



О возможности увода астероида с помощью двигателя малой тяги

К.В.Холшевников, К.И.Оськина, Т.Н.Санникова, В.Б.Титов
СПбГУ, ИПА РАН

Околоземная астрономия и космическое наследие
Казань, 30 сентября – 4 октября 2019

Постановка задачи

Астероид \mathcal{A} движется по опасной орбите с элементами:
 ω = среднее движение, e, i, Ω, g = аргумент перицентра, M, a .

Двигатель малой тяги сообщает ему ускорение T по трансверсали к оскулирующей орбите.

Уравнения движения

Уравнения движения типа Эйлера приведены в статье:

Санникова Т.Н., Холшевников К.В.

Осредненные уравнения движения при постоянном в различных системах отсчета возмущающем ускорении //

Астрон. журн., 2014, 91, 12, 1060–1068.

Astronomy Reports, 2014, Vol. 58, No. 12, pp. 945–953.

По методу осреднения получена замена переменных (переход к средним элементам) и уравнения движения в средних элементах.

Уклонение оскулирующей орбиты от средней

$$\varrho_1 := \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (\Delta \mathbf{r}_1)^2 dM}.$$

$$\varrho_1 = \frac{4|T|}{\omega^2} \sqrt{1 - \frac{99}{512}e^2 - \frac{385}{512}e^4 - \frac{1}{512}e^6}.$$

Уравнения движения в средних элементах

$$\dot{\omega} = -\frac{3\eta}{a}T,$$

$$\dot{e} = -\frac{3e\eta}{2\omega a}T,$$

$$\dot{M} = \omega,$$

$$\dot{i} = \dot{\Omega} = \dot{g} = 0.$$

$$\eta = \sqrt{1 - e^2}$$

Решение; круговая начальная орбита

Пусть $e_0 = 0$. Тогда $e = 0$ тождественно.

Введем критическое время t^* и безразмерное „медленное“ время τ :

$$t^* = \frac{a_0 \omega_0}{T}, \quad \tau = \frac{t}{t^*}.$$

Решение (точное!):

$$\omega = \omega_0(1 - \tau)^3,$$

$$a = \frac{a_0}{(1 - \tau)^2},$$

$$M = M_0 + \frac{\omega_0 t^*}{4} \left[1 - (1 - \tau)^4 \right] = M_0 + \omega_0 t \left(1 - \frac{3}{2}\tau + \tau^2 - \frac{1}{4}\tau^3 \right).$$

Решение; некруговая начальная орбита

Решение в виде ряда по степеням медленного времени τ :

$$\omega = \omega_0 \left[1 - 3\eta_0\tau + \frac{3}{4}(4 - 7e_0^2)\tau^2 + \dots \right],$$

$$e = e_0 \left[1 - \frac{3}{2}\eta_0\tau + \frac{3}{8}(1 - 4e_0^2)\tau^2 + \dots \right],$$

$$a = a_0 \left[1 + 2\eta_0\tau + \frac{3}{2}(2 - e_0^2)\tau^2 + \dots \right],$$

$$\delta M = -\frac{3\kappa^2\eta_0}{2a_0^2T}\tau^2 \left(1 - \frac{4 - 7e_0^2}{6\eta_0}\tau + \dots \right).$$

$$\delta M = M - M_0 - \omega_0 t.$$

Радиус сходимости рядов по степеням τ

Таблица:

e	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.550406
τ^*	1	1.0013	1.0051	1.0117	1.0215	1.0352	1.04388
e	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.99	1
τ^*	0.9172	0.6989	0.5100	0.3263	0.2203	0.0951	0

Численные результаты

Вычислим норму периодического уклонения ρ_1 (вызванного отличием оскулирующей орбиты от средней) и векового уклонения $\rho_2(t_1)$ за время $t_1 = 30$ суток и $\rho_2(t_2)$ за время $t_2 = 1$ тропический год для 66 астероидов. Эта выборка содержит АСЗ размером от 26 до 200 метров с хорошо определенными орбитами плюс Апофис.

Тяга всегда 1 ньютон.

Численные результаты

Объект	d	a(au)	e	T ·10 ¹⁰	t* ·10 ⁻¹²	τ_1 ·10 ⁶	τ_2 ·10 ⁵
(2010 YD)	26	2.04	0.538	435	0.480	5.40	6.58
(2002 JR100)	28	0.92	0.299	348	0.891	2.91	3.54
(1998 KY26)	30	1.23	0.202	283	0.948	2.73	3.33
(2010 FX9)	30	1.13	0.367	283	0.990	2.62	3.19
(2010 HA)	32	0.96	0.196	233	1.304	1.99	2.42
(2010 JJ3)	32	2.23	0.578	233	0.855	3.03	3.69
(2010 CO44)	34	1.07	0.231	194	1.481	1.75	2.13
(2010 JO71)	37	1.17	0.387	151	1.824	1.42	1.73
(2010 QG2)	38	1.67	0.517	139	1.654	1.57	1.91
			
468468	197	0.71	0.499	0.999	353.3	0.00734	0.00893
(2010 CB55)	198	1.13	0.148	0.984	284.3	0.00912	0.0111
510055	200	1.23	0.210	0.955	281.7	0.00920	0.0112
99942(Apophis)	325	0.92	0.191	0.223	1390	0.00186	0.00226

Численные результаты

Объект	m $\cdot 10^{-7}$	τ_1 $\cdot 10^6$	τ_2 $\cdot 10^5$	ρ_1 $\cdot 10^{-6}$	$\rho_2(\tau_1)$ $\cdot 10^{-6}$	$\rho_2(\tau_2)$ $\cdot 10^{-6}$
(2010 YD)	2.30	5.40	6.58	35.0	3.10	66.3
(2002 JR100)	2.87	2.91	3.54	2.74	0.859	50.5
(1998 KY26)	3.53	2.73	3.33	5.33	1.04	43.2
(2010 FX9)	3.53	2.62	3.19	4.05	0.903	40.7
(2010 HA)	4.29	1.99	2.42	2.07	0.612	34.8
(2010 JJ3)	4.29	3.03	3.69	24.2	1.87	36.3
(2010 CO44)	5.14	1.75	2.13	2.39	0.587	29.0
(2010 JO71)	6.63	1.42	1.73	2.39	0.503	21.6
(2010 QG2)	7.18	1.57	1.91	6.23	0.746	19.9
	
468468	1000	0.00734	0.00893	0.00346	0.00171	0.131
(2010 CB55)	1020	0.00912	0.0111	0.0144	0.00323	0.150
510055	1050	0.00920	0.0112	0.0177	0.00348	0.145
99942(Apophis)	4490	0.00186	0.00226	0.00175	0.000555	0.0332

Выводы; возмущающая сила = 1 Н

1. Для всех астероидов τ_1, τ_2 лежат глубоко внутри круга сходимости ряда для решения.
2. На месячном интервале $\varrho_1 > \varrho_2(\tau_1)$: периодические возмущения превосходят вековые. Противоположная ситуация на годичном интервале $\varrho_1 < \varrho_2(\tau_2)$ (за одним исключением)
3. Величина $\varrho_2(\tau_1)$ для всех астероидов оказалась меньше радиуса Земли. Увод астероидов за месяц невозможен.
4. Для всех 19 астероидов с диаметром до 55 метров включительно $\varrho_2(\tau_2)$ превысило радиус Земли. Для таких опасных астероидов увод возможен за время около года. Учет периодических возмущений необходим.
5. Увод астероидов крупнее 55-метровых за год невозможен.

Выводы; возмущающая сила = 20 Н

1. Для всех 11 астероидов с диаметром, меньшим 40 метров, и 5 астероидов с диаметрами до 53 метров $\varrho_2(\tau_1)$ превысило радиус Земли. Для более крупных $\varrho_2(\tau_1)$ оказалось меньше радиуса Земли. Таким образом, для небольших опасных астероидов увод возможен за время около месяца. Учет периодических возмущений, превышающих вековые, обязателен.
2. Для всех 47 астероидов с диаметром до 143 метров включительно, а также еще четырех 150-метровых астероидов $\varrho_2(\tau_2)$ превысило радиус Земли. Для таких астероидов увод возможен за время около года. Учет периодических возмущений также необходим.
3. Увод астероидов крупнее 150-метровых, в частности, увод Апофиса за год невозможен.

Апофис

1. Апофис можно увести с орбиты соударения за год при тяге в 8 кН.
2. Апофис можно увести с орбиты соударения за 3.15 года при тяге в 20 Н.



Спасибо! Рәхмәт!