечивает контроллер углового положения, состоящий из двух электродвигателей с редукторами, рамы со штативом, двухкомпонентного инклинометра и компьютера. Погрешность приведения в вертикальное положение составляет порядка $0,001^\circ$ ($3,6''$) в зависимости от разрешения инклинометра [8]. Танигучи (Taniguchi) [18] провел испытания приводного механизма, чтобы доказать его работоспособность даже в условиях вакуума. В течение 91 часа периодически включали приводной механизм, помещенный в вакуум, и приводили в движение маховое колесо, установленное сверху на оси редуктора вместо трубы телескопа (рис. 9). Максимальная скорость вращения составила около 3,6 град/с, то есть больше, чем в режиме наблюдений на Луне. По окончании экспериментов показатели угла вращения двигателя, потребляемая мощность и температура компонентов были в норме.

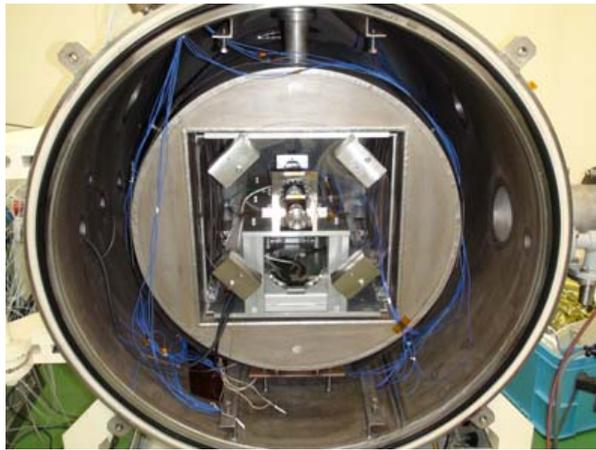


Рис. 9. Испытательный модуль приводного механизма в вакуумной камере

7. Ожидается, что при приземлении на лунный грунт телескоп просядет, поскольку лунный грунт представляет собой не твердую, а легкую пылеватую породу. Цурута (Tsuruta) [19] осуществил имитацию просадки на лунном грунте объекта, сопоставимого с телескопом, при приземлении; методика испытаний предусматривала падение объекта на материал, имитирующий рыхлый лунный грунт. В процессе экспериментов использовались два вида падающих объектов (один массой 196 г и диаметром 5 см, а второй – массой 226 г и диаметром 2 см). Глубину просадки при падении с высоты 20 см измеряли с помощью лазерного интерферометра (5526A, Keysight). Падающие объекты отбирались таким образом, чтобы их размер и масса были пропорциональны размеру и массе телескопа на Луне. В момент падения объекты погружались в грунт всего на несколько десятков микрон, а процесс проседания останавливался через несколько часов (рис. 10).



Рис. 10. Устройство для эксперимента с падением объекта на материал, имитирующий лунный грунт, и падающий объект на грунте (внизу справа).

Dropping mechanism – механизм сброса;
Regolith simulant – имитация лунного грунта;

Laser interferometer – лазерный интерферометр;

Falling object – падающий объект

Результаты наземных экспериментов

Эксперименты с центроидом

Эксперименты с центроидом выполнялись с целью добиться максимальной точности определения положения центра изображений звезд. Результаты экспериментов с центроидом уже официально опубликованы [12, 10]. Данные, полученные 1 апреля 2015 г., были повторно проанализированы с помощью того же программного обеспечения, которое использовалось для лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений, с целью сопоставления результатов. Блок данных включает 1207 фотографий, снятых с интервалом в 2 с; на каждой фотографии зафиксировано 9 изображений искусственных звезд. Для анализа было отобрано 5 изображений самых ярких звезд. Наибольшую яркость изображение каждой звезды имеет в области центра, и интенсивность ее снижается по мере удаления от центра в соответствии с гауссовским распределением. Компьютерная программа определяет центроид, применяя к изображению функцию гауссовского распределения; при этом положение оси симметрии функции принимается за центр координат.

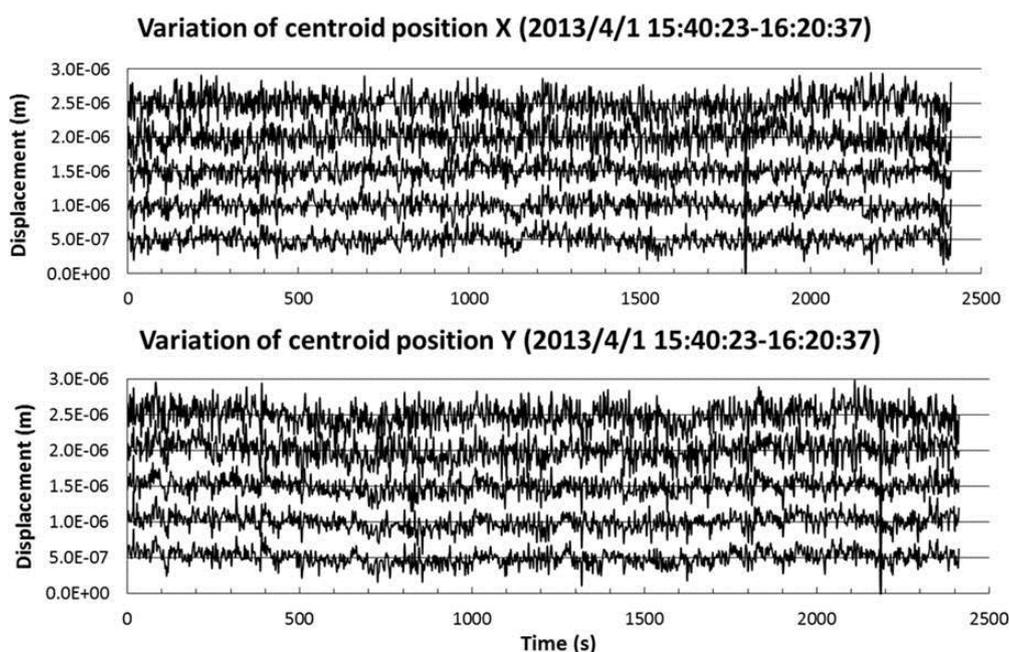


Рис. 11. Изменение центроидов изображений звезд в направлениях x и y .
Изображения пяти самых ярких звезд показаны снизу вверх в порядке усиления яркости.

Variation of centroid position – изменение координаты центроида;

Displacement – смещение; *Time (s)* – время (с)

Изменение центров координат пяти искусственных звезд показано на рис. 11. ПЗС-камеру медленно перемещали в вертикальном направлении (направление y на рисунке) с постоянной скоростью около $0,43$ мкм/с, имитируя движение изображений настоящих звезд. Сначала с помощью приближения по методу наименьших квадратов избавились от линейного тренда. Как видно из рис. 11, преобладают высокочастотные вариации, в частности беспорядочные шумы; при-

существуют также компоненты с более низкой частотой, которые характерны почти для всех звезд на одном снимке. Высокочастотные вариации не зависят от типа звезд, и можно считать, что они возникают в связи с так называемой «точностью определения центроида», в которой преобладает беспорядочный шум. Вариации с более низкими частотами, в свою очередь, скорее всего связаны с шумом среды, например механическими вибрациями и колебаниями воздуха.

Мы убедились, что более высокочастотные компоненты имеют случайный характер, поскольку погрешность, описываемая среднеквадратическим отклонением, почти пропорциональна отношению «сигнал–шум», которое определяется как отношение пиковой амплитуды изображения звезды к среднеквадратическому отклонению шума вне изображения (рис. 12). Среднеквадратическое отклонение шума рассчитывается для матрицы размером 16×16 пикселей за исключением участка изображения звезды, размещенного в центре указанной матрицы. Среднеквадратическое отклонение изменения более высокочастотных компонент является стандартным для характеристики точности лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений, описанных в следующих разделах.

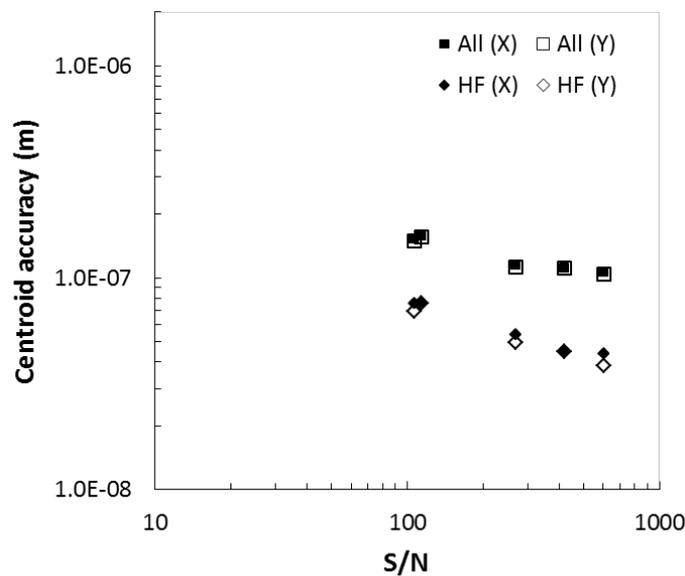


Рис. 12. Зависимость между отношением «сигнал–шум» (S/N) и точностью центроида (*centroid accuracy*). «All» (все) означает вариацию центроида, включая все компоненты; «HF» (ВЧ) – высокочастотные компоненты ($f > 0,15$ Гц)

Лабораторные эксперименты

Лабораторные эксперименты проводились 19 августа 2014 года с использованием опытной модели и оптической системы для создания искусственных звезд. Поток света от лампы накаливания с вольфрамовой нитью направлялся на сетку с 21-точечным отверстием, и с помощью коллиматора (CL-1000, Pearl Opt. Ind. Co.) из рассеянного светового потока были получены параллельные световые пучки, которые создавали имитацию настоящих звезд. В трубу телескопа поступал свет, отраженный от наклонного зеркала, установленного на алюминиевой раме (рис. 13). Изображения звезд снимались на видеокамеру (MTV63-VTN, Mintron Enterprise Co. Ltd.) со скоростью 30 кадров в секунду. На раме

были также установлены три датчика сейсмоприемников (МТКВ-1С, МТКН-1С, Sato Trading Co.) для мониторинга фоновых вибраций и механических вибраций рамы.

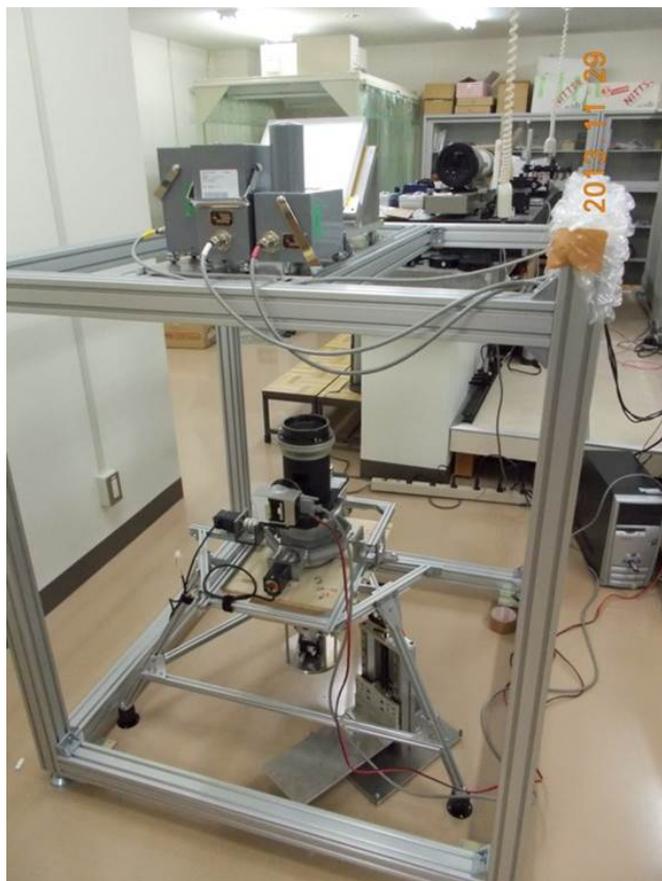


Рис. 13. Опытная модель телескопа (*вид спереди*) и коллиматор для создания изображений искусственных звезд

Проведено три серии измерений; в первом эксперименте для сравнения вместо ртутного горизонта использовали плоское зеркало. На дисплее видеокамеры удалось зафиксировать изображения только четырех звезд ввиду ограниченности дисплея по площади. Результаты 2-го эксперимента представлены на рис. 14 в качестве примера. Общие вариации на рис. 14 более ярко выражены, чем в экспериментах с центроидами, результаты которых представлены на рис. 11, при том что разброс координат примерно в 2 раза больше, чем в экспериментах с центроидами. Общие вариации также отмечены в спектрах изменений положения центроидов во втором и третьем экспериментах (рис. 15), в которых имеются сильные пики около 0,2 Гц и 5,5 Гц, а амплитуды составляют около 1 мкм, что соответствует 0,2" для данного телескопа. Скорее всего, источником таких периодических вариаций является ртутный горизонт, поскольку в спектрах первого эксперимента такие вариации не наблюдаются. Проблеме вибраций ртутного зеркала посвящен следующий раздел. Спектры фоновых вибраций, в свою очередь, не содержат пиков, которые могут повлиять на изменение координат (рис. 16).

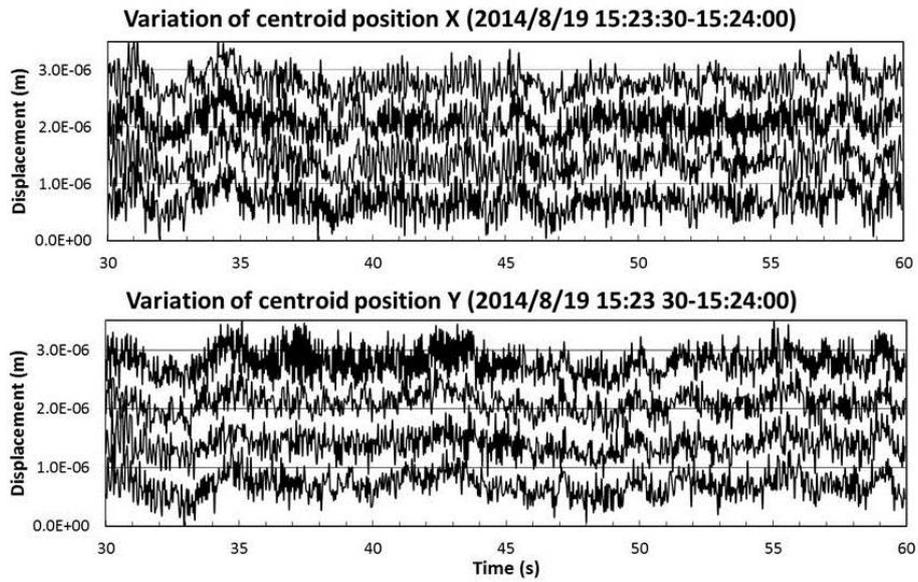


Рис. 14. Изменение координат центров изображений четырех звезд в направлениях X и Y.
Variation of centroid position – изменение координаты центроида;
Displacement – смещение; Time (s) – время (с)

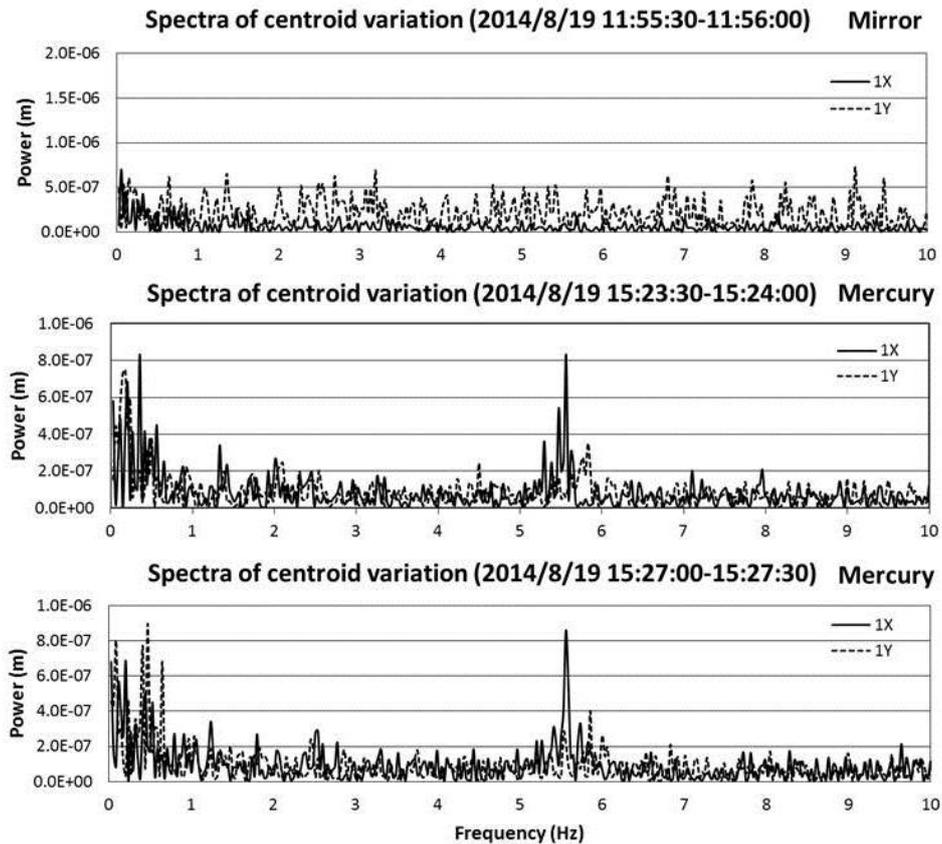


Рис. 15. Спектры изменения координат центроидов (*Spectra of centroid variation*)
в трех циклах экспериментов.
Frequency (Hz) – частота (Гц)

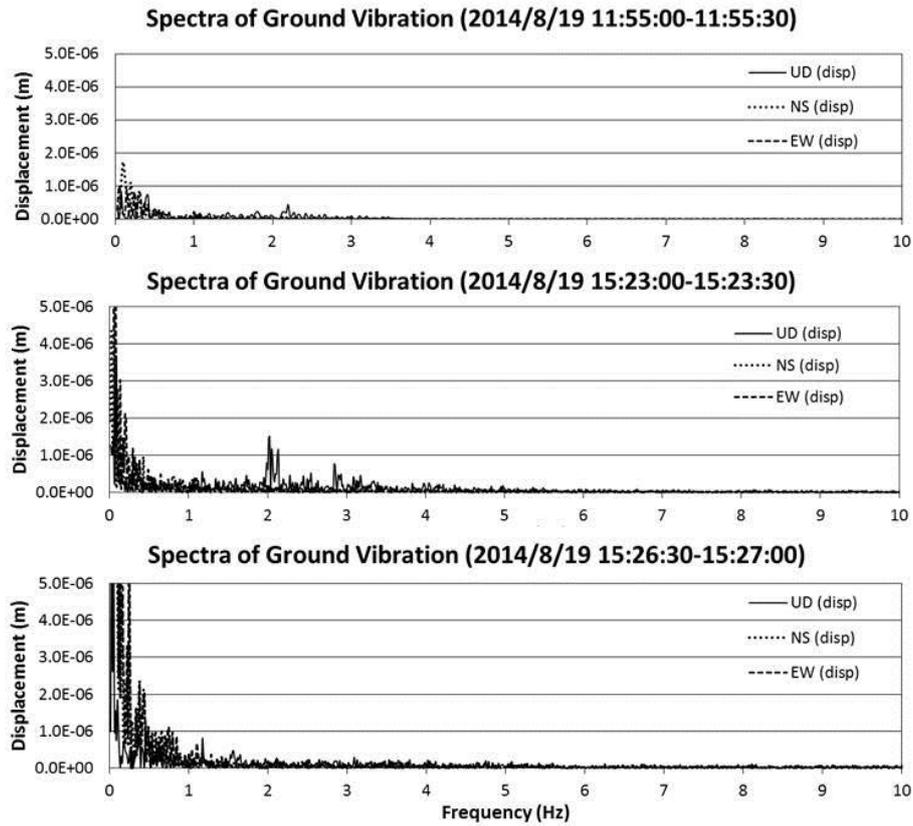


Рис. 16. Спектры фоновых вибраций (*Spectra of ground vibration*) в трех компонентах за периоды, соответствующие периодам в экспериментах с центроидами.
Displacement – смещение; *Frequency (Hz)* – частота (Гц)

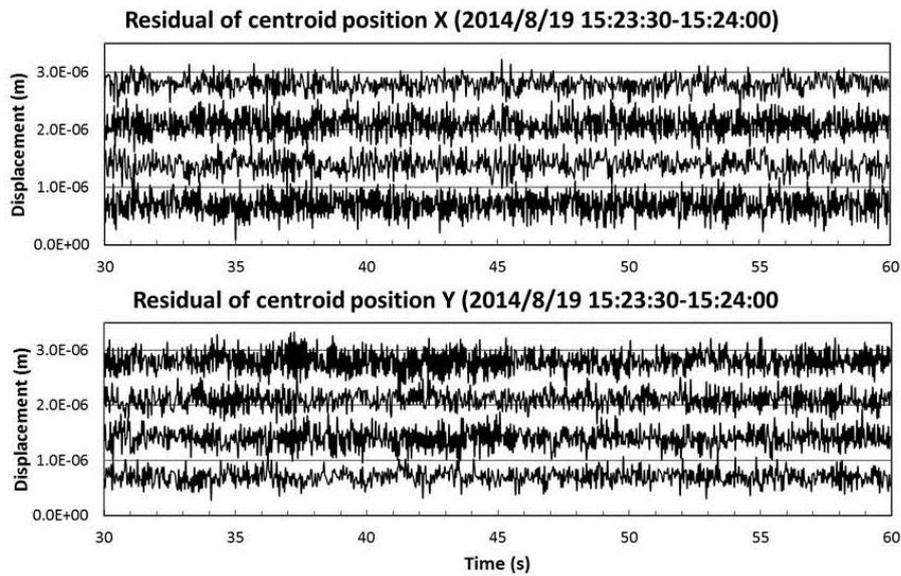


Рис. 17. Остаточная вариация положения центра (Residual of centroid position) после исключения общих вариаций.
Displacement – смещение; *Time (s)* – время (с)

Общие вариации были исключены путем вычитания среднего значения 4 блоков данных из каждого блока данных, поскольку яркость изображений звезд примерно одинакова, и общие вариации являются преобладающими. Результаты представлены на рис. 17, а соответствующие спектры – на рис. 18. Можно утверждать, что общие компоненты практически исключены из величин, а среднеквадратическое отклонение остаточных величин можно считать погрешностью положения центроидов в лабораторных экспериментах. Среднеквадратическое отклонение остаточных величин более чем в два раза превышает среднеквадратическое отклонение в экспериментах с центроидами. Различия в точности центроидов подробнее обсуждаются в следующих разделах.

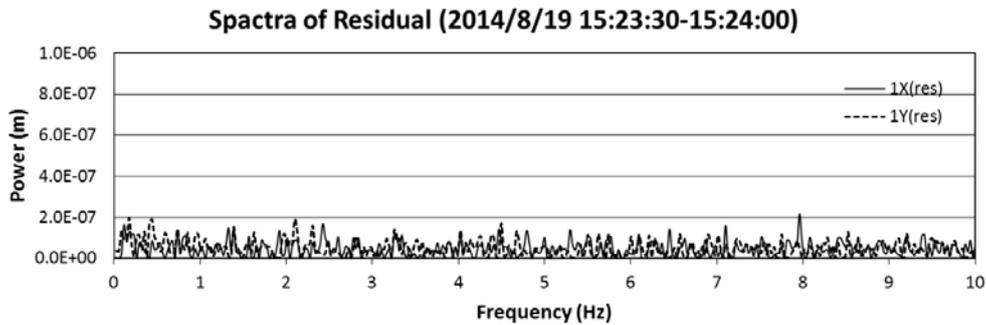


Рис. 18. Спектры остаточного положения центроида (*Residual of centroid position*), показанного на рис. 17. *Frequency (Hz)* – частота (Гц)

Вибрации ртутного зеркала

Вибрации ртутного зеркала можно оценить теоретически. Представим поверхность ртутного зеркала в виде функции $z = \zeta(r, \theta, t)$, где r – расстояние по радиусу, θ – азимут, z – высота, t – время. Тогда можно получить следующее соотношение:

$$\zeta = \frac{FJ_1(kr)\cos\theta\cos\omega t}{gka\{J_0(ka) - J_2(ka)\}/2}. \quad (3)$$

Коэффициент усиления выражается формулой

$$G(f) = \frac{J_1(kr)}{kaJ_1'(ka)}, \quad (4)$$

где F – амплитуда внешней вибрации, J_n – функция Бесселя первого рода, $k = \omega / c$, $c = \sqrt{gh}$, ω – угловая частота внешней вибрации, $f = \omega / 2\pi$, a и h – радиус и глубина ртутного зеркала соответственно [21, 22]. Резонансные характеристики ртутных горизонтов диаметром 84 мм и глубиной 0,25 и 0,5 мм представлены на рис. 19. В области 5 Гц отмечено много пиков, то есть вибрации ртутного зеркала, скорее всего, имеют частоту около 0,5 и 5,5 Гц и вызваны вибрациями Земли, несмотря на разное поперечное сечение у теоретической

модели (прямоугольное) и у фактической модели (треугольное). Резонансная частота треугольного сосуда теоретически выше, чем частота прямоугольного сосуда примерно в 1,3 раза [23].

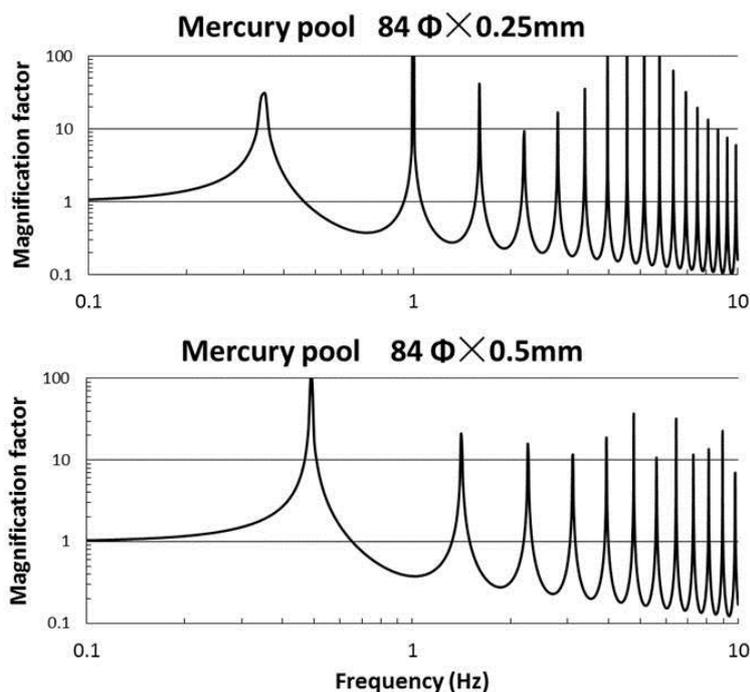


Рис. 19. Резонансные характеристики ртутных горизонтов (*Mercury pool*) диаметром 84 мм и глубиной 0,25 мм (*вверху*) и 0,5 мм (*внизу*). *Magnification factor* – коэффициент усиления; *Frequency (Hz)* – частота (Гц)

Для подтверждения фактической вибрации ртутного зеркала с частотой около 0,5 и 5,5 Гц были проведены исследования вибрации ртутного зеркала, которое использовалось для лабораторных экспериментов. Ртутный горизонт установили на подставку и подвергали его вибрациям с частотой 0,1, 0,3, 0,5, 1,0, 2,0 и 5,0 Гц в течение 60 с. Форму поверхности ртутного горизонта наблюдали при помощи лазерного интерферометра. Изменение формы ртутного зеркала во времени оценивалось путем аппроксимации интерференционной картины формы поверхности функцией

$$f(x, y) = A \sin(\alpha x - \beta y) + B \cos(\alpha x - \beta y) + ax + by + c. \quad (5)$$

Затем направление хода интерференционной картины (соответствующее направлению наклона поверхности), длину волны формирования интерференционной полосы (угол наклона) и фазу интерференционной полосы (вертикальное смещение) выразили соответственно через $\tan^{-1}(\beta/\alpha)$, $\cos(\tan^{-1}(\beta/\alpha))/a$ и $\tan^{-1}(B/A)$. Диапазоны изменения указанных параметров во времени представлены на рис. 20. Таким образом было подтверждено, что при определенных условиях ртутное зеркало вибрирует с частотой около 0,5 и 5,5 Гц. При этом

представляется, что вибрация ртутного зеркала вызвана внешней вибрацией с более низкой частотой.

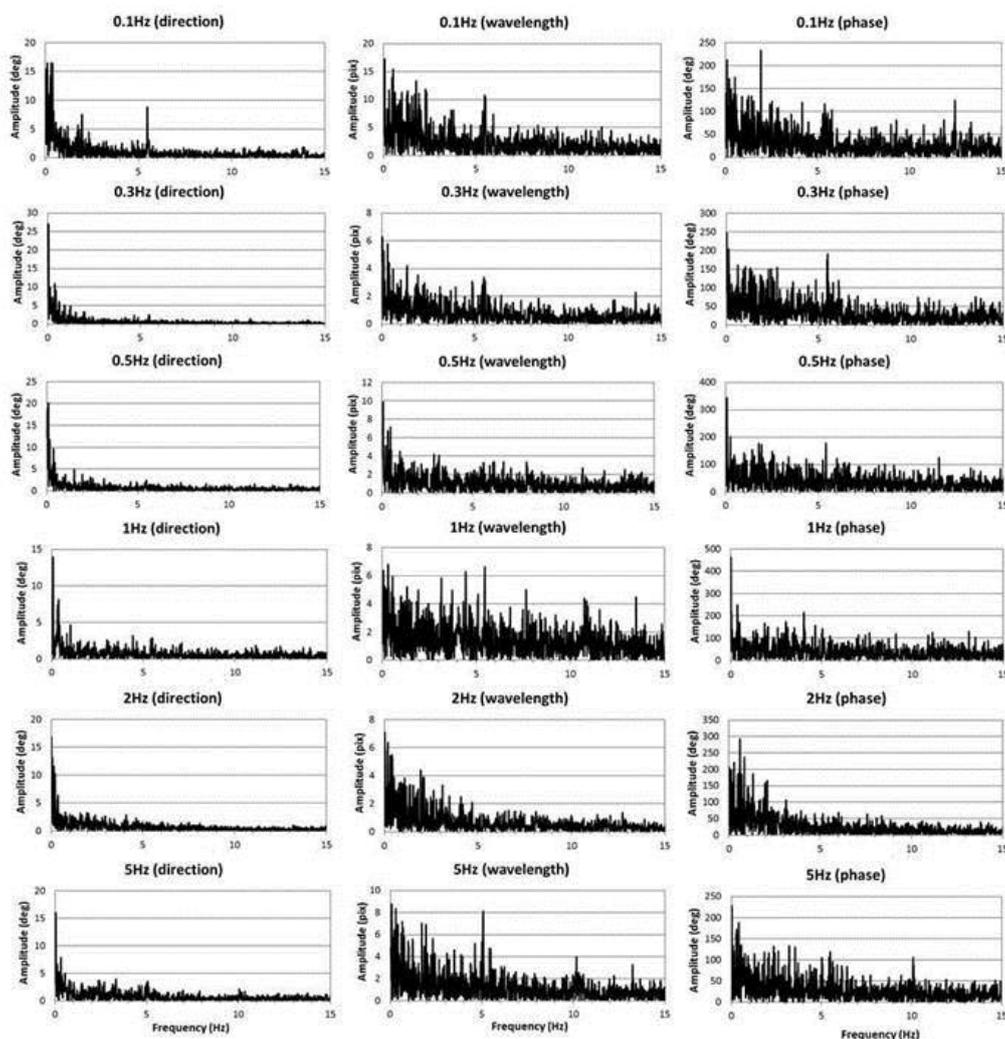


Рис. 20. Спектры вибрации ртутного горизонта.

Частота внешних вибраций, действующих на ртутное зеркало, составляет от 0,1 Гц (вверху) до 5,0 Гц (внизу). Представлены три компонента интерференционной картины: направление (слева), длина волны (в середине) и фаза (справа)

Натурные наблюдения

Изображение реальных звезд было впервые получено с помощью опытной модели телескопа на базе Космической обсерватории НАОЯ (Мидзусава, Япония) 16 сентября 2014 г. Основной задачей данного эксперимента была оценка точности опытной модели телескопа при определении центрального положения реальных звезд на матрице ПЗС; при этом получение геофизических данных, в частности УОЛ или параметров вращения Земли, не предусматривалось, поскольку программное обеспечение для пересчета положения звезд на ПЗС для положения в земной системе координат на тот момент еще не было разработано. Несколько звезд 7-8 величины наблюдали с экспозицией 0,5 с (рис. 21). Из

шесть блоков данных наблюдений для анализа использовали только два, поскольку небо было недостаточно ясным для получения оптимального соотношения «сигнал–шум». Позднее данные эксперименты были несколько раз проведены повторно; однако все они оказались неудачными, поскольку не удалось получить данные лучшего качества, чем во время эксперимента 16 сентября.



Рис. 21. Изображения звезд, зафиксированные ПЗС-камерой

В каждом блоке данных было получено порядка 20 изображений с интервалом в 1 с. Затем определили положение координат центроидов звезд в поле зрения тем же способом, что и в ходе лабораторных экспериментов. Для записи изображений звезд использовали охлаждаемую ПЗС-камеру для астрономических наблюдений (BJ-42L, Vitran Co.). Большинство звезд были слишком тусклыми для видеокамеры, которая использовалась при проведении лабораторных экспериментов для записи с оптимальным отношением «сигнал–шум», поэтому получить данные с высокой частотой регистрации, сопоставимые

с данными по вибрации, не удалось. Пример изменения положения центроидов звезд представлен на рис. 22. Отношение «сигнал–шум» в целом ниже (от 4 до 13), чем в лабораторном эксперименте (рис. 23).

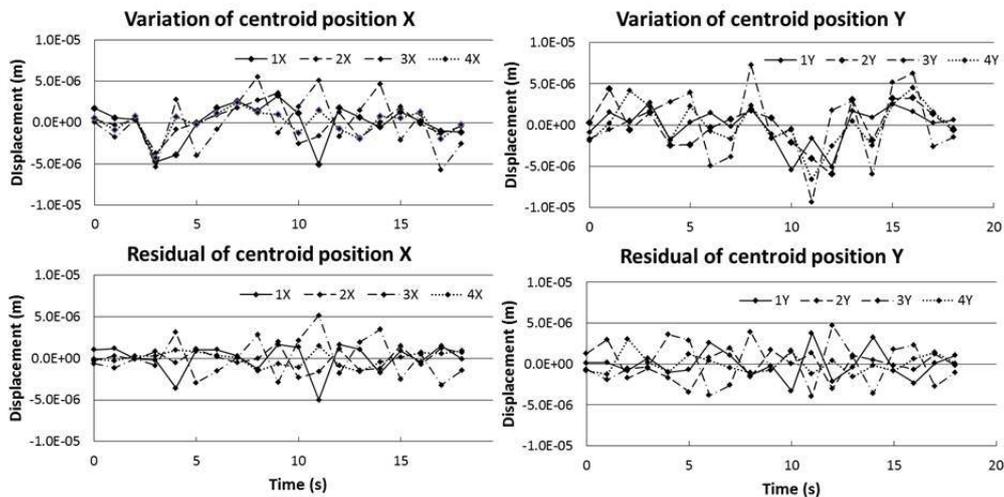


Рис. 22. Изменение положения центроидов в ходе натурных наблюдений (верхние кривые) и остаточные их изменения после исключения общих вариаций (нижние кривые).

Variation of centroid position – изменение координаты центроида;

Residual of centroid position – остаточная вариация положения центроида

Displacement – смещение; *Time (s)* – время (с)

Изменение положения координат центроида выглядит более значительным, чем в лабораторных экспериментах. Среднеквадратическое отклонение изменения уменьшается, если исключить общие вариации, как это было сделано в лабораторных экспериментах, однако величина уменьшения будет не слишком велика (рис. 22). Скорее всего, причина такого незначительного уменьшения заключается в том, что среднеквадратическое отклонение случайной погрешности имеет такую же величину, что и для общих компонент. Эффекты вибрации ртутного горизонта в этом случае должны быть исключены так же, как и в лабораторных экспериментах.

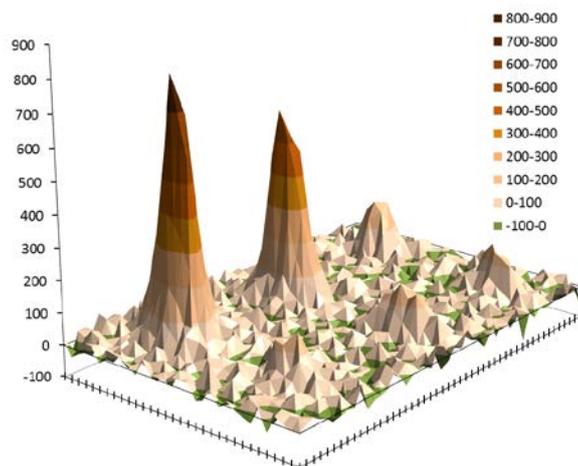


Рис. 23. Распределение светимости изображений звезд, видимых в поле зрения. Изображение звезд записано на ПЗС-матрице размером 16×16 пикселей; матрицы расположены в 2 линии и 3 ряда для сравнения

Анализ полученных результатов

При сравнении результатов лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений было обнаружено, что среднеквадратическое отклонение изменения положения координат центроида в первом случае несколько меньше, чем во втором. Вибрации грунта и вибрации ртутного зеркала могут влиять на среднеквадратическое отклонение вариаций. Однако это воздействие должно проявляться в общих вариациях, которые уже были исключены в обоих случаях. Амплитуды вибраций грунта, в свою очередь, были почти одинаковыми в обоих видах экспериментов.

Другая возможная причина заключается в том, что изображения звезд, полученные при натуральных наблюдениях, выглядят темнее, чем на изображениях, полученных в ходе лабораторных экспериментов, где в качестве источника света использовали лампу накаливания. Действительно, отношение «сигнал–шум» на изображениях звезд, полученных при натуральных наблюдениях, было намного меньше, чем в ходе лабораторных экспериментов. Результат численного моделирования показывает, что погрешность определения координат центроида обратно пропорциональна среднеквадратическому отклонению шума. В модели нормально распределенные числа были приписаны к узлам сетки 16×16 , а случайные числа введены таким образом, чтобы отношение «сигнал–шум» составляло соответственно 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} и $0,1$ [9].

Источником случайных шумов в основном является пуассоновский шум; при этом известно, что среднеквадратическое отклонение пуассоновского шума равно квадратному корню из числа фотонов, входящих в пиксел. Очевидно, что погрешность в оценке положения центраида пропорциональна квадратному корню из числа фотонов, поскольку отношение «сигнал–шум» в каждом пикселе равно $N / \sqrt{N} = \sqrt{N}$. Существует эмпирическое соотношение

$$\sigma = 1.5 / \sqrt{N}, \tag{6}$$

где σ – неопределенность оценки положения центраида, а N – число фотонов [24]. Хотя определение отношения «сигнал–шум» в контексте данной статьи отличается от определения для дробового шума, по большому счету они аналогичны. Предполагается, что число фотонов, входящих в пиксел за пределами изображений звезд, пропорционально числу фотонов, входящих в пиксел на пике изображения. Тогда мы можем привести следующее соотношение:

$$n_{sur} = \sqrt{N_{sur}} = \sqrt{cN_p}, \tag{7}$$

где N_{sur} и n_{sur} – число фотонов и среднеквадратическое отклонение шума, входящие во внешний пиксел, соответственно; N_p – число фотонов, входящих в центральный пиксел; c – коэффициент. В этом случае отношение «сигнал–шум» (SNR) принимает вид:

$$\text{SNR} = \frac{N_p}{n_{sur}} = \frac{N_{sur}}{c\sqrt{N_{sur}}} = \frac{\sqrt{N_{sur}}}{c}. \tag{8}$$

Подставив (8) в (6), получим отношение:

$$\sigma = c' / \text{SNR}, \tag{9}$$

где $c' = 1.5/c$. Данное уравнение означает, что точность центраида обратно пропорциональна отношению «сигнал–шум».

Рассмотрим соотношение между среднеквадратическим отклонением вариации центраида и отношением «сигнал–шум», полученными в результате экспериментов с центраидами, лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений. Как видно из рис. 24, среднеквадратическое отклонение вариации центраида действительно обратно пропор-

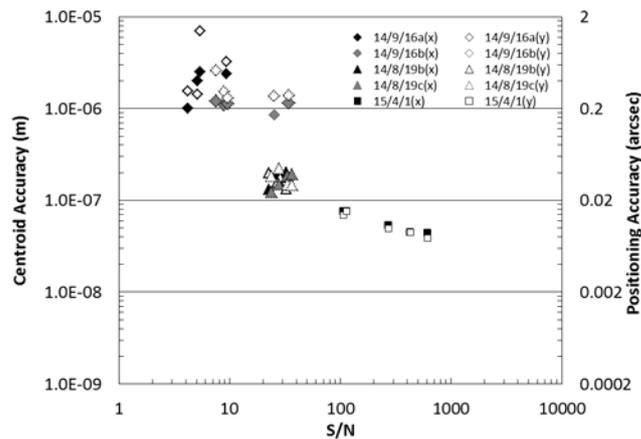


Рис. 24. Среднеквадратическое отклонение координат центраида в зависимости от отношения «сигнал–шум» для трех видов экспериментов.

Centroid position (m) – погрешность центраида (мкм);
Positioning accuracy (arcsec) – погрешность в положении (угл. с)

ционально отношению «сигнал–шум». Это означает, что погрешности, возникающие при оценке центроида после корректировки систематических погрешностей, являются практически случайными величинами, вызванными пуассоновским шумом. Возможно также, что погрешность положения центроида достигнет 0,01" при достаточно высоком отношении «сигнал–шум».

Заключение

Была создана опытная модель телескопа типа фотографической зенитной трубы, с использованием которой проведены лабораторные и натурные эксперименты с целью оценки погрешностей малогабаритного переносного телескопа при наблюдении за звездами. Ниже приводятся результаты и выводы:

1. Погрешность определения координат центроида при натуральных наблюдениях составила от 0,1 до 0,5", а в условиях лабораторных экспериментов – от 0,02 до 0,05".
2. Данные погрешности несколько выше погрешностей, полученных в экспериментах с центроидами, которые при измерениях составляли менее 0,01" (1/200 пиксела).
3. Остаточные вариации определяемого положения центроида после исключения систематических и общих погрешностей являются практически случайными, а среднеквадратическое отклонение остаточных величин обратно пропорционально отношению «сигнал–шум» на изображениях звезд.
4. Точность 0,01" вполне может быть достигнута, если отношение «сигнал–шум» будет составлять порядка 5000, а воздействие помех, в частности вибраций, будет устранено.
5. Эффекты вибрации ртутного зеркала, которые могут стать причиной погрешности в центроиде 1", являются практически одинаковыми для звезд, находящихся в одном поле зрения; их можно парировать путем исключения средних показателей этих вариаций.
6. Наблюдения за УОЛ и вращением Земли будут проводиться, как только появится программное обеспечение для преобразования координат, а также после того, как будет оценена стабильность наблюдений в долгосрочной перспективе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yokoyama, K., Manabe, S. and Sakai, S., History of the International Polar Motion Service/Latitude Service, *Polar Motion: Historical and Scientific Problems ASP Conference Series*, 208, 2000 (Eds. S. Dick, D. McCarthy and B. Luzum), 2000, pp. 147–162.
2. Hirt, C. and Bürki, B., The Digital Zenith Camera – a new high-precision and economic astrogeodetic observation system for real-time measurement of deflections of the vertical, *Proc. 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission of the International Association of Geodesy, Thessaloniki, Greece (ed. I. Tziavos)*, 2002, pp. 161–166.
3. Heiskanen, W. A. and Moritz, H., *Physical geodesy*, Freeman, 1966, p. 364.
4. Li, Z. X., Li, H., Li, Y.F. and Han, Y. B., Non-tidal variations in the deflection of the vertical at Beijing Observatory, *J. Geodesy*, 2005, vol. 78, pp. 588–593, DOI 10.1007/s00190-004-0421-2.
5. Hanada, H., Heki, H., Araki, H., Matumoto, K., Noda, H., Kawano, N., Tsubokawa, T., Tsuruta, S., Tazawa, S., Asari, K., Kono, Y., Yano, T., Gouda, N., Iwata, T., Yokoyama, T., Kanamori, H., Funazaki, K. and Miyazaki, T., Application of PZT telescope to In-situ Lunar Orientation Measurement (ILOM), *International Association of Geodesy Symposia*, 2004, vol. 128, pp. 163–168.
7. Noda, H., Heki, K. and Hanada, H., In-situ Lunar Orientation Measurement (ILOM): Simulation of observation, *Adv. Space Res.*, 2008, vol. 42, pp. 358–362.

8. Williams, J. G., Boggs, D. H., Yoder, C. F., Ratcliff, J. T. and Dickey, J. O., Lunar rotational dissipation in solid body and molten core, *J. Geophys. Res.*, 2001, vol. 106, pp. 27933–27968.
9. Hanada, H., Araki, H., Tazawa, S., Tsuruta, S., Noda, H., Asari, K., Sasaki, S., Funazaki, K., Satoh, A., Taniguchi, H., Kikuchi, M., Takahashi, T., Yamazaki, A., Ping, J., Kawano, N., Petrova, N., Gouda, N., Yano, T., Yamada, Y., Niwa, Y., Kono, Y., and Iwata, T., Development of a digital zenith telescope for advanced astrometry, *Science China*, 2012, vol. 55, pp. 723–732.
10. Hanada, H., Tsuruta, S., Asari, K., Araki, H., Noda, H., Kashima, S., Funazaki, K., Satoh, A., Taniguchi, H., Kato, H., Kikuchi, M., Sasaki, H., Hasegawa, T. and Gusev, A., Expected accuracy of a small telescope like PZT for observations of vertical gravity gradient and Lunar rotation 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry, 2016, 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2016), St. Petersburg, 2016, pp. 220–227.
11. Noda, H., Thermal analyses for ILOM project, *Report on the Research Meeting of Space Astronomy (Apr 16, 2004)*, 2004 (internal document).
12. Tsuruta, S., Noda, H., Hanada, H., and Asari, K., Temperature variation of a tube of the telescope for ILOM project on the lunar surface – results of simulations and experiments., *Proc. 27th Solar System Exploration Symposium*, 2005, pp. 73–76 (in Japanese).
13. Yano, T., Gouda, N., Kobayashi, Y., Tsujimoto, T., Nakajima, T., Hanada, H., Kan-ya, Y., Yamada, Y., Araki, H., Tazawa, S., Asari, K., Tsuruta, S. and Kawano, N., CCD Centroiding Experiment for the Japan Astrometry Satellite Mission (JASMINE) and In Situ Lunar Orientation Measurement (ILOM), *Publ. Astr. Soc. Pacific*, 2004, vol. 116, pp. 667–673.
14. Kashima, S., A telescope for In-Situ Lunar Orientation Measurement with a diffractive optical element, Patent Application No.2013-80826, 2013.
15. Kashima, S., Araki, H., Tsuruta, S., and Hanada, H., Proposal of adoption of DOE for In Situ Lunar Orientation Measurements (ILOM), *Proc. 31st Symposium on Techniques in Astronomy*, 2011, pp. 80–82 (in Japanese).
16. Rabinovich, A. B., Seiches and harbor oscillations, *Handbook of Coastal and Ocean Engineering (ed. Kim, Y. C.)*, 2009, pp.193–236.
17. Tsuruta, S., Hanada, H., Araki, H., Asari, K., Kashima, S., Utsunomiya, S., and Kamiya, T., Experimental development of mercury pool for ILOM project, *Proc. 32nd Symposium on Techniques in Astronomy*, 2012, pp. 65–68 (in Japanese).
18. Tsuruta, S., Hanada, H., Asari, K., Chiba, K., Yokokawa, R., Inaba, K., Funazaki, K., Taniguchi, H., Satoh, A., Kato, H., Kikuchi, M., Araki, H., Noda, H., and Kashima, S., Imaging experiments with a mercury pool in the experimental model of a telescope for ILOM project, *Proceedings of the 14th Space Science Symposium*, 2014, pp. 250–253 (in Japanese).
19. Taniguchi, H., Vacuum test of the driving mechanism (5th report), *Report on the Research Meeting of ILOM (June 25, 2012)*, 2012 (internal document).
20. Tsuruta, S., Hanada, H., Asari, K., and Tazawa, S., Experiments in simulated lunar surface environment (2), *Proc. 30th Symposium on Techniques in Astronomy*, 2011, pp. 105–108 (in Japanese).
21. Yano T., Araki, H., Gouda, N., Kobayashi, Y., Tsujimoto, T., Nakajima, T., Kawano, N., and Tazawa, S., CCD centroiding experiment for correcting a distorted image on the focal plane. *Publ Astron Soc Pacific*, 2006, vol. 118, pp. 1448–1454.
22. Lamb, H., *Hydrodynamics*, 6th ed., 1959, pp. 282–291.
23. Ishizaki, H., Discussion on the vibration of PZT mercury basin, *Report Tokyo Astronomical Observatory*, 1986, vol. 20, pp. 604–616 (in Japanese).
24. Rabinovich, A. B., Seiches and harbor oscillations, *Handbook of Coastal and Ocean Engineering (ed. Y. C. Kim)*, 2009, pp. 193–236.
25. Zhai, C., Shao, M., Goullioud, R. and Nemat, B., Micro-pixel accuracy centroid displacement estimation and detector calibration, *Proc. Roy. Soc. A.*, 2011, vol. 467, pp. 3550–3569.

Hanada H., Araki H., Noda H., Yano T., Gouda N., Kobayashi Y. (National Astronomical Observatory, Mitaka / Oshu, Japan; SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), Mitaka / Sagamihara, Japan), **Tsuruta S., Asari K., Tazawa S., Kashima S.** (National Astronomical Observatory), **Funazaki K., Satoh A., Taniguchi H., Kato H., Kikuchi M., Sasaki H., Hasegawa T.** (Iwate University, Morioka, Japan), **Yamada Y.** (Kyoto University, Kyoto, Japan), **Iwata T.** (Institute of Space and Astronautical Sciences, JAXA, Sagamihara, Japan; SOKENDAI), **and Gusev A.** (Kazan Federal University, Russia)
Development of a Small Telescope like PZT and Effects of Vibrations of Mercury Surface and Ground Noise. *Giroskopiya i Navigatsiya*. 2017. Vol. 25. No. 3 (98). P. 130–152.

Abstract. A PZT type telescope for observations of gravity gradient and lunar rotation was developed, and a Bread Board Model (BBM) for ground experiments was completed. Some developments were made for the BBM such as a tripod with attitude control system, a stable mercury pool and a method for collecting the effects of vibrations. Laboratory experiments and field observations were performed from August to September of 2014, in order to check the entire system of the telescope and the software, and the results were compared to the centroid experiments which pursue the best accuracy of determination of the center of star images with a simple optical system. It was also investigated how the vibrations of mercury surface affect the centroid position on Charge Coupled Device (CCD).

The results of the experiments showed that the effects of vibrations are almost common to stars in the same view, and they can be corrected by removing mean variation of the stars; and that the vibration of mercury surface can cause errors in centroid as large as 0.2 arcsec; and that there is a strong correlation between the Standard Deviation (SD) of variation of the centroid position and signal to noise ratio (SNR) of star images. It is likely that the accuracy of one (1) milli arcsecond is possible if SNR is high enough and the effects of vibrations are corrected.

Key words: zenith telescope, photographic zenith tube, gravity gradient, centroid.

Материал поступил 12.04.2017