

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 621.37

**О КАЛИБРОВКЕ ПРИЕМНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
МЕТОДОМ КОЛЛЕКТИВНОГО РАССЕЯНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКИ ГДЛ**

©2026 г. Т. А. Хусаинов^{а,*}

^а *Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46*

**e-mail: hta@ipfran.ru*

Поступила в редакцию 03.07.2025 г.

После доработки 02.09.2025 г.

Принята к публикации 23.09.2025 г.

Описана методика калибровки приемной аппаратуры для эксперимента по регистрации спектров коллективного томсоновского рассеяния на частоте 54.5 ГГц в открытой магнитной ловушке. Это рассеяние является основой для диагностики ионной функции распределения, широко используемой в тороидальных ловушках, токамаках и стеллараторах, и стоит задача адаптировать этот метод для открытой ловушки. Переход к новому типу ловушки потребовал использования оригинального подхода для калибровки, в рамках которого были решены две задачи. Во-первых, с помощью имеющейся аппаратуры с точностью 3% был зарегистрирован спектр сигнала от теплового источника с температурой около 200 К. Во-вторых, было обеспечено согласование приемника с генератором шумового излучения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в методах удержания термоядерной плазмы в существующих открытых магнитных ловушках [1–8] и планирование новых физических задач для открытых ловушек следующего поколения [9–12] привели к тому, что сейчас активно совершенствуются методы диагностики плазмы для установок такого типа. Важной потребностью для больших пробкотронов, оснащенных инжекторами нейтральных частиц, является потребность в диагностике функции распределения энергетических ионов. Такую диагностику возможно реализовать, если адаптировать для открытой ловушки метод регистрации спектров коллективного томсоновского рассеяния (collective Thomson scattering, CTS) излучения миллиметрового диапазона [13].

Этот метод основан на регистрации рассеяния мощного зондирующего миллиметрового излучения на тепловых флуктуациях электронной плотности, которые, в свою очередь, существенно зависят от распределения ионов плазмы по скоростям. Информация о функции распределения ионов содержится в форме спектра рассеянного

излучения, что позволяет отслеживать динамику функции распределения практически в реальном времени. Пространственное разрешение при этой диагностике также достаточно хорошее, поскольку оно определяется размерами пучков крайне высокой частоты (КВЧ). Совокупность этих качеств обусловила распространение CTS-диагностики в тороидальных магнитных ловушках, токамаках и стеллараторах, используемых для удержания высокотемпературной плазмы с субтермоядерными параметрами [14]. Особенности применения этого метода для открытых ловушек обсуждались в работах [15, 16].

Для CTS-диагностики важным элементом является сопоставление спектральной плотности мощности сигнала, записанного регистрирующей аппаратурой, со спектром радиационной температуры рассеянного излучения. В тороидальных ловушках для этой цели используется калибровка по собственному излучению плазмы, что удобно по двум причинам. Во-первых, поскольку плазма непрозрачна в наблюдаемом диапазоне частот, температура теплового излучения известна и равна температуре плазмы. Во-вторых, поскольку тепловое излучение проходит ровно тот же путь до регистрирующей аппаратуры, что и CTS-сигнал, такая калибровка позволяет учитывать все особенности приемной системы: согласования антенн, потери в линиях передачи, амплитудно-частотную характеристику приемника и т.д., причем калибровку можно проводить в одном выстреле с приемом полезного сигнала.

Однако в открытых ловушках такой подход плохо применим, поскольку циклотронный резонанс расположен далеко от области CTS-рассеяния, плазма в области рассеяния прозрачна, ее собственное излучение слабо, а его температура неизвестна. В настоящей статье будет изложен подход к калибровке системы приема, который мы выработали в ходе работ на установке “Газодинамическая ловушка” (ГДЛ), (ИЯФ СО РАН, Новосибирск) [17, 18]. ГДЛ – это большая аксиально-симметричная открытая ловушка, ее центральный соленоид имеет 7 м в длину, магнитное поле в пробке достигает 15 Тл, а пробочное отношение может быть больше 30 [19]. Для этой установки был создан диагностический комплекс для регистрации спектров коллективного рассеяния микроволнового излучения [15, 16, 20], включающий мощный гиротрон с энергией 450 кВт и частотой 54.47 ГГц в качестве источника зондирующего излучения, два независимых высокочувствительных КВЧ-приемника диапазона 54.47 ± 0.55 ГГц для одновременной регистрации рассеянного излучения в двух разных геометриях, а также квазиоптические системы фокусировки зондирующего и рассеянного излучений.

2. ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ КАЛИБРОВКИ

Устройство системы для приема и записи сигналов CTS на ГДЛ подробно изложено в работах [21, 22], ее схема приведена на рис. 1а, б. Излучение из плазмы попадает в рупорную антенну и далее по волноводной линии подается на вход супергетеродинного приемника. В приемнике излучение проходит защитную систему, включающую режекторный фильтр, настроенный на частоту гиротрона, а затем поступает на преобразователь частоты, который включает в себя балансный смеситель и гетеродин. Смеситель разработан в АО “НИИПП” [23], он представляет собой волноводную вставку с волноводными входами для принимаемого и гетеродинного сигналов и коаксиальными разъемами для вывода сигнала промежуточной частоты (ПЧ) и подачи смещения на диоды. Гетеродин преобразователя выполнен на диоде Гана. Перестройка частоты генерации гетеродина (перестройка частоты приема) в полосе 52.5–55 ГГц осуществляется изменением напряжения на варикапе,

включенном в резонансный контур генератора. Сигнал ПЧ с выхода смесителя поступает на предварительный усилитель промежуточной частоты с полосой от 0.01 до 1.3 ГГц и общим усилением около 30 дБ, а затем записывается цифровым осциллографом Tektronix MSO54.

Рис. 1. Схема системы приема и записи сигналов.

Для калибровки важно то, что в системе не используется подавление зеркального канала и сигналы из прямого и зеркального каналов накладываются друг на друга. Такая схема улучшает чувствительность для излучения, спектр которого симметричен относительно частоты гетеродина, однако затрудняет восстановление спектра излучения, если спектры в прямом и зеркальном каналах различны.

Это ограничение не слишком существенно для нашего CTS-эксперимента, поскольку спектр рассеянного излучения симметричен относительно частоты гиротрона и, соответственно, можно избежать проблем при наложении каналов, совместив частоту гетеродина с частотой гиротрона, т.е. при работе в квазигомодинном режиме. В этом режиме спектральная плотность мощности принятого сигнала будет пропорциональна спектральной плотности мощности излучения, а калибровка будет состоять в определении коэффициента пропорциональности, который будет функцией ПЧ, отражающей неоднородность чувствительности приемника, средней по прямому и зеркальному каналам. Назовем эту функцию калибровочной для квазигомодинного режима, и ее можно найти, сняв спектр сигнала эталонного источника с известной радиационной температурой и поделив его на эту температуру. Температура при этом может быть функцией частоты, но для квазигомодинного режима четной относительно частоты гетеродина.

Впрочем, иногда квазигомодинного режима может быть недостаточно, и нужно иметь возможность восстановить спектр излучения без дополнительных предположений о его симметрии. Потенциально с имеющейся аппаратурой это возможно, если перестроить частоту гетеродина таким образом, чтобы в прямом или зеркальном канале сигнал был равен нулю, далее будем называть этот режим гетеродинным. Тогда, так же как и в квазигомодинном режиме, спектральная плотность мощности принятого сигнала будет пропорциональна спектральной плотности мощности излучения. Но для определения калибровочной функции потребуется эталонный источник, радиационная температура которого равна нулю в неиспользуемом канале, поскольку чувствительности каналов различны, а калибровка должна отражать чувствительность рабочего канала.

В качестве эталонных источников для калибровки системы мы можем использовать тепловое излучение чернотельной мишени и медицинский генератор шума (ГШ) АМФИТ-0,2/10-01, выдающий шумовое излучение в диапазоне 53.57–78.33 ГГц через одномодовый прямоугольный волновод сечением $1.8 \cdot 3.6 \text{ мм}^2$.

Чернотельная мишень, также называемая согласованной нагрузкой, представляет собой КВЧ-поглотитель в коробке из пенопласта, в которую можно заливать жидкий азот. Таким образом, разница сигналов от мишени при комнатной температуре и при температуре жидкого азота представляет собой сигнал теплового излучения с температурой около 200 К или $2 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$. Чернотельная мишень удобна тем, что она с заведомо достаточной точностью дает плоский спектр с точно известной температурой во всей полосе приема, и это излучение легко ввести в приемную систему через штатную рупорную антенну. Однако слабость сигнала сильно затрудняет работу с ним, а при типичных для CTS-экспериментов установках волноводных аттенуаторов тепловое излучение вообще невозможно

зафиксировать за разумное время на нашем оборудовании, если пропускать его через всю приемную систему от входного рупора.

Генератор шума дает излучение с существенно большей спектральной плотностью мощности, однако точно его радиационная температура и спектр, вообще говоря, неизвестны, а кроме этого, возникает проблема согласованного подключения генератора в систему.

С учетом этих ограничений и особенностей мы пришли к следующей концепции калибровки: основным средством калибровки выступает ГШ, для его подключения сразу за входным рупором в линию вставляется волноводный переключатель (см. рис. 1б), однако сам ГШ сначала калибруется по чернотельной мишени.

Поскольку ни тот, ни другой источники не могут дать излучение отдельно для прямого или зеркального каналов приемника, далее речь будет идти только о калибровке в квазигомодинном режиме. Для гетеродинного режима остается только использовать те же источники и исходить из приближения равной чувствительности прямого и зеркального каналов на всех частотах. Тогда калибровочную функцию, полученную от источника, дающего сигнал в оба канала, нужно будет поделить на два, чтобы получить приближенный отклик одного канала.

После определения калибровочной функции для калибровки CTS-сигнала его спектр просто делится на нее, и частное дает спектр CTS-излучения. Спектр сигнала, в свою очередь, определяется при помощи оконного преобразования Фурье, которое применяется к оцифрованному сигналу на ПЧ

Можно отметить, что такой подход нетипичен для CTS-экспериментов, где частотный анализ обычно выполняется при помощи аналогового устройства, которое можно назвать многоканальным анализатором спектра. В нем сигнал на ПЧ пропускается через набор работающих параллельно полосовых фильтров с квадратичными детекторами, и далее записывается только зависимость мощности от времени для каждого из частотных диапазонов [24–29]. Однако, поскольку на ГДЛ довольно короткое время разряда (до 10 мс), было решено использовать полностью цифровую обработку сигнала. Это позволило использовать стандартный осциллограф вместо специального многоканального анализатора, гибко управлять разрешениями по частоте и по времени, а также дало больше возможностей по идентификации и фильтрации помех.

3. КАЛИБРОВКА ГЕНЕРАТОРА ШУМА ПО ЧЕРНОТЕЛЬНОЙ МИШЕНИ

Для калибровки ГШ используются те же приемник и осциллограф, что и для приема CTS-сигналов, однако вместо штатной диагностической линии (рис. 1б) к входу приемника подключается либо просто рупорная антенна (рис. 1в), либо пара волноводных аттенуаторов с ГШ (рис. 1г). Таким образом уменьшаются потери при передаче, и сигнал от теплового излучения чернотельной мишени становится лучше различим. Соответственно, сначала приемник и осциллограф калибруются по чернотельной мишени, а по калиброванной приемной системе определяются характеристики ГШ.

3.1. Калибровка приемной системы по чернотельной мишени

Схема для калибровки системы по тепловому излучению чернотельной мишени показана на рис. 1в: на вход приемника ставилась рупорная антенна и далее последовательно записывались спектры выходного сигнала, пока перед антенной менялись две мишени:

соответственно с комнатной температурой и с температурой жидкого азота. Время экспозиции каждой мишени составляло около минуты, всего было сделано 29 записей, холодная мишень все время обдувалась атмосферным воздухом, чтобы избежать образования конденсата, мишени ставились так, чтобы перекрыть всю диаграмму направленности рупора, но при этом под небольшим углом к нему, чтобы минимизировать влияние отражения.

Спектр выходного сигнала по ПЧ формировался и записывался цифровым осциллографом Tektronix MSO54, для этого использовались встроенные функции быстрого преобразования Фурье и усреднения результата. Для каждого цикла экспозиции мишени осциллограф около 1000 раз записывал сигналы с приемника с длительностью 0.1 мс и частотой дискретизации 3.125 Гвыб/с, делал для них преобразование Фурье, вычислял спектральную мощность гармоник в децибел-милливаттах и усреднял полученные величины всех записей. Использование усреднения логарифма мощности было обусловлено встроенным функционалом осциллографа, но можно показать, что спектральная мощность шумового сигнала с одинаковой по частоте формой функции распределения, полученная в результате такого усреднения, будет пропорциональна настоящей спектральной мощности. Для наших шумовых сигналов, у которых комплексная амплитуда спектральных гармоник имеет нормальное распределение на комплексной плоскости, коэффициент пропорциональности равен экспоненте от постоянной Эйлера – Маскерони (примерно 1.78).

Полученные осциллографом спектры приводились к величине спектральной плотности мощности, зафиксированной в осциллографе в мВт/Гц, фильтровались от дискретных линий и сглаживались, а затем считался разностный спектр, отвечающий сигналу от теплового излучения, по следующей формуле:

$$S_{\Delta}(f) = \frac{1}{N-2} \sum_{i=2}^{N-1} (-1)^i \left(\frac{S_{i-1}(f) + S_{i+1}(f)}{2} - S_i(f) \right),$$

где S_i – спектр i -го измерения, а $N = 29$ – общее число снятых спектров. Мишени при комнатной температуре отвечали нечетным i , при температуре жидкого азота – четным i , а среднее арифметическое $(S_{i-1}(f) + S_{i+1}(f))/2$ использовалось в расчетах, чтобы компенсировать изменение собственного уровня шума приемника в ходе измерений. Получившийся разностный спектр делился на разность температур теплой и холодной мишеней, которая составляла 218 К или $1.88 \cdot 10^{-2}$ эВ, и так получалась калибровочная функция для системы приемник-осциллограф, приведенная на рис. 2 синей сплошной линией.

Рис. 2. Калибровочная функция для системы приемник-осциллограф, определенная по спектру сигнала теплового излучения...

Максимум функции соответствует частоте, на которой система приемник–осциллограф обладает наибольшей чувствительностью, снижение чувствительности на больших частотах обусловлено выходом из полосы пропускания усилителей ПЧ в приемнике и трактов осциллографа. Согласно документации, осциллограф имеет полосу частотой 500 МГц, но измерения показывают, что существенного падения чувствительности нет до значения 800 МГц. Вблизи нуля чувствительность падает, поскольку для защиты в приемнике стоит режекторный фильтр на частоте гиротрона, и в квазигомодном режиме эта частота соответствует ПЧ, равной нулю. Для записи сигнала CTS-рассеяния на быстрых ионах в условиях ГДЛ достаточно полосы 300 МГц [15], но для полноты картины и в соответствии с

определенным диапазоном чувствительности приемной системы в дальнейшем все зависимости по ПЧ будут приводиться до значений 800 МГц.

Проведенные измерения позволяют также определить распределение по частоте для шумовой температуры приемника, отнесенной к его входу, т.е. спектр излучения, которое даст на выходе сигнал со спектром собственного шума приемника, если подать его на вход. Эта функция приведена на рис. 2 красной штриховой линией, и можно видеть, что в основном шумовая температура лежит в области 0.3 эВ.

Полупрозрачной заливкой на рис. 2 показаны погрешности полученных функций, определенные с достоверностью 95%. Погрешность оказывается довольно существенной вблизи ПЧ, равной нулю, и вблизи сохранившейся дискретной помехи на частоте 830 МГц, но если отбросить точечные выбросы, посчитав медианную погрешность по интервалу, то для калибровочной функции она составит около 3%, что вполне достаточно для наших измерений.

Таким образом, для целей калибровки нам удалось адаптировать систему, предназначенную для приема мощных (до 10 МэВ) и коротких (до 10 мс) CTS-сигналов для приема слабых (10^{-2} эВ) и длительных сигналов теплового излучения. Для этого был использован не совсем стандартный режим работы осциллографа и в каком-то смысле это сделало нашу систему аналогом упомянутых выше многоканальных анализаторов спектра [24–29]. В отличие от аналоговых анализаторов, у нас теряется большая часть сигнала: из 40 мин, потраченных на калибровку, были реально использованы только 3 с, но зато была получена куда более детальная информация о спектре, что, в частности, позволило удалить квазимонохроматические помехи.

3.2. Определение характеристик генератора шума

Как уже отмечалось, для ГШ не гарантированы постоянство радиационной температуры в полосе приема или симметрия ее распределения относительно какой-либо частоты. Проверить это, определив спектр ГШ явно, также невозможно из-за наложения прямого и зеркального каналов приемника. Поэтому мы будем исходить из предположения, что спектр ГШ близок к плоскому, определим его среднюю температуру и стандартное отклонение температуры в полосе, и отклонение будем относить к погрешности калибровки по ГШ. Нам нужно снять спектр сигнала ГШ в квазигомодинном режиме, но при этом также нужно обеспечить согласованное подключение генератора к приемнику. Для обеспечения и контроля согласования использовалась следующая техника.

Схема подключения ГШ показана на рис. 1г: ГШ подключался к приемнику через два волноводных аттенюатора с плавной перестройкой, первый типа AP-05 с максимальным ослаблением около 12 дБ, второй аналогичный с максимальным ослаблением до 40 дБ. В ходе измерений записывались спектры сигналов ГШ для различных комбинаций установок аттенюаторов. По записям определялась область установок, где спектры не меняют форму, суммарное ослабление двух аттенюаторов было равно сумме ослаблений, которые они давали бы по отдельности. Это проиллюстрировано на рис. 3, где искажение формы спектра и ослабление, вносимое при полном закрытии первого аттенюатора, приведены в зависимости от мощности записанного сигнала, и видна область от -16 до -42 дБм, где подключение ГШ согласовано.

Рис. 3. Зависимость искажения формы спектра $\delta\bar{S}...$

Относительное искажение формы спектра $\delta\bar{S}$ обозначено на рис. 3 сплошной темно-синей линией и определено по следующей формуле:

$$\delta\bar{S} = \left\{ \left| \frac{\bar{S}_i(f) - \bar{S}(f)}{\bar{S}(f)} \right| \right\}_f, \quad \bar{S}_i(f) = \frac{S_i(f)}{\int S_i(f)df}, \quad \bar{S}(f) = \{\bar{S}_i(f)\}_i,$$

где $S_i(f)$ – спектральная плотность мощности для i -го сигнала в зависимости от промежуточной частоты f , $\bar{S}_i(f)$ – та же величина, нормированная на полную мощность, определяет функцию формы спектра, а $\{ \}_x$ – означает взятие медианы по параметру x . Таким образом, искажение определяется как медиана по частоте для модуля разности между формой данного спектра \bar{S}_i и эталонной формой \bar{S} . Эталонная форма, в свою очередь, определяется как медиана по всем записанным формам, взятая отдельно для каждой частоты. В области согласования искажение составляет порядка 1–2%, оно связано с небольшой нестабильностью режима работы ГШ, за пределами области искажение резко растет.

Штриховыми линиями на рис. 3 приведено ослабление, вносимое при полном закрытии первого аттенюатора, оно считается как отношение мощностей двух сигналов, снятых при одинаковой установке второго аттенюатора, и приведено в виде двух линий, поскольку отдельная точка на графике строится для мощности каждого из этих сигналов. Можно видеть, что для сигналов, форма спектра которых не меняется, величина ослабления при закрытии аттенюатора также практически постоянна и равна 12.27 ± 0.17 дБ. Это означает, что в этой области ослабление аттенюатора не зависит от мощности сигнала, а суммарное ослабление двух аттенюаторов равно сумме ослаблений, которые они давали бы по отдельности, т.е. приемник развязан с генератором и работает в линейном режиме.

Далее, зная форму спектра ГШ, развязанного с приемником, ослабление на первом аттенюаторе и уровень мощности сигнала при закрытом первом аттенюаторе и открытом втором, можно восстановить спектр ГШ, каким бы он был с учетом согласования, но без ослабления, а по вариациям формы спектра и степени ослабления также можно оценить погрешность определения этого спектра. Эта погрешность оказывается больше, чем при определении калибровочной функции по измерениям с чернотельной мишенью: медиана отклонения, посчитанного с достоверностью 95%, оказывается около 6% против 3% у калибровочной функции. Это связано с не совсем оптимальной методикой проведения измерений, в которой ошибка установки ручки второго аттенюатора могла влиять на рассчитанное ослабление первого. В дальнейшем этот источник ошибки можно устранить, но в целом и полученную погрешность можно считать приемлемой.

Измерения проводились для двух ГШ: ГШ1 и ГШ2, их согласованные без ослабления спектры сигналов, нормированные на калибровочную функцию, приведены на рис. 4 сплошными линиями, а полупрозрачные области определяют погрешности, включающие ошибку калибровочной функции и ошибку определения согласованного спектра ГШ. В принципе, спектр излучения обоих ГШ действительно довольно близок к плоскому, стандартное отклонение температуры излучения составляет порядка 10% для ГШ1 и 3% для ГШ2, что сопоставимо с точностью регистрации самих спектров. Средняя радиационная температура составляет 680 эВ для ГШ1 и 340 эВ для ГШ2. По абсолютной частоте выбранный диапазон отвечает 54.47 ± 0.8 ГГц.

Рис. 4. Температура излучения ГШ1 (синий) и ГШ2 (красный)...

Полученные данные также позволяют оценить величину ослабления, нужную для развязки ГШ и приемника. Она оказывается порядка 8 дБ и вычисляется как отношение

мощности согласованного без ослабления сигнала ГШ1, которая равна -8 дБм, и наибольшей мощности из интервала согласования, равной -16 дБм.

4. КАЛИБРОВКА СИСТЕМЫ ПРИЕМА CTS-СИГНАЛОВ ПО ГЕНЕРАТОРУ ШУМА

Для калибровки системы приема CTS-сигналов использовался ГШ2, поскольку его спектр оказался ближе к плоскому; ГШ подключался через волноводный переключатель, и таким образом его излучение проходило практически всю волноводную линию передачи диагностического комплекса. Линия передачи имеет длину 6 м, она набрана в основном из волновода сечением 10×23 мм² со вставками из волновода 1.8×3.6 мм², ее характеристика ослабления приведена на рис. 5. Ослабление довольно сильно меняется по частоте, но в среднем оно составляет около 8 дБ в диапазоне 54.47 ± 0.8 ГГц. Это ослабление делает проблематичной калибровку приемника с линией передачи по тепловому излучению, но зато обеспечивает развязку приемника и ГШ.

Рис. 5. Зависимость ослабления от промежуточной частоты, приведенная для волноводной линии системы приема CTS-сигнала.

Спектры ГШ, подключенного через диагностическую линию (рис. 1б), записывались осциллографом при разных установках аттенюатора. Поскольку линия передачи обеспечивает развязку приемника и ГШ, форма спектров уже не менялась от перестройки аттенюатора, поэтому калибровочная функция определялась по формуле $S_0(f)/d(a)$, где $S_0(f)$ – спектр, снятый при открытом аттенюаторе, а $d(a)$ – коэффициент ослабления аттенюатора в зависимости от его установки a , посчитанный по отношению средней спектральной мощности в диапазоне 0–800 МГц.

Таким образом, калибровочная функция задавалась для всех установок аттенюатора, однако возникла проблема воспроизводимости такой калибровочной функции при последовательных подключениях ГШ. На рис. 6 приведены калибровочные функции при открытом аттенюаторе, снятые в начале (темно-синий, сплошной), в середине (фиолетовый, пунктирный) и в конце (красный, штриховой) экспериментальной кампании 2024 г. Видно, что расхождение в определении чувствительности достигает трех раз, что свидетельствует о возможности ошибки порядка нескольких децибел.

Рис. 6. Калибровочные функции приемной системы с диагностической линией...

Также в конце кампании мы еще раз сняли спектры обоих ГШ при подключении к приемнику через аттенюатор по схеме с рис. 1г и прокалибровали их по сделанным ранее измерениям с чернотельной мишенью. Результат приведен на рис. 4 штриховыми линиями с подписями ГШ1(альт.) и ГШ2(альт.). Как видно, спектр остался таким же примерно плоским, но средние температуры совпали.

Вероятно, ошибка возникает из-за изменения режима работы ГШ в зависимости от того, что отражается в него из линии передачи, причем чувствительность к отражению оказывается довольно велика: судя по измерениям с подключением ГШ к приемнику, показанным на рис. 4, прибор чувствует даже отражения от соединений волноводов. Неожиданно, что эти отражения приводят к ошибке порядка нескольких децибел, но, по крайней мере, мы можем утверждать, что проведенная калибровка позволяет правильно оценить порядок величины температуры рассеянного излучения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе описана методика калибровки системы приема CTS-излучения на установке ГДЛ (ИЯФ СО РАН, Новосибирск). В основе методики лежит стандартный подход использования эталонных источников излучения для определения чувствительности приемной системы: в качестве источников использовались тепловое излучение черного тела и генератор шума АМФИТ-0,2/10-01, а приемная система включала линию передачи, волноводный аттенюатор, супергетеродинный приемник и цифровой осциллограф.

Главной особенностью использованной методики было то, что чувствительность определялась как функция промежуточной частоты, причем разрешение по частоте не фиксировалось аппаратно и могло гибко регулироваться. При этом для записи спектров теплового излучения и согласования приемника с генератором шума использовались особые техники. При работе с тепловым излучением накопление и усреднение слабого сигнала проводились после преобразования Фурье при помощи цифрового осциллографа. Для согласования анализировались спектры сигналов от излучения генератора шума, пропущенного через два независимых аттенюатора, и на основе этой информации восстанавливался спектр сигнала генератора с учетом согласования и калибровались аттенюаторы.

Итоговая точность калибровки оказалась порядка нескольких децибел из-за недостаточной развязки генератора шума и линии передачи. В дальнейшем точность может быть улучшена, однако и достигнутый результат имеет важное значение в контексте экспериментов по CTS-рассеянию на ГДЛ. Даже с имеющейся погрешностью можно констатировать, что наблюдаемая интенсивность рассеянного излучения в вакуумной камере заметно превышает теоретически ожидаемый уровень для CTS-рассеяния, что указывает на необходимость дальнейшего анализа физики рассеяния микроволноволн в плазме открытых ловушек [30].

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность Л. В. Лубяко, А. Г. Шалашову, Е. Д. Господчикову и коллективу ГДЛ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-72-20139.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bagryansky P.A., Shalashov A.G., Gospodchikov E.D. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. P. 205001. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.114.205001>
2. *Bagryansky P.A., Gospodchikov E.D., Kovalenko Y.V. et al.* // Fusion Sci. Technol. 2015. V. 68. P. 87. <https://doi.org/10.13182/fst14-864>

3. *Bagryansky P.A., Anikeev A.V., Denisov G.G. et al.* // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. P. 053009.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/5/053009>
4. *Yakovlev D.V., Shalashov A.G., Gospodchikov E.D. et al.* // Nucl. Fusion. 2018. V. 58.
P. 094001. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aacb88>
5. *Simonen T.C.* // J. Fusion Energy. 2016. V. 35. P. 63.
<https://doi.org/10.1007/s10894-015-0017-2>
6. *Bagryansky P.A., Beklemishev A.D., Postupaev V.V. et al.* // J. Fusion Energy. 2019. V. 38. P.
162. <https://doi.org/10.1007/s10894-018-0174-1>
7. *P.A. Bagryansky, E.D. Gospodchikov, A.A. Ivanov et al.* // Plasma and Fusion Research. 2019.
V. 14. P. 2402030. <https://doi.org/10.1585/pfr.14.2402030>
8. *Bagryansky P.A., Chen Z., Kotelnikov I.A. et al.* // Nucl. Fusion. 2020. V. 60. № 3.
P. 036005. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab668d>
9. *Gota H., Binderbauer M.W., Tajima T. et al.* // Nucl. Fusion. 2021. V. 61. № 10.
P. 106039. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac2521>
10. *Yakovlev D., Chen Z., Bagryansky P. et al.* // Nucl. Fusion. 2022. V. 62. № 7. P. 076017.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac5224>
11. *Сковородин Д.И., Черноштанов И.С., Амиров В.Х. и др.* // Физика плазмы. 2023.
Т. 49. № 9. С. 831. <https://doi.org/10.31857/S0367292123600322>
12. *Endrizzi D., Anderson J.K., Brown M. et al.* // J. Plasma Phys. 2023. V. 89. № 5.
P. 975890501. <https://doi.org/10.1017/S0022377823000806>
13. *Шеффилд Дж.* Рассеяние электромагнитного излучения в плазме. Москва: Атомиздат,
1978.
14. *Moseev D., Salewski M., Garcia-Muñoz M., Geiger B., Nocente M.* // Rev. Mod. Plasma Phys.
2018. V. 2. P. 7. <https://doi.org/10.1007/s41614-018-0019-4>
15. *Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., Khusainov T.A., Lubyako L.V., Smolyakova O.B.,
Solomakhin A.L.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2020. V. 62. № 6. P. 065010.
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab83cc>
16. *Шалашов А. Г., Господчиков Е.Д., Лубяко Л.В., Хусаинов Т.А., Соломахин А.Л., Викторов
М.Е.* // Известия вузов. Радиофизика. 2022. Т. №5–6. С. 353.
https://doi.org/10.52452/00213462_2022_65_05_353
17. *Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., Khusainov T.A., Lubyako L.V., Solomakhin A.L., Yakovlev
D.V.* // Phys. Plasmas. 2022. V. 29. № 29. P. 080702. <https://doi.org/10.1063/5.0101751>
18. *Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., Lubyako L.V., Khusainov T.A., Shmigelsky E.A.,
Soldatkina E.I., Solomakhin A.L.* // Phys. Plasmas. 2024. V. 31. № 12. P. 122506.
<https://doi.org/10.1063/5.0234887>

19. *Ivanov A.A., Prikhodko V.V. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2013. V. 55. № 6. P. 063001. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/55/6/063001>*
20. *Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., Khusainov T.A., Lubyako L.V., Solomakhin A.L., Viktorov M.E. // J. Instrum. 2021. V. 16. P. P07007. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/07/P07007>*
21. *Лубяко Л.В., Шалашов А.Г., Андриянов А.Ф., Божков В.Г., Господчиков Е.Д., Дорожкина Д.С. // Известия вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 5. С. 373. https://doi.org/10.52452/00213462_2021_64_05_373*
22. *Лубяко Л.В., Шалашов А.Г., Архипцевс Ф.Ф., Геннеберг В.А., Яковлев Д.В., Соломахин А.Л. // ПТЭ. 2018. № 1. С. 78. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32619930> <https://doi.org/10.7868/S0032816218010226>*
23. *Божков В.Г., Геннеберг В.А., Куркан К.И. и др. // Электронная промышленность. 1993. № 9. С. 88.*
24. *Suvorov E.V., Holzhauser E., Kasperek W. et al (W7-AS Team, ECRH Team and NBI Team). // Plasma Phys. Control. Fusion. 1997. V. 39. P. B337. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/39/12B/026>*
25. *Лубяко Л.В., Суворов Е.В., Буров А.Б., Штанюк А.М., Дрягин Ю.А., Кукин Л.М., Скалыга Н.К. // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 8. С. 54. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21319522>*
26. *Stejner M., Nielsen S.K., Korsholm S.B. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. № 10. P. 10D515. <https://doi.org/10.1063/1.3475540>*
27. *Furtula V., Salewski M., Leipold F. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. № 1. P. 013507. <https://doi.org/10.1063/1.3675886>*
28. *Moseev D., Stejner M., Stange T. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. № 1. P. 013503. <https://doi.org/10.1063/1.5050193>*
29. *Deng W.C., Shi Z.B., Shi P.W. et al. // J. Instrum. 2022. V. 17. P. C02006. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/C02006>*
30. *Shalashov A.G., Suvorov E.V., Lubyako L.V., Maassberg H., W7-AS Team. // Plasma Phys. Controlled Fusion. 2003. V. 45. P. 395. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/45/4/306>*

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема системы приема и записи сигналов: **а** – принципиальная схема приемника и подключение цифрового осциллографа, **б** – различные варианты оборудования, подключающегося к приемнику для CTS-эксперимента, **в** – калибровки по чернотельной мишени, **г** – калибровки генератора шума.
- Рис. 2.** Калибровочная функция для системы приемник–осциллограф, определенная по спектру сигнала теплового излучения (синяя сплошная линия), и шумовая температура приемника, отнесенная к его входу (красная штриховая линия). Полупрозрачной заливкой показана погрешность полученных функций для достоверности 95%.
- Рис. 3.** Зависимость искажения формы спектра $\delta\bar{S}$ (темно-синяя сплошная линия) и ослабления, вносимого при полном закрытии первого аттенюатора (красная штриховая линия), от мощности записанного сигнала ГШ1.
- Рис. 4.** Температура излучения ГШ1 (синий) и ГШ2 (красный). Сплошными линиями показаны спектры, записанные в начале кампании, штриховой линией – в конце. Полупрозрачной заливкой показана погрешность полученных функций, определенная с достоверностью 95%.
- Рис. 5.** Зависимость ослабления от промежуточной частоты, приведенная для волноводной линии системы приема CTS-сигнала. Зависимость считалась как отношение спектров сигналов ГШ2: при прямом подключении к приемнику через аттенюатор с ослаблением 11 дБ, обеспечивающим согласование, и при подключении через линию и аттенюатор с тем же ослаблением.
- Рис. 6.** Калибровочные функции приемной системы с диагностической линией, определенные по спектру сигнала ГШ2 в начале (темно-синий, сплошной), в середине (фиолетовый, пунктирный) и в конце кампании (красный, штриховой)

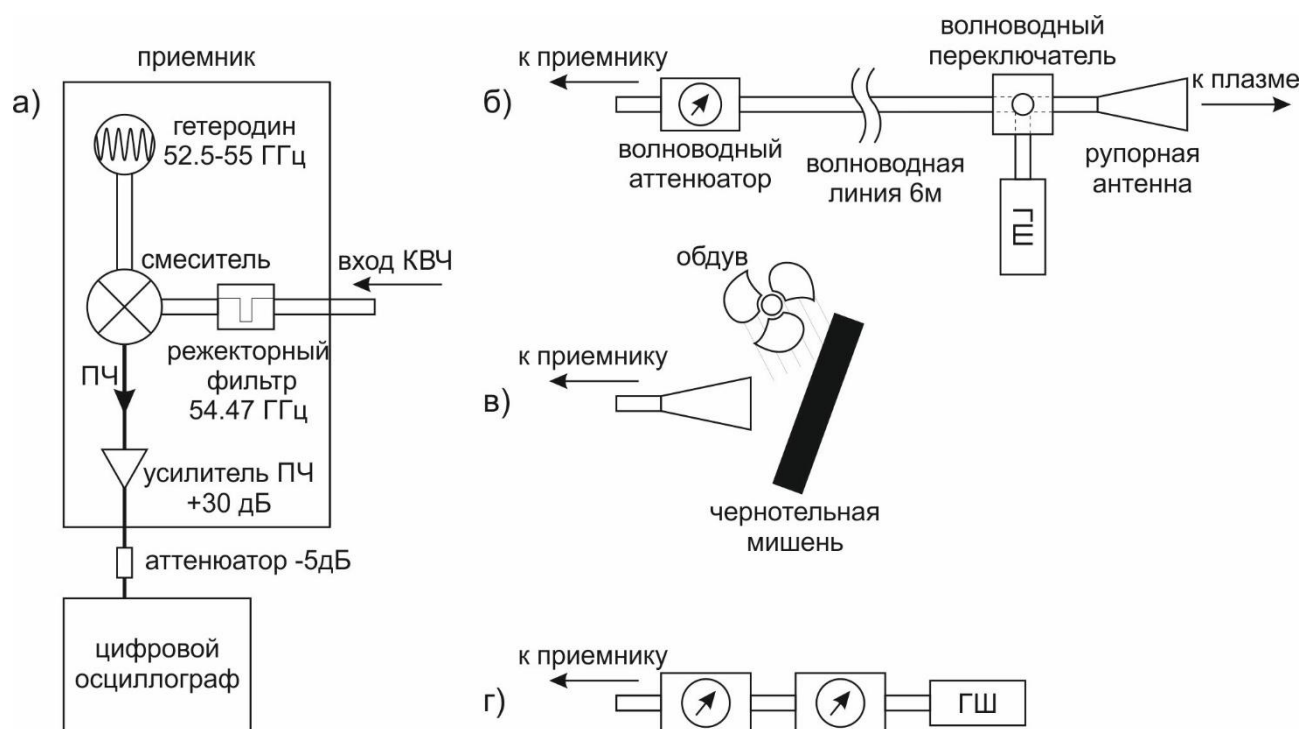


Рис. 1.

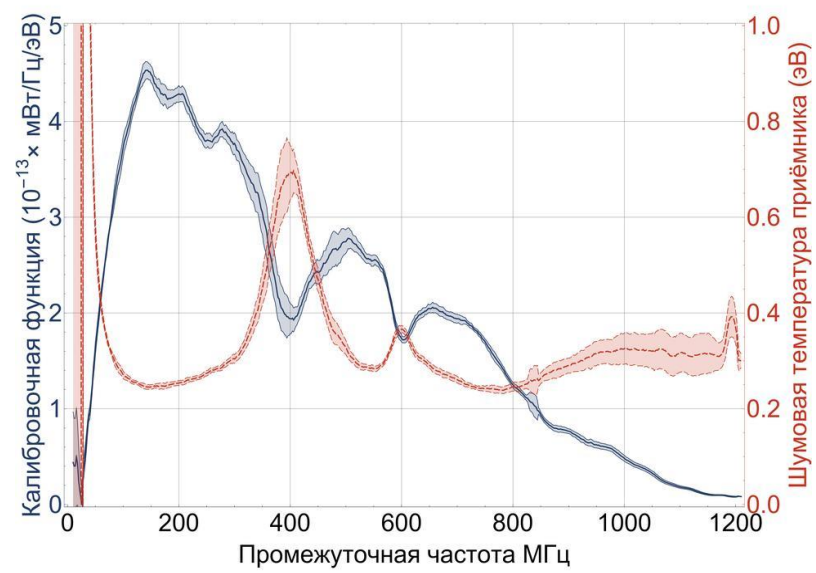


Рис. 2.

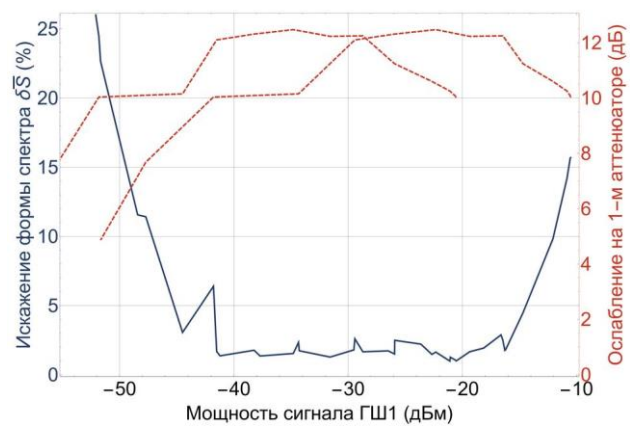


Рис. 3.

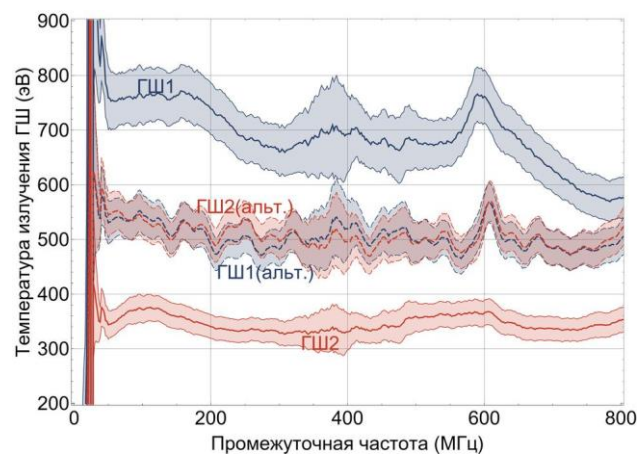


Рис. 4.



Рис. 5.

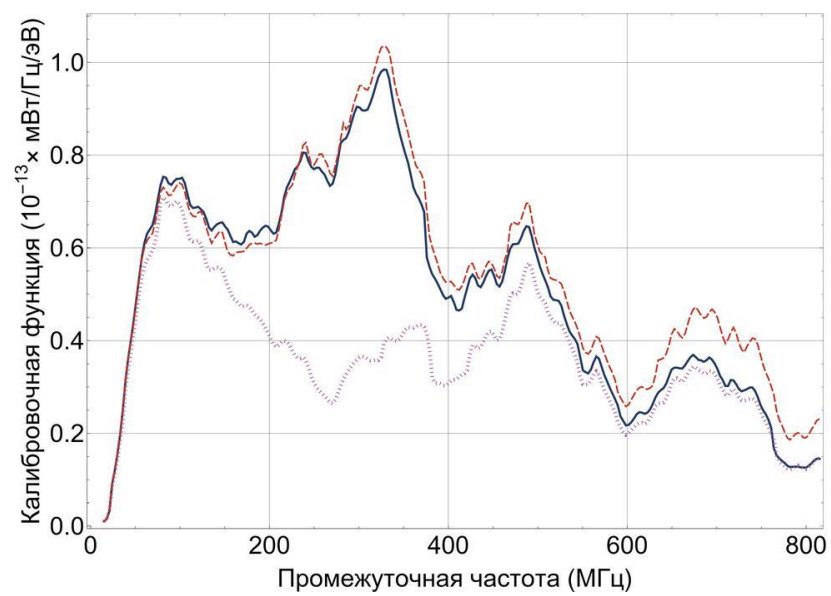


Рис. 6.