

04

Возможность измерения флуктуаций радиальной скорости плазмы в токамаке с помощью диагностики усиленного микроволнового рассеяния

© А.Д. Гурченко, Е.З. Гусаков

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

E-mail: Aleksey.Gurchenko@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 сентября 2017 г.

Предлагается идея реализации диагностики длинноволновых флуктуаций радиальной скорости плазмы в токамаке, основанной на доплеровском усиленном рассеянии на коротковолновых флуктуациях плотности, увлекаемых крупномасштабным турбулентным потоком в экваториальной плоскости токамака.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.08.45966.17028

Проблема аномального переноса плазмы в токамаке — одна из последних нерешенных фундаментальных проблем физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием. Перенос энергии и частиц в токамаке значительно превышает предсказания классической и неоклассической теорий, основанных на анализе движения заряженных частиц в неоднородном и искривленном магнитном поле токамака и их столкновений друг с другом. Согласно современным представлениям, перенос определяется дрейфовым движением частиц в случайных электрических полях, связанных с плазменной турбулентностью, возбуждаемой из-за пространственной неоднородности плотности плазмы и температур электронов и ионов. В настоящее время аномальный, турбулентный перенос энергии и частиц в плазме токамака активно исследуется как с помощью сложных гирокинетических кодов [1,2], позволяющих рассчитывать динамику многомасштабной плазменной турбулентности, так и с помощью локальных диагностик [3–5], дающих возможность непосредственно измерять турбулентные флуктуации параметров плазмы.

Среди флуктуаций параметров плазмы особый интерес представляют флуктуации плотности плазмы, электронной температуры и скорости плазмы, потому что именно эти величины определяют значения потока частиц и энергии в электронном канале, отличающемся особенно большой аномальностью.

Задача измерения скорости замагниченной плазмы применительно к низкочастотным течениям эквивалентна задаче измерения электрических полей. В случае периферийной плазмы установок с магнитным удержанием она успешно решается с помощью зондовой диагностики потенциала плазмы. Однако во внутренних областях разряда стационарные зонды не пригодны и применимы лишь подвижные, которые непросто использовать для исследования турбулентных процессов. С этой целью с успехом используются различные методики (как микроволновые, так и спектроскопические), дающие информацию о крупномасштабных низкочастотных течениях. К таким методикам относятся полоидальная корреляционная рефлектометрия [6,7] и спектроскопия атомных пучков (beam emission spectroscopy) [8], основанные на корреляционном анализе сигналов, приходящих из различных пространственных точек, и определении времени запаздывания; доплеровская рефлектометрия [5,9], основанная на измерении доплеровского частотного сдвига сигнала обратного рассеяния в точке отражения волны; диагностика доплеровского усиленного рассеяния вне экваториальной плоскости [10], базирующаяся на том же физическом принципе, но использующая рост значения полоидального волнового числа зондирующей волны в верхнем гибридном резонансе (ВГР) [11]. Следует отметить, что с помощью перечисленных диагностик измеряются скорости крупномасштабных полоидальных течений, таких как, например, зональные потоки или колебания скорости, связанные с возбуждением геодезической акустической моды.

Диагностика, позволяющая проводить измерения флуктуаций радиальных скоростей меньшего пространственного масштаба, основана на зондировании пучком тяжелых ионов (heavy ion beam probe — НИВР) [12–14]. Эта диагностика, первоначально создававшаяся для измерения распределения потенциала в плазме, использует для зондирования пучок тяжелых ионов, ускоренных до высоких энергий в несколько сотен keV. В результате вторичной ионизации (вызванной в основном столкновениями с электронами) рождается поток вторичных ионов с другим зарядом, двигающихся в магнитном поле токамака по траекто-

риям, измененным относительно исходной. Анализ энергии вторичного пучка позволяет определять не только потенциал в области столкновений, но и электронную плотность [15]. Существенным ограничением подобной диагностики является низкая локальность определения электрического поля, связанная с интегральностью потенциала, фактически определяемого на всей хорде от области вторичной ионизации до периферии плазмы. Использование щелевых анализаторов или специальных линеек детекторов (multiple cell array detector) [16] способно решить проблему измерения электрического поля с локализацией в несколько сантиметров. При этом в принципе возможно провести измерения, в том числе, и длинноволновых флуктуаций радиальных скоростей плазмы одновременно с флуктуациями плотности, а следовательно, и оценить величину турбулентного транспорта. Следует отметить, что НВР-диагностика является технически сложной и дорогостоящей из-за использования высоковольтных приборов и ионов высоких энергий. Кроме того, подобная диагностика требует организации специальных портов для инъекции быстрых ионов и анализа вторично ионизованного пучка в одном сечении установки.

Диагностика, предлагаемая в настоящей работе, не призвана полностью заменить метод НВР, а служит для проведения более локальных измерений флуктуаций радиальных скоростей в горячей плазме и в более широком диапазоне длин волн. Для реализации диагностики флуктуаций радиальной скорости плазмы предлагается использовать эффект доплеровского сдвига частоты при обратном рассеянии на флуктуациях плотности плазмы микроволнового излучения, распространяющегося вдоль радиального, а не полоидального направления. При зондировании плазмы и приеме рассеянного излучения в экваториальной плоскости вертикально симметричного разряда токамака (вдоль большого радиуса) волновой вектор флуктуаций, вносящих вклад в сигнал рассеяния назад, имеет направление вдоль малого радиуса r (радиуса плазменного шнура) и величину, равную удвоенному значению волнового числа зондирующей волны: $\kappa_r = 2k_{ir}$. Наличие у флуктуаций плотности радиальной скорости v_r , связанной с движением плазмы, приводит к появлению доплеровского частотного смещения у сигнала рассеяния

$$f_D = \frac{\kappa_r v_r}{2\pi} = \frac{k_{ir} v_r}{\pi}.$$

Соответственно флуктуации частотного сдвига будут связаны с флуктуациями радиальной компоненты скорости плазмы соотношением

$$\delta f_D = \frac{k_{ir} \delta v_r}{\pi}.$$

При длительных измерениях рассеянного сигнала случайный (флуктуационный) характер движения плазмы в радиальном направлении приводит к уширению частотного спектра. В этом случае по ширине спектра рассеяния возможно определение среднеквадратичного значения радиальной скорости. Однако при измерениях за времена, меньшие корреляционного времени турбулентности, делается возможным отслеживание временного поведения флуктуаций радиальной скорости плазмы, а также определение их корреляционного времени. Следует отметить, что в случае дрейфовой турбулентности собственная частота флуктуаций скорости, имеющих строго радиальный волновой вектор, мала, что позволяет надеяться на экспериментальное измерение именно флуктуаций скорости движения плазмы.

Заметим, что существует два серьезных ограничения предложенной методики. Первое связано с низким уровнем сечения рассеяния в традиционной постановке эксперимента, когда частота зондирующего микроволнового излучения f превосходит электронную плазменную f_{pe} и циклотронную f_{ce} частоты. Второе ограничение связано с малым значением частотного сдвига из-за малой величины флуктуаций скорости и волнового числа зондирующей волны.

Для преодоления этих ограничений предлагается организовать зондирование со стороны сильного магнитного поля волной необыкновенной поляризации, для частоты которой в плазме выполнено условие ВГР: $f^2 = f_{pe}^2 + f_{ce}^2$. В окрестности ВГР на субмиллиметровом масштабе групповая скорость зондирующей волны падает на порядок величины, а ее амплитуда соответственно резонансно возрастает. При этом резко увеличивается радиальное волновое число волны, что позволяет ей рассеиваться на флуктуациях плотности с масштабами, существенно меньшими, чем длина волны зондирующего излучения в вакууме. Совокупность этих явлений приводит к тому, что рассеяние назад происходит в очень узкой окрестности ВГР на чрезвычайно коротковолновых колебаниях плотности. При этом эффективность рассеяния превышает стандартную на несколько порядков величины, а процесс рассеяния называют усиленным [17]. Можно надеяться, что

эти обстоятельства позволят одновременно обеспечить высокую (субмиллиметровую) локальность измерений, большую величину мощности рассеянного сигнала и рекордные значения его доплеровского частотного сдвига, связанного с длинноволновыми флуктуациями радиальной скорости плазмы. Конкретное значение волнового числа флуктуаций плотности, вносящих максимальный вклад в сигнал усиленного рассеяния, необходимое для определения радиальной скорости по величине доплеровского частотного сдвига, может быть определено с помощью методики корреляционного усиленного рассеяния [18,19].

Важной особенностью усиленного рассеяния также является поведение волновых векторов зондирующей и рассеянной волн вблизи ВГР. В этой области волновые векторы направлены по нормали к поверхности ВГР. При рассеянии в экваториальной плоскости, где магнитная поверхность совпадает с поверхностью ВГР, это явление позволяет существенно уменьшить уширение спектра рассеяния назад, связанное с полоидальным вращением плазмы и конечной шириной диаграммы направленности по полоидальным волновым числам в ВГР, а также подавить вклад в доплеровский частотный сдвиг флуктуаций полоидальной скорости плазмы, в частности колебаний геодезической акустической моды, имеющих большую амплитуду. При выборе параметров зондирующего пучка основное ограничение на его ширину накладывает требование малости уширения спектра рассеяния назад, связанного с конечной угловой шириной диаграммы направленности антенны в ВГР и полоидальным вращением плазмы, по сравнению с уширением из-за флуктуаций радиальной скорости плазмы. Имея в виду то, что ширина спектра зондирующего пучка по полоидальным волновым числам $\delta k_{i\theta}$ связана с его шириной w и величиной радиального волнового числа k_{ir} соотношением [4,11,20]

$$\delta k_{i\theta} \approx k_{ir} \frac{w/2}{r[1 - R(f_{pe}^2)'_r / (2f_{ce}^2)]} \Big|_{\text{UHR}},$$

получим ограничение на ширину пучка

$$w < r [1 - R(f_{pe}^2)'_r / (2f_{ce}^2)] \Big|_{\text{UHR}} \frac{2\delta v_r}{v_\theta}, \quad (1)$$

где r и R — малый и большой радиусы ВГР (upper hybrid resonance — UHR) в экваториальной плоскости токамака, $(f_{pe}^2)'_r = \partial f_{pe}^2 / \partial r$. Отметим, что ограничение (1) может быть легко выполнено в условиях

эксперимента по усиленному рассеянию на токамаке ФТ-2, где, согласно гирокинетическим расчетам [2], флуктуации радиальной скорости плазмы сравнимы со средней величиной скорости полоидального вращения плазмы.

Уникально высокое пространственное разрешение методики усиленного рассеяния позволяет также впервые поставить вопрос об определении пространственных характеристик поля флуктуаций радиальной скорости, а именно об измерении их двухточечной корреляционной функции и определении радиальной корреляционной длины. С этой целью необходимо реализовать корреляционную диагностику усиленного рассеяния, основанную на одновременном использовании двух квадратурных схем, каждая из которых позволяет измерить амплитуду и фазу сигнала усиленного рассеяния [20]. При этом комплексный сигнал рассеяния должен измеряться на двух частотах зондирования, одна из которых перестраивается от разряда к разряду. Корреляционный анализ поведения доплеровского частотного сдвига спектров обратного рассеяния, измеренных в двух каналах, в принципе позволяет получить двухточечную корреляционную функцию флуктуаций радиальной скорости.

Резюмируя, следует отметить, что перечисленные выше благоприятные обстоятельства позволяют надеяться на создание диагностики длинноволновых флуктуаций радиальной скорости плазмы в токамаке, основанной на доплеровском усиленном рассеянии на коротковолновых флуктуациях плотности, увлекаемых крупномасштабным турбулентным потоком в экваториальной плоскости токамака.

Авторы благодарят за финансовую поддержку РФФИ (грант 16-02-00580).

Список литературы

- [1] *Leerink S., Bulanin V.V., Gurchenko A.D., Gusakov E.Z., Heikkinen J.A., Janhunen S.J., Lashkul S.I., Altukhov A.B., Esipov L.A., Kantor M.Yu., Kiviniemi T.P., Korpilo T., Kuprienko D.V., Petrov A.V.* // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. N 16. P. 165001.
- [2] *Gusakov E.Z., Altukhov A.B., Bulanin V.V., Gurchenko A.D., Heikkinen J.A., Janhunen S.J., Leerink S., Esipov L.A., Kantor M.Yu., Kiviniemi T.P., Korpilo T., Kouprienko D.V., Lashkul S.I., Petrov A.V., Teplova N.V.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2013. V. 55. N 12. P. 124034.

- [3] *Altukhov A., Gurchenko A.D., Gusakov E.Z., Esipov L.A., Irzak M.A., Kantor M.Yu., Kouprienko D.V., Lashkul S.I., Leerink S., Niskala P., Stepanov A.Yu., Teplova N.V.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2016. V. 58. N 10. P. 105004.
- [4] *Gurchenko A.D., Gusakov E.Z., Altukhov A.B., Stepanov A.Yu., Esipov L.A., Kantor M.Yu., Kouprienko D.V., Dyachenko V.V., Lashkul S.I.* // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. N 4. P. 245–250.
- [5] *Conway G.D., Scott B., Schirmer J., Reich M., Kendl A., the ASDEX Upgrade Team* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47. N 8. P. 1165–1186.
- [6] *Vershkov V.A., Shelukhin D.A., Soldatov S.V., Urazbaev A.O., Grashin S.A., Eliseev L.G., Melnikov A.V., the T-10 Team* // Nucl. Fusion. 2005. V. 45. N 10. P. S203–S226.
- [7] *Krämer-Flecken A., Soldatov S., Vowinkel B., Müller P.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. N 11. P. 113502.
- [8] *McKee G.R., Fonck R.J., Jakubowski M., Burrell K.H., Hallatschek K., Moyer R.A., Rudakov D.L., Nevins W., Porter G.D., Schoch P., Xu X.* // Phys. Plasmas. 2003. V. 10. N 5. P. 1712–1719.
- [9] *Bulanin V.V., Petrov A.V., Rozhansky V.A., Yefanov M.V.* // Proc. of the 32nd EPS Conf. on plasma physics. Europhys. Conf. Abstracts. EPS, 2005. V. 29C. P. P4.051.
- [10] *Gurchenko A.D., Gusakov E.Z., Altukhov A.B., Selyunin E.P., Esipov L.A., Kantor M.Yu., Kouprienko D.V., Lashkul S.I., Stepanov A.Yu., Wagner F.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2013. V. 55. N 8. P. 085017.
- [11] *Bulyiginskiy D.G., Gurchenko A.D., Gusakov E.Z., Korkin V.V., Larionov M.M., Novik K.M., Petrov Yu.V., Popov A.Yu., Saveliev A.N., Selenin V.L., Stepanov A.Yu.* // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. N 5. P. 2224–2231.
- [12] *Fujisawa A., Iguchi H., Sasao M., Hamada Y., Fujita J.* // Rev. Sci. Instrum. 1992. V. 63. N 7. P. 3694–3700.
- [13] *Krupnik L.I., Bondarenko I.S., Chmyga A.A., Dreval M.B., Khrebtov S.M., Komarov A.D., Kozachok A.S., Hidalgo C., Garcia-Cortes I., Rodriguez-Rodrigo L., Melnikov A.V., Goelho P., Gunha M., Goncalves B., Malaquias A., Nedzelskij I.S., Varandas C.A.F.* // Fusion Eng. Design. 2001. V. 56-57. P. 935–939.
- [14] *Melnikov A.V., Alonso A., Ascasióbar E., Balbin R., Chmyga A.A., Dnestrovskij Yu.N., Eliseev L.G., Estrada T., Fontdecaba J.M., Fuentes C., Guasp J., Herranz J., Hidalgo C., Komarov A.D., Kozachek A.S., Krupnik L.I., Liniers M., Lysenko S.E., McCarthy K.J., Ochando M.A., Pastor I., de Pablos J.L., Pedrosa M.A., Perfilov S.V., Petrov S.Yu., Tereshin V.I., TJ-II Team* // Fusion Sci. Technol. 2007. V. 51. N 1. P. 31–37.
- [15] *Melnikov A.V., Krupnik L.I., Hidalgo C., Eliseev L.G., Mavrin V.A., Perfilov S.V., Chmyga A.A., Komarov A.D., Kozachek A.S., Khrebtov S.M., Lopez J., Molinero A., de Pablos J.L., Alonso A., Barcala J.M., Lysenko S.E., Tashchev Yu.I., Zhezhera A.I.* // Proc. of the 40th EPS Conf. on plasma physics. Europhys. Conf. Abstracts. ECS, 2013. V. 37D. P. O6.505.

- [16] *Gonçalves B., Malaquias A., Nedzelskiy I.S., Pereira L., Silva C., Khrebtov S.M., Dreval N.B., Krupnik L.I., Hidalgo C., de Pablos J.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2004. V. 75. N 10. P. 3511–3513.
- [17] *Novik K.M., Piliya A.D.* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 1994. V. 36. N 3. P. 357–382.
- [18] *Gusakov E.Z., Kaganskaya N.M., Krämer M., Selenin V.L.* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2000. V. 42. N 10. P. 1033–1048.
- [19] *Gusakov E.Z., Gurchenko A.D., Altukhov A.B., Bulanin V.V., Esipov L.A., Kantor M.Yu., Kouprienko D.V., Lashkul S.I., Petrov A.V., Stepanov A.Yu.* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2006. V. 48. N 12B. P. B443– B452.
- [20] *Altukhov A.B., Gurchenko A.D., Gusakov E.Z., Esipov L.A., Selenin V.L., Stepanov A.Yu.* // *Proc. of the 30th EPS Conf. on contr. fusion and plasma physics.* *Europhys. Conf. Abstracts.* EPS, 2003. V. 27A. P. p-4.170pd.