

ДИАГНОСТИКА ПРОФИЛЯ ТОКА ПЛАЗМЫ НА ФТ-2, ОСНОВАННАЯ НА КОРРЕЛЯЦИОННЫХ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ МГД МОД

© В.Н.Будников, Е.С.Гусаков, Л.А.Есипов,
Е.Р.Итс, А.Ю.Степанов, В.Ю.Шориков

1. Введение

Определение профиля тока для плазмы термоядерного реактора является важной проблемой, для решения которой необходимо разрабатывать новые диагностические методы. Можно отметить такие трудности, как ограничения доступности и высокие уровни излучения. В этом контексте микроволновая диагностика могла бы быть весьма перспективной.

Одной из наиболее продвинутых микроволновых диагностик является рефлектометрия. Обычно ее используют для измерений профиля электронной плотности и наблюдения мелкомасштабных колебаний плазмы. Кроме того, известно, что рефлектометрическая диагностика может регистрировать крупномасштабные колебания плазмы, связанные с магнитогидродинамической (МГД) активностью [1,2]. В настоящей работе мы представляем методику по определению q -профиля с использованием корреляционного анализа рефлектометрических сигналов от МГД колебаний.

2. Принципы измерений

Предлагается использовать, по крайней мере, два рефлектометра, расположенные в общем случае под разными полоидальными и тороидальными углами, аналогично магнитным зондам Мирнова для корреляционного анализа МГД мод. Данные обрабатываются с помощью спектрального и корреляционного анализа [3,4]. Рассчитываются нормированная кросскорреляционная функция $S_{n12}(\tau)$, исходный для каждого из каналов $G_i(\omega)$ ($i = 1, 2$) и взаимный $G_{12}(\omega)$ спектры, спектры когерентности $\gamma(\omega)$ и взаимной фазы $\Phi(\omega)$. Анализ временного поведения этих функций может дать информацию о локализации резонансных магнитных поверхностей, которая позволяет получать данные по

q -профилю. Принципиальная разница между корреляционными методами для рефлектометрических сигналов и сигналов магнитных зондов заключается в том, что в случае рефлектометра имеется возможность локально сканировать во внутренних областях плазмы.

3. Схема корреляционного рефлектометра на токамаке ФТ-2

МГД возмущения плотности на ФТ-2 изучались с помощью двух рефлектометров, работающих одновременно на одной и той же частоте 35 ГГц. Зондирование проводилось на волне с обыкновенной поляризацией, плотность отсечки составляла $n_c = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Эксперименты проводились при двух разных относительных положениях

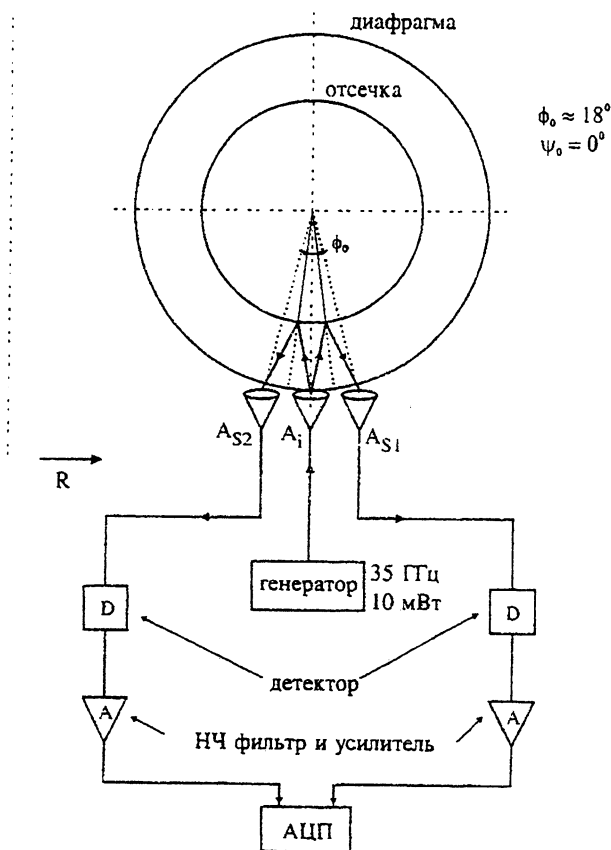


Рис. 1. Схема корреляционного рефлектометра на токамаке ФТ-2 для полоидального случая.

приемно-передающих систем: "полоидальном" и "тороидальном".

На рис. 1 приведена блок-схема измерений для полоидального случая; рефлектометры расположены в одном и том же полоидальном сечении ($\Psi_p = 0^\circ$) и разнесены полоидально на угол $\phi_p \approx 18^\circ$. Для обоих рефлектометров используется один и тот же зондирующий генератор с выходной мощностью ~ 10 мВт и одна и та же передающая антенна A_i . Два отраженных сигнала принимаются антеннами A_{s1} и A_{s2} и регистрируются схемами прямого детектирования, так что информация о МГД колебаниях заключена в амплитудной модуляции сигналов. После усиления в полосе частот до 500 кГц сигналы регистрируются АЦП с периодом записи 1 мкс.

В тороидальном случае тороидальный угол составляет $\Psi_t = 180^\circ$ и полоидальный — $\phi_t \approx 72^\circ$. Мощность зондирования делится на два канала и поступает на две передающие антенны. Приемная часть идентична описанной для полоидального случая.

4. Экспериментальные результаты

Эксперименты на токамаке ФТ-2 ($R_0 = 55$ см, $a = 8$ см) проводились при следующих параметрах разряда: ток плазмы I_p — до 30 кА, средняя концентрация электронов $\langle n_e \rangle$ — до $3 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, магнитное поле $B_{\max}(0) = 2$ Тл. Изменение во времени тока плазмы и магнитного поля определяли положение магнитных поверхностей с заданным q . Изменения плотности электронов в течение импульса токамака и от разряда к разряду позволяло обеспечить некоторое сканирование положением поверхности отсечки по малому радиусу. Поэтому при используемых в экспериментах максимальных значениях тока плазмы $I_p \sim 20$ кА и ~ 30 кА можно было исследовать $q = m/n = (1.5-4.0)$.

4.1. Полоидальная рефлектометрия

На рис. 2 приведены спектры когерентности и взаимной фазы для полоидального случая, когда положение отсечки совпадает с положением магнитной поверхности $q = m/n = 2$. Отчетливо видны три кратных гармоники на частотах ~ 40 , ~ 80 и ~ 120 кГц с высоким уровнем когерентности. Для вращающихся МГД мод в полоидальном случае взаимная фаза должна расти линейно с номером моды (или с частотой): $\Phi = \phi_p \cdot m$. Как видно, фаза для этих частот хорошо ложится на прямую (пунктирная прямая), для которой

$$I_p = 28.5 \text{ кА} \quad \langle n_e \rangle = 2.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

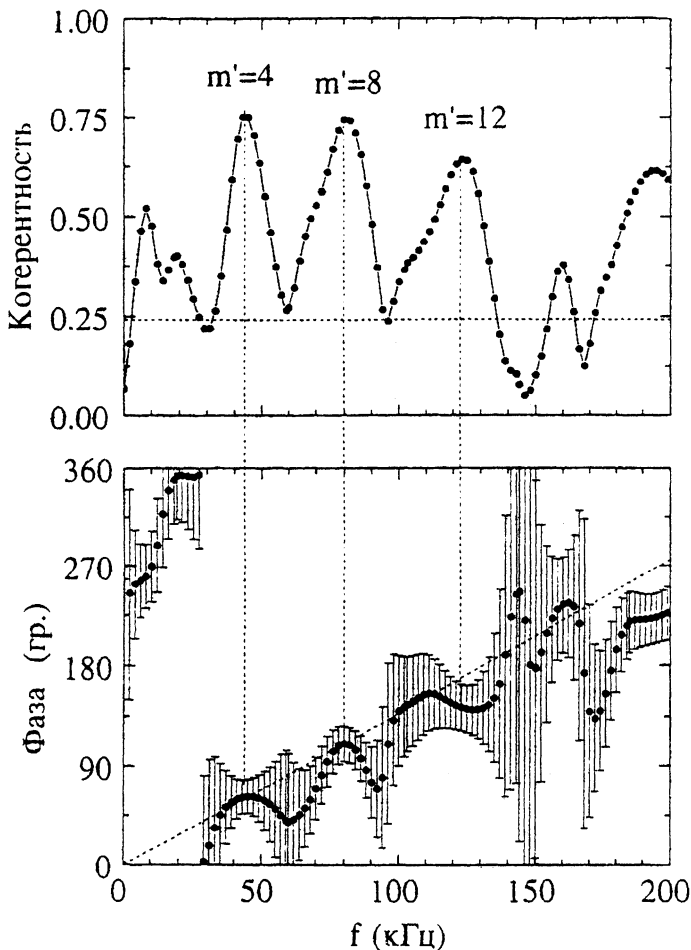


Рис. 2. Спектры когерентности и взаимной фазы, когда рефлектометрические сигналы принимаются из окрестности магнитной поверхности $q = 2$.

соответственно $m' = 4.8$ и 12 . Здесь m' — номер моды, измеренный рефлектометром. Следует отметить, что $m' = 2 \cdot m$, так как число полюсов с максимальным отражением (грубо говоря, там, где поверхность отсечки перпендикулярна линии зондирования и наблюдения рефлектометра) в два раза больше, чем номер МГД моды плазмы. Так что наблюдаемые с помощью рефлектометра моды $(m/n)' = 4/2, 8.4$ и

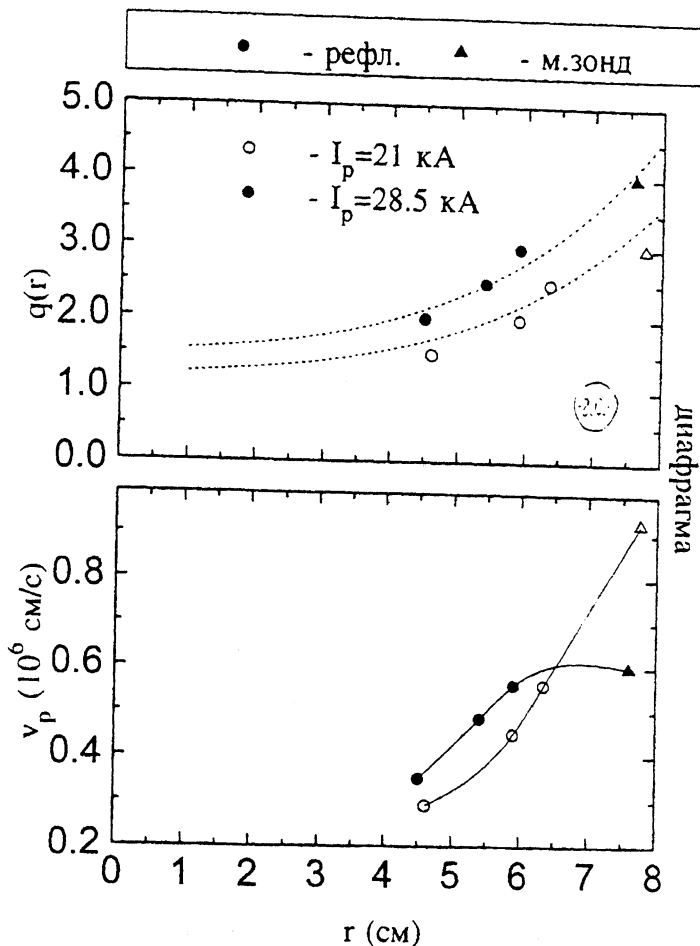


Рис. 3. а — данные по q -профилю для двух токов плазмы; б — профили скорости вращения МГД возмущений для двух токов плазмы.

12/6 соответствуют плазменным МГД модам $m/n = 2/1, 4/2$ и $6/3$.

Кратные гармоники с высоким уровнем когерентности наблюдались для $q = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ и 4.0 . Однако хорошее фазовое соответствие с ожидаемыми величинами фиксировалось лишь для $q = 2$ и 3 .

На рис. 3, а изображены полученные данные по q -профилю для двух токов плазмы $I_p = 21$ и 28.5 кА. Точки на периферии плазмы получены с помощью магнитных зондов. Для сравнения здесь же приведены расчетные профили для $j(r) = j(0) \cdot (1 - (r/a)^2)^2$ (пунктир). Несмотря на то что значе-

ния токов плазмы отличаются почти в полтора раза, полученные оценочные q -профили подобны и хорошо согласуются с расчетными. Приведенные данные обладают тем недостатком, что относятся к разным моментам времени одного и того же токамачного разряда. Однако, по мнению авторов, они в достаточной степени демонстрируют возможности используемого метода.

Зная частотные спектры и номера МГД мод, можно пересчитать данные рис. 3, а в профили скорости вращения МГД возмущений (см. рис. 3, б). В отличие от q -профилей, последние существенно различаются на периферии плазмы.

4.2. Тороидальная рефлектометрия

В тороидальном случае используемый ток плазмы 27 кА позволял зондировать магнитные поверхности $q = 1.5, 2.0, 2.5$. Пики когерентности наблюдались для магнитных поверхностей $q = 2.0, 2.5$. Хорошее соответствие между полученными и ожидаемыми данными кроссфазы наблюдается только для $q = 2.5$; кроссфаза на основной гармонике в этом случае проходит через 0° . Этот результат хорошо согласуется с тем фактом, что в выбранной конфигурации ($\Psi_t = 180^\circ, \phi_t \approx 72^\circ$) магнитная силовая линия непосредственно соединяет два рефлектометра для $q \sim 2.5$. Ширина спектральных линий на основной гармонике больше по сравнению с полоидальным случаем примерно в полтора-два-раза. В тороидальном случае наблюдается меньшее число МГД гармоник (только основная и первая).

5. Заключение

Описанные результаты получены, несмотря на ряд трудностей, типичных для небольшого токамака ФТ-2. Профиль q и положение отсечки нестационарны в течение используемых периодов анализа данных (512 мкс). Радиальное пространственное разрешение для рефлектометра с обыкновенной поляризацией невысоко для параметров ФТ-2. Полоидальное и тороидальное пространственные разрешения также недостаточны из-за широких диаграмм направленности используемых антенн. Важно подчеркнуть, что эти ограничения несущественны в установках с большими масштабами и длительностями разряда.

Итак, описанная диагностика позволяет оценивать положение различных рациональных магнитных поверхностей, что позволяет получать информацию о профиле тока в токамаке. Кроме того, диагностика дает информацию о частотных спектрах и скоростях вращения МГД возмущений.

Список литературы

- [1] *Cripwell P.J.* // Extraordinary Mode Reflectometry at JET, Ph.D. Thes., ICSTM University, London, 1992.
- [2] *Manso M.E., Serra F., Silva A. et al.* Measurements of MHD Activity with Reflectometry on ASDEX, Coll. of Papers IAEA Tech. Com. Meeting. "Microwave Reflectometry for Fusion Plasma Diagnostics". Vienna, 1992. P. 123-132.
- [3] *Bendat J.S., Piersol A.G.* Random Data: Analysis and Measurement Techniques, Wiley, 1971.
- [4] *Marple S.H.* Digital Spectral Analysis With Applications. Prentice-Hall, 1987.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
4 апреля 1996 г.