

Принципы построения сверхмощных субтерагерцовых комплексов

Г.Г. Денисов, А.Н. Куфтин, М.Ю. Глявин

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Аннотация: представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований гиротронов, направленные на повышение частоты и мощности как отдельных приборов, так и на возможность создания сфазированных комплексов, состоящего из большого числа источников излучения. Описываются первые эксперименты по захвату частоты и фазы мегаваттного гиротрона с рабочей частотой 170 ГГц сигналом гиротрона-драйвера.

Ключевые слова: гиротрон, мощность, частота генерации, спектр излучения, внешний сигнал, захват частоты

1. Введение

Существует ряд актуальных научных задач, требующих разработки сверхмощных источников электромагнитного излучения в частотном диапазоне 0.1-1 ТГц. Для этих задач предлагается использовать гироприборы, которые обладают уникальным сочетанием таких параметров как мощность, эффективность, спектральные характеристики, стоимость и размеры [1,2]. Наиболее востребованными важными приложениями являются комплексы для новых установок УТС, источники для перспективных терагерцовых ускорителей частиц, комплексы для беспроводной передачи энергии на удаленные наземные и космические объекты. Для указанных приложений комплексы из десятков (а может быть тысяч) мегаваттных гиротронов-генераторов необходимо захватить по частоте и синхронизовать с помощью стабилизированного по частоте гиротрона-драйвера. В выполненных работах впервые в мире продемонстрирован захват частоты мегаваттного гиротрона внешним стабилизированным сигналом с мощностью 10-20 кВт. Также впервые в мире показана возможность стабилизации частоты до 10^{-12} относительно мощного гиротрона (20 кВт) системой фазовой автоподстройки. Такая высокая стабильность обеспечивает определенность взаимных фаз гиротронов на значительных расстояниях. Захват колебаний [3,4] позволяет повысить КПД приборов, дает принципиальную возможность создания эффективных мегаваттных субтерагерцовых (0.2-0.5 ТГц) гиротронов, необходимых для электронно-циклотронных систем плазменных установок УТС нового поколения. Например, в проекте ДЕМО планируется использование 50-60 непрерывных гиротронов с частотой около 230 ГГц и КПД не менее 60%.

Исследование ускорения с высоким градиентом, заметно превышающим достигнутые на сегодня в классических ускорителях дециметрового и сантиметрового диапазонов значение ~ 100 МВ/м, является важнейшей и актуальной задачей современной ускорительной физики. Высокие ускоряющие поля предполагается получать в системе мегаваттного субтерагерцового гиротрона с захваченной фазой и компрессора импульсов. Требуемая мощность источника составляет сотни мегаватт при длительности импульса порядка наносекунды. Для ускорителя требуется комплекс из десятков таких источников со стабильностью фазы в несколько градусов.

Измумляющие масштабами комплексы сфазированных гиротронов для передачи энергии с Земли до двигателей ракет представлены в проектах научных групп США (1000 гиротронов) и Японии (98000 гиротронов). Диапазон частот гиротронов 140 –

170 ГГц, мощность 2 МВт, длительности импульсов 20-100 секунд. Взаимные фазы разных приборов должны обеспечивать возможность создания антенно-фазовой решетки размеров в сотни метров. Эти проекты казались абсолютно нереальными до предложений и экспериментов сотрудников ИПФ РАН по захвату колебаний гиротронов внешним сигналом, стабилизации частоты и фазы гиротрона: Важно отметить, что направленная передача даже меньшей мощности на более скромные расстояния (10-1000 км) также актуальна и для других приложений.

Целью настоящей работы является представление результатов, полученных в ходе выполнения проекта РНФ “Принципы построения сверхмощных субтерагерцовых комплексов”

2. Испытания гиротрона со встроенным квазиоптическим преобразователем, работающим с модами разного вращения

Для того чтобы иметь возможность ввести в рабочее пространство гиротрона внешний сигнал для захвата частоты колебаний, что повышает КПД генератора вследствие подавления конкурирующих мод, был разработан и изготовлен оригинальный квазиоптический преобразователь [5]. Схема преобразователя изображена на рисунке 1а, а на фото (Рис.1б) хорошо видны окна ввода-вывода мощности и последняя пара зеркал.

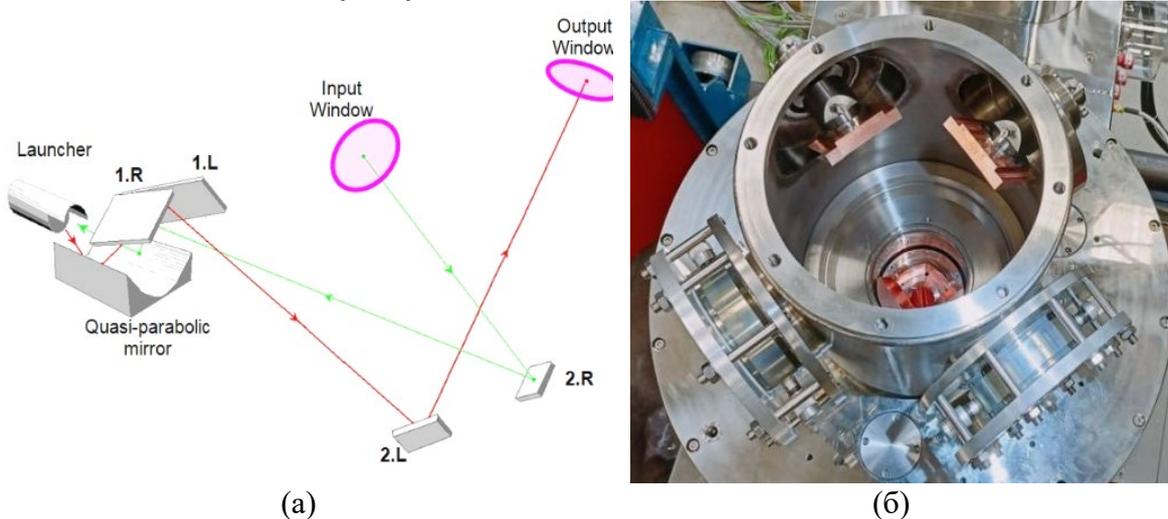


Рисунок 1. Схема (а) и фото (б) квазиоптического преобразователя и вакуумных окон. На первом этапе установлены окна из нитрида бора, рассчитанные на импульсный режим работы

Экспериментальный стенд состоял из двух гиротронных систем, соединенных линией передачи микроволнового излучения и аппаратурой измерения характеристик излучения. Стенд гиротрона-драйвера [6] – источника входного сигнала (25 кВт) использовался для эксперимента по стабилизации частоты гиротрона. Стенд оборудован высоковольтным источником питания (25 кВ, 3 А), работающем в импульсном и непрерывном режимах. Магнитное поле создается системой JASTEC, состоящей из источника питания и сухого сверхпроводящего магнита на 10 Тесла с диаметром теплового отверстия 100 мм. Стенд мегаваттного гиротрона оборудован высоковольтным источником питания (115 кВ, 70 А), работающем в импульсном режиме с длительностью импульса 100 мкс и частотой повторения 5 Гц. Рабочая мода гиротрона на частоте 170 ГГц – TE_{28.12}. Гиротрон может также работать на модах TE_{27.12} (частота 167 ГГц) и TE_{29.12} (частота 173 ГГц). Магнитное поле создается системой JASTEC, состоящей из источника питания и сухого сверхпроводящего магнита на 7 Тесла с диаметром теплового отверстия 140 мм.

Для эксперимента по захвату частоты изготовлена и смонтирована

комбинированная линия передачи (рис. 2), состоящая из двух квазиоптических участков (внутри гиротронных стендов) и протяженного (около 20 метров) волноводного участка между стендами (стенды расположены в разных помещениях).

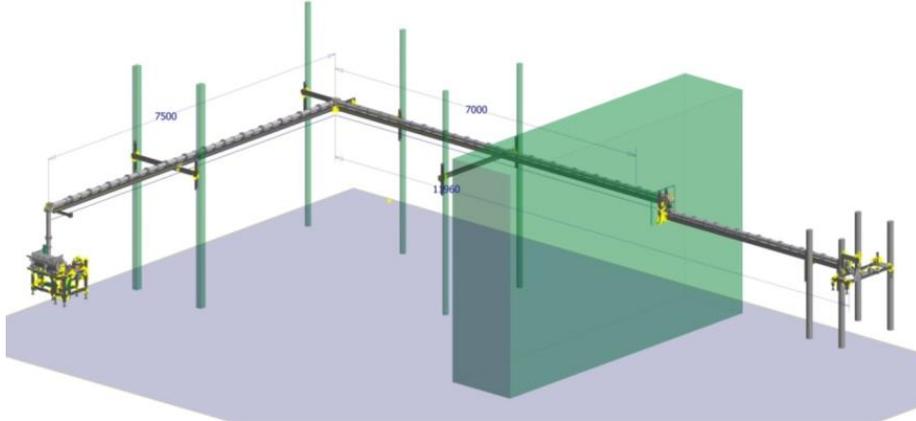


Рисунок 2. Схема комбинированной линии передачи и фото части элементов тракта

Волноводная линия состоит из пяти уголков, обеспечивающих поворот излучения на 90° и полуметровых отрезков (40 штук) круглых гофрированных волноводов с внутренним диаметром 63.5 мм. Параметры синусоидальной гофрировки рассчитаны на передачу волны HE₁₁ круглого волновода: период – 0,588 мм, глубина – 0,44 мм. Квазиоптический участок в стенде гиротрона-драйвера состоит из двух пар зеркал и calorиметрической нагрузки. Пары зеркал расположены на двух перемещающихся платформах и могут замещать друг друга. Первая пара используется для работы на calorиметрическую нагрузку в непрерывном режиме. Зеркала медные с водяным охлаждением. Вторая пара зеркал используется для работы на линию передачи с мегаваттным гиротроном в импульсном режиме. Работа на calorиметрическую нагрузку происходит при отработке режимов гиротрона-драйвера, и в эксперименте по стабилизации частоты. Квазиоптический участок в стенде мегаваттного гиротрона должен обеспечить ввод СВЧ излучения в окно гиротрона под требуемым углом к нормали окна (10° по горизонтали и $0-5^\circ$ по вертикали) и регулировку входящей мощности. Линия состоит из 4-х зеркал, поляризационной решетки и calorиметрической нагрузки.

Для обеспечения захвата частоты колебаний необходима достаточная близость частот гиротрона-драйвера и мегаваттного гиротрона. Для детального снятия характеристик захвата необходима регулируемая разность частот в диапазоне от -100 МГц до + 100 МГц. Мощность гиротрона-драйвера (в непрерывном режиме) достигает 20 кВт, КПД 34%, перестройка частоты температурой ($5 - 65^\circ\text{C}$) охлаждающей жидкости 130 МГц, электронная перестройка частоты (катодная катушка и напряжение) около 140 МГц, что соответствует требованиям к перестройке частоты.

Схема измерения спектров в эксперименте по захвату частоты показана на рисунке 3. Анализ спектров гиротрона-драйвера и МВт гиротрона проводился после смещения

на промежуточную частоту с помощью цифрового осциллографа с полосой 2 ГГц.

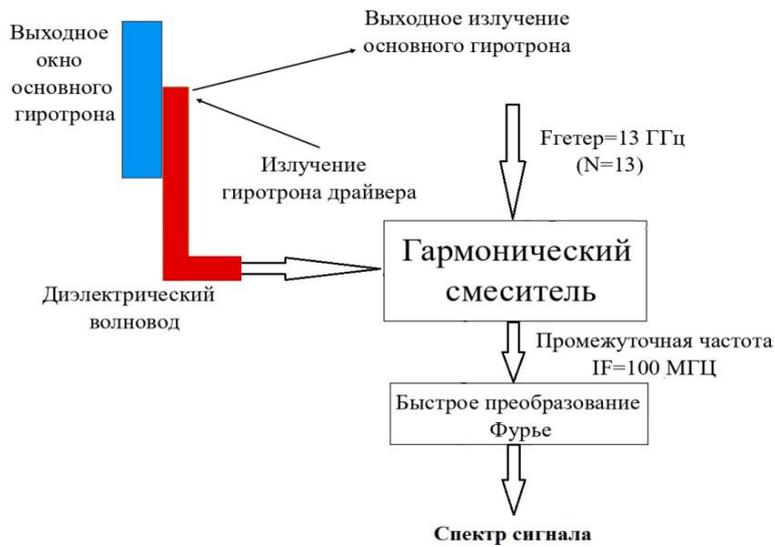


Рисунок 3. Блок-схема измерения спектров излучения

Проведены эксперименты по захвату частоты проведенны на уровне мощности основного гиротрона превышающем 1МВт (ток пучка 35 А, энергия электронов около 100 кэВ). Мощность сигнала драйвера составляла 20 кВт. При такой мощности драйвера эффект захвата наблюдался очень четко – зона захвата составляла более 0.5 % по основному магнитному полю при точности управления лучше 10^{-4} , 6-8 кВ по основному напряжению при точности управления лучше 0.5 кВ, в полосе частот 15-20 МГц (в зависимости от магнитного поля) при стабильности частоты мегаваттного гиротрона от импульса к импульсу около 2 МГц. При захвате спектр излучения мегаваттного гиротрона преобразовывался в спектр гиротрона-драйвера. Отмечено также расширение зоны генерации захваченного гиротрона по магнитному полю и увеличение диапазона перестройки частоты более двух раз.

На рисунке 4 показаны некоторые осциллограммы, соответствующие разным режимам работы.

4. Заключение.

В ходе выполнения проекта подтвердилась важность и актуальность разработки сверхмощных гиротронных комплексов. Наиболее востребованными важными приложениями являются комплексы для разрабатываемых установок УТС, источники для терагерцовых ускорителей частиц, комплексы для беспроводной передачи энергии на удаленные наземные и космические объекты. Для указанных приложений комплексы из десятков (а может быть сотен) мегаваттных гиротронов-генераторов необходимо захватить по частоте и синхронизовать с помощью стабилизированного по частоте [7] гиротрона-драйвера. Выполненные работы показали возможность стабилизации частоты системой фазовой автоподстройки, возможность разделения сигнала большой мощности на несколько (в том числе на большое число) каналов. Захват колебаний позволяет повысить КПД приборов, дает возможность создания эффективных мегаваттных субтерагерцовых гиротронов, необходимых для электронно-циклотронных систем плазменных установок УТС нового поколения и терагерцовых ускорителей. Очевидно, что использование большого числа гиротронов для ускорителей или в системах передачи энергии подразумевает их когерентность и необходимое фазирование. Такие возможности были впервые в мире экспериментально продемонстрированы в работе с 170 ГГц, 1 МВт гиротроном.

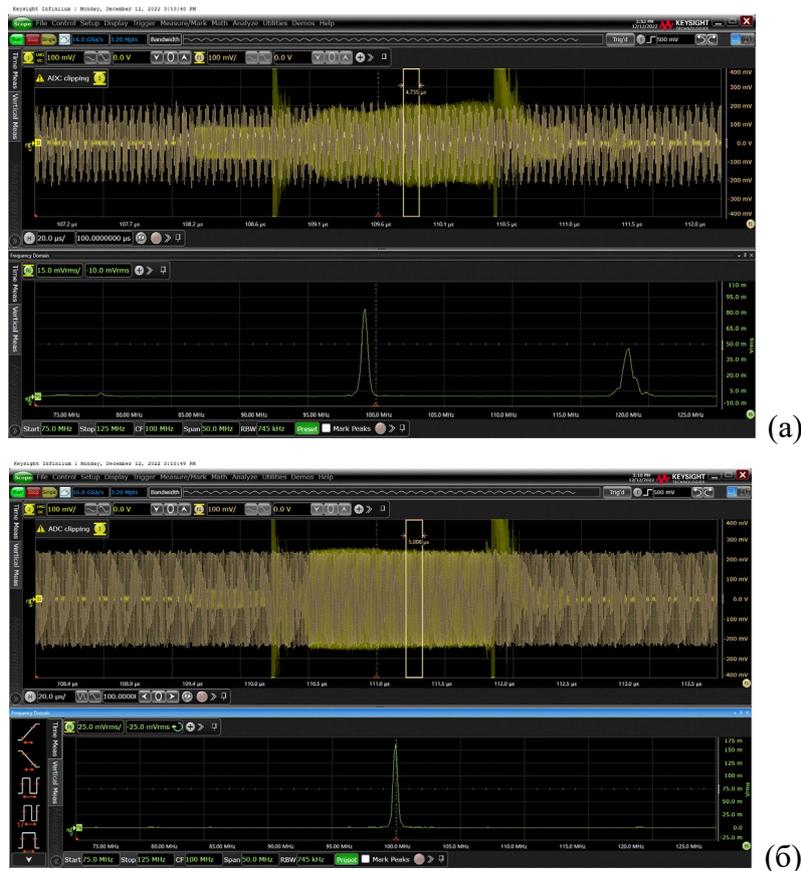


Рисунок 4. Осциллограммы и спектры сигналов драйвера (левее) и МВт гиротрона (справа) в режиме отсутствия захвата (большая разница частот 20 МГц). На осциллограмме видны биения частот драйвера и МВт гиротрона (а) Осциллограммы и спектры сигналов драйвера и МВт гиротрона (совпадают) в режиме захвата.

Работа выполнена при поддержке за счет гранта **Российского научного фонда (проект № 19-79-30071 П)**.

Список литературы

1. A. G. Litvak, G. G. Denisov and M. Y. Glyavin, “Russian Gyrotrons: Achievements and Trends”, *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 1, no. 1, pp. 260-268, Jan. 2021, <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030917>
2. M.Glyavin, *et al.* “Novel and Emerging Applications of the Gyrotrons Worldwide: Current Status and Prospects”. *Journal of Infrared, MM and THz Waves* 42, 7, 715–741 (2021) doi: 10.1007/s10762-021-00804-8
3. V.L.Bakunin, G.G.Denisov, Yu.V.Novozhilova. “Frequency and phase stabilization of a multi-mode gyrotron with megawatt power by an external signal”. *Tech. Phys. Lett.* 40, 382-385 (2014) doi:10.1134/S1063785014050034
4. S.P. Sabchevski, M.Yu. Glyavin, G.S. Nusinovich. “The Progress in the Studies of Mode Interaction in Gyrotrons”. *Journal of Infrared, MM, and THz Waves* 43, 1–47 (2022) doi: 10.1007/s10762-022-00845-7
5. A.V.Chirkov, G.G.Denisov, A.N.Kuftin. “Perspective gyrotron with mode converter for co-and counter-rotation operating mode” *Applied Physics Letters* **106** (26), 263501 (2015) doi: 10.1063/1.4923269
6. G.G.Denisov, *et al.* “Development of master oscillator for frequency locking of a complex of megawatt level microwave sources” *Microwave and Optical Technology Letters* **62**, 6, 2137-2143 (2020) doi: 10.1002/mop.32330
7. A. Fokin, *et al.* “High-power sub-terahertz source with a record frequency stability at up to 1 Hz”. *Sci Re* **8**, 4317 (2018). doi:10.1038/s41598-018-22772-1