

УДК 004.942

И. А. Пилькевич

Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины
ул. Генерала Наумова, 15, 03164 Киев, Украина
тел. (0412) 41-56-86

Использование гидродинамической модели объемно-распределенного объекта при каталогизации мелких осколков космического мусора

Проведен обзор работ в мире по предотвращению загрязнения околоземного космического пространства, которое создается при запусках ракет-носителей. Сделан вывод о необходимости разработки метода каталогизации мелких осколков космического мусора, основанного на математической модели объемно-распределенного объекта. Разработана структурная схема гибридного каталога мелких осколков космического мусора, а также алгоритм минимизации метрического расстояния.

Ключевые слова: экология космического пространства, космический мусор, гибридный каталог.

Постановка задачи

Освоение и изучение космического пространства принесло человеку много земных благ. Но каждое положительное явление или событие имеет и обратную, негативную, сторону медали. Не обошло это и космонавтику. Загрязнение околоземного космического пространства предметами и телами искусственного происхождения — обратная сторона этой медали, о которой мало известно не только широкому кругу читателей, но и специалистам.

В результате ракетно-космической деятельности человека оказались засоренными также поверхность Земли и ее атмосфера. Можно утверждать, что человечество не осознало в полной мере негативные последствия засорения космического пространства. Возникшая проблема загрязнения космоса в результате народнохозяйственной деятельности человека в какой-то степени оказалась неожиданной и для специалистов, работающих в области ракетно-космической техники. Даже пионеры ракетной техники, которые прозорливо предвидели основные проблемы и трудности развития этого направления в технике на десятилетия вперед, в своих фундаментальных работах ни словом не обмолвились о последствиях загрязнения

© И. А. Пилькевич

космоса, атмосферы и поверхности Земли и более того, практически не упомянули об этом явлении.

В настоящее время космический техногенный мусор представляет реальную опасность для космонавтов, особенно при работе в открытом космосе. Наибольшую опасность в космосе представляют объекты с диаметром от 1 до 10 см, скорость которых до 10 км/с [1]. Для обнаружения службами контроля они еще недоступны, и представляют собой настоящие «айсберги» на орбите. Столкновение с ними при условии большой населенности орбит может привести к катастрофическим последствиям. Поэтому наблюдение, каталогизация, моделирование ситуации на разных высотах околоземного пространства с учетом прохождения Земли через многочисленные метеорные потоки и мониторинг наиболее опасных направлений прихода в околоземное пространство естественных космических объектов — это новые проблемы земной астрономии.

Исследование загрязнения околоземного пространства радиолокационно-оптическими средствами

Первые шаги в систематическом слежении за объектами, находящимися в околоземном космосе, были предприняты военными в СССР и США в рамках задач противоракетной и противокосмической обороны. В обеих странах были созданы системы контроля околоземного пространства, оснащенные радаром дальнего обнаружения и оптическим инструментом. Задачи служб контроля состоят в обнаружении, сопровождении, получении координатной информации и изображений объектов, их идентификации, анализе и отображении космической обстановки.

Всего службами контроля космоса зафиксировано и непрерывно отслеживается чуть более 10 тыс. объектов, находящихся на околоземных орбитах [2, 3]. Это в основном довольно крупные тела размером более 10 см. Около 8 тыс. объектов занесены в официальные каталоги. Отслеживаемые телескопами и радаром служб контроля и занесенные в каталоги объекты имеют размеры 10–30 см для низких орбит (высоты орбит от 200 до 2000 км) и около 1 м на геостационарной орбите (высота круговой экваториальной орбиты около 35800 км). Однако из-за огромного количества находящихся в околоземном пространстве частиц различного происхождения не может быть и речи об их полном и постоянном отслеживании.

Число объектов размером 1–10 см можно оценить лишь статистически (это примерно 70000–150000 объектов), поскольку они не наблюдаются ни телескопами, ни радаром, и не могут поэтому быть занесены ни в какие каталоги. Количество частиц, имеющих размеры менее 1 см, оценивается в *несколько миллионов*. Количество объектов микронного и меньшего размера, газовой и пылевой фракций — порядка 10^{13} – 10^{14} . Столкновение любого фрагмента размером более 1 см с действующим спутником опасно для последнего из-за большой кинетической энергии осколка и может стать причиной прекращения его функциональной деятельности [4]. Поэтому актуальным направлением дальнейшего исследования загрязнения околоземного пространства является совершенствование методики моделирования мелких фрагментов (осколков) космического мусора.

Современный подход к научным исследованиям техногенных облаков

Проведение фундаментальных и прикладных исследований сегодня связаны с величиной финансирования. Экономика страны, с одной стороны, зависит от успехов в области научно-технического прогресса, а с другой — влияет на интенсивность научных исследований и научно-технических разработок.

Считается, что наука родилась из практики, вернее потребностей практической деятельности человека, и служит практике. Тем не менее, наука является основой технического прогресса, а любопытство ученых удивительным образом способствует развитию науки. Так, в Украине предлагается проводить целенаправленные фундаментальные исследования космоса [5].

В настоящее время, с целью снижения засоренности космоса, работы ведутся в следующих направлениях [6]:

а) разработка новых конструкций ракетоносителей и искусственных спутников Земли, а также использование топлива, «свободного от частиц» (окись алюминия);

б) активное «очищение» космоса за счет удаления или уничтожения осколков космического мусора.

Удаление осколков — это основная задача. Для удаления с орбиты мелких осколков космического мусора разработаны два метода [7]:

1) пассивный метод — создание большого пенного шара, поглощающего кинетическую энергию осколков, теряющих высоту и входящих в плотные слои;

2) активный метод — облучение осколков пучками направленной энергии с помощью специального устройства, в результате чего теряется скорость.

Оба метода предполагают использование данных математического моделирования облаков осколков космического мусора. Под *облаком осколков космического мусора* будем понимать большую систему дискретных элементов (осколков), организованных в объемно-распределенный объект.

Объемно-распределенный объект — это групповой излучатель, размеры которого превышают размеры разрешаемого объема радиолокационной станции.

Гибридный каталог техногенных осколков в околоземном космическом пространстве

В настоящее время Министерством обороны и Национальным космическим агентством (NASA) США ведется работа над каталогом для определения обстановки с орбитальными осколками космического мусора. В результате этой работы составляется интеллектуальный каталог, который комбинирует наблюдаемые и моделируемые осколки космического мусора в одну гибридную базу данных. Однако данный каталог имеет низкий уровень достоверности определения параметров осколков на низких орбитах размером от 0,1 до 10 см [6].

Структурная схема гибридного каталога, использующего пространственно-скоростную модель объемно-распределенного объекта, представлена на рис. 1 [8].

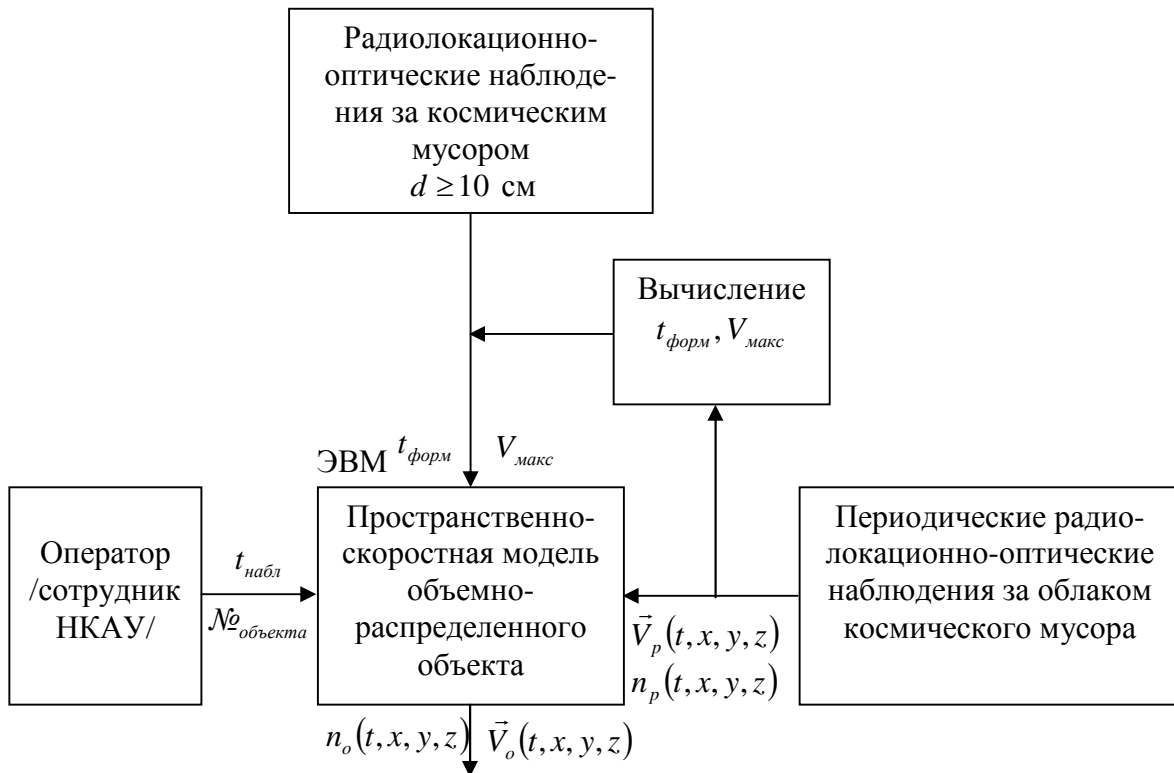


Рис. 1

Исходными данными каталога являются данные радиолокационно-оптического наблюдения за крупными осколками космического мусора (более 10 см): $t_{форм}$ — время формирования облака осколков космического мусора (время взрыва или столкновения); $V_{макс}$ — максимальная скорость разлета осколков (определяется мощностью взрыва или взаимной скоростью столкновения крупных осколков).

Если облако осколков космического мусора уже сформировано, то для внесения его параметров в каталог необходимо предварительно рассчитать время формирования $t_{форм}$ и максимальную скорость $V_{макс}$. Для этого в структурную схему каталога включен блок вычисления $t_{форм}$ и $V_{макс}$. Исходной информацией данного блока являются данные периодических радиолокационно-оптических наблюдений за реальным облаком космического мусора ($n_p(t, x, y, z)$, $V_p(t, x, y, z)$). Воспользовавшись априорной информацией о том, что плотность распределения осколков по скоростям равномерная [9], время формирования определим с помощью формулы:

$$t_{форм} = \frac{\Delta t}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4}{\Delta t \Delta n}} - 1 \right) - t_1,$$

где $\Delta t = t_1 - t_2$ — интервал времени между первым и вторым радиолокационно-оптическим наблюдением за облаком (рис. 2);

$\Delta n = n(t_1) - n(t_2)$ — разность плотностей концентрации осколков, полученных в первом и втором наблюдениях.

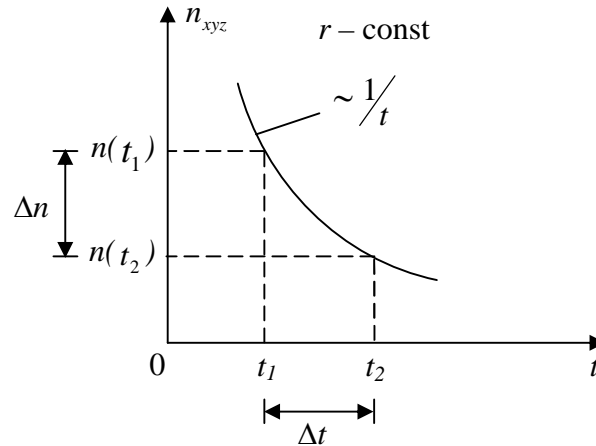


Рис. 2

Максимальная скорость $V_{\text{макс}}$ определяется непосредственно по результатам радиолокационно-оптических наблюдений за облаком путем оценки скорости разлета осколков (наблюдения за изменением размеров облака за время Δt):

$$V_{\text{макс}} = \frac{\Delta L}{2\Delta t},$$

где ΔL — приращение линейного размера облака за интервал времени Δt .

Расчетные данные $t_{\text{форм}}$, $V_{\text{макс}}$ поступают на вход пространственно-скоростной модели объемно-распределенного объекта как исходные.

При необходимости получения информации об облаке космического мусора оператор ЭВМ (сотрудник Национального космического агентства Украины (НКАУ) или оператор Центра контроля космического пространства) задает время наблюдения ($t_{\text{набл}}$) и номер группового объекта, который присваивается объекту непосредственно после взрыва (столкновения). По заданным параметрам ЭВМ по алгоритму пространственно-скоростной модели рассчитывает поле плотностей $n(t, x, y, z)$ и поле скоростей $\vec{V}(t, x, y, z)$ заданного облака космического мусора. При необходимости уточнения информации для долгосрочной модели (адаптации модели) можно использовать данные периодических радиолокационно-оптических наблюдений за облаком космического мусора ($n_p(t, x, y, z)$; $\vec{V}_p(t, x, y, z)$). Алгоритм адаптации разработан и детально рассмотрен в [10].

Достоинством данного гибридного каталога является то, что для получения оперативной информации об облаке космического мусора нет необходимости постоянного его сопровождения в целом, а также его отдельных осколков. (Да это технически и не возможно.) Для упрощения каталога из всего множества параметров, характеризующих облако осколков космического мусора, выбраны только два: распределение осколков по скоростям и их плотность в каждой точке пространства и в каждый момент времени. Про необходимость знания плотности распределения осколков было отмечено выше, а распределение осколков по скоростям необходимо из-за того, что оно задает всю историю развития облака космического мусора (определяет форму и размеры облака).

Недостатком каталога является то, что пространственно-скоростная модель не учитывает размеры осколков. Однако опыты NASA на Земле показали, что столкновение крупных объектов на гиперскорости приводит к образованию осколков в виде «пыли» [6]. Поэтому при начальном приближении будем считать осколки одинаковыми, а в дальнейшем эта погрешность может быть устранена адаптацией модели с помощью результатов периодического радиолокационно-оптического наблюдения за реальным облаком космического мусора (объектом №...).

Пространственно-скоростная модель объемно-распределенного объекта

Как известно [11], пространственно-скоростное распределение элементов в объемно-распределенном объекте описывается двумя параметрами: плотностью элементов $n(t, x, y, z)$ и скоростью их разлета $\vec{V}(t, x, y, z)$. Заданием полей $n(t, \vec{r})$, $\vec{V}(t, \vec{r})$, $\vec{r} = \{x, y, z\}$ (поля скоростей $\vec{V}(t, \vec{r})$ и поля плотностей $n(t, \vec{r})$) полностью описывается геометрия и механика развития объемно-распределенного объекта.

Будем считать, что все осколки в момент формирования облака находились в одной точке (место взрыва или столкновения). В результате радиолокационно-оптического наблюдения за каталогизированными объектами получена информация о времени взрыва (столкновения) $t_{\text{взр(столк)}}$ (время формирования облака осколков космического мусора $t_{\text{форм}}$) и максимальной скорости разлета осколков $V_{\text{макс}}$ (рис. 3).

Для использования модели объемно-распределенного объекта с целью моделирования динамики развития облака осколков космического мусора достаточно задаться распределением осколков по скоростям разлета в каждом угловом направлении [9]. Эту информацию получить с достаточной точностью невозможно из-за большой неоднозначности исходных данных (зависит от материала объекта, мощности взрыва (скорости столкновения), предварительной деформации корпуса объекта и т.д.).



Рис. 3

Поэтому для моделирования процесса формирования облака плотность распределения осколков по скоростям предлагается задавать равномерной (наиболее часто используемая модель). В результате этого моделируемый процесс может отличаться от реального. Поэтому в модели необходимо предусмотреть адаптацию модели под сложившуюся ситуацию. Адаптацию модели целесообразно проводить по периодическим радиолокационно-оптическим наблюдениям за реальным облаком, используя при этом алгоритм минимизации метрического расстояния.

Алгоритм минимизации метрического расстояния

В качестве основной идейной основы проектирования [10] является алгоритмизация проверки выполнимости 2-х неравенств относительно метрических расстояний в оговоренной метрике относительно доверительной вероятности:

$$\left\| \frac{n_p}{\|n_p\|} - \frac{n_m}{\|n_m\|} \right\| \leq \varepsilon_n(P), \quad (1)$$

$$\left\| \frac{\vec{V}_p}{\|\vec{V}_p\|} - \frac{\vec{V}_m}{\|\vec{V}_m\|} \right\| \leq \varepsilon_v(P), \quad (2)$$

где $n_p = n_p(t)$ — выборка реального пространственного распределения элементов (осколков);

$n_m = n_m(t)$ — выборка пространственного распределения элементов (осколков), полученная в результате моделирования;

$\vec{V}_p = \vec{V}_p(t)$ — выборка реального скоростного распределения элементов (осколков);

$n_m = n_m(t)$ — выборка скоростного распределения элементов (осколков), полученная в результате моделирования;

$\varepsilon_n(P), \varepsilon_v(P)$ — доверительные интервалы, соответствующие доверительной вероятности P и описывающие суммарную погрешность оценки распределения выборки $n_o(t)$ и $\vec{V}_o(t)$.

Из формы записи неравенств (1) и (2) следует, что задача адаптации модели не может быть правильно решена без введения понятия погрешности, причем оценка этой погрешности является исходной информацией к решаемой задаче. Использование упомянутой погрешности позволяет не накладывать строгих ограничений типа выбора конкретного закона распределения реальной и модельной выборок. Однако это не означает и полного произвола в описании распределения, которому должна подчиняться выборка. Законы распределения, которыми может описываться одна и та же выборка, могут отличаться в пределах задаваемых погрешностью, то есть любую выборку можно приближенно описать тем или иным законом распределения в пределах погрешности.

Ввиду задания исходной информации с погрешностью, задача имеет не единственное решение [12]. Определение границ множества решений подразумевает возможность нахождения промежуточного решения, удовлетворяющего условию минимума метрического расстояния в левой части (1) на множестве модельных образов, допускаемых априорной информацией о пространственно-скоростном распределении, для каждого фиксированного модельного образа, допускаемого априорной информацией о скоростном распределении, и уточняемого в процессе обработки согласно выражению (2).

Таким образом, потенциально оптимальным алгоритмом поставленной задачи является процедура минимизации в какой-либо метрике функционала типа [13]:

$$\Phi = \min \left\{ \left\| \frac{n_p}{\|n_p\|} - \frac{n_{mi}}{\|n_{mi}\|} \right\|^2 \right\},$$

где $\|z\| = \sqrt{\int_a^b z^2(x) dx}$ — норма в метрическом пространстве L_2 .

Полученная модель пространственно-скоростного распределения $(n_o(t, x_1, x_2, x_3)$ и $\vec{V}_o(t, x_1, x_2, x_3))$ будет адаптированной сложившейся ситуации, а, следовательно, ее можно использовать при каталогизации мелких осколков космического мусора.

Таким образом, адекватность такой модели обеспечивается путем динамической адаптации пространственно-скоростного распределения в реальном масштабе времени с помощью человека-оператора (или ЭВМ).

Выводы и практические рекомендации

1. В настоящее время вокруг Земли скопилось свыше 110 тыс. «мусорных» предметов размером свыше 1 см в диаметре и 40 млн. предметов, размер которых превышает 1 мм. Наблюдаемые осколки составляют лишь очень небольшую часть общего числа частиц, находящихся в околоземном пространстве.

2. Столкновение любого фрагмента размером более 1 см с действующим спутником опасно для последнего из-за большой кинетической энергии осколка ($V \approx 7-8$ км/сек) и может стать причиной прекращения его функциональной деятельности. Для оценки реального риска столкновения действующих спутников с фрагментами космического мусора необходимо учитывать и некаталогизированные объекты, что подразумевает знание их пространственного распределения. Для получения такой информации в настоящее время существует единственный путь — моделирование некаталогизированных популяций.

3. Основным источником некаталогизированных объектов являются разрушения космических аппаратов и ракет-носителей вследствие взрывов или высокоскоростных столкновений. Исследования, проведенные в Институте астрономии РАН и NASA, показывают, что более 40 % космического мусора, находящегося на низких околоземных орбитах, — это осколки, образовавшиеся в результате взрывов последних (вторых или третьих) ступеней ракет и спутников на орбитах.

4. Актуальным направлением исследования загрязнения околоземного пространства является изучение общих закономерностей процесса миграции осколков космического мусора с целью их выявления и каталогизации, а также проведение наблюдений представительных выборок осколков искусственного происхождения, уделяя особое внимание исследованию взорвавшихся объектов. С целью совершенствования системы обнаружения и измерения параметров осколков, ведения их учета с помощью наземных РЛС и создания гибридной базы данных необходимо ускорить мероприятия по моделированию и статистическому анализу процедуры определения параметров облаков космического мусора.

5. С целью исследования динамики развития облаков мелких осколков космического мусора необходимо использовать математическое моделирование. При моделировании некаталогизированных популяций космического мусора целесообразно использовать наглядную и простую в эксплуатации математическую модель объемно-распределенного объекта, для адаптации которой необходимо использовать алгоритм, основанный на минимизации метрического расстояния между модельными параметрами и параметрами, полученными в результате периодических радиолокационно-оптических наблюдений.

1. *Рыхлова Л.В.* Проблемы космического мусора // Земля и вселенная. — 1997. — № 6. — С. 30.

2. Микиша А.М., Рыхлова Л.В., Смирнов М.А. Загрязнение космоса // Вестник Российской Академии наук. — 2001. — Т. 71, № 1. — С. 26–31.
3. Микиша А.М., Рыхлова Л.В., Смирнов М.А. Загрязнение космоса. — М.: Институт астрономии РАН, 2001. — <http://www.ibmh.msk.su>. — 8 с.
4. Гринберг Э.И. Загрязнение космоса и космические полеты // Природа. — 1998. — № 8. — С. 12–17.
5. Загальнодержавна (Національна) космічна програма України на 2003–2007 роки. — К.: НКАУ, 2002. — 78 с.
6. Космический мусор техногенного происхождения: Тезис-обзор. — М.: Прогноз-парк, 1992–2001. — 13 с.
7. Федосеева Ю. Экология космического пространства. — Томск: ТПУ, 1999. — <http://www.bankreferatov.ru>. — 14 с.
8. Пилькевич И.А. Использование пространственно-скоростной модели объемно-распределенного объекта для создания гибридного каталога космического мусора // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2006. — Т. 8, № 1. — С. 17–30.
9. Пилькевич И.А. Моделирование облаков техногенного происхождения в околоземном космическом пространстве: Монография. — К.: Наук. думка, 2006. — 112 с.
10. Пилькевич И.А. Адаптированное моделирование облаков искусственного происхождения в космосе // Электронное моделирование. — 2006. — Т. 28, № 2. — С. 105–114.
11. Пилькевич И.А. Використання законів гідродинаміки для опису локальних хмар дипольних відбивачів поза атмосферою // Актуальні проблеми створення і застосування авіаційних та космічних систем: Збірник матеріалів НПК. — К.: НАО України, 20.11.2003. — С. 374–380.
12. Тихонов Н.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач: Учеб. пособ. для вузов. — Изд. 3-е, исп. — М.: Наука. ГРФМЛ, 1986. — 288 с.
13. Пилькевич И.А. Виявлення і фільтрація сигналів цілі з розсіюванням за частотою і затримкою в присутності сигналоподібних перешкод // Вісник Житомирського державного технологічного університету / Технічні науки. — Житомир: ЖДТУ, 2004. — Вип. № 1(28). — С. 88–92.

Поступила в редакцію 05.12.2007