

04.2

Применение метода многочастотного доплеровского обратного рассеяния для исследования альфвеновских мод в токамаке

© В.В. Буланин^{1,2}, В.К. Гусев¹, Г.С. Курский¹, В.Б. Минаев¹, М.И. Патров¹,
А.В. Петров², Ю.В. Петров¹, А.Ю. Яшин^{1,2}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: V.Bulanin@spbstu.ru

Поступило в Редакцию 15 июля 2019 г.

В окончательной редакции 15 июля 2019 г.

Принято к публикации 17 июля 2019 г.

Приведены результаты исследования тороидальных альфвеновских мод с использованием многочастотного метода доплеровского обратного рассеяния в токамаке Глобус-М. Представлена методика регистрации альфвеновских мод при многоканальном зондировании. Детально обсуждаются возможные причины наблюдаемых колебаний полоидальной скорости вращения плазмы на частотах альфвеновских колебаний. Представлены сведения о пространственном распределении альфвеновских мод. Определены рекомендации для дальнейшего развития доплеровского обратного рассеяния с целью более детального исследования тороидальных альфвеновских мод в токамаках.

Ключевые слова: плазма, токамак, альфвеновская мода, доплеровское обратное рассеяние.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.21.48474.17982

Исследование возникновения и развития альфвеновских мод, вызывающих потери высокоэнергетических ионов в токамаке, остается одной из основных экспериментальных задач в области реализации управляемого термоядерного синтеза и создания эффективных источников нейтронов [1–3]. Ранее сообщалось, что альфвеновские моды могут быть зарегистрированы методом доплеровского обратного рассеяния (ДОР) [4]. Использование этого метода открывает новую возможность изучения альфвеновских мод в центральных областях токамака. Эксперименты в работе [4] проводились в сферическом токамаке Глобус-М с использованием схемы ДОР, в которой зондирование плазмы осуществлялось СВЧ-излучением на одной фиксированной частоте, когда обратное рассеяние регистрировалось в ограниченном интервале по радиусу. Как показывает численное моделирование, в токамаке Глобус-М альфвеновские моды различных частот имеют неоднородное распределение по радиусу [5,6]. Для восстановления радиальных распределений требуется параллельная регистрация мод на различных радиусах. В настоящей работе для получения пространственных распределений альфвеновских мод в токамаке Глобус-М реализовано многочастотное зондирование плазмы.

Метод ДОР предназначен для регистрации мелкомасштабных флуктуаций плотности плазмы и определения скорости их вращения в направлении диамагнитного дрейфа заряженных частиц [7–10]. Скорость вращения V_{\perp} связана с величиной доплеровского смещения частоты обратно рассеянного излучения соотношением $\Delta\omega_D = \mathbf{k}_{\perp} \mathbf{V}_{\perp}$, что позволяет определить величину и направление скорости вращения (здесь \mathbf{k}_{\perp} — волновой

вектор рассеивающих флуктуаций электронной плотности плазмы вблизи отсечки для случая распространения излучения О-моды). Доплеровское обратное рассеяние происходит на флуктуациях плазмы малых масштабов, в связи с этим рассеяние на альфвеновских модах, представляющих собой возмущения плазмы с поперечным размером порядка малого радиуса, не происходит. Тем не менее альфвеновские моды могут оказывать, как показано в работе [4], косвенное влияние на параметры обратно рассеянного излучения, которое выражается в появлении колебаний доплеровского частотного сдвига на альфвеновских частотах. Этот эффект использовался для регистрации альфвеновских мод при многочастотном зондировании. В настоящей работе для проведения исследований на токамаке Глобус-М использовалась четырехчастотная схема доплеровского обратного рассеяния [11]. Каждый частотный канал включал микроволновую схему с двойным гомодинным приемом, которая позволяла осуществлять квадратурное детектирование обратно рассеянного излучения. Использовались четыре фиксированные зондирующие частоты: 20, 29, 39 и 48 GHz. Зондирование плазмы осуществлялось со стороны слабого магнитного поля с помощью двух антенн с изменяющимся углом наклона относительно нормали к магнитной поверхности. Определение области обратного рассеяния проводилось с помощью ранее разработанного 3D-кода [5,6]. При выбранном наборе частот зондирующего излучения регистрацию альфвеновских мод можно было проводить в широком интервале по радиусу $\rho = 0.6-1$ (ρ — нормированный малый радиус).

Применение четырехчастотной схемы доплеровского обратного рассеяния для регистрации альфвеновских

мод осуществлялось в разрядах, в которых тороидальные альфвеновские моды надежно наблюдались в период инъекции пучка дейтерия с помощью магнитных зондов [3,12]. Основные характеристики разрядов были следующими: ток $I_p = 170\text{--}250$ кА, плотность плазмы $n_e < 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, тороидальное магнитное поле $B_T = 0.4$ и 0.5 Т. Энергия нагревного пучка дейтерия составляла $E_b = 28$ кеВ, мощность $P_b = 0.75$ МВ. С помощью магнитных зондов в период стационарного плазменного тока через несколько миллисекунд после включения инжектора были зарегистрированы цуги колебаний на альфвеновских частотах, которые интерпретировались как тороидальные альфвеновские моды [3,12]. В ряде разрядов на спектрограммах сигналов магнитного зонда наблюдались всплески альфвеновских мод, содержащие от одной до трех гармоник основной частоты. С использованием метода ДОР удалось зарегистрировать колебания доплеровского частотного сдвига $\Delta\omega_D$ на альфвеновских частотах. Эти колебания наблюдались одновременно со всплесками колебаний сигналов магнитных зондов. Совпадали также частоты гармоник колебаний частотного сдвига и колебаний сигналов магнитного зонда. На рис. 1 показаны спектры магнитного зонда и спектры доплеровского частотного смещения для двух различных положений отсечки, вычисленные для одного и того же временного интервала длительностью $64 \mu\text{s}$. Видно совпадение спектральных пиков на частоте 90 кГц и ее гармониках в спектрах сигналов магнитного зонда и частотного сдвига. Было установлено (с использованием массива магнитных зондов), что различным гармоникам соответствуют альфвеновские колебания с различными тороидальными модовыми числами n . Различие в частотных спектрах доплеровского сдвига для положений отсечек $R_{\text{cutoff}} = 51.8$ и 54.1 см отражает различие в локализациях альфвеновских колебаний с разными модовыми числами n . Отметим, что пик на частоте 90 кГц имелся и в спектрах колебаний амплитуды сигналов обратного рассеяния (рис. 1, *d*). Однако контраст этого пика значительно меньше, чем контраст пиков в спектрах колебаний доплеровского сдвига.

В работе [4] наблюдаемые колебания доплеровского частотного сдвига $\Delta\omega_D$ на альфвеновских частотах связывались с колебаниями скорости рассеивающих флуктуаций \mathbf{V}_\perp . Полагалось, что эта скорость на альфвеновских частотах обусловлена $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфом в скрещенных радиальном электрическом поле альфвеновской волны E_r и магнитном поле токамака. Электрическое поле альфвеновской моды ранее надежно регистрировалось с помощью метода зондирования пучком тяжелых ионов (НВР) на стеллараторе TJ-II [13,14]. Основываясь на предположении о том, что скорость \mathbf{V}_\perp есть скорость $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфа, можно оценить абсолютные значения амплитуды колебаний радиального электрического поля $\tilde{E}_r = \tilde{V}_\perp B$ и использовать полученные данные для нахождения амплитуды колебаний полоидальной проекции магнитного поля в альфвеновской электромагнит-

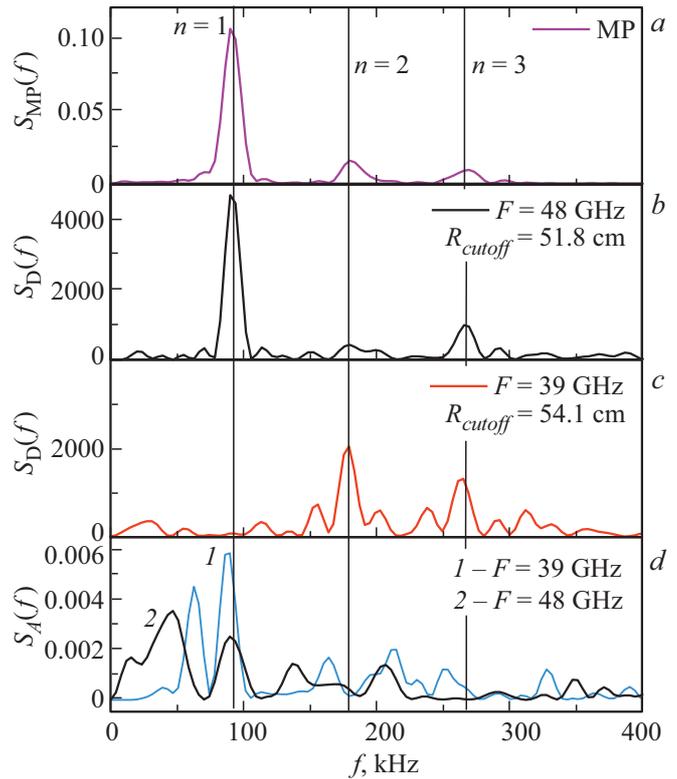


Рис. 1. Спектры мощности сигналов магнитного зонда (а), доплеровского частотного сдвига (b, c), модуля сигнала IQ-детектора (d). Выстрел токамака #36994, момент времени $t = 146.2$ ms, F — частота зондирования.

ной волне \tilde{B}_θ . Определенные таким образом значения отвечают локальным величинам полей в области отсечек зондирующего излучения. С учетом рассеяния излучения различных СВЧ рассчитанные параметры находились в следующих пределах: $V_\theta = 2\text{--}9$ км/с, $E_r = 0.5\text{--}3$ кВ/м, $B_\theta = (7\text{--}25) \cdot 10^{-4}$ Т. Колебания магнитного поля в альфвеновской волне приводят к деформации магнитных поверхностей, которая вызывает вариацию угла падения излучения и колебания с альфвеновской частотой вектора \mathbf{k}_\perp . Изменения \mathbf{k}_\perp в свою очередь могут приводить к колебаниям $\Delta\omega_D$ [4]. Однако амплитуда этих колебаний $\Delta\omega_D$ по оценкам значительно меньше амплитуды, наблюдаемой в эксперименте. Поэтому с учетом новых данных об амплитуде колебаний магнитного поля, полученных при многочастотном зондировании, можно полагать, что колебания скорости — это колебания скорости дрейфа в радиальном электрическом поле. Колебания \mathbf{k}_\perp могут также вызывать колебания амплитуды рассеивающих флуктуаций при их сильной зависимости от волнового числа. Наблюдаемые малые колебания интенсивности рассеянного излучения, которые проявляются в спектральных пиках на спектрах (рис. 1, *d*), возможно, связаны с этим эффектом.

С использованием всего массива данных, полученных при многочастотном зондировании, было проведено

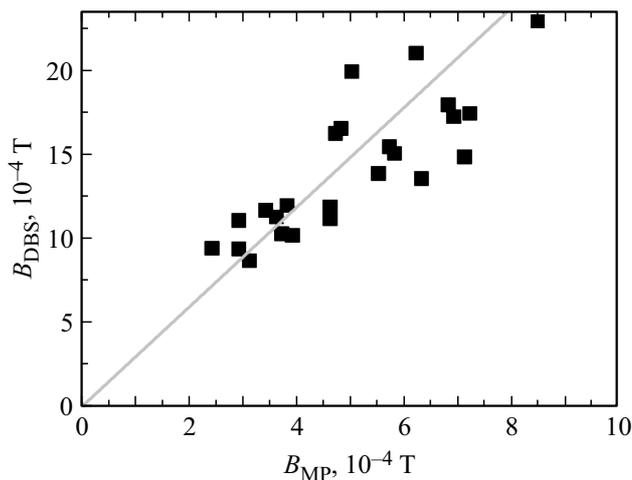


Рис. 2. Сопоставление амплитуд колебаний полоидальной компоненты магнитного поля альфвеновской волны в плазме, измеренных с помощью метода доплеровского обратного рассеяния (B_{DBS}) и с использованием магнитного зонда вне разряда (B_{MP}).

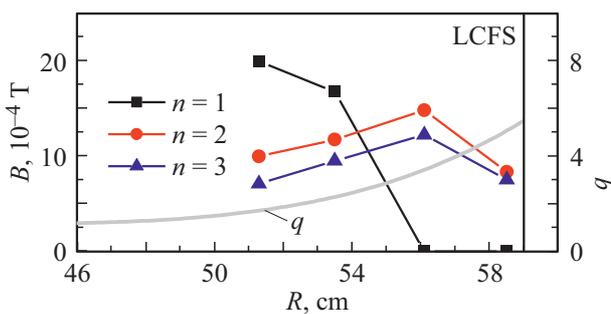


Рис. 3. Распределение амплитуд колебаний магнитного поля для различных тороидальных модовых чисел n . q — коэффициент запаса устойчивости, LCFS — последняя замкнутая магнитная поверхность, разряд токамака #36988, $I_p = 236$ кА, $t = 147.6$ ms.

сравнение амплитуд колебаний магнитного поля, измеренных с помощью магнитного зонда B_{MP} и вычисленных с использованием данных диагностики доплеровского обратного рассеяния B_{DBS} . Магнитный зонд, расположенный на радиусе $R = 62.5$ см, регистрировал колебания полоидальной составляющей магнитного поля. Результаты сравнения представлены на рис. 2. Значения, определенные с помощью периферийного магнитного зонда, оказывались меньше в силу естественного спада магнитного поля с увеличением расстояния от источника колебаний. При этом прослеживается пропорциональная зависимость между величинами магнитных полей B_{MP} и B_{DBS} .

Основное назначение многочастотного метода обратного доплеровского рассеяния заключалось в определении интенсивности альфвеновских мод одновременно на четырех радиусах, что позволяло восстановить пространственное распределение колебаний магнитного

поля для различных значений тороидального модового числа n для альфвеновских мод. В качестве примера на рис. 3 представлены распределения амплитуд одного из пучков альфвеновских колебаний, наблюдаемых в разряде #36988. Как видно из рис. 3, альфвеновские моды с тороидальными волновыми числами $n = 2$ и 3 были локализованы на периферии плазмы. Что касается колебаний с модовым числом $n = 1$, то отмечалось смещение радиального распределения амплитуд колебаний с $n = 1$ в центральную область разряда с ростом плазменного тока и уменьшением запаса устойчивости на границе плазмы.

Таким образом, многочастотное доплеровское обратное рассеяние позволило определить пространственные распределения альфвеновских мод, которые позволяют провести сопоставление с результатами численного моделирования альфвеновской неустойчивости в токамаке Глобус-М. Эксперимент указал на необходимость расширения диапазона зондирующих частот и увеличения числа каналов с целью регистрации альфвеновских колебаний в центральных областях разряда с лучшим пространственным разрешением.

Финансирование работы

Эксперименты проведены на УНУ „Сферический токамак Глобус-М“ в рамках государственного задания Минобрнауки РФ. Исследование тороидальных альфвеновских мод выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-12-01177).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Heidbrink W.W. // Phys. Plasmas. 2008. V. 15. P. 055501.
- [2] Gorelenkov N.N., Pinches S.D., Toi K. // Nucl. Fusion. 2014. V. 54. P. 125001.
- [3] Petrov Yu.V., Bakharev N.N., Gusev V.K., Minaev V.B., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Patrov M.I., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Shchegolev P.B. // J. Plasma Phys. 2015. V. 81. P. 515810601.
- [4] Буланин В.В., Гусев В.К., Курскиев Г.С., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров А.В., Петров М.А., Петров Ю.В., Тельнова А.Ю., Яшин А.Ю. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. С. 40–47.
- [5] Medvedev S.Yu., Martynov A.A., Gusev V.K., Petrov Yu.V., Patrov M.I., Tel'nova A.Yu., Ivanov A.A., Poshekhnov Yu.Yu. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. В. 2. С. 95–104.
- [6] Петров Ю.В., Бахарев Н.Н., Буланин В.В., Гусев В.К., Курскиев Г.С., Мартынов А.А., Медведев С.Ю., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров А.В., Сахаров Н.В., Щеголев П.Б., Тельнова А.Ю., Толстяков С.Ю., Яшин А.Ю. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. В. 8. С. 675–684.
- [7] Bulanin V.V., Lebedev S.V., Levin L.S., Roytershteyn V.S. // Plasma Phys. Rep. 2000. V. 26. P. 813–819.

- [8] *Hirsch M., Holzhauser E., Baldzuhn J., Kurzan B., Scott B.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2001. V. 43. P. 1641–1660.
- [9] *Conway G.D., Schirmer J., Kluge S., Suttrop W., Holzhauser E. and the ASDEX Upgrade Team* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2004. V. 46. P. 951–970.
- [10] *Hennequin P., Honoré C., Truc A., Quémeœur A., Fenzi-Bonizec C., Bourdelle C., Garbet X., Hoang G.T. and the Tore Supra Team* // Nucl. Fusion. 2006. V. 46. P. S771–S779.
- [11] *Yashin A.Y., Bulanin V.V., Petrov A.V., Petrov M.A., Gusev V.K., Khromov N.A., Kurskiev G.S., Patrov M.I., Petrov Y.V., Tolstyakov S.Y., Prisyazhnyuk D.V.* // JINST. 2015. V. 10. P. P10023.
- [12] *Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Ибляминова А.Д., Корнев В.А., Курскиев Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Щёголев П.Б., Вагнер Ф.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 24. С. 22–29.
- [13] *Melnikov A.V., Eliseev L.G., Ascasibar E., Chmyga A.A., Hidalgo C., Ido T., Jiménez-Gómez R., Komarov A.D., Kozachek A.S., Krupnik L.I., Khrebtov S.M., Könies A., Kuznetsov Yu.K., López-Fraguas A., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Nagaoka K., de Pablos J.L., Pedrosa M.A., Perfilov S.V., Smolyakov A.I., Spong D.A., Ufimtsev M.V., Yamamoto S. and the TJ-II Team* // Nucl. Fusion. 2012. V. 52. P. 123004.
- [14] *Melnikov A.V., Ochando M., Ascasibar E., Castejon F., Cappa A., Eliseev L.G., Hidalgo C., Krupnik L.I., Lopez-Fraguas A., Liniers M., Lysenko S.E., de Pablos J.L., Perfilov S.V., Sharapov S.E., Spong D.A., Jimenez J.A., Ufimtsev M.V., Breizman B.N., HIBP group and the TJ-II Team* // Nucl. Fusion. 2014. V. 54. P. 123002.