

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ ТГУ

V Международная молодежная научная конференция
«Актуальные проблемы современной механики
сплошных сред и небесной механики»
25–27 ноября 2015 г., Томск

Издательство Томского университета
2016

наблюдений, показывает, что отбраковку для астероида 2014 WZ120 можно считать результативной.

Заключение

В данной работе приводятся результаты анализа отбраковки наблюдений астероида 2014 WZ120, основанного на определении показателей эффективности $\varepsilon_{отн}$ и $V_{отн}$. Применение этих показателей позволяет оценить смещение относительно друг друга доверительных областей, построенных по данным разных выборок наблюдений, а также определить отношение объемов этих областей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 12-02-00220-а.

Литература

1. Сюсина О.М., Самбаров Г.Е., Черницов А.М., Тамаров В.А. Исследование влияния ошибок модели движения астероидов на точность построения начальной доверительной области // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 10/2. С. 50–59.
2. Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А., Самбаров Г.Е. Способ оценки влияния модели сил на систематическую ошибку определения областей возможных движений астероидов // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 6/3. С. 235–237.
3. Сюсина О.М., Самбаров Г.Е. Новые данные о потенциально опасных астероидах, наблюдавших в одной оппозиции // Изв. вузов. Физика. 2015 (в печати).
4. Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А. Построение доверительных областей в задаче вероятностного исследования движения малых тел Солнечной системы // *Астрономический вестник*. 2012. Т. 46, № 3. С. 209–222.

DOI: 10.17223/9785751124199/22

АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ОБЪЕКТОВ ГНСС

И.В. Томилова, Р.Р. Менибаев

Представлены результаты автокорреляционного анализа долговременной динамической эволюции отработавших объектов ГНСС ГЛОНАСС и GPS. Показано, что орбитальная эволюция отработавших объектов ГЛОНАСС близка к регулярной, а объекты системы GPS обладают сложной орбитальной эволюцией с существенной неравномерностью, изменения большой полуоси имеют к концу 100-летнего периода эволюции хаотические орбиты.

AUTOCORRELATION ANALYSIS OF ORBITAL EVOLUTION OF EXHAUST GNSS OBJECTS

I.V. Tomilova, R.R. Menibaev

The results of the autocorrelation analysis of the long-term dynamic evolution of exhaust objects GLONASS and GPS are presented. It is shown that the evolution of the orbital GLONASS exhaust objects close to a regular and the GPS system objects have complicated orbital evolution with a significant irregularity in the change of the semi-major axis and have chaotic orbits to the end of the 100 year period of the evolution.

Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) функционируют в настоящее время в области МЕО (medium Earth orbits) околоземного космического пространства, на наклонных почти круговых орбитах со средними периодами обращения 40544 с. для спутников системы ГЛОНАСС и 43080 с для объектов системы GPS. Система ГЛОНАСС состоит из 24 действующих объектов, а система GPS – из

32. Рано или поздно все эти объекты потеряют управление и превратятся в космический мусор. После утраты управления объекты будут двигаться по законам небесной механики и движение это, как показано в работах [1–3], будет весьма сложным. Это связано, как известно [4], с особенностью орбит объектов, для которых характерно наличие наклонений, приводящих к появлению вековых резонансов в движении объектов. Знание будущей орбитальной эволюции отработавших объектов необходимо для решения проблемы их утилизации и обеспечения безопасности функционирующих спутников.

В работе [3] дано описание долговременной орбитальной эволюции ныне существующих объектов этих систем в предположении, что все они потеряли управление 8.01.2015 г.

В настоящей работе на основе данных численного эксперимента, приведенных в [3], дается автокорреляционный анализ долговременной эволюции неуправляемых объектов ГНСС в сопоставлении с MEGNO-анализом, приведенным в этой же работе.

Методы исследования

Численное моделирование орбитальной эволюции движения. Численное моделирование долговременной орбитальной эволюции рассматриваемых объектов осуществляется с помощью программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ» [4], дополненного программой MEGNO-анализа орбитальной эволюции объектов [5]. Параметр MEGNO [6] представляет собой взвешенную по времени интегральную форму ляпуновского характеристического числа. Этот параметр обладает рядом полезных свойств: для квазипериодических (регулярных) орбит параметр осциллирует около 2, его усредненное значение для квазипериодических орбит всегда стремится к 2, а для устойчивых орбит типа гармонического осциллятора равно нулю. Для хаотического движения параметр показывает линейный рост.

Программный комплекс реализован на кластере «СкифCybergia» Томского государственного университета. Оценки точности прогнозирования движения ИСЗ с помощью указанного программного комплекса на больших интервалах времени приведены в работе [1]. Оценки получены на примере численного моделирования движения ИСЗ «Эталон-1» и «Эталон-2». Точность моделирования движения на интервале 100 лет при использовании 64-битной разрядной сетки составляет 1 м, а при использовании 128-битной разрядной сетки не превышает 1 мм.

Вычисление автокорреляционных функций. Интегральная автокорреляционная функция I определяется как среднее значение квадратов последовательности автокорреляционных функций A_k [7]. Причем автокорреляционная функция A_k по смешанным моментам имеет вид

$$A_k = \frac{\sum_{i=0}^{N-k} (r_i - \bar{r}_i)(r_{i+k} - \bar{r}_{i+k})}{\left(\sum_{i=0}^{N-k} (r_i - \bar{r}_i)^2 \sum_{i=0}^{N-k} (r_{i+k} - \bar{r}_{i+k})^2 \right)^{1/2}}, \quad (1)$$

где $\bar{r}_s = (s+1)^{-1} \sum_{i=0}^s r_i$ – среднее значение s -элементного подмножества равномерного временного ряда (t_0 – начальный момент, h – постоянный шаг)

$$r_i = r(t_0 + ih), 0 \leq i \leq N, \quad (2)$$

в нашем случае получаемого в результате численного интегрирования уравнений движения объекта (1). Интегральная автокорреляционная функция I вычисляется по формуле

$$I(J_K) = \frac{1}{J_K} \left(1 + \sum_k^K (J_k - J_{k-1}) A_{J_k}^2 \right). \quad (3)$$

Здесь $J_K = j_K - j_{K-k}$ задает сдвиг аргумента автокорреляционной функции A_{J_k} на последовательности экспоненциально распределенных точек

$$j_0 = 0, j_1 = 1, \dots, j_k = j_{k-1} + 2^{\lfloor (k-1)/B \rfloor}, \quad k = 0, 1, \dots, K, \quad j_K \leq N, \quad (4)$$

где $\lfloor (k-1)/B \rfloor$ – целая часть числа, B – базовое число.

Для постоянных временных рядов интегральная автокорреляционная функция I асимптотически стремится к 1. Для равномерного временного ряда, представляющего периодическую функцию типа синус, функция I равна 0,5. Для квазипериодических временных рядов I стремится к нулю.

В результате ряда численных экспериментов Э.Д. Кузнецовым [8] было определено для ИСЗ, что при значении базового числа $B = 100$ интегральная автокорреляционная функция I на интервале интегрирования, равном 200 лет, оценивается надёжно.

Описание результатов

Рассмотрим совместно данные численного эксперимента, описанные в работе [3], и результаты автокорреляционного анализа орбитальной эволюции объектов ГНСС, выполненного в данной работе. Целью совместного анализа является сопоставление орбитальной эволюции ее оценок, полученных с помощью параметров MEGNO, и интегральных автокорреляционных функций.

Что касается объектов системы ГЛОНАСС, то их орбитальная эволюция достаточно однотипна (рис. 1): почти линейное с небольшими колебаниями возрастание эксцентриситета e , долгопериодические, нерегулярные колебания наклона i орбиты и короткопериодические колебания большой полуоси a , отличающиеся высокой нерегулярностью без хаотизации движения. Визуальный анализ подтверждается полученными значениями интегральной автокорреляционной функции (см. рис. 1).

На рис. 1–6 вверху приведены данные об эволюции основных орбитальных параметров объекта: большой полуоси a , эксцентриситета e и наклона i – на 100-летнем интервале времени и изменении параметров MEGNO на том же интервале времени. Сплошной линией показан неусредненный параметр MEGNO, а пунктирной линией – изменение его усредненного значения. На нижних графиках приведены изменения интегральных автокорреляционных функций параметров орбиты a, e, I в зависимости от параметра K , отвечающего за плотности выборки значений исследуемого орбитального параметра.

Орбитальная эволюция объектов GPS отличается большим разнообразием. На рис. 2 приведен пример объекта с идеально регулярной эволюцией элементов орбиты, что полностью подтверждается и значениями интегральных автокорреляционных функций, которые концентрируются около значения 0,5. Усредненный пара-

метр MEGNO приближается к 2. Таких объектов всего два среди всей совокупности рассматриваемых 34 спутников системы GPS.

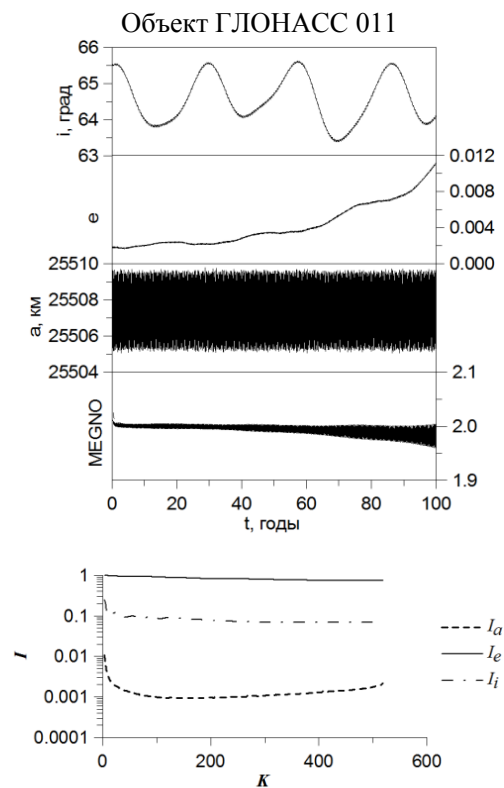


Рис. 1. Результаты анализа долговременной орбитальной эволюции и поведение интегральных автокорреляционных функций для большой полуоси a , эксцентриситета e и наклона орбиты I объекта ГЛОНАСС

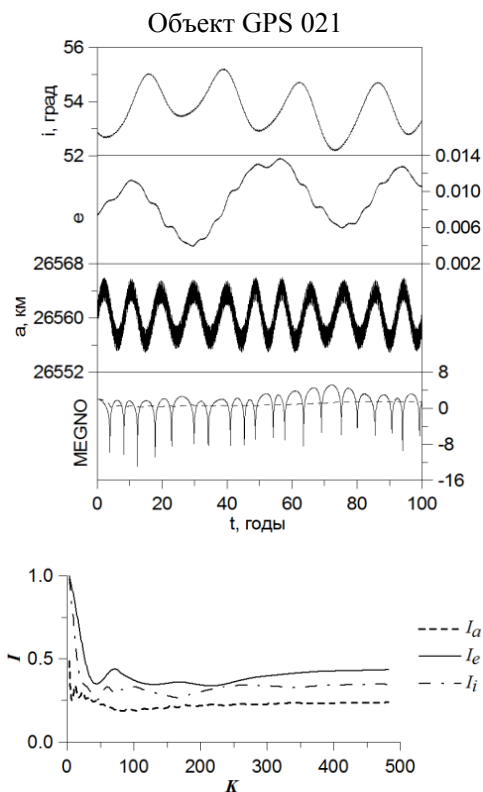


Рис. 2. Пример регулярной орбитальной эволюции и поведение интегральных автокорреляционных функций для большой полуоси a , эксцентриситета e и наклона орбиты I объекта GPS

Большинство объектов системы GPS движутся по нерегулярным орбитам с разной степенью хаотизации движения. Примеры приведены на рис. 3–6.

Обращает на себя внимание тот факт, что во всех этих случаях интегральная автокорреляционная функция показывает значение, близкое к оси абсцисс для большой полуоси a орбиты объекта, причем во всех случаях одно и то же значение независимо от степени хаотизации движения. По-видимому, можно считать, что, как показано в [9] на большом количестве примеров, хаотичность всегда сопровождается неравномерностью изменения большой полуоси орбиты. Однако неравномерность по большой полуоси a выявляется и при отсутствии хаотизации (см. рис. 1) и ее нельзя считать свойством хаотического движения.

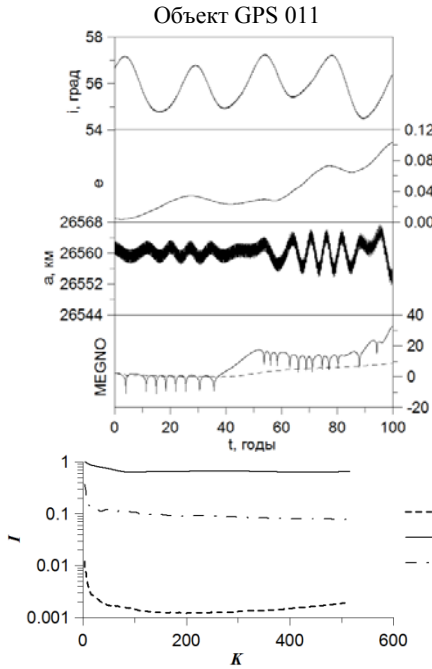


Рис. 3. Пример орбитальной эволюции объекта с незначительной хаотизацией движения и существенной нерегулярностью изменения параметра a , а также поведение интегральных автокорреляционных функций для большой полуоси a , эксцентриситета e и наклона орбиты i

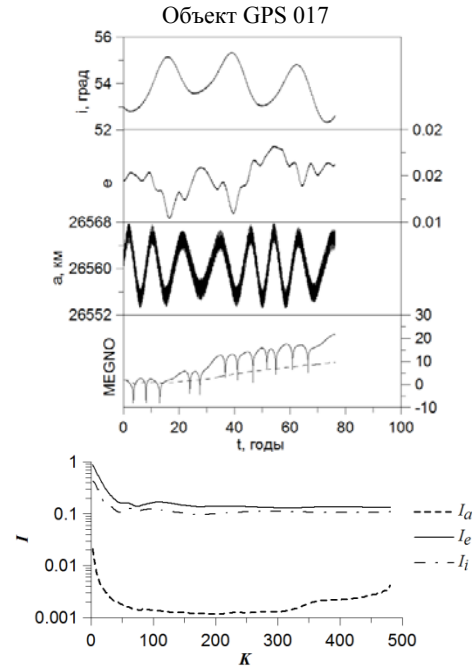


Рис. 4. Пример орбитальной эволюции объекта с значительной хаотизацией движения и малой нерегулярностью изменения параметра a , а также поведение интегральных автокорреляционных функций для большой полуоси a , эксцентриситета e и наклона орбиты i

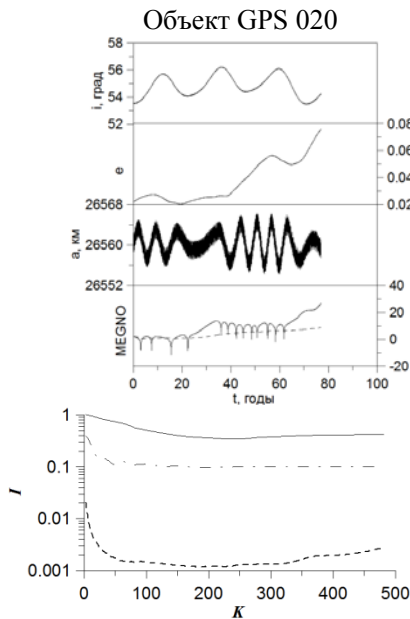


Рис. 5. Пример орбитальной эволюции объекта с значительной хаотизацией движения и существенной нерегулярностью изменения параметра a , а также поведение интегральных автокорреляционных функций для большой полуоси a , эксцентриситета e и наклона орбиты i

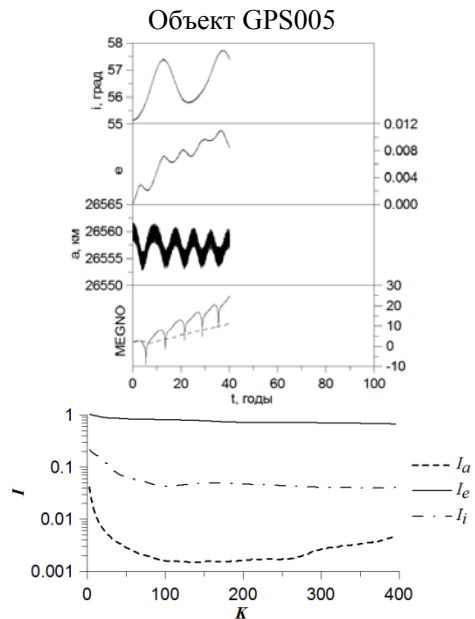


Рис. 6. Пример орбитальной эволюции объекта со стремительной хаотизацией движения и малой нерегулярностью изменения параметра a , а также поведение интегральных автокорреляционных функций для большой полуоси a , эксцентриситета e и наклона орбиты i

Заключение

Таким образом, приведенный здесь автокорреляционный анализ орбитальной эволюции ГНСС показал, что случаи регулярной эволюции элементов орбит этих объектов очень редки. А хаотичность в движении объектов всегда сопровождается неравномерностью изменения большой полуоси орбиты.

Кроме того, приведенные результаты говорят о том, что интегральную автокорреляционную функцию нельзя использовать, как предлагают некоторые авторы [8], в качестве индикатора хаотичности движения. Это другая характеристика, которая может дополнять общее представление о свойствах движения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 15-02-02868а.

Литература

1. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В., Чувашов И.Н.* Влияние вековых резонансов на долговременную орбитальную эволюцию неуправляемых объектов спутниковых радионавигационных систем в области МЕО // *Астрон. вестн.* 2012. Т. 46, № 5. С. 356–368.
2. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В., Чувашов И.Н.* Вековые резонансы как источник возникновения динамической хаотичности в долговременной орбитальной эволюции неуправляемых объектов спутниковых радионавигационных систем // *Астрон. вестн.* 2014. Т. 48, № 4. С. 280–289.
3. *Томилова И.В., Каширин М.В., Бордовицына Т.В.* Описание долговременной орбитальной эволюции неуправляемых объектов ГНСС ГЛОНАСС и GPS // *Изв. вузов. Физика.* 2015. Т. 58, № 10/2.
4. *Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А., Чувашов И.Н. и др.* Численное моделирование движения систем ИСЗ в среде параллельных вычислений // *Изв. вузов. Физика.* 2009. № 10/2. С. 5–11.
5. *Бордовицына Т.В., Александрова А.Г., Чувашов И.Н.* Комплекс алгоритмов и программ для исследования хаотичности в динамике искусственных спутников Земли // *Изв. вузов. Физика.* 2010. № 8/2. С. 14–21.
6. *Cincotta P.M., Girdano C.M., Simo C.* Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits // *Physica D.* 2003. Vol. 182. P. 151–178.
7. *Бриллинджер Д.* Временные ряды. Обработка данных и теория. М.: Мир, 1980. 536 с.
8. *Kuznetsov E.D., Zakharova P.E., Glamazda D.V., Kudryavtsev S.O.* Effect of the high-order resonances on the orbital evolution of objects near geostationary orbit // *Solar System Research.* Vol. 48, is. 6. P. 446–459.
9. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В., Куликова П.В., Менибаев Р.Р.* Применение интегральной автокорреляционной функции для оценки особенностей динамики околоземных космических объектов // *Изв. вузов. Физика.* 2014. № 10/2. С. 88–94.