

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЯ ФИЛАМЕНТОВ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ МОД ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ ^{*)}

²Буц М.К., ²Тимохин В.М., ²Сергеев В.Ю., ¹Новохацкий А.Н., ¹команда Глобус-М2

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,
m.buts@mail.ioffe.ru

²СПбГПУ им. Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Исследование периферийных локализованных мод и связанных с ними плазменных филаментов является важной задачей в контексте ограничения максимальных тепловых потоков на элементы первой стенки токамаков [1]. Эффективной методикой регистрации пространственной структуры и временной динамики филаментов является высокоскоростная видеосъемка. С этой целью на сферическом токамаке Глобус-М2 создан диагностический комплекс высокоскоростной съемки плазмы, состоящий из трех быстрых камер, а также программный комплекс обработки получаемых изображений.

Сложность регистрации филаментов состоит в их высокой скорости и невысокой яркости относительно фонового излучения плазмы. Характерное значение экспозиции, используемой при съемке филаментов составляет 2–5 мкс. При этом необходимая для наблюдения их динамики частота кадров – не менее 100 кГц. Для достижения высокой частоты требуется существенное сужение рабочей области матрицы камеры, что затрудняет анализ пространственной структуры филаментов. Для решения этой проблемы применена одновременная съемка двумя камерами – «обзорной», с относительно низкой частотой и широким углом обзора для анализа пространственных характеристик филаментов (локализация, мода, размеры), и «быстрой», с высокой частотой и относительно малым полем зрения для анализа временных характеристик (скорость, время жизни).

Предварительная обработка изображений состоит в медианной и билатеральной [3] фильтрации. Далее, для повышения контрастности филаментов реализован алгоритм удаления стационарного фонового излучения с изображений. Стандартный алгоритм вычисления фона простым усреднением соседних кадров дает значительные искажения, затрудняющие дальнейший анализ изображений. Поэтому был разработан новый алгоритм, нивелирующий эффекты неоднородности фона, вызванных филаментами с соседних кадров.

Для пространственной калибровки области обзора камеры и сопоставления наблюдаемых филаментов с силовыми линиями магнитного поля использован код CalCam [4]. Магнитная конфигурация рассчитывается либо кодом ruGSS [5] с последующей трассировкой силовой линии кодом PLEQUE [6], либо используется только код FreeGS [7]. Наблюдаемые филаменты хорошо совпадают с силовыми линиями, лежащими вблизи сепаратрисы. Определены характерные размеры 2–3 см и скорости 5–10 км/с наблюдаемых филаментов.

Работа поддержана ГК Росатом и Минобрнауки России в рамках Федерального проекта 3 (ФПЗ), проект № FSEG-2025-0002 “Разработка принципов и систем управления и диагностики плазмы токамаков с помощью инъекции вещества”.

Литература

- [1]. Fundamenski W. et al., Journal of Nuclear Materials 363–365 (2007) 319–324
- [2]. Kirk A. et al., 2004 Physical Review Letters, vol. 92, Issue 24
- [3]. Tomasi C. et al., Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Computer Vision
- [4]. Silburn S., et al., Calcam Python package, DOI: 10.5281/zenodo.14041548
- [5]. Kiselev E.O., et al., Plasma Phys. Rep. 49, 1560–1577 (2023)
- [6]. Kripner L., et al., PLEQUE Python module, <https://github.com/kripnerl/pleque>
- [7]. Dudson B., et al., FreeGS Python module, <https://github.com/freegs-plasma/freegs>

^{*)} DOI – тезисы на английском