

ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОЛУТЕНЕВЫХ УЧАСТКАХ ОРБИТ СПУТНИКОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрено влияние эффекта неравномерного распределения интенсивности излучения с поверхности солнечного диска на точность определения сил светового давления, действующих на орбитах спутников глобальных навигационных систем. Проведено сравнение различных моделей распределения интенсивности излучения на характеристики движения искусственных спутников Земли.

Розглянуто вплив ефекту нерівномірного розподілу інтенсивності випромінювання з поверхні сонячного диска на точність визначення сил світлового тиску, що діють на орбіти супутників глобальних навігаційних систем. Проведено порівняння різних моделей розподілу інтенсивності випромінювання на характеристики руху штучних супутників Землі.

The effects of an irregular distribution of the intensity of radiation from the solar disk surface on the accuracy of determination of the light pressure forces acting on satellite orbits of global navigation systems are considered. Different models of the radiation intensity distribution on motion characteristics of artificial earth satellites are compared.

Для решения определенного круга фундаментальных и прикладных задач в области аэронавигации и геофизики требуется достаточно точное определение положения космического аппарата (КА) по отношению к заданной координатной системе и динамики изменения параметров его орбиты на длительных временных интервалах. Исходя из этого, к расчетам негравитационных возмущений, действующих на КА, предъявляются достаточно высокие требования как по точности и надежности результатов, так и по оперативности их получения. Корректный расчет силовых и моментных характеристик КА на высотах свыше 150 км над поверхностью Земли становится определяющим для прогнозирования времени их существования, определения параметров движения, проектирования систем ориентации, стабилизации и т.д.

К примеру, для спутников глобальных навигационных систем (ГНС) США и России (GPS и ГЛОНАСС), а также геодинамических искусственных спутников Земли (ИСЗ) (LAGEOS и “Эталон” соответственно) предъявляются достаточно высокие требования для фиксирования земной системы координат и определения параметров вращения Земли. Математическое и программное обеспечение, обрабатывающее орбитальную и наземную информацию, для достижения требуемой точности: ± 1 см при определении координат полюса Земли; $1 \cdot 10^{-4}$ с за сутки для всемирного времени; $\pm(1-3)$ см для координат наземных пунктов [1] должно моделировать движение спутников на орбите с точностью до $\pm 0,3$ м на суточном интервале времени [2]. При этом точность должна оставаться на субметровом уровне при использовании более протяженных временных интервалов – до 30 суток. Эти требования определяют перечень возмущающих факторов, которые следует учитывать при построении модели движения спутников. Значения ускорений спутника GPS и его максимальных смещений под действием различных сил за 2 суток приведены в таблице 1 [3].

Аналогичные таблицы максимальных смещений под действием некоторых возмущающих факторов за 12 часов для GPS приведены в [4]. Оценки порядка величин ускорений для некоторых сил негравитационного происхождения, сделанные другими авторами [5], совпадают с приведенными в таблице 1.

© Т.Г. Смеляя, 2011

Техн. механика. – 2011. – № 1.

Таблица 1

Составляющие силы	Ускорение, м/с^2	Максимальное смещение ИСЗ за 2 суток, м
Центральное поле Земли	$6 \cdot 10^{-1}$	–
Сжатие Земли (J_{20})	$5 \cdot 10^{-5}$	14000
Гравитационное поле Луны	$5 \cdot 10^{-6}$	4000
Гравитационное поле Солнца	$2 \cdot 10^{-6}$	1500
Гармоники геопотенциала более высоких порядков (J_{22})	$3 \cdot 10^{-7}$	100–1500
Прямое солнечное излучение	$1 \cdot 10^{-7}$	100–800
Тепловая эмиссия	$1 \cdot 10^{-8}$	30–50
Излучение, отраженное от Земли	$2 \cdot 10^{-9}$	1,0–1,5
Приливы твердой Земли	$2 \cdot 10^{-9}$	0,5–1,0
Океанические приливы	$1 \cdot 10^{-9}$	0,0–0,2
Гравитационное поле Венеры	$3 \cdot 10^{-10}$	0,1
Релятивистский эффект	$3 \cdot 10^{-10}$	0,3
Атмосферное торможение	мало	0

Для достижения требуемой точности при определении положения спутника необходимо включать силы, приводящие к возмущающему ускорению не менее $1 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}^2$.

Основными источниками негравитационных возмущений, приводящих к торможению КА, являются силы, обусловленные взаимодействием его поверхности с нейтральными и заряженными частицами верхней атмосферы, а также с потоками солнечной радиации. Вклад этих источников в суммарные возмущения зависит от высоты орбиты, взаимного расположения системы Земля – Солнце – КА, отражательных и экранирующих свойств элементов поверхности спутника. Среди таких сил особое место занимают силы светового давления. Поскольку сила солнечного давления для спутников данного класса приводит к ускорению порядка $1 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$, влияние солнечного давления на спутники должно моделироваться с точностью не хуже 1% [6].

Сложный характер возмущений от радиационных потоков, действующих на КА, особенности геометрической формы аппарата, необходимость учета эффектов интерференции и затенения требуют разработки специальных математических моделей, алгоритмов и программных средств, обеспечивающих высокую точность, быстроедействие и автоматизацию вычислений. Использование эффективных численных методов, алгоритмов и программ для учета силовых нагрузок на КА, движущихся на больших высотах, имеет большое значение на этапе их проектирования. Хотя уровень развития современной вычислительной техники позволяет произвести численные расчеты сложнейших задач практически с любой наперед заданной точностью и учесть многие влияющие факторы, часто возникает необходимость предварительных, оценочных расчетов, при минимальных затратах времени.

В [6, 7] разработана процедура определения сил и моментов светового давления, действующих на тело произвольной формы. Строгая постановка фотогравитационной задачи о поступательно-вращательном движении тела конечных размеров сформулирована в [8]. В этой работе излучающим телом является материальная точка.

Следующим этапом в развитии теории радиационных возмущений является учет конечных размеров излучающего тела. В [9] выведены аналитические выражения для возмущающей функции, обусловленной световым давлением, для случая, когда Солнце рассматривается не как материальная точка, а как сферическое тело конечного радиуса. Эта задача особенно актуальна в случае, когда космический аппарат малой массы, но с большой площадью внешней поверхности, движется вблизи Солнца.

Заметное влияние на точность расчета силового воздействия солнечного давления может оказывать учет неравномерности распределения интенсивности светового потока по диску Солнца на полутеневых участках орбиты. Это замечание особенно актуально по отношению к геодинамическим спутникам (ГДС).

Продолжая исследования влияния различных факторов на точность учета солнечного давления [10, 11], рассмотрим задачу, при которой Солнце считается излучающим сферическим телом конечного радиуса R_C . В настоящей работе рассмотрено два варианта распределения интенсивности излучения (ИИ) по солнечному диску: постоянное излучение, равное осредненному по видимой поверхности диска, и переменное, описываемое функцией угла между нормалью к элементу поверхности Солнца и лучом зрения.

Для оценки погрешности вычисления солнечного давления для двух рассматриваемых моделей рассмотрим орбиту наибольшего затенения, т. е. лежащую в плоскости, параллельной солнечным лучам.

Используются следующие основные допущения:

- линия, соединяющая центры Земли и Солнца, лежит в плоскости орбиты;
- учитываются “полутеневые” области орбитального движения КА;
- учитываются конечные размеры диска Солнца;
- предполагается, что Солнце и Земля являются правильными сферами;
- пренебрегается земной атмосферой;
- поверхность Солнца однородна, и его излучение постоянно во времени;
- учитывается весь участок спектрального диапазона солнечного излучения;
- распределение локальных значений интенсивности солнечного излучения взято для двух случаев: для неравномерного распределения по солнечному диску и для постоянного значения, равного его среднему значению;
- реальный КА заменяется плоской пластиной, имеющей эффективную площадь A_m , поскольку в данном случае нас интересует только величина падающего светового потока.

Почти все оптическое (видимое) излучение Солнца исходит из тонкого поверхностного слоя – фотосферы, имеющей толщину около $1/2000$ величины радиуса Солнца R_C , то есть около 320 км. Излучение из более глубоких слоев до поверхности не доходит. Располагающаяся над фотосферой хромосфера и корона практически свободно пропускают непрерывное излучение фотосферы.

Максимум излучения фотосферы приходится на видимую область спектра. Часть энергии поглощается при прохождении через земную атмосферу. Считается, что примерно половина солнечной энергии, достигающей поверхности Земли, приходится на видимый участок спектра [12].

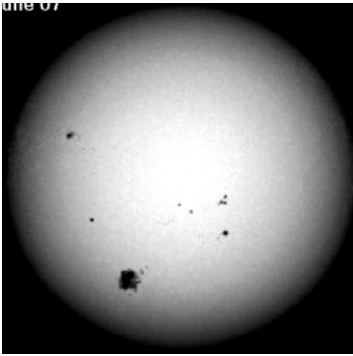


Рис. 1

В фотосфере, в широкой области спектра от 160 – 170 нм до 0,2 – 0,5 мм край Солнца темнее, чем центр, и тем сильнее, чем меньше длина волны. Плавное потемнение солнечного диска к краю в белом свете видно на снимке (<http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar/surface.htm>) [13] (рис. 1). Средняя по диску ИИ Солнца, ИИ его центра, а также контраст центр – край зависят от длины волны.

Решим задачу, используя численное интегрирование локальных характеристик потока солнечного излучения на поверхность рассмат-

риваемой площадки.

Разобьем видимую поверхность Солнца на элементарные площадки, характеризующие площадью ds .

Для этого введем вспомогательную сферическую систему координат (r, θ, β) с полюсом, лежащим на радиус-векторе центр Солнца – центр площадки, плоскостью \tilde{S} , совпадающей с плоскостью видимого диска Солнца (рис. 2). θ – угол между гелиоцентрическими радиус-векторами центра элемента поверхности Солнца ds и центром площадки A_m , а β – азимутальный угол с началом отсчета в некоторой точке A . В центре видимого диска $\theta = 0$,

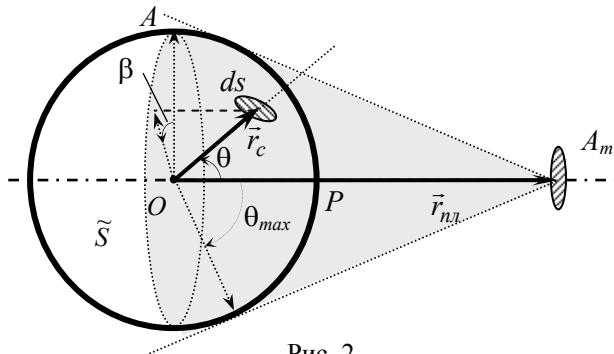


Рис. 2

а на краю – $\theta \approx 90^\circ$. Так как Солнце считается однородным источником излучения, а его состояние стационарным, ИИ элемента его поверхности ds , наблюдаемая в некоторой точке на орбите Земли, не зависит от угла β . Для решения задачи необходима функция распределения ИИ элемента Солнца от центра к краю.

Наблюдения при помощи специальной аппаратуры дают возможность найти такую зависимость как от углового расстояния до центра диска, так и от длины волны.

За последние годы благодаря использованию приборов высокого разрешения и измерениям, сделанным на спутниках, ракетах, баллонах, появилась огромная масса новых данных, для которых существенно возросла точность и надежность полученных солнечных данных. Оказались возможными некото-

рые принципиально новые количественные, а не только качественные подходы к оценке части фундаментальных исследований.

Регистрация потемнения к краю осуществлялась с начала текущего столетия, но наблюдения сложны из-за дрожания края Солнца и влияния света, рассеянного как в атмосфере, так и в измерительной аппаратуре. Надежные наблюдения такого рода успешно осуществлялись только с баллонов или во время солнечных затмений. Наблюдения солнечного диска, как правило, ограничиваются приэкваториальной зоной Солнца и предполагается, что потемнение к краю одинаково на всех широтах [12]. В данной работе будем считать, что потемнение к краю диска является функцией только двух параметров – угла θ и длины волны λ .

При измерениях потемнения к краю делаются фотометрические разрезы вдоль радиуса солнечного диска и определяются величины

$$j_{\lambda}(\theta) = \frac{I_{\lambda}(\theta)}{I_{\lambda}(0)},$$

которые представляются в виде таблиц или графиков для различных λ и θ . Здесь $I_{\lambda}(0)$ и $I_{\lambda}(\theta)$ – ИИ в центре диска Солнца и на угловом расстоянии θ от центра соответственно.

Поскольку нас интересует вся область спектра излучения Солнца, то далее будем рассматривать интенсивность $I_{\lambda}(\vec{r}_C, \vec{\omega}, \varphi)$, которая может быть вычислена интегрированием по всем длинам волн:

$$I = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda.$$

Результаты обработки наблюдений позволили авторам [14] представить функцию потемнения к краю в виде полиномов 5-й степени от $\mu = \cos(\theta)$ или $\xi = \ln \mu$ [14]. Погрешность этой формулы для коэффициента потемнения к краю $j_{\lambda}(\theta)$ оценивается примерно в 0,3%, а по мнению [15] – до 1% по аргументу μ для длин волн более 750 нм. Попытки представить зависимость потемнения к краю от угла в виде полиномов 3-й степени, как иногда делается, приводят к расхождению наблюдаемых и вычисленных значений в пределах 3 – 9% [12].

Согласно [16] функция потемнения к краю меняется во времени с амплитудой 1 – 2% и периодом от нескольких минут до часов. Аналогично ИИ в центре диска также может колебаться. Ориентировочная точность измерения ИИ и связанных с ней величин вследствие существования предела чувствительности измерительной аппаратуры имеет естественный предел – 1% – 2% [12, 17]. Данные, полученные разными исследователями для непрерывного спектра, систематически расходятся минимум на 1% – 3% (для $\cos \theta = 0,7$), а иногда и более – на 5% – 10% (для $\cos \theta = 0,2$). На отдельных длинах волн погрешность достигает даже 16% на краю диска. Среднее значение потока от всего диска определяется с точностью до 7% – 10%.

Исходя из этих данных, можно сделать вывод, что использование громоздких формул с применением полиномов 3-й и 5-й степеней для аппроксимации коэффициента $j(\theta)$ не оправдано и вполне удовлетворительна точность более простой формулы [18]:

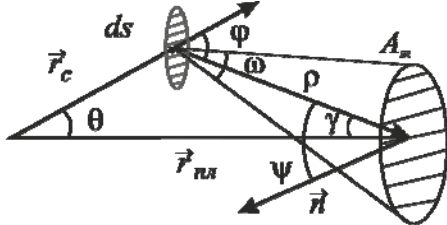
$$j(\theta) = 1 - u_2 - v_2 + u_2 \cdot \cos \theta + v_2 \cdot \cos^2 \theta, \quad (1)$$

где u_2 и v_2 – некие постоянные (для полного излучения Солнца $u_2 = 0,84$, $v_2 = -0,20$ [16]).

Полный световой поток $d\Phi$, падающий на площадку A_m от элемента поверхности Солнца [19], определяется равенством

$$d\Phi = I \cdot ds \cdot \cos \varphi \cdot d\omega, \quad (2)$$

где I – ИИ элемента поверхности Солнца в направлении оси телесного угла $d\omega$; $d\omega$ – телесный угол, в котором распространяется световой поток от поверхности Солнца к площадке A_m ; φ –



угол, который составляет луч зрения с нормалью к поверхности Солнца для рассматриваемой площадки (рис. 3), $\cos \varphi ds$ – эффективная площадь для направления $\bar{\omega}$.

Рис. 3

Обозначим через ρ расстояние от элемента поверхности Солнца до аппарата (рис. 3). Гомоцентрический световой пучок, падающий на площадку A_m ,

занимает телесный угол

$$d\omega = \frac{\cos \psi \cdot A_m}{\rho^2}, \quad (3)$$

где ψ – острый угол между осью пучка и нормалью \bar{n} к этой площадке (рис. 3) [18].

Подставив (3) в (2), получим:

$$d\Phi = I \cdot A_m \cdot \frac{ds \cdot \cos \varphi \cdot \cos \psi}{\rho^2}. \quad (4)$$

Формулу для расчета ИИ элемента поверхности Солнца I можно представить в виде

$$I(\theta) = I(0) \cdot j(\theta), \quad (5)$$

где $I(0) = 2,417 \cdot 10^7$ Вт/(м²·ср.) – ИИ центра солнечного диска, а $j(\theta)$ – функция потемнения диска к краю [13].

В качестве модельной задачи рассмотрены два варианта.

Первому соответствует упрощенная модель $j(\theta) = \text{const}$, при которой ИИ постоянна и равна средней $I_{cp} = F$. Данные для F приводятся с точностью $\pm 1\%$ и составляют $F = 2 \cdot 10^7$ Вт/(м²·ср.).

Второму – неравномерная интенсивность по формуле (5).

Результаты расчетов и их обсуждение. Оценим погрешность выбранного соотношения (1), сравнив с данными измерений [18]. На рис. 4 сплошной линией отображена зависимость коэффициента $j(\theta)$, полученная по формуле (1), а кружками – данные измерений [18] для тех же углов θ . Крестиками

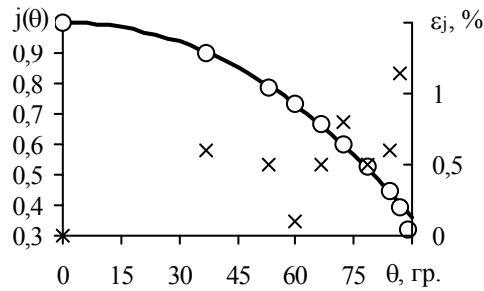


Рис. 4

представлена погрешность этой зависимости

$$\varepsilon_j(\theta) = |j(\theta) - j_{\text{таб}}(\theta)| \cdot 100\%.$$

Кривая $j(\theta)$ дает хорошее совпадение с данными измерений [16], и её погрешность не превышает 1,2%.

Надо заметить, что для соотношения (1) наблюдения на краю диска соответствуют случаю $\cos \theta = 0,3$ [18], т. к. большинство

параметров между $\cos \theta = 0$ и $\cos \theta = 0,3$ меняются очень быстро.

Попытаемся в формуле (1) перейти к вычислениям по углу φ . Расчеты показывают, что для орбит с высотой полета до 40000 км, а значит и для рассматриваемого класса спутников, угол γ (см. рис. 3) не превышает $16'$ и, следовательно, с точностью до 5-го знака после запятой можно считать $\cos \gamma \cong 1$. Для $\theta = \varphi - \gamma$ (рис. 3) замена $\cos \theta$ на $\cos \varphi$ дает расхождение, не превышающее 0,005. Погрешность такой замены в (1) не превосходит 1,2%. Формула (1) для вычисления коэффициента потемнения к краю будет выглядеть так:

$$j(\varphi) = 1 - u_2 - v_2 + u_2 \cdot \cos \varphi + v_2 \cdot \cos^2 \varphi. \quad (6)$$

Без потери общности будем считать, что $\cos \psi = 1$, т.е. A_m – проекция площади рассматриваемой площадки на нормальную к вектору $\vec{r}_{\text{ка}}$. Формула (4) примет вид

$$d\Phi = I \cdot A_m \frac{dS \cdot \cos \varphi}{\rho^2}. \quad (7)$$

Для варианта $j = \text{const}$, а также учитывая, что $\sum_i \cos \varphi_i \cdot ds_i = S_{\text{диска}} = \pi \cdot R_C^2$, а $\rho \cong R_{3C}$ для площадки на освещенном участке орбиты:



Рис. 5

$$\Phi_{\text{max}} = F \cdot A_m \frac{\pi R_C^2}{R_{3C}^2}.$$

Здесь $R_C = 696000$ км – радиус Солнца, $R_{3C} = 149599800$ км – среднее расстояние от Земли до Солнца. Для $F = 2,02 \cdot 10^7$ Вт/(м²·ср) $\Phi_{\text{max}} = 1373,6$ Вт/м², для $F = 2,00 \cdot 10^7$ Вт/(м²·ср) $\Phi_{\text{max}} = 1360$ Вт/м²,

$$F = 1,98 \cdot 10^7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср}) \quad \Phi_{\text{max}} = 1346 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Эти цифры совпадают со значением солнечной постоянной на среднем расстоянии от Земли до Солнца, равным примерно $1366 \text{ Вт}/\text{м}^2$ [20].

Для второй модели распределения по диску Солнца вычислим значение величины светового потока $d\Phi$ от всех видимых площадок поверхности Солнца для случая, когда площадка A_m находится на свету. На рис. 5 изображено распределение ИИ по солнечному диску, вычисленное по формулам (5), (7). Визуально можно определить, что оно отличается от фотографии солнечного диска в видимом диапазоне (рис. 1) только отсутствием на нем пятен.

Расхождения между постоянным осредненным значением ИИ и неравномерным распределением будут проявляться только в сумеречной области, так как именно на этом участке часть площадок Солнца, излучающих световой поток в направлении площадки A_m , будут затеняться земной сферой (рис. 6).

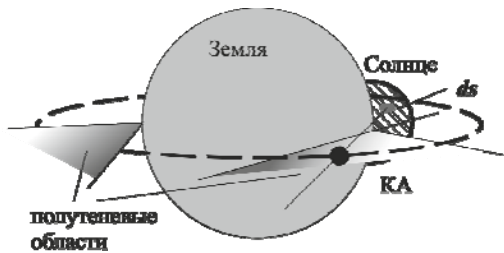


Рис. 6

Оценим погрешность вычисления величины потока солнечного излучения на единичную площадку на этом промежутке орбиты, применяя аппарат пространственной геометрии для проверки пересечения с поверхностью Земли. Поверхность планеты и луч \vec{r} (рис. 2) (элементарная площадка Солнца – площадка A_m) задаются

пространственными уравнениями. Площадка ds считается видимой только в том случае, если луч и сфера не пересекаются.

На рис. 7 для круговой орбиты с высотой $H = 20\,000$ км, близкой по параметрам к орбитам ГНС, представлены значения интенсивности светового потока $\Phi(\tilde{\theta})$, падающего на площадку с единичной эффективной площадью в сумеречной области, вычисленные для двух моделей распределения интен-

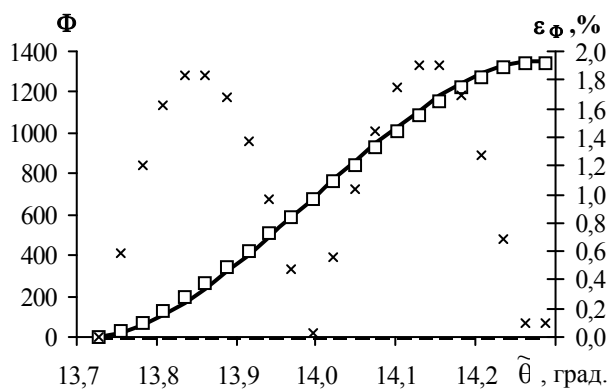


Рис. 7

сивности по солнечному диску $j = j(\theta)$ (квадратики – $j = const$, сплошная линия – $j = j(\theta)$). Здесь $\tilde{\theta}$ – истинная аномалия спутника. Начало графика соответствует точке выхода из тени, конец графика – переходу на освещенный участок орбиты. Крестиками обозначена относительная погрешность

величины $\Phi(\tilde{\theta})$ $\varepsilon_{\Phi}(\tilde{\theta}) = \frac{|\Phi_{j=const}(\tilde{\theta}) - \bar{\Phi}_{j(\tilde{\theta})}(\tilde{\theta})|}{\Phi_{\max}} \cdot 100\%$, где

$\Phi_{\max} = 1346 \text{ Вт/м}^2$. Как видно из графика, величина погрешности доходит до 2%, а расхождение между моделями по абсолютной величине доходит до $25,5 \text{ Вт/м}^2$.

Оценим максимальное расхождение величины Φ для двух рассматриваемых моделей, проделав аналогичные расчеты для площадки A_m на других высотах (рис. 8). На рис. 8 видно, что на высотах до 100 тыс. км расхождение все еще не превышает 2%, а максимальное расхождение между моделями наблюдается на высотах 1,5 – 2,5 млн. км и достигает 5% – 7%.

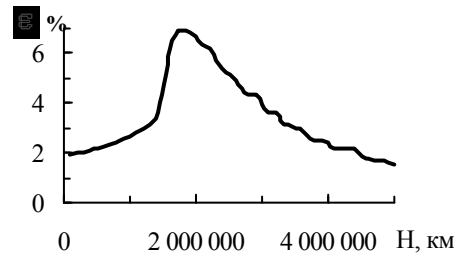


Рис. 8

Таким образом, погрешность при замене неравномерной ИИ по диску Солнца на постоянную, осредненную по диску Солнца, для большинства орбит спутников Земли, в том числе и для спутников ГНС, в полутеневой области доходит до 2%. Эта величина превосходит минимально допустимую погрешность определения величины светового давления для этих

спутников, равную 1% [6]. Можно сделать вывод о необходимости учета неравномерного распределения ИИ по солнечному диску при определении параметров движения спутников этого класса.

В заключение автор хочет выразить особую признательность академику НАН Украины Я. С. Яцкиву за постановку задачи при выполнении совместных научно-исследовательских работ.

1. Paquet P. Simulation to recover Earth Rotation Parameters with GPS System / P. Paquet, L. Louis // Variations in Earth Rotation. Geophysical Monograph 59. – Washington : International Union of Geodesy and Geophysics and American Geophysical Union, 1990. – V. 9. – P. 185 – 188.
2. Feltens J. Nicht-gravitative Storeinflusse bei der Modellierung von GPS-Erdumlaufbahnen : Dissertation for Doktor-Ingenieur at the Technische Hochschule Darmstadt (Germany) Deutsche Geodatische Kommission. Reihe C, Heft Nr. 371 / J. Feltens; Deutsche geod. Kommiss. bei der Bayerischen Akad. der. Wiss (Geod. Komm. Bayer. Akad. Wiss.). – Munich, 1991. – 418 p.
3. Porter W. W. Solar Force-Torque Model for The GPS Space Vehicle System / W. W. Porter // Rockwell International Space Division, Downey, California, February 18, 1976. – 1976. – reissued 1983.
4. Fligel G. F. Solar Force Modeling of Block IIR Global Positioning System Satellites / G. F. Fligel, T. E. Gallini // Journal of Spacecraft and Rockets. – 1996. – Vol. 33, № 6. – P. 863 – 866.
5. Ziebart M. S. Combined Radiation Pressure and Thermal Modeling of Complex Satellites' algorithms and on-orbit tests / M. K. Ziebart, S. Adhya, A. Sibthorpe, S. Edwards, P. Cross // Advanced in Space Research. – 2005. – Vol. 36(3). – P. 424 – 430.
6. Басс В. П. Модели и методы молекулярной газовой динамики и их применение в ракетно-космической технике / В. П. Басс // Техническая механика. – 2005. – № 2. – С. 106 – 119.
7. Карымов А. А. Определение сил и моментов сил светового давления, действующих на тело при движении в космическом пространстве / А. А. Карымов // Прикл. математика и механика. – М. : Наука, 1962. – Т. XXVI. – С. 867 – 876.
8. Журавлев С. Г. Общий вид уравнений движения в фотогравитационной ограниченной задаче двух тел / С. Г. Журавлев // Астрономический журнал. – 1989. – Т. 66, вып. 6. – С. 1319 – 1326.
9. Кознов В. В. Влияние светового давления на движение космического аппарата вблизи Солнца / В. В. Кознов // Астрономический журнал. – 1992. – Т. 69, вып. 4. – С. 873 – 879.
10. Смелая Т. Г. Численный анализ моделей затенения орбит искусственных спутников Земли / Т. Г. Смелая // Вісник Дніпропетр. ун-ту, Механіка. – 2006. – Вип. 10, т. 1, № 2/1. – С. 80 – 92.
11. Смелая Т. Г. Долгопериодические возмущения орбит ИСЗ под действием сил светового давления / Т. Г. Смелая // Техническая механика. – 2006. – № 1. – С. 80 – 90.
12. Макарова Е. А. Поток солнечного излучения / Е. А. Макарова, А. В. Харитонов, Т. В. Казачевская. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 400 с.
13. Гибсон Э. Спокойное Солнце / Э. Гибсон. – М. : Мир, 1977. – 408 с.

14. *Pierce A. K. / A. K. Pierce, C. D. Slaughter // Solar Phys. – 1977. – V. 51. – P. 25 – 41.*
15. *Сарычев А. П. Распределение энергии в спектре Солнца как звезды / А. П. Сарычев, Е. М. Рощина // Изв. Рос. акад. наук. Сер. физическая. – 1998. – Т. 62, № 6. – С. 1196 – 1197.*
16. *Neckel H. / H. Neckel, D. Labs // Solar Phys. – 1987. – V. 110. – P. 139 – 170.*
17. *Макарова Е. А. Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная / Е. А. Макарова, А. В. Харитонов. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972. – 288 с.*
18. *Аллен К. У. Астрофизические величины / К. У. Аллен. – М. : Мир, 1977. – 448 с.*
19. *Сапожников Р. А. Теоретическая фотометрия / Р. А. Сапожников. – М. : Энергия, 1977. – 264 с.*
20. *Поток энергии Солнца и его измерения / Под ред. Уайта О. – М. : Мир, 1980. – 560 с.*

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 28.01.2011,
в окончательном варианте 02.03.2011