

Моделирование видимого блеска космического аппарата «Спектр-Р» для планирования астрометрических наблюдений

05, май 2013

DOI: 10.7463/0513.0571011

Захваткин М. В.

УДК 521.3+520.82

Россия, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
zakhvatkin@kiam1.rssi.ru

Введение

Космический аппарат «Спектр-Р» (рис. 1) находится на эволюционирующей высоко-апогейной орбите спутника Земли. Полуось орбиты составляет 190 тыс. км, расстояние в апоцентре изменяется от 350 до 270 тыс. км. Для расширения множества наблюдаемых радиоисточников орбита аппарата была выбрана таким образом, что наклонение и направление линии апсид претерпевают существенные изменения в течение полета. С точки зрения навигационного обеспечения «Спектр-Р» является сложным аппаратом. В ходе полета давление солнечной радиации по-разному действует на элементы поверхности КА, что приводит к возникновению моментов сил относительно центра масс. Заданная ориентация аппарата удерживается системой маховиков (электромаховичных исполнительных



Рис. 1. Изображение КА «Спектр-Р»

органов — ЭМИО). Длительное воздействие возмущающих моментов одного направления приводит к постоянному увеличению угловой скорости маховиков, что, в свою очередь, вызывает необходимость их разгрузки — уменьшения угловой скорости вращения маховиков и одновременного включения двигателей системы ориентации. Отсутствие моментной схемы ориентации приводит к возмущению движения центра масс КА. Приращение скорости, вызванное такими возмущениями, за сутки составляет величину 5–10 мм/сек. Накопленное в течение суток координатное смещение составляет 300–500 м, что во много раз превышает точность радиотехнических измерений дальности. Поэтому при навигации помимо штатного радиотехнического комплекса используются средства лазерной локации, телеметрическая информация о направлении и величинах возмущающих импульсов, а также астрометрические наблюдения прямого восхождения и склонения объекта на небесной сфере.

В данной работе рассмотрена проблема планирования оптических наблюдений КА «Спектр-Р», в той ее части, когда неточность прогнозного движения, обусловленная сложностью динамики аппарата, может компенсироваться ориентировочным знанием некоординатной информацией, а именно — видимого блеска блеска.

1. Планирование астрометрических наблюдений

Эффективность астрометрических наблюдений сильно зависит от их планирования. Для рационального использования времени обсерваторий на момент наблюдений должны быть выполнены геометрические условия видимости и освещенности аппарата, а также условие нахождения наблюдателя в тени. Эти условия можно формализовать в следующем виде:

- угол места аппарата над горизонтом φ должен быть не меньше определенного значения: $\varphi \geq E(a)$, где $E(a)$ — функция, в общем случае зависящая от азимута и определяемая индивидуально для каждого измерительного пункта;
- угол места Солнца над горизонтом φ_{\odot} не должен превышать -10° : $\varphi_{\odot} < -10^{\circ}$;
- засветка от Луны должна отсутствовать: $\vartheta_m \geq M(t)$, где ϑ_m — угол между центром Луны, наблюдателем и аппаратом, $M(t)$ — предельное угловое расстояние от центра Луны, на котором возможно проведение наблюдений, зависящее от текущей фазы Луны, то есть в общем случае от времени;
- видимый блеск аппарата m должен быть достаточным для его обнаружения обсерваторией: $m \leq m_0$, где m_0 — индивидуальная характеристика инструмента, при помощи которого производятся наблюдения.

Недостаточная точность в учете этих факторов может негативно сказаться, как на эффективности использования времени наблюдательного средства, так и на качестве получаемых измерений. Первые три пункта ограничений, используемых при планировании наблюдений, носят геометрический характер и могут быть проверены, если известна орбита аппарата. Последнее ограничение обычно заменяется условием освещенности аппарата Солнцем, или же блеск представляется простой функцией фазового угла. В случае объектов простой

формы, например, шара, такое упрощение имеет смысл. Однако для объектов более сложной формы может сложиться ситуация, когда освещенность Солнцем достигнута, но освещенные участки не видны наблюдателю. Подобная ситуация возникла и со «Спектром-Р», когда в сентябре 2011 года наблюдатели либо с трудом обнаруживали аппарат, либо вовсе не могли его найти. Повышение точности прогнозирования блеска также ведет к улучшению качества измерений, поскольку позволяет наблюдателям подбирать время экспозиции, соответствующее яркости объекта.

Целью настоящей работы является построение математической модели блеска аппарата «Спектр-Р», которая бы учитывала взаимное расположение наблюдателя, аппарата и Солнца, а также ориентацию аппарата в пространстве.

2. Модель видимого блеска

Видимым блеском или звездной величиной называется соотношение, связывающее световой поток от объекта Φ с эталонным потоком Φ_0 в том же диапазоне частот:

$$\begin{aligned} m &= -2.5 \log_{10} \left(\frac{\Phi}{\Phi_0} \right), \\ m &= -2.5 \log_{10}(\Phi) + C. \end{aligned} \tag{1}$$

Для оценки потока света, отраженного от аппарата, необходимо знание геометрической формы аппарата, а также отражающих свойств его поверхности. В качестве приближенной формы аппарата будем рассматривать совокупность трех элементов:

- антенна космического радиотелескопа (КРТ) — часть сферы, геометрическое отличие от параболоида минимально,
- центральный блок аппарата — параллелепипед,
- панели солнечных батарей — два прямоугольника, способные поворачиваться вокруг определенной оси, ориентированные всегда таким образом, чтобы максимизировать проходящий через них световой поток.

Будем называть совокупность этих элементов упрощенной формой аппарата (рис. 2). Геометрические характеристики и взаимное расположение элементов упрощенной формы соответствуют реальному строению аппарата. Немаловажным фактором при расчете светового потока является затенение определенных элементов конструкции и отсутствие видимости освещенных элементов. В ходе полета космическим аппаратом поддерживается такая ориентация, что солнечные лучи не попадают на внутреннюю поверхность КРТ, а угол между нормалью к плоскости солнечных батарей и направлением на Солнце не превышает 5 градусов. Ограничения на ориентацию аппарата позволяют сделать определенные допущения относительно освещенных участков аппарата и возникающей тени. При штатной работе системы ориентации всегда будут освещены панели солнечных батарей, а также нижняя, передняя и одна из боковых граней центрального блока. Единственный элемент, на котором будет возникать зависящая от ориентации КА тень, — это антенна радиотелескопа. Для

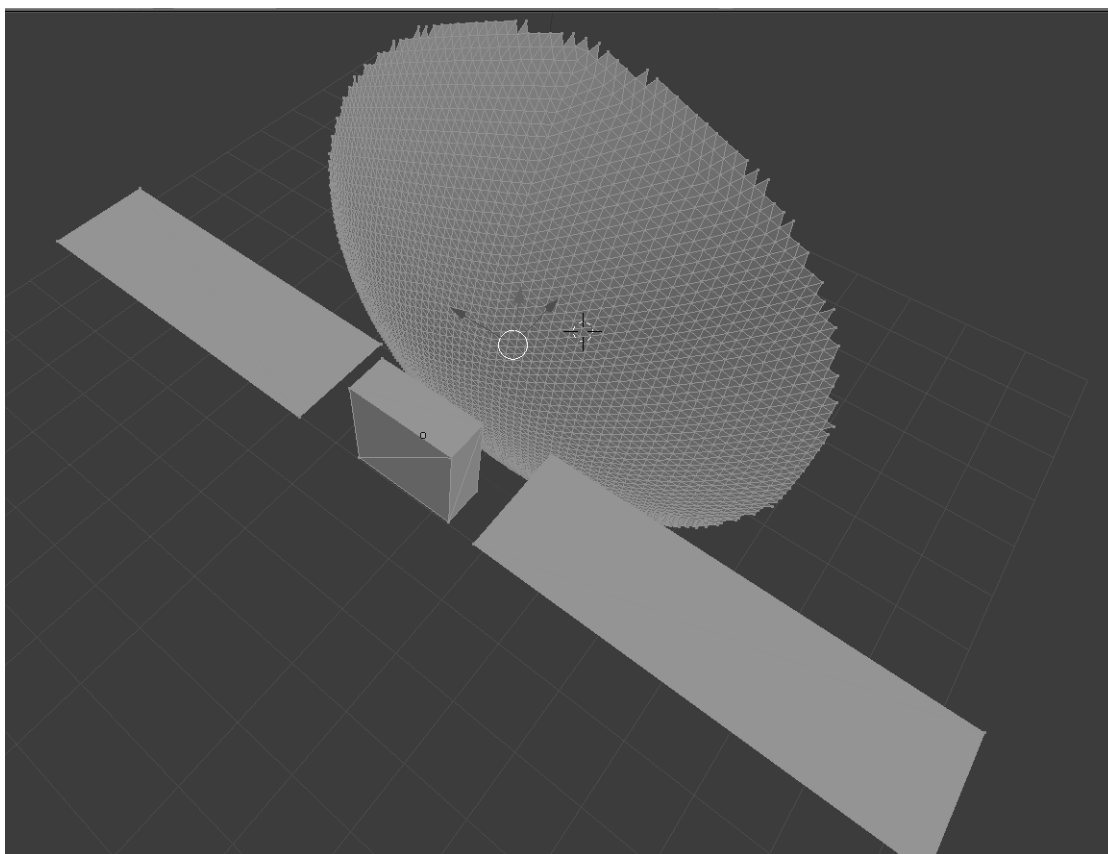


Рис. 2. Упрощенная форма КА «Спектр-Р»

упрощения расчетов разобьем поверхность антенны на множество одинаковых треугольников. Такое разбиение можно получить из разбиения сферы, так как ее поверхность по форме близка к поверхности КРТ. Разбиение сферы, в свою очередь, получается из последовательного дробления граней икосаэдра. Примеры разбиения поверхности антенны КРТ приведены на рис. 3.

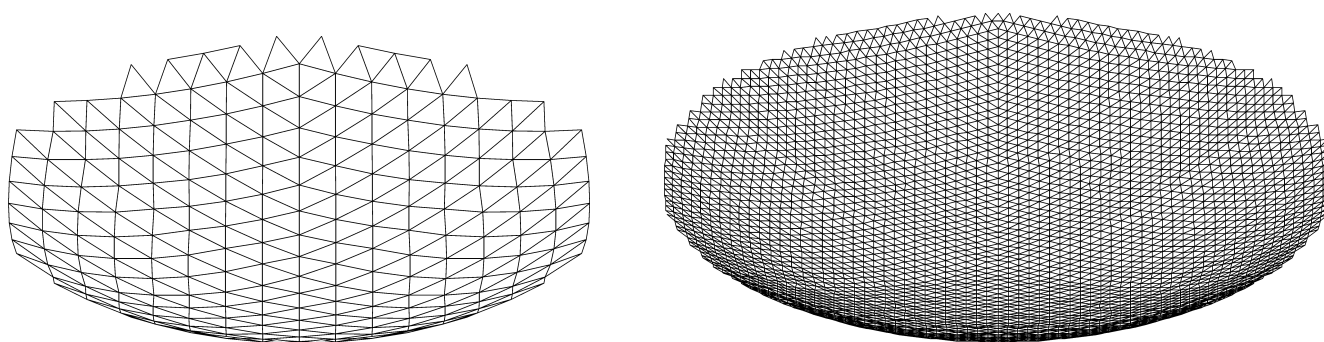


Рис. 3. Разбиение поверхности антенны на треугольники

Будем считать, что элемент освещен, если освещен его центр. Такой подход адекватно описывает возникающую на антенне тень, если площадь одного элемента во много раз меньше площади поверхности антенны. Элемент разбиения может быть затенен другими

элементами антенны, центральным блоком или панелями солнечных батарей. Затенение от других элементов антенны имеет место при выполнении очевидного неравенства: $\mathbf{s} \cdot \mathbf{n} > 0$, где \mathbf{s} — вектор направления солнечного излучения, \mathbf{n} — внутренняя нормаль к поверхности элемента, то есть нормаль, направленная внутрь сферы, содержащей антенну радиотелескопа. Грани центрального блока и панели солнечных батарей имеют прямоугольную форму, что позволяет записать условие попадания в их тень следующим образом:

$$t = \frac{A - \mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_p}{\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_p}, \quad t > 0, \quad (2)$$

$$0 \leq (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_1) \cdot (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \leq |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|^2, \quad (3)$$

$$0 \leq (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_1) \cdot (\mathbf{r}_4 - \mathbf{r}_1) \leq |\mathbf{r}_4 - \mathbf{r}_1|^2, \quad (4)$$

где \mathbf{s} — направление солнечного излучения; \mathbf{r} — радиус-вектор центра рассматриваемого элемента разбиения; $\mathbf{n}_p \cdot \mathbf{x} = A$ — уравнение плоскости, содержащей прямоугольник, наличие тени от которого проверяется; \mathbf{n}_p — нормаль к плоскости; $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ и \mathbf{r}_4 — последовательно заданные координаты вершин прямоугольника; $\mathbf{r}_p = \mathbf{r} - t\mathbf{s}$ — проекция центра элемента на плоскость в направлении излучения. Согласно уравнению (2) солнечные лучи должны пересечь плоскость, содержащую прямоугольник, прежде чем попасть на элемент. Это является необходимым условием возникновения тени. Уравнения (3) и (4) описывают условия попадания проекции \mathbf{r}_p непосредственно в прямоугольник.

По аналогии с расчетом затененности элементов поверхности КА вычисляется их видимость для наблюдателя, при этом вместо вектора \mathbf{s} , характеризующего направление Солнце — аппарат, используется вектор \mathbf{v} , направленный от аппарата к наблюдателю.

Для моделирования отраженного светового потока необходимо сформулировать законы, по которым происходит отражение света. Для этого рассмотрим площадку dS (рис. 4). На рисунке вектором \mathbf{s} обозначен вектор падения солнечных лучей, \mathbf{s}' — вектор зеркального отражения \mathbf{s} , \mathbf{n} — нормаль к dS , \mathbf{v} — единичный вектор в направлении наблюдателя. Пусть поток светового излучения вблизи аппарата равен F_0 . С достаточной степенью точности этот поток можно считать постоянным на протяжении полета. Мощность светового излучения, падающего на площадку dS , имеет вид

$$N_{dS} = F_0 dS \cos \vartheta.$$

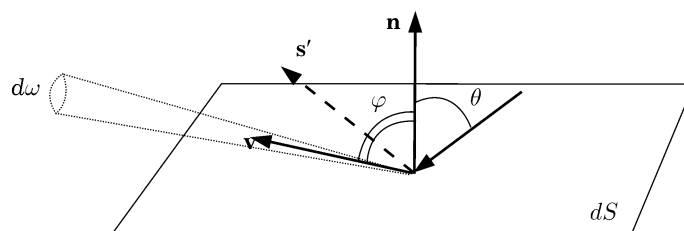


Рис. 4. Схема отражения света

Поток излучаемого площадкой света будем считать пропорциональным падающему потоку. Пусть часть C_r падающего потока отражается (переизлучается) в видимом спектре. Отраженное излучение, проходящее через телесный угол $d\omega$ в направлении \mathbf{v} в единицу времени, описывается выражением [2]

$$dF = C_r F_0 \rho(\mathbf{v}) \cos \vartheta \cdot dS d\omega,$$

где функция $\rho(\mathbf{v})$ описывает степень интенсивности отраженного излучения в направлении \mathbf{v} . Для нее должно выполняться очевидное нормировочное равенство

$$\int_{\Omega} \rho(\mathbf{v}) d\omega = 2\pi, \quad (5)$$

где Ω — полусфера. Коэффициент C_r и функция $\rho(\mathbf{v})$ зависят от свойств поверхности. Отражение света от многих поверхностей хорошо приближается линейной совокупностью диффузного и зеркального отражения [1, 3]. Рассмотрим отдельно каждый из этих типов отражения.

Пусть C_D — коэффициент диффузного отражения. Будем считать, что диффузно отраженный свет отражается по закону косинусов Ламберта. В этом случае поверхность dS будет одинаково яркой для наблюдателя вне зависимости от угла наблюдения. Как следует из формулировки закона, функция $\rho(\mathbf{v})$ имеет вид

$$\rho_d(\mathbf{v}) = 2 \cos \varphi.$$

Множитель 2 возникает из-за условия нормировки (5). Таким образом, выражение для светового излучения примет вид

$$dF_D = 2C_D F_0 \cos \varphi \cos \vartheta \cdot dS d\omega.$$

Теперь рассмотрим зеркальную составляющую отраженного света. Пусть C_S — коэффициент зеркального отражения. Отметим, что использовать идеальное зеркальное отражение, для которого $\rho(\mathbf{v}) = 2\pi\delta(|\mathbf{v} - \mathbf{s}'|)$, в модели блеска нельзя — главным образом из-за того, что вероятность увидеть такой сигнал в телескоп близка к нулю и сильно неустойчива по отношению к неточностям знания ориентации аппарата. Введем закон отражения близкий к зеркальному, который не обладает этими недостатками. Пусть

$$\rho(\mathbf{v}) = \begin{cases} P \cdot (\mathbf{s}' \cdot \mathbf{v})^\alpha, & \mathbf{s}' \cdot \mathbf{v} \geq 0; \\ 0, & \mathbf{s}' \cdot \mathbf{v} < 0, \end{cases} \quad (6)$$

где P — нормировочная константа; α — показатель, характеризующий, как быстро плотность излучения падает с ростом отклонения \mathbf{v} от \mathbf{s}' : чем больше α , тем ближе отражение к зеркальному. Выражение для излучения зеркально отраженного света будет иметь вид

$$dF_S = C_S F_0 P (\mathbf{s}' \cdot \mathbf{v})^\alpha \cos \vartheta \cdot dS d\omega.$$

Совокупное излучение, проходящее через телесный угол $d\omega$ за единицу времени, равно

$$dF = dF_D + dF_S,$$

$$dF = (2C_D \cos \varphi + C_S P(\mathbf{s}' \cdot \mathbf{v})^\alpha) F_0 \cos \vartheta \cdot dS d\omega.$$

Слагаемое C'_S в скобках появляется только в случае отличия от нуля величины $\rho(\mathbf{v})$ из (6). Положив расстояние от аппарата до наблюдателя равным r , а эффективную площадь телескопа равной S_A , получим $\delta\omega = \frac{S_A}{r^2}$ и световой поток

$$\delta\Phi = \frac{\delta F}{S_A} = \frac{1}{r^2} (2C_D \cos \varphi + C_S P(\mathbf{s}' \cdot \mathbf{v})^\alpha) F_0 \cos \vartheta \cdot \delta S. \quad (7)$$

Используя (7) для каждого освещенного и видимого элемента и предполагая одинаковыми отражательные свойства всех элементов, получим выражение для общего светового потока от аппарата

$$\Phi = \frac{F_0}{r^2} \left(C_D \sum_{i \in V} 2S_i \cos \varphi_i \cos \vartheta_i + C_S \sum_{j \in V \cap W} P(\mathbf{s}' \cdot \mathbf{v})^\alpha S_j \cos \vartheta_j \right), \quad (8)$$

где S_i — площадь i -го элемента поверхности аппарата; φ_i — угол, под которым виден i -й элемент; ϑ_i — угол падения света на i -й элемент; V — индексное множество освещенных и видимых наблюдателем элементов; W — индексное множество элементов, для которых соблюдается почти зеркальная видимость в терминах (6). Подставим (8) в (1) для выражения видимого блеска, получим

$$m = -2.5 \log_{10} \frac{1}{r^2} \left(\frac{F_0 C_D}{\Phi_0} \sum_{i \in V} 2S_i \cos \varphi_i \cos \vartheta_i + \frac{F_0 C_S}{\Phi_0} \sum_{j \in V \cap W} P(\mathbf{s}' \cdot \mathbf{v})^\alpha S_j \cos \vartheta_j \right),$$

$$m = -2.5 \log_{10} (A_D S_D + A_S S_S) + 5 \log_{10} r,$$

где

$$A_D = \frac{F_0 C_D}{\Phi_0}, \quad A_S = \frac{F_0 C'_S}{\Phi_0}, \quad S_D = \sum_{i \in V} 2S_i \cos \varphi_i \cos \vartheta_i, \quad S_S = \sum_{j \in V \cap W} P(\mathbf{s}' \cdot \mathbf{v})^\alpha S_j \cos \vartheta_j.$$

Величины S_D и S_S могут быть вычислены при помощи построенной геометрической модели аппарата. Неизвестные величины A_D и A_S являются параметрами модели, зависящими от отражательной способности поверхности КА, их можно найти в результате обработки реальных фотометрических наблюдений путем сравнения расчетных и измеренных величин блеска аппарата.

3. Сравнение с реальными измерениями

Определение величин A_D и A_S для КА «Спектр-Р» было выполнено по измерениям сети НСОИ АФН [4] в период с августа 2011 года по апрель 2012 года. Для исключения зависимости от расстояния рассматривался видимый блеск, приведенный на 1000 км

$m_{1000} = m - 5 \log_{10} r/r_0$, $r_0 = 1000$ км. Параметры модели были определены путем минимизации суммы квадратов рассогласований расчетных и измеренных значений приведенного блеска. Информация об ориентации аппарата, необходимая для формирования расчетного значения блеска, бралась из поступающей с борта аппарата телеметрии. При этом расчеты проводились при различных значениях α из (6). Наилучшие результаты были достигнуты при значении $\alpha = 15$. Это характеризует поверхность как близкую к зеркальной, что совпадает с имеющимися данными о покрытии поверхности КА. Результаты сравнения измеренных и расчетных величин приведенного и фактического блеска показаны на рис. 5 и 6 соответственно. Измерения расположены по возрастанию времени и изображены на графиках квадратами. Для оценки качества прогнозирования на графиках также показаны измерен-

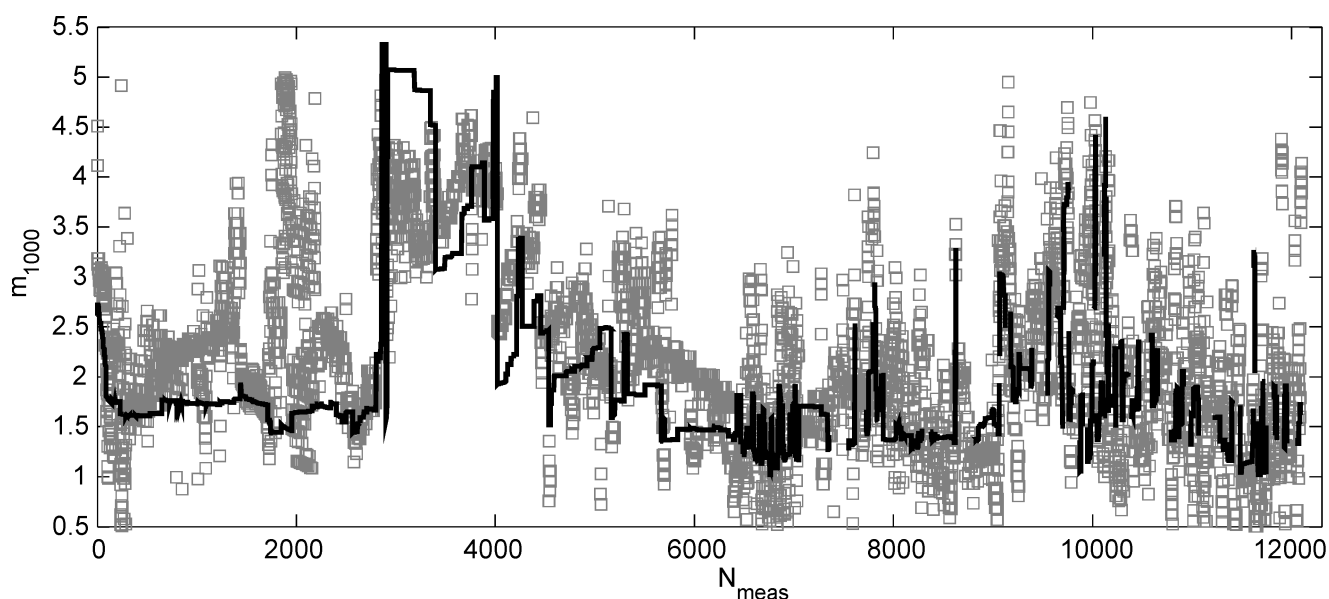


Рис. 5. Сравнение расчетного и измеренного значений приведенного видимого блеска

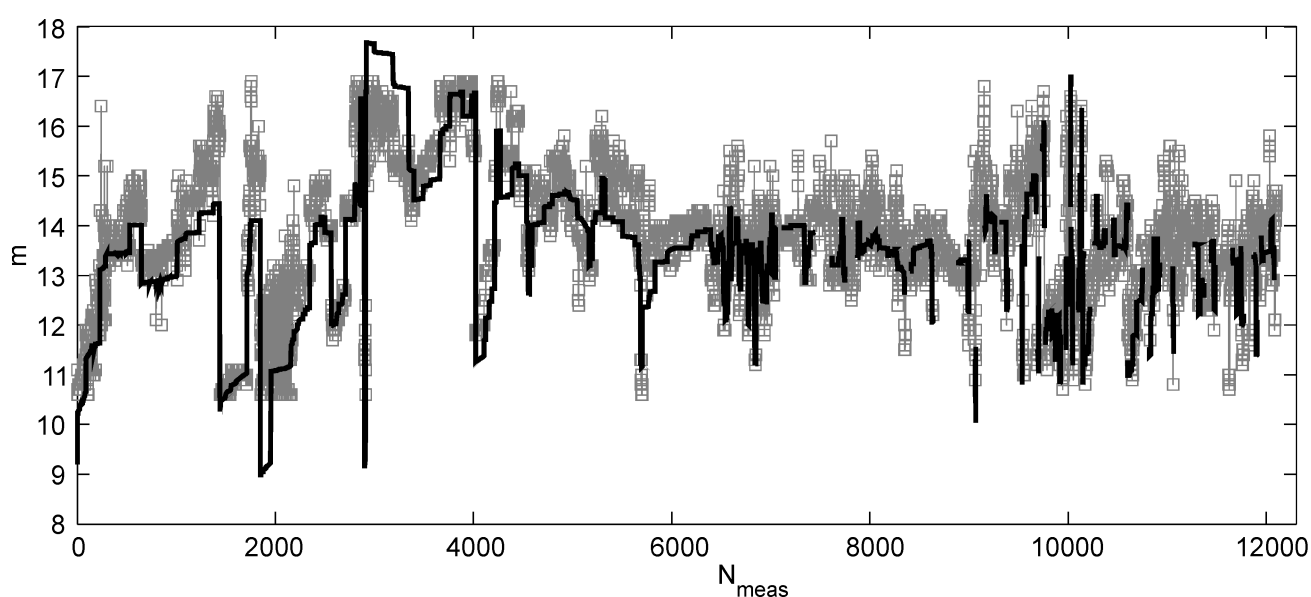


Рис. 6. Сравнение расчетного и измеренного значений видимого блеска

ные значения блеска в период с мая 2012 года по март 2013 года и соответствующие им расчетные значения, изображенные пунктирной кривой. Измеренный и расчетный блеск согласуются со среднеквадратичным отклонением 0,64, что немного выше ожидаемой ошибки фотометрических измерений. Основным источником рассогласований являются эпизодические провалы в блеске, для моделирования которых необходимо более точное знание формы аппарата.

Заключение

В работе была предложена адаптированная для расчетов геометрическая модель аппарата. Изучена структура возникающей тени, предложен алгоритм ее расчета. Эта же модель может быть использована для более точного расчета динамики аппарата, связанной с давлением солнечного излучения.

Подобраны параметры модели, характеризующие отражение света от поверхности аппарата, через согласование накопленных в ходе полета измерений и моделируемых значений блеска.

Реализовано прогнозирование блеска в целеуказаниях, предоставляемых обсерваториям. При этом прогнозные значения имеют точность близкую к точности фотометрических измерений.

Список литературы

1. Montenbruck O., Gill E. Satellite Orbits: Models, Methods and Applications. Springer, 2000. 369 p. DOI: 10.1007/978-3-642-58351-3
2. Гершун А.А. Избранные труды по фотометрии и светотехнике. М.: Гос. изд-во физико-математической лит-ры, 1958. 400 с.
3. Kubo-oka T., Sengoku A. Solar radiation pressure model for the relay satellite of SELENE // Earth Planets and Space. 1999. Vol. 51, no. 9. P. 979–986.
4. Молотов И.Е., Агапов В.М., Куприянов В.В., Титенко В.В., Хуторовский З.Н., Гусева И.С., Румянцев В.В., Бирюков В.В., Литвиненко Е.А., Борисов Г.В., Суханов С.А., Бурцев Ю.В., Корниенко Г.И., Бахтигараев Н.С., Русаков О.П., Щелков П.О., Ерофеева А.В., Круглый Ю.Н., Ивашенко Ю.Н., Борисова Н.Н., Ирсмамбетова Т.Р., Сальес Р., Гребецкая О.Н., Выхристенко А.М., Алиев А., Миникулов Н.Х., Гулямов М.И., Инасаридзе Р.Я., Ибрагимов М.А., Ерофеев Д.В., Лоскутников В.С., Ерофеев А.Д., Губин Е.Г., Дорохов Н.И., Цыбизов О.Ю., Лих Ю.С., Чекалин О.Н., Рыбак А.Л., Абдуллоев С.Х., Ермаков Б.К., Юрков В.В., Матреницкий Д.В., Семенчук С.А. Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений // Известия ГАО РАН. 2009. № 1. С. 233–248.

Simulation of apparent brightness of the spacecraft “Spectr-R” for planning astrometric observations

05, May 2013

DOI: 10.7463/0513.0571011

Zakhvatkin M. V.

Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS
105005, Moscow, Russian Federation
zakhvatkin@kiam1.rssi.ru

A radio telescope which is ten meters in diameter was placed on the operational orbit of the artificial Earth satellite on July 18, 2011. This telescope was mounted at spacecraft “Spectr-R” and designed for consistent radio interferometer observations of remote sources together with Earth stations. Success of this scientific project significantly depends on the accuracy of the calculated orbit of the space radio telescope. Astrometric observations are one of many information sources that were used for adjustment of the spacecraft’s orbit. Due to considerable evolution of the orbit observations were taken by means of target indication. Besides the position on the celestial sphere, a predicted value of apparent brightness is also used to identify the object. In case of “Spectr-R” this brightness can vary essentially during the flight. A model for calculation of apparent brightness of the spacecraft “Spectr-R” is presented in this work. Key parameters of this model were obtained from the analysis of telemetric and photometric data.

References

1. Montenbruck O., Gill E. *Satellite Orbits: Models, Methods and Applications*. Springer, 2000. 369 p. DOI: 10.1007/978-3-642-58351-3.
2. Gershun A.A. *Izbrannye trudy po fotometrii i svetotekhnike* [Selected papers on photometry and lighting engineering]. Moscow, Fizmatlit, 1958. 400 p.
3. Kubo-oka T., Sengoku A. Solar radiation pressure model for the relay satellite of SELENE. *Earth Planets and Space*, 1999, vol. 51, no. 9, pp. 979–986.
4. Molotov I.E., Agapov V.M., Kupriianov V.V., Titenko V.V., Khutorovskii Z.N., Guseva I.S., Rumiantsev V.V., Biriukov V.V., Litvinenko E.A., Borisov G.V., Sukhanov S.A., Burtsev Iu.V., Kornienko G.I., Bakhtigaraev N.S., Rusakov O.P., Shchelkov P.O., Erofeeva A.V., Kruglyi Iu.N., Ivashchenko Iu.N., Borisova N.N., Irmambetova T.R., Sal’es R., Grebetskaia O.N., Vykhristenko A.M., Aliev A., Minikulov N.Kh., Guliamov M.I., Inasaridze R.Ia., Ibragimov M.A., Erofeev D.V., Loskutnikov V.S., Erofeev A.D., Gubin E.G., Dorokhov N.I., Tsybizov O.Iu., Likh Iu.S., Chekalin O.N., Rybak A.L., Abdulloev S.Kh., Ermakov B.K., Iurkov V.V., Matrenitskii D.V., Semenchuk S.A. Nauchnaia set’ opticheskikh instrumentov dlia astrometricheskikh i fotometricheskikh nabliudenii [Scientific network of optical instruments for astrometric and photometric observations]. *Izvestiia GAO RAN*, 2009, no. 1, pp. 233–248.