

Исследование методов реализации неравномерной сетки для моделирования плазмы методом частиц в ячейках*

А.В. Ларин^{1,2}, Е.С. Ефименко^{1,2}, А.А. Гоносков^{1,2,3}

Институт прикладной физики РАН¹, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского², Технологический университет Чалмерс³

Задачи моделирования динамики плазмы и её взаимодействия с лазерными импульсами в настоящее время представляют значительный интерес. К важнейшим направлениям исследований относится, например, создание компактных ускорителей заряженных частиц. Одним из основных инструментов компьютерного моделирования плазмы является метод частиц в ячейках [1], использующий кинетическое описание плазмы в виде распределения электромагнитного поля и набора заряженных частиц. К сильным сторонам метода относятся относительная интуитивность и вычислительная эффективность. Относительная независимость отдельных этапов метода позволяет подбирать набор численных схем, удовлетворяющих конкретным требованиям исследователя к точности и производительности моделирования.

Поскольку динамика электромагнитного поля в задачах физики плазмы диктуется не только начальным распределением поля, но и динамикой частиц, нередко ситуации, в которых в рамках одного моделирования существует необходимость наблюдения явлений разных пространственных масштабов. Например, частицы могут группироваться в небольшом объёме расчётной области, создавая необходимость в более точном разрешении полей в данном объёме. Для интегрирования уравнений Максвелла в методе частиц в ячейках могут применяться методы разных классов: конечно-разностные, конечно-элементные, спектральные. Достаточно распространённым является метод конечных разностей во временной области (finite-difference time-domain, FDTD) [2], благодаря его эффективности, простоте и высокой точности сохранения энергии электромагнитного поля [3]. Однако оригинальная формулировка метода FDTD использует равномерную сетку, и повышение разрешения в ней связано со значительным увеличением вычислительной трудоёмкости. В связи с этим кажется полезным исследование возможностей локального повышения разрешения сетки при использовании метода FDTD в рамках метода частиц в ячейках.

Использование неравномерных сеток осложняется как проблемами, связанными с FDTD (отражения электромагнитных волн от стыков между участками с различным разрешением, нефизичный экспоненциальный рост энергии электромагнитного поля из-за численных эффектов — так называемая поздняя неустойчивость), так и проблемами, специфичными для метода частиц в ячейках (оказание частицей силового воздействия самой на себя при движении вблизи стыка участков сетки с разными разрешениями, появление на стыке мнимых частиц, создающих нефизичное электростатическое поле). На настоящий момент существует значительное число публикаций, рассматривающих методы использования неравномерных сеток для решения электродинамических задач методом FDTD, однако их использование в методе частиц в ячейках затруднительно из-за того, что они не адресуют проблемы второй группы. Публикаций, рассматривающих использование неравномерных сеток в FDTD в контексте метода частиц в ячейках, меньше. В [4, 5] был рассмотрен подход, при котором для достижения локального повышения разрешения проводится дополнительный расчёт на меньшей сетке с меньшим размером ячейки, чем у основной. В [6] был предложен адаптивный метод увеличения разрешения, оперирующий отдельными ячейками, нежели сетками. В [7] был представлен метод, в котором сетка с повышенным разрешением внед-

*Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ № 15-37-21015/16.

ряется в основную сетку, а передачи полей на стыке организуются через цепочку вспомогательных сеток, благодаря чему достигается приемлемый уровень отражений от стыка. В [8] было рассмотрено использование последнего алгоритма в методе частиц в ячейках. Тем не менее, с практической точки зрения публикации по данной тематике имеют ограниченную ценность, в основном ввиду отсутствия в них чётких описаний предлагаемых алгоритмов.

Конечной целью данной работы является создание высокопроизводительной реализации метода использования неравномерных сеток в программном комплексе для трёхмерного моделирования плазмы методом частиц в ячейках PICADOR [9, 10]. На текущий момент были реализованы одномерные прототипы нескольких связанных методов (в частности, метода, описанного в [7]), была проведена экспериментальная проверка данных прототипов на электродинамической задаче (в отсутствие частиц). Было установлено, что при определённых условиях метод, описанный в [7] гарантирует отражения от стыков между областями с разными разрешениями сеток с амплитудой менее чем 10^{-6} от амплитуды исходного импульса, что является достаточным уровнем для решения задач моделирования плазмы. В настоящее время ведётся работа над дополнением данного метода операциями, призванными обеспечить его функционирование в рамках полного метода частиц в ячейках.

Литература

1. Бэдсел Ч., Ленгдон А. Физика плазмы и численное моделирование. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 456 С.
2. Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1966. Вып. 14, № 3. С. 302–307.
3. Taflove A., Hagness S. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Third Edition. London: Artech House, 2004. 1038 С.
4. Vay J.-L., Colella P., McCorquodale P., Van Straalen B., Friedman A., Grote D.P. Mesh refinement for particle-in-cell plasma simulations: applications to and benefits for heavy ion fusion // Laser and Particle Beams. 2002. Вып. 20, № 4. С. 269–575.
5. Vay J.-L., Adam J.-C., Heron A. Asymmetric PML for the absorption of waves. Application to mesh refinement in electromagnetic Particle-In-Cell plasma simulations // Computer Physics Communications. 2004. Вып. 164, № 1. С. 171–177.
6. Fujimoto K. A new electromagnetic particle-in-cell model with adaptive mesh refinement for high-performance parallel computation // Journal of Computational Physics. 2011. Вып. 230, № 23. С. 8508–8526.
7. Donderici B., Teixeira F.L. Improved FDTD subgridding algorithms via digital filtering and domain overriding // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2005. Вып. 53, № 9. С. 2938–2951.
8. Donderici B. Time-Domain Solvers For Complex-Media Electrodynamics And Plasma Physics: Dissertation / Donderici Burkay. — 2008.
9. Bastrakov S., Donchenko R., Gonoskov A., Efimenko E., Malyshev A., Meyerov I., Surmin I. Particle-in-Cell plasma simulation on heterogeneous cluster systems // Journal of Computational Science. 2012. Вып. 3, № 6. С. 474–479.
10. Surmin I.A., Bastrakov S.I., Efimenko E.S., Gonoskov A.A., Korzhimanov A.V., Meyerov I.B. Particle-in-Cell laser-plasma simulation on Xeon Phi coprocessors // Computer Physics Communications. 2016. Вып. 202. С. 204–210.