



Анализ некоординатной информации об
околоземных космических объектах на
длительных интервалах времени для
формирования характеристик и признаков
состояния этих объектов.

Н.В. Саква

Доклад посвящен возможности получения
информации о различных характеристиках объектов
по результатам анализа фотометрических данных,
получаемых «попутно» при наблюдениях для
уточнения координат объектов.

Анализ некоординатной информации об околоземных космических объектах на длительных интервалах времени для формирования характеристик и признаков состояния этих объектов

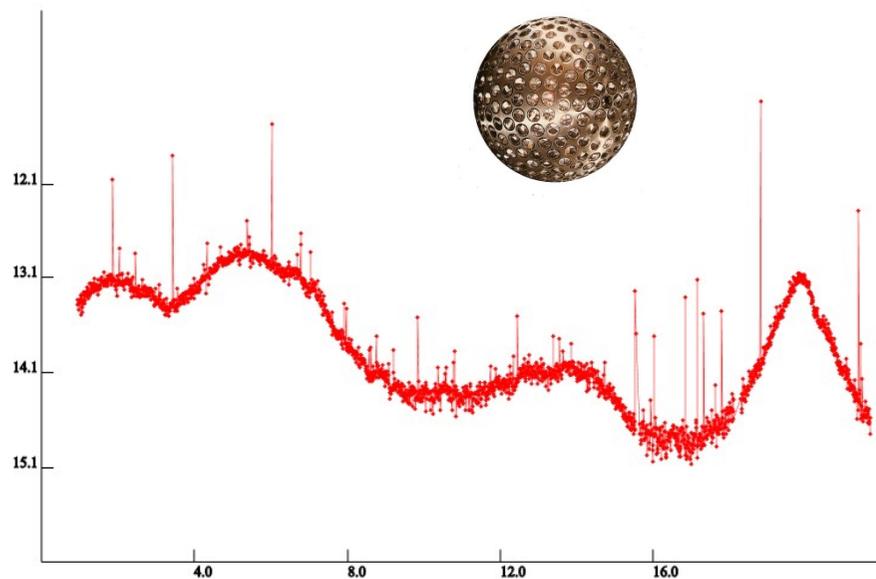


Координатные и фотометрические наблюдения

При фотометрических измерениях: точность 0.1 звездной величины, разрешение - доли секунды, длительность – десятки минут, несколько сеансов в сутки.

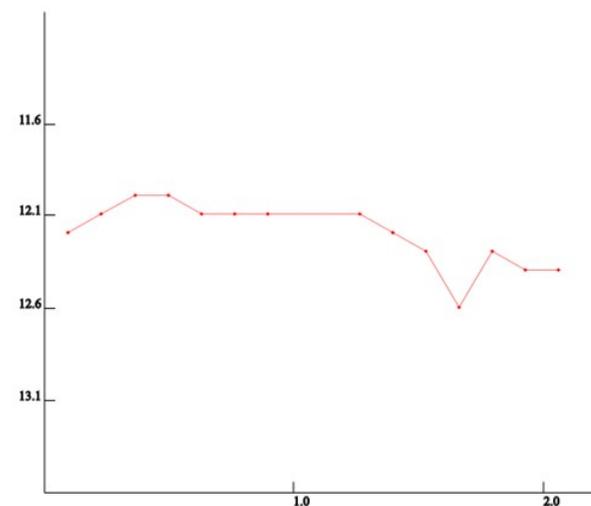
Телескопы координатных измерений: Саянская обсерватория: точность 0.5 звездной величины, разрешение - несколько секунд, длительность – минуты, сотни сеансов в сутки

LAGEOS 2(1992-070B/22195,6243) - 2017-03-01 21:29



Фотометрические наблюдения КА LAGEOS-2

LAGEOS 2(1992-070B/22195,6243) - 2015-11-05 17:08



Координатные наблюдения КА LAGEOS-2



Отражение луча угольным отражателем при разных углах падения луча

$$m = m_0 - 2.5 \lg(E/E_0)$$

$$m_0 = -26.7 \text{ и } E_0 = 1367 \text{ Вт/м}^2$$

$$M = m - 5 \lg(d/40000)$$



<p>Диффузно отражающая сфера</p>	
---	--

$E = \frac{2}{3} a S_0 R^2 ((\pi - \varphi) \cos \varphi + \sin \varphi) / (\pi d^2)$ <p>где S_0 – плотность лучистого потока R – радиус сферы φ – значение фазового угла.</p>	
---	--

<p>Зеркально отражающая сфера</p>	
--	--

$E = a S_0 R^2 / (4 d^2)$ <p>R – радиус сферы Отраженный поток считается постоянным в малом угле.</p>	
---	--

<p>Диффузно отражающая плоскость</p>	
---	--

$E = a S_0 F \cos \alpha \cos \beta / (\pi d^2)$ <p>$(\alpha < \pi/2 \quad \beta < \pi/2)$ α – угол между нормалью и направлением на Солнце β – угол между нормалью и направлением на наблюдателя F – площадь плоскости</p>	
---	--

<p>Зеркально отражающая плоскость</p>	
--	--

$E = a S_0 F \cos \alpha \cos^k \gamma (k+1) / (2\pi d^2)$ <p>$(\alpha < \pi/2 \quad \gamma < \pi/2)$ α – угол между нормалью и направлением на Солнце γ – угол между зеркальным лучом и направлением на наблюдателя $k \approx 1/\psi^2$ ψ – угол расхождения отраженных лучей F – площадь плоскости</p>	
--	--

Анализ некоординатной информации об околоземных космических объектах на длительных интервалах времени для формирования характеристик и признаков состояния этих объектов

Плотности потока, отраженные в направлении наблюдателя от простых поверхностей, типичных для КА и КО

<p>Диффузно отражающий цилиндр</p>	
---	--

$E = 0.5 a S_0 R h ((\pi - \varepsilon) \cos \varepsilon + \sin \varepsilon) / \pi \sin \alpha \sin \beta / (d^2)$ <p>R – радиус цилиндра h – высота цилиндра a – коэффициент отражения поверхности цилиндра α – угол между осью цилиндра и направлением на Солнце β – угол между осью цилиндра и направлением на наблюдателя ε – значение угла между плоскостями, образованными осью цилиндра и направлениями на Солнце и на наблюдателя</p>	
---	--

<p>Зеркально отражающий цилиндр</p>	
--	--

$E = a S_0 R h \cos(\varepsilon/2) / (d^2)$ <p>где S_0 – плотность лучистого потока R – радиус цилиндра h – высота цилиндра ε – значение угла между плоскостями, образованными осью цилиндра и направлениями на Солнце и на наблюдателя Отраженный поток считается постоянным в малом угле.</p>	
--	--

Анализ некоординатной информации об околоземных космических объектах на длительных интервалах времени для формирования характеристик и признаков состояния этих объектов



Зеркально отражающая плоскость (по закону Фонга):

$$E = \frac{1}{2} a S_0 \frac{F (k + 1) (2 \cos \alpha \cos \beta - \cos \varphi)^k}{d^2 \pi}$$

$k \approx 1/\psi^2$ ψ – угол расхождения отраженных лучей

Диффузно отражающая цилиндрическая поверхность.

$$E = \frac{1}{2} a S_0 \frac{R h (\pi - \varepsilon) (\cos \varphi - \cos \alpha \cos \beta) + \sqrt{\sin^2 \alpha \sin^2 \beta - (\cos \varphi - \cos \alpha \cos \beta)^2}}{d^2 \pi}$$

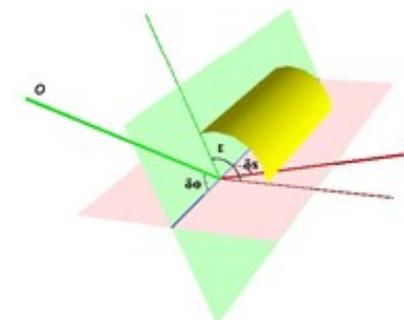
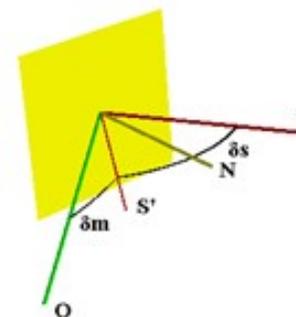
$$\varepsilon = \arccos \left(\frac{\cos \varphi - \cos \alpha \cos \beta}{\sin \alpha \sin \beta} \right)$$

α – угол между нормалью/осью и направлением на Солнце

β – угол между нормалью /осью и направлением на наблюдателя

F – площадь плоскости

R – радиус цилиндра, h – высота цилиндра



Анализ некоординатной информации об околоземных космических объектах на длительных интервалах времени для формирования характеристик и признаков состояния этих объектов



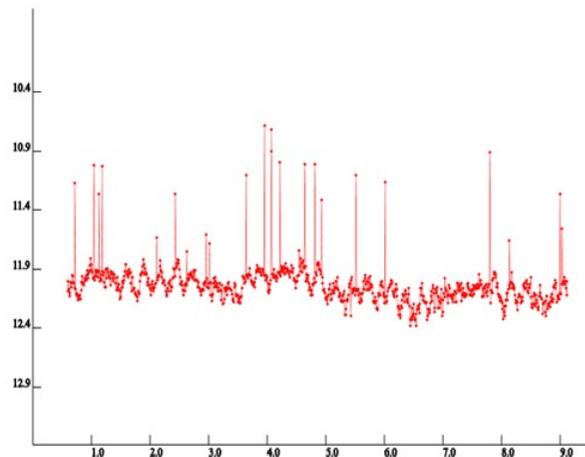
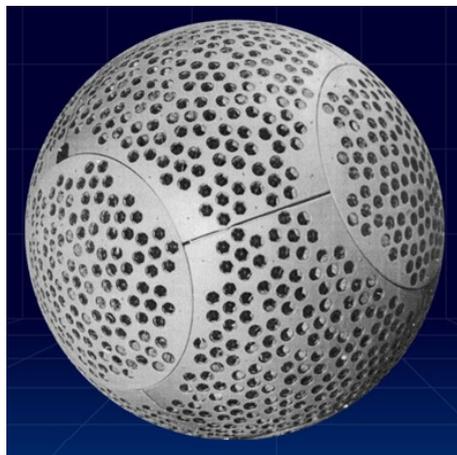
<p>Зависимость блеска сложного объекта будем искать в виде суммы</p>	$E = \sum_{k=1}^N C_k f_k(p)$
<p>$f_k(p)$ – известные функции. Методом наименьших квадратов можно найти константы C_k, наилучшим образом аппроксимирующие массив наблюдаемых значений блеска. Будем искать значения констант, обеспечивающих минимум функции</p>	$F = \sum_{i=1}^n (E_i - E(p_i))^2 = \sum_{i=1}^n \left(E_i - \sum_{k=1}^N C_k f_k(p_i) \right)^2$
<p>Приравняв частные производные по C_k нулю, получаем систему N уравнений:</p>	$\sum_{k=1}^N C_k \left(\sum_{i=1}^n f_k(p_i) \right) = \sum_{i=1}^n E_i$
<p>В простейшем случае однородной диффузной сферы (N=1)</p>	$C_1 = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n f_k(p_i)}$

Анализ некоординатной информации об околоземных космических объектах на длительных интервалах времени для формирования характеристик и признаков состояния этих объектов

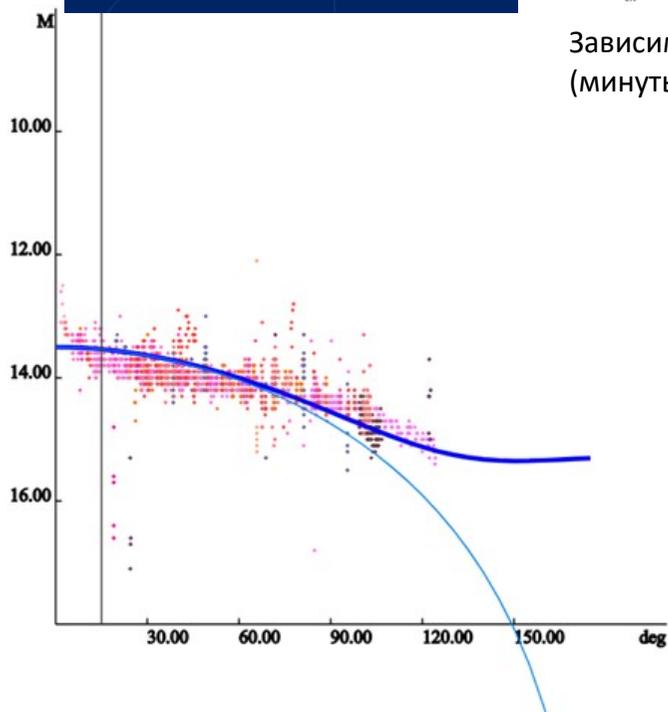


КА «Эталон»

КОСМОС 1989(1989-001C/19751,6566) - 2016-12-02 13:58



Зависимость блеска КА «Эталон» от времени (минуты), полученная Саянской обсерваторией



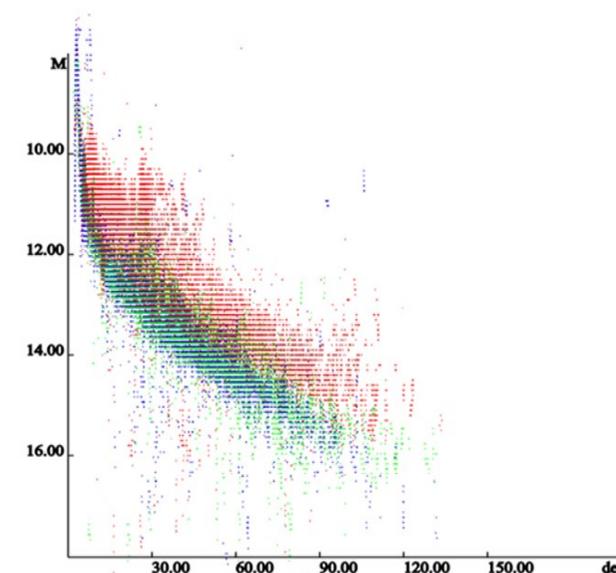
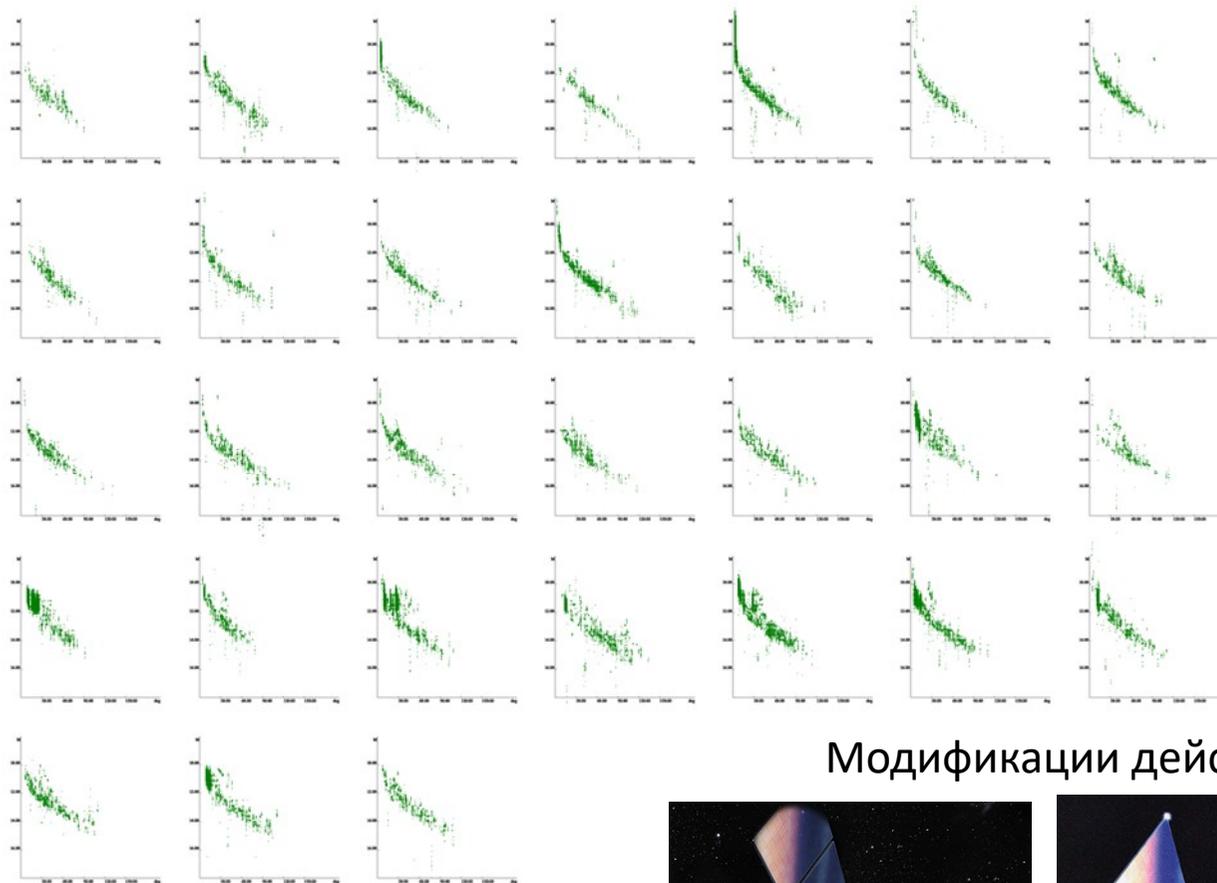
Результаты координатных наблюдений КА «Эталон-1» («фазовый портрет») Синие кривые – аппроксимация диффузной сферой с учетом (толстая линия) и без учета (тонкая линия) отраженного света Земли.

Точность определения звездной величины при некоординатных наблюдениях составляет приблизительно ± 0.5 (оценка по разбросу значений).

Различные наблюдательные пункты получают близкие значения звездной величины при одинаковых условиях наблюдения (при одинаковых фазовых углах).

Коэффициент отражения сферы оцененный по результатам наблюдений при известном радиусе $R=0.67$, равен 0.5, что вполне удовлетворительно согласуется с конструкцией и оптическими свойствами поверхности аппарата.

Анализ некоординатной информации об околоземных космических объектах на длительных интервалах времени для формирования характеристик и признаков состояния этих объектов



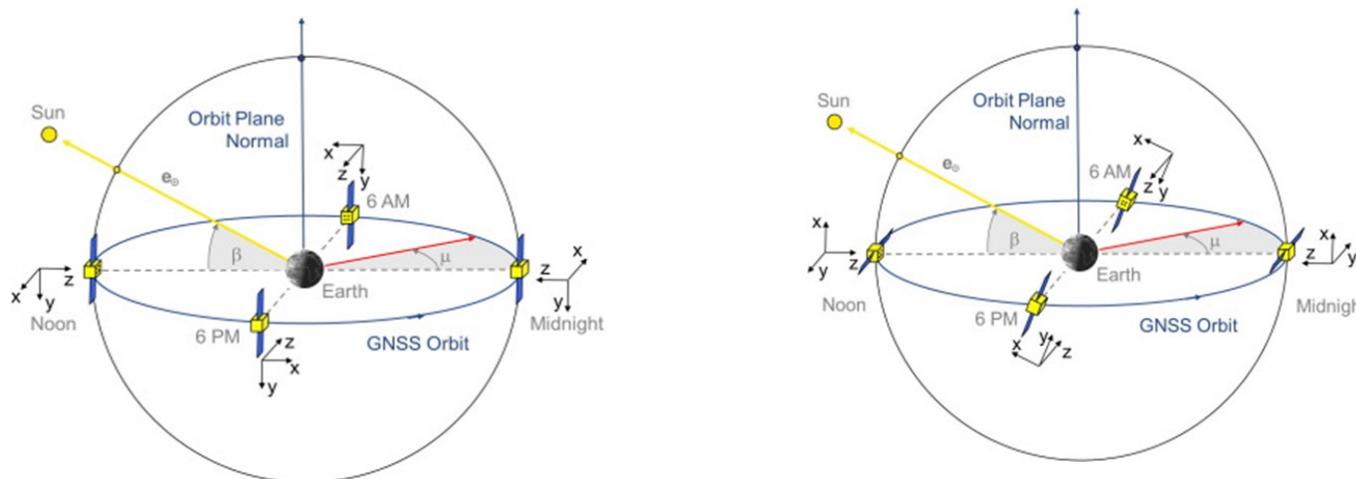
Результаты наблюдений КА «Navstar» (GPS) синие точки – IIR, зеленые – IIRM, красные - IIF

Модификации действующих КА системы GPS

«Фазовые портреты» КА «Navstar» (2013-2018 годы)



Анализ некоординатной информации об околоземных космических объектах на длительных интервалах времени для формирования характеристик и признаков состояния этих объектов



Типовые ориентации панелей солнечных батарей КА относительно Солнца
 Пытаемся аппроксимировать массив наблюдений навигационных КА суммой двух функций: для диффузной и зеркально отражающей плоскости

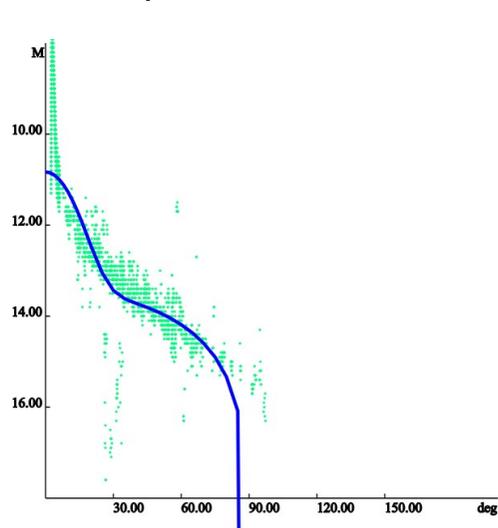
$$E = C_1 \cos \alpha_1 \cos \beta_1 + C_2 (k+1) \cos \alpha_2 \cos^k \beta_2 \text{ где } \alpha_2 = 0, \beta_2 = \phi \text{ (фазовому углу)}$$

Поскольку угол, под которым видна Земля с высоты геостационарных спутников, достаточно мал (не более 14 градусов), в первом приближении можно считать $\alpha_1 = 0$, а $\beta_1 = \phi$ (равным фазовому углу).

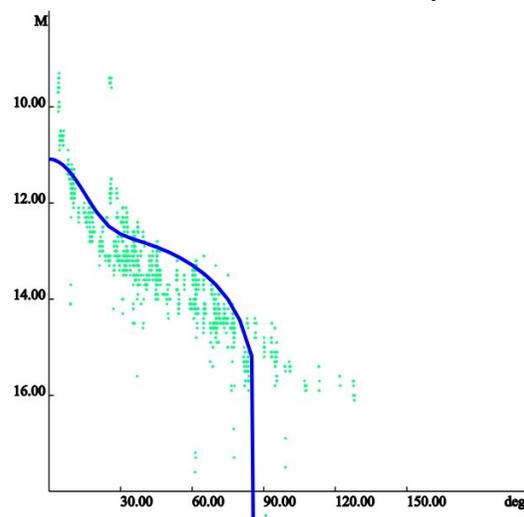
$$E = C_1 \cos \phi + C_2 (k+1) \cos^k \phi$$

Анализ некоординатной информации об околоземных космических объектах на длительных интервалах времени для формирования характеристик и признаков состояния этих объектов

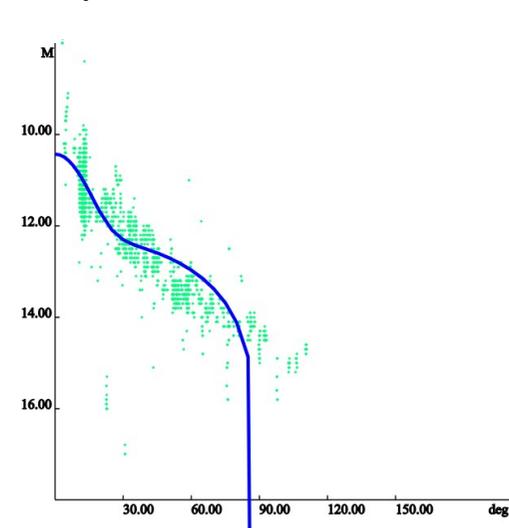
Аппроксимации зависимостей блеска КА от фазового угла.



II-R



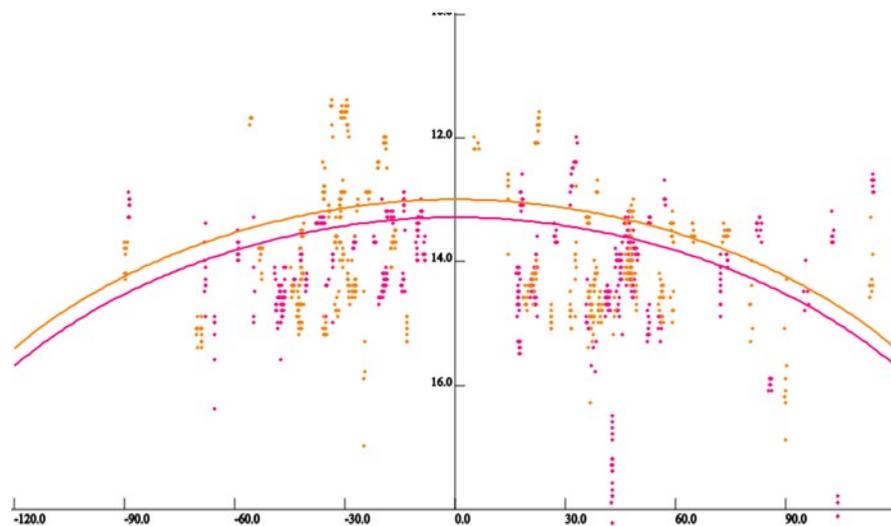
II-R(M)



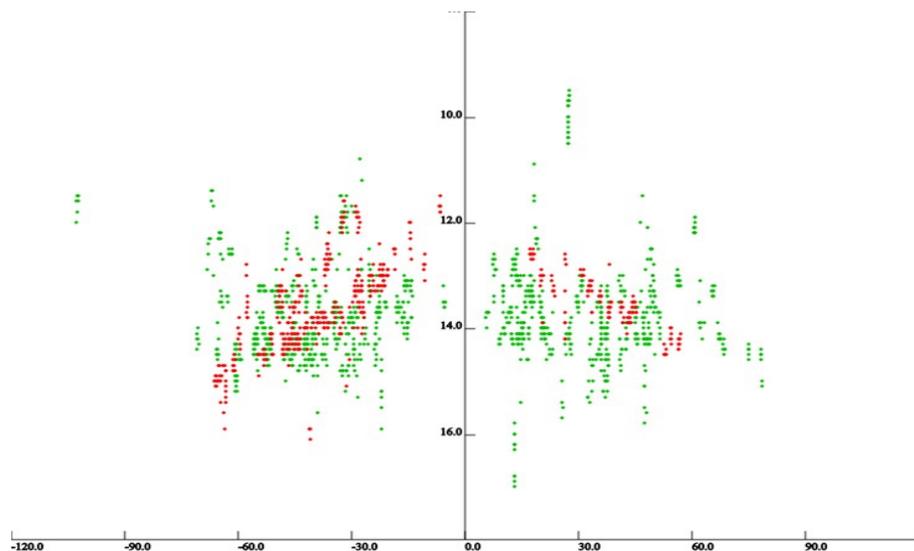
II-F

Модель	C_1	C_2	$a_1 F_1 (m^2)$	$a_2 F_2 (m^2)$	Корпус	Батареи
II-R	0.14	1.4	0.7	1.9	3 – 4 м ²	14.0 м ²
II-R(M)	0.32	0.9	0.7	2.0	1.6×2.0×2.2 м	14.0 м ²
II-F	0.43	1.8	1.3	1.8	2.5×2.1×1.8 м	22.5 м ²

Анализ некоординатной информации об околоземных космических объектах на длительных интервалах времени для формирования характеристик и признаков состояния этих объектов

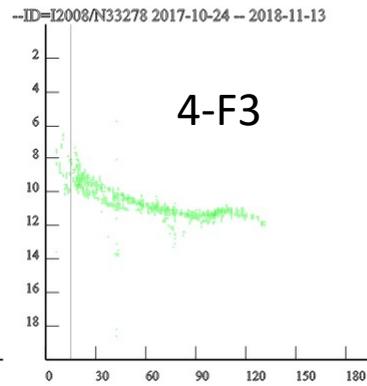
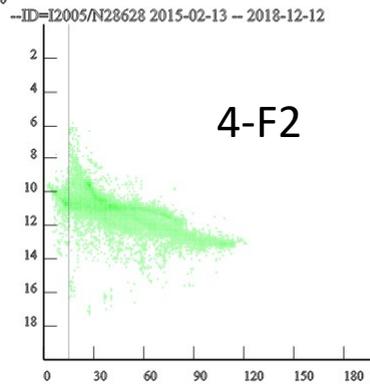
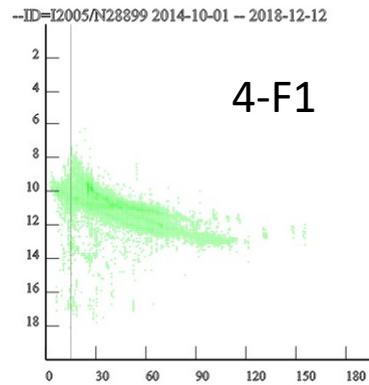
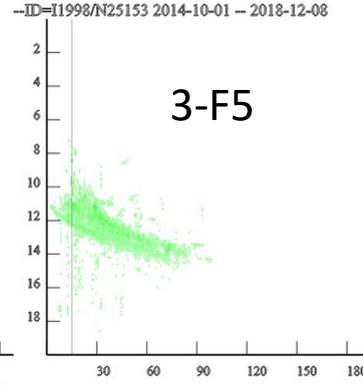
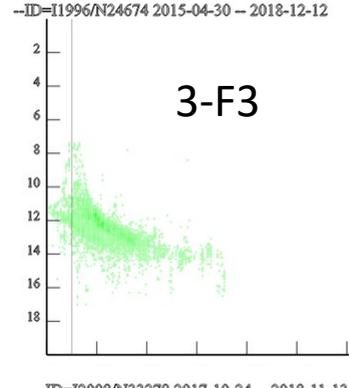
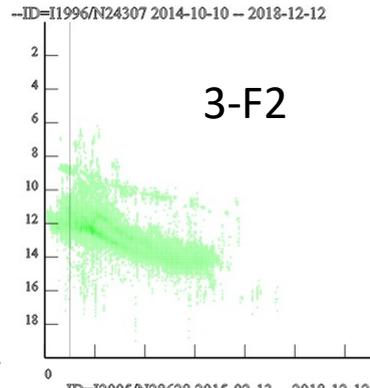
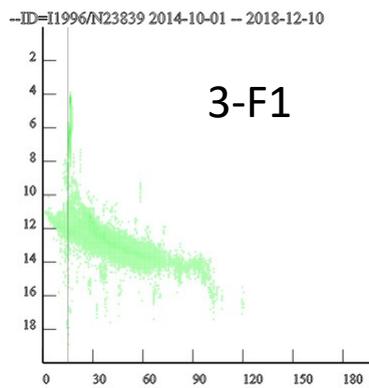


Результаты наблюдений 2013-2016 годах выведенных из эксплуатации КА GPS-I и GPS-II, фиолетовые точки – GPS-I, оранжевые – GPS-II. Кривые – аппроксимация «сферической» зависимостью

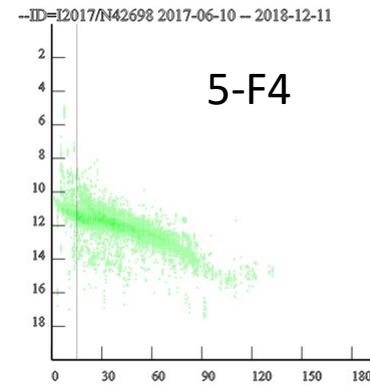
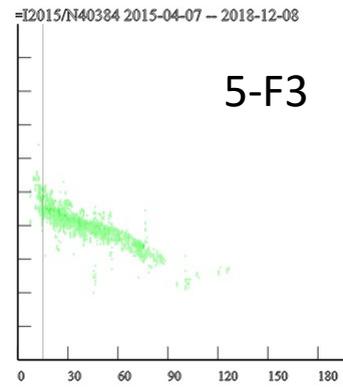
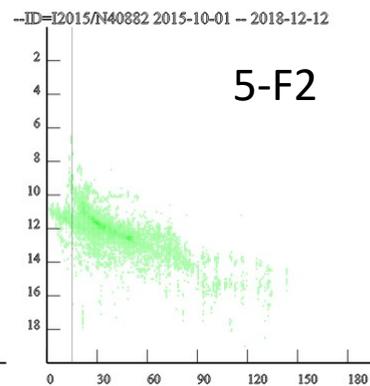
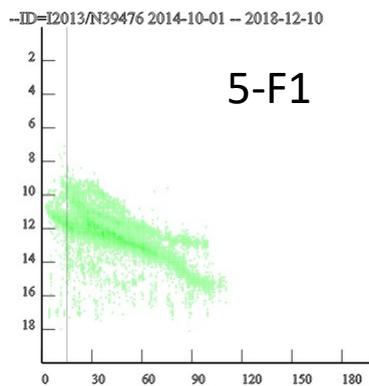
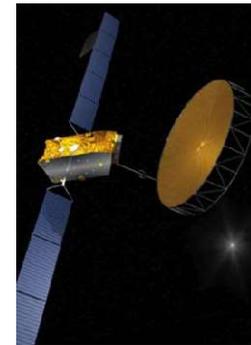


Результаты наблюдений 2013-2016 годах выведенных из эксплуатации КА GPS-IIA. Красные точки – КА, находящиеся в резерве

Анализ некоординатной информации об околоземных космических объектах на длительных интервалах времени для формирования характеристик и признаков состояния этих объектов



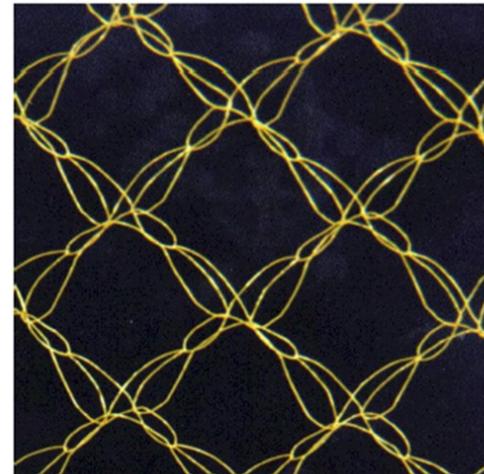
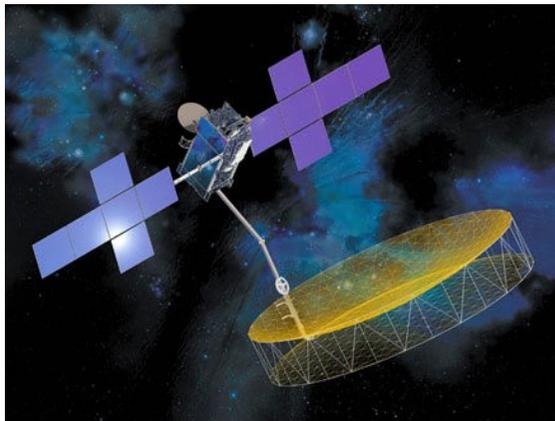
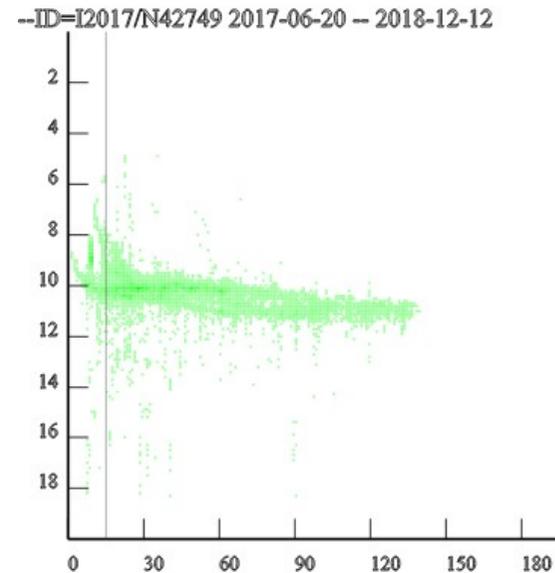
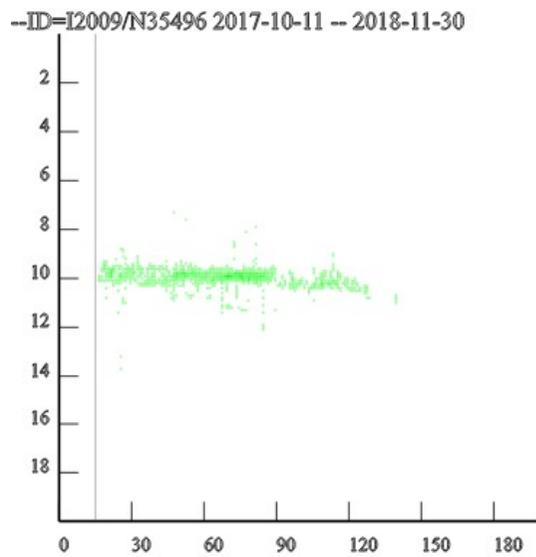
Фазовые
портреты КА
«Инмарсат»



Анализ некоординатной информации об околоземных космических объектах на длительных интервалах времени для формирования характеристик и признаков состояния этих объектов



« Фазовые портреты» КА «Terrestar» и «EchoStar 21»



Анализ некоординатной информации об околоземных космических объектах на длительных интервалах времени для формирования характеристик и признаков состояния этих объектов



Выводы.

- 1. Подтверждено, что различные оптико-электронные средства, используемые при координатных наблюдениях, получают близкие значения блеска наблюдаемых объектов (не имеют существенных систематических погрешностей), удовлетворительно согласующиеся с расчетными значениями.**
- 2. Показана возможность использования фотометрической информации, получаемой в ходе координатных наблюдений околоземных космических объектов, для оценки геометрических, оптических, кинематических параметров объектов и характера их ориентации. Предложены методы анализа этой информации.**
- 3. С помощью предложенных методов проведен анализ фотометрической информации, полученной при координатных наблюдениях навигационных спутников системы GPS, как работающих, так и выведенных из эксплуатации.**
- 4. Показана возможность корректной оценки с помощью предложенных методов размеров, оптических характеристик и стабилизации наблюдаемых объектов.**
- 5. Предложенные подходы позволяют проводить обработку и классификацию наблюдений в автоматизированном режиме, что позволяет в перспективе создать каталог некоординатных характеристик всех наблюдаемых высокоорбитальных и среднеорбитальных космических объектов.**

Анализ некоординатной информации об околоземных космических объектах на длительных интервалах времени для формирования характеристик и признаков состояния этих объектов



Использованные источники.

Investigation of Photometric Data Received from an Artificial Earth Satellites. Eugene Michael Valerie III. 1963.

<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=AD0419069>

B. T. Phong, Illumination for computer generated pictures, Communications of ACM 18 (1975), no. http://www.cs.northwestern.edu/~ago820/cs395/Papers/Phong_1975.pdf

Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics <http://www.gps.gov/multimedia/images/>

GNSS satellite geometry and attitude models

O. Montenbruck, R. Schmid, F. Mercier, P. Steigenberger, C. Noll, R. Fatkulin, S. Kogure, A.S. Ganeshan

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117715004378>

University of New Brunswick, Canada. [Latest GPS Constellation Status](#) (21-07-2016)

<http://www2.unb.ca/gge/Resources/GPSConstellationStatus.txt>

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»

<https://www.iss-reshetnev.ru/>

Thomson. Mechanical vs. Inflatable Deployable Structures for Large Apertures or Still No Simple Answers

<http://kiss.caltech.edu/workshops/apertures/presentations/thomson.pdf>

https://space.skyrocket.de/doc_sdat/inmarsat-3.htm

https://space.skyrocket.de/doc_sdat/inmarsat-4.htm

https://space.skyrocket.de/doc_sdat/inmarsat-5.htm