

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 530.12

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПА ХОДА ЧАСОВ В АСТРОМЕТРИЧЕСКОМ ПРОЕКТЕ «ОЗИРИС»

М. М. Денисов, А. А. Зубрило  
(НИИЯФ)

E-mail: zbr@srd.sinp.msu.ru

**Проведено исследование темпа хода бортовых часов космического аппарата «ОЗИРИС». Показано, что для достижения требуемой точности астрометрических измерений влияние релятивистского и гравитационного воздействий на темп хода бортовых часов необходимо контролировать с относительной точностью 0.1 %.**

В настоящее время на стадии подготовки находятся несколько научных программ по проведению прецизионных измерений с помощью интерферометров, стандартов частоты и лазерных систем, установленных на космических аппаратах.

В проекте «ОЗИРИС» [1, 2], разрабатываемом Институтом астрономии РАН, определение угловых положений звезд предполагается осуществлять с высокоапогейной околоземной орбиты с точностью единичного измерения 10 угловых микросекунд. Результатом этой астрометрической миссии должен быть список угловых положений звезд и моментов времени, когда измерения этих положений сделаны. Эти измерения позволят провести уточнение астрономической инерциальной системы отсчета [2], наблюдать собственные движения ближайших двойных систем и провести поиск космических струн [3].

Для обеспечения требуемой в проекте «ОЗИРИС» точности измерения времени необходимо учитывать влияние тонких релятивистских и гравитационных эффектов [4]. Одним из таких эффектов является отличие темпа хода бортовых часов космического аппарата, движущегося в гравитационном поле Земли, от темпа хода часов, покоящихся на поверхности вращающейся Земли. Проведем исследование этого эффекта и выясним, с какой точностью необходимо учитывать этот эффект при проведении астрометрических измерений в проекте «ОЗИРИС».

Следует отметить, что аналогичное исследование проведено в работах [5–7] для проекта LISA, предназначенного для регистрации гравитационных волн в условиях космического полета. Однако в проекте LISA места расположения измерительной аппаратуры и конфигурация спутниковой системы существенно отличаются от таковых проекта «ОЗИРИС»: предполагается, что система будет состоять из трех космических аппаратов, находящихся на гелиоцен-

трической орбитах. Поэтому лазерные станции для высокоточного измерения расстояний между космическими аппаратами и стандарты частоты для измерения времени будут размещены на самих аппаратах, т.е. в локально-геодезических системах отсчета. В проекте «ОЗИРИС» один из стандартов частоты будет расположен на космическом аппарате, а лазерная станция и другой стандарт частоты — на Земле. Это различие в местах расположения измерительной аппаратуры, а следовательно, и различие в величине релятивистских поправок общей теории относительности приводят к необходимости проведения расчета темпа хода часов специально для проекта «ОЗИРИС».

Согласно общей теории относительности, темп хода часов любой природы, движущихся в гравитационном поле, отличается от темпа хода таких же часов, покоящихся на поверхности Земли. Собственное время  $\tau$ , которое показывают часы, связано с координатным временем  $t$  соотношением

$$\tau = \int_0^t \sqrt{g_{ik} dx^i dx^k} = \int_0^t \sqrt{g_{00} + 2g_{0\alpha}\beta^\alpha + g_{\alpha\sigma}\beta^\alpha\beta^\sigma} dt, \quad (1)$$

где  $\beta^\alpha = v^\alpha/c$ , а  $v^\alpha$  — координатная скорость часов.

Так как земные часы находятся в покое на поверхности вращающейся Земли, то выражение (1), определяющее их собственное время  $\tau_E$ , принимает вид

$$\tau_E = \int_0^t \sqrt{1 - \frac{\Omega^2 R^2 \cos^2 \theta}{c^2} - \frac{r_g}{R}} dt,$$

где  $\Omega$  — частота вращения Земли,  $r_g = 2GM/c^2 = 0.887$  см — гравитационный радиус Земли,  $R$  — ее геометрический радиус,  $\theta$  — широта, на которой расположены земные часы.

Космический аппарат движется в гравитационном поле Земли, которое для наших целей с требуемой точностью можно записать в ньютоновском приближении:  $g_{00} = 1 - r_g/r$ ,  $g_{\alpha\sigma} = -\delta_{\alpha\sigma}$ , где  $r$  — расстояние от центра Земли до космического аппарата.

Тогда выражение для собственного времени часов  $\tau_S$ , установленных на космическом аппарате, находящемся на расстоянии  $r_S = r_S(t)$  от Земли, примет вид

$$\tau_S = \int_0^t \sqrt{1 - \frac{r_g}{r_S(t)} - \beta_S^2(t)} dt.$$

Разность показаний  $\Delta\tau = \tau_S - \tau_E$  часов космического аппарата и земных часов будет определяться выражением

$$\Delta\tau = \frac{1}{2} \int_0^t \left\{ \frac{r_g}{R} - \frac{r_g}{r_S(t)} - \beta_S^2(t) + \frac{\Omega^2 R^2 \cos^2 \theta}{c^2} \right\} dt. \quad (2)$$

В этом общем выражении вектор скорости космического аппарата и его радиус-вектор явно зависят от параметров орбиты. Для наших целей достаточно ограничиться ньютоновским приближением и закон движения космического аппарата по орбите представить в виде [8]

$$t = \frac{T}{2\pi} [\eta - e \sin \eta], \quad r_S = a[1 - e \cos \eta],$$

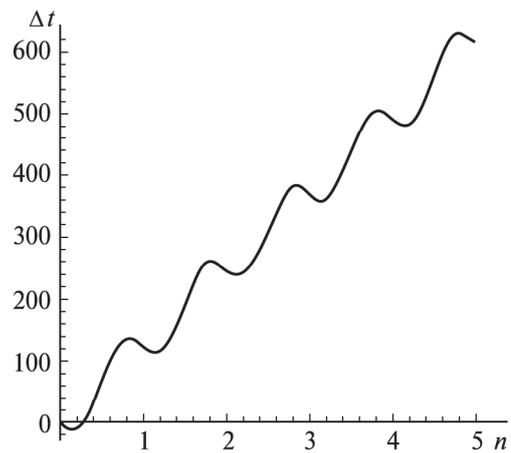
$$\cos \varphi_S = \frac{\cos \eta - e}{1 - e \cos \eta}, \quad \sin \varphi_S = \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin \eta}{1 - e \cos \eta},$$

где для космического аппарата «ОЗИРИС» период обращения  $T = 3.51 \cdot 10^5$  с, эксцентриситет  $e = 0.93768$  и параметр орбиты  $a = 1065122$  км.

Переходя в выражении (2) от интегрирования по координатному времени  $t$  к интегрированию по переменной  $\eta$ , получим

$$\Delta\tau = \frac{T}{4\pi} \left\{ \left[ \frac{r_g}{R} - \frac{r_g}{a} - \frac{4\pi^2 a^2}{c^2 T^2} + \frac{\Omega^2 R^2 \cos^2 \theta}{c^2} \right] \eta - e \left[ \frac{4\pi^2 a^2}{c^2 T^2} + \frac{\Omega^2 R^2 \cos^2 \theta}{c^2} + \frac{r_g}{R} \right] \sin \eta \right\}.$$

Полагая, что часы на Земле находятся на широте  $\theta = 55^\circ 45'$  (широта ВНИИФТРИ, п. Менделеево Московской обл., где имеются наиболее точные стандарты частоты), и подставляя в эту формулу параметры орбиты космического аппарата «ОЗИРИС», для разности  $\Delta\tau$  показаний часов, находящихся на Земле и на космическом аппарате, с требуемой точностью получим:  $\Delta\tau = (19.5\eta - 36.4 \sin \eta) \cdot 10^{-6}$  с. График зависимости разности  $\Delta\tau$  от положения космического аппарата на орбите представлен на



рисунке, где по оси абсцисс отложены обороты космического аппарата по орбите, а по оси ординат — величина  $\Delta\tau$  в мкс. Из рисунка следует, что бортовые часы по сравнению с часами, установленными на Земле, за один оборот космического аппарата «ОЗИРИС» по орбите уходят вперед на величину, равную 123 мкс, так как они движутся в области пространства с меньшим значением гравитационного потенциала, чем потенциал на поверхности Земли. Требуемая же точность регистрации момента измерения угловых положений звезд находится на уровне одной микросекунды. Поэтому в проекте «ОЗИРИС» учет различий в показаниях бортовых часов по сравнению с показаниями земных часов, обусловленными различным влиянием на них релятивистских и гравитационных эффектов, следует производить с относительной точностью  $10^{-3}$ .

Настоящая работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 07-02-00458).

### Литература

1. Боярчук А.А., Багров А.В., Микуша А.М. и др. // Космические исследования. 1999. **37**. С. 3.
2. Багров А.В. // Труды ГАИШ. 2005. **78**. С. 10.
3. Грац Ю.В., Россихин А.А. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2004. № 6. С. 11 (Moscow University Phys. Bull. 2004. N 6. P. 12).
4. Денисов М.М., Зубрило А.А. // Препринт НИИЯФ МГУ № 2005-6/772, 2005.
5. Chauvineau B. et al. // Phys. Rev. D. 2005. **72**. P. 122003.
6. Dhurandhar S.V. et al. // Phys. Rev. D. 2002. **65**. P. 102002.
7. Armstrong J.W. et al. // Phys. Rev. D. 2000. **62**. P. 042002.
8. Ольховский И.И. Курс теоретической механики для физиков. М., 1974.

Поступила в редакцию  
29.09.06