



А. А. Шарамет, Л. В. Зинин,
С. А. Ишанов, С. В. Мацевский

2D МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОЙ ТЕНИ ЗА ЗАРЯЖЕННЫМ СПУТНИКОМ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Рассмотрена двумерная модель взаимодействия заряженного микро-спутника и тепловой плазмы. В качестве метода решения использовался метод молекулярной динамики. Приведены распределения ионной концентрации вблизи КА для 10 и 10^2 протонов в см^2 и двух значений относительных скоростей спутника и плазмы 8 и 20 км/с, соответственно. Показано, что с увеличением скорости и концентрации частиц ионная тень за спутником становится более выраженной.

It was considered a two-dimensional model of the interaction of a charged micro satellite and thermal plasma. The method of molecular dynamics used as a modeling method. Ion concentration distributions near SC were calculated for 10 and 10^2 protons in cm^2 and the two values of relative satellite velocity and plasma were considered – 8 and 20 km s^{-1} , respectively. It is shown that an increase in velocity and concentration of particles of ion shadow behind the satellite becomes more expressed.

Ключевые слова: математическое моделирование, метод молекулярной динамики, параллельное программирование.

Key words: mathematical modeling, molecular dynamics method, parallel programming.

Введение

Космические аппараты (КА) активно используются для изучения тепловой плазмы верхних слоев ионосферы. При этом даже небольшой потенциал спутника способен внести существенные искажения в полученные данные масс-спектрометрических измерений. Для их корректной интерпретации необходимо построение картины электростатического поля вокруг КА, в особенности при измерении тепловых легких ионов, таких как H^+ и He^+ . Для анализа подобных данных за рубежом используются ряд программных комплексов, самый известный из которых NASCAP (NASA Charging Analyzer Program) [1–3]. Вместе с тем этот комплекс ориентирован главным образом на расчет токов на поверхности КА и процессов его электризации. В наших расчетах потенциал спутника постоянен, токи на поверхности отсутствуют, а задачей является нахождение распределения концентрации частиц вблизи КА.

Один из определяющих факторов в построении модели – радиус Дебая R_D , характерный пространственный размер электромагнитных



взаимодействий в плазме. В случае R_D , сравнимого с размерами КА, задача значительно усложняется, и возможности ее решения напрямую зависят от производительности суперкомпьютерных комплексов.

В последние годы предпринимался ряд попыток решить ее в самой простой геометрической интерпретации с использованием следующих подходов.

1. Гидродинамический подход [4; 5], не позволяющий рассчитывать траектории отдельных частиц и применяемый только при большой концентрации порядка 10^5 см^{-3} и более.

2. Метод крупных частиц — своего рода компромиссный подход между решением системы гидродинамических уравнений и моделированием движений всех частиц с учетом электростатического взаимодействия [4; 5].

3. Метод молекулярной динамики, подробно рассмотренный в [6], дающий достоверные результаты для любой концентрации, но на практике ограниченный мощностью вычислительной системы.

1. Геометрия модели

Построим модель взаимодействия движущегося микроспутника и плазмы. Будем рассматривать двухмерную интерпретацию, в которой магнитное поле не учитывается. В двумерной интерпретации спутник представляет собой круг радиуса R , имеющий постоянный положительный потенциал Φ_0 .

Спутник движется в невозмущенной плазме с постоянной скоростью v_0 . Моделирование осуществляется в квадрате, стороны которого параллельны координатным осям и имеют длину L . Координата $(0, 0)$ лежит в центре области. Квадрат является окрестностью спутника-круга и выбран так, чтобы влиянием спутника вне области можно было пренебречь. Таким образом, спутник-круг с центром в точке $(0, 0)$ и радиусом R движется со скоростью v_0 вдоль оси абсцисс, на границе круга поддерживается потенциал Φ_0 .

2. Описание алгоритма

Для описания перемещения частиц используются формулы классической механики $x = x_0 + v_x t + a_x t^2 / 2$ и $y = y_0 + v_y t + a_y t^2 / 2$, где x_0, y_0 — начальные координаты частицы; v_x, v_y — проекции скорости на оси абсцисс и ординат; a_x, a_y — проекции ускорения на оси абсцисс и ординат. Ускорение находится из второго закона Ньютона с силой Лоренца в правой части $m\vec{a} = q\vec{E}$. Здесь m — масса частицы; \vec{a} — ускорение частицы; q — заряд частицы; \vec{E} — вектор напряженности электрического поля. Напряженность находится как сумма напряженностей электрического поля от всех частиц и спутника: $\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i + \vec{E}_s$, $\vec{E}_i = q_i / r_i^2$, где n — количество частиц; r — расстояние между частицами.



На каждом временном шаге для частицы рассчитывается вектор напряженности электрического поля и далее пересчитываются компоненты ее скорости и координаты.

Начальное пространственное распределение задается случайным образом, компоненты скоростей плазмы распределяются с использованием функции распределения Максвелла по скоростям:

$$F(v) = N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT} \right),$$

где v – скорость; N – количество частиц; m – масса частицы; k – постоянная Больцмана; T – температура. Относительная скорость спутника и плазмы учитывается добавлением к x -компоненте скорости величины v_0 .

3. Исследование динамики движения спутника в плазме

На рисунках 1, 2 спутник изображен серым кругом по центру. В остальном цвет каждой точки зависит от суммарного заряда частиц, расположенных в этой точке, и глобальных экстремумов. От белого положительного (превалируют ионы H^+) к черному отрицательному (превалируют электроны).

Моделирование производилось в квадрате со стороной 1 метр, радиус микроспутника 0,1 метра, положительный потенциал на поверхности 5 вольт. На всех рисунках распределение по прошествии $3,5 \cdot 10^{-5}$ секунд. На рисунке 1 концентрации (вернее, плоский аналог пространственной концентрации) составляют 10 (слева) и 100 (справа) частиц в $см^2$, что соответствует решению 10^5 и 10^6 уравнений движения соответственно.

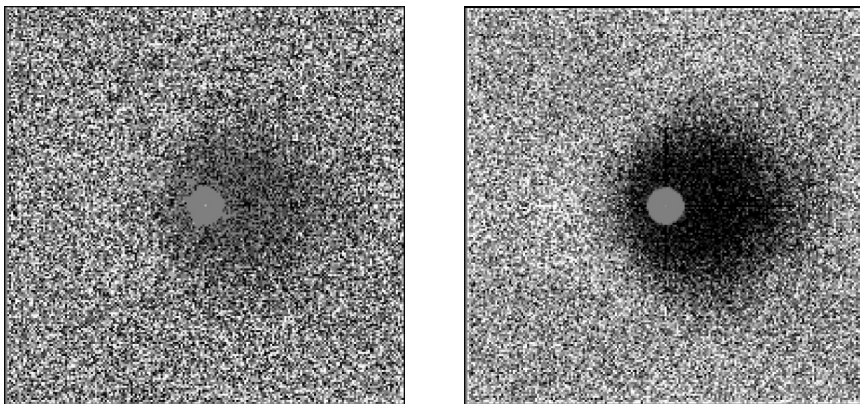


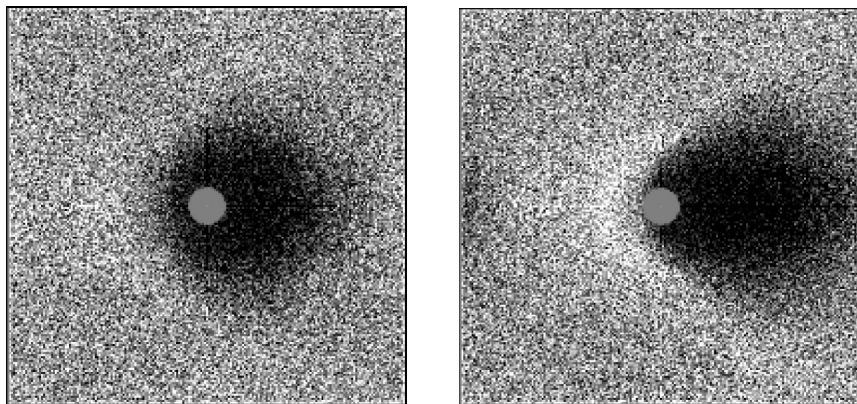
Рис. 1. Пространственное распределение частиц вблизи спутника. Черная область соответствует минимальной ионной концентрации. Левая часть – концентрация 10 частиц в $см^2$, правая – 100 частиц в $см^2$.

На рисунках 1, 2 скорость спутника 8 км/с



При повышении концентрации эффект ионной тени (уменьшение концентрации ионов) наблюдается с большей четкостью. Переднего фронта практически не видно.

Рассмотрим влияние относительной скорости спутника и плазмы. Для сравнения выберем концентрацию 100 частиц и две скорости 8 и 20 км/с. Из рисунка 2 очевидно, что при увеличении скорости эффект значительно усиливается: ионная тень выросла в размерах и приобрела более четкие очертания, также появился ярко выраженный положительно заряженный фронт перед спутником.



29

Рис. 2. Пространственное распределение частиц. Слева скорость спутника 8 км / с, справа – 20 км / с. Концентрация 100 частиц в см²

Заключение

Таким образом, показано, что метод молекулярной динамики хорошо описывает процессы взаимодействия большого числа реальных частиц и заряженного спутника. Подход представляется очень перспективным, в особенности в связи с активным ростом вычислительных мощностей. Распределение ионной концентрации, полученное в модели, вполне соответствует теоретическим представлениям о процессах взаимодействия заряженного спутника и плазмы. На данный момент созданный программный комплекс не позволяет считать распределение частиц при большей концентрации, что накладывает некоторые ограничения при переходе к расчетам в пространстве, однако он сдерживается только техническими проблемами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проектам № 11-01-00098а, № 11-01-00558а и № 12-01-00477а.

Список литературы

1. Katz I., Mandell M.L. Differential charging of high-voltage spacecraft: The equilibrium potential of insulated surfaces // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87. P. 5433.



2. Katz I., Stannart P.R., Gedeon L. et al. NASCAP simulations of spacecraft charging of the SCATHA satellite // Spacecraft/plasma interactions and their influence on field and particle measurements. Proceeding of the 17th ESLAB symposium. Noordwijk. The Netherlands. 13–16 Sept., 1983. ESA SP-198. P. 109–114.

3. Mandell M.J., Katz I., Hilton M. et al. Nascap-2K spacecraft charging models: algorithms and applications // 2001: A spacecraft charging odyssey. Proceeding of the 7th Spacecraft Charging Technology Conference. 23–27 April 2001. ESTEC. Noordwijk. The Netherlands. ESA SP-476. P. 499–507.

4. Zinin L., Grigoriev S., Rylina I. The models of electric field distributions near a satellite // Proceedings of the conference in memory of Yuri Galperin, eds: L.M. Zelenyi, M.A. Geller, J.H. Allen, CAWSES Handbook-001. 2004. P. 76–83.

5. Рылина И.В., Зинин Л.В., Григорьев С.А. и др. Гидродинамический подход к моделированию распределения тепловой плазмы вокруг движущегося заряженного спутника // Космические исследования. 2002. Т. 40. С. 395–405.

6. Зинин Л.В., Ишанов С.А., Шарамет А.А., Мациевский С.В. Моделирование распределения ионов вблизи заряженного спутника методом молекулярной динамики. 2-D приближение // Вестник Балтийского федерального университета. им. И. Канта. 2012. Вып. 10. С. 53–60.

Об авторах

Александр Александрович Шарамет — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: alexsharamet@gmail.com

Леонид Викторович Зинин — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: keonid.zinin@gmail.com

Сергей Александрович Ишанов — д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: sergey.ishanov@ya.ru

Сергей Валентинович Мациевский — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: matsievsky@newmail.ru

About the authors

Alexandr Sharamet — PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: alexsharamet@gmail.com

Dr Leonid Zinin — Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: keonid.zinin@gmail.com

Prof Sergey Ishanov — I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: sergey.ishanov@ya.ru

Dr Sergey Matsievsky — Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: matsievsky@newmail.ru