

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени П. К. ШТЕРНБЕРГА

На правах рукописи
УДК 521.1+521.3+521.98

КУДРЯВЦЕВ Сергей Михайлович

**ВЫСОКОТОЧНЫЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ВАЖНЕЙШИХ ФУНКЦИЙ
НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ В АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЯДЫ
И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ**

Специальность 01.03.01

Астрометрия и небесная механика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва

2006

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Точное представление эфемерид небесных тел и основных функций от них (например, пертурбационных) компактными аналитическими рядами является одной из классических задач небесной механики. Подобные аналитические ряды требуются для решения многих актуальных задач астрономии и космической геодезии, например, при построении теорий прецессии и нутации Земли, теории приливов, аналитических теорий движения ИСЗ и естественных спутников планет и др.

Как правило, такие ряды строятся на основе известных аналитических разложений для координат Луны и планет. Однако, в настоящее время точность подобных разложений уступает точности современных численных эфемерид Луны и планет серий DE/LE (JPL NASA, США) и EPM (ИПА РАН, Россия). [Отметим, что численные эфемериды DE/LE-405,-406 рекомендуются Соглашениями Международной службы вращения Земли в качестве современного стандарта при вычислении координат планет и Луны.]

В частности, использование пертурбационных функций спутниковой задачи, вычисленных на основе имеющихся аналитических теорий движения планет и Луны, не позволяет построить аналитические теории движения ИСЗ, удовлетворяющие на длительных интервалах времени современным требованиям к точности и компактности эфемерид спутников. Отметим, что подобные требования резко возросли (в десятки и сотни раз) в последнее время в связи с появлением качественно новых видов измерений ИСЗ (таких как средства лазерной локации) и возможности применения аналитических теорий движения спутников для представления эфемерид объектов навигационных спутниковых систем (таких как GPS, ГЛОНАСС, Galileo) в бортовых компьютерах КА и наземной аппаратуре потребителя.

Отметим, что важным преимуществом аналитических разложений является их существенно бóльшая компактность по сравнению с численными эфемеридами. В частности, это явилось одной из причин того, что численные эфемериды Луны и больших планет были заменены на аналитические теории движения этих тел в программно-математическом обеспечении ряда операций по управлению полетом Космического телескопа им. Хаббла. [Однако, при этом точность аналитического представления координат Луны оказалась примерно на 2 порядка хуже, чем аналогичный показатель для планет, что обуславливает необходимость улучшения разложения лунной эфемериды в первую очередь.]

В последние годы, в связи с развитием прецизионных радиоинтерферометрических измерений со сверхдлинной базой (РСДБ) существенно возросли требования к точности взаимной привязки Небесной и Земной систем отсчета. Для обработки РСДБ-измерений нужно знать координаты измерительных станций в Небесной системе отсчета, а для этого, в частности, необходимо точное вычисление параметров прецессии и нутации геоэкватора, а также мгновенных значений приливов. Основой для построения теорий, описывающих все эти эффекты, служат аналитические разложения приливообразующего потенциала на поверхности Земли.

Поэтому, весьма актуальна задача получения новых аналитических разложений важнейших потенциалов и пертурбационных функций небесной механики, максимально соответствующим по точности современным численным эфемеридам планет и Луны (в частности, DE/LE-405,-406) и разработки адекватных алгоритмов их использования. Для практической работы также важно разработать универсальный метод получения

подобных разложений, позволяющий относительно легко обновлять коэффициенты соответствующих аналитических рядов при смене стандартной численной эфемериды Луны и планет.

Настоящая диссертация представляет собою вклад в решение вышеперечисленных задач.

Цель диссертации

Основными целями настоящей работы являются:

1. Разработка универсального метода разложения произвольной функции от координат Луны, Солнца и планет (вычисленной на основе современных численных эфемерид этих тел) в аналитические ряды;
2. Высокоточное аналитическое разложение приливообразующего потенциала на поверхности Земли;
3. Представление главных пертурбационных функций спутниковой задачи прецизионными аналитическими рядами;
4. Высокоточное аналитическое решение дифференциальных уравнений Лагранжа движения спутника;
5. Создание новой аналитической теории движения ИСЗ;
6. Прецизионное аналитическое представление современной численной эфемериды Луны.

Научная новизна

1. Разработан новый метод спектрального анализа произвольной функции от координат Луны, Солнца и планет в ряды Пуассона. В отличие от результатов классического анализа Фурье амплитуды и частоты членов итоговых рядов есть полиномы высокой степени от времени, что позволяет достичь высокой точности разложения функции на интервалах времени в несколько тысяч лет;
2. Выполнено новое аналитическое разложение приливообразующего потенциала на поверхности Земли на интервале времени 1000-3000 гг. Точность нового разложения и интервал его применимости в несколько раз превосходят аналогичные характеристики всех известных ранее решений;
3. На основе данного разложения впервые построены компактные аналитические ряды, представляющие главные вариации коэффициентов разложения геопотенциала, вызванные приливными деформациями упругой Земли;
4. Впервые получено полное аналитическое решение 5-го порядка дифференциальных уравнения Лагранжа движения спутника (до этого были известны только полное решение 3-го порядка и для ряда частных случаев - 4-го);
5. Разработана оригинальная высокоточная методика аналитического учета возмущений орбиты ИСЗ от прецессии/нутаии геозкватора, движения полюсов, неравномерного вращения Земли, а также всех приливных эффектов, как-то: морских приливов, приливных деформаций упругой Земли и изменений ее центробежной деформации, вызванных движением полюсов;

6. Построена новая аналитическая теория движения ИСЗ, позволяющая вычислять возмущения от всех геодинамических сил с точностью в 1-2 см для высокоорбитальных спутников (типа ЭТАЛОН, ГЛОНАСС) и с точностью не хуже 70 см для низкоорбитальных спутников (типа STARLETTE) на длительных интервалах времени (несколько сотен витков спутника);
7. Получено новое высокоточное разложение пертурбационной функции, обусловленной притяжением Луны, Солнца и планет на движение ИСЗ, применимое на интервале времени в две тысячи лет, 1000 – 3000 гг.;
8. Уточнены коэффициенты 2-й степени, 1-го порядка в разложении гравитационного потенциала Земли, $\bar{C}_{21}(IERS)$ и $\bar{S}_{21}(IERS)$;
9. Построено новое аналитическое разложение сферических эклиптических координат Луны в ряды Пуассона, представляющее стандартную численную эфемериду Луны LE-405/406 на интервале времени 1500 – 2500 гг. с точностью, в 9 - 70 раз превышающей точность всех известных аналитических теорий движения данного спутника.

Научная и практическая значимость

1. Разработанный новый метод спектрального анализа в ряды Пуассона (где, в отличие от анализа Фурье, амплитуды и частоты членов ряда находятся в виде полиномов высокой степени от времени) применим для построения аналитического разложения произвольной функции от координат Луны, Солнца и планет на длительных (несколько тысяч лет) интервалах времени;
2. Данный метод позволяет быстро получать обновления коэффициентов аналитического представления функции при смене стандартной численной эфемериды Луны и планет;
3. Разработанные алгоритмы аналитического прогнозирования движения спутников внедрены в российский Центр управления полетами ЦНИИМаш (проект «ФОБОС», информационно-аналитическое обеспечение спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС); французском Центре космических исследований (CNES), г. Тулуза; немецком Центре управления полетами (GSOC DLR), г. Весслинг; в состав эфемеридных серверов ГАИШ МГУ (<http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/nss/nssreq4r.htm>) и французского Института небесной механики и расчета эфемерид (IMCEE / BDL), г. Париж (<http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/generateur/saimirror/nssreq4f.htm>).
В 1998 г. работа была удостоена 1-й премии им. акад. С. П. Королева (учрежденной Администрацией г. Королев Московской обл.);
4. Уточненные коэффициенты разложения гравитационного поля Земли $\bar{C}_{21}(IERS)$ и $\bar{S}_{21}(IERS)$ включены в современные Соглашения Международной службы вращения Земли (IERS Conventions; McCarthy, Petit 2003) и рекомендованы для использования в новых моделях геопотенциала и прецизионных расчетах движения ИСЗ;
5. Полученное разложение приливообразующего потенциала может быть использовано при разработке новых высокоточных теорий прецессии и нутации Земли, а также в стандартных программных пакетах для обработки измерений приливов на поверхности Земли (таких как, ETERNA);
6. Аналитическое разложение эфемериды Луны внедрено в практику работы ФГУП НИИ «Комета».

Апробация результатов

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на:

- Международных симпозиумах по динамике космического полета (International Spaceflight symposium): США, г. Гринбелт 1993 г.; Франция, г. Тулуза, 1995 г.; Япония, г. Гифу, 1996 г.; Германия, г. Дармштадт, 1997 г.; Бразилия, г. Фоз до Игуасу, 1999 г.; Россия, г. Москва, 2003 г.;
- Международных конференциях по системам отсчета пространства и времени (Journées systemes de référence spatio-temporels): Франция, г. Париж, 2000, 2002, 2004 гг.; Бельгия, г. Брюссель, 2001 г.; Россия, г. Санкт-Петербург, 2003 г.;
- Научных семинарах французского Бюро долгот (Bureau des Longitudes), г. Париж, 1994 г.; отделения космической механики французского Центра космических исследований (CNES), г. Тулуза, 1996 г.; немецкого Центра управления космическими полетами (DLR GSOC), г. Весслинг, 2000 г.;
- 4-м международном семинаре по позиционной астрономии и небесной механике (Fourth International Workshop on Positional Astronomy and Celestial Mechanics), Испания, г. Пенискола, 1996 г.;
- Коллоквиуме Международного Астрономического Союза (IAU) 165 «Динамика и астрометрия естественных и искусственных небесных тел», Польша, г. Познань, 1996 г.;
- Генеральной ассамблее Европейского геофизического общества (EGU), Франция, г. Ницца, 1998 г.;
- Коллоквиуме им. О. М. Stewart в Университете Миссури, США, г. Коламбия, 2000 г.;
- Международной астрономической конференции JENAM 2000, Россия, г. Москва, 2000 г.;
- Дубошинских чтениях ГАИШ МГУ, г. Москва, 2001 г.;
- Международной конференции «Небесная механика-2002: Результаты и перспективы», Россия, г. С.-Петербург, 2002 г.;
- XXIII Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (IUGG), Япония, г. Саппоро, 2003 г.;
- 35-й научной ассамблее COSPAR, Франция, г. Париж, 2004 г.;
- XIV международной конференции по астрономическим алгоритмам и базам данным (ADASS), США, г. Пасадена, 2004 г.;
- Ассамблее Международной ассоциации геодезии (IAG) «Динамическая планета 2005», Австралия, г. Кэрнс, 2005 г.;
- Ломоносовских чтениях МГУ, г. Москва, 2005 г.;
- Ученом Совете ГАИШ МГУ, г. Москва, 1997, 2005 гг.;
- Координационном Совете по Небесной механике ГАИШ МГУ, г. Москва, 1996 (2), 1999, 2006 гг.;
- Научном семинаре ИПМ им. М.В. Келдыша РАН «Солнечная система и смежные проблемы физики и механики», г. Москва, 2006 г.;
- IV международной конференции по анализу астрономических данных (ADA IV), Франция, г. Марсель, 2006 г.;
- XXVI Генеральной ассамблее Международного астрономического союза (IAU), Чехия, г. Прага, 2006 г.

Публикации и вклад автора

Основные результаты работы опубликованы в 29 статьях (список которых приведен в конце автореферата) общим объемом 201 страница.

В совместных работах автору принадлежат: в [1-5, 7, 14, 29] – разработка и улучшение аналитической теории движения естественных спутников Марса Фобоса и Деймоса; в [28] – разложение приливообразующего потенциала на поверхности Земли. Участие соавторов в заключительном анализе результатов – равное.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она изложена на 141 странице, содержит 6 рисунков и 20 таблиц. В списке литературы 153 наименования.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, указана научная новизна, научная и практическая значимость результатов работы, перечислены результаты, выносимые на защиту, приведены структура и содержание диссертации, указаны печатные работы, в которых отражены основные результаты, и определена доля участия автора в совместных публикациях.

Глава 1. Метод разложения произвольной функции от координат Луны, Солнца и планет в ряд Пуассона

В данной главе представлен разработанный автором новый метод спектрального анализа произвольной функции от координат Луны, Солнца и планет, рассчитанной таблично на основе современных численных эфемерид этих тел на длительном интервале времени. Основные положения метода суть следующие.

Пусть $f(t)$ есть произвольная функция от координат Луны, Солнца и планет, заданная таблично с постоянным шагом на интервале времени $[-T, T]$. Целью метода является построить аналитическое представление данной функции на этом же интервале времени в виде отрезка ряда Пуассона h -го порядка

$$f(t) \approx \sum_{k=1}^N \left\{ \left[A_{k0}^c + A_{k1}^c t + \dots + A_{kh}^c t^h \right] \cos \omega_k(t) + \left[A_{k0}^s + A_{k1}^s t + \dots + A_{kh}^s t^h \right] \sin \omega_k(t) \right\}$$

где $A_{k0}^c, A_{k1}^c, \dots, A_{kh}^c$ есть константы, и $\omega_k(t)$ есть некоторый предопределенный набор аргументов, являющихся полиномами q -го порядка от времени t

$$\omega_k(t) = v_k t + v_{k2} t^2 + \dots + v_{kq} t^q .$$

Для решения этой задачи мы находим проекции $f(t)$ на базис, образуемый функциями

$$\mathbf{c}_{kl}(t) \equiv t^l \cos \omega_k(t) \quad \text{и} \quad \mathbf{s}_{kl}(t) \equiv t^l \sin \omega_k(t)$$

(где $k = 1, 2, \dots, N$; $l = 0, 1, \dots, h$),

численно вычисляя следующие скалярные произведения

$$A_{kl}^c = \langle f, \mathbf{c}_{kl} \rangle \equiv \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t) t^l \cos \omega_k(t) \chi(t) dt$$

$$A_{kl}^s = \langle f, \mathbf{s}_{kl} \rangle \equiv \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t) t^l \sin \omega_k(t) \chi(t) dt$$

где, по определению,

$$\langle f, g \rangle \equiv \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t) \bar{g}(t) \chi(t) dt$$

и \bar{g} есть функция, комплексно сопряженная к функции g ; $\chi(t) = 1 + \cos \frac{\pi}{T} t$ есть фильтр Хэннинга, используемый как весовая функция.

Однако, базисные функции $\mathbf{c}_{k_1 l_1}(t)$, $\mathbf{s}_{k_1 l_1}(t)$, $\mathbf{c}_{k_2 l_2}(t)$, $\mathbf{s}_{k_2 l_2}(t)$, ..., как правило, не являются ортогональными. Поэтому далее выполняется процесс ортогонализации выбранного базиса для того, чтобы улучшить качество разложения и избежать избыточных членов ряда. При выполнении последней процедуры основой служит алгоритм, разработанный Šidlichovský & Nesvořný (1997) и обобщенный автором на случай произвольного базиса. Наряду с ортогонализацией базиса важным обстоятельством является адекватный подбор базисных функций, который осуществляется в алгоритме метода.

В результате:

- Разработан универсальный метод спектрального анализа произвольной функции от координат Луны, Солнца и планет в ряды Пуассона. В отличие от классического анализа Фурье, амплитуды и частоты членов результирующих рядов получаются не константами, а полиномами высокой степени от времени. Это позволяет достичь высокой точности разложения функции на длительных (несколько тысяч лет) интервалах времени и существенно сокращает длину рядов;
- Данный метод позволяет быстро получать обновления коэффициентов аналитического представления функции при смене стандартной численной эфемериды Луны и планет;
- Тестирование метода путем анализа табулированной функции, предварительно полученной с помощью известного аналитического разложения (геоцентрическая дальность до Луны, рассчитываемая полной аналитической теорией ELP2000-85), показало его исключительную эффективность. Все 320 членов ряда Пуассона, представляющего оригинальное разложение ELP2000-85 для геоцентрической дальности Луны, были определены, и, как результат, максимальное отклонение аппроксимированной дальности от исходной не превысило 1,5 см на интервале времени 6000 лет.

Глава 2. Новое высокоточное разложение приливообразующего потенциала на поверхности Земли

Разложение приливообразующего потенциала на поверхности Земли в аналитические ряды представляет собою классическую задачу, решение которой находится и улучшается уже на протяжении около 100 лет. (Аналитические разложения приливообразующего потенциала служат основой для построения теорий земных приливов и современных теорий прецессии и нутации Земли.) Наиболее точные до недавнего времени разложения приливообразующего потенциала были выполнены в работе Roosbeek (1996) (решение

RATGP95), где применялся аналитический метод, и авторами Hartmann & Wenzel (1994, 1995) (решение HW95), использовавшим спектральный анализ Фурье таблицы значений потенциала, рассчитанных на интервале времени 1850 - 2150 гг. на основе (ныне устарелой) численной эфемериды DE-200 (Standish & Williams 1981).

В отличие от предшествующих решений в нашей работе:

- использовался новый оригинальный метод разложения произвольной таблично заданной функции от координат Луны, Солнца и планет в ряды Пуассона;
- в качестве источника координат возмущающих тел использовались наиболее точные на сегодня долгосрочные численные эфемериды Луны и планет DE/LE-406 (Standish, 1998);
- для улучшения разделения близких частот спектральный анализ выполнялся на большом интервале времени (1000 - 3000 гг.).

Получены следующие основные результаты:

- Построено новое высокоточное аналитическое разложение приливообразующего потенциала на поверхности Земли, действительное на интервале времени в 2000 лет, 1000 – 3000 гг.;
- Новое разложение (решение KSM03) включает в себя 26753 члена в оригинальном формате (или 28806 членов в стандартном формате HW95) с амплитудой не менее $10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}^2$;
- Точность решения KSM03 в частотной области не уступает точности лучших предшествующих решений: HW95 и RATGP95. При объединении членов с близкими частотами амплитуды главных членов разложения во всех 3-х решениях практически идентичны. При этом решение KSM03 включает в себя более 14000 новых членов, отсутствующих в предшествующих решениях;
- Точность решения KSM03 во временной области составляет 0.025/0.39 nGal (с.к.о./макс.ошибка) при вычислении гравитационных приливов на среднеширотной станции в течение 1600 – 2200 гг. Данная точность и интервал применимости нового решения как минимум в 3 раза превосходят аналогичные характеристики всех известных ранее разложений приливообразующего потенциала;
- На основе решения KSM03 впервые получены компактные аналитические ряды, представляющие главные вариации коэффициентов разложения геопотенциала, вызванные приливными деформациями упругой Земли;
- Новое разложение приливообразующего потенциала KSM03 представлено в стандартном формате HW95 (<http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/ksm/tgp/ksm03.dat>), что позволяет использовать его в известных программных пакетах для обработки измерений приливов на поверхности Земли (таких как, например, ETERNA), а также при разработке новых высокоточных теорий прецессии и нутации Земли.

Глава 3 Разложения главных пертурбационных функций движения ИСЗ и их применение для построения высокоточной аналитической теории движения спутников

Данная глава посвящена решению актуальной проблемы разложения важнейших пертурбационных функций спутниковой задачи в тригонометрические ряды и высокоточного аналитического прогнозирования движения искусственных и естественных спутников планет. Современные траекторные измерения дальности до

геодинамических ИСЗ (например, данные лазерных наблюдений) имеют точность порядка одного сантиметра. Использование таких измерений, накопленных на длительных интервалах времени (десятки лет), позволяет ставить и решать многие фундаментальные и прикладные задачи космической геодезии (как-то, определение долгопериодических эффектов во вращении Земли, измерение вариаций геопотенциала со временем и др.) Это обуславливает желательность использования в этих случаях аналитических методов прогнозирования движения спутника, т.к. применение в подобных задачах численных методов может приводить к большим затратам времени работы ЭВМ и потере точности вычислений. (Аналитические методы лишены принципиального недостатка численных способов - пошаговых вычислений, приводящих к накоплению ошибок округления с увеличением интервала прогнозирования.)

Также, компактные аналитические методы прогнозирования движения ИСЗ используются в настоящее время для представления краткосрочных эфемерид навигационных спутников (например, GPS) в бортовых компьютерах и наземной аппаратуре потребителя. Повышение точности аналитических методов расчета движения навигационных ИСЗ может привести к уменьшению частоты перезакладки эфемеридных данных на борт КА и улучшить алгоритм представления последних (в частности, для объектов системы ГЛОНАСС).

В решении данной проблемы достигнуты следующие основные результаты:

- Впервые получено полное аналитическое решение 5-го порядка дифференциальных уравнения Лагранжа движения спутника (до этого были известны только полное решение 3-го порядка и для ряда частных случаев - 4-го).
- Коэффициенты разложения гравитационного поля Земли выражены в Небесной системе отсчета (ICRF) в виде аналитических функций от постоянных коэффициентов разложения геопотенциала (определенных в Земной системе отсчета, ITRF), времени и всех известных углов вращения между ITRF и ICRF. На основе данных выражений разработан новый прецизионный метод аналитического вычисления возмущений элементов орбиты ИСЗ, обусловленных прецессией и нутацией геоэкватора, неравномерностями вращения Земли и движением полюсов;
- Разработан эффективный аналитический метод учета всех приливных эффектов в движении ИСЗ, как-то: морских приливов, приливных деформаций упругой Земли и изменений ее центробежной деформации, вызванных движением полюсов. В прецизионных расчетах орбиты спутников на длительных временных интервалах могут быть учтены вековые вариации коэффициентов разложения геопотенциала (такие как J_2);
- В результате построена новая аналитическая теория движения ИСЗ, позволяющая вычислять возмущения от всех геодинамических сил с точностью в 1-2 см для высокоорбитальных спутников (типа ЭТАЛОН, ГЛОНАСС) и с точностью не хуже 70 см для низкоорбитальных спутников (типа STARLETTE) на длительных интервалах времени (несколько сотен витков). При этом скорость вычислений параметров орбиты ИСЗ с помощью аналитической теории существенно превышает аналогичный показатель численного метода;
- Получено новое высокоточное разложение пертурбационной функции, обусловленной притяжением Луны, Солнца и планет на движение ИСЗ. Разложение включает в себя 38585 членов ряда Пуассона с амплитудой не менее $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^2$ и применимо на интервале времени в 2 тысячи лет, 1000 – 3000 гг.;

- Уточнены коэффициенты 2-й степени, 1-го порядка в разложении гравитационного потенциала Земли, $\bar{C}_{21}(IERS)$ и $\bar{S}_{21}(IERS)$. Значения данных коэффициентов и уточненные формулы для их вычисления приняты Международной службой вращения Земли (IERS) и включены в современные Соглашения IERS (McCarthy & Petit 2003) для использования в новых моделях геопотенциала и прецизионных расчетах движения ИСЗ;
- Аналитический метод прогнозирования движения спутников Марса используется в авторской теории движения Фобоса и Деймоса, разработанной для реализации космического проекта «ФОБОС» и впоследствии улучшенной. Сравнение данной теории с численными моделями движения спутников Марса и их наблюдениями, выполненными за последние годы, в т.ч. с искусственных спутников Марса (например, с КА МАРС-ЭКСПРЕСС), показывает, что ошибка аналитического прогноза движения Фобоса вперед на 25-30 лет не превышает 6-8 км (1 σ).

Глава 4 Высокоточное аналитическое представление эфемериды Луны

Теория движения Луны является классической задачей небесной механики. Наиболее точные координаты Луны в настоящее время предоставляются численными эфемеридами LE-405/406 (Standish 1998) и EPM2003 (Krasinsky 2002, Питьева 2003). При этом точность численных эфемерид Луны является в настоящее время лучшей, чем точность соответствующих аналитических разложений, однако важным преимуществом последних является их компактность. Современные численные эфемериды планет и Луны занимают объем в сотни мегабайт, что создает определенные трудности при их практическом использовании. В частности, это является одной из причин того, что численные эфемериды как планет, так и Луны были заменены на аналитические теории движения этих тел в программно-математическом обеспечении ряда операций по управлению полетом Космического телескопа им. Хаббла (McCutcheon 2003). Однако, при этом точность аналитического представления эфемериды Луны оказалась примерно на 2 порядка хуже, чем точность представления координат планет. Поэтому задача получения новых высокоточных аналитических представлений эфемериды Луны является актуальной.

Данная глава представляет аналитическое разложение координат Луны, на новом уровне точности аппроксимирующее современную численную эфемериду спутника LE-405/406.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

- Построено высокоточное аналитическое разложение сферических эклиптических координат Луны в ряды Пуассона с помощью нового метода спектрального анализа современной долгосрочной эфемериды спутника LE-405/406. Полное решение LEA-406a включает в себя 10704 члена для координаты r (геоцентрическая дальность), 19116 членов для координаты V (эклиптическая долгота) и 12450 членов для координаты U (эклиптическая широта) с минимальной амплитудой, равной в линейной мере 1 см, и действительно на интервале времени 1000 лет, 1500 – 2500 гг. Упрощенное решение LEA-406b включает в себя 1996 членов для координаты r , 3770 членов для координаты V и 2186 членов для координаты U с минимальной амплитудой, равной в линейной мере 1 м, и действительно на интервале времени 3000 г. до н.э. – 3000 г. н.э.

- На интервале времени в 1000 лет, 1500-2500 гг., точность представления эфемериды Луны с помощью решения LEA-406a (максимальное отклонение от значений, даваемых численной эфемеридой LE-406) составляет: 3,2 м для координаты r ; 0".0056 и 0".0018 для координат V и U , соответственно. Данные значения превосходят в 9 – 70 раз (в зависимости от координаты) аналогичные характеристики наиболее современной аналитической теории движения Луны ELP/MMP02 (Chapront & Francou 2003) при том что общее количество членов нового разложения оказывается меньшим.

В Заключении сформулированы основные результаты, полученные автором в диссертации. Выражается благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку данной работы грантами №№ 99-02-16552, 02-02-16887, 05-02-16436.

Основные результаты диссертации

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Новый метод спектрального анализа произвольной функции от координат Луны, Солнца и планет, заданной численно на длительном интервале времени (несколько тысяч лет). Метод универсален; используя в качестве входных данных современные стандартные численные эфемериды Луны, Солнца и планет, он позволяет получать разложения многих пертурбационных и других важнейших функций небесной механики в высокоточные аналитические ряды Пуассона, где частоты и амплитуды членов рядов являются полиномами высокой степени от времени. Новый метод является обобщением классического анализа Фурье (как известно, последний дает разложение функций в ряды, члены которого имеют постоянные значения амплитуд и частот);
2. Новое аналитическое разложение приливообразующего потенциала на поверхности Земли. Полученное разложение позволяет вычислять гравитационные приливы на среднеширотной станции с точностью не ниже 0.39 nGal на интервале времени 1600-2200 гг. Точность нового разложения и интервал его применимости как минимум в 3 раза превосходят аналогичные характеристики всех известных ранее решений;
3. Уточненные разложения ряда пертурбационных функций спутниковой задачи для решения задачи аналитического прогнозирования движения ИСЗ на длительных интервалах времени (а именно: пертурбационные функции, обусловленные прецессией и нутацией геоэкватора, движением полюсов, неравномерным вращением Земли, приливными деформациями упругой Земли, притяжением Луны, Солнца и планет);
4. Впервые полученное полное аналитическое решение 5-го порядка дифференциальных уравнений Лагранжа движения спутника (до этого было известно только полное решение 3-го порядка и для ряда частных случаев – 4-го). Новое решение позволяет аналитически прогнозировать движение спутника с более высокой точностью. Новая аналитическая теория движения ИСЗ, позволяющая вычислять возмущения от всех геодинамических сил с точностью в 1-2 см для высокоорбитальных спутников (типа ЭТАЛОН, ГЛОНАСС) и с точностью не хуже 70 см для низкоорбитальных спутников (типа STARLETTE) на длительных интервалах времени (несколько сотен витков);

5. Новая аналитическая теория движения ИСЗ, позволяющая вычислять возмущения от всех геодинамических сил с точностью в 1-2 см для высокоорбитальных спутников (типа ЭТАЛОН, ГЛОНАСС) и с точностью не хуже 70 см для низкоорбитальных спутников (типа STARLETTE) на длительных интервалах времени (несколько сотен витков);
6. Уточненные коэффициенты 2-й степени, 1-го порядка в разложении гравитационного потенциала Земли. Значения данных коэффициентов и улучшенные формулы для их вычисления приняты Международной службой вращения Земли и включены в новые IERS Conventions (2003);
7. Новое аналитическое разложение сферических координат Луны, с высокой точностью аппроксимирующее современную численную эфемериду спутника LE-405/406 на протяжении 6000 лет (3000 г. до н.э. – 3000 г. н.э.). На интервале времени ± 500 лет относительно эпохи J2000.0 (1500 – 2500 гг.) точность вычисления координат Луны улучшена в 9 – 70 раз по сравнению с наиболее современной аналитической теорией движения Луны ELP/MMP02 при меньшем общем количестве членов нового разложения.

Публикации по теме диссертации

1. Иванов Н.М., Колюка Ю.Ф., Кудрявцев С.М., Тарасов В.П., Тихонов В.Ф. (1990) Новая теория движения спутников Марса. Использование данных космической программы «Фобос». *Доклады АН СССР*, т. 313, N 2, стр. 305-308
2. Bugayenko O.I., Yevstigneeva N.M., Kudryavtsev S.M., Nesterov V.V., Novikov S.B., Romanova G.V., Shirokova M.G., Shokin Yu.A. (1990) Results of positional observations of Martian satellites at the Mount Maidanak Observatory in 1988. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, vol. 86, pp. 351-356
3. Kolyuka Yu.F., Kudryavtsev S.M., Tarasov V.P., Tikhonov V.F. Ivanov N.M., Polyakov V.S., Potchukaev V.N., Papkov O.V., Sukhanov K.G., Akim E.L., Stepanians V.A., Nazirov R.R. (1991) International project “Phobos”. Experiment “Celestial mechanics”. *Planet. Space Sci.*, vol. 39, N 1/2, pp. 349-354
4. Кудрявцев С.М., Шокин Ю.А., Евстигнеева Н.М. (1992) Улучшенный ряд положений спутников Марса, полученный из наблюдений в оппозицию 1988 г. *Препр. МО ГАИШ*, N 24, стр. 1-30
5. Евстигнеева Н.М., Кудрявцев С.М., Шокин Ю.А. (1992) Улучшение ряда положений спутников Марса в оппозицию 1988 г. *Письма в АЖ*, т.18, N 9, стр. 815-818
6. Kudryavtsev S.M. (1993) Calculation of perturbations in the orbital elements of a non-spherical planet satellite in long-term intervals. In: *Proc. of AAS/GSFC Intern. Symp. on Space Flight Dynamics*, 1993, Greenbelt, USA, vol. 2, pp. 316/1-316/10
7. Колюка Ю.Ф., Кудрявцев С.М., Тарасов В.П., Тихонов В.Ф. (1994) Навигационная обработка данных телевизионного эксперимента. В сб. «Телевизионные исследования Фобоса», М. Наука, стр.59-75

8. Кудрявцев С.М. (1994) Вычисление возмущений элементов орбиты спутника несферичной планеты на длительных интервалах времени. *Астрон. ж.*, т. 71, N 1, стр. 161-165
9. Кудрявцев С.М. (1995) Вычисление возмущений элементов орбиты спутника несферичной планеты на длительных интервалах времени. Аналитическая теория пятого порядка. *Астрон. ж.*, т. 72, N 2, стр. 285-288
10. Kudryavtsev S.M. (1995) Development of precise analytical theory of satellite motion. In: *Proc. of the 10th Intern. Symp. on Spaceflight Dynamics*, Toulouse, France, Cepadues-Edit., pp. 221-224
11. Kudryavtsev S.M. (1995) The fifth-order analytical solution of the equations of motion of a satellite in orbit around a non-spherical planet. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, vol. 61, pp. 207-215
12. Kudryavtsev S.M. (1996) Satellite orbit perturbations due to non-inertial reference frame. In: *Proc. of the XX Intern. Space Congress*, Gifu, Japan, pp. 181-185
13. Kudryavtsev S.M. (1997) Accurate analytical calculation of effects of rotations of the central planet on a satellite's orbit. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, vol. 67, pp. 131-144
14. Kudryavtsev S.M., Kolyka Yu.F., Tikhonov V.F. (1997) New analytical theory of motion of Phobos and Deimos for navigation support of Mission to Mars. *ESA SP-403, Proc. of the 12th Intern. Symp. on Spaceflight Dynamics*, ESOC, Darmstadt, Germany, pp. 377-382
15. Kudryavtsev S.M. (1998) Updating values for the C_{21} (IERS) and S_{21} (IERS) gravity coefficients. *Annales Geoph.*, vol. 16, sup. 1, p. C236
16. Kudryavtsev S.M. (1999) On calculating the Earth's C_{21} and S_{21} gravity coefficients in the IERS terrestrial reference frame. *J. Geodesy*, vol. 73, N 9, pp. 448-451
17. Kudryavtsev S.M. (1999) Accurate and quick account of the tidal effects by the new analytical method. *J. Brazil. Soc. of Mech. Sci.*, vol. XXI, pp. 552-557
18. Kudryavtsev S.M. (2001) Updated values for the Earth C_{21} and S_{21} gravity coefficients in the IERS Terrestrial reference frame. In: Capitaine N. (ed.) *Proc. of the Journées 2000: Systemes de Reference Spatio-Temporels*, Obs. de Paris, pp. 113-114
19. Kudryavtsev S.M. (2002) Precision analytical calculation of geodynamical effects on satellite motion. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, vol. 82, N 4, pp. 301-316
20. Kudryavtsev S.M. (2002) An improved analytical technique for accurate calculation of satellite motion perturbations due to the Moon/Sun/planets. *Труды ИПА РАН*, N 8, стр. 112-114
21. Kudryavtsev S.M. (2003) Improved analytical method of calculation of "third-bodies" perturbations in satellite motion. *Препр. ИПМ им. М.В.Келдыша РАН*, N 32, стр. 35-36
22. Kudryavtsev S.M. (2003) Compact representation of spherical functions of Sun/Moon ephemerides by frequency analysis. In: Capitaine N. (ed.) *Proc. of the Journées 2001: Systemes de References Spatio-Temporels*, Obs. Royal de Belgique, pp. 269-274
23. Kudryavtsev S.M. (2004) Improved harmonic development of the Earth tide generating potential. *J. Geodesy*, vol. 77, N 12, pp. 829-838

24. Kudryavtsev S.M. (2004) New harmonic development of the Earth tide generating potential. In: Finkelshtein A., Capitaine N. (eds.) *Proc. of the Journées 2003: Systemes de References Spatio-Temporels*, IAA, St. Petersburg, pp. 251-254
25. Kudryavtsev S.M. (2005) Advanced harmonic development of the Earth tide generating potential. In: Sansò F. (ed.) *A window on the future of geodesy*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 465-470
26. Kudryavtsev S.M. (2005) KSM03 harmonic development of the Earth tide-generating potential in Terrestrial reference frame. In: Capitaine N. (ed.) *Proc. of the Journées 2004: Systemes de Reference Spatio-Temporels*, Obs. de Paris, pp. 142-143
27. Kudryavtsev S.M. (2005) Harmonic development of an arbitrary function of the Moon/Sun/planets coordinates to Poisson series. In: Shobbell P.L., Britton M.C., Ebert R. (eds.) *Proc. of Astron. Data Analysis Software and Systems XIV*, ASP Conference series, Astron. Soc. of the Pacific, vol. 347, pp. 133-137
28. Пасынок С.Л., Кудрявцев С.М. (2005) Влияние членов при высоких степенях времени в разложении приливообразующего потенциала на поправки к прецессии. *Вестник Москов. ун-та, сер. 3 Физ., Астрон.*, N 4, стр. 79-80
29. Емельянов Н.В., Арло Ж.-Ю., Варфоломеев М.И., Вашковьяк С.Н., Кантер А.А., Кудрявцев С.М., Насонова Л.П., Уральская В.С. (2006) Создание теорий движения, эфемерид и баз данных для естественных спутников планет. *Космич. исслед.*, т. 44, N 2, стр. 1-10

Цитируемая литература

- Питьева Е.В. (2003) Современные численные теории движения Солнца, Луны и больших планет. *Сообщ. ИИА РАН*, N 156, стр. 1-33
- Chapront J., Francou G. (2003) The lunar theory ELP revisited. Introduction of new planetary perturbations. *Astron. Astroph.*, vol. 404, pp. 735-742
- Hartmann T., Wenzel H.-G. (1994) The harmonic development of the Earth tide generating potential due to the direct effect of the planets. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 21, pp. 1991-1993
- Hartmann T., Wenzel H.-G. (1995) The HW95 tidal potential catalogue. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 22, pp. 3553-3556
- Krasinsky G.A. (2002) Selenodynamical parameters from analysis of LLR observations of 1970-2001. *Commun. IAA RAN*, N 148, pp. 1-27
- Roosbeek F. (1996) RATGP95: a harmonic development of the tide-generating potential using an analytical method. *Geophys. J. Int.*, vol. 126, pp. 197-204
- McCarthy D.D., Petit G. (eds.) (2003) *IERS Conventions (2000)*. *IERS Technical Note*, N 32, Verlag des Bundesamts für Kartografie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- McCuttcheon R.A. (2003) A platform-independent solar-lunar-planetary package for flight dynamics applications based on methods from the Bureau des Longitudes. *Препр. ИИМ РАН*, N 32, стр. 7

- Šidlichovský M., Nesvorný D. (1997) Frequency modified Fourier transform and its application to asteroids. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, vol. 65, pp. 137-148
- Standish E.M., Williams J.G. (1981) Planetary and lunar ephemerides DE200-LE200. URL: <ftp://nav.jpl.nasa.gov/pub/ephem/export/>
- Standish E.M. (1998) JPL Planetary and lunar ephemerides DE405/LE405. JPL IOM 312.F-98-048, Pasadena