

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ КА «СИЧ-2» В 2013 Г. ПО ДАННЫМ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Лопаченко В. В., Рыхальский В. В., Кожухов А. М., Богдановский А. Н., Шульга А. В., Кошкин Н. И., Епишев В. П., Благодар Я. Т., Мурга В. В., Рыщенко С. В.

Национальный центр управления и испытаний космических средств

96552, Автономная республика Крым, Сакский р-н, с. Витино

Научно-исследовательский институт "Николаевская обсерватория"

54030, г. Николаев, ул. Обсерваторная, 1.

Астрономическая обсерватория Одесского национального университета им. И. И. Мечникова

65014, г. Одесса, ул. Маразлиевская, 1в

Лаборатория космических исследований Ужгородского национального университета

88000, г. Ужгород, пл. Народная, 3

Астрономическая обсерватория Львовского национального университета имени Ивана Франко

79005, г. Львов, ул. Кирилла и Мефодия, 8а

Государственный межвузовский центр лазерно-локационных наблюдений «Орион» Донбасского государственного технического университета

94201, Луганская обл., г. Алчевск, пер. Красный, 6

Центр приема и обработки специальной информации и контроля навигационного поля

32444, Хмельницкая обл., Дунаевецкий р-н, с. Залесцы

e-mail: skinny2@rambler.ru

Анотація

Анализ фотометрических измерений вышедшего из строя КА «Сич-2» показал, что его стабилизация нарушена, и он вращается вокруг центра масс с уменьшающимся периодом. Методом численного моделирования были определены основные характеристики вращения КА (период, направление и ориентацию оси вращения). Данный метод может быть использован для определения состояния других микроспутников аналогичной конструкции (типа «KubeSat»).

The analysis of the photometric measurements of the failed satellite „Sich-2“ showed that its stabilization has broken, and he rotates around its center of mass with decreasing period. The method of numerical simulation identifies The main characteristics of „Sich-2“ rotation (period, rotation direction and orientation of the rotation axis). This method can be used to determine the state of other microsattellites with similar design („KubeSat“-type).

Введение

Космический аппарат (КА) «Сич-2» был изготовлен в рамках государственной программы Украины и запущен на орбиту 17 августа 2011 г. [1]. Внешний вид КА представлен на рис. 1, некоторые характеристики – в табл. 1. Последний сеанс радиосвязи с ним состоялся 11 декабря 2012 г. [2] и имел продолжительность 20 с. Для последующего получения информации о состоянии аппарата были проведены фотометрические измерения оптическими инструментами, входящими в Украинскую сеть оптических наблюдений (УМОС – Українська мережа оптичних спостережень).

Наблюдения отечественного КА «Сич-2»

КА «Сич-2» находится на низкой круговой околоземной орбите с периодом обращения 98 минут и наклоном 98 градусов. Это накладывает ограничение на возможность его наблюдения оптическими инструментами т.к. для значительного числа проходов он находится в тени Земли (рис. 2). Так, с момента запуска по сентябрь 2013 г. КА был доступен для наблюдения оптическими инструментами порядка 330 раз (при угле возвышения более 15 градусов). При этом интервал видимости ограничен концом апреля – началом сентября. В остальные периоды времени (для территории Украины), КА находится в тени и недоступен для наблюдения в видимом диапазоне.

Такая особенность орбиты привела к тому, что после потери радиосвязи с КА «Сич-2» в середине декабря 2012 г., первые оптические наблюдения объекта удалось провести только в начале апреля 2013 г.

© Лопаченко В. В., Рыхальский В. В., Кожухов А. М., Богдановский А. Н., Шульга А. В., Кошкин Н. И., Епишев В. П., Благодар Я. Т., Мурга В. В., Рыщенко С. В., 2013

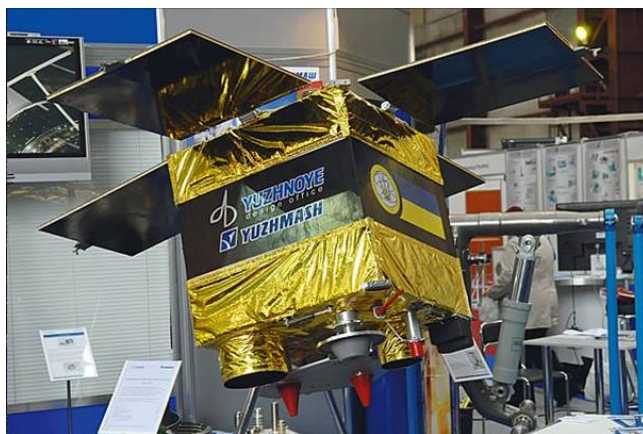


Рис. 1. Внешний вид КА «Сич-2».

Табл. 1. Некоторые характеристики КА «Сич-2».

1	2	3
Характеристика		Значение
1	Дата запуска	17 августа 2011 г.
2	Масса	167 кг
3	Размер корпуса	0,793x0,793x0,722 м
4	Размах солнечных батарей	2,2 м
5	Орбитальный период	98,6 мин.
6	Наклонение орбиты	98,2°
7	Высота орбиты	668-700 км

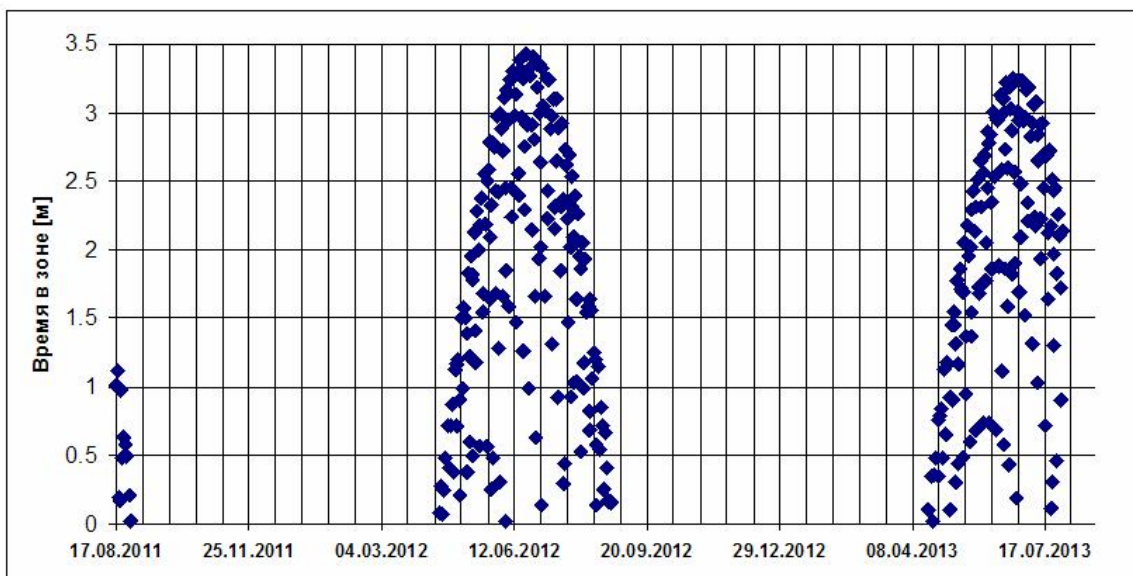


Рис. 2. Зависимость интервала видимости КА «Сич-2» от даты наблюдений. Расчет проведен для точки стояния телескопа АЗТ-28 (Евпатория) на интервале 2011-2013 г.г.

Статистика наблюдений

В период со 2 апреля по 10 сентября 2013 г. инструментами сети УМОС был получен 81 массив фотометрических наблюдений КА «Сич-2» (табл. 2). При этом 10 пролетов наблюдались в синхронном режиме.

Сравнительный анализ полученных фотометрических данных

В работоспособном состоянии КА «Сич-2» был активно стабилизирован в пространстве по трем осям, и

Табл. 2. Статистика наблюдений КА Сич-2 в 2013 г.

Наблюдательный инструмент	Всего проводок	Из них синхронных	
1	2	3	
1	Евпатория, АЗТ-28	54	10
2	Одесса, КТ-50	18	7
3	Ужгород, ТПЛ-1М	5	1
4	Дунаевцы, АЗТ-28	2	1
5	Львов, ТПЛ-1М	1	1
6	Алчевск, ТПЛ-1М	1	0

наблюдаемое изменение его видимого блеска было сравнительно плавным (см. например, [3] и рис. 3). В наблюдениях 2013 года блеск КА характеризуется наличием регулярных всплесков яркости (рис. 4), что указывает на отсутствие ожидаемой трехосной стабилизации и на быстрое вращение объекта вокруг центра масс.

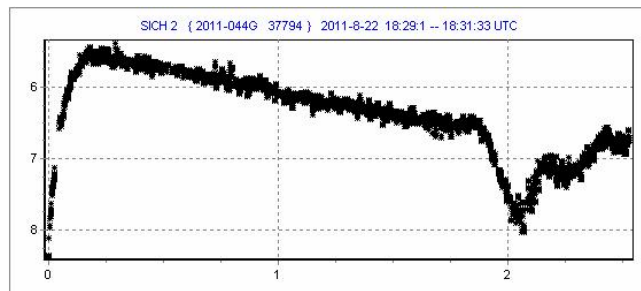


Рис. 3. Пример кривой блеска КА «Сич-2», полученный 22.08.2011 г. при трехосной стабилизации КА.



Рис. 4. Пример фрагмента кривой блеска КА «Сич-2», полученный 16.05.2013 г., во время синхронных наблюдений из Евпатории и Одессы (отображаемый интервал: 54 с).

Следует отметить, что блеск КА «EgyptSat-1», который имеет схожую форму и перестал функционировать в 2011 г., значительно отличается от блеска «Сич-2». «EgyptSat-1» после выхода из строя имел период собственного вращения $T_s = 87,2$ с [4]. Систематические наблюдения, которые проводились в 2011-2013 г.г., подтверждают факт его вращения (рис. 5) с периодом значительно большим, чем у КА «Сич-2».

Спектральный анализ кривых блеска

С помощью дискретного преобразования Фурье по каждому полученному фотометрическому ряду измерений, был получен спектр видимого блеска (рис. 6). Это позволило детектировать максимум спектра сигнала, и построить зависимость его изменения от времени (рис. 7).

Изучение характера изменения блеска ИСЗ показало, что спектральный максимум с периодом 3-7 с на самом деле является производной гармоникой. Это может быть объяснено кубической симметрией спутника с двумя особыми направлениями (верхняя и нижняя часть солнечных панелей). Так, на рис. 8 представлена выборка участка кривой блеска, где наглядно показан реальный период в 11,4 с и видимый полупериод 5,7 с. Указанные особенности проявляют себя только на ограниченном интервале у некоторых из рядов наблюдений.

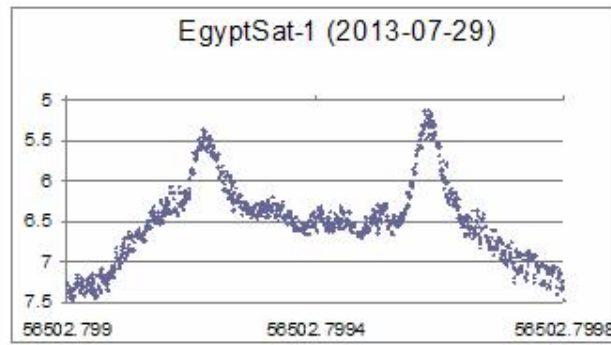


Рис. 5. Изменение блеска КА «EgyptSat-1» после дестабилизации. Интервал между максимумами: 30,7 с.

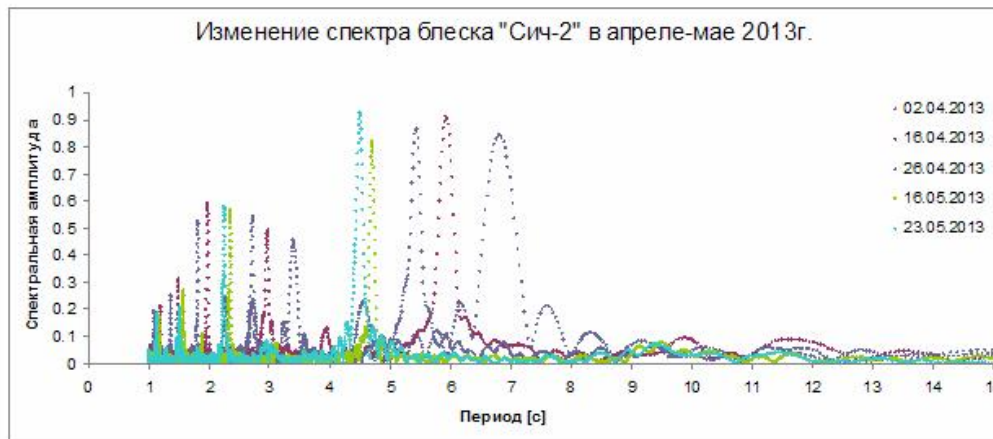


Рис. 6. Смещение спектральных составляющих блеска КА «Сич-2» со временем.

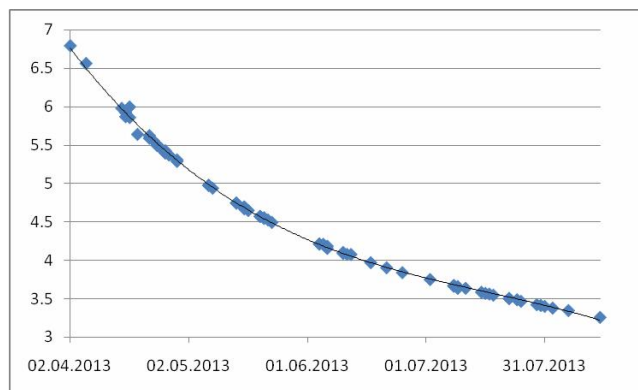


Рис. 7. Изменение периода вращения КА «Сич-2» (в секундах), который соответствует спектральному максимуму, в зависимости от даты наблюдений.

Полученная статистика (рис. 7) с высокой степенью сходимости может быть аппроксимирована полиномом четвертой степени. Экстраполяция данных на момент потери управления КА «Сич-2» дает оценку видимого полупериода $T_{05}=23$ с и, соответственно, значение видимого периода: $T=46$ с.

Определение ориентации и параметров вращения КА

Зарегистрированные фотометрические данные являются необратимыми (класс некорректных задач в математике [5]). Иными словами, видимый блеск в заданный момент времени представляет собой интегральную величину, зависящую от условий наблюдений, формы и поведения объекта. Напрямую определить

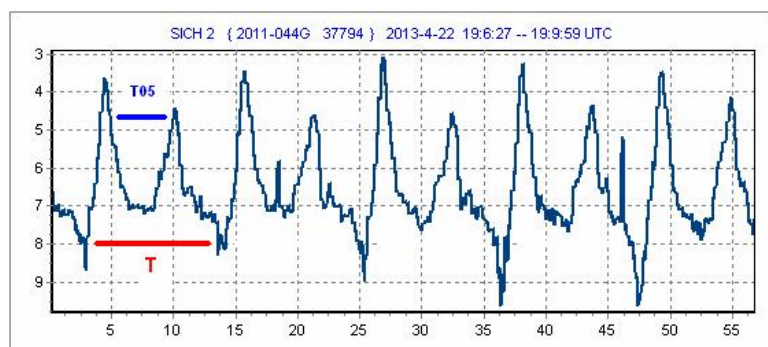


Рис. 8. Изменение звездной величины от времени (секунд от начала наблюдения) для КА «Сич-2». Цветом отмечены детектируемый и полный видимые периоды.

характеристики вращения объекта по этим данным не всегда возможно. В то же время, изменение со временем зарегистрированной фотометрической информации является персональной характеристикой КА, которую можно использовать при проведении сравнительного анализа, формирования статистических параметров и верификации результатов моделирования.

Как было показано выше, видимый блеск КА «Сич-2» представляет собой периодический ряд. В случае регистрации максимума блеска, соответствующего зеркальному отражению, можно определить вектор-биссектрису фазового угла (Солнце-объект-наблюдатель, СОН), который близок к вектору нормали отражающей поверхности объекта. При наличии трех и более близких наблюдений зеркального отражения от одной и той же поверхности появляется возможность, по ориентации векторов-биссектрис, построить плоскость вращения и оценить ориентацию оси вращения (рис. 9). Однако, в подавляющем большинстве полученных фотометрических измерений по КА «Сич-2», поведение блеска соответствует диффузно-зеркальному отражению. Это означает, что рассчитанный вектор-биссектриса угла СОН отклонен от нормали поверхности на неопределенный угол (рис. 10). Так же, и сама поверхность отражения неизвестным образом ориентирована в выбранной системе координат (например, если принять за нормаль поверхности ось Z, то направление осей XY неизвестно, рис. 10). Наблюдения КА «Сич-2» были проведены в интегральном свете, что в совокупности с симметричной формой объекта усложняет задачу сопоставления конкретного максимума яркости с заданной отражающей поверхностью. Указанные ограничения не позволяют определить ось вращения КА напрямую (по трем векторам- биссектрисам максимумов яркости), даже если идентифицировать повторяющиеся элементы КА. Фактически, знание момента максимума яркости означает лишь то, что в данный момент нормаль поверхности максимально близко расположена к плоскости образованной углом СОН.

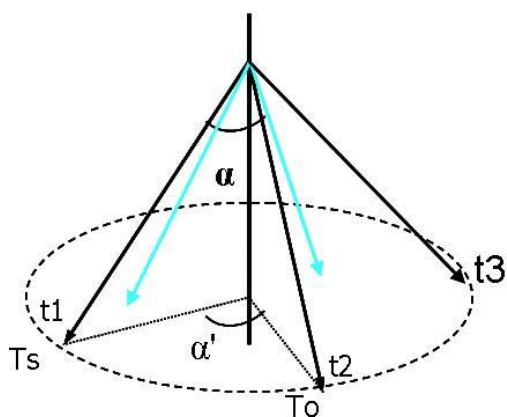


Рис. 9. Разворот вектора нормали поверхности (черные стрелки) вокруг оси вращения КО и рассчитанные вектора-биссектрисы (светлые стрелки).

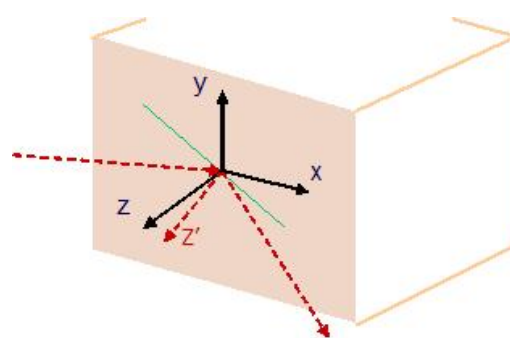


Рис. 10. Рассогласование фактического вектора нормали поверхности (z) и рассчитанного вектора- биссектрисы угла СОН (z'), для локального максимума блеска.

Для решения задачи определения параметров вращения КА «Сич-2» был выбран подход, который

основан на следующих допущениях:

- форму КА «Сич-2», в первом приближении, можно аппроксимировать тремя парами ортогональных плоскостей;
- для зарегистрированных моментов времени максимума блеска КА известна примерная ориентация вектора нормали отражающей поверхности (вектор нормали лежит в плоскости СОН с точностью, зависящей от ошибки по времени детектирования момента максимума);
- форма КА «Сич-2» известна и вдоль продольной оси не симметрична, поэтому значительная разность в яркости двух соседних измеренных максимумов указывает на то, что они сформированы двумя ортогональными плоскостями;
- в наборе измерений из семи максимумов, по крайней мере два из них принадлежат одной и той же поверхности;
- при задании полного набора параметров вращения модели, решение является однозначным. При этом набор расчетных моментов пересечения плоскости СОН нормалью видимой поверхности будут близки к измеренным моментам максимумов, при условии, что параметры ориентации модели близки к действительным параметрам ориентации КО.

Опираясь на момент времени соответствующий измеренному максимуму блеска и на диапазон возможной ориентации нормали отражающей поверхности, можно задать полный набор параметров текущей ориентации КА «Сич-2». Соответственно, можно получить расчетное распределение максимумов блеска от времени, для заданных условий наблюдений, и сравнить их с наблюдением. Из всех вариантов моделирования должно существовать такое решение, которое будет иметь минимальные невязки с наблюдением, и ему будет соответствовать набор из трех независимых параметров:

- Ориентация оси вращения в пространстве.
- Ориентация КА в пространстве.
- Направление вращения и сидерический период.

Для охвата всего диапазона возможных значений ориентации оси вращения была проведена выборка направлений, равномерно распределенных по всей полусфере пространства инерциальной системы координат (ИСК) с шагом 3° . Для задания ориентации модели КА использовалась информация о параметрах плоскости СОН для первого зарегистрированного максимума яркости. В пределах этой плоскости была проведена выборка возможных направлений ориентации вектора нормали поверхности с шагом $d\varphi = 3^\circ$, которые являлись опорными для последующей цепочки расчета. Диапазон задания угла был ограничен требованием: $\{\varphi < 180^\circ - \text{СОН}\}$ для обеспечения выполнения условия, когда и Солнце и наблюдатель расположены с одной стороны отражающей поверхности. Информация об ориентации опорного вектора нормали поверхности и параметры плоскости СОН для второго максимума блеска (исходя из предположения, что он соответствует ортогональной плоскости) позволяет решить задачу нахождения ортогональной прямой (к опорному вектору), и тем самым задать трехосную ориентацию модели КА в пространстве ИСК.

Для последующих моментов времени, соответствующих максимумам яркости №№3,4,5,6,7, можно рассчитать ориентацию плоскости СОН, в совокупности с предполагаемыми данными об ориентации оси вращения и положения опорной нормали поверхности—для этих моментов можно определить второй опорный вектор. Этим реализуется предположение, что нормаль поверхности совершила один оборот. Полученные данные позволяют определить угол разворота вектора со временем и задают три возможных сидерических периода вращения КА. Эти периоды соответствуют вращению по- или против часовой стрелки (измеренный интервал времени меньше истинного периода), а так же «внахлест» (измеренный интервал времени более истинного периода). При этом необходимо помнить, что измерение моментов максимумов блеска проведено с ошибкой. Поэтому, расчетный период вращения так же будет содержать неучтенную ошибку, что приведет к накоплению расхождения между измерением и результатом моделирования. В связи с этим, в качестве критерия достоверности необходимо использовать величину значения среднеквадратического отклонения (СКО) невязок между расчетными и наблюдаемыми интервалами соседних максимумов.

В качестве данных для расчета были взяты измерения блеска, полученные 16.05.2013 г. в Одессе (рис. 4). Характер поведения зарегистрированных максимумов, для этих наблюдений, указывает на значительный вклад зеркальной составляющей. Данное обстоятельство служило дополнительным критерием для проверки правильности конечного результата, т.к. в этом случае известно, что ориентация вектора нормали отражающей поверхности близка к вектору-биссектрисе угла СОН. Кроме этого, данные наблюдения были проведены синхронно с Евпаторией, что позволило сравнить их и идентифицировать две ортогональные плоскости.

В результате реализации вышеописанного метода, можно получить пространственное распределение

значения СКО невязки в зависимости от положения оси вращения (рис. 11). Из распределения видно, что существуют «запрещенные» области пространства, в которых количество смоделированных и наблюдаемых максимумов на контрольном интервале неравно. При этом набор параметров, соответствующих минимуму невязок, имеет следующие характеристики (рис. 12):

- ориентация оси вращения (ИСК): $Ra = -63^\circ, De = 36^\circ$;
- отклонение нормали поверхности солнечных батарей от оси вращения: $\varphi = 90^\circ$;
- сидерический период вращения: $T = -9,28$ с (знак трактуется как направление вращения).

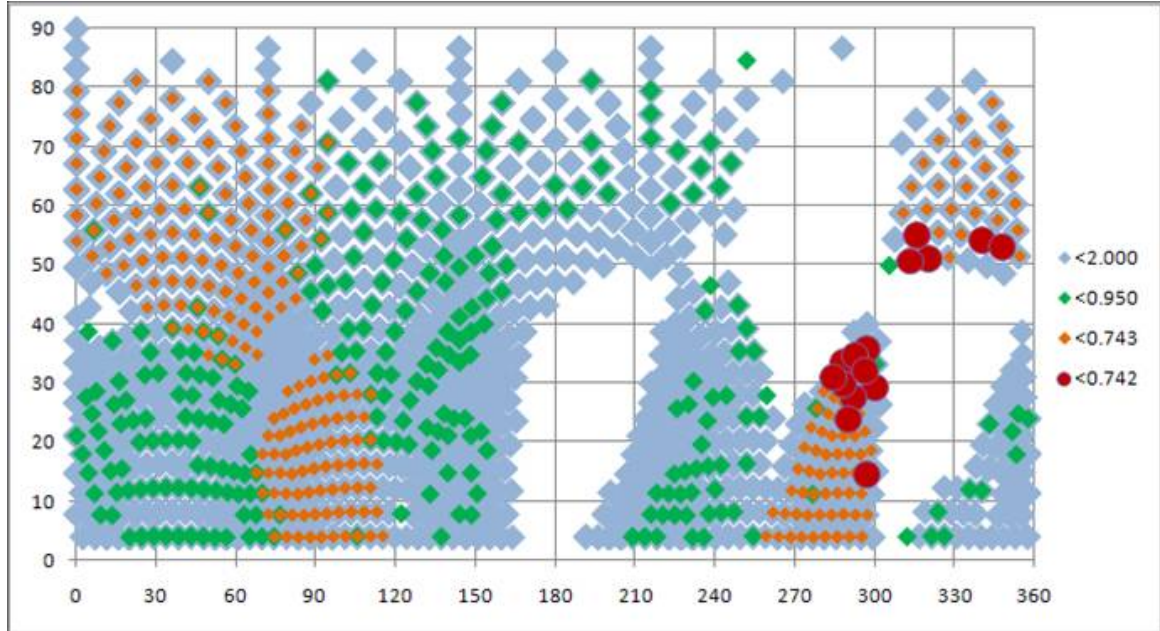


Рис. 11. Распределение по пространству ИСК Ra, De СКО невязок (моделирования и измерения, обозначено разным цветом в зависимости от максимального значения невязки) интервалов максимумов блеска КО.

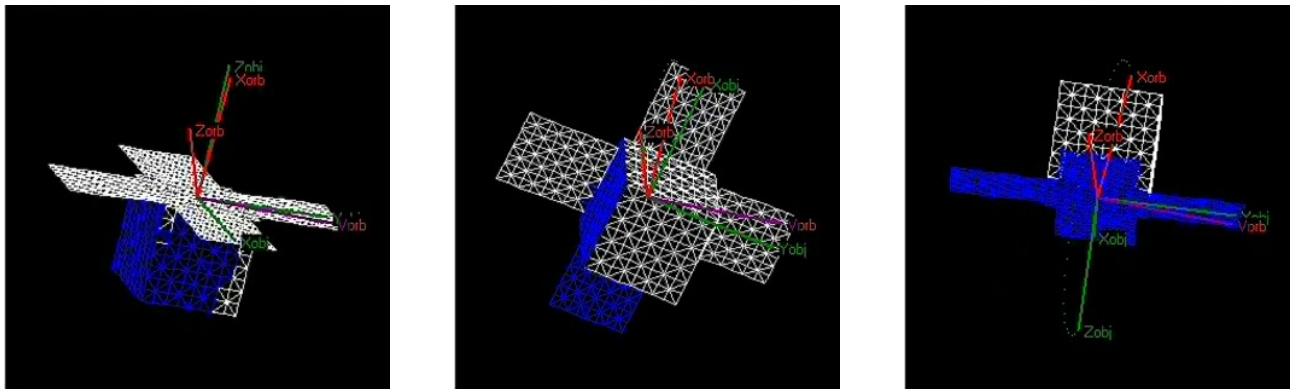


Рис. 12. Изменение ориентации КА «Сич-2» в пространстве за счет вращения. Красными стрелками обозначены оси подвижной орбитальной системы координат (X_{orb} – вектор скорости КА, Z_{orb} – направление в местный зенит), а зелеными- оси объектоцентрической СК (Z_{obj} – направление вдоль продольной оси КА).

Заключение

При получении фотометрических измерений по КА «Сич-2» были использованы различные оптические инструменты, входящие в наблюдательную сеть УМОС. При этом полученные данные являются согласованными и взаимно дополняющими друг друга. Использование разнесенной сети позволяет получить значительный объем данных, что очень важно в условиях, когда возможность наблюдения КА ограничено по времени (технические, орбитальные, погодные условия). Проведение синхронных наблюдений позволило верифицировать данные и идентифицировать опорные элементы конструкции.

В данной работе были использованы априорные данные о КА «Сич-2» и циклические особенности его фотометрических данных. Подход, который был разработан и реализован, в общем случае не является универсальными, однако, он может быть применим к классу искусственных космических объектов, имеющих кубическую форму (КубСаты) при условии, что на непрерывном интервале измерений имеется достаточное число характерных максимумов яркости достаточных для проведения статистического сравнения. Другой важной особенностью использованного подхода является возможность оценки текущей ориентации КА по данным, полученным за время одного прохождения в зоне видимости наблюдателя. Это может быть востребовано при аварийных ситуациях, когда необходимо быстро определить состояние КА в условиях потери радиоконтакта. Недостатком данного метода является зависимость достоверности полученного результата от правильной идентификации опорных (ортогональных) элементов конструкции КА. Однако, при значительном количестве наблюдений, этот недостаток минимизируется за счет сравнительного анализа поведения кривых блеска и сравнения наблюдательных данных с ожидаемым поведением.

Практическим результатом данной работы является определение пространственной ориентации КА «Сич-2». Было определено, что на интервале наблюдений он вращается с относительно высокой частотой (период уменьшился с 14 до 6 секунд). При этом ось вращения отстоит от перпендикуляра к плоскости орбиты на угол 30° , а сам КА вращается вокруг собственной оси «Y» (тангаж). Полученный закон изменения видимого полупериода от времени позволил предположить, что на момент последней радиосвязи с КА тот уже вращался с периодом около 40 с.

Сам факт увеличения частоты собственного вращения со временем является интересным для дальнейшего изучения. Вероятной причиной изменения периода являются естественные причины, т.к. подобное поведение замечено и у других неуправляемых КА (Торех, Ajisai и др. [6], [7]).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Электронный документ. *Состоялся успешный пуск ракеты-носителя "Днепр" с украинским спутником "Сич-2" посвященный 100-летию со дня рождения выдающегося конструктора ракетно-космической техники М.К. Янгеля.* //Официальный веб-сайт ГКАУ – Режим доступа к документу: <http://www.nkau.gov.ua/nsau/newsnsau.nsf/mainsubjectsU/1C36E850C29ABBE4C22578EF00234E2B?openDocumentLang=R>.
- [2] Электронный документ. *О ситуации с космическим аппаратом «Сич-2».* //Официальный веб-сайт ГКАУ – Режим доступа к документу: <http://www.nkau.gov.ua/nsau/newsnsau.nsf/Articles1/61B7248DD2E0136BC2257B7400255CDF?openDocument&lang=R>.
- [3] Благодир Я. Т., Білінський А. І., Вірун Н. В. та ін. *Звіт про роботу ЛЛС "Львів-1831" у 2011 році в рамках УМОС.* //Бюлетень УЦПОЗ – 2011.– №6.–с. 83-84.
- [4] Лопаченко В. В., Шульга А. В., Кошкин Н. И. и др. *Оценка состояния КА "ЕгиптSat-1" по результатам наблюдения оптическими инструментами Украины.* //Бюлетень УЦПОЗ – 2011.– №6.–с.45-51
- [5] Гончарский А. В., Черепашук А. М., Ягола А. Г. *Численные методы решения обратных задач астрофизики.* //М.: Наука.-1978.-336 с.
- [6] Кошкин Н. И., Коробейникова Е. А., Лопаченко В. В. и др. *О характере движения микроспутника с парусом в атмосфере («NanoSail-D»).* //Космічна наука і технологія.-2012.-Т. 18., № 1.-с. 31–38.
- [7] Епишев В. П., Исак И. И., Кудак В. И. и др. *Результаты исследований поведения на орбите ИСЗ в нештатном режиме под воздействием околоземного космического пространства.* //Космічна наука і технологія.-2012.-Т. 18., № 1.-с. 60–67.