

04;09;12

Система измерения спектров коллективного рассеяния для диагностики термоядерной плазмы

© Л.В. Лубяко, Е.В. Суворов, А.Б. Буров, А.М. Штанюк, Ю.А. Дрягин, Л.М. Кукин, Н.К. Скалыга

Институт прикладной физики РАН,
603600 Нижний Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 6 мая 1997 г.)

Обсуждаются схема и конструкция приемной системы для регистрации спектров, разработанной для исследований коллективного томсоновского рассеяния в плазме с использованием гиротрона 140 GHz в качестве источника зондирующего излучения. Приведены методика измерений и примеры полученных результатов.

Как хорошо известно (см., например, [1,2]), спектры флуктуаций электронной плотности, частоты ω и волновые числа k которых связаны соотношением

$$\omega \cong kv_i, \quad (1)$$

где v_i — характерные скорости ионов, несут информацию об ионной функции распределения.

Широко распространенным методом исследования характеристик плазменной турбулентности (и спектров флуктуаций электронной плотности, в частности) является коллективное рассеяние на ней монохроматического зондирующего излучения. При коллективном рассеянии выполняются хорошо известные резонансные условия

$$\omega_s = \omega_i + \omega_p, \quad \mathbf{k}_s = \mathbf{k}_i + \mathbf{k}_p, \quad (2)$$

где ω_i , \mathbf{k}_i , ω_p , \mathbf{k}_p и ω_s , \mathbf{k}_s — частоты и волновые векторы зондирующего излучения, плазменной турбулентности и рассеянного излучения соответственно.

Поэтому пространственно-временные спектры рассеянного излучения несут информацию о спектрах плазменной турбулентности. Чтобы спектр рассеянного сигнала определялся резонансными соотношениями (2), необходимо, чтобы так называемый параметр Солпитера значительно превышал единицу

$$1/k_p^2 r_d^2 \gg 1, \quad (3)$$

где r_d — электронный дебаевский радиус.

Соотношения (2), (3) определяют допустимую геометрию коллективного рассеяния при известной частоте источника зондирующего излучения, а соотношение (1) при выбранной геометрии рассеяния и ожидаемых параметрах ионной компоненты плазмы определяет необходимый частотный диапазон спектрального анализа. Проблемы диагностики ионной функции распределения (и, в частности, ионной температуры) методом коллективного рассеяния на протяжении многих лет обсуждались в литературе [1–8]. Главная трудность здесь обусловлена чрезвычайно малой величиной коэффициента рассеяния на равновесных флуктуациях, который для типичных условий термоядерной плазмы не превышает 10^{-23} 1/Hz.

Это заставляет использовать мощный источник зондирующего излучения и достаточно чувствительный приемник.

Исторически продвижение в экспериментальных исследованиях ионной функции распределения связано с развитием мощных источников излучения, лидерство среди которых долгое время оставалось за оптическими и инфракрасными лазерами. Однако для оптических источников условие (3) выполнимо лишь для очень малых углов рассеяния (практически это рассеяние вперед), что сильно затрудняет измерения спектров коллективного рассеяния и их интерпретацию. Хорошие результаты по локальным измерениям ионной температуры получены с использованием D₂O лазера (385 μm , 0.5 J при длительности импульса 1.4 μs) в качестве источника зондирующего излучения [4]. Тем не менее ограниченная длительность импульса делает использование этого источника весьма проблематичным для такого важного приложения как диагностика альфа-частиц в термоядерной плазме, когда уровень рассеянного сигнала понижается еще на несколько порядков. В связи с этим довольно перспективным представляется миллиметровый диапазон, в котором разработаны достаточно мощные генераторы (гиротроны), используемые для электронно-циклотронного нагрева в квазинепрерывном режиме работы. Это позволяет надеяться на значительное увеличение отношения сигнал/шум за счет усреднения по достаточно большому времени измерения [5].

В настоящей работе представляется система измерения спектров коллективного рассеяния, разработанная в ИПФ РАН и предназначенная для работы в комплексе с гиротроном, обеспечивающим мощное зондирующее излучение на частоте 140 GHz. Система предназначена для использования в установках УТС среднего размера (конкретно имеются в виду стелларатор W7-AS — Гархинг, Германия и токамак FTU — Фраскати, Италия) с ионной температурой от нескольких сотен eV до единиц keV. Диапазон спектрального анализа позволяет регистрировать спектры коллективного рассеяния на тепловых флуктуациях плотности в водородной или дейтериевой плазме в различных геометриях (интервал углов рассеяния от 60 до 180°).

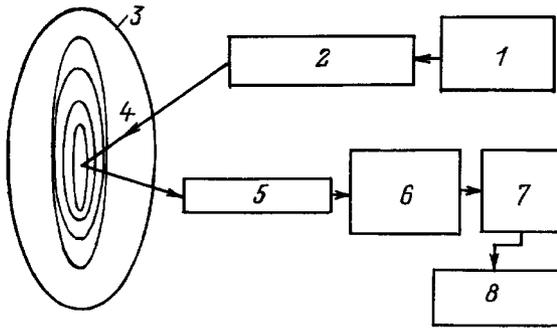


Рис. 1. Блок-схема измерительного комплекса коллективного рассеяния: 1 — гиротрон, 2 — линия высокого уровня мощности, 3 — вакуумная камера, 4 — плазма, 5 — волноводная линия низкого уровня мощности, 6 — высокочастотная часть приемника, 7 — анализаторы спектра промежуточной частоты, 8 — система цифровой обработки.

Комплекс коллективного рассеяния включает в себя (рис. 1) источник мощного зондирующего излучения — гиротрон, линию передачи мощного зондирующего излучения, приемно-передающую антенную систему, определяющую геометрию рассеяния и позволяющую в принципе менять положение рассеивающего объема внутри плазменного шнура, линию передачи рассеянного излучения, а также приемную систему регистрации спектров и систему сбора, накопления и обработки данных.

Требования к приемной системе

Основные требования к приемной системе диктуются прежде всего ожидаемыми характеристиками рассеянного сигнала. Отсылая за подробностями к литературе [1,2], отметим, что исследуемый сигнал в случае рассеяния на тепловых флуктуациях представляет собой шум, спектр которого расположен в ограниченной полосе частот и симметричен относительно частоты зондирующего излучения. Форма спектра зависит от геометрии рассеяния, газового состава плазмы, ее плотности, электронной и ионной температур. Ширина спектра максимальна для водорода при рассеянии, близком к обратному. При температурах порядка нескольких keV верхняя граничная частота составляет ≈ 1 GHz для водородной плазмы, что задает требуемую полосу анализа приемной системы. Величина рассеянного сигнала, перехватываемого приемной антенной, в зависимости от геометрии рассеяния и параметров плазмы меняется в пределах от нескольких десятков до сотен eV [8–10]. Это не требует сверхвысокой чувствительности приемной аппаратуры и позволяет, используя супергетеродинную схему приема, обеспечить широкий динамический диапазон величин измеряемых сигналов при адекватном спектральном разрешении.

Следует, однако, иметь в виду, что реально чувствительность приемной системы может быть ограничена внешними факторами, такими как паразитное попадание

какой-то части мощного зондирующего излучения на вход приемной антенны [9], а также собственное циклотронное излучение плазмы. Тепловое циклотронное излучение плазмы, как правило, по величине превышает ожидаемый уровень рассеянного сигнала, но его вклад может быть снижен до единиц eV, если магнитное поле в установке не соответствует условию циклотронного резонанса на частоте зондирующего излучения. Кроме того, поскольку трудно ожидать, что спектр циклотронного шума в довольно узкой полосе анализа имеет какие-либо особенности, то даже слабый рассеянный сигнал может быть выделен и на его фоне путем накопления и усреднения в течение достаточно большого времени.

Более серьезным препятствием для надежной регистрации спектров коллективного рассеяния может оказаться "паразитное пролезание" зондирующего излучения на вход приемной антенны как в результате многократных отражений от стенок камеры, так и за счет боковых лепестков передающей и приемной антенн. Паразитное излучение при достаточно высоком уровне может привести к перегрузке приемной системы или даже к разрушению смесителя на входе приемной системы. Для предотвращения этого должна быть предусмотрена защита приемника в виде системы аттенюаторов, которые вместе с паразитным сигналом понижают и уровень рассеянного сигнала, ухудшая его отношение к шуму приемника либо режекторных фильтров, которые снижают уровень "пролезания" на частоте зондирующего излучения.

Соотношение между собственным шумом гиротрона и полезным сигналом определяется величиной этого шума в полосе полезного сигнала и степенью развязки между передающей и приемной антеннами. Если учет циклотронного шума плазмы сводится лишь к вычитанию постоянной шумовой составляющей, абсолютная величина которой не обязательно должна быть хорошо известной, то вычитание шумов гиротрона является более сложной

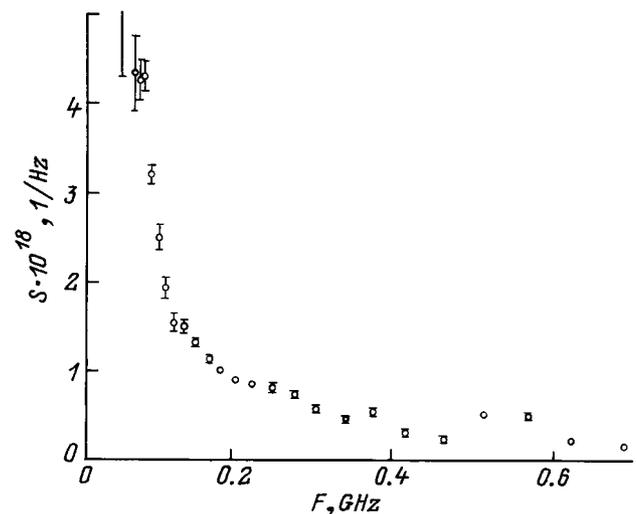


Рис. 2. Относительная плотность мощности шумов гиротрона.

процедурой. Трудно ожидать, что спектр шумов гиротрона постоянен в пределах полосы полезного сигнала (рис. 2). Поэтому для его "вычитания" необходимы весьма тщательные измерения спектра шумов гиротрона и довольно точные измерения величины паразитного сигнала на входе приемного тракта в режиме коллективного рассеяния. Экспериментальные исследования [7,11–13] показали, что уровень паразитного излучения сильно меняется в зависимости от геометрии рассеяния и параметров плазмы. Как видно из рис. 2, при развязке между передающей и приемной антеннами порядка 40 dB и мощности зондирующего излучения около 0.5 MW уровень шума на частотах, отстоящих на 100–150 MHz от центра линии генерации, может составлять величину порядка 100 eV в терминах эквивалентной шумовой температуры.

Блок-схема системы регистрации спектров

Система регистрации (рис. 3) построена по схеме супергетеродинного многоканального радиометра с модуляцией входного сигнала. По функциональным признакам в ней можно выделить следующие основные части: широкополосный гетеродинный преобразователь, снабженный системой защиты смесителя от паразитного излучения гиротрона, систему стабилизации частоты гетеродина, анализаторы спектра промежуточной частоты, многоканальный аналого-цифровой преобразователь и систему сбора и обработки информации на базе ЭВМ. Кроме того, на входе приемной системы через волноводный ответвитель включен квадратичный детектор для измерения мощности паразитного излучения гиротрона, попавшего в приемный тракт.

Гетеродинный преобразователь обеспечивает перенос спектра исследуемого сигнала из высокочастотной области (порядка 140 GHz) в область промежуточных частот 50–1200 MHz, где и проводится спектральный анализ. Задача спектрального анализа решается с помощью двух многоканальных систем параллельного анализа, что обеспечивает работу в реальном масштабе времени

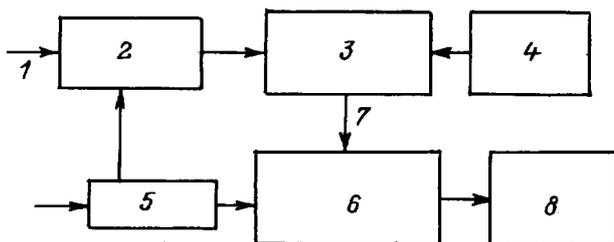


Рис. 3. Блок-схема регистрации спектров: 1 — волноводный вход, 2 — система защиты приемника, 3 — гетеродинный преобразователь частоты, 4 — система стабилизации частоты гетеродина, 5 — синхронизатор, 6 — анализаторы спектра промежуточной частоты, 7 — коаксиальная линия с малыми потерями, 8 — система цифровой обработки.

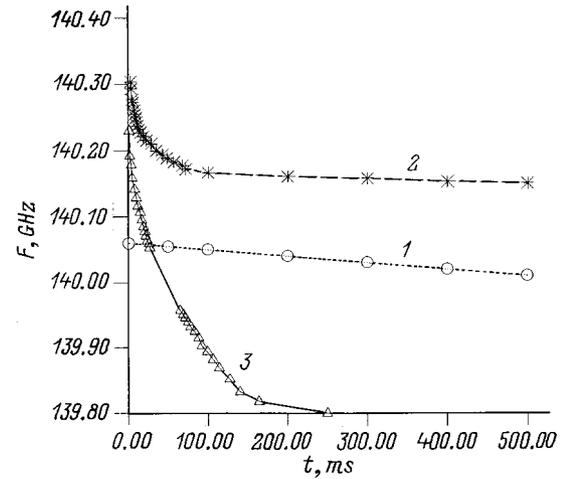


Рис. 4. Изменение частоты гиротрона внутри импульса генерации. 1 — гиротрон А, 2 — гиротрон Е, 3 — гиротрон С.

с разрешением порядка 1 ms. Обзорный анализатор спектра промежуточной частоты включает в себя основную фильтровую систему с 10%-ным относительным спектральным разрешением. Второй анализатор спектра промежуточной частоты является "линзовой" системой, позволяющей с более высоким спектральным разрешением исследовать любой участок спектра шириной 100 MHz в пределах всей полосы обзора.

Особенностью преобразователя частоты является "квазигомодинный" режим работы, который обеспечивается за счет двухполосной (без подавления зеркальной полосы) работы смесителя и равенства частот гетеродина и гиротрона. Использование обеих полос оптимально с точки зрения чувствительности, так как спектр рассеянного сигнала симметричен относительно частоты зондирующего сигнала. Чтобы сохранить при этом однозначную связь между спектром входного сигнала и сигналом промежуточной частоты необходимо, чтобы взаимная расстройка частот гетеродина приемника и гиротрона не превышала минимального спектрального разрешения. Система стабилизации частоты гетеродина обеспечивает относительную стабильность частоты на уровне 10^{-8} , что заведомо меньше спектрального разрешения прибора, поэтому причиной возникновения расстройки может быть либо регулярный дрейф частоты гиротрона в течение импульса, либо недостаточная повторяемость режима работы гиротрона от импульса к импульсу.

Исследования нескольких гиротронов (А, С, Е), которые в принципе можно использовать для коллективного рассеяния на W7-AS, показали (рис. 4), что каждый из исследованных генераторов характеризуется своей собственной зависимостью частоты от времени и зависимость эта повторяется от импульса к импульсу с точностью не хуже 10 MHz в идентичных режимах работы гиротронов. Это позволяет использовать для коллективного рассеяния заранее выбранный промежуток им-

пульса генерации, в течение которого частота уходит не более чем на несколько МГц. Наиболее благоприятными с точки зрения измерений кажутся участки импульса излучения с минимальной кривизной на характеристике частота–время, т.е. спустя несколько сотен ns после начала генерации. Однако, во-первых, на этих участках несколько ухудшается повторяемость от импульса к импульсу, во-вторых, длительность инжектируемого в камеру мощного импульса ограничена несколькими десятками ns в случае, когда излучение не поглощается плазмой, а такие режимы работы представляют интерес с точки зрения уменьшения уровня фонового циклотронного излучения. С учетом этого обстоятельства гиротрон С вряд ли представляет интерес для коллективного рассеяния, а гиротрон А наиболее перспективен.

Выбор схемы супергетеродинного радиометра позволяет удовлетворить требования к чувствительности даже при средних параметрах смесителя и усилителя промежуточной частоты, потерями преобразования и шумовой температурой которых определяется чувствительность приемника. В частности, использованная элементная база позволила получить на частоте 140 GHz температуру шума, отнесенную ко входу ≈ 0.6 eV (при ≈ 0.2 eV на входе смесителя).

Как известно, радиометрическая чувствительность, определяемая как минимальное обнаружимое приращение антенной температуры, определяется соотношением

$$\Delta T_{\min} = \frac{2T_n}{\sqrt{\Delta f \cdot \tau}}, \quad (4)$$

где Δf — ширина спектрального канала, τ — время усреднения.

В эксперименте общая шумовая температура измерительной системы, отнесенная ко входу антенны, складывается из собственного излучения плазмы с яркостной температурой T_{pl} , шума гиротрона в "крыльях" линии генерации (рис. 2), характеризуемого температурой $T_{g,n}$, и собственными шумами приемной системы с температурой T_{rn}

$$T_n = T_{pl} + L_a T_{g,n} + L_l^{-1} T_{rn}, \quad (5)$$

где L_a — коэффициент связи между приемной и передающей антеннами, L_l — коэффициент передачи тракта от приемной антенны до входа смесителя.

Чтобы дать представление о порядках отметим, что чувствительности 1 eV при времени усреднения 1 ms соответствует циклотронный шум порядка 50 eV в узких каналах ($\Delta f \approx 5$ MHz) и порядка 200 eV в широких каналах ($\Delta f \approx 100$ MHz) либо собственный шум приемника при общем затухании в приемном тракте порядка 20 dB для узких каналов или 27 dB для широких каналов; наконец, на этом же уровне ограничивает чувствительность собственный шум гиротрона в каналах, отстоящих примерно на 100 MHz от центра линии генерации при развязке между приемной и передающей антеннами порядка 40 dB.

Система защиты

Одним из ключевых моментов в постановке экспериментов по коллективному рассеянию с использованием гиротрона в качестве источника является проблема защиты приемника от паразитного излучения. Уровень этого излучения даже с учетом потерь в антенне и линии передачи достаточен, чтобы нарушить нормальный режим работы приемника. Для решения этой проблемы разработана система защиты, в которой используется многорезонаторный полосовой режекторный фильтр и коммутируемые электронные $p-i-n$ -аттенюаторы. Эта система решает две задачи: ослабление паразитного излучения гиротрона и стробирование принимаемого сигнала с тем, чтобы избежать перегрузок приемной системы, возникающих в те моменты времени, когда линия генерации гиротрона находится вне полосы режекторного фильтра.

В системе использован механически перестраиваемый фильтр на волноводе основного сечения с 20 цилиндрическими резонаторами, работающими на моде H_{013} [14]. Этот фильтр (рис. 5) обеспечивает максимальное подавление до 100 dB и не менее 40 dB в полосе порядка 50 MHz. Характеристику вне полосы ± 50 MHz относительно центра линии подавления можно считать дополнительным возмущением сквозной передаточной функции всей системы в целом; так, затухание на уровне 3 dB соответствует частотам примерно ± 60 MHz, а искажения, вносимые вне полосы ± 90 MHz, не превышают 2 dB. Затухание на крыльях линии режекторного фильтра приводит к небольшой дополнительной потере чувствительности в низкочастотных каналах. Для устранения влияния температурной нестабильности фильтр размещен в термостатированном блоке.

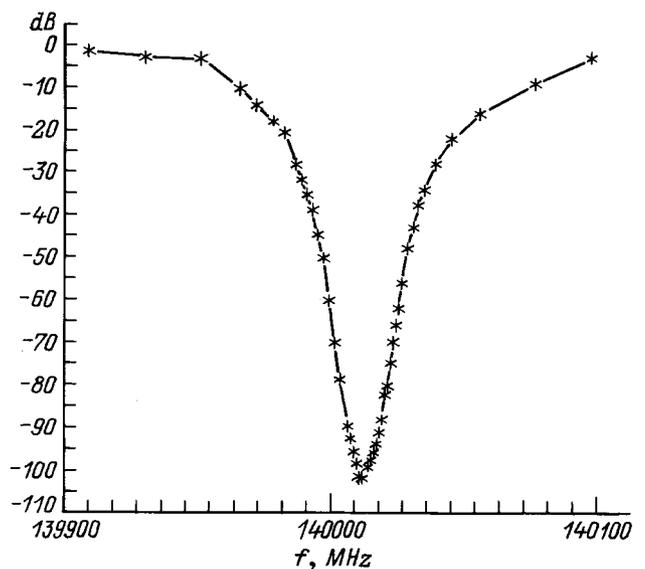


Рис. 5. Частотная характеристика режекторного фильтра на основном сечении волновода.

Вторым элементом системы защиты, позволяющим запереть вход приемной системы на уровне не менее 40 дБ и открывать его только на время измерений, является управляемый специально формируемым импульсным напряжением-стробом $p-i-n$ -аттенюатор. Внутри строба этот аттенюатор работает как модулятор. Управляющее напряжение формируется с помощью синхронизатора, позволяющего в широких пределах менять время запуска и длительность строба.

Высокочастотная часть приемной системы

Высокочастотная часть приемной системы регистрации спектров, скомпонованная в виде отдельного, хорошо экранированного от внешнего излучения блока, включает в себя (рис. 6): волноводный $p-i-n$ -модулятор, ферритовый вентиль, смеситель, два усилителя промежуточной частоты, между которыми включен фильтр высоких частот с граничной частотой 45 МГц гетеродин (лампа обратной волны) и включенные в тракт гетеродина ферритовый вентиль и полосовой пропускающий фильтр с полосой около 300 МГц. Кроме того, там же размещены высокочастотная часть схемы фазовой автоподстройки частоты. На входе смесителя перед модулятором включен полосовой режекторный фильтр, являющийся элементом схемы защиты приемника от паразитного сигнала гиротрона, и ответвитель для измерения мощности паразитного излучения гиротрона.

В высокочастотном блоке сигнал, поступающий из линии передачи рассеянного излучения, модулируется по амплитуде с частотой 10 кГц и через вентиль 1 попадает на балансный смеситель. Потери в модуляторе

не более 1 дБ, прямые потери в вентиле 3 дБ при развязке 27 дБ. На смеситель также через вентиль 2 и полосовой фильтр подается сигнал гетеродина — лампы обратной волны (140 ГГц, 10 мВт). Фильтр обеспечивает дополнительное подавление шумов гетеродина не менее 5–8 дБ в полосе 300 МГц, центрированной к частоте гетеродина. Режим работы смесителя по постоянному току поддерживается с помощью источника тока (на схеме не показан) и контролируется по измеряемому напряжению на его диодах. Применение невзаимных устройств во входных цепях, хотя и связано с ухудшением чувствительности, но оправдано тем, что таким образом удается решить проблему паразитного сигнала, присущую модуляционным радиометрам.

Поступающий с выхода смесителя сигнал промежуточной частоты усиливается широкополосным малошумящим услителем, выполненным на биполярных транзисторах. Полоса УПЧ — от 45 МГц до 1.3 ГГц, интегральная шумовая температура 210 К, полный (для двух модулей) коэффициент усиления 56 дБ. Для улучшения динамической характеристики УПЧ в области нижних частот между модулями УПЧ включен фильтр высоких частот с частотой среза 45 МГц и крутизной спада 10 дБ/МГц. Шумовая температура приемника в целом с учетом потерь в режекторном фильтре, модуляторе и вентиле, т.е. отнесенная ко входу блока, составляла около 5000 К.

С выхода высокочастотного блока по коаксиальному кабелю с малыми потерями сигнал промежуточной частоты поступает на анализаторы спектра.

Стабилизация частоты гетеродина осуществляется по схеме фазовой автоподстройки (ФАП). В состав системы ФАП входят следующие элементы (рис. 6): волноводный ответвитель, гармонический смеситель, УПЧ ФАП, синтезатор частоты РЧ6-02 диапазона 4–8 ГГц, фазовый детектор и схема управления частотой лампы обратной волны. Высокочастотные элементы ФАП размещены непосредственно в СВЧ блоке анализатора спектра. Система стабилизации включает в себя только одно кольцо ФАП, что стало возможным благодаря использованию высокого номера гармоники ($n = 21$) и высокой частоте опорного генератора (6678 МГц). Частота гетеродина стабилизируется во всей полосе генерации лампы обратной волны (порядка 20%) и в режиме синхронизации задается частотой опорного генератора — синтезатора частоты

$$f_{\text{het}} = 2l \cdot f_{\text{syn}} - 250 \text{ МГц.} \quad (6)$$

Стабильность частоты гетеродина определяется параметрами синтезатора и в нашем случае составляет не менее $5 \cdot 10^{-8}$; эта стабильность является с большим запасом избыточной для описываемой системы спектрального анализа. Полоса удержания системы ФАП составляет 600 МГц, полоса захвата — 250 МГц. Минимальный шаг перестройки частоты 210 кГц.

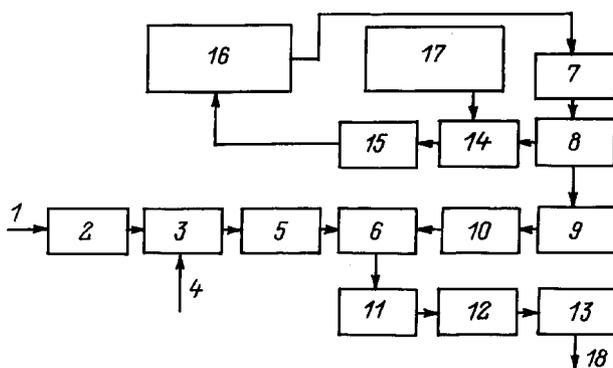


Рис. 6. Блок-схема высокочастотной части приемника: 1 — входной волновод, 2 — полосовой режекторный фильтр, 3 — модулятор, 4 — стробируемое напряжение 10 кГц, 5 — вентиль, 6 — смеситель, 7 — гетеродин, 8 — ответвитель, 9 — вентиль, 10 — полосовой фильтр, 11 — усилитель промежуточной частоты, 12 — фильтр высоких частот, 13 — второй модуль УПЧ, 14 — смеситель ФАП, 15 — УПЧ ФАП, 16 — блок ФАП, 17 — синтезатор, 18 — выход промежуточной частоты.

Анализаторы спектра промежуточной частоты

Обзорный анализатор спектра промежуточной частоты и дополнительный анализатор спектра высокого разрешения выполнены в виде отдельных блоков. Оба прибора реализуют в себе схему параллельного анализа и отличаются лишь параметрами фильтровых систем и наличием второго гетеродина во вспомогательном анализаторе спектра.

В обзорном анализаторе спектра (рис. 7), предназначенном для анализа сигнала в полосе от 50 MHz до 1.2 GHz с постоянным относительным разрешением 10%, используется специально разработанный 32-канальный мультиплексор, представляющий собой цепочку из активных широкополосных усилителей промежуточной частоты (УПЧ), 8 каскадов активных делителей мощности на полевых транзисторах, 32 полосовых фильтра промежуточной частоты и 32 амплитудных детектора. Кроме того, он имеет развязанный с помощью аттенуатора широкополосный выход для подключения вспомогательного анализатора спектра.

Фильтры промежуточной частоты выполнены по трехконтурной схеме с емкостной связью на сосредоточенных элементах и настроены на частоты: 48, 54, 59, 66, 73, 80, 90, 102, 111, 123, 136, 153, 172, 187, 205, 227, 252, 280, 308, 344, 379, 418, 464, 514, 570, 625, 692, 766, 845, 940, 1033, 1155 MHz; полоса каждого фильтра составляет примерно 10% от средней частоты фильтра. Развязка между соседними каналами не менее 20 dB.

Тракт промежуточной частоты анализатора также включает в себя управляемый напряжением *p-i-n*-аттенуатор промежуточной частоты и широкополосный УПЧ, включенные перед мультиплексором. С помощью аттенуатора устанавливается коэффициент передачи, необходимый для обеспечения динамического диапазона УПЧ. Кроме того, этот аттенуатор используется для дополнительного стробирования синхронно с высокочастотным модулятором.

Каждый из низкочастотных каналов анализатора включает в себя малозумящий усилитель низкой частоты,

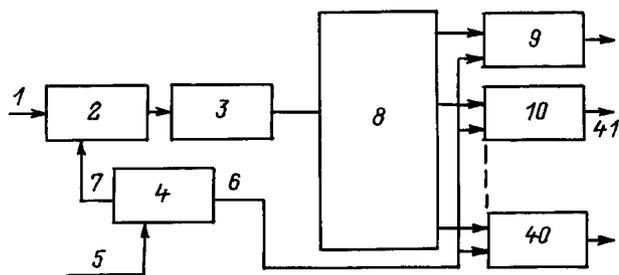


Рис. 7. Блок-схема обзорного анализатора спектра промежуточной частоты: 1 — вход, 2 — *p-i-n*-аттенуатор, 3 — УПЧ, 4 — синхронизатор, 5 — внешний стробирующий сигнал, 6 — выход опорного напряжения 10 kHz, 7 — строб, 8 — 32-канальный мультиплексор, 9–40 — низкочастотные каналы, 41 — выход на АЦП.

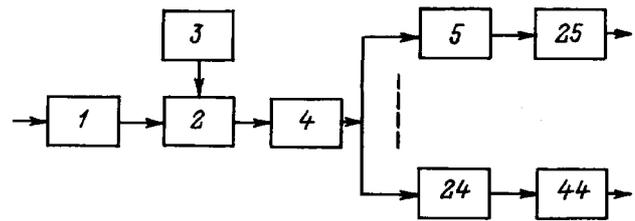


Рис. 8. Блок-схема "линзового" анализатора спектра: 1 — фильтр высоких частот, 2 — смеситель, 3 — второй гетеродин, 4 — полосовой УПЧ, 5–24 — система из 20 узкополосных фильтров, 25–44 — низкочастотные каналы.

синхронный фильтр, аттенуатор, синхронный детектор, интегрирующую RC-цепь и выходной видеоусилитель. Постоянная времени выбрана равной 1 ms, что связано с невозможностью использовать частоту модуляции выше 10 kHz из-за ограниченного быстродействия *p-i-n*-модулятора.

Использование системы аттенуаторов обеспечивает широкий динамический диапазон величин измеряемых сигналов, поступающих на вход приемной системы: от сотых долей eV, являющихся пороговой чувствительностью из-за собственных шумов приемной системы, до 10⁸ eV. Это позволило использовать систему регистрации не только по ее прямому назначению — для измерений ионной температуры, но и для исследования неравновесной плазменной турбулентности, а также для оперативных измерений частотного дрейфа излучения гиротронов.

Второй анализатор спектра (рис. 8) предназначен для исследования тонкой структуры спектра и позволяет с разрешением 5.5 MHz наблюдать спектр в полосе 100 MHz, центрированной к одной из частот полосы анализа. Он выполнен по схеме со вторым гетеродинированием и включает в себя: входной преселектор, смеситель, второй гетеродин, селектор преобразованного сигнала, УПЧ2, 20-канальный мультиплексор и систему 20 селективных каналов. Вторая промежуточная частота равна 250 MHz. Перестройка полосы анализа осуществляется переключением частоты гетеродина с шагом 100 MHz с соответствующим переключением фильтров преселектора. Низкочастотная часть блока аналогична используемой в обзорном анализаторе спектра.

Методика измерения

Напряжение на выходе каждого из спектральных каналов анализатора можно записать как

$$u_i = K_i T_{ai} + u_i^0, \tag{7}$$

где K_i — полный коэффициент передачи *i*-го приемного канала от входа приемной антенны до аналогового выхода спектроанализатора; T_{ai} — температура антенны, усредненная по полосе *i*-го приемного канала; u_i^0 — некий постоянный сдвиг "приборного нуля".

Вообще говоря, величины K_i и u_i^0 в каждом канале зависят от выбора динамического диапазона, определяемого установками набора аттенюаторов. Поэтому для измерения сигнала на входе приемной антенны необходимы калибровочные измерения, позволяющие определить эти величины в каждом из каналов при каждом выборе динамического диапазона. Идеальным способом калибровки всей приемной системы в целом было бы помещение перед входом приемной антенны двух шумовых источников с известными и достаточно сильно отличающимися температурами. При такой абсолютной калибровке величины K_i и u_i^0 однозначно определяются в каждом из каналов, что дает возможность абсолютного измерения эффективной температуры излучения в каждом из каналов в режиме коллективного рассеяния. При горизонтальной ориентации диаграммы направленности приемной антенны хорошим калибровочным источником является оптически толстый резонансный слой плазмы, излучающей на второй циклотронной гармонике, температура излучения которого совпадает с физической электронной температурой в слое. В качестве второго эталонного источника можно взять пустую вакуумную камеру, температуру излучения которой можно считать совпадающей с температурой окружающей среды. Если эффективная температура циклотронного излучения и измеряемого сигнала значительно превышают эту величину, то ее точное значение неважно и эффективную температуру измеряемого сигнала можно определить следующим образом:

$$T_{ai} = \frac{u_i - u_i^{(k)}}{u_i^{(ECE)} - u_i^{(k)}} T_{ECE}, \quad (8)$$

где величины u_i , $u_i^{(k)}$ и $u_i^{(ECE)}$ соответствуют величинам выходного сигнала в i -м канале при коллективном рассеянии, при измерениях сигнала из пустой камеры и при калибровке по циклотронному излучению соответственно.

При другой ориентации луча приемной антенны циклотронное излучение можно использовать лишь для относительной калибровки (программируемого выравнивания коэффициентов передачи во всех каналах спектроанализатора) в предположении, что эффективная температура излучения постоянна в пределах полосы анализа. Абсолютное значение измеряемых сигналов при этом получается с невысокой точностью, которая определяется либо оценкой уровня циклотронного излучения в заданной геометрии, либо путем оценки потерь в приемном тракте и абсолютной калибровки с "чернотельным" источником, подключаемым ко входу приемника.

Заключение

Первые эксперименты по коллективному рассеянию с использованием гиротрона 140 GHz представляемой в настоящей работе приемной системы измерения спектров, проведенные на стеллараторе W7-AS, имели пред-

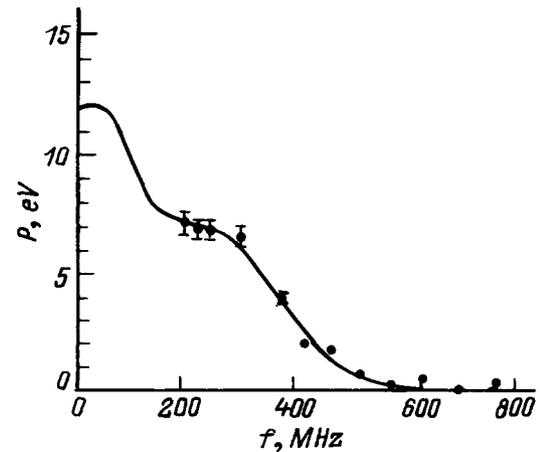


Рис. 9. Экспериментальный (точки) и подгоночный (сплошная линия) спектры рассеяния на тепловых флуктуациях плотности.

варительный характер и позволили понять необходимость модернизации ряда компонент и принципиальных решений. В частности, стала ясна необходимость более глубокого подавления паразитного сигнала гиротрона, пришлось отказаться от открытых квазиоптических элементов в линии транспортировки рассеянного сигнала и обеспечить тщательную экранировку волноводного тракта и высокочастотной части приемника, ввести систему более эффективного стробирования исследуемого сигнала. С целью повышения стабильности параметров приемника была изменена схема радиометра (вместо компенсационной модуляционная) и введено термостатирование его высокочастотной части. В чисто иллюстративных целях мы приведем здесь ряд примеров.

Первые результаты по коллективному рассеянию на W7-AS были получены в геометрии обратного рассеяния с использованием гиротрона А, причем зондирующий и рассеянный лучи были близки к экваториальной плоскости. В этой геометрии при отсутствии поглощения зондирующего излучения плазмой стелларатора уровень рассеянного излучения гиротрона был достаточно высок, так что рассеяние на тепловых флуктуациях можно было зарегистрировать лишь при некоторых оптимальных положениях приемной и передающей антенн путем вычитания шумов гиротрона из общего сигнала. Пример такого разностного сигнала и спектра шумов гиротрона показан на рис. 9.

При интенсивном поглощении зондирующего излучения (в качестве зондирующего излучения использовалась необыкновенная волна на второй циклотронной гармонике) рассеянный сигнал не удалось выделить на фоне циклотронного излучения плазмы. Другой пример спектра рассеянного излучения показан на рис. 10; спектр получен при рассеянии на нетепловой нижегибридной турбулентности в той же геометрии обратного рассеяния, причем уровень рассеянного сигнала на несколько порядков превышал и циклотронное излучение плазмы, и шумы гиротрона, и уровень сигнала, рассеянного на

тепловых флуктуациях. Хорошее частотное разрешение получено за счет использования "линзовой" системы спектрального анализа. На рис. 11 представлен спектр рассеяния на тепловых флуктуациях с использованием гиротрона E в качестве источника зондирующего излучения; этот спектр может быть использован для локального определения ионной температуры, поскольку получен в геометрии рассеяния на 90° из объема размером порядка 4 см. Характерной особенностью новой геометрии является хорошая развязка между передающей и приемной антеннами — уровень шумов гиротрона, попадающих на вход приемной антенны, примерно на два порядка ниже уровня зарегистрированного сигнала. Приведенный спектр выделен на фоне циклотронного излучения, эффективная температура излучения которого в два-три раза выше, чем у рассеянного сигнала.

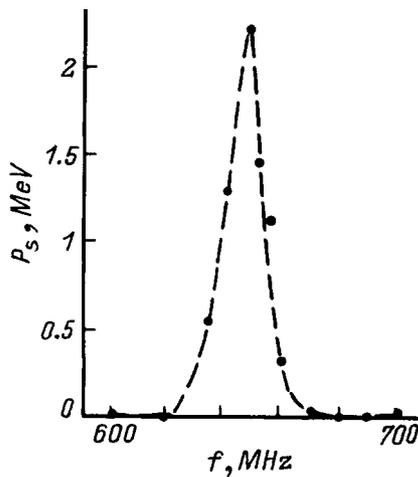


Рис. 10. Спектр рассеяния на нижнегибридной турбулентности.

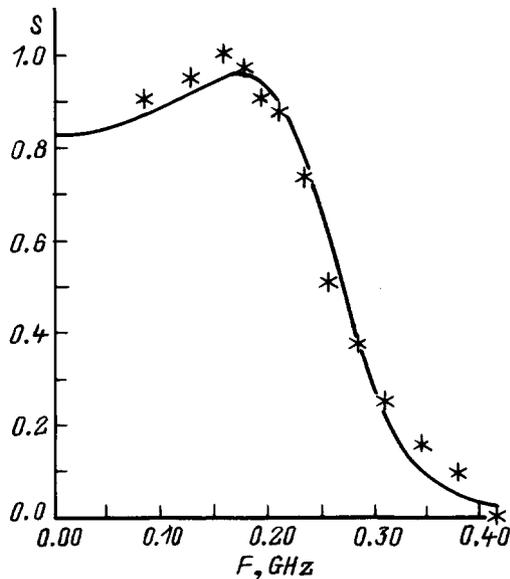


Рис. 11. Экспериментальный (значки) и расчетный (линия) спектры рассеяния на тепловых флуктуациях.

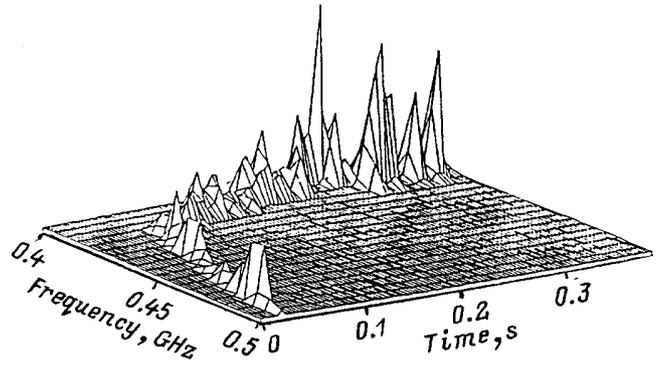


Рис. 12. Эволюция спектра излучения гиротрона E .

Система регистрации спектров коллективного рассеяния при введении сильного дополнительного ослабления сигнала позволяет исследовать и дрейф частоты в течение импульса гиротрона. В качестве примера на рис. 12 показана эволюция частоты генерации гиротрона E , полученная таким образом.

Проведенные исследования продемонстрировали принципиальную возможность использования гиротрона в качестве источника мощного излучения для коллективного рассеяния, что весьма важно не только и не столько для измерений ионной температуры, но и для диагностики альфа-частиц в условиях термоядерной реакции. На сегодняшний день гиротрон представляется единственным реальным источником мощного зондирующего излучения большой длительности, использование которого открывает перспективу для локальных измерений спектров коллективного рассеяния на альфа-частицах с достаточно высокой чувствительностью за счет высокого "радиометрического выигрыша". Принципы построения системы измерений спектров коллективного рассеяния, проверенные на установке W7-AS, без существенных модификаций могут быть перенесены и на комплекс для диагностики альфа-частиц. При той же частоте зондирующего излучения условие "коллективности" рассеяния выполнено в любой мыслимой геометрии. Из соображений разумной ширины спектра измеряемого сигнала (3–4 GHz) угол рассеяния не должен быть заметно больше 30° . В крупной установке реакторного масштаба можно ожидать заметного уменьшения уровня паразитного сигнала, однако с учетом низкого ожидаемого уровня рассеянного сигнала, по-видимому, режекторный фильтр останется необходимым элементом системы регистрации. Поскольку длительность импульса зондирующего сигнала для повышения чувствительности должна быть максимальной (порядка секунд), то встанет задача разработки либо достаточно широкополосного режекторного фильтра, либо фильтра с электронно управляемой характеристикой для компенсации уходов частоты гиротрона в длинном импульсе.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 96-02-19455-а).

Список литературы

- [1] Шеффилд Дж. Рассеяние электромагнитного излучения в плазме. М.: Атомиздат, 1978.
- [2] Левин М.Л., Рытов С.М. Теория равновесных флуктуаций в электродинамике. М.: Наука, 1967.
- [3] Hoekzema J.A., Costley A.E. et al. // Proc. of 15th Symp. on Fusion Technology. Utrecht, 1988. P. 314.
- [4] Orsitto F., Buratti P. Analysis of Collective Thomson for Alpha-particle Diagnostics on Tokamaks. ENEA rep. 1988.
- [5] Benhn R., Dicken D. et al. // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69. N 4.
- [6] Woskoboinikov P., Cohn D.R. et al. // Digest of XII Intern. Conf. on IR&MM Waves. Orlando (Florida), 1987. N CH2490-1.
- [7] Лубяко Л.В., Лучинин А.Г., Нусинович Г.С. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 2. С. 211–212.
- [8] Бродский Ю.Я., Лубяко Л.В., Нечуев С.И. и др. // Тез. докл. межведомственной конф. "Приборы, техника и распространение мм и субмм волн". Харьков, 1992. С. 109.
- [9] Suvorov E.V. // Proc. of Intern. School of Plasma Physics "Piero Caldirola". Villa Monastero-Varenna (Italy), 1991. P. 79–98.
- [10] Suvorov E.V., Burov A.B., Dryagin Yu. A. et al. // Proc. of Intern. Workshop "Strong microwaves in plasma". N. Novgorod, 1993. P. 172–184.
- [11] Куфтин А.Н., Лубяко Л.В., Скалыга Н.К. // Тез. докл. межведомственной конф. "Приборы, техника и распространение мм и субмм волн". Харьков, 1992. С. 35.
- [12] Suvorov E.V., Dryagin Yu.A., Filchenkov S.E. et al. // 9th Joint Workshop on ECE and ECRH. Singapore: World Scientific Publishing, Co. Pte LTD, 1995. P. 501–508.
- [13] Suvorov E.V., Erckmann V., Holzhauser E. et al. // Plasma Phys. Controlled Fusion. 1995. Vol. 37. P. 1207–1213.
- [14] Dryagin Yu., Skalyga N., Geist T. // Int. J. Infrared and MM Waves. 1996. Vol. 17. N 7. P. 1199–1204.