

Научная статья

УДК 621.314.26; 537.8.029

DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-23-33

Спектральная характеристика балансного смесителя для гетеродинной диагностики в окрестности частоты 0,3 ТГц

**Денис Алексеевич Самцов, Евгений Сергеевич Сандалов
Андрей Васильевич Аржанников, Петр Валерьевич Калинин**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия
d.a.samtsov@inp.nsk.su

Аннотация

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера проводятся исследования по генерации мультимегаваттных потоков излучения в интервале частот 0,1–1 ТГц. В настоящее время, исходя из перспективы практического использования таких потоков излучения, данные работы сосредотачиваются на локальной частотной области 0,3 ТГц. Для детального исследования потока излучения с высоким спектральным разрешением в этой локальной области частот нами создается радиометрическая диагностика на основе гетеродинного метода регистрации сигнала с высоким временным разрешением. Ключевой составляющей такой частотно-селективной диагностики высокого разрешения служит балансный смеситель, который обеспечивает получение сигнала на частоте, равной разности частот исследуемого и опорного сигналов. В представляемой работе описаны результаты характеристики балансного смесителя, который поставляется компанией МВЭйв для использования потребителями в интервале частот 0,2–0,3 ТГц. Спектральные измерения проведены в окрестности частоты 0,3 ТГц в условиях, когда исследуемый сигнал и опорный сигнал поступают на входы смесителя в виде потоков излучения по квазиоптическим трактам. Частота исследуемого сигнала, подаваемого от лампы обратной волны, варьировалась в пределах от 288 до 294 ГГц. Опорный сигнал на эталонной частоте 290,85 ГГц генерировался диодом Ганна. В проведенных измерениях доказан линейный характер зависимости частоты разностного сигнала от разницы частот сигналов, подаваемых на входы смесителя, в пределах изменения отстройки от +4 до –2 ГГц. Разрешающая способность по частоте гетеродина с данным балансным смесителем оказалась на уровне не хуже 0,1 %.

Ключевые слова

терагерцевое излучение, радиометрическая диагностика, гетеродинирование, квазиоптическое приборостроение

Финансирование

Часть исследования, посвященная созданию гетеродинной системы регистрации излучения в окрестности частоты 300 ГГц выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №25-22-00317).

Благодарности

Авторы выражают признательность сотрудникам Центра коллективного пользования научным оборудованием «Высокие технологии и аналитика наносистем» НГУ за предоставленное измерительное оборудование.

Для цитирования

Самцов Д. А., Сандалов Е. С., Аржанников А. В., Калинин П. В. Спектральная характеристика балансного смесителя для гетеродинной диагностики в окрестности частоты 0,3 ТГц // Сибирский физический журнал. 2025. Т. 20, № 3. С. 23–33. DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-23-33

The Spectral Characterization of a Balanced Mixer for the Heterodyne Diagnostics in the Vicinity of the 0.3 THz

Denis A. Samtsov, Yevgeny S. Sandalov, Andrey V. Arzhannikov,
Petr V. Kalinin

Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

d.a.samtsov@inp.nsk.su

Abstract

The Budker Institute of Nuclear Physics is conducting research on the generation of multi-megawatt radiation fluxes in the frequency range of 0.1–1 THz. Currently, based on the prospects for practical use of such radiation fluxes, this work is focused on a local region of 0.3 THz, which corresponds to a wavelength of 1 mm. To study the radiation flux in this local frequency range in detail with high spectral resolution, we are developing a radiometric diagnostic system based on a heterodyne method for signal recording with high temporal resolution. One of the key components of this frequency-selective diagnostic system is a balanced mixer, which must generate a signal at a frequency equal to the difference between the frequency of the signal being studied and the reference frequency of the reference signal. This paper describes the characterization results of a balanced mixer supplied by MWave for use in the frequency range of 0.2–0.3 THz. Measurements were conducted around 0.3 THz with the working and reference signals supplied as radiation beams through quasi-optical paths. The working signal frequency varied from 288 to 294 GHz. The reference signal at a reference frequency of 290.85 GHz was provided by a Gunn diode. The measurements demonstrated the linearity of the difference signal frequency dependence on the frequency difference between the signals supplied to its two inputs. The frequency resolution of the local oscillator with this balanced mixer was found to be no worse than 0.1%.

Keywords

Terahertz radiation, radiometric diagnostics, heterodyning, quasi-optical instrumentation

Funding

The work was supported by the Russian Science Foundation (project 25-22-00317).

Acknowledgement

The authors acknowledge the Shared Equipment Center CKP “VTAN” (ATRC) of the NSU Physics Department for instrumental support of THz measurements.

For citation

Samtsov D. A., Sandalov E. S., Arzhannikov A. V., Kalinin P. V. The spectral characterization of a balanced mixer for the heterodyne diagnostics in the vicinity of the 0.3 THz. *Siberian Journal of Physics*, 2025, vol. 20, no. 3, p. 23–33. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-23-33

Введение

В настоящее время в России и мире ведутся активные исследования, направленные на освоение области частот 0,1–1 ТГц, что проявляется как в разработке источников, так и систем регистрации такого излучения. Источники терагерцевого излучения находят применение в различных областях физики и оказываются востребованы для задач анализа структуры композитных материалов, локализации пространственных областей с высоким разрешением, диагностики плазмы, неразрушающего контроля непроводящих материалов [1]. Одним из направлений, для которого важны именно источники высокой мощности, оказывается задача нагрева плазмы электрон-циклотронного резонанса (ЭЦР) [2]. Отметим, что наибольший прогресс в создании источников излучения мегаваттного уровня мощности в данном частотном диапазоне достигнут на устройствах гиротронного типа. Требуемая частота таких систем зависит от индукции магнитного поля в плазме и лежит в интервале 90–300 ГГц, верхняя граница которого имеет тенденцию к смещению в область более высоких значений [3–6]. При этом сохраняется тенденция увеличения рабочей частоты и выходной мощности таких приборов. Так, например, в проекте ИТЕР будут использованы устройства с рабочей частотой 170 ГГц [4], а в будущих проектах Российского токамака ТРТ [5; 6] и Китайского ДЕМО [7] рассматривается использование гиротронов на частотах 240 ГГц, 300 ГГц и более.

Одновременно с развитием программы по созданию генераторов типа гиротрон осуществляются исследования новых подходов к формированию сверхмощных (≥ 10 МВт) импульсов излучения субмиллиметровой области спектра. В том числе исследования новых методов генерации такого излучения проводятся в ИЯФ СО РАН [9–12]. Исследования по генерации излучения в широком спектральном интервале субмиллиметрового излучения осуществляются на основе механизма взаимодействия сильнотоочного релятивистского электронного пучка с плазмой и трансформации электронных плазменных колебаний, накачиваемых этим пучком, в направленный поток электромагнитного излучения [9; 10]. Результаты данных исследований, полученные на установке ГОЛ-ПЭТ, свидетельствуют о возможности формирования в пучково-плазменной системе направленного потока излучения с характерным уровнем мощности в импульсе масштаба 10 МВт [11]. В настоящее время эти исследования направлены на реализацию генерации излучения в окрестности 0,3 ТГц, что достигается увеличением плотности плазмы до значений $(0,5\text{--}1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [12; 13]. Кроме того, в ИЯФ реализуется проект лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на базе пучка электронов высокой яркости, генерируемого в линейном индукционном ускорителе (ЛИУ) [14; 15]. Такой пучок релятивистских электронов, поступающий в ЛСЭ от ЛИУ с током масштаба одного килоампера, осуществит эффективную накачку в электродинамической системе лазера электромагнитных колебаний, которые обеспечат генерацию потока излучения с суб-гигаваттным уровнем мощности [14]. Для генерации потока излучения на частоте 0,3 ТГц с узким спектром при такой импульсной мощности в ЛСЭ необходимо использовать электродинамическую систему с поперечным размером, на порядок величины превышающем длину волны генерируемого излучения [14]. В этих условиях для селекции мод электромагнитных колебаний используют двумерные брэгговские отражатели (см. [15]). Для понимания механизма генерации излучения в условиях селекции мод при высоком уровне мощности генерируемого потока важно реализовать регистрацию спектрального состава излучения, когда оно поступает в виде потока, распространяющегося в свободном пространстве.

В связи с этими обстоятельствами весьма актуальной задачей становится создание системы радиометрических диагностик для регистрации потоков излучения высокой мощности в частотной области около 0,3 ТГц [16; 17]. С одной стороны, это обеспечит детальное исследование механизма для генерации потоков излучения, формируемых в пучково-плазменной системе, и позволит достигнуть оптимальных условий для этого процесса. С другой стороны, верно и обратное, измерения параметров излучения открывают возможность восстановить параметры плазмы в области формирования этих потоков излучения. С целью обеспечить возможность проведения измерений спектрального состава излучения, генерируемого в экспериментах на установках ИЯФ СО РАН, с высоким разрешением как по частоте, так и во времени, было принято решение о создании гетеродинной диагностики на основе существующих в свободном доступе терагерцевых приборов [17; 18]. Ключевым элементом такой гетеродинной диагностики становится балансный смеситель, способный функционировать в указанном частотном диапазоне. В качестве возможного варианта был использован балансный смеситель, изготовленный компанией МВЭйв, с рабочим диапазоном 0,2–0,3 ТГц. Кратко отметим принцип работы балансного смесителя. Данное устройство предназначено для преобразования частоты сигнала с одновременным эффективным подавлением паразитных составляющих. На вход устройства подаются два сигнала. Далее происходит их смешение, в результате чего образуются новые комбинационные частоты, главными из которых являются сигналы на частотах, соответствующих разнице и сумме частот исходных сигналов. Преимущество балансного смесителя заключается в том, что образующиеся в процессе смешения паразитные гармоники значительно подавляются, благодаря чему на выходе смесителя можно регистрировать полезный сигнал на разностной частоте при минимальном уровне паразитных составляющих. Измерениям спектральных характеристик балансного смесителя в окрестности частоты 300 ГГц

в условиях квазиоптического способа подвода к его двум входам потоков излучения и посвящена данная работа.

Статья состоит из введения, где обоснована актуальность и обозначены задачи проводимой работы. Далее приведено описание измерительного стенда, где проводились испытания и измерения балансного смесителя, а также обозначены особенности проводимых измерений. Затем будут приведены результаты измерений спектральных характеристик смесителя и обозначены предельные параметры в случае его использования в гетеродинной диагностике. И наконец, в заключении будет проведено обобщение результатов испытаний смесителя и анализа измеренных в ходе этих испытаний его спектральных характеристик.

Измерительный стенд

Как уже отмечалось, главная цель проводимых экспериментальных исследований состояла в характеристизации спектральных характеристик балансного смесителя в случае, когда он используется в рамках квазиоптической схемы подачи на него рабочего и опорного сигналов. Схема проводимых измерений представлена на рис. 1.

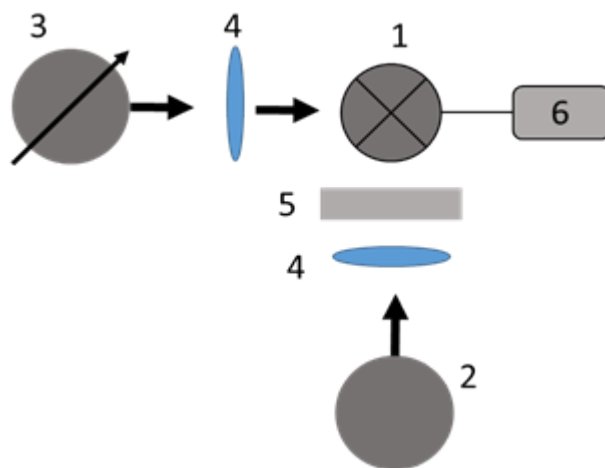


Рис. 1. Схема измерений характеристик балансного смесителя:

1 – балансный смеситель; 2 – гетеродинный генератор сигнала на постоянной частоте; 3 – перестраиваемый генератор ТГц-излучения; 4 – фторопластовая линза для формирования потока; 5 – «серый» ослабитель потока; 6 – приемник сигнала на разностной частоте

Fig. 1. Scheme of the experiment to measure the characteristics of a balanced mixer:

1 – balanced mixer; 2 – heterodyne signal generator at a constant frequency; 3 – tunable THz radiation generator; 4 – teflon lens to form radiation flux; 5 – wideband flux attenuator; 6 – receiver of the difference signal

Измерения спектральных характеристик смесителя проводились на специализированном стенде, который создан на базе квазиоптического субтерагерцевого ЛОВ-спектрометра в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Высокие технологии и аналитика наносистем» (ЦКП «ВТАН») Новосибирского государственного университета. Фотография этого стенда, адаптированного для проведения измерений в условиях подачи рабочего и опорного сигнала с помощью потоков излучения в рамках квазиоптической схемы их распространения, представлена на рис. 2.

Как показано на рис. 2, для подачи сигналов на вход смесителя (1) использовались два источника излучения. С одной стороны, подавался сигнал фиксированной частоты от опорного эталонного источника (2), а с другой – сигнал от источника с варьируемой частотой (3). В качестве эталонного источника (2) излучения на фиксированной частоте применялся твердотель-

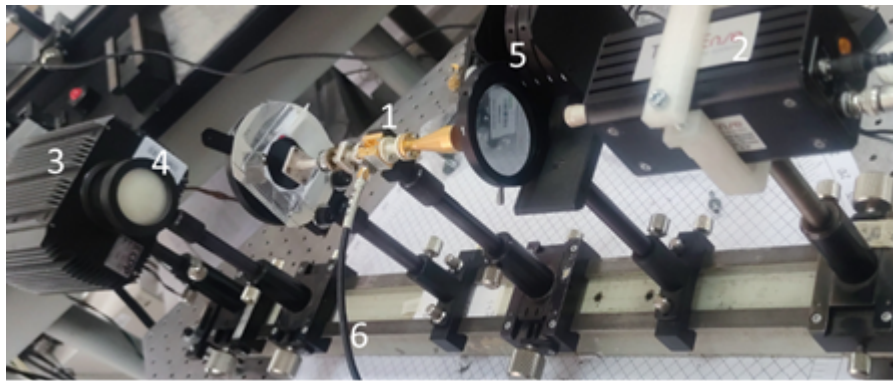


Рис. 2. Фотография стенда для измерения характеристик балансного смесителя:

- 1 – балансный смеситель; 2 – гетеродинный генератор сигнала на постоянной частоте;
3 – перестраиваемый генератор ТГц-излучения на основе лампы обратной волны (ЛОВ);
4 – фторопластовая линза; 5 – «серый» ослабитель потока; 6 – вывод к осциллографу с шириной полосы 4 ГГц
- Fig. 2. Photograph of the experimental stand to measure the characteristics of a balanced mixer:
1 – balanced mixer; 2 – heterodyne signal generator at a constant frequency; 3 – tunable THz radiation generator based on a backward-wave tube (BWT); 4 – teflon lens; 5 – wideband flux attenuator; 6 – output to oscilloscope with a bandwidth of 4 GHz

ный генератор, в котором использован диод Ганна на заданную частоту 290,85 ГГц с выходной мощностью 10 мВт. Источником потока ТГц-излучения с варьируемой частотой (3) в окрестности 0,3 ТГц служила лампа обратной волны (ЛОВ) модели OV-32. Характерный уровень мощности этой лампы имел величину около 1 мВт. Отметим, что в совокупности набор ЛОВ на использованном стенде позволяет обеспечить генерацию излучения в интервале частот 0,05–1 ТГц при характерном уровне мощности от 1 до 10 мВт. Излучение от обоих указанных выше генераторов выходило в свободное пространство в виде расходящегося квазигауссового пучка и далее распространялось в воздухе в рамках квазиоптической схемы. При распространении в пространстве каждый из этих двух пучков трансформировался с использованием фторопластовых линз (4), установленных на фокусном расстоянии от источников излучения, в пучок параллельных лучей. Эти лучи далее поступали на два противоположных входа балансного смесителя (1), который располагался посередине между выходом источника излучения фиксированной частоты и выходом источников излучения варьируемой частоты. Дополнительно в области прохождения потока излучения от генератора фиксированной частоты устанавливался «серый» аттенюатор (5), который понижал мощность этого потока до необходимого уровня 1 мВт, соответствующего уровню мощности потока излучения от генератора с варьируемой частотой. Потоки излучения, приходящие с противоположных сторон на входы смесителя, принимались рупорами и далее направлялись на кристалл полупроводника, где происходило их смешение. Разностный сигнал балансного смесителя записывался во времени при помощи осциллографа (6) модели Keysight MXR 104 A с шириной полосы регистрации аналогового сигнала 4,2 ГГц.

Измерения спектральных характеристик балансного смесителя

Измерения спектральных характеристик балансного смесителя были проведены в условиях подачи опорного и рабочего сигналов в виде потоков излучения по квазиоптической схеме, описанной выше. Измерения осуществлялись путем регистрации сигнала разностной частоты, поступающего на осциллограф от балансного смесителя при варьировании частоты ЛОВ в пределах 289–294 ГГц с шагом 0,5 ГГц. Все осциллограммы этих сигналов были записаны в режиме накопления данных по 16 отсчетам в течение времени записи данного сигнала.

На рис. 3. приведены осциллограммы разностного сигнала, поступающего от балансного смесителя (а), и спектральный состав разностного сигнала, полученный по процедуре разложения на Фурье-компоненты этого сигнала, представленного на осциллограммах (б). Представленные сигналы относятся к трем величинам частоты ($f_1 = 288,85$ ГГц, $f_2 = 291,85$ ГГц, $f_3 = 293,85$ ГГц) излучения, поступающего от ЛОВ, и эти величины указаны на рисунке по результатам их отсчетов на шкале генератора.

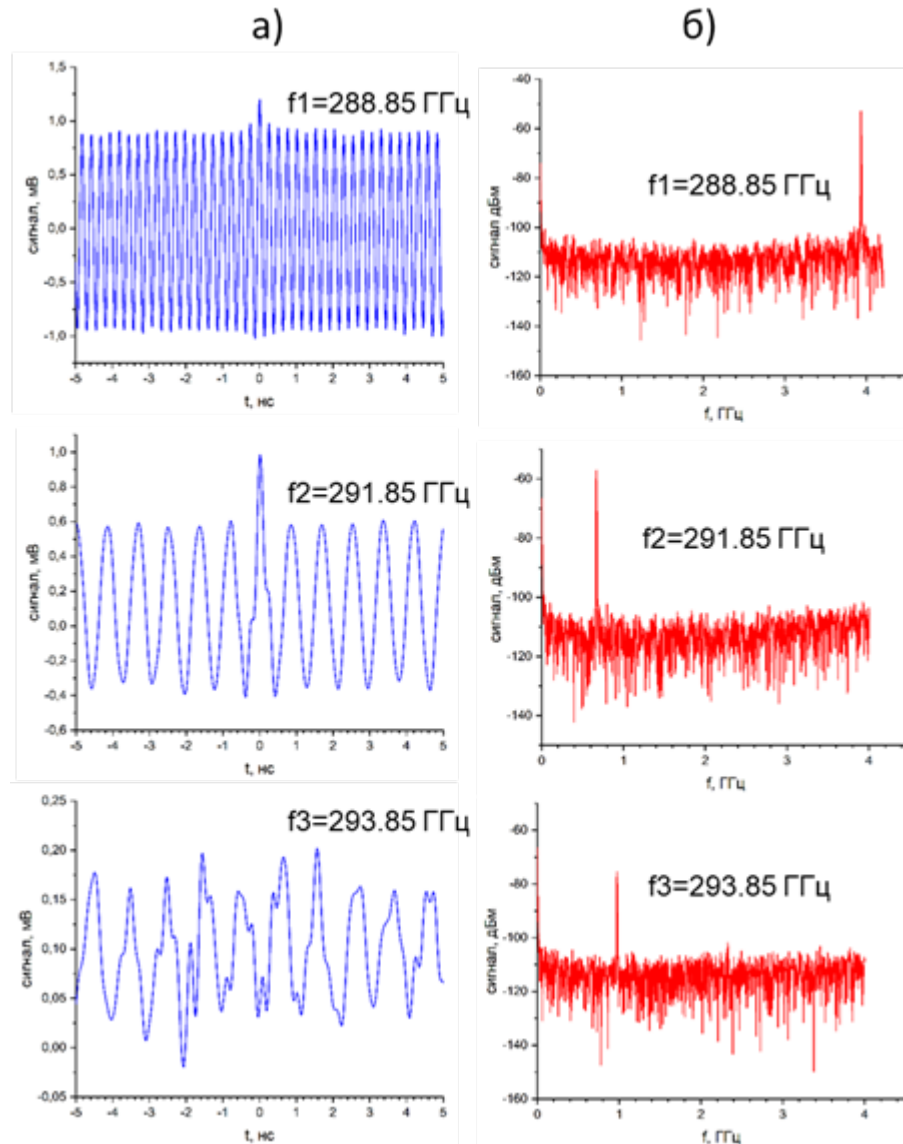


Рис. 3. Изменение во времени сигнала разностной частоты (а), поступающего в осциллограф от балансного смесителя при различной частоте потока излучения, подаваемого от ЛОВ, и представление этого сигнала в пространстве частот, полученном в результате применения преобразования Фурье (б)

Fig. 3. The change over time of the difference frequency signal from the balanced mixer (а) measured by the oscilloscope at different frequencies of the radiation flux supplied by the BWO, and its representation in the frequency space obtained as a result of the Fourier transform (б)

Как видно из представленных на данном рисунке результатов, сигнал на разностной частоте вполне надежно регистрируется в условиях подачи потоков излучения от эталонного источ-

ника и источника с перестраиваемой частотой по квазиоптическим трактам. При этом все же следует отметить, что совпадение частот обоих источников излучения (соответственно, нулевое значение разностной частоты) наблюдается при выставлении на шкале генератора, использующего ЛОВ, величины частоты $f_{\text{BWO}} = 292,5$ ГГц, в то время как частота опорного сигнала, указанная в паспорте источника с фиксированной частотой, имеет величину $f_0 = 290,85$ ГГц. По-нашему мнению, это различие в показаниях величины частоты генерируемого излучения, отсчитываемой на этих двух генераторах согласно их документации, вызвано недостаточной точностью линии калибровки зависимости фактической частоты генерации данной ЛОВ от величины напряжения, прикладываемого к ее ускоряющему промежутку.

В ходе варьирования частоты потока излучения, генерируемого ЛОВ, была получена зависимость частоты разностного сигнала (Δf) от значения частоты этого потока (f_{BWO}), которая выставлялась в специализированной программе управления ЛОВ путем варьирования напряжения, прикладываемого к ЛОВ. Величина подаваемого на лампу напряжения измерялась цифровым вольтметром, который обеспечил точность отсчетов на уровне 1 %. Полученная по такой процедуре обработки результатов измерений зависимость частоты разностного сигнала от частоты потока излучения, генерируемого ЛОВ, представлена на рис. 4.

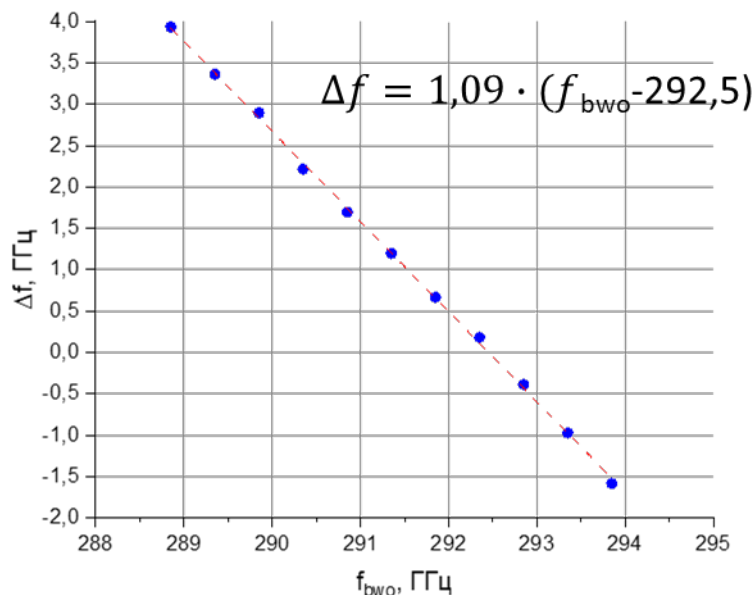


Рис. 4. Зависимость частоты разностного сигнала Δf от частоты потока излучения f_{BWO} поступающего от ЛОВ

Fig. 4. Dependence of the difference signal frequency Δf on the frequency of the radiation flux f_{BWO} from the BWT

Отметим, что регистрация поступающего от балансного смесителя сигнала разностной частоты позволяет получить информацию только об абсолютной величине значения разницы частот без указания того, в каком из поступающих на смеситель потоков частота излучения имеет частоту выше другого. Поэтому в ходе проведения измерений частота ЛОВ варьировалась монотонно, а знак разностной частоты выбирался вручную исходя из того, растёт ли частота разностного сигнала при увеличении частоты ЛОВ или уменьшается. Синие точки на графике соответствуют отдельным измерениям во время опытов. Полученная зависимость величины разностной частоты от варьiruемой частоты излучения, поступающего от ЛОВ, имеет линейную зависимость, которая аппроксимируется аналитическим выражением следующего вида: $\Delta f = 1,09 \cdot (f_{\text{BWO}} - 292,5)$. Таким образом, по результатам испытаний было об-

наружено, что совпадение частот излучения наблюдается при подаче к ЛОВ напряжения, соответствующего частоте 292,5 ГГц, при значении частоты излучения от опорного генератора постоянной частоты 290,85 ГГц. Такое расхождение относительно значений частот мы связываем с неточностью калибровочной зависимости частоты генерации данной ЛОВ от подаваемого напряжения на ее анод.

Дополнительно с целью оценить разрешающую способность будущей гетеродинной диагностики на базе испытанного смесителя был проведен анализ спектров разностного сигнала, полученных при различной величине отстройки между генераторами. На рис. 5 приведены результаты измерений спектральной ширины линии на уровне полувысоты (δf) для различных величин разностной частоты (Δf).

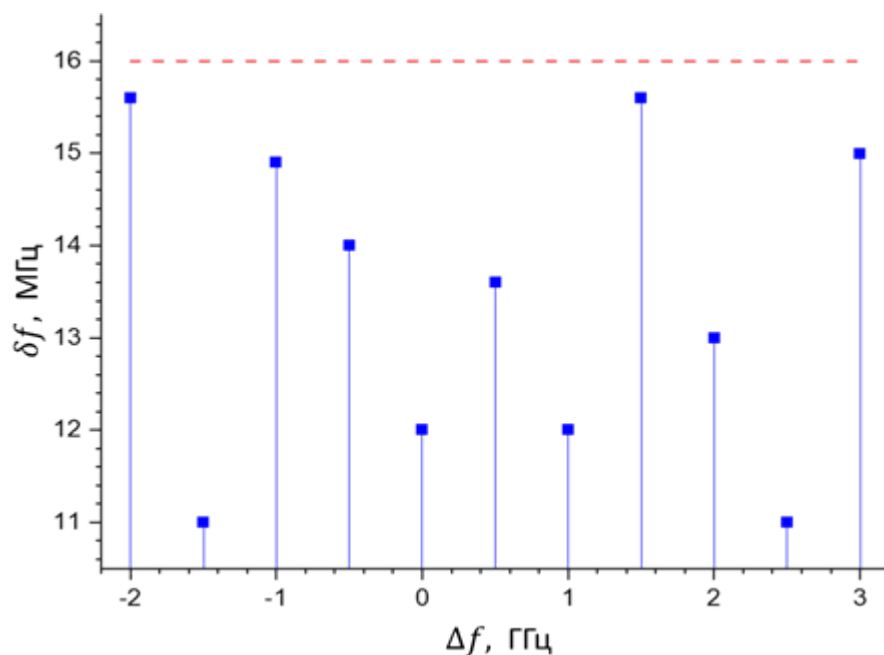


Рис. 5. Ширина спектральной линии (δf) на разностной частоте при различной частоте отстройки между ЛОВ и эталонным источником излучения (Δf)

Fig. 5. A width of the spectral lines (δf) at the difference frequency (Δf) for different detuning frequencies between the BWO and the heterodyne radiation source

Как видно из графика, для всего набора спектров, полученных в ходе испытания смесителя, ширина спектральной линии на полувысоте для измеренного сигнала не превышала величины 16 МГц, исходя из чего можно заключить, что собственная, предельная разрешающая способность балансного смесителя в области частот 288–294 ГГц имеет масштаб $6 \cdot 10^{-2} \%$.

Заключение

Проведены испытания балансного смесителя для диапазона частот 220–330 ГГц с целью определить возможность его использования для создания гетеродинной диагностики с высоким спектральным разрешением. В ходе проведения испытаний показана возможность получения устойчивого сигнала со смесителя на разностной частоте в случае транспортировки потоков электромагнитного излучения через свободное пространство тракты, т. е. без использования протяженных волноводных структур. С одной стороны, данный результат позволит в ближайшее время реализовать гетеродинную диагностику для проведения измерений спектральных

характеристик излучения в частотной области 287–295 ГГц, генерируемого в экспериментах на специализированных установках в ИЯФ. С другой стороны, квазиоптический метод транспортировки потоков излучения к смесителю оставляет возможность изменения рабочей области диагностики путем замены эталонного источника излучения без необходимости полной переборки диагностики. Также в ходе испытаний показано, что гетеродинная диагностика на основе данного смесителя может обеспечить разрешение по частоте на уровне 16 МГц.

Таким образом, проведенные испытания позволили убедиться в надежности балансного смесителя и генератора на постоянной частоте для создания на их основе гетеродинной диагностики с высоким спектральным разрешением в условиях транспортировки излучения через квазиоптический тракт.

Список литературы

1. **Dhillon S. S., Vitiello M. S., Linfield E. H. et al.** The 2017 terahertz science and technology roadmap // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017. Vol. 50. No. 4. P. 043001. DOI 10.1088/1361-6463/50/4/043001
2. **Thumm M. K. A., Denisov G. G., Sakamoto K., Tran M. Q.** High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // *Nuclear Fusion*. 2019. Vol. 59. No. 7. P. 073001. DOI 10.1088/1741-4326/ab2005
3. **Litvak A. G., Denisov G. G., Glyavin M. Y.** Russian Gyrotrons: Achievements and Trends // *IEEE Journal of Microwaves*. 2021. Vol. 1. No. 1. P. 260–268. DOI 10.1109/JMW.2020.3030917
4. **Ikeda R., Kajiwara K., Nakai T. et al.** Progress on performance tests of ITER gyrotrons and design of dual-frequency gyrotrons for ITER staged operation plan // *Nuclear Fusion*. 2021. Vol. 61. No. 10. P. 106031. DOI 10.1088/1741-4326/ac21f7
5. **Belousov V. I., Denisov G. G., Shmelev M. Y.** System of Electron Cyclotron Heating at the TRT Tokamak. // *Plasma Phys. Rep.* 2021. Vol. 47. P. 1158–1168. <https://doi.org/10.1134/S1063780X21110143>
6. **Ananichev A. A., Fokin A. P., Kuftin A. N. et al.** Experimental Study of a Short-Pulse Prototype Megawatt-Power 230-GHz Gyrotron for the TRT Tokamak // *IEEE Electron Device Letters*. 2025. Vol. 46. No. 11. P. 2142–2144. DOI 10.1109/LED.2025.3604060
7. **Denisov G., Kuftin A., Manuilov V. et al.** Concept design of the megawatt power level gyrotron stabilized by a low-power signal for DEMO project // *Nuclear Fusion*. 2022. Vol. 62. No. 3. P. 036020. DOI 10.1088/1741-4326/ac4946
8. **Kariya T., Minami R., Imai T. et al.** Development of high power gyrotrons for advanced fusion devices // *Nuclear Fusion*. 2019. Vol. 59. No. 6. P. 066009. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab0e2c>
9. **Arzhannikov A. V., Timofeev I. V.** *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2012. Vol. 54(10). P. 105004. DOI 10.1088/0741-3335/54/10/105004
10. **Аржанников А. В., Тимофеев И. В.** Интенсивное пучково-плазменное взаимодействие как источник субмиллиметрового излучения // *Вестник НГУ. Серия Физика*. 2016. Т. 11, № 4. С. 78–104. DOI 10.54362/1818-7919-2016-11-4-78-104
11. **Arzhannikov A. V., Sinitsky S. L., Popov S. S. et al.** Energy content and spectral composition of a submillimeter radiation flux generated by a high-current electron beam in a plasma column with density gradients // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2022. Vol. 50. No. 8. P. 2348–2363. DOI 10.1109/TPS.2022.3183629
12. **Arzhannikov A. V., Sinitsky S. L., Samtsov D. A. et al.** The Frequency Spectrum and Energy Content in a Pulse Flux of Terahertz Radiation Generated by a Relativistic Electron Beam in a Plasma Column with Different Density Distributions // *Plasma Phys. Rep.* 2024. Vol. 50. P. 331–341. <https://doi.org/10.1134/S1063780X24600051>
13. **Аржанников А. В., Сеницкий С. Л., Старостенко Д. А. и др.** Пучково-плазменный генератор ТГц-излучения на основе индукционного ускорителя (проект ЛИУ-ПЭТ) //

- Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18 (1). С. 28–42. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-1-28-42
14. **Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Arzhannikov A. V. et al.** Kiloampere Electron Beam of a Linear Induction Accelerator as a Driver for a Submillimeter Free Electron Laser // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2023. Vol. 87. P. 573–579. <https://doi.org/10.3103/S1062873822701763>
 15. **Peskov N. Y., Ginzburg N.S., Zaslavskiy V. Yu. et al.** Oversized modified Bragg cavities for high-power long-pulse subterahertz Free-Electron Lasers // *Radiophysics and Quantum Electronics.* 2020. Vol. 63. P. 440–448. <https://doi.org/10.1007/s11141-021-10069-9>
 16. **Samtsov D. A., Kalinin P. V., Sandalov E. S.** Project of heterodyne detector at 300 GHz frequency and spectral properties of its main elements // *Proceedings of the 14th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, 2025.* 12 p.
 17. **Самцов Д. А., Аржанников А. В., Калинин П. В. и др.** Комплекс радиометрических диагностик для излучения диапазона 0,1–1 ТГц при его генерации в процессе пучково-плазменного взаимодействия // *Сб. тез. докладов 21-й конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» (XXI ДВП-2025), 2025.* С. 245–246.
 18. **Матрозова Е. А., Ревин Л. С.** Исследование интегрального гармонического смесителя на основе ВТСП джозефсоновского перехода // *Журнал радиоэлектроники.* 2025. №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.5>

References

1. **Dhillon S. S., Vitiello M. S., Linfield E. H. et al.** The 2017 terahertz science and technology roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, vol. 50, no. 4, pp. 043001. DOI 10.1088/1361-6463/50/4/043001
2. **Thumm M. K. A., Denisov G. G., Sakamoto K., Trans M. Q.** High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive. *Nuclear Fusion*, 2019, vol. 59, no. 7, pp. 073001. DOI 10.1088/1741-4326/ab2005
3. **Litvak A. G., Denisov G. G., Glyavin M. Y.** Russian Gyrotrons: Achievements and Trends. *IEEE Journal of Microwaves*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 260–268. DOI 10.1109/JMW.2020.3030917
4. **Ikeda R., Kajiwara K., Nakai T. et al.** Progress on performance tests of ITER gyrotrons and design of dual-frequency gyrotrons for ITER staged operation plan. *Nuclear Fusion*, 2021, vol. 61, no. 10, p. 106031. DOI 10.1088/1741-4326/ac21f7
5. **Belousov V. I., Denisov G. G., Shmelev M. Y.** System of Electron Cyclotron Heating at the TRT Tokamak. *Plasma Phys. Rep.*, 2021, vol. 47, pp. 1158–1168. <https://doi.org/10.1134/S1063780X21110143>
6. **Ananichev A. A., Fokin A. P., Kuftin A. N., et al.** Experimental Study of a Short-Pulse Prototype Megawatt-Power 230-GHz Gyrotron for the TRT Tokamak. *IEEE Electron Device Letters*, 2025, vol. 46, no. 11, pp. 2142–2144. DOI 10.1109/LED.2025.3604060
7. **Denisov G., Kuftin A., Manuilov V. et al.** Concept design of the megawatt power level gyrotron stabilized by a low-power signal for DEMO project. *Nuclear Fusion*, 2022, vol. 62, no. 3, pp. 036020. DOI 10.1088/1741-4326/ac4946
8. **Kariya T., Minami R., Imai T. et al.** Development of high power gyrotrons for advanced fusion devices. *Nuclear Fusion*, 2019, vol. 59, no. 6, pp. 066009. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab0e2c>
9. **Arzhannikov A. V., Timofeev I. V.** Plasma Physics and Controlled Fusion, 2012, vol. 54(10), 105004. DOI 10.1088/0741-3335/54/10/105004
10. **Arzhannikov A. V., Timofeev I. V.** Intense beam-plasma interaction as a source of submillimeter radiation. *Bulletin of NSU. Physics Series*, 2016, vol. 11, no. 4, pp. 78–104. DOI 10.54362/1818-7919-2016-11-4-78-104 (in Russ.)

11. **Arzhannikov A. V., Sinitsky S. L., Popov S. S. et al.** Energy content and spectral composition of a submillimeter radiation flux generated by a high-current electron beam in a plasma column with density gradients. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2022, vol. 50, no. 8, pp. 2348–2363. DOI 10.1109/TPS.2022.3183629.
12. **Arzhannikov A. V., Sinitsky S. L., Samtsov D. A. et al.** The Frequency Spectrum and Energy Content in a Pulse Flux of Terahertz Radiation Generated by a Relativistic Electron Beam in a Plasma Column with Different Density Distributions. *Plasma Phys. Rep.*, 2024, vol. 50, pp. 331–341. <https://doi.org/10.1134/S1063780X24600051>
13. **Arzhannikov A. V., Sinitsky S. L., Starostenko D. A. et al.** Beam-plasma generator of THz radiation based on an induction accelerator (LIU-PET project). *Siberian Physical Journal*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 28–42. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-1-28-42 (in Russ.)
14. **Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Arzhannikov A. V. et al.** Kiloampere Electron Beam of a Linear Induction Accelerator as a Driver for a Submillimeter Free Electron Laser. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2023, no. 87, pp. 573–579. <https://doi.org/10.3103/S1062873822701763>
15. **Peskov N. Y., Ginzburg N. S., Zaslavskiy V. Yu. et al.** Oversized modified Bragg cavities for high-power long-pulse subterahertz Free-Electron Lasers. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2020, vol. 63, pp. 440–448. <https://doi.org/10.1007/s11141-021-10069-9>
16. **Samtsov D. A., Kalinin P. V., Sandalov E. S.** Project of heterodyne detector at 300 GHz frequency and spectral properties of its main elements. *Proceedings of the 14th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement*, 2025, 12 p.
17. **Samtsov D. A., Arzhannikov A. V., Kalinin P. V. et al.** Complex of radiometric diagnostics for radiation in the range of 0.1-1 THz during its generation in the process of beam-plasma interaction. *Collection of abstracts of reports of the 21st conference Diagnostics of High-Temperature Plasma (XXI DVP-2025)*, 2025, pp. 245–246. (in Russ.)
18. **Matrozova E. A., Revin L. S.** Study of an integrated harmonic mixer based on a HTSC Josephson junction. *Journal of Radio Electronics*, 2025, no. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.5> (in Russ.)

Сведения об авторах

Самцов Денис Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Сандалов Евгений Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Аржанников Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник

Калинин Петр Валерьевич, научный сотрудник

Information about the Authors

Denis A. Samtsov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher

Yevgeny S. Sandalov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher

Andrey V. Arzhannikov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Chief Researcher

Petr V. Kalinin, Researcher

Статья поступила в редакцию 04.12.2025;

одобрена после рецензирования 09.12.2025; принята к публикации 12.01.2026

The article was submitted 04.12.2025;

approved after reviewing 09.12.2025; accepted for publication 12.01.2026