

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ МИКРОГРАВИТАЦИОННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ "ФОТОН-М2" ПО СПУТНИКОВЫМ РАДИОНАВИГАЦИОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

В настоящее время спутниковая радионавигация активно используется для решения различных прикладных задач в космосе. Это обусловлено большим разнообразием выпускаемых навигационных приемников (НП) сигналов от спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС и GPS [1, 2]. При этом коммерческие НП позволяют расширять или модифицировать свои функциональные возможности за счет подключения дополнительных унифицированных плат с соответствующим программным обеспечением [3].

Микрогравитационные космические платформы (МКП) типа "Фотон" предназначены для проведения научных и технологических экспериментов в условиях микрогравитации.

Во время полета МКП "Фотон-М2" в мае-июне 2005 года был проведен эксперимент "НАВИГАТОР" [4, 5]. В силу конструктивных особенностей МКП "Фотон-М2" приемная антенна НП была размещена в непосредственной близости от продольной оси МКП. При этом из-за малых размеров антенны и больших габаритов МКП область видимости антенны со стороны навигационных спутников (НС) ограничивалась плоскостью, перпендикулярной продольной оси МКП (рис. 1). Оценка возможной ориентации продольной оси МКП принципиально возможна по анализу пространственного расположения видимых и невидимых НС. Одной из задач эксперимента "НАВИГАТОР" было послеполетное восстановление возможной ориентации продольной оси МКП "Фотон-М2" по спутниковым радионавигационным измерениям.

При постановке и решении задачи определения возможной ориентации продольной оси МКП использованы правые ортогональные системы координат с центром, расположенным в центре масс объекта:

- связанная система координат (ССК) $Ox_1y_1z_1$ (главная ось Ox_1 – продольная ось);
- орбитальная система координат (ОСК) $Ox_2y_2z_2$ (ось Oz_2 направлена по радиусу-вектору КА, ось Oy_2 направлена по вектору кинетического момента орбитального движения КА, ось Ox_2 дополняет систему координат до правой).

Задача определения возможной ориентации продольной оси МКП рассматривается как задача нахождения направляющих косинусов $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$ продольной оси МКП относительно осей ОСК (рис. 2).

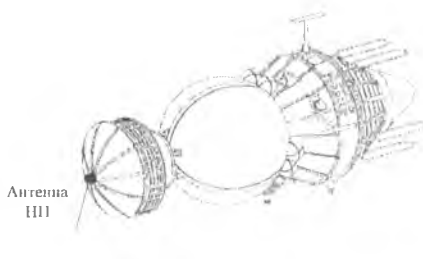


Рис. 1. Размещение антенны III

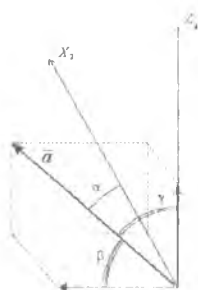


Рис. 2

При этом будем полагать, что заданы следующие исходные данные:

1. Координаты антенны в связанной с МКП системе координат (антенна размещена продольной осью МКП) и конус ее затенения со стороны конструкции МКП.
2. Навигационные данные, формируемые III (массив номеров всех ИС, массив номеров видимых ИС, массив номеров невидимых ИС, геоцентрические координаты всех ИС в СРС, представленные в виде матрицы размером $N_{ИС} \times 3$).
3. Параметры движения центра масс (ЦДЦМ) МКП "Фотон-М2", получаемые от навигационного приемника.

На подготовительном этапе в ОСК вычисляются единичные векторы, коллинейные векторам дальностей до видимых (В) и невидимых (НВ) ИС, и из них формируются соответствующие матрицы I_B размером $N_{IV} \times 3$ и I_{NB} размером $N_{HNB} \times 3$ (при этом исключается из рассмотрения те ИС, видимость которых отсутствует из-за затенения Землей).

Введем обозначения:

$$I_B^1 = [\overline{grad}_{B_1} \quad \overline{grad}_{B_2} \quad \dots \quad \overline{grad}_{B_{N_B}}] \quad I_{NB}^1 = [\overline{grad}_{NB_1} \quad \overline{grad}_{NB_2} \quad \dots \quad \overline{grad}_{NB_{N_{NB}}}],$$

где $\overline{grad}_i = \{x_{2i}, y_{2i}, z_{2i}\}$ - единичный вектор дальности до i -го ИС, в проекциях на ОСК.

Исходя из того, что ширина диаграммы направленности антенны составляет 180° , для видимых и невидимых ИС выполняются следующие соотношения:

$$\begin{cases} \cos(a_i, \overline{grad}_{B_i}) > 0, & (i = 1, N_B) \\ \cos(a_j, \overline{grad}_{NB_j}) < 0, & (j = 1, N_{NB}) \end{cases}$$

где $\vec{a}_2 = \{x_2, y_2, z_2\}$ – единичный вектор антенны, записанный в проекциях на оси ОСК $Ox_2y_2z_2$.

Так как $|\vec{a}_2| = 1$ и $|\overline{grad}_2| = 1$, то, представляя косинусы углов через скалярные произведения, можно записать

$$\begin{cases} x_{2i}x_2 + y_{2i}y_2 + z_{2i}z_2 \geq 0, & (i = \overline{1, N_H}) \\ x_{2j}x_2 + y_{2j}y_2 + z_{2j}z_2 < 0, & (j = \overline{1, N_{HP}}) \end{cases} \quad (3)$$

Используя соотношения (3), описывающие геометрические связи между видимыми и невидимыми НС и вектором антенны, можно записать функционал вида:

$$\Phi(x_2, y_2, z_2) = \sum_{i=1}^{N_H} (x_{2i}x_2 + y_{2i}y_2 + z_{2i}z_2 - 1)^2 + \sum_{j=1}^{N_{HP}} (x_{2j}x_2 + y_{2j}y_2 + z_{2j}z_2 + 1)^2, \quad (4)$$

который в дальнейшем используется для поиска возможной ориентации продольной оси МКП.

Первое слагаемое в (4) описывает связь проекции вектора антенны \vec{a}_2 с проекциями единичных векторов видимых НС \overline{grad}_2 на оси ОСК, второе слагаемое описывает аналогичную связь вектора антенны с векторами невидимых НС.

Решается задача отыскания минимума функционала (4) по направляющим косинусам $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$ (рис. 2), которые равно соответственно x_2, y_2, z_2 , с учетом условия нормировки для координат антенны: $x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 = 1$. Решение задачи отыскания минимума функционала (4) сводится к решению системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} \left(\sum_{i=1}^{N_H} x_{2i}^2 + \sum_{j=1}^{N_{HP}} x_{2j}^2 \right) x_2 + \left(\sum_{i=1}^{N_H} x_{2i}y_{2i} + \sum_{j=1}^{N_{HP}} x_{2j}y_{2j} \right) y_2 + \left(\sum_{i=1}^{N_H} y_{2i}z_{2i} + \sum_{j=1}^{N_{HP}} x_{2j}z_{2j} \right) z_2 = \sum_{i=1}^{N_H} x_{2i} - \sum_{j=1}^{N_{HP}} x_{2j}, \\ \left(\sum_{i=1}^{N_H} x_2y_{2i} + \sum_{j=1}^{N_{HP}} x_2y_{2j} \right) x_2 + \left(\sum_{i=1}^{N_H} y_{2i}^2 + \sum_{j=1}^{N_{HP}} y_{2j}^2 \right) y_2 + \left(\sum_{i=1}^{N_H} y_{2i}z_{2i} + \sum_{j=1}^{N_{HP}} y_{2j}z_{2j} \right) z_2 = \sum_{i=1}^{N_H} y_{2i} - \sum_{j=1}^{N_{HP}} y_{2j}, \\ \left(\sum_{i=1}^{N_H} x_2z_{2i} + \sum_{j=1}^{N_{HP}} x_2z_{2j} \right) x_2 + \left(\sum_{i=1}^{N_H} y_{2i}z_{2i} + \sum_{j=1}^{N_{HP}} y_{2j}z_{2j} \right) y_2 + \left(\sum_{i=1}^{N_H} z_{2i}^2 + \sum_{j=1}^{N_{HP}} z_{2j}^2 \right) z_2 = \sum_{i=1}^{N_H} z_{2i} - \sum_{j=1}^{N_{HP}} z_{2j}. \end{cases}$$

На модельной задаче было показано, что при условии использования всех навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS предельные погрешности не превышают 15° , а в среднем составляют $7^\circ \dots 8^\circ$.

Настоящий алгоритм был апробирован на реальных данных, полученных во время полета МКП "Фотон-М2" (учитывались данные только по видимым НС).

Согласно циклограмме проведения навигационных экспериментов [4], НПЗ на орту МКП "Фотон-М2" работал на протяжении пяти суток полета непрерывно по **есть** часов с интервалами перерыва работы продолжительностью также шесть часов. Общее время работы НПЗ составило 60 часов с ежесекундным запоминанием навигац-

онных решений и вспомогательной информации (отношений сигнал/шум, номер спутников по каждому каналу и т.д.).

Была проведена предварительная отбраковка полученного массива информации для выявления аномальных навигационных решений.

После выведения на орбиту и гашения угловых скоростей МКП начальные углы ориентации продольной оси составляют: $\alpha = 180^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $\gamma = 90^\circ$.

Наиболее достоверные результаты определения ориентации продольной МКП по информации только о видимых НС можно получить при количестве видимых НС, большем или равном 14.

На рис. 3-4 показано количество видимых НС в процессе работы НП на протяжении одного часа в сеансах измерений №3 и №5.

На рис. 5-6 представлены примеры ориентации продольной оси МКП "Фотон-М2" при условии видимости более 14 НС.

Полученные результаты дают представление об ориентации продольной МКП "Фотон-М2" в течение времени проведения навигационного эксперимента: третьи сутки полета угловая скорость продольной оси составляла величину порядка 0,6 град/с. Отклонения продольной оси МКП от нормали к плоскости орбиты не вышались 60° . Движение продольной оси МКП стремится к регулярной прецессии с периодом около 3 ра. Полученные результаты близки к результатам, полученным в работе [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 060-08-00244а).

Библиографический список

1. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (третья редакция). – М.: КНИЦ ВКС, 1995.
2. Global Positioning System. Standard positioning service. Signal specification. 2nd edition. June 2, 1995.
3. Бортовые устройства спутниковой радионавигации /И.В. Кудрявцев, И.Н. Мишурин, А.И. Волюнкин и др. Под ред. В.С. Шабшаевича. – Транспорт, 1998.
4. Белоконов И.В., Болтов Е.А., Крамлих А.В., Собола С.А. Экспериментальные результаты "НАВИГАТОР" на борту космического аппарата "ФОТОН-М2": цели, задачи, предварительный результаты. Сборник трудов XII Всероссийского научного технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов /Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2006, с. 32-40.
5. Белоконов И.В., Крамлих А.В., Собола С.А. Проблема навигационной подсистемы научных экспериментов в космосе на примере миссии КА "Фотон-М2". Сб

материалов XIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. "Электроприбор", Санкт-Петербург, 2007, с. 332-333.

Абрашкин В.И. и др. Определение вращательного движения спутника "Фотон-М2" по данным бортовых измерений магнитного поля Земли. Препринт Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, 2005, № 96.

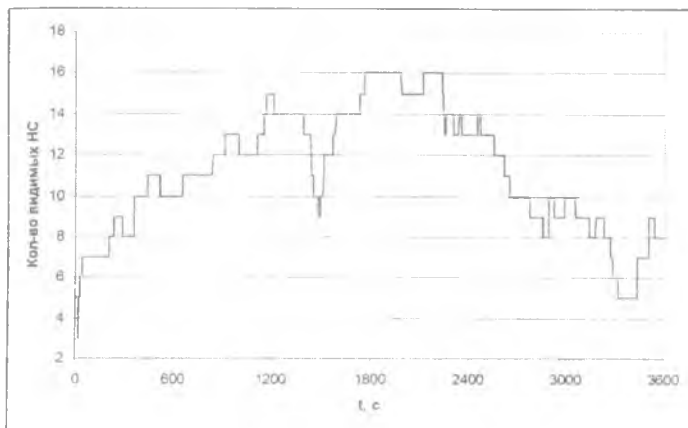


Рис. 3. Количество видимых НС. Сеанс измерений №3 (01.06.05)

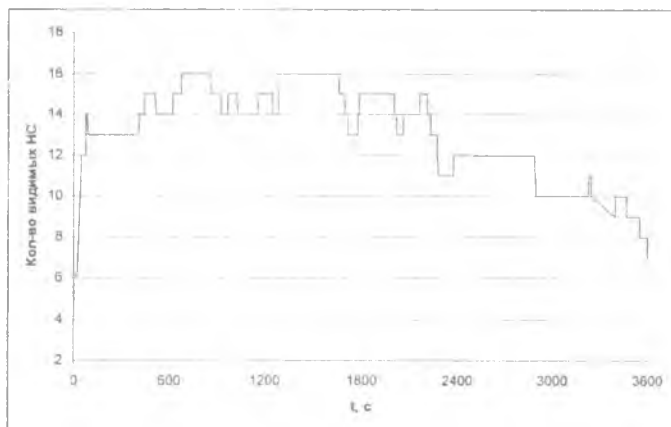
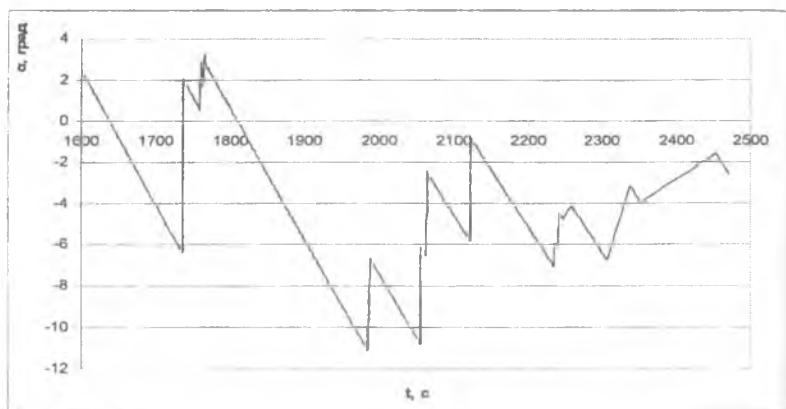
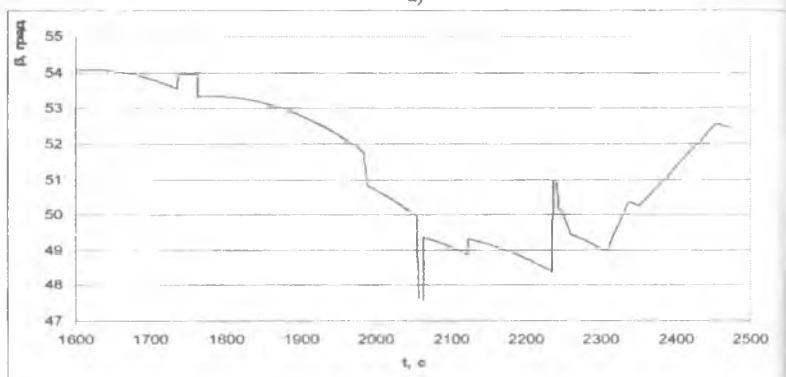


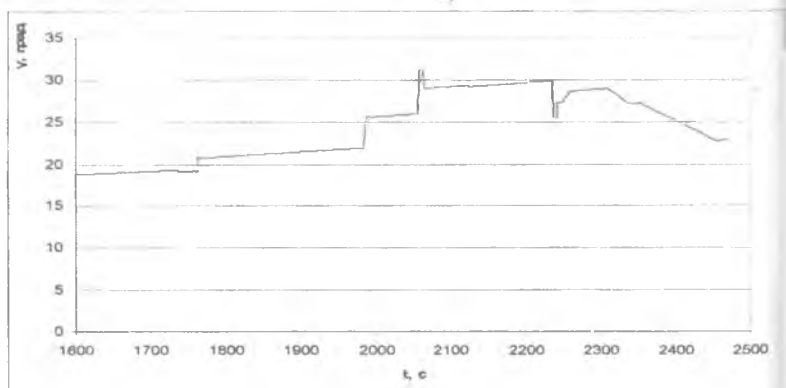
Рис. 4. Количество видимых НС. Сеанс измерений №5 (02.06.05)



a)

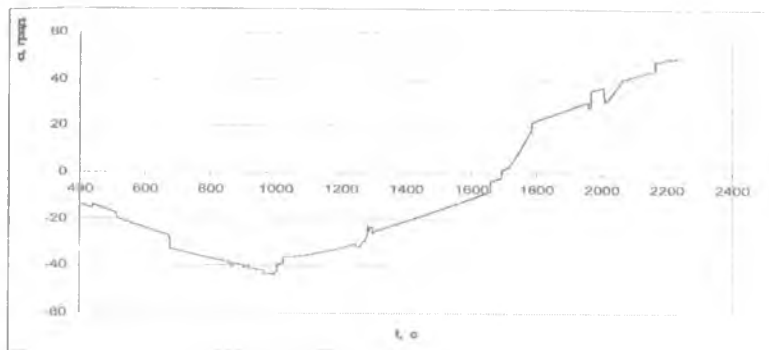


б)

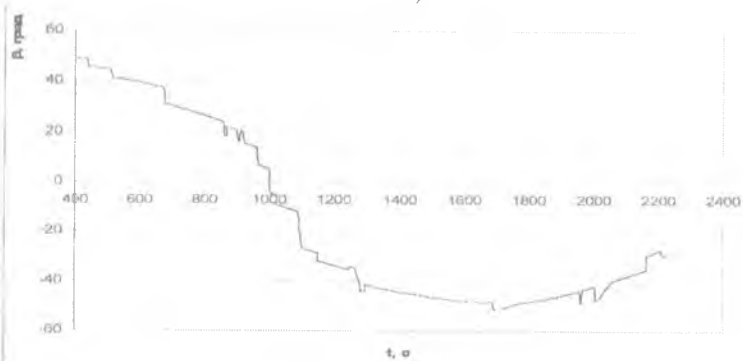


в)

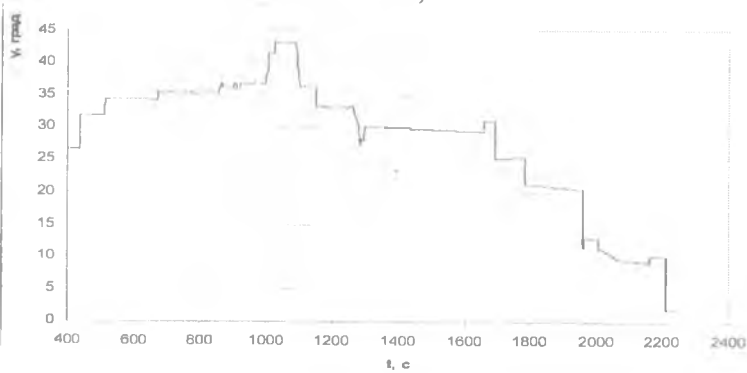
Рис. 5. Сеанс измерений №3 (01.06.05)



а)



б)



в)

Рис. 6. Ссанс измерений №5 (02.06.05)