

УДК 533.951

М.В.Ефанов (6 курс, каф. ФП), В.В. Буланин, к.ф-м.н., доц.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОПЛЕРОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

Доплеровская рефлектометрия является методом определения полоидальных скоростей вращения плазмы в токамаке, основанный на измерении Доплеровского частотного сдвига излучения, обратно рассеянного на флуктуациях плазмы, при наклонном падении микроволнового пучка. В случае, когда для микроволнового излучения в плазме имеется отсечка, рассеяние происходит на полоидально неоднородных флуктуациях преимущественно из области поворота лучевой траектории. Для количественной оценки разрешения метода по полоидальным волновым числам и разрешения вдоль малого радиуса токамака необходимо проведение численного моделирования обратного рассеяния в двумерной (2D) геометрии. Ранее такое моделирование уже проводилось для случая прямоугольной геометрии, когда зондирующая волна падала на плоский слой плазмы с линейно нарастающей концентрацией. Целью настоящей работы явилось развитие методов 2D моделирования для случая цилиндрической геометрии плазмы и произвольного радиального профиля электронной плотности. При моделировании так же учитывалось распределение поля в раскрыве антенны, близкого к реальному распределению.

Моделирование проводилось при условии выполнения борновского приближения, т.е. для однократного рассеяния при условии малости амплитуды флуктуаций концентрации. Расчет проводился для случая использования для зондирования и приема рассеянного излучения обыкновенной моды одной антенны. Рассмотрен важный для измерения вращения плазмы случай наклонного зондирования плазмы. Конечным результатом этого моделирования являются 2D профили весовых функций для вычисления отклика детектора $I(t)$ рассеянного излучения при гомодинном приеме:

$$I(t) = \eta \int \delta n(r, \theta, t) \cdot \langle \vec{E}_i(r, \theta, t) \vec{E}_{l_0}(r, \theta, t) \rangle r dr d\theta, \quad (1)$$

где $\delta n(r, \theta, t)$ - флуктуации плотности, E_i – поле зондирующего излучения в объеме рассеяния, E_{l_0} - фиктивное поле, которое возникает в плазме с той же неоднородностью коэффициента преломления при работе приемной антенны в режиме передачи. Для представления микроволновых полей в вакуумной области эти поля представлялись в виде суперпозиции плоских волн, распространяющихся под различными углами. Угловая зависимость амплитуд этих волн находилась как Фурье-преобразование поля в раскрыве антенны. Распределение поля в раскрыве антенны задавалось различными образами с учетом конечного радиуса кривизны волнового фронта. Такое представление полей позволяло вычислить распределение поля на окружности, на которой находился центр раскрыва микроволнового рупора. Затем поле на этой цилиндрической поверхности раскладывалось по полоидальным гармоникам. Амплитуды этих гармоник определяли в вакууме амплитуды сходящихся волн, радиальное распределение которых задавались функциями Ганкеля второго рода. Распределение полей каждой полоидальной моды на границе плазмы сшивалось с полоидальными модами в плазме, радиальное распределение которых определялось как решение одномерного волнового уравнения в цилиндрической геометрии. Окончательно поле в плазме находилось, как суперпозиция этих полоидальных мод.

В численном эксперименте была определена разрешающая способность метода по полоидальным волновым числам и радиальное разрешение в зависимости от радиусов кривизны поверхности отсечки и углового раскрыва диаграммы направленности антенны. Моделирование проводилось для токамаков, как малого, так и большого масштаба (токамак-реактор ITER и токамак Туман-3М) с использованием данных о радиальных профилях плотности плазмы.

В результате было установлено, что оптимальный угол наклона антенны с точки зрения разрешающей способности по радиусу и полоидальным волновым числам лежит в интервале 10-20 градусов. При меньших углах наклона антенны возможно паразитное влияние рассеяния волн, нормально падающих на поверхность отсечки. С другой стороны, с увеличением угла наклона растет полоидальное число рассеивающих флуктуаций, и одновременно падает их амплитуда, что ограничивает использование метода из-за конечной чувствительности.

При больших наклонах антенны чувствительность метода падает из-за больших полоидальных волновых чисел. Также было показано, что для лучшего разрешения метода необходимо обеспечить малую расходимость зондирующего пучка. Результаты были сопоставлены с данными расчетов для случая плоского слоя плазмы. Эти сравнения показали, что при учете кривизны поверхности отсечки разрешение метода по радиусу ухудшится. Этот факт следует особо учитывать для токамаков малого размера.