Детектирование космических объектов по фотометрической информации

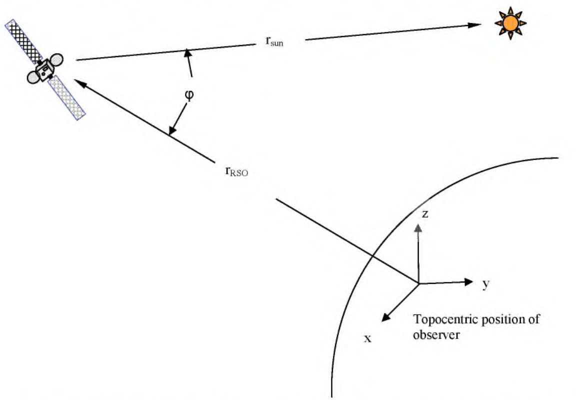
Факультет Космических Исследований, МГУ

Москва

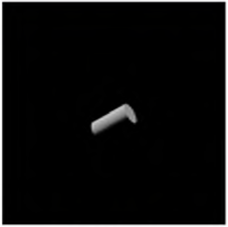
Постановка задачи

1. определние параметров вращения объекта
2. определение формы объекта
3. классификация объектов

Обьект на орбите

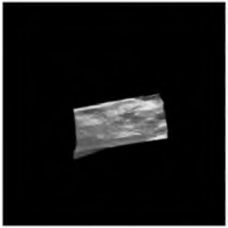


Модели для учета вращения

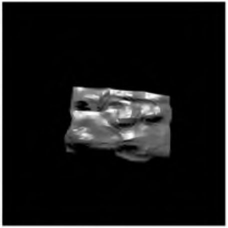


(a) Cylinder

(b) Upper stage

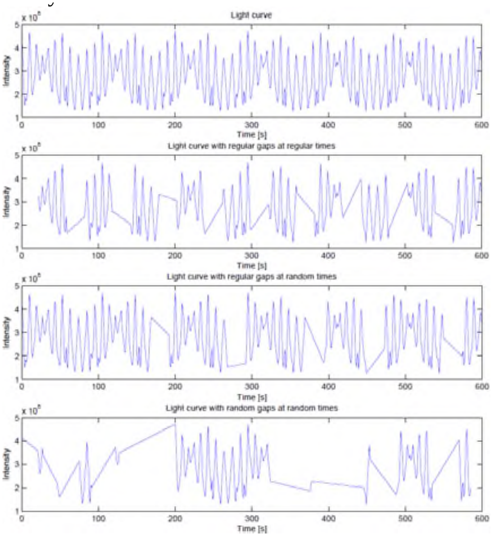


(c) Aluminium fragment



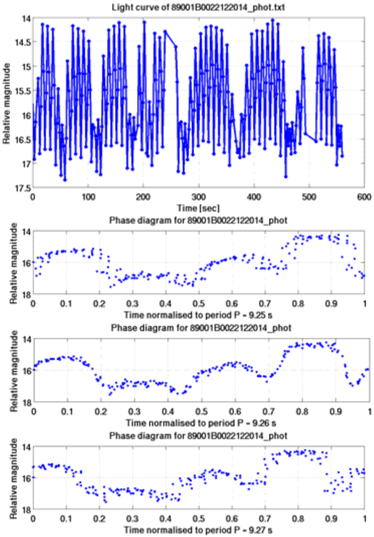
(d) Silver fragment

Примеры кривых с искажениями



Пример спуткника ГЛОНАС

Спутник с периодом вращения 9.26 м/с или 38.9



град/с.

Синодическим периодом обращения (S) планеты называется промежуток времени между ее двумя последовательными одноименными конфигурациями. **Сидерическим** или звездным периодом обращения (T) планеты называется промежуток времени, в течение которого планета совершает один полный оборот вокруг Солнца по своей орбите.

Быстрое Преобразование Фурье

Метод

Позволяет надежно восстановить период вращения, когда он мене 17% полного времени измерений;

Достоинства

может использоваться для проверки например с методом Lomb-Scargle;

Недостатки

маленькое временное разрешение, работает для равномерно спроецированных данных, сложности в применении к кривым с разрывами;

Метод наложения периодов (epoch folding)

Метод

Позволяет надежно восстановить период вращения, когда он мене 45% полного времени измерений;

Достоинства

не требует равномерно отмасштабированных данных;

Недостатки

не всегда надежен, иногда требуется начальное приближение полученное из других методов;

Периодиграмма Ломба-Скаргла

Периодиграмма - оценка спектральной плотности мощности (СПМ), основанная на вычислении квадрата модуля преобразования Фурье последовательности данных с использованием статистического усреднения:

Метод

Позволяет надежно восстановить период вращения, когда он мене 40% полного времени измерений для кривых без разрыва и до 16% для кривых с разрывом;

Достоинства

очень надежные результаты применимые для неравномерных измерений;

Недостатки

результаты не всегда убедительные, необходимо сравнивать с другими методами;

Метод наложения периодов (epoch folding)

Метод

иногда позволяет извлечь ;

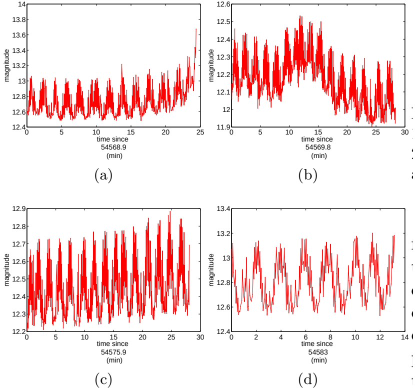
Достоинства

очень надежные результаты применимые для неравномерных измерений;

Недостатки

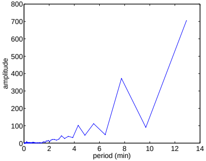
не применим для шумных данных, необходимо начальное приближение из других методов, иногда подразумевает ручную настройку, менее эфектвиен при наличии тренда;

Наблюдаемые кривые

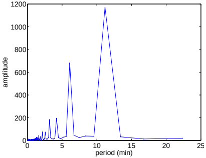


(a) (b) (c) (d)

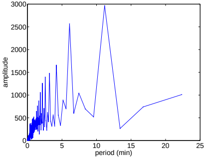
Примеры кривых с искажениями



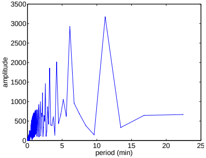
(a)



(b)

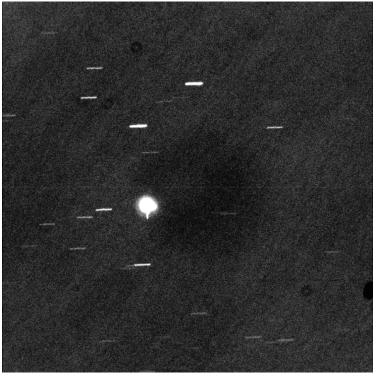


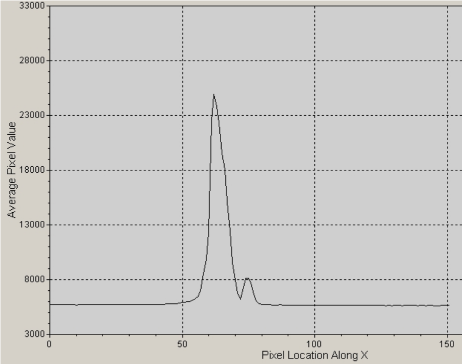
(c)



(d)

Обьекты на орбите





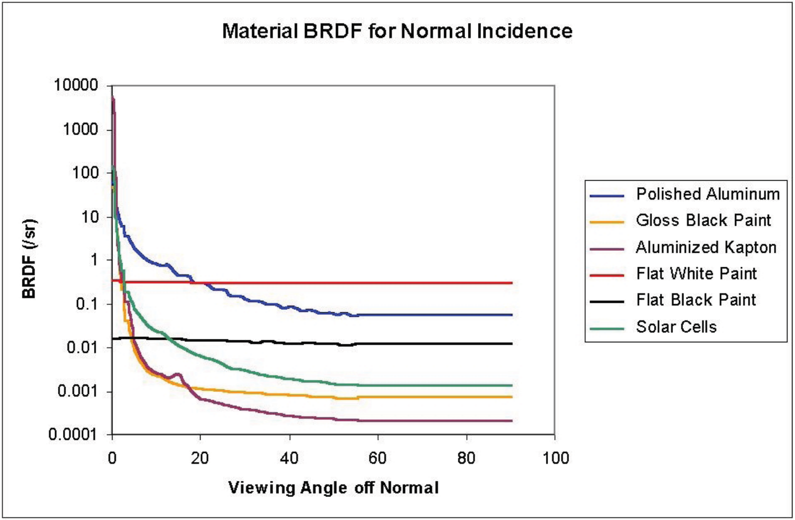
Фотометрия космических объектов

$$\rho = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} BDFR(\theta, \varphi) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi,$$

оптическое сечение аппарата есть сумма сечений поглашения отдельных его элементов

$$\omega_0 = \int_S BDFR(\theta_i, \theta_0) \cos(\theta_i) \sin(\theta_0) d\theta,$$

Примеры функций рассеяния различных материалов



Фотометрический анализ астероидов

основопалагающие статьи:

2. Kaasalainen, M. and Torrpa, J., "Optimization Methods for Asteroid Lightcurve Inversion I. Shape Determination," Icarus, Vol. 153, pp. 24?36, 2001.

3. Kaasalainen, M. et. al., "Optimization Methods for Asteroid Lightcurve Inversion II. The Complete Inverse Problem," Icarus, Vol. 153, pp. 37?51, 2001.

Математическая модель для астероидов

Исходная модель

$$L = Ag,$$

с учетом выпуклости многоугольника выполнено

$$\sum_j n_j g_j = 0,$$

коэффициенты матрицы

$$A_{ij} = S_j(\mu^{ij}, \mu_0^{ij}),$$

можно решать в простейшем случае методом наименьших квадратов

$$\xi = ||L - Ag||^2,$$

для обсеспечения корректности $g_j = exp(a_j)$

Функционал со сглаживанием

Задача усложненная поиском альбедо

$$\chi^2 = \sum_j (g_j - s_j\omega_j)^2 + \lambda_s \sum_i [\sum_j n_j^i s_j]^2 + \lambda_\omega f(\omega),$$

где $f(\omega)$ -есть регуляризующая функция, а λ_s и λ_ω - регуляризующие веса.

Невыпулое восстановления

Вводим набор базисных функций в сферических

$$r(\theta, \phi) = \exp\left(\sum_{lm} c_{lm} Y_l^m(\theta, \phi)\right),$$

или в цилиндрических координатах

$$\rho(x, \phi) = \exp(\sum_{jk} c_{jk} x^j e^{ik\phi})$$

Звездные величины

$$M_1 - M_2 = -2.5 log_{10}(f_2/f_1),$$

$$I_{RSO} = \frac{I_{sun}\sigma_0}{R^2},$$

$$M_{\nu_{RSO}} = M_{sun} - 2.5 log_{10}(\sigma_0/R^2),$$

Оценка звездной величины ЛО методом конечных элементов

Расчет угла зрения на обьект с учетом его вращения:

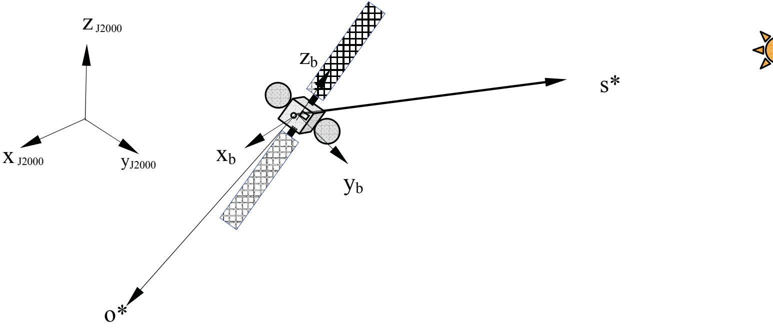
$$o(t, p_{attitude}) = [R(t, p_{attitude}][o^*(t)],$$

$$s(t, p_{attitude}) = [R(t, p_{attitude}][s^*(t)],$$

где $R(t, p_{attitude})$ - коэффициенты вращения Эйлера.

$$L(t, p_{attitude}, p_{body}) = F_{sun} \sum_k A_k \left[\frac{BRDF(a\cos([n_k o(t, p_{att})])[n_k o(t, p_{att})][n_k s(t, p_{att})]}{\pi} \right]. \tag{1}$$

Геометрия наблюдения за обьектом



Уравнения Эйлера динамики космического объекта

$$\psi' = |\vec{L}|(\frac{cos^2\psi}{I_y} + \frac{\sin^2\psi}{I_x}),$$

$$\theta' = |\vec{L}|(\frac{1}{I_x} - \frac{1}{I_y})\sin\theta\sin\psi\cos\psi,$$

$$\psi' = |\vec{L}|(\frac{1}{I_z} - \frac{\cos^2\psi}{I_y} - \frac{\sin^2\psi}{I_y})\cos\theta,$$

Для начальных условий $\psi_0 = 0$, $\theta_0 = \arccos(\frac{r_{oz}}{|\vec{r_0}|})$, $\psi_0 = \arctan 2(r_{0x}, r_{0y})$

Геометрия вращающегося обьекта

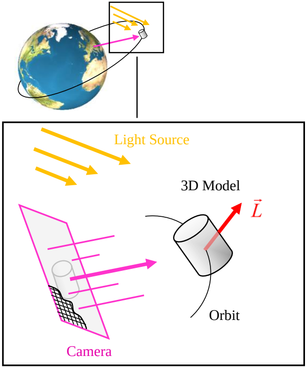


Fig. 1. Scene Components

Уравнение определения состава

$$L(t) = \int aA(\omega)K(t,\omega)d\omega$$

$$L(t, p_{attitude}, p_{body}) = \sum a_k A_k K(t, n_k, p_{attitude})$$

для выпуклых тел давнное суммирование можено предстваить уравнением

$$L(t, p_{attitude}, p_{body}) = \int aA(\omega)K(t, \omega p_{attitude})d\omega,$$

выражение $aA(\omega)$- есть характеристика площадь - поверхность. Для тел с неламбертовым рассеянием

$$L(t, p_{attitude}, p_{body}) = \int [aA_D(\omega)K_D(t, \omega, p_{attitude}) + A_S(\omega)K_S(t, \omega, p_{attitu}$$

для многосоставных материалов, в уравнение добавляется суммирование

$$L(t, p_{attitude}, p_{body}) = \int \sum [aA_m(\omega)K_m(t, \omega, p_{attitude})d\omega.$$

Блики

что можно сказать про характер вращения объекта если мы не знаем его форму? Биссектрису фазового угла можнонайти по формуле:

$$b^*(t) = \frac{o^*(t) + s^*(t)}{|o^*(t) + s^*(t)|},$$

в момент блика нормальный вектр к поверхности и

$$n^*(t_G) b^*(t_G) = 1$$

Обращение кривой блеска

Рассмотрим линейную модель

$$L = Ag,$$

с коэффициентами матрицы $A_{ij} = S(\mu_{ij}, \mu_{0ij}, \alpha)$, $g_j = exp(a_j)$. Данное условие позволяет избежать использования дополнительныйх ограничений при решении задачи. В простейшем случае решение можно искать как минимум функционала:

$$\chi^2 = ||Ag - L||^2,$$

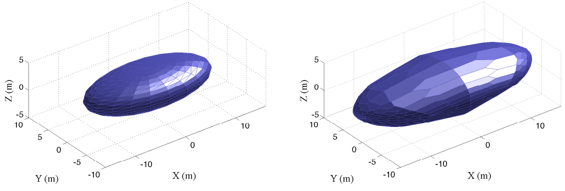
При наличии различныйх кривых наблюдения, полезной бывает нормировка

$$\chi^2 = \sum_i ||\frac{A^k g - L^k}{< L^k >}||^2,$$

введем величину root-mean-square $\chi_{RMS} = \sqrt{(}\chi_{rel}/N)$ для нормы

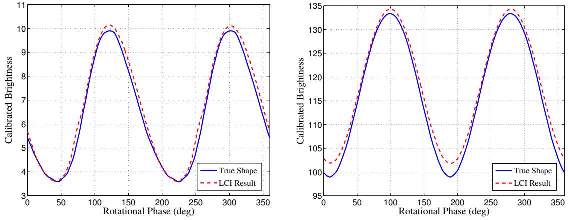
$$\chi^2 = \sum ||\frac{L^k}{< L^k >} - \frac{L^k_{model}}{< L^k_{model} >}||^2,$$

Примеры распознавания обьектов 1



(a) True Shape (b) LCI Result

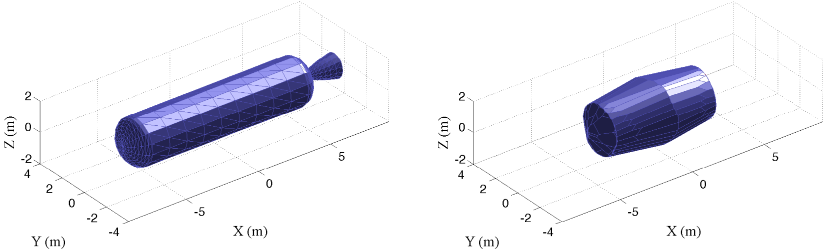
Figure 2: Truth and LCI shape models in body frame for the test ellipsoid.



(a) $\alpha = 95°$ (b) $\alpha = 15°$

Figure 3: Lightcurve comparisons for two different viewing geometries of the test ellipsoid.

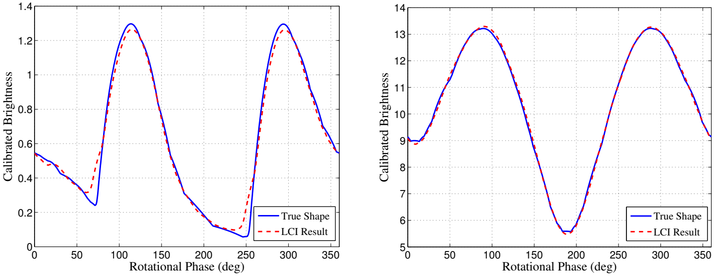
Примеры распознавания обьектов 2



(a) True Shape (b) LCI Result

Figure 4: Truth and LCI shape models for the Centaur upper stage.

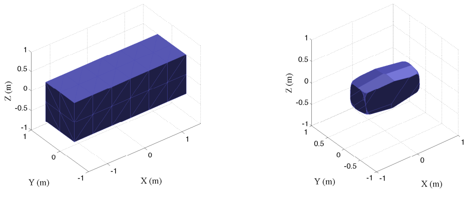
Примеры распознавания обьектов 2



(a) $\alpha = 95^\circ$ (b) $\alpha = 15^\circ$

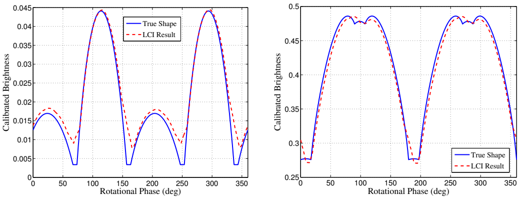
Figure 6: Lightcurve comparisons for two different viewing geometries of the Centaur upper stage.

Примеры распознавания обьектов 3



(a) True Shape (b) LCI Result

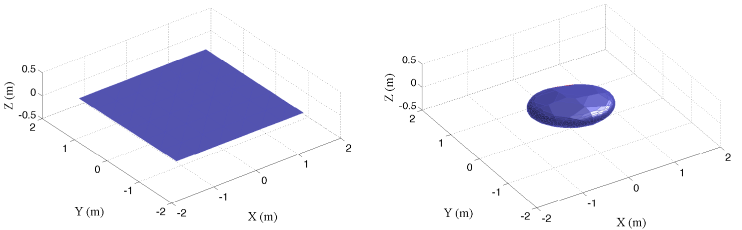
Figure 10: Truth and LCI shape models for a 3U CubeSat.



(a) $\alpha = 95°$ (b) $\alpha = 15°$

Figure 11: Lightcurve comparisons for two different viewing geometries of the 3U CubeSat.

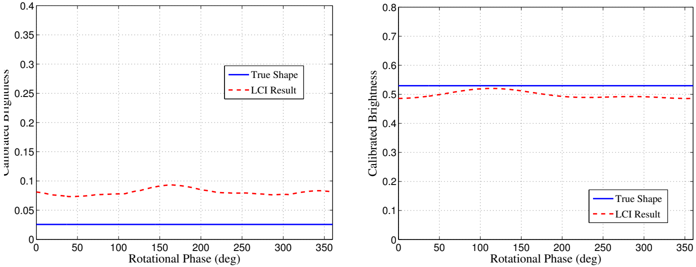
Примеры распознавания обьектов 4



(a) True Shape (b) LCI Result

Figure 12: Truth and LCI shape models for the flat plate HAMR object. LCI shape solution generated with the true rotation pole.

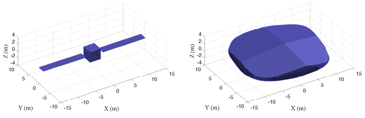
Примеры распознавания обьектов 4



(a) $\alpha = 65^\circ$ (b) $\alpha = 15^\circ$

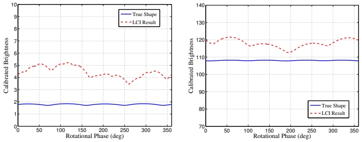
Figure 13: Lightcurve comparisons for two different viewing geometries of the flat plate HAMR object. The LCI solution is based on the thin disc generated using the true rotation pole.

Примеры распознавания обьектов 5



(a) True Shape (b) LCI Result

Figure 14: Truth and LCI shape models for the box-wing GEO satellite.



(a) $\alpha = 65°$ (b) $\alpha = 15°$

Figure 15: Lightcurve comparisons for two different viewing geometries of the box-wing satellite. The LCI solution is based on the use of the true rotation pole.