

Приложения современной теории движения ИСЗ к прогнозированию траекторий навигационных спутников.

В.Г. Сернов.

Одной из важнейших задач, постоянно решаемых в процессе функционирования систем дифференциальной навигации, является задача высокоточного прогнозирования траекторий навигационных спутников. Чем более точным является такое прогнозирование, тем меньшими будут затраты на эксплуатацию системы. В статье рассматриваются аспекты использования достижений современной теории движения центра масс искусственных спутников Земли (ИСЗ) к прогнозированию движения навигационных спутников.

Существующие глобальные системы спутниковой навигации в условиях нормального функционирования обеспечивают точность местоопределения пользователя в пределах 15-25 метров [1]. Для повышения точности используется дифференциальный режим.

К настоящему времени наиболее широкую известность получили проекты широкозонных систем дифференциальной навигации (ШСДН). Такими системами являются американская WAAS [2], европейская EGNOS [3] и японская MSAS [3]. В этих системах потребителю передаются коррекции параметров модели движения спутников, параметров модели ионосферных задержек и смещений шкал времени спутников. Коррекции параметров модели движения позволяют определять координаты ИСЗ с ошибками не превышающими нескольких дециметров. Столь высокая точность знания координат спутников, при условии учета прочих ошибок, позволяет определять абсолютные координаты приемников так же с ошибками в несколько дециметров [4]. Поправки к эфемеридам навигационных искусственных спутников Земли (ИСЗ) определяются путем уточнения опорной орбиты по измерениям сети станций сбора измерений. Понятно, что от точности исходной опорной орбиты зависит точность получаемой корректирующей информации. При этом, показателем точности опорной орбиты можно считать длительность интервала прогнозирования пассивного движения ИСЗ, на котором ошибки не превышают порогового значения.

В данной статье рассматриваются прикладные аспекты использования достижений современной теории движения центра масс ИСЗ к прогнозированию движения ИСЗ.

Совокупность данных алгоритмов позволяет производить высокоточное прогнозирование движения НИСЗ и использовать полученную модель движения в ШСДН в качестве опорной в задаче формирования дифференциальных поправок.

Для оценивания ошибок прогнозирования в данной работе используются «эталонные» орбиты национальной геодезической службы (National Geodetic Survey <http://www.ngs.noaa.gov>). Заявленная точность этих орбит составляет единицы сантиметров.

Прикладные аспекты использования достижений современной теории движения центра масс ИСЗ к прогнозированию движения навигационных спутников.

Системы координат.

Прогнозировать возмущенное движение спутника можно в любой удобной системе координат. Под "удобной" понимается система координат, реализация уравнений движения в которой требует минимального времени вычислений и не имеет вырожденных случаев, ведущих к неопределенностям. К сожалению, универсальной системы координат не существует. Так, координаты наземных объектов задают в системе, связанной с земной экваториальной плоскостью (земная СК), а координаты Луны и Солнца — в системе, связанной с плоскостью эклиптики (небесная СК).

Основные системы координат, используемые при описании модели движения центра масс НИСЗ:

- Земная опорная система координат (International Terrestrial Reference System, ITRS) [5] \overline{OXYZ} жёстко связана с телом Земли. Точка O совпадает с центром масс, ось \overline{OZ} направлена в точку условного северного полюса, оси \overline{OX} и \overline{OY} лежат в плоскости условного экватора так, что ось \overline{OX} проходит через гринвичский меридиан.
- Небесная опорная система координат (Geocentric Celestial Reference System GCRS), её начало находится в центре масс Земли [6]. Базовой плоскостью является плоскость экватора в стандартную эпоху 1 января 0ч. 0мин. 0сек. 2000 года, обозначаемую как J2000. Главная ось направлена в точку весеннего равноденствия эпохи J2000. Ось Z направлена на северный полюс мира, ось Y дополняет систему до правой.

- Системы координат WGS84 и ПЗ90 являются гринвичскими, но связаны с эфемеридным обеспечением КНС соответственно GPS и ГЛОНАСС.

В соответствии с IERS Standards, 2003 [5, 7] переход между прямоугольными координатами разных систем (А и Б) определяется 7-ю параметрами Хелмерга. Они представляют сдвиг начала координат ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$), развороты относительно осей ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) и масштаб (m). Переход определяется соотношением:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_B = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} + (1+m) \begin{pmatrix} 1 & +\omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & +\omega_x \\ +\omega_y & -\omega_x & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_A$$

Переход из ПЗ90 в WGS84 осуществляется в соответствии с рекомендациями [7] по алгоритму:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{WGS84} = \begin{pmatrix} 0,0m \\ 0,0m \\ -1,1m \end{pmatrix} + (1+9 \cdot 10^{-9}) \begin{pmatrix} 1 & -1,73 \cdot 10^{-6} & -0,02 \cdot 10^{-6} \\ 1,73 \cdot 10^{-6} & 1 & 0,08 \cdot 10^{-6} \\ 0,02 \cdot 10^{-6} & -0,08 \cdot 10^{-6} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{ПЗ90}$$

Информация параметров, входящих в этот алгоритм, размещается в Internet на веб-сайте ИАЦ КВО (<http://www.mcc.rsa.ru/iackvo/rus/mainhtm>) и публикуется в виде ежемесячных отчетов и экспресс-бюллетеней.

Преобразования между системами координат

Преобразование из земной опорной системы координат (ITRS) на дату наблюдений в небесную (GCRS) выполняется при помощи выражения [5]:

$$\vec{r}_{GCRS} = P' \cdot \bar{N}' \cdot R_3(-GAST) \cdot R_1(y_p) \cdot R_2(x_p) \cdot \vec{r}_{ITRS}$$

где: P - матрица прецессии,

\bar{N} - матрица нутации,

$GAST$ - гринвичское истинное звёздное время,

x_p, y_p - координаты полюса.

Верхний штрих означает транспонирование соответствующей матрицы. Обозначения $R_1(\alpha), R_2(\alpha), R_3(\alpha)$ введены для матриц поворота против часовой стрелки на угол α вокруг осей Ox, Oy, Oz .

Первой части формулы преобразования, произведению транспонированных матриц прецессии и нутации, соответствует движение небесного эфемеридного полюса, второй части соответствуют вращение Земли и явление движения полюсов.

Система шкал времени

При работе с аппаратурой потребителя систем GPS и ГЛОНАСС появляются понятия шкал времени этих систем: время системы GPS (GPST) и время системы ГЛОНАСС (GLOT). Кроме того, в задаче прогнозирования, при расчете возмущающих ускорений используются различные шкалы времени, удобные для оценки тех или иных физических процессов. Различия между системами отсчета времени обусловлены разным поведением физических величин, выбранных в качестве опорных.

Не останавливаясь подробно на описании шкал времени, которое можно найти в [9], приведем систему обозначений различных шкал времени в Астрономических ежегодниках [9].

UT = UT1 - Всемирное время от полуночи в средних солнечных сутках.

UT0 - Всемирное время, не исправленное за движение полюса.

GPST - Время навигационной системы GPS.

GLOT - Время навигационной системы ГЛОНАСС.

GMST - гринвичское среднее звёздное время.

TAI - шкала атомного времени.

UTC - Всемирное координированное время, отличающееся от TAI целым числом секунд. Разность показаний часов в системах UTC и UT1 не должна превышать 0.7 секунды.

TDT - земное динамическое время, $TDT = TAI + 32.184$ секунды.

В Ежегодниках и Бюллетенях публикуют также поправки:

$$\Delta T = TDT - UT1 ,$$

$$\Delta UT1 = UT1 - UTC ,$$

$$\Delta TT = TDT - UTC .$$

Отсчет времени на шкале GPST осуществляется непрерывно и без коррекций начиная от полуночи с 5-го на 6-е января 1980г. Смещение шкалы GPST относительно шкалы UTC(USNO) в настоящее время достигло величины ~ 13 секунд. Точное смещение может быть вычислено на основе информации, содержащейся в навигационных сообщениях спутников системы GPS.

Отсчет времени на шкале GLOT осуществляется с периодическими секундными коррекциями, осуществляемыми одновременно с плановыми секундными коррекциями шкалы UTC, осуществляемыми Международным Бюро времени (BIPM) по рекомендации международной службы вращения Земли. Смещение шкалы времени GLOT относительно шкалы UTC не превышает 1 мс. Величина этого смещения передается в навигационных сообщениях спутников системы ГЛОНАСС.

Прогнозирование орбит

Моделирование орбитального движения системы спутников — основной инструмент получения информации, для принятия решений при проектировании спутниковых систем различного назначения. С помощью моделирования оценивается эволюция системы и орбитальная обстановка на длительных интервалах времени, определяются моменты вхождения спутника в зону видимости, вычисляются различные показатели эффективности системы. В дифференциальной системе, как было отмечено ранее, прогнозирование орбит является инструментом для вычисления и оперативного обновления корректирующей информации.

Средства моделирования должны обеспечивать достаточную для принятия решений полноту информации при различной точности вычислений и располагаемых ресурсах вычислительных средств. Задача прогнозирования орбит на начальном этапе может решаться с использованием программ моделирования невозмущенного движения спутников. Как известно, векторное дифференциальное уравнение невозмущенного движения в геоцентрической экваториальной системе координат имеет вид

$$\ddot{\bar{R}} + \mu \frac{\bar{R}}{r^3} = 0 \quad (4)$$

где: \bar{R} - радиус-вектор, направленный из центра Земли в центр масс спутника; μ - гравитационный параметр Земли; r - длина вектора \bar{R} . Согласно этому выражению на спутник действует ускорение Ньютоновской силы тяготения, величина которого равна

$$g = \mu / r^2. \quad (5)$$

При моделировании возмущенного движения, для спутников с высотой полета порядка 20000÷40000км в [5] рекомендовано учитывать помимо сил центрального гравитационного поля Земли - силы, обусловленные:

- аномалии гравитационного поля Земли (гармоники до 12 степени) [6];
- гравитационные притяжения КА планетами, Луной и Солнцем [6];
- возмущения вызываемые приливами в упругом теле Земли [5];
- возмущения вызываемые океаническими приливами [6,10];
- возмущения, вызываемые давлением солнечного света [5];

Действие данных сил вызывает отклонения (возмущения) координат и скорости относительно невозмущенного движения. Движение спутника с учетом возмущающих сил называют возмущенным движением. Возмущения элементов орбиты принято разделять на периодические и вековые. Вековые возмущения повторяются, например, с периодом обращения спутника по орбите. Вековые возмущения непрерывно нарастают по времени

полета. Наиболее существенными являются вековые возмущения, которые на длительном интервале времени могут оказать существенное влияние на характер орбитального движения спутника.

Дифференциальные уравнения возмущенного движения в геоцентрической экваториальной системе координат (ГЭСК) получаются из (4) добавлением к правой части проекций возмущающей силы:

$$\ddot{q} + \frac{\mu q}{r^3} = \sum_{j=0}^k \Delta g_{jq}, q = \{x, y, z\} \quad (6)$$

где: Δg_{jq} - проекция j -го возмущающего ускорения на координатное направление q . Если составляющие возмущающего ускорения являются частными производными по соответствующим координатам от одной и той же функции $R\{x, y, z, t\}$ координат и времени, то функция R называется возмущающей или пертурбационной функцией.

Характеристики точности прогнозирования пассивного движения НИСЗ.

В конечном итоге была создана и испытана модель возмущенного движения НИСЗ. В качестве эталонной орбиты, как отмечалось ранее, была взята орбита полученная службой национального геодезического обозрения ([National Geodetic Survey http://www.ngs.noaa.gov](http://www.ngs.noaa.gov)), заявленная точность составляет которой единицы сантиметров. Такая точность была достигнута в результате постобработки измерений сети станций, расположенных по всему земному шару. Файлы оценок орбит распространяются в текстовом формате SP3 и двоичном E18. В текстовом формате приводятся координаты GPS спутника в узловых точках в системе WGS84, период узловых точек 15мин. Зададим в качестве начального вектора моделирования вектор, одной из узловых точек SP3 файла. Производя интегрирование, будем сравнивать в последующих узловых точках значения «эталонной» орбиты и моделированной.

На рис. 1 изображено поведение модели возмущенного движения ИСЗ. Интервал моделирования, на котором точность прогнозирования орбиты не превысит 30см, составляет более 1 часа. Достигнутая точность модели движения НИСЗ (для спутников с высотой орбит порядка 20000км.) позволяет использовать её в системах дифференциальной навигации для формирования дифференциальных поправок к эфемеридам спутников на час вперед. Следует отметить, что дальнейшее повышение точности модели орбиты позволит увеличить время прогнозирования, однако это возможно лишь в результате обработки дополнительных данных (будь то дальность до спутника, псевдодальность, измерения псевдофазы и т.д.).

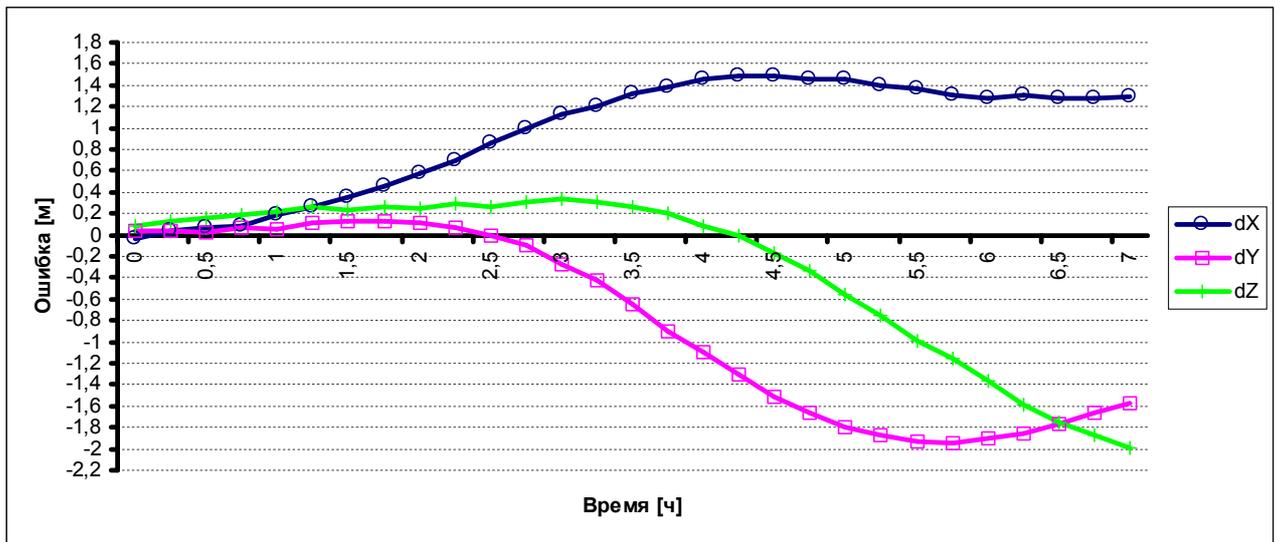


Рис. 1 Различие модели возмущенного движения ИСЗ от «эталонной» орбиты.

Так же было проведено статистическое исследование на достоверность полученного результата. Суть эксперимента заключалась в построении гистограммы длительности интервала прогнозирования, на котором ошибки не превышают 30см. Для этого было проведено порядка 1000 экспериментов. Гистограмма длительности прогнозирования этих экспериментов, при условии что ошибки не превышают 30см, приведена на рис. 2.

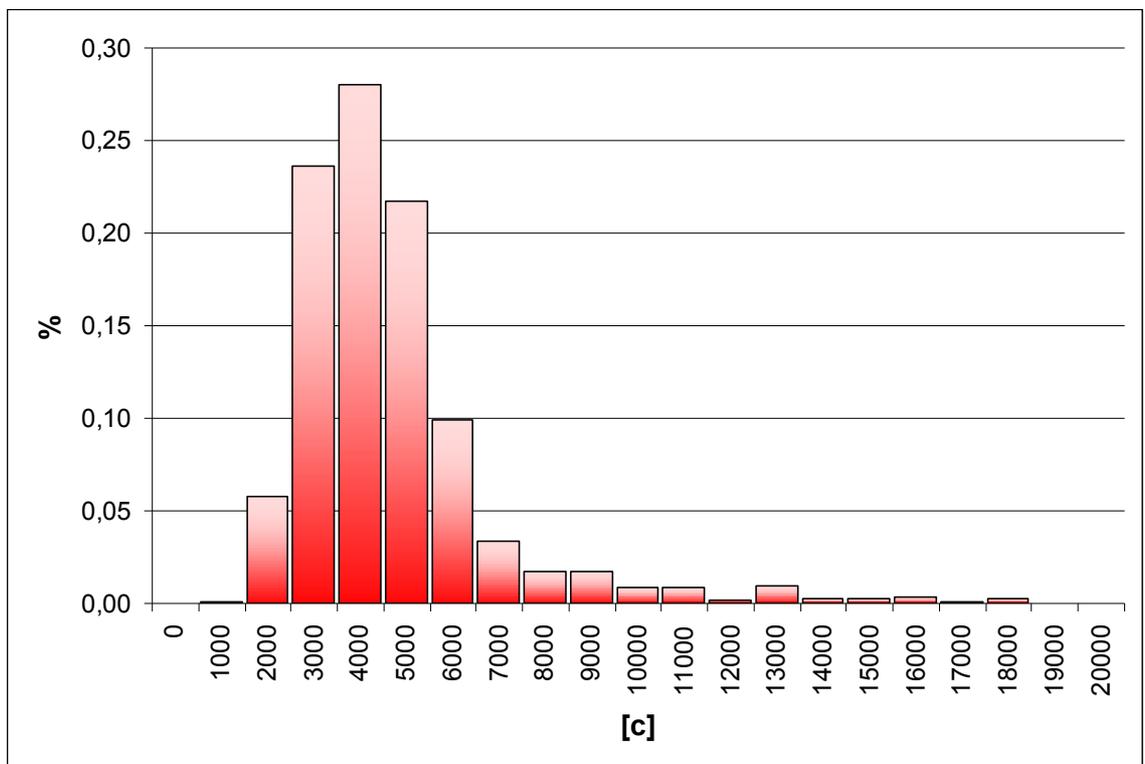


Рис. 2 Гистограмма распределения длительности интервала прогнозирования при условии, что ошибки прогнозирования не превышают 30 см.

Список литературы:

1. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС./ Под ред. В.Н. Харисова, Ф.И. Петрова, В.А. Болдина.- М.: ИПРЖР, 1999.-560с.
2. Specification Wide Area Augmentation System (WAAS), U.S. Department of Transport, Federal Aviation Administration, FAA-E-2892B, March 10, 1997.-151с.
3. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации . -М: Эко-трендз, 2000.-269с.
4. NASA`s Global DGPS for High-precision Users. //GPS World-. Jun 2001.-с.15-20.
5. IERS Conventions 2003 Dennis D. McCarthy U.S. Naval Observatory .-137с.
6. Спутниковые системы мониторинга. В.В. Малышев, ., М.Н.Красильщиков, В.Т.Бобронников и др: под.ред. В.В.Малышева . –М.: изд-во МАИ, 2000.-568с.
7. Система геодезических параметров земли 1990 года Справочник.Сост. В.Ф.Глазин, Б.Л.,Каплан ., :М.Г.Лебедев и др:-М.:Координационный научно-информационный центр,1998.-35с.
8. Построение матрицы перехода между системами координат ПЗ90 ГЛОНАСС и ITRF на основе результатов лазерных данных международного эксперимента IGEX-98. Митрикас В.В. и др. IGEX-98 Workshop Proceedings. Sept. 13-14, 1999, p.p. 275-300
9. Измерение времени. Основы GPS. К.Оудан, Б.Гино. пер. с англ. Домина Ю.С. М.: Техносфера, 2002- 400с.
10. Leland E. Cunningham. On the computation of the spherical harmonic term needed during the numerical integration of the orbital motion of on artificial satellite/ Celestial Mechanics. Volz. 1970.-с.207-217.

Сведения об авторе:

1. *Сернов Виталий Геннадьевич, аспирант кафедры радиосистем управления и передачи информации Московского авиационного института (государственного технического университета), тел.: 673-93-77, e-mail: s_wital@pochtamt.ru*