

УДК 528.8; 523.14

П. П. Сухов

Научно-исследовательский институт «Астрономическая обсерватория Одесского национального университета им. И. И. Мечникова»
ул. Маразлиевская 1 В (парк Т. Г. Шевченко), Одесса, 65014
psukhov@ukr.net

О фотометрии геостационарных спутников близ дат равноденствий

Для определения фотометрических, оптико-геометрических и динамических характеристик слабых по блеску геостационарных спутников (ГСС), необходимых для идентификации, нужны длительные (полгода — год) фотометрические наблюдения при разных положениях ГСС относительно наблюдателя. Автор предлагает проводить фотометрию ГСС при входе и выходе из тени Земли близ дат равноденствий. В эти даты блеск ГСС увеличивается на несколько звездных величин, что позволяет эффективно использовать телескопы с диаметром зеркала 50—70 см. Также можно получить значительно больше информации об отражательных свойствах объекта, чем при длительных наблюдениях на больших фазовых углах.

ПРО ФОТОМЕТРІЮ ГЕОСТАЦІОНАРНИХ СУПУТНИКІВ ПОБЛИЗУ ДАТ РІВНОДЕНЬ, Сухов П. П. — Для визначення фотометричних, оптико-геометричних і динамічних характеристик геостационарних супутників (ГСС), необхідних для його ідентифікації, потрібні тривалі (півроку — рік) фотометричні спостереження при різних положеннях ГСС відносно спостерігача. Автор пропонує проводити фотометрію ГСС при вході і виході з тіні Землі поблизу дат рівнодень. У ці дати блиск супутника збільшується на кілька зоряних величин, і для фотометрії об'єкта можна ефективно використовувати телескопи з діаметром дзеркала 50—70 см. Також можна одержати значно більше інформації про відбивні властивості об'єкта, ніж при тривалих спостереженнях на великих фазових кутах.

ON PHOTOMETRIC OBSERVATIONS OF GEOSTATIONARY SATELLITES NEAR EQUINOX DATES, by Sukhov P. P. — The determination of

photometric and dynamic features of geostationary satellites (GSS), which are necessary for their identifications, requires long (from a half of a year to one year) photometric observations at various positions of GSS with respect to the observer. We propose to perform photometric measurements of a GSS when it enters into and passes off the Earth's shadow near equinox dates. During the dates the light of a GSS increases by several magnitudes, which allows one to use telescopes with mirror diameters from 50 to 70 cm for photometric measurements of an object. Besides, one can also get much more information on reflective properties of an object as compared with long-term observations at large phase angles.

На начало 2013 г. на геостационарной орбите (ГСО), высота которой близ 36 000 км, перенасыщена объектами техногенного происхождения. На ней расположено более 1800 космических объектов. Это «активные», «пассивные» космические аппараты (КА), космический мусор, много дрейфующих, либрационных, маневрирующих объектов. Имеется более 20 орбитальных позиций, в которых находится группировка геостационарных спутников (ГСС), образующих компактный кластер из нескольких ГСС и имеющих практически нулевое наклонение к экватору и нулевой эксцентриситет. Идентификация таких близко расположенных друг к другу космических аппаратов (КА) по орбитальным параметрам не всегда однозначна [1, 3]. В таких случаях для отождествления ГСС необходима дополнительная, некоординатная информация об объекте, полученная из радиолокационных, лазерных, оптических наблюдений.

Радиолокационные наблюдения ГСО проводятся эпизодически и не позволяют контролировать ГСО. Они нуждаются в больших финансовых затратах и не всегда эффективны. Регулярный контроль ГСО проводят только наземные сети оптических пунктов нескольких ведущих космических стран, имеющих широкопольные оптические телескопы для координатных наблюдений, и телескопы с малым полем зрения для некоординатных (фотометрических) наблюдений.

Фотометрия ГСС позволяет определить физические и отражательные характеристики поверхности спутника, идентифицировать спутник с какой-то степенью вероятности, определить признаки аварийности КА, особенно когда с ним нет связи.

Блеск геостационарного спутника можно представить известной формулой

$$m = m^c - 2.5 \lg \frac{S F(\alpha)}{d^2},$$

где m^c — звездная величина Солнца в спектральном диапазоне λ , S — видимая наблюдателем площадь КА, освещенная Солнцем, ρ — спектральный коэффициент отражения, S_e — эффективная площадь отражения, $F(\alpha)$ — фазовая функция, α — спутникоцентрический фазовый угол, d — топоцентрическое расстояние до объекта. В фор-

муле не учтена подсветка от Луны, отражение и рассеивание света от Земли. На высоте 36000 км они составляют менее 0.02^m , так что ими можно пренебречь [5].

К фотометрическим характеристикам ГСС можно отнести: 1) эффективная площадь отражения S , 2) спектральный коэффициент отражения, 3) фазовый коэффициент, 4) показатели цвета $B - V$ и $V - R$, 5) звездная величина, приведенная к стандартному расстоянию 36000 км и $\alpha = 0^\circ$.

Оптико-геометрические характеристики ГСС: 1) линейные размеры КА, 2) доминирующая форма объекта.

Динамические характеристики ГСС: 1) период вращения вокруг центра масс или одной из осей, 2) ориентация КА в пространстве, определяемая вектором нормали к бликующей поверхности КА (X_n, Y_n, Z_n — компоненты вектора).

Ввиду прикладного значения не все фотометрические характеристики спутника публикуются в открытой печати.

Видимый блеск ГСС зависит от многих факторов, которые далеко не всегда могут быть смоделированы математически. Это фазовый угол, дальность до объекта d , ракурс наблюдения, наличие механически связанных, но движущихся самостоятельно элементов конструкции, вызывающих «затенение» соседних элементов, или движение всей конструкции как единого целого, эффективная площадь отражения S , коэффициенты отражения в разных спектральных диапазонах, время нахождения объекта на орбите (старение материалов конструкции), сезон наблюдений.

Обычно для определения фотометрических, оптико-геометрических характеристик ГСС проводятся длительные фотометрические наблюдения ГСС в течение ночи при $\alpha > 30^\circ$ на длинном интервале изменения относительно наблюдателя. В этом случае возникают следующие трудности. Во-первых, при фазовых углах $\alpha > 30^\circ$ блеск геостационарного спутника очень слабый ($12-15^m$). Для наблюдений таких ГСС необходимо использовать телескоп с диаметром зеркала не менее 1 м. Такие телескопы редко доступны специалистам по фотометрии ГСС. Во-вторых, при синхронных наблюдениях на $\alpha > 30^\circ$ одного ГСС с базисным расстоянием в сотни, тысячи километров, каждый наблюдатель будет видеть КА под разным углом. Сравнить или объединить такие кривые для объяснения поведения ГСС на орбите в момент наблюдения блеска некорректно. Для такого сравнения кривых блеска нужно получить участки кривой блеска с одинаковыми фазовыми углами. Последнее условие часто ограничено погодными условиями в пунктах наблюдений. Фотометрия ГСС, в том числе базисная, не нашла широкого применения из-за слабого блеска ГСС и малодоступности в использовании телескопов с диаметров главного зеркала более 1 м (за редким исключением).

Автор предлагает проводить фотометрию ГСС в моменты времени, когда экваториальные спутники с нулевым наклоном и

нулевым эксцентриситетом имеют малые фазовые углы т. е. получать «короткие кривые блеска» при входе и выходе из тени Земли близ дат равноденствий. В этом случае для фотометрии ГСС можно эффективно использовать телескопы с диаметром зеркала 50—70 см.

Преимущества наблюдений на малых фазовых углах близ равноденствий обусловлены следующими обстоятельствами:

— при малых фазовых углах блеск КА максимален вследствие квазизеркального отражения от его поверхности;

— определяя отражательные характеристики вблизи равноденствий ГСС с известными размерами, можно с достаточной точностью определить его реальные спектральные коэффициенты отражения;

— по зеркальным вспышкам можно определить ориентацию ГСС в пространстве [2] и объяснить динамику поведения ГСС на орбите (штатный, внештатный режим работы);

— можно выявить наличие на платформе «не задекларированной» полезной нагрузки в виде телескопов, приемо-передающих сферических, параболических антенн, и др. устройств. Наличие такой полезной нагрузки вносит заметный вклад в спектральные, отражательные характеристики ГСС [8].

Интервал времени, когда активный экваториальный ГСС может находиться в тени Земли, составляет около 88 ночей относительно весеннего и осеннего равноденствий. Длительность пребывания спутника в тени Земли зависит от даты наблюдений относительно даты равноденствия и изменяется от 10 до 72 мин (рис. 1, а). Минимальные и максимальные фазовые углы экваториальных ГСС при входе и выходе (рис. 1, б) из тени Земли составляют 13.6° и 16.1° [6].

Предлагаемый алгоритм вычисления фотометрических характеристик ГСС на нулевую фазу представлен в табл. 1.

По известным из открытых источников сведениям о линейных размерах ГСС и доминирующей геометрической форме можно выбрать соответствующие фазовые функции рассеивания тела (для сферы, цилиндра, пластины и др. [7]). Как показали наши расчеты [4], для расстояния 36000 км вычисленные характеристики для сферы и пластины различаются в пределах ошибок наблюдений. Ниже на примере телекоммуникационного ГСС «Intelsat 10-02» приведены «короткая» и «длинная» кривая блеска (рис. 2) полученные автором в Одесской астрономической обсерватории на телескопе с диаметром главного зеркала 50 см.

В табл. 2 даны приведенные к $\alpha = 0$ значения эффективной площади отражения S и спектрального коэффициента отражения для «Интелсат 10-02», вычисленные по «короткой» кривой блеска при интервале изменения α 13 и по «длинной» кривой блеска при интервале изменения α 27. При вычислениях использовалась фазовая функция рассеивания для пластины. Видно, что значения S и ρ , вычисленные по «коротким» и «длинным» кривым блеска, близки между собой.

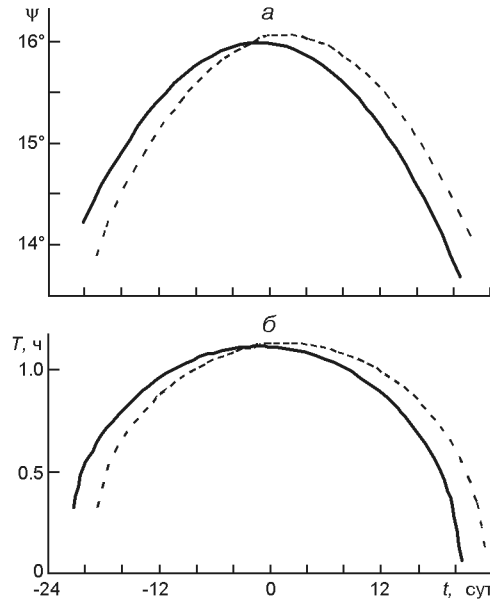


Рис. 1. Фазовый угол (а) и длительность T (б) пребывания ГСС в тени для момента его наблюдения, отстоящего от момента равноденствия на t сут: сплошная линия — для весеннего равноденствия, пунктирная — для осеннего. Нуль-пункт на оси абсцисс соответствует датам равноденствия (21 марта и 22 сентября)

Таблица 1. Структурная схема ПО определения фотометрических характеристик ГСС для $\alpha = 0$

Ввод информации об экстинкционных и опорных звёздах
Вычисление коэффициентов экстинкции и трансформации
Ввод фотоэлектрической информации о КО: $N(t)$ — (блеск, время)
Вычисление инструментальных звёздных величин B, V, R
Приведение к стандартной фотометрической системе. Вынос блеска на расстояние 36000 км
Определение показателей цвета $B - V, V - R$
Фазовые кривые блеска $B(\alpha), V(\alpha), R(\alpha)$
Вычисление эффективных площадей отражения $S_B(\alpha), S_V(\alpha), S_R(\alpha)$
Выходной файл: Звёздные величины, эффективные площади и пр. на $\alpha = 0$

В итоге при фотометрии ГСС близ равноденствий за более короткое время можно получить:

- 1) более достоверную фотометрическую и динамическую информацию об объекте, провести анализ поведения КА на орбите;
- 2) приведя кривых блеска к фотометрической системе Джонсона — Моргана, можно сравнивать и объединять базисные наблюдения по одному и тому же ГСС;
- 3) в течение наблюдательной ночи можно получить несколько кривых блеска разных ГСС, последовательно заходящих и выходящих из тени Земли. Это дает возможность получить намного больше информации об объектах, чем при многомесячных длительных наблюдениях на больших фазовых углах;

Рис. 2. «Короткая» (а, 12 октября 2010 г.) и «длинная» (б, 27 октября 2011 г.) фазовые кривые блеска «Интелсат 10-02» при выходе из тени Земли

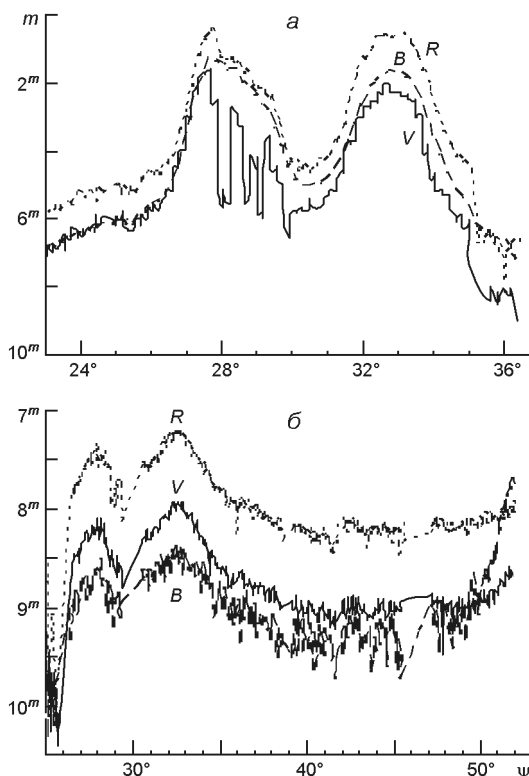


Таблица 2. Эффективная площадь отражения S и спектральный коэффициент отражения для «Интелсат 10-02»

Спектральная полоса	$S, \text{ м}^2$			
	13	27	13	27
B	0.18 ± 0.02	0.18 ± 0.02	17.58 ± 1	16.25 ± 0.6
V	0.34 ± 0.02	0.38 ± 0.02	32.44 ± 1	34.11 ± 0.6
R	0.22 ± 0.02	0.21 ± 0.02	20.26 ± 1	19.15 ± 0.6

4) фотометрия ГСС на входе и выходе из тени Земли позволяет значительно сократить время для получения фотометрических характеристик, необходимых для идентификации КА.

Фотометрические наблюдения близ дат равноденствий предпочтительны и для фотометрии низкоорбитальных космических объектов.

1. Диденко А. В. Исследование фотометрических характеристик геостационарных ИСЗ методом электрофотометрии: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Алма-Ата, 1991.—122 с.—Машинопись.
2. Епишев В. П. Определение ориентации ИНТ в пространстве по их зеркальному отражению // Астрометрия и астрофизика.—1983.—Вып. 50.—С. 89—93.
3. Епишев В. П. Исследование ориентации и поверхности ИНТ методом электрофотометрии: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Ужгород, 1985.—125 с.—Машинопись.

4. *Епишев В. П., Карпенко Г. Ф., Сухов П. П. и др.* Определение эффективной площади отражения и размера некоторых геостационарных спутников по кривой блеска // *Околосемная астрономия 2009*. — Казань: ГЕОС, 2010.—С. 87—92.
5. *Смирнов М. А.* Фотометрические наблюдения искусственных небесных тел: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. — М.: Ин-т астрономии РАН, 1994.—164 с.— Машинопись.
6. *Karpenko G. F., Murnikov B. A., Sukhov P. P.* The conditions of an active equatorial GSS entering the Earth's shadow // *Odessa Astron. Publs.*—2009/2010.—**22**.—P. 25—27.
7. *Rambauske W. R., Gruenzel R. R.* Distribution of reflection around some stereometric surfaces // *J. Opt. Soc. Amer.*—1965.—**55**.—P. 315—318.
8. *Sukhov P. P., Karpenko G. F., Epishev V. P., Motrunych I. I.* Photometrical research of GSS «Intelsat 10-02» // *Odessa Astron. Publs.*—2009/2010.—**22**.—P. 55—59.

Статья поступила в редакцию 02.09.13