

09;12

Исследование спектра шумов гиротрона диапазона 140 GHz для установок управляемого термоядерного синтеза

© Л.В. Лубяко, Н.К. Скалыга, А.Н. Куфтин

Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: adm@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 30 октября 2008 г.)

Обсуждаются метод измерения амплитудных шумов гиротрона с использованием в качестве режекторного фильтра интерферометра Маха–Цендера, измерительный комплекс и результаты испытаний мощного промышленного гиротрона диапазона 140 GHz. Метод позволил более чем на два порядка повысить чувствительность по сравнению с прямым детектированием. Полученные в эксперименте значения относительной спектральной плотности мощности в интервале значений частоты 50–250 MHz от центра линии составляют $7 \cdot 10^{-20} - 5 \cdot 10^{-19}$ 1/Hz.

PACS: 84.40 Ik

Введение

Использование гиротронов [1] в качестве источников зондирующего излучения при решении задач диагностики термоядерной плазмы послужило побудительным мотивом к исследованию спектра шумов этих мощных ламп. Диагностика ионной функции распределения плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС), основанная на коллективном рассеянии мощного излучения коротковолновой части миллиметрового диапазона волн на флуктуациях электронной плотности плазмы, является сравнительно новой областью применения этих ламп. Перспективность применения гиротронов в качестве источника зондирующего излучения при исследовании коллективного рассеяния в настоящее время подтверждена результатами экспериментальных исследований, выполненных на ряде установок УТС. В частности, на стеллараторе W7-AS [2] была продемонстрирована возможность диагностики ионной температуры плазмы по спектру рассеянного излучения, аналогичная задача решалась на токамаке FTU [3], а на токамаках JET [4], TEXTOR и ASDEX-Up [5] — исследована возможность диагностики функции распределения по скоростям высокоэнергичных ионов и альфа-частиц. Интерес к проблемам диагностики по коллективному рассеянию поддерживается планами, связанными с проектом экспериментального термоядерного реактора ITER [6].

Возникающие при регистрации спектров коллективного рассеяния проблемы в основном связаны с крайне малой величиной коэффициента рассеяния, особенно для рассеяния на тепловых флуктуациях электронной плотности плазмы. Для типичных параметров термоядерной плазмы установок УТС он не превышает $10^{-23} - 10^{-22}$ 1/Hz. Это требует использования мощного источника зондирующего излучения и чувствительного приемника. В ранних экспериментах по регистрации спектров коллективного рассеяния [7], показавших воз-

можность измерения таким способом ионной температуры плазмы, использовался мощный импульсный D₂O-лазер на длине волны 385 μm. Тем не менее этого оказалось недостаточно, чтобы при существующих ограничениях чувствительности, связанных с малой длительностью импульса, обеспечить отношение сигнал–шум, необходимое для приемлемой точности измерений.

С момента появления гиротронов многих исследователей привлекала возможность использования столь мощных источников излучения в системах диагностики плазмы, основанных на коллективном рассеянии. Гиротроны в этой задаче обладают существенными преимуществами перед лазерами. Они полностью отвечают требованиям к мощности и длительности импульса зондирующего излучения. Кроме того, они позволяют перевести измерения в коротковолновую часть миллиметрового диапазона волн, что при типичных для существующих установок параметрах плазмы практически снимает ограничения на диапазон углов, при которых рассеяние носит коллективный характер.

Использование гиротронов в качестве источников зондирующего излучения в диагностике плазмы, основанной на регистрации спектров рассеянного излучения, выдвинуло новые, более строгие, чем предъявляемые в случае электронно-циклотронного нагрева плазмы, требования к спектральным характеристикам этих ламп. Требования к стабильности частоты генерации и ширине генерируемой линии, определяющим возможное спектральное разрешение и точность измерений, очевидны. Влияние шумов источника зондирующего излучения и требования к их уровню, возникающие в связи с тем, что шумовое излучение в крыльях линии генерации попадает в область локализации спектра исследуемого сигнала из-за связи (не обусловленной рассеянием в плазме) излучающей и приемной антенн, специфичны для данной задачи. В неблагоприятном случае шумы источника могут внести искажения в исследуемый спектр коллективного рассеяния и ухудшить соотношение сигнал–шум.

Несмотря на предыдущие попытки исследования спектра шумов гиротрона [8,9], по-видимому, только в ходе экспериментов по коллективному рассеянию стала ясна важность текущего контроля спектральных характеристик выходного излучения гиротрона в процессе измерений [2,10]. Такой контроль позволяет избежать ошибок, связанных с наличием аномалий в спектре зондирующего излучения. В частности, он позволяет выявить влияние отражений сигнала от плазмы в тракт лампы на режим (и, следовательно, спектр) генерации гиротрона, которое наблюдалось рядом авторов [11,12]. Избежать такого влияния полностью в реальных условиях невозможно, так как невзаимные устройства (ферритовые вентили и циркуляторы), способные работать при столь высокой мощности излучения, отсутствуют.

В связи с интересом к характеристикам гиротрона как источника зондирующего излучения в системах диагностика термоядерной плазмы представляется целесообразным обсудить эксперимент, в котором были выполнены измерения шумов гиротрона с использованием интерферометра Маха–Цендера в качестве режекторного фильтра [8]. Эксперимент предусматривал исследование коллективного рассеяния на равновесных флуктуациях электронной плотности термоядерной плазмы с использованием мощных гиротронов, проводившиеся на стеллараторе W7-AS [2,10]. Созданные методика и измерительный комплекс позволили провести исследования спектра шумов промышленного гиротрона 140 GHz/0.5 MW (НПП „Гиком“, ИПФ РАН) [13], разработанного для электронно-циклотронного нагрева в установках УТС.

1. Наблюдение коллективного рассеяния и шумы гиротрона

Исследуемый сигнал в случае коллективного рассеяния на тепловых флуктуациях плотности электронов [14] представляет собой узкополосный (менее 1% от частоты зондирующего сигнала) шум. Форма спектра зависит от значений электронной и ионной температур плазмы, ее ионного состава, а также геометрии, при которой наблюдается рассеяние. В частности, при частоте зондирующего сигнала 140 GHz ширина спектра для рассеяния на ионной компоненте тепловых флуктуаций электронной плотности водородной плазмы и условий, типичных для средних по характеристикам установок УТС, может достигать 800 MHz.

Проблема шумов гиротрона в экспериментах по коллективному рассеянию возникает в связи с существованием „паразитного“ сигнала. В условиях, когда рассеивающий объект находится внутри металлической камеры, а среда прозрачна, связь между приемной и передающей антеннами трудно сделать сколь угодно малой. Часть мощности зондирующего излучения попадает на вход приемника „паразитным“, не связанным с рассеянием в плазме, путем.

Спектр сигнала генератора (см., например, [15]) можно представить в виде резонансной линии и шумового пьедестала. Ширина линии в основном определяется медленными „техническими“ уходами частоты, а пьедестал образован суммарным вкладом „естественных“ амплитудных и фазовых флуктуаций. Естественные флуктуации, являющиеся быстрыми, но слабыми, вызваны дробовым шумом и тепловым разбросом скоростей электронного пучка. Их вклад становится доминирующим в „крыльях“ линии генерации при достаточном удалении от ее центра. Энергонесущая часть спектра „паразитного“ сигнала сосредоточена в сравнительно узкой области частот, определяемой шириной линии генерации, и может быть подавлена с помощью селективного фильтра до уровня, когда ее влияние на работу приемника несущественно. А вот шумы лампы в „крыльях“ линии генерации попадают в область значений частоты, где локализован спектр сигнала, рассеянного на тепловых флуктуациях плотности плазмы. Они не могут быть отфильтрованы и по существу увеличивают шумы приемной системы. Так как значение рассеянного сигнала весьма мало, то шумы источника зондирующего излучения могут оказывать существенное влияние на точность измерений. Уровень шумов гиротрона определяет требования к развязке антенн.

Из расчета шумов МЦР-монотрона, обусловленных дробовыми шумами, выполненного в [16], следует, что в нашем случае в достаточно удаленной от центра линии генерации области частот относительная спектральная плотность мощности флуктуаций амплитуды составляет около $3 \cdot 10^{-22}$ 1/Hz. Определяемый этими шумами уровень является минимальным, и для гиротрона с мощностью 500 kW в достаточно удаленной от центра линии области частот спектральная плотность мощности шума составит $1 \cdot 10^{-17}$ W/Hz. При столь высоком уровне шумов источника измерение с отношением сигнал–шум не менее 100 спектральной плотности мощности рассеянного плазмой излучения, лежащей в интервале $1 \cdot 10^{-19}$ – $5 \cdot 10^{-18}$ W/Hz, требует развязки антенн не менее 40 dB.

2. Особенности измерения шумов гиротрона

На первый взгляд, задача измерения шумов столь мощного генератора не выглядит сложной. Чувствительность радиометров — приемников, предназначенных для измерения слабых шумовых сигналов, — в данном диапазоне существенно менее $1 \cdot 10^{-19}$ W/Hz, а уровень спектральной плотности мощности шума достигает $1 \cdot 10^{-17}$ W/Hz и более. Необходимо только перенести исследуемый спектр излучения лампы в область более низких (промежуточных) частот, где легко организовать спектральный анализ с требуемым временным и частотным разрешением. В частности, такое преобразование

можно осуществить с помощью простейшего квадратичного детектирования.

Представим сигнал генератора $z(t)$ в виде квазимонохроматического колебания с амплитудой B_0 и частотой f_0 :

$$z(t) = R_0(1 + \alpha(t)) \cos 2\pi \left(f_0 t + \int_0^t v(\vartheta) d\vartheta \right),$$

где шумы проявляются в виде очень малой шумовой модуляции амплитуды и частоты, так что $\alpha(t) \ll 1$, $\langle \alpha(t) \rangle = 0$ и $v(\vartheta) \ll f_0$. На выходе квадратичного детектора после усреднения за время, много большее периода несущей, но меньшее характерных значений времени шумовой модуляции, получим переменную составляющую напряжения:

$$u_{\sim} = GR_0\alpha(t),$$

которая несет в себе информацию о спектре флуктуаций амплитуды (G — коэффициент, характеризующий эффективность преобразования).

Квадратичное детектирование сигнала генератора можно интерпретировать как гетеродинное преобразование с равной нулю промежуточной частотой. Несущая (составляющая на частоте f_0) играет роль гетеродинного сигнала, а спектр преобразованного сигнала представляет собой сумму составляющих спектра амплитудных шумов, расположенных симметрично относительно несущей. Информация о флуктуациях частоты при этом теряется.

Существенным недостатком, ограничивающим чувствительность таких измерений, является необходимость уменьшения мощности исследуемого сигнала до „гетеродинного“ уровня, определяемого динамическим диапазоном преобразователя частоты. В частности, для полупроводникового смесителя на диоде Шоттки, чтобы не выйти из области квадратичности, сигнал необходимо уменьшить до 5–10 mW, т.е. на семь порядков. Соответственно при этом и исследуемый шум упадет до уровня 10^{-24} W/Hz, который ниже чувствительности приемника.

Необходимого увеличения чувствительности по сравнению с простейшим детектированием можно добиться с помощью селективной фильтрации, позволяющей ослабить сигнал лишь на центральной частоте линии генерации, без внесения потерь в области частот, где локализован спектр шумов. Такое изменение соотношения между спектральной плотностью мощности шума и мощностью на частоте генерации при значительном запасе мощности источника излучения позволяет существенно повысить уровень исследуемого сигнала без искажения работы смесителя.

3. Интерферометр Маха—Цендера как фильтр

В созданной для исследования шумов гиротрона установке в качестве режекторного фильтра использован интерферометр Маха—Цендера. Сконструированные на базе сверхразмерных волноводов интерферометры, отличающиеся малыми потерями, широко применялись и как диплексеры, и как фильтры с заданными свойствами в разработках приемников коротковолновой части миллиметрового диапазона волн (см., например, [17]). Наш выбор был предопределен предыдущим опытом и возможностью использования уже имевшихся конструкций.

Интерферометр Маха—Цендера является двухканальным (рис. 1) и имеет два входа — 1, 2 и два выхода — 3, 4. В нем используются два квазиоптических ответвителя с диэлектрическими (слодяными) делительными пластинками, установленными под углом 45° к оси волновода (квазиоптический аналог двойного-T). С помощью первого поступающее с одного из входов излучение делится на две волны, направляемые в волноводные каналы разной длины, соединяющие выходы первого ответвителя с входами второго. Второй ответвитель служит для сложения этих волн. Коэффициенты передачи интерферометра K_{ij} со входа i на выход j зависят от разности хода интерферирующих волн и в случае их равной интенсивности имеют вид:

$$K_{13} = \frac{1}{2} (1 + \cos 2\pi f \tau),$$

$$K_{14} = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\pi f \tau),$$

$$K_{13} = K_{24} \quad K_{14} = K_{23} \quad K_{13} + K_{14} = 1,$$

где f — частота, τ — задержка, вызываемая неравенством длин каналов интерферометра.

Подобрав длину одного из каналов интерферометра, можно получить требуемую периодичность в частотной зависимости коэффициента передачи. Секционная конструкция интерферометра позволяла варьировать разность хода в широких пределах, а для точной подстройки в пределах нескольких полуволн использовался V-образный поршень (рис. 1). В частности, при $\tau = 1/2F$ интерферометр позволяет просуммировать на

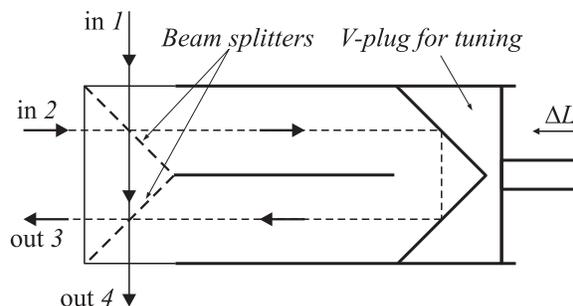


Рис. 1. Схема интерферометра Маха—Цендера на сверхразмерных волноводах.

общем выходе два поданных на разные входы сигнала с отличающимися на F частотами. В нашем случае задержка в одном из каналов выбрана такой, чтобы обеспечить максимум коэффициента передачи для шумов в области частот, отстоящих на 100–140 МГц от центра линии генерации гиротрона, при минимуме коэффициента передачи и соответственно ослаблением сигнала гиротрона на центральной частоте.

При использовании интерферометра Маха–Цендера в качестве режекторного фильтра применялась зависимость глубины интерференционного минимума от соотношения значений интенсивности интерферирующих волн. Квазиоптический ответвитель позволял подбором толщины пластинки изменять коэффициент деления и таким образом добиваться, чтобы ослабление сигнала на частоте гиротрона в интерференционном минимуме составляло 20–25 дБ. Уменьшение коэффициента передачи в максимуме интерференции при этом было незначительным, и исследуемый шум практически не ослаблялся. Выбранная величина глубины режекции, по существу, определяла возможность увеличения мощности шумов, подаваемой в измерительную часть, и соответствующее увеличение чувствительности установки.

4. Описание установки

Измерительный комплекс (рис. 2) включал в себя исследуемый гиротрон, радиометрический приемник-анализатор спектра и регистрирующую аппаратуру. Гиротрон был размещен в металлическом экранном боксе. Приемник и регистрирующая аппаратура размещались вне бокса на удалении, достаточном, чтобы снизить до приемлемой величины влияние магнитного поля рассеяния криомагнита лампы на работу аппаратуры.

Измерения проводились с промышленным гиротроном 140 GHz/0.5 MW/1 s (НПП „Гиком“, ИПФ РАН), разработанным для электронно-циклотронного нагрева плазмы в установках УТС [13]. Из-за ограничений, связанных с высоковольтным источником питания, в данном эксперименте было возможен лишь короткоимпульсный режим работы, и исследуемый сигнал представлял собой последовательность импульсов с длительностью 100 μ s и частотой повторения 10 Hz.

Основная часть излучения гиротрона, сформированного в виде гауссова пучка, поступала в согласованную нагрузку, расположенную внутри экранированного бокса. Часть мощности, необходимая для измерения, отвечалась с помощью тонкой диэлектрической пластинки, размещенной в пучке под углом 45°, регистрировалась с помощью рупорной антенны и по волновому тракту поступала на вход измерительной системы. В СВЧ-тракте использовались сверхразмерные волноводы, что позволяло снизить потери до нескольких дБ при общей длине тракта около 2 м. Для регулировки мощности, поступающей на вход приемной системы, использовались 2 аттенюатора: квазиоптический призмный аттенюатор

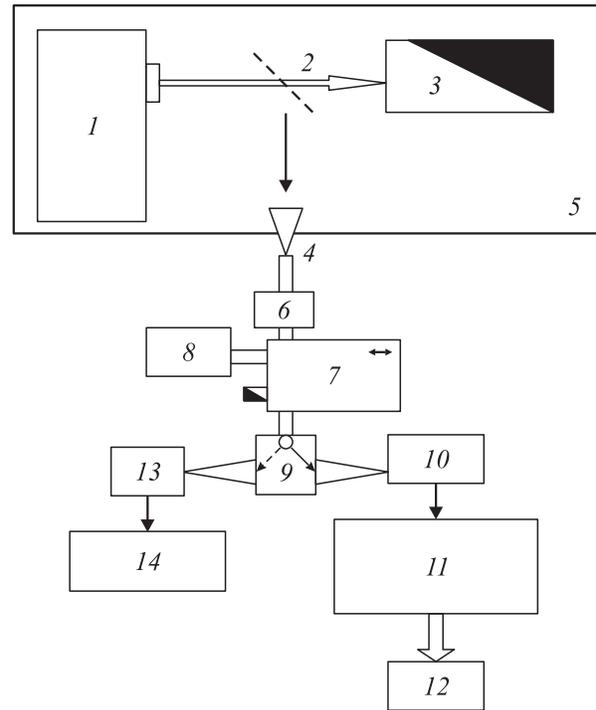


Рис. 2. Блок-схема комплекса для измерения относительной спектральной плотности мощности амплитудных шумов гиротрона: 1 — гиротрон 140 GHz, 500 kW, 2 — ответвитель 1/1000, 3 — согласованная нагрузка, 4 — рупорная антенна, 5 — экранированный бокс, 6 — аттенюатор, 7 — интерферометр Маха–Цендера с подстройкой разности хода, 8 — генератор шума (ГШ), 9 — волноводный переключатель на две позиции, 10 — смеситель и ПУПЧ, 11 — 10-канальный анализатор спектра ПЧ, 12 — регистрирующее устройство, 13 — детектор, 14 — осциллограф.

на сверхразмерном волноводе с регулируемым ослаблением от 0 до 25 дБ (на схеме не показан) и градуированный аттенюатор с пределами регулировки ослабления 0–50 дБ. Первый, более грубый, можно использовать на высоком уровне мощности. Он был необходим, чтобы снизить мощность от десятков до десятых долей ватт, а второй аттенюатор — прецизионный, по существу, являлся измерительным. С его помощью поддерживался постоянный уровень гетеродинной мощности при измерении и калибровке, что обеспечивало точное измерение вносимого интерферометром ослабления. Далее следовал радиометр-анализатор спектра.

Радиометр-анализатор спектра включал в себя преобразователь частоты и анализатор спектра промежуточной частоты. В преобразователе использовался интерферометр Маха–Цендера, который выполнял две функции: режекторного фильтра (при измерении) и диплексера (при калибровке). При измерении шумов разность хода интерферирующих волн в интерферометре Маха–Цендера составляла ~ 1.5 м, что обеспечивало передачу без ослабления на выход сигнала на частоте, отстоящей на 125 МГц от центра линии гиротрона

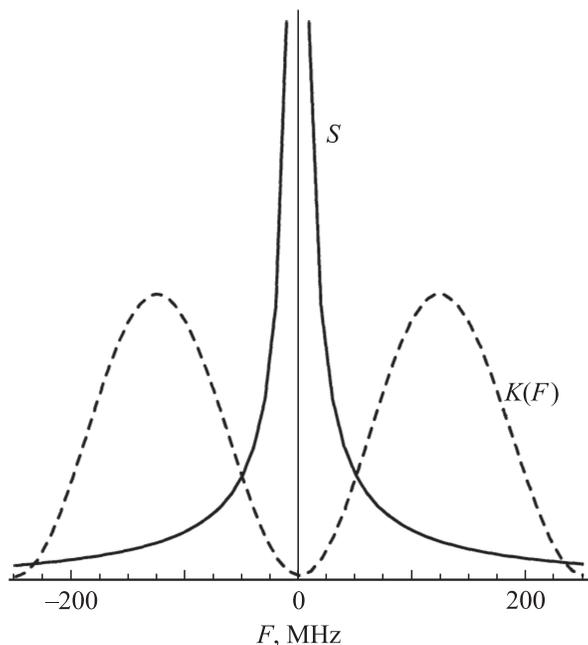


Рис. 3. Положение спектра сигнала гиротрона (сплошная линия) относительно частотной характеристики интерферометра (пунктир) при измерении шумов.

(рис. 3), тогда как сигнал на центральной частоте ослаблялся на 20–25 dB. Полоса анализа спектра шумов при этом составляла 50–170 MHz.

Сигнал промежуточной частоты с выхода смесителя после предварительного усиления поступал на анализатор спектра, выполненный с использованием системы параллельных селективных каналов. Каждый из каналов содержит в себе узкополосный фильтр, квадратичный детектор, видеодетектор, видеоусилитель, интегрирующее звено и усилитель постоянного тока. Фильтры каналов были настроены на частоту 50, 65, 80, 90, 110, 125, 140, 155, 170, 250 MHz. Ширина полосы у всех фильтров была одинаковой — 12 MHz.

В приемнике проводилось стробирование сигнала, что позволяло выбором длительности и положения строба исключить влияние переходных процессов на фронте и спаде импульса. Стробирование осуществлялось как на промежуточной частоте с помощью электрически управляемого $p-i-n$ -аттенюатора, так и на низкой частоте в детекторе огибающей системы выборки и хранения информации. Управление стробом, а также работа системы выборки и хранения синхронизировались с запуском гиротрона. После усреднения и усиления сигналы всех десяти каналов регистрировались на многоканальном самописце.

Для измерения мощности анализируемого сигнала использовался предварительно прокалиброванный детектор. Этот детектор по мере необходимости с помощью волноводного переключателя подключался на выход интерферометра. Кроме того, на второй вход интерферометра был включен газоразрядный генератор

шума с температурой шума 4200 K, использовавшийся при калибровке радиометра.

Чувствительность каждого из каналов радиометра-анализатора спектра представляет собой минимальное обнаружимое приращение температуры антенны ΔT_{\min} , которое определяется как шумами приемной системы, так и „радиометрическим выигрышем“, связанным с усреднением сигнала после детектирования:

$$\Delta T_{\min} = \frac{2T_{\text{noise}}}{\sqrt{\Delta f_i \tau_{RC}}}.$$

Здесь T_{noise} — шумовая температура приемной системы, Δf_i — ширина полосы приемного канала и τ_{RC} — постоянная времени интегрирующей цепочки, включенной после квадратичного детектора. Если измеряемый сигнал усреднить по N импульсам, то можно получить дополнительный выигрыш в \sqrt{N} раз. В нашем случае (при шумовой температуре приемника 5000 K) с учетом проводившегося усреднения по нескольким десяткам импульсов чувствительность составляла ~ 100 K (10^{-21} W/Hz).

5. Процедура измерений и полученные результаты

Измерение амплитудных шумов гиротрона включало в себя две операции: калибровку приемника и собственно измерение шумов. При калибровке интерферометр использовался как диплексер. Он настраивался так, чтобы обеспечить максимум коэффициента передачи сигнала на центральной частоте линии гиротрона, играющего роль гетеродинного сигнала, на смеситель. При этом калибровочный сигнал генератора шума со второго входа интерферометра поступал на смеситель также без дополнительного ослабления. Гетеродинный уровень (5 mW) сигнала гиротрона устанавливался введением дополнительного ослабления ~ 25 dB с помощью прецизионного аттенюатора. На такое же значение уменьшался и вклад шумов гиротрона в шум приемника.

Собственно измерение шумов гиротрона проводилось при настройке интерферометра на минимум коэффициента передачи на частоте генерации (изменением разности времен задержки) с одновременным уменьшением аттенюации на входе для того, чтобы поддержать неизменным уровень „гетеродинного“ сигнала. Уровень мощности измеряемых шумов гиротрона при этом возрастал пропорционально уменьшению ослабления аттенюатора, т. е. на 23–25 dB. Это и был выигрыш по сравнению с прямым детектированием.

Относительная спектральная плотность мощности флуктуаций амплитуды $S(F_i)$ находилась из соотношения

$$S(F_i) = \eta \frac{u_{3i} - u_{1i}}{u_{2i} - u_{1i}} \frac{kT_{\text{noise}}}{P_0}.$$

Здесь F_i — частота i -го канала анализатора спектра; P_0 — мощность, поступающая на смеситель, измеренная детектором; u_{1i} — отклик i -го канала анализатора

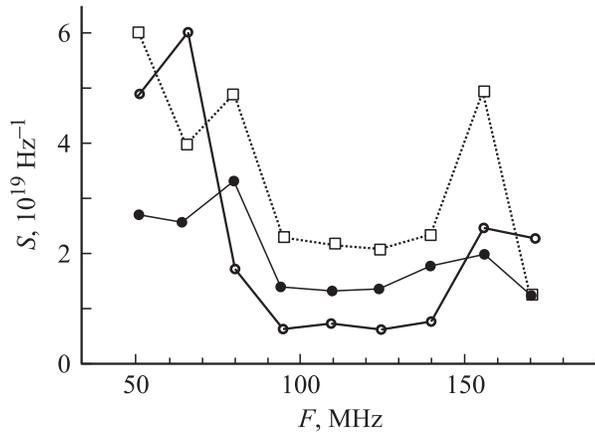


Рис. 4. Относительная спектральная плотность мощности флуктуаций амплитуды гиротрона (три серии измерений).

спектра при настройке интерферометра на максимум коэффициента передачи на частоте генерации, что соответствует уровню собственных шумов приемника; u_{2i} — отклик i -го канала анализатора спектра при включении шумового генератора; u_{3i} — отклик i -го канала анализатора спектра при настройке интерферометра на минимум коэффициента передачи на центральной частоте; η — разница ослабления аттенюатора при настройке интерферометра на максимум и минимум; k — постоянная Больцмана.

Точность измерений величины u_{ji} определялась упомянутой выше чувствительностью радиометра-анализатора спектра 10^{-21} W/Hz, а систематическая погрешность измерения P_0 — использовавшимся для калибровки детектора измерителем мощности, и не превышала 50%. Ошибки, связанные с дрейфом частоты гиротрона (5 MHz за 60 μ s) и соответственно модуляцией мощности сигнала при прохождении через интерференционный минимум, были меньше 15%.

В эксперименте было проведено около десяти серий измерений относительной спектральной плотности мощности амплитудных шумов при различных режимах работы гиротрона. Полученные в эксперименте значения $S(F)$ укладываются в интервал $7 \cdot 10^{-20} - 5 \cdot 10^{-19}$ 1/Hz. Усредненный по всем измерениям спектр амплитудных флуктуаций получился практически плоским со значением $\sim 2 \cdot 10^{-19}$ Hz. Зависимость $S(F)$ от уровня выходной мощности была слабой и имела тенденцию увеличиваться лишь при значительном росте генерируемой мощности.

На рис. 4 приведены некоторые из спектров, полученные при режиме работы гиротрона, близком к оптимальному по КПД. Для $S(F)$ характерен минимум в области частот 90–140 MHz, где достигался максимум коэффициента передачи интерферометра для шумов и соответственно точность измерений была максимальной. Наблюдавшийся на краях полосы анализа рост относительной спектральной плотности мощности флукту-

аций отчасти мог быть следствием уменьшения там коэффициента передачи интерферометра, что приводило к уменьшению доли амплитудных шумов гиротрона в измеряемом сигнале и соответственно, увеличению ошибки измерений. Также возможно, что такой вид спектра связан с влиянием частотных флуктуаций, которые могут иметь техническое происхождение. Преобразование частотных шумов в амплитудные возможно лишь на участках, где коэффициент передачи интерферометра существенно меняется с частотой (интерферометр играет роль дискриминатора), и отсутствует при его постоянстве [15]. Подробно причины такой формы спектра исследованы не были.

Полученные экспериментальные значения относительной спектральной плотности мощности амплитудных шумов гиротрона больше чем на два порядка превышают результаты численных расчетов для МЦР-модотрона с моноскоростным электронным пучком [16] (поле пространственного заряда слабoreлятивистского пучка не учитывается, структура поля рабочей TE-моды — фиксированная). Существенное расхождение расчетных и экспериментальных значений обусловлено, по видимому, влиянием низкочастотных колебаний пространственного заряда и потенциала в электромагнитном пучке [18–20], вызванных захватом части частиц в адиабатическую магнитную ловушку, не учитываемого при численном моделировании. Нельзя исключить в данном диапазоне частот и возможный вклад шумов, имеющих техническое происхождение [2,21,22].

Заключение

Представленные в данной работе измерительный комплекс и методика измерения позволили впервые получить информацию об амплитудных шумах гиротронов в „крыльях“ линии генерации. Полученные в работе экспериментальные данные об относительной спектральной плотности мощности флуктуаций амплитуды промышленного 140 GHz/0.5 MW/1 s гиротрона на уровне $2 \cdot 10^{-19}$ 1/Hz, безусловно, имели в первую очередь практическое значение. Они использовались при обосновании возможности экспериментального исследования спектров коллективного рассеяния на тепловых флуктуациях плотности плазмы в установках УТС. В частности, они позволили считать, что наблюдения рассеяния возможны, если будет обеспечена развязка между приемной и передающей антеннами не менее 50 dB, что позднее подтвердилось в экспериментах на стеллараторе W7-AS [2,14].

В заключение авторы хотели бы выразить благодарность А.Г. Шалашову за ряд полезных замечаний, сделанных в процессе подготовки статьи.

Список литературы

- [1] Денисов Г.Г., Запевалов В.Е., Литвак А.Г., Мясников В.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. XLVI. № 10. С. 845–858.
- [2] Suvorov E.V., Erckmann V., Lubyako L.V. et al. // Plasma Phys. & Control. Fusion. 1995. Vol. 37. N 11. P. 1207–1213.
- [3] Orsitto F., Brusadin A., Brodsky Yu., Lubyako L.V. et al. // Rev. of Sci. Instrum. 1999. Vol. 70. N 1. P. 1158–1161.
- [4] Hoekzema J.A., Bindslev H., Egedal J. et al. // Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. Contributed Papers, 4–7 Bournemouth. 1995. Pt 2. P. 445–448.
- [5] Korsholm S.B., Bindslev H., Meo F. et al. // Rev. of Sci. Instrum. Vol. 77. P. 10E514.
- [6] Bindslev H., Meo F., and Korsholm S. ITER Fast Ion Collective Thomson Scattering Feasibility Study. Annex 1, Riso Lab. Report under EFDA Contract 01.654. November 2003.
- [7] Behn R., Dicken D., Hackmann J. et al. // Phys. Rev. Lett. 1989. Vol. 62. N 24. P. 2833–2836.
- [8] Лубяко Л.В., Лучинин А.Г., Нусинович Г.С., Скалыга Н.К., Суворов Е.В., Фрайман А.А. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 2. С. 211.
- [9] Лубяко Л.В., Куфтин А.Н., Скалыга Н.К. // Тез. докл. конф. „Приборы, техника и распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн“. Харьков, 1992. С. 35.
- [10] Suvorov E.V., Kasperek W., Lubyako L.V., Skalyga N.K., Erckmann V., and Laqua H. // Proc. 3rd Int. Symp. „Physics and engineering of millimeter and sub millimeter waves“. Kharkov, 1998. Vol. 1. P. 188–190.
- [11] Батанов Г.М., Колик Л.В., Новожилова Ю.В. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 5. С. 90–95.
- [12] Tartari U., Grosso G., Granucci G., Lubyako L.V. et al. // Nucl. Fusion. 2006. Vol. 46. P. 928–940.
- [13] Alikaev V.V., Denisov G.G., Flyagin V.F. et al. // Proc. 19th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves. Sendai, ISAP. 1994. P. 79–80.
- [14] Шеффильд Дж. Рассеяние электромагнитного излучения в плазме. М.: Атомиздат, 1978.
- [15] Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М.: Наука, 1968.
- [16] Ергаков В.С., Моисеев М.А., Шапошников А.А. // Радиотехника и электроника, 1977. Т. 22. Вып. 10. С. 2154–2161.
- [17] Дрягин Ю.А., Кукин Л.М., Лубяко Л.В. // Радиотехника и электроника. 1974. Т. 19. № 8. С. 1779–1780.
- [18] Ran Y., Antonsen T.M., and Nusinovich S.S. // Phys. Plasmas 2008. Vol. 15. P. 103 102.
- [19] Мануилов В.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. LIX. № 10. С. 872–879.
- [20] Калинин Ю.А., Кожневников В.Н., Лазерсон А.Г. и др. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 7. С. 83–91.
- [21] Глявин М.Ю., Запевалов В.Е. // Изв. вузов. Радиотехника. 1998. Т. XLI. № 10. С. 1348–1357.
- [22] Глявин М.Ю., Запевалов В.Е., Куфтин А.Н., Лучинин А.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. XLIII. № 5. С. 440–444.