

УДК 523.4

А.В. ДИДЕНКО, Л.А. УСОЛЬЦЕВА

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДИФФУЗНОЙ И ЗЕРКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ КРИВЫХ БЛЕСКА ГСС «РАДУГА»

Проанализированы результаты фотозелектрических наблюдений 1984-2006 г.г. для 20 ГСС типа «Радуга». Определены интегральные оптические характеристики, выявлены особенности ориентации ИСЗ на орбите. Показано, что применяемые методы могут быть использованы при отождествлении объектов этого типа.

Данная работа является составной частью наших исследований, связанных с проблемой отождествления ГСС на основе наземных оптических наблюдений [1-3]. Ее цель – показать применимость методики на примере анализа координатных и фотометрических наблюдений космических аппаратов (КА) «Радуга» («Raduga»). Объекты данного типа широко представлены в советской группировке спутников связи. Они были смонтированы на базе новой универсальной спутниковой платформы KAUR – 3, которая в дальнейшем послужила основой для следующих поколений КА - «Горизонт», «Экран», «Космос (Prognoz)», «Космос (Luch - Geizer)», «Экспресс». Все эти аппараты имеют похожие конструкции, но у каждого типа есть свои индивидуальные оптические и динамические характеристики, которые позволяют отличить один от другого.

Ниже в таблице приведен список наблюдавшихся нами «Радуг», указаны их международные номера, промежуток времени, в течение которого объекты сопровождались, и периоды вращения вокруг центра масс (для пассивного состояния). Методика определения периодов вращения описана в работе [4]. Спутники наблюдались как в активном (с), так и в неуправляемом состоянии (L- либрационный, d - дрейфующий).

Фотометрические наблюдения проводились в трех (BVR) фильтрах, в течение ночи получались как минимум три кривых блеска при различных значениях фазового угла ϕ . Вся информация обработана и проанализирована. В данной статье приведены типичные примеры фазовых кривых и кривых блеска отдельных представителей КА типа «Радуга» и их усредненные характеристики.

Таблица. Список наблюдавшихся ГСС типа «Радуга»

| № | Международный номер | Интервал наблюдений | Период вращения в секундах | Состояние |
|----|---------------------|---------------------|----------------------------|-----------|
| 1 | 75123A | 01.03.00 - 25.08.06 | 155.9 | L |
| 2 | 77071A | 25.11.03 - 26.09.06 | 55.1 | L |
| 3 | 79035A | 20.02.88 - 07.11.05 | 328.0 | c, L |
| 4 | 81027A | 19.03.99 - 05.11.99 | 53.4 | d |
| 5 | 81102A | 24.10.84 - 17.03.05 | 33.1 | c, L |
| 6 | 85107A | 13.05.89 - 18.09.93 | - | c |
| 7 | 86082A | 13.03.86 - 02.03.89 | - | c |
| 8 | 88095A | 26.09.06 | - | L |
| 9 | 89030A | 03.09.89 - 20.10.04 | 249.5 | c, L |
| 10 | 89048A | 03.09.05 | 73.2 | d |
| 11 | 90016A | 03.09.91 - 21.10.91 | - | c |
| 12 | 90112A | 15.08.04 - 23.07.06 | 47.8 | L |
| 13 | 90116A | 20.06.99 | 66.4 | L |
| 14 | 91014A | 31.08.03 - 13.10.04 | 59.8 | L |
| 15 | 91087A | 11.04.05 - 21.09.06 | 95.8 | L |
| 16 | 93062A | 09.03.95 - 15.03.02 | - | c, L |
| 17 | 94008A | 14.10.94 - 14.11.04 | 114.9 | c, L |
| 18 | 94087A | 28.03.00 - 06.04.00 | - | c |
| 19 | 99010A | 23.08.06 - 21.09.06 | 96.0 | L |
| 20 | 01045A | 23.08.06 | 210.5 | d |

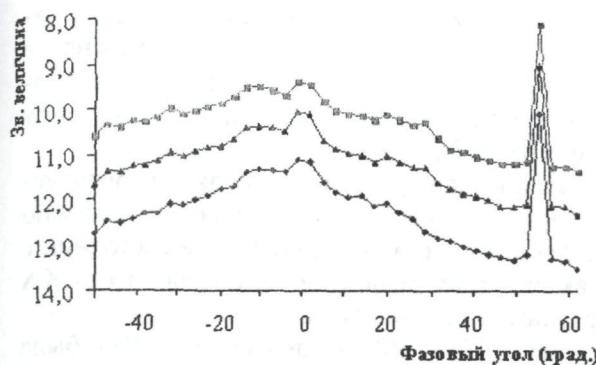


Рис. 1. Фазовые кривые для стабилизированного ГСС «Raduga 25» (91016A) в фильтрах B - ●, V-▲ и R-■, наблюдения 03.09.1991.

1 Анализ кривых блеска стабилизированных ГСС «Радуга»

На рисунке 1 показаны фазовые кривые КА «Raduga 25» (91016A), наблюдения 03.09.1991, объект стабилизирован, точка стояния $\lambda = 69^{\circ} 12'$ в.д., угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора $i = 0^{\circ}$; склонение Солнца $\delta_c = 7^{\circ}$. На кривых отчетливо выделяются три участка с резкими скачками яркости. Подробный анализ причин этих вспышек будет проведен ниже. Если вспышки исключить, то диффузную составляющую фазовых кривых этого ГСС можно аппроксимировать функцией, предложенной в работе [5], см. рисунок 2.

Анализ диффузной составляющей [5,6] позволяет определить ряд характеристик и особенности ориентации ГСС на орбите. Приведем некоторые результаты этого анализа.

1) Четко прослеживается зависимость блеска КА, приведенного к нулевой фазе, от склонения Солнца δ_c .

2) Если считать, что звездная величина m , оптические характеристики и фазовая функция объекта связаны между собой зависимостью (1):

$$m_\lambda = m_\lambda^c - 2,5 \lg \left[\frac{S\gamma_\lambda F(\phi)}{d^2} \right], \quad (1)$$

где m_λ^c - звездная величина Солнца в соответствующем спектральном диапазоне; S - видимая наблюдателем поверхность аппарата, освещенная Солнцем; γ - спектральный коэффициент отражения; $F(\phi)$ фазовая функция; d - топоцентрическое расстояние до объекта, то можно определить $S\gamma$ - эффективную площадь отражения.

При Ламбертовском законе отражения для всех наблюдавшихся нами «Радуг» эти величины оказались близкими, и $\overline{S\gamma_B} = 1.06 \pm 0.08 \text{ м}^2$, $\overline{S\gamma_V} = 1.28 \pm 0.07 \text{ м}^2$, $\overline{S\gamma_R} = 1.78 \pm 0.05 \text{ м}^2$.

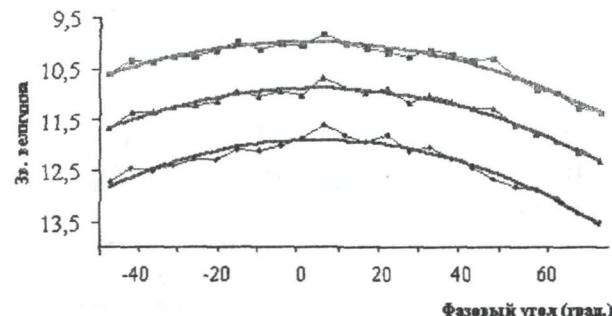


Рис. 2. Диффузная составляющая фазовых кривых для «Радуги 25» (91016A) в фильтрах B - ●, V-▲ и R-■, наблюдения 03.09.1991. Сплошные линии – аппроксимирующие функции согласно [5].

3) Анализ фазового портрета стабилизированного ГСС «Raduga 25» [2] показывает, что панели солнечных батарей (СБ) расположены практически в плоскости орбиты, но при этом образуют угол между осью КА и центром Земли, равный 94° .

4) Фазовые коэффициенты β [1], вычисленные по фазовой кривой 03.09.91, несколько различны для отрицательной ($\phi_1 = -49^{\circ} \div -6^{\circ}$) и положительной ($\phi_2 = 52^{\circ} \div 10^{\circ}$) ветвей. $\beta_{1B} = 0.020 \text{ м}^2/\text{рп}$, $\beta_{1V} = 0.038 \text{ м}^2/\text{рп}$; $\beta_{1R} = 0.018 \text{ м}^2/\text{рп}$, $\beta_{2V} = 0.035 \text{ м}^2/\text{рп}$; $\beta_{1R} = 0.012 \text{ м}^2/\text{рп}$, $\beta_{2R} = 0.040 \text{ м}^2/\text{рп}$. Существует зависимость β от точки стояния аппарата на орбите и пространственной ориентации СБ относительно небесного экватора. Этот факт еще раз подчеркивает, что фазовые коэффициенты отражают реальное состояние КА. При перемене точки стояния и пространственной ориентации изменяются условия освещения ГСС и степень затенения корпуса солнечными батареями и антеннами. Следствием этого и является изменение величины β .

5) Выше уже говорилось, что на фазовой кривой, представленной на рисунке 1, четко прослеживается увеличение яркости в трех участках: $\phi_1 \approx -7^{\circ}$, $\phi_2 \approx -5^{\circ}$ и $\phi_3 = 53^{\circ}$. При $\phi = -7^{\circ} \div -5^{\circ}$ - это сдвоенный пик продолжительностью около 40 минут. Такое же увеличение яркости (с большей или меньшей амплитудой) зарегистрировано на всех фазовых кривых, полученных при $\delta_c = -15^{\circ} \div 12^{\circ}$, максимальные значения амплитуды были отмечены 13.10.1991 г., см. рисунок 3.

Двойной максимум на кривой блеска указывает на то, что наблюдавшийся спутник имеет, по крайней мере, два больших элемента. Отражение света от них дает близкие по положению, но разные по амплитуде значения блеска. Такой эффект может обеспечить внефокальное изображение Солнца от двух антенн, направленных

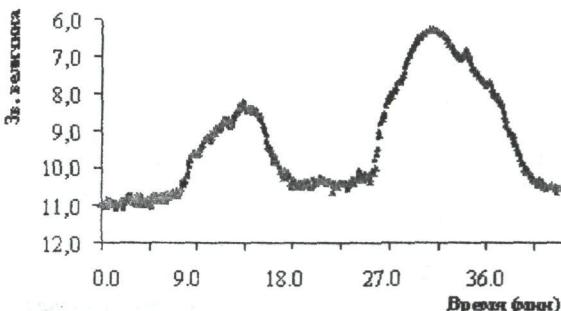


Рис. 3. Зеркальная вспышка, зарегистрированная у ГСС «Raduga 25» 13.10.1991 г., фильтр V.

на Землю и расположенных под некоторым углом друг к другу.

Несложные вычисления позволяют определить размеры сформированных световых пятен. Диаметр пятна, обусловленного правой ветвью, $D_1 = 3^\circ 7$; левой - $D_2 = 2^\circ 5$. Такой размер внефокального изображения Солнца могут дать антенны, имеющие отношение диаметра к радиусу кривизны 1 : 30 и более.

6) Резкая вспышка до 8^m продолжительностью 50 сек. наблюдалась только 03.09.1991 г. при $\varphi = 53^\circ$. Её форма и изменения показателя цвета характерны для зеркальной вспышки от СБ, см. рисунок 4 (а,б).

Следует отметить, что, если исключить зеркальные вспышки, то фазовые кривые всех аппаратов этого типа хорошо согласуются между собой. Количество и форма зеркальных вспышек у всех «Радуг» одинаковы, но их положение на фазовых кривых у разных КА отличаются - это зависит от пространственной ориентации и точки стояния конкретного объекта.

2 Анализ кривых блеска нестабилизированных ГСС «Радуга»

После прекращения активной стадии существования КА теряет стабилизацию и начинает

вращаться вокруг центра масс с некоторым периодом. Анализируя кривые блеска, можно не только определить периоды вращения и прецессии оси вращения, но и исследовать структуру поверхности ГСС.

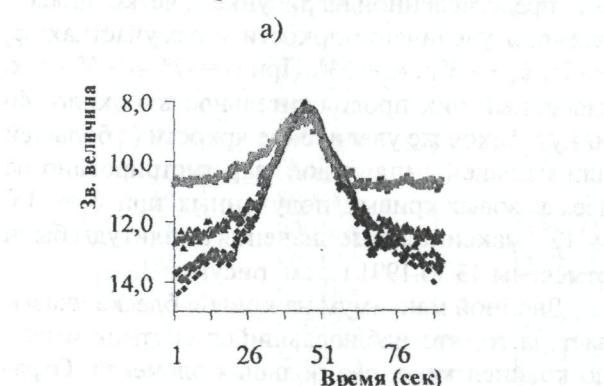
Мы провели сравнительный анализ оптических характеристик для объектов, первоначально находящихся в стабилизированном состоянии с характеристиками, полученными для этих же КА после потери стабилизации.

«Raduga 28» (91087A) до октября 1999 г. была стабилизирована и находилась в точке стояния с $\lambda = 35^\circ 5$ в.д. В качестве примера на рисунке 5 показана зависимость блеска от угла поворота ГСС относительно центра масс для нестабилизированной «Радуги 28». Ноль соответствует направлению оси рыскания на наблюдателя. Скейлинговые коэффициенты, определенные по данной информации, дают размерность, близкую к двум, что указывает на наличие двух периодов изменения блеска. Один из них мы связываем с вращением КА вокруг центра масс, второй – с прецессией оси вращения.

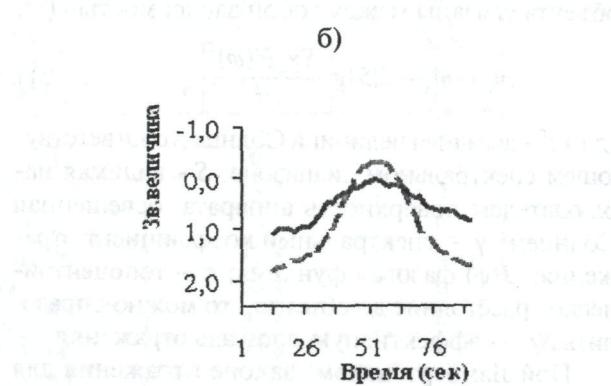
На всех кривых блеска нестабилизированного ГСС Raduga 28 при углах поворота, близких к 100° , регистрируются две зеркальные вспышки. Согласно В.А. Григорьевского и С.Я. Колесника [7] форма зеркальной вспышки от КА с регулярной зеркальной поверхностью может быть представлена в виде следующего уравнения:

$$F(\psi) = \frac{\cos \theta / 2}{\pi \Delta} \cdot 2 \sqrt{\frac{t}{t_0} \left(1 - \frac{t}{t_0} \right)}, \quad (2)$$

где ψ - угол поворота, t - полная длительность зеркальной вспышки, t_0 - время, прошедшее с момента начала вспышки, θ - разность долгот Солн-



a)



б)

Рис. 4. Зеркальная вспышка, зарегистрированная 03.09.1991 г. у ГСС «Raduga 25», $\phi = 53^\circ$: (а) - изменение блеска, фильтры B - ●, V - ▲ и R - ■, и (б) - изменение показателей цвета: — (B-V), --- (V-R).

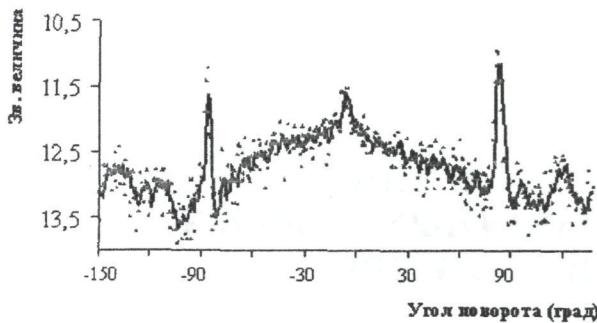


Рис. 5. Зависимость блеска ГСС «Raduga 28» от угла поворота аппарата, наблюдения 11.04.2005 г., фильтр V

ца и наблюдателя в спутникоцентрической системе координат, Δ - угловая ширина конуса зеркальной вспышки. Варьируя Δ , можно добиться удовлетворительного согласия между измеренной и теоретической формой зеркальной вспышки.

Эффективные площади отражения, рассчитанные с учетом формулы (2): $\overline{S\gamma_B} = 1,10 \pm 0,02 \text{ м}^2$; $\overline{S\gamma_V} = 1,41 \pm 0,02 \text{ м}^2$; $\overline{S\gamma_R} = 1,90 \pm 0,02 \text{ м}^2$, это близко к величинам, вычисленным по диффузному отражению.

Анализ диффузной и зеркальных составляющих фазовых кривых показывает, что характерными особенностями ГСС типа «Радуга» являются следующие:

- усредненные значения фазовых коэффициентов, определяемые по диффузной составляющей, одинаковы для трех фильтров: $\beta \approx 0,035 \text{ м}^3/\text{п.}$

- эффективные площади отражения (усредненные из определений по диффузной и зеркальной составляющих): $S\gamma_B = 1.10 \pm 0.05 \text{ м}^2$, $S\gamma_V = 1.30 \pm 0.05 \text{ м}^2$ и $S\gamma_R = 1.80 \pm 0.05 \text{ м}^2$. Согласно А.К. Муртазову [8] коэффициенты отражения материала покрытия, полученные в лабораторных условиях, $\gamma = 0.042$, $\gamma = 0.051$, $\gamma = 0.071$. В нашей работе [9] показано, что условия космического полета приводят к изменению этих коэффициентов. Если это учесть, то площадь отражения панелей солнечных батарей получается близкой к 25 м^2 : $\overline{S}_B = 25.36 \text{ м}^2$, $\overline{S}_V = 25.10 \text{ м}^2$, $\overline{S}_R = 25.12 \text{ м}^2$. Известно, что реальная суммарная площадь СБ у КА этого типа равна 25 м^2 , [10].

- наличие на фазовой кривой двух вспышек, формируемой, по нашему мнению, параболическими антеннами с $S\gamma_B = 1.70 \pm 0.02 \text{ м}^2$; $S\gamma_V = 1.95 \pm 0.02 \text{ м}^2$; $S\gamma_R = 1.90 \pm 0.02 \text{ м}^2$.

- пульсации яркости у всех стабилизированных КА данного типа при выходе их из тени, подробный анализ этого явления проведен в нашей работе [11].

Полученные оптические характеристики, наряду с орбитальными параметрами позволяют однозначно идентифицировать ГСС типа «Радуга».

Работа выполнена в рамках ПФИ, шифр Ф-0351

ЛИТЕРАТУРА

1. Диденко А.В., Демченко Б.И., Усольцева Л.А., Афонин А.Н. и др. Зональный каталог геостационарных спутников. Выпуск 2, 2000, Алматы, Гылым, 108 с.
2. Didenko A.V., Usoltseva L.A. Methods of geostationary satellites' identification by the photometric information // Transaction of the KAU, 2001, № 2, P. 83-91.
3. Диденко А.В. Идентификация геостационарных спутников DSP по их орбитальным и фотометрическим характеристикам // Вестник КазНПУ им. Абая, Сер. «Физ-мат. науки», № 1(12), 2005, С. 76-80.
4. Диденко А.В., Усольцева Л.А. Об определении периодов вращения геостационарного спутника (ГСС) вокруг центра масс // Известия НАН РК, сер. «физ-мат.», № 4, 2007, С. 90-93.
5. Северный С.А., Смирнов М.А., Багров А.В. Определение формы искусственного спутника Земли по фотометрическим наблюдениям // Научные информации, М., 1986, № 58, С. 103-105.
6. Диденко А.В. Идентификация геостационарных спутников DSP по их орбитальным и фотометрическим характеристикам // Вестник КазНПУ им. Абая, Сер. «Физ-мат. науки», № 1(12), 2005, С. 76-80.
7. Григорьевский В.А., Колесник С.Я. Отражение света космическими объектами с регулярной зеркальной поверхностью // Астрономический вестник, М., 1978, Т. 12, № 2, С. 107-119.
8. Муртазов А.К. Оптические свойства поверхностей ИКО и техногенных отходов в космосе // Околовоздушная астрономия и проблемы изучения малых тел солнечной системы, М., 2000, С. 262-268.
9. Диденко А.В. О влиянии старения покрытий космического аппарата на его фотометрические характеристики // Вестник КазНПУ им. Абая, Сер. «Физ-мат. науки», 2005, № 1(12), С. 81-84.
10. GUNTER'S SPACE PAGE HTTP://WWW.SKYROCKET.DE/SPACE
11. Бектасова Н.К., Диденко А.В., Каимова Л.М., Макаренко Н.Г. Детерминированный хаос из кривой блеска ГСС // Письма в АЖ, 1994, Т. 20, № 12, С. 928-933.

Резюме

20 «Радуга» геостационарлық Жердің жасанды серігі үшін 1984-2006 жылдарда өткізілген фотоэлектрлік бақылаударының нәтижелерін талдашықты. Интегралдық оптикалық сипаттамалар аныкталған және орбитада болған Жердің жасанды серіктердің бағдарының ерекшеліктерін айқындап білген. Осы түрлінің объектілерін тенденстіру үшін колданылған әдістерін пайдалануға мүмкіндік көрсетті.

Summary

We analyzed the results of photoelectric observations 1984-2006 for 20 GSS "Raduga". There were determined the integral optical characteristics and revealed the features of GSS' orientation in an orbit. It has been shown that such methods may be used in the procedure of the GSS' type identification.

Астрофизический институт
им. В.Г. Фесенкова МОН РК,
г. Алматы

Поступила 29.04.08