

Методические подходы к моделированию радиационных возмущений в движении навигационных КА

© И. А. Бурдин¹, В. В. Пасынков², Р. В. Хомяк³

¹Филиал ПНБО АО НПК СПП, г. Королев, Московская обл., Россия

²АО НПК СПП, г. Москва, Россия

³АО ЭКА, г. Королев, Московская обл., Россия

Рассмотрены основные подходы к учету влияния солнечной радиации на навигационный космический аппарат (НКА), основанные на построении априорной и согласующей моделей. Проведен анализ существующих априорных и согласующих моделей радиационного давления (МРД) НКА ГЛОНАСС и GPS. Предложена методика согласования параметров для новой МРД НКА ГЛОНАСС, позволяющая снизить существующий уровень немоделируемых ускорений (НМУ) за счет радиационного давления (РД) и улучшить точностные характеристики прогнозирования эфемеридной информации (ЭИ) НКА ГЛОНАСС.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, модель радиационного давления, немоделируемые ускорения, эфемеридная информация.

На данный момент главным источником ошибок модели движения (МД) НКА является неточность учета возмущения за счет РД Солнца. Основными причинами являются НМУ центра масс НКА за счет погрешностей ориентации панелей солнечных батарей (ПСБ) на Солнце и особенностей конструкции НКА ГЛОНАСС, работы его бортовых систем и изменения характеристик элементов конструкции во время активного существования НКА. Для выполнения требований к точности прогнозирования ЭИ НКА ГЛОНАСС, предъявленных в [1], требуется, в первую очередь, компенсация НМУ МД из-за сил негравитационной природы. Основные известные подходы по компенсации влияния сол-

нечной радиации на НКА следующие: построение априорной (номинальной) модели, построение согласующей модели.

При построении априорной МРД используются данные об объекте: форма и геометрические размеры НКА, радиационные характеристики поверхности НКА, алгоритм работы системы ориентации и стабилизации (СОС) НКА и др. Основная проблема этих моделей состоит в том, что они не могут достаточно точно учесть возмущения за счет реального поведения спутников на орбите, обусловленных, например, изменением (старением) или неопределенностью в априорных оптических свойствах поверхностей спутников или отклонений от номинальной ориентации [5]. Исторически первая МРД НКА ГЛОНАСС была одномерная, т. е. описывала ускорение только вдоль оси Солнце – НКА. Поскольку давление солнечной радиации обратно пропорционально квадрату расстояния до Солнца (как и солнечное гравитационное притяжение), то ускорение, вызванное солнечным давлением, выражалось в долях солнечного притяжения через коэффициент светового давления k . Модель радиационного давления (МСД-1) НКА модификации 11Ф654 была двумерной (плоской), то есть описывала радиационное возмущение по двум составляющим: по направлению солнечного излучения и перпендикулярно ему в плоскости Солнце – объект – Земля (СОЗ). Из-за того, что ориентация и форма НКА модификации 11Ф654 была симметрична относительно плоскости СОЗ, предпосылки для возникновения третьей составляющей (нормальной к плоскости СОЗ) отсутствовала. В модели радиационного давления МСД-1 космический аппарат был представлен в виде двух элементарных поверхностей: панель солнечных батарей и цилиндрический корпус. Для компенсации остаточных НМУ для МСД-1 использовались два согласующих параметра. По результатам штатного эфемеридного обеспечения ГЛОНАСС было установлено, что МСД-1 имеет высокий уровень НМУ (до 10 % от величины полного возмущающего ускорения), главной причиной которого являлось отсутствие учета возмущений по нормали к плоскости СОЗ. Таким образом, была создана следующая модификация МРД (МСД-2), принципиальное отличие которой было в моделировании трехмерного вектора возмущающего ускорения. Количество согласующих параметров МСД-2 также равнялось двум. Уровень МСД-2 достигал 5 % от величины полного возмущающего ускорения. Очередной этап повышения точностных характеристик ГЛОНАСС потребовал пересмотреть подход к моделированию светового давления НКА моди-

фикации 11Ф654. Был применен комплексный метод решения проблемы снижения НМУ МРД, суть которого заключалось в следующем:

- практический эксперимент по замеру оптических характеристик поверхности;

- детальное описание конструкции НКА с замером в натуральных условиях размеров и расположения всех сколь-нибудь значимых элементов конструкции (более двухсот);

- смоделирована работа СОС с учетом особенности ее работы на теневых и других переходных участках;

- создана стохастическая имитационная модель облучения НКА с учетом взаимного затенения и переотражения радиации;

- создан программно-методический аппарат апостериорного согласования и коррекции параметров модели радиационного давления.

Разработанная таким образом номинальная МРД НКА (МРД-3) обладала очень высокой точностью, погрешность моделирования составляла около 1 % от величины полного возмущения. Количество согласуемых по измерениям параметров МРД-3 достигло трех. Для получения более высокой точности прогнозирования ЭИ с использованием априорной модели МРД-3, необходимо было реализовать улучшенную версию согласующей модели. Впоследствии МРД-3 была дополнена учетом влияния отраженного от Земли излучения и теплового излучения Земли [9]. Запускаемые с конца 2003 года НКА 14Ф113 («Глонасс-М») потребовали создания новой априорной МРД. Основными особенностями НКА модификации 14Ф113 по сравнению с модификацией 11Ф654 (в части моделирования светового давления) были следующие:

- увеличенная на 40 % площадь ПСБ,

- использование программной ориентации ПСБ на Солнце в канале привода ПСБ,

- модернизированная система терморегулирования НКА, которая позволила снизить асимметрию собственного теплового излучения НКА.

Использование в априорной МРД-3 при описании объекта более двухсот поверхностей было явно избыточным. Кроме того, устанавливаемая на отдельных НКА аппаратура делает создание высокоточной априорной МРД «под каждый НКА» проблематичной и нецелесообразной. Поэтому при создании априорной МРД 14Ф113 был ограничен состав учитываемых поверхностей: ПСБ, цилиндр корпуса, блок АФУ, жалюзи СТР. При этом, погрешности априорной МРД НКА ГЛОНАСС 14Ф113 за счет неопределенности отражающих характеристик ПСБ,

проблема наличия различных значений одних и тех же параметров (оптических характеристик, характеристик работы СОС и СТР) между НКА одной модификации, то есть «индивидуальность» конкретного НКА, требовало разработки более совершенной согласующей МРД, способной парировать остаточные возмущения.

Априорные модели давления солнечного излучения для НКА GPS разрабатывались по тем же принципам, рассматривая детали конструкции спутников (небольшие элементы корпуса НКА, затенение и эффекты переотражения между ними), с известными оптическими свойствами и учетом физического взаимодействия радиации с поверхностями спутников (включая эффекты повторного излучения), и номинальную ориентацию. Первыми априорными моделями для спутников с модификациями Block I и Block II/IIA GPS были модели ROCK4 и ROCK42, разработанные производителем спутников Rockwell International и IBM. Эти модели были улучшены аппроксимацией простым рядом Фурье в зависимости от угла СОЗ [2], данные модели получили названием T10 и T20, соответственно. В работе [7] использован тот же подход для разработки модели T30 для спутников GPS с модификацией Block IIR, основываясь на детальной модели производителя спутников Martin Marietta. В более поздней работе [8] авторы разработали улучшенную априорную МРД для спутников GPS с модификацией Block IIR. Рассмотренные номинальные модели спутников важны как априорная информация, но они имеют основную проблему — они не являются адаптивными.

Анализируя развитие МРД НКА можно отметить тенденцию разработки именно согласующих моделей, которые могут согласовывать давление солнечного излучения с данными измерений по НКА.

Для получения согласующих (эмпирических) моделей используются измерения глобальной сети БИС по НКА, которые позволяют получить апостериорные орбиты НКА высокой точности (IGS, CODE, СВОЭВП). Главное неудобство чисто эмпирических моделей заключается в потере физического понимания сил, действующих на спутники, это может привести к «нефизичности» орбиты и потенциально привести к нежелательным ошибкам. Одна из первых попыток компенсации НМУ за счет сил, действующих на НКА GPS, была сделана Коломбо (1989). Для компенсации прямого давления солнечного излучения, действующего на спутники, оценивались до девяти эмпирических параметров в системе координат DYB . Направление D — нормаль к солнечным батареям в инерциальном пространстве, направление Y —

вдоль оси ПСБ НКА и направление B дополняет систему до правой (при этом направление B не соответствует ориентации корпуса спутника). Дополнительно, данная модель давления прямого излучения могла учитывать априорную информацию, например, аналитическую модель ROCK [2], [7]. Так же зарубежными центрами была разработана модель, которая более адекватно описывала действие солнечного излучения на НКА GPS [6] и позволяла сократить число уточняемых параметров орбиты. Модель содержала шесть основных параметров, а всего модель могла включать до 18 различных параметров. Два дополнительных направления Z и X соответствовали поверхностям спутника, освещенным Солнцем. Аргумент периодических членов модели был связан с Δu , аргументом широты спутника относительно аргумента широты Солнца в плоскости орбиты. Аналогично с подходом, используемым в [6], но с другой параметризацией, была разработана улучшенная модель НКА GPS (GSPM). Модель имеет 10 параметров. Интересно отметить выбор угла ε (СОЗ) главной зависимостью модели. В работе [4] применен подход дополнения аналитических моделей T20 и T30 эмпирически согласуемыми параметрами по измерениям НКА GPS.

Для НКА ГЛОНАСС также применялся метод согласования параметров МРД по измерительной информации, начиная с первых моделей количество согласуемых параметров МРД по измерениям постоянно росло. Разработка наиболее совершенной согласующей МРД для НКА ГЛОНАСС была проведена в 2003 г. [3]. В некоторой мере созданию согласующей МРД для НКА модификации 14Ф113 помог переход на беззапросную технологию эфемеридного обеспечения, в результате которого увеличился объем и качество используемой измерительной информации. Для согласующей МРД 14Ф113 [3] в штатном технологическом цикле управления, при обработке измерительной информации, уточнялись не только параметры орбиты, но и эмпирические согласуемые ускорения (обычно два коэффициента, по направлению Солнце – объект (κ_1) и по трансверсали к орбите (Tr)). Единичное значение таких коэффициентов в значительной мере зависит от погрешностей определения, однако их выборка на длительном интервале (порядка года) несет в себе заметную систематическую составляющую. С помощью анализа выборок согласуемых параметров определялись коэффициенты упрощенных моделей их поведения (порядок моделей равнялся нулю, либо единице), далее значения данных моделей учитывались при прогнозировании ЭИ конкретных НКА. Учет индивидуальных особенностей НКА ГЛОНАСС при использовании согласующей

МРД 14Ф113 [3] позволил в значительной мере уменьшить погрешности прогноза ЭИ и выполнить предъявляемые на тот момент требования к бортовой ЭИ.

Сегодня применяемые в ЭО ГЛОНАСС МРД не удовлетворяют высоким перспективным требованиям [1] к уровню именно прогнозирования ЭИ НКА ГЛОНАСС. На данный момент в штатной МРД 14Ф113 ускорение от радиационного давления учитывается с использованием трех составляющих в номинальной панельной связанной системе координат (НПССК). Ускорение от радиационного давления нормировано значением ускорения от гравитационного притяжения Солнца и выражается через безразмерные коэффициенты $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ в соответствующих направлениях НПССК:

$$\vec{g}_c = \frac{b_2}{r_c^2} \sum_{i=1}^3 \kappa_i \vec{i}_i, \quad (1)$$

где b_2 — гравитационная постоянная Солнца, r_c — радиус вектор Солнца, \vec{i}_i — орты НПССК: $\vec{i}_1 = \frac{\vec{r}_c}{r_c}$ — по направлению солнечной радиации

(Солнце — объект), $\vec{i}_2 = \frac{\vec{i}_1 \times \vec{r}}{|\vec{i}_1 \times \vec{r}|}$ — по нормали к плоскости СОЗ,

$\vec{i}_3 = \vec{i}_1 \times \vec{i}_2$ — по нормали к направлению Солнце — объект в плоскости СОЗ). Неадекватный учет сил радиационного давления в МД НКА ГЛОНАСС приводит к необходимости как уточнения параметров существующей модели ($\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$), так и включения в нее ранее неучитываемых воздействий (модель трансверсального ускорения). Для этого используется измерительная информация текущих навигационных параметров и апостериорная ЭИ. С целью снижения величины НМУ от радиационных воздействий в эфемеридном обеспечении ГЛОНАСС при определении параметров движения на мерном интервале используются согласующие параметры (поправки к коэффициентам априорной МРД), характеризующие проекции НМУ на оси НПССК и трансверсальное направление. Из анализа эволюции во времени поправок к коэффициентам априорной МРД для НКА ГЛОНАСС модификации 14Ф113 из различных орбитальных плоскостей, принадлежащих разным производственным сериям, можно сделать следующие выводы:

— характер поведения поправок к параметрам МРД индивидуален для каждого НКА и коэффициента модели;

- в эволюции поправки для каждого коэффициента модели присутствует не только случайная, но и детерминированная составляющая;
- результат согласования коэффициентов МРД по прецизионной ЭИ обладает пониженной шумовой составляющей.

Примем в качестве объекта исследований для анализа возмущений РД выборки значений поправок к коэффициентам априорной МРД по осям НПССК $\Delta\kappa_1$, $\Delta\kappa_2$, $\Delta\kappa_3$, и трансверсальному ускорению НКА ΔTr , которые были получены в процессе ежесуточного определения параметров движения НКА по измерительной информации, либо согласованы по прецизионной ЭИ НКА. Используя данные выборки значений, уточняются параметры разложения в ряд по сферическим функциям коэффициентов светового давления по осям НПССК и трансверсального ускорения НКА. Вид разложения коэффициентов светового давления следующий:

$$\kappa_i = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n \left(A_{nm}^{(i)} \cos m\alpha + B_{nm}^{(i)} \sin m\alpha \right) P_{nm}(\sin \gamma), \quad i=1, 2, 3\dots, \quad (2)$$

где $A_{nm}^{(i)}$, $B_{nm}^{(i)}$ — коэффициенты разложения, κ_i — безразмерные коэффициенты светового давления, γ — угол склонения Солнца к плоскости орбиты, α — угол, отсчитываемый в плоскости орбиты от радиус-вектора НКА до проекции направления на Солнце. Для получения достоверных оценок параметров разложения (2) требуется интервал измерений, равный или больший периоду изменения углов α, γ . По результатам проведенных исследований можно сказать, что использование параметров приведенного уточнённого разложения хотя бы применительно к одному коэффициенту МРД (κ_3) обуславливает уменьшение погрешности прогноза эфемерид НКА на 10 суток по составляющей dR (в направлении по радиусу-вектору НКА) на ~20 %.

С целью решения проблемы повышения точности моделирования радиационного давления, действующего на НКА ГЛОНАСС, проведен анализ методов учета радиационных возмущений, применяемых как в штатном ЭО ГЛОНАСС, так и для решения прикладных задач зарубежных глобальных навигационных систем. Основные подходы к компенсации влияния солнечной радиации на НКА — построение априорной и согласующей МРД. Отметим, что затраты на построение высокоточной априорной модели могут превысить эффект от ее использования, это обусловлено проведением большого количества трудоемких экспериментов. Требуется индивидуальный подход к каждому НКА, к тому же результат непрогнозируем, так как некоторые характеристики НКА, являющиеся основой модели, с течением времени изменяются.

Поэтому путь совершенствования согласующей МРД является наиболее перспективным и эффективным. По результатам проведенного анализа предложен вариант построения новой согласующей МРД НКА ГЛОНАСС.

Литература

1. Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 03.03.2012 г. № 189). — 2012 г.
2. *Fliegel H. F., Gallini T. E., Swift E. R.* Global Positioning System Radiation Force Model for geodetic applications // *J. Geophys. Res.* — 1992. Янв. — Т. 97, В 1. — С. 559–568. — DOI: 10.1029/91JB02564.
3. *Куropyтников А. Д.* Кандидатская диссертация. — НИИ КС, 2003.
4. *Гаязов И. С.* Докторская диссертация. — СПб.: РГБ, 2006. — 217 с.
5. *Bar-Sever Y. E. and Da Kuang.* New empirically – derived solar radiation pressure model for GPS satellites // *IPN Progress Reports, JPL.* — 2004. — С. 42–159.
6. *Springer T. A., Beutler G., and Rothacher M.* A new solar radiation pressure model for GPS satellites // *GPS Solutions.* — 1999. — Т. 2. — С. 50–62. — DOI: 10.1007/PL00012757.
7. *Fliegel H. F., Gallini T. E.* Solar force modeling of block IIR global positioning system satellites // *J Spacecr Rockets* 33(6). — 1996. — С. 863.
8. *Marquis W., Krier C.* Examination of the GPS Block IIR Solar Pressure Model // *Proceedings of ION GPS.* — 2000. — С. 407–415.
9. Отчет по НИР. Войсковая часть 73790, инв. № 4162, 1991.

Approaches to Modeling an Influence of Solar Radiation on the Motion of Navigation Satellites

I. A. Burdin, V. V. Pasynkov, R. V. Khomyak

The main approaches to the calculation of the effect of solar radiation on navigation satellites are considered. The approaches are based on the construction of a priori and matching models. We analyze the existing a priori and matching models of radiation pressure for GLONASS and GPS satellites. The methods for matching parameters for the new model for GLONASS satellites are proposed, which makes it possible to reduce the existing level of non-gravitational accelerations due to the radiation pressure and improve the accuracy of predicting the ephemeris information of the GLONASS satellites.

Keywords: GLONASS, model of radiation pressure, non-gravitational accelerations, ephemeris information.