

ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ И ГЕНЕРАТОРОВ

С. Н. Сытова

*Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,
ул. Бобруйская 11, 220006, Минск, Беларусь, sytova@inp.bsu.by*

Рассматриваются проблемы, возникающие при широком использовании в математическом моделировании различных физических процессов и явлений готовых пакетов прикладных программ. Данная тематика важна для студентов и аспирантов физического и математического профилей, которые в будущем планируют связать свою деятельность с математическим моделированием разнообразных физических явлений и приборов, а также для научных сотрудников, в задачу которых входит исследование методами математического моделирования различных физических закономерностей. Проблемы рассмотрены на примере моделирования различных электронных усилителей и генераторов, включая объемные лазеры на свободных электронах. Однако приведенные рассуждения справедливы и для других областей математического моделирования физических процессов.

Ключевые слова: математическое моделирование; пакеты прикладных программ; электронные приборы; математические модели; системы дифференциальных уравнений.

История развития методов математического моделирования разнообразных физических явлений и устройств выявила следующие необходимые этапы проведения математического моделирования: построение на основе феноменологических физических моделей адекватных математических моделей рассматриваемых физических процессов, выбор среди существующих либо разработку собственных численных методов и алгоритмов для их решения, выбор либо разработку собственных компьютерных программ, реализующих данные алгоритмы, а также собственно сами полученные численные результаты и их анализ с возможным последующим уточнением как феноменологических, так и математических моделей, алгоритмов и программ [1, 2].

Начиная с середины двадцатого века и до сегодняшних дней наблюдается бурное развитие исследований в области нелинейных процессов генерации электромагнитного излучения, происходящих в различных типах электронных усилителей и генераторов. Их производительность и надежность в настоящее время обеспечивается использованием сложных электромагнитных структур на основе новых материалов и передовых технологий. Широкое применение таких приборов в разнообразных приложениях (в системах спутниковой связи, телерадиовещании, различных микроволновых устройствах нагрева для промышленного и бытового использования, в научных исследованиях, в том числе – в ускорителях частиц высоких энергий, нагреве плазмы для управляемого термоядерного синтеза, а также в медицинских системах и т. д.) требует надежной работы при высокой мощности и эффективности, а также низкой стоимости [3].

Назовем наиболее распространенные в настоящее время и использующие в своем функционировании достаточно близкие физические принципы электронные усилители и генераторы – лампы бегущей волны (ЛБВ), лампы обратной волны (ЛОВ), карсинотроны и карсинотропы, мноволновые черенковские генераторы (МВЧГ), лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), гиротроны и мазеры на свободных электронах (МСЭ), виркаторы, оротроны, различные варианты черенковских и смит-парселовских ЛСЭ [4–6], объемные лазеры на свободных электронах (ОЛСЭ) [7].

Основа их функционирования заключается в генерации электромагнитного излучения пучками заряженных частиц, в которых эти частицы сгруппированы в сгустки (банчи) и взаимодействуют в резонаторе (замедляющей системе) с замедленными электромагнитными волнами.

Системы уравнений для моделирования ЛОВ, ЛБВ, ЛСЭ и других электронных приборов могут быть найдены в [5, 6] и др. Для их решения используются численные методы [8] и в целом – методы математического моделирования [1, 2].

Для математического моделирования рассматриваемых электронных усилителей и генераторов создан целый ряд компьютерных программ [9], в том числе KAPAT [10], OOPIC (англ. – Object Oriented PIC) [11], MAGIC [12], PARMELA [13], Genesis 1.3 [14]. Постоянно появляются новые. Следует упомянуть мощный коммерческий программный пакет CST (англ. – Computer Simulation Technology) [15], который позволяет проводить 3D-моделирование электромагнитного поля для проектирования, анализа и оптимизации разнообразных электромагнитных компонентов и систем.

Также в настоящее время в силу экспоненциального возрастания сложности и объема счета большое внимание уделяется проблемам распараллеливания, эффективного использования суперкомпьютеров и распределенных вычислений на массивах компьютеров.

Многие из указанных выше программных продуктов являются коммерческими и имеют высокую стоимость. Но даже если используются свободно распространяемые пакеты программ, в силу их сложности и недостаточной гибкости зачастую требуются значительные усилия по настройке входных параметров данных кодов для получения адекватных результатов моделирования требуемых конкретных установок. Часто исследователи, использующие такие сложные пакеты программ, пытаются обходиться вообще без формулирования систем уравнений, описывающих физические процессы, которые они моделируют, доверяясь разработчикам программ. Это может привести к получению нефизичных результатов [16].

Кроме того, не все ученые имеют доступ к суперкомпьютерным вычислениям, которые являются достаточно дорогими. Но и суперкомпьютер не выдаст численный результат мгновенно. Приведем примерную оценку необходимых затрат. При моделировании таких ускорительных систем как, например, ЛСЭ решение системы полных трехмерных уравнений Максвелла разностными методами на сетках и моделирование методом частиц пучка заряженных частиц, толкаемых в электромагнитном поле силой Лоренца, предполагает моделирование до 10^{10} частиц на примерно 500^3 ячейках разностной сетки за большое (как минимум несколько сотен) число шагов по времени. Для этого может потребоваться оперативная память порядка 0,5 ТБ, а время выполнения даже на хорошем суперкомпьютере может занять от нескольких часов до месяцев работы. При этом для хранения полученных численных данных может потребоваться до 1 ТБ памяти на жестком диске. Понятно, что для создания, например, многомиллионных ускорительных комплексов и установок, а также для проведения экспериментальных исследований на них такое моделирование должно быть выполнено, невзирая на материальные затраты. Также очевидно, что предварительно следует выполнить экспресс-расчеты по одномерным программам с целью сужения и уточнения параметров для последующего эффективного полноценного моделирования.

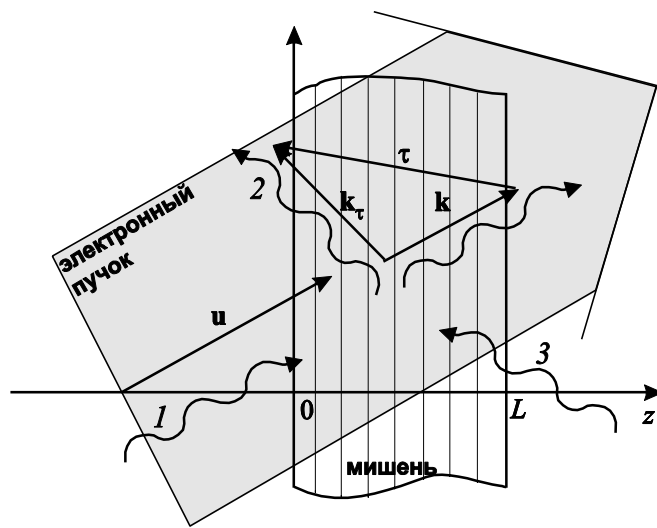
Именно поэтому многие исследователи используют программные коды собственного производства, более того, активно развиваются не просто собственные программы, но и экспресс-коды (не трехмерные полные «тяжелые» коды, а быстрые и «легкие» 1D- и 2D-коды) [17, 18].

В качестве примера такого экспресс-кода для моделирования ОЛСЭ разработан комплекс программ VOLC («VOLume Code») [19, 20]. Он позволяет осуществить математическое моделирование во времени рассматриваемых физических процессов в ОЛСЭ для одного (1D) и двух (2D) пространственных измерений. В первом случае мы имеем одно пространственное

измерение для электромагнитных полей и два измерения (пространственное и фаза) для электронного пучка + время. Простая схема двухволнового ОЛСЭ приведена на рисунке.

Второй случай касается ОЛСЭ с объемными дифракционными решетками, где используются два пространственных измерения (z и x) для электромагнитных полей и функций распределения пучка электронов [21]. Это т. н. поверхностный квазичеренковский ОЛСЭ (surface quasi-Cherenkov FEL). Такие схемы реализуемы в оптическом и терагерцовом диапазонах [22].

Рассмотрим простейшую математическую модель двухволнового ОЛСЭ в объемной геометрии (см. рисунок). Пусть электронный пучок со скоростью u и плотностью j_b «падает» под некоторым углом на полубесконечную трехмерную пространственно-периодическую мишень (резонатор) толщиной L . Здесь он находится в синхронизме с одной из электромагнитных волн, образующихся в системе вследствие динамической дифракции. Это означает выполнение известных условий Вавилова-Черенкова для пучка.



Объемная схема ОЛСЭ в геометрии Брэгга

Одновременно на мишень может падать плоская электромагнитная волна с частотой ω и волновым вектором $\mathbf{k}$ (волна 1 на рисунке). Если эта волна находится в условиях дифракции, то в мишени образуется дифрагированная волна с волновым вектором $\mathbf{k}_\tau = \mathbf{k} + \boldsymbol{\tau}$ (волна 2 на рисунке).

В результате аккуратного учета условий объемной распределенной обратной связи в ОЛСЭ и фаз электронов в пучке, компьютерный код VOLC позволяет моделировать сложную трехмерную динамику электронного пучка и распространение электромагнитных волн в трехмерном резонаторе ОЛСЭ. Такая программа подходит для быстрого моделирования, не требуя больших мощностей компьютера. Она позволяет проверить все основные физические законы, лежащие в основе ОЛСЭ, провести быстрый предрасчет условий эксперимента, который затем может быть с большей точностью промоделирован с помощью «тяжелых» компьютерных кодов (рассмотренных выше) на суперкомпьютерной технике (при ее наличии). Таким образом, комплекс программ VOLC предназначен для экспресс-моделирования работы различных типов ОЛСЭ, в том числе экспериментальных физических установок ОЛСЭ НИИ ЯП БГУ.

Компьютерный код VOLC предоставляет возможность моделировать:

1) динамическую дифракцию электромагнитных волн в геометрии Брэгга и Лауэ в различных типах резонаторов, включая естественные кристаллы (рентгеновский диапазон), сеточные и фольговые резонаторы (СВЧ-диапазон) для двух- и трехволнового случая дифракции, различных дифракционных структур (с учетом отраженных волн в оптическом диапазоне длин волн);

2) проверку условий дифракции в системе;

3) вычисление значений коэффициентов разложения диэлектрической проницаемости среды в ряд по векторам обратной решетки;

4) режимы усиления и генерации, включая режим SASE – Self-amplified spontaneous emission;

5) эффекты, обусловленные наличием внешних зеркал;

6) эффекты дисперсии электромагнитных волн в системе;

7) процессы, учитывающие формы внешнего импульса электромагнитного излучения и пространственной формы пучка электронов, падающих на мишень;

8) динамику пучка электронов при прохождении резонатора при моделировании фаз электронов и функций распределения;

9) взаимодействие одного и двух пучков электронов с электромагнитными волнами в условиях дифракции;

10) циклы по нескольким входным параметрам (параметры внешнего импульса электромагнитного излучения, длина резонатора, плотность тока пучка электронов, форма его импульса, геометрические параметры дифракции, отстройка от точного выполнения черенковского условия, параметры фотонного кристалла и др.) для формирования параметрических карт перехода к хаосу в системе.

Входными данными VOLC являются длина волны, плотность тока пучка и его Лоренц-фактор, размеры резонатора, время процесса, фактор асимметрии, параметры геометрии, отклонение от точного выполнения условия Черенкова, значения разложения диэлектрической проницаемости в ряд по векторам обратной решетки, параметры отражения при наличии внешних зеркал и др. Наборы параметров варьируются в зависимости от версии программы (двухволновая геометрия, трехволновая и т.д.).

В качестве выходных данных в файлы выводятся распределения амплитуд электромагнитных волн и пучка электронов в каждый момент времени на концах резонатора, а также соответствующие им фурье-компоненты. Возможен вывод этих данных в зависимости от пространственных координат в каждый момент времени.

VOLC всесторонне протестирован, в том числе путем сравнения численных результатов моделирования и известных аналитических решений. Полученные численные результаты имеют хорошее согласие с теоретическими и экспериментальными физическими результатами. Математическое моделирование с использованием VOLC подтвердило все основные физические закономерности и принципы работы ОЛСЭ, получены пороги генерации для установок ОЛСЭ, эксперименты на которых проводились в НИИ ЯП БГУ. Показано, что для эффективной генерации существует оптимальный набор параметров системы.

Применимость использованных в VOLC разностных алгоритмов и достоверность решения методами математического моделирования ОЛСЭ подтверждается использованием принятых в научном мире исходных уравнений, корректностью использованных приближений, многочисленными положительными примерами валидации и верификации разработанного программного обеспечения – комплекса программ VOLC. Также достоверность полученных результатов подтверждается их соответствием современным физическим представлениям и согласованностью с существующими аналитическими оценками.

Библиографические ссылки

1. Бэдсел Ч., Лэнгдон А. Физика плазмы и численное моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1989. 452 с.
2. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987. 640 с.
3. Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E. High power microwave. Boca Raton: CRC Press, 2016. 446 p.
4. Freund H. P., Antonsen Jr T. M. Principles of free electron lasers. Springer, 2018. 716 p.
5. Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике СВЧ. М.: Сов. Радио, 1973. 399 с.

6. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков: в 2 т., М: ФИЗМАТЛИТ, 2003. Т. 1. 496 с.; Т. 2. 648 с.
7. Baryshevsky V. G. High-energy nuclear optics of polarized particles. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2012. 640 p.
8. Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
9. Reiche, S. FEL simulations: history, status and outlook // The 32st Int. Free Electron Laser Conference: Proceedings of FEL2010, Malmö, Sweden, 23-27 August 2010. Malmö, 2010. P. 134-137.
10. Tarakanov V. P. Code KARAT in simulations of power microwave sources including Cherenkov plasma devices, vircators, orotron, E-field sensor, calorimeter etc. // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 149. № art. 04024.
11. Verboncoeur J. P., Langdon A. B., Gladd N. T. An object-oriented electromagnetic PIC code // Computer Physics Communications. 1995. Vol. 87. P. 199-211.
12. User-configurable MAGIC for electromagnetic PIC calculations / B. Goplen [et al.] // Computer Physics Communications. 1995. Volume 87, Issues 1-2. P. 54-86.
13. Young L., Billen J. The particle tracking code PARMELA // Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, Portland, Oregon, USA, May 12-16, 2003. IEEE, 2003. P. 3521-3523.
14. Reiche S. GENESIS 1. 3: a fully 3D time-dependent FEL simulation code // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1999. Vol. 429. P. 243-248.
15. CST Studio Suite 2017 offers EM simulation on every scale // Microwave Journal. 2017. February. 2 p.
16. Моделирование неустойчивостей в релятивистском электронном потоке в среде CST Particle Studio / С. А. Куркин [и др.] // Математическое Моделирование. 2017. Т. 29, № 7. С. 109-122.
17. Cyclotron auto resonance maser and free electron laser devices: a unified point of view / E. Di Palma [et al.] // J. Plasma Phys. 2017. Vol. 83. № art. 905830102
18. Optimization of volume free electron laser with photonic crystal foil grid structure for operation in sub-terahertz range / A. Badarin [et al.] // 44th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2019. 2 p.
19. Сытова С. Н. Компьютерное моделирование объемных лазеров на свободных электронах с помощью компьютерной программы VOLC // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Веб-программирование и интернет-технологии» (WebConf09). 8-10 июня 2009 г. Минск, 2009. Часть 2. С. 59-60.
20. Sytova S. Simulation Techniques for Vacuum Electronic Devices // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2022. Vol. 25, No 2. P. 168-176.
21. Сытова С. Н. Модели объемных лазеров на свободных электронах // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, № 6. С. 124-135.
22. Visible surface quasi-Cherenkov FEL / V. G. Baryshevsky [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1995. Vol. A358. P. 508-511.
23. Shintake T. Review of the worldwide SASE FEL development // Proc. PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA. 2007. № art. MOZBAB01. P. 89-93.