

*Цветков А.И., Фокин А.П., Седов А.С.
Институт прикладной физики РАН*

Передача данных с использованием сигнала гиротрона в качестве несущего

В исследовании представлены результаты экспериментов, демонстрирующих возможность передачи данных с помощью гиротрона с частотой 0,26 ТГц и уровнем мощности до 1 кВт. Продемонстрирована передача аудиосигнала, а также псевдослучайной битовой последовательности со скоростью до 1,5 Мбит/с, используя амплитудную модуляцию излучения гиротрона путем управления анодным напряжением. В качестве модулирующего использовался сигнал аудиоманголы, а также генератора сигналов произвольной формы

Ключевые слова: гиротрон, терагерцовый диапазон, передача данных.

В настоящее время происходит активное продвижение от СВЧ диапазона в так называемый терагерцовый диапазон частот, который принято отсчитывать от 100 ГГц. Многочисленные приложения данного диапазона связаны с задачами спектроскопии высокого разрешения, обработки материалов, неразрушающего контроля, получения новых материалов с уникальными свойствами, с медицинскими исследованиями и другими перспективными направлениями. В частности, очень активно в научном сообществе обсуждается вопрос о продвижении систем связи и передачи информации в более высокочастотную область [1 – 5]. Передача данных на несущих частотах в субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах частот привлекательна по ряду причин, в том числе помехозащищенности и сложности условий перехвата. Однако одним из препятствий на пути к реализации подобных систем является отсутствие в этом диапазоне относительно мощных источников излучения, имеющих достаточные возможности управления выходными параметрами – мощностью и частотой.

В настоящей работе исследовались возможности передачи информации на несущей частоте порядка 0,26 ТГц, для чего в качестве источника сигнала использовался созданный в ИПФ РАН совместно с ЗАО НПП «Гиком» комплекс на основе 263 ГГц гиротрона [6, 7], который обеспечивает уровень выходной мощности до 1 кВт в непрерывном режиме генерации на основной гармонике гирочастоты. Прибор имеет встроенный квазиоптический преобразователь рабочей моды, обеспечивающий боковой вывод узконаправленного волнового пучка (содержание моды ТЕМ₀₀ более 93%) через вакуумное окно в горизонтальном направлении. Блок-схема такого прибора представлена на рис. 1 (слева).

Существуют различные подходы к управлению выходными параметрами гиротронов. В частности, в ряде экспериментов по стабилизации частоты гиротронов использовались схемы, в которых управление параметрами излучения осуществлялось за счет изменения напряжения на одном из электродов магнетронно-инжекторной пушки (МИП) прибора. При этом, например, в случае диодной МИП при управлении с помощью катодного напряжения необходимо за короткие характерные времена изменять параметры мощного высоковольтного источника, что существенно увеличивает его сложность и стоимость.

Более экономичным способом быстрого управления мощностью и частотой гиротрона является изменение напряжения на изолированном аноде, емкость которого сравнительно мала относительно других электродов. В этом случае энергия электронов, которая определяется потенциалом катода относительно резонатора, фиксирована, а изменение анодного напряжения влияет лишь на питч-фактор электронов (отношение скорости поперечного движения электронов к их продольной скорости). Изменение питч-фактора электронов сопровождается изменением как активной, так и реактивной составляющих проводимости винтового электронного пучка относительно рабочей моды резонатора. Вследствие этого изменяется как амплитуда автоколебаний, так и частота. Значение частоты при этом остается в пределах полосы, определяемой добротностью рабочей моды резонатора гиротрона.

МИП рассматриваемого гиротрона имеет триодную схему, что позволило добиться быстрого управления амплитудой выходного сигнала гиротрона путем изменения величины его анодного напряжения. Вследствие того, что одна из выходных клемм анодного источника питания заземлена, регулирующий элемент мог располагаться лишь между анодом гиротрона и потенциальным выходом анодного источника, иначе говоря, должен был находиться под потенциалом анодного напряжения величиной до нескольких киловольт (рис. 1).

Для модуляции анодного потенциала гиротрона использовался разработанный и изготовленный в ИПФ РАН блок быстрого управления высоким напряжением [8] (рис. 1) на основе высоковольтного импульсного тетрода ГМИ-83В в качестве регулирующего элемента. Управление тетродом осуществляется через аналоговую оптронную пару (излучатель - HFBR-1414; приемник - HFBR-2416) с помощью быстродействующего операционного усилителя К574УД1А. Для развязки по высокому напряжению используется оптическое волокно длиной 30 см. Блок управления позволяет регулировать анодное напряжение гиротрона на величину порядка 1 кВ при изменении управляющего сигнала от 0 до 10 В с линейностью около 5% за время менее 1 мкс.

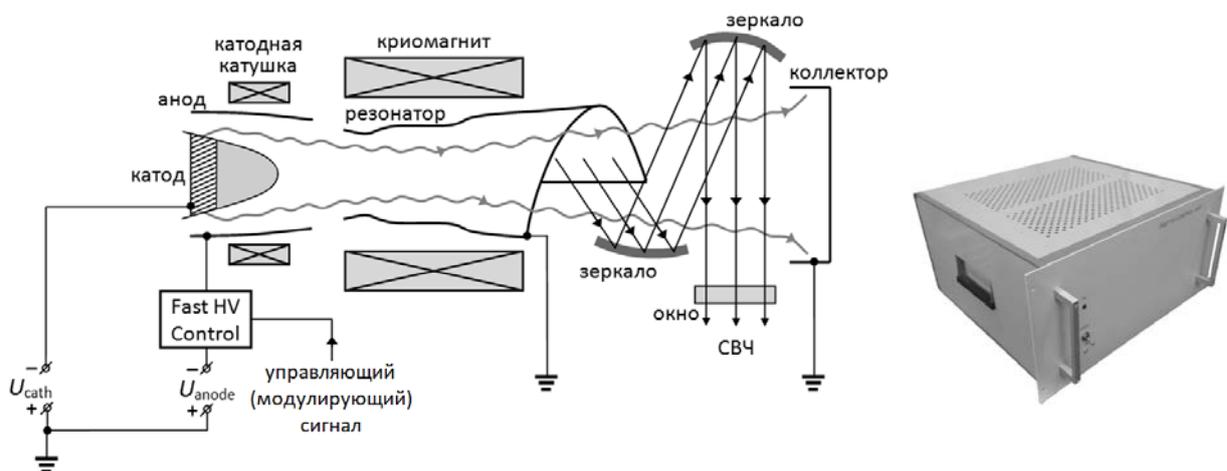


Рис.1. Слева – блок-схема гиротрона с боковым выводом излучения со схемой подключения блока быстрого управления анодным напряжением; справа – блок быстрого управления анодным напряжением

В качестве приемника излучения, а также для детектирования амплитудно-модулированного сигнала, использовался сверхбыстрый терагерцовый (50 ГГц – 0,7 ТГц) детектор производства компании TeraSense [9], установленный практически на пути распространения пучка излучения гиротрона на расстоянии около 1 м от вакуумного окна прибора. Напряжение на аноде гиротрона регистрировалось быстрым высоковольтным

пробником NorthStar PVM-5 [10]. Без ограничения общности демонстрационные эксперименты проводились на уровне мощности выходного излучения гиротрона около 50 Вт. Аналогичным образом управление параметрами данного гиротрона может осуществляться при любых уровнях выходной мощности вплоть до 1 кВт.

В первом эксперименте использовалась аудиоманитола, обеспечивающая уровень модулирующего управляющего сигнала в диапазоне 0 – 10 В. При этом сигнал терагерцового детектора подавался как на осциллограф, так и на усилитель звуковых частот с последующим выводом на громкоговоритель. Была продемонстрирована успешная аналоговая передача нескольких аудиозаписей. На рис. 2. представлены примеры осциллограмм соответствующих сигналов для части вокально-инструментальной композиции “Sultans of Swing” группы Dire Straits.

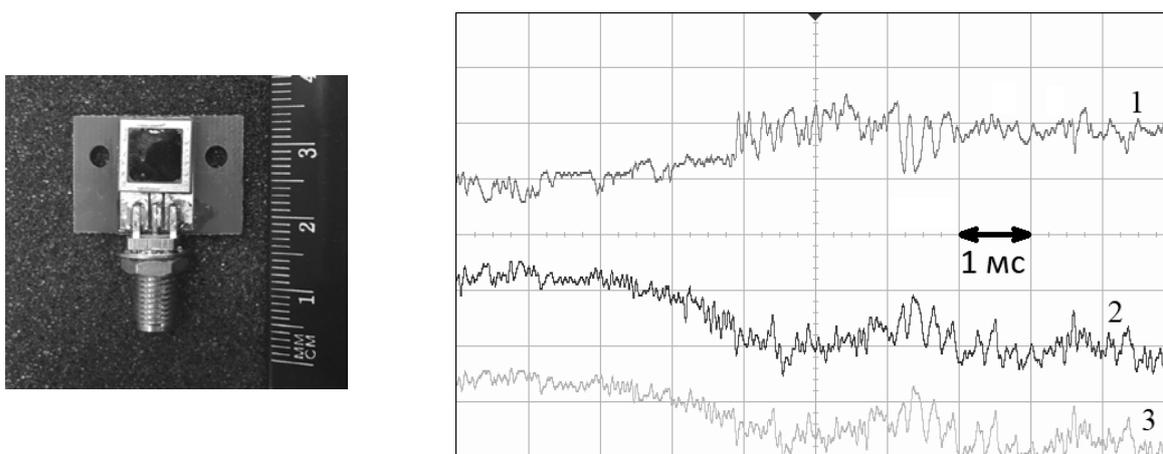


Рис.2. Слева: фотография сверхбыстрого ТГц детектора производства TeraSense; справа: осциллограммы сигнала терагерцового детектора (1), анодного напряжения (2), модулирующего сигнала звукового генератора (3)

На рис. 2 (справа) можно увидеть, что при некоторых значениях амплитуды несущего сигнала осциллограмма, полученная с терагерцового детектора, искажена по отношению к модулирующему сигналу. Это связано с нелинейностью крутизны регулирующего элемента блока управления анодным напряжением (особенно заметной вблизи 0 В сигнале управления) и в принципе может быть скомпенсировано выбором подходящего смещения управляющего сигнала.

Во втором эксперименте в качестве источника управляющего (модулирующего) сигнала использовался генератор сигналов произвольной формы Agilent 33521В. Была продемонстрирована передача цифрового сигнала – псевдослучайной битовой последовательности (пример осциллограммы представлен на рис. 3). При этом, также, как и в предыдущем эксперименте, использовалась простая амплитудная модуляция сигнала. До скорости передачи данных около 1,5 Мбит/с логические уровни принятого (детектированного) сигнала были хорошо разрешимы.

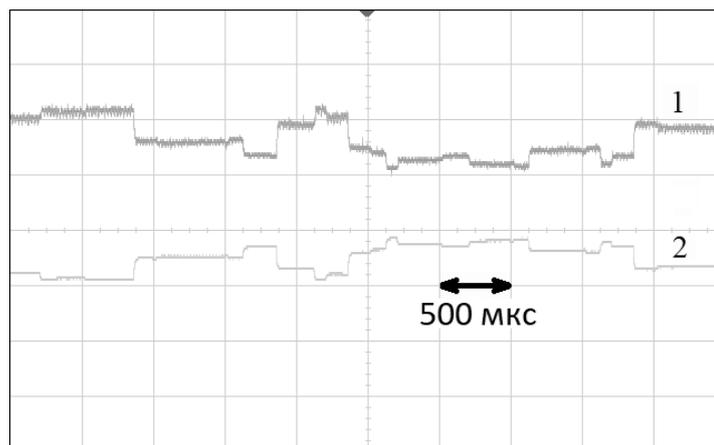


Рис.3. Псевдослучайная битовая последовательность: управляющий (модулирующий) сигнал генератора 33521В (1), сигнал терагерцового детектора (2).

Авторам представляется, что достигнутое значение скорости передачи данных далеко от принципиального предела и может быть увеличено путем уменьшения постоянной времени цепи питания анода, применения более сложных способов управления выходными параметрами гиротрона, использования более развитых схем цифровой модуляции сигналов, повышения мощности в канале передачи данных.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых, проект № МК-3452.2017.8

Библиографический список

1. J. Federici and L. Moeller, "Review of terahertz and subterahertz wireless communications," *Journal of Applied Physics*, 107, 111101 (2010).
2. T. Kleine-Ostmann and T. Nagatsuma, "A review on terahertz communications research," *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 32,143-171 (2011).
3. H.-J. Song and T. Nagatsuma, "Present and future of terahertz communications," *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, 1, 256-263 (2011).
4. T. Nagatsuma et al., "Terahertz wireless communications based on photonics technologies," *Opt. Express*, 21, 23736-23747 (2013).
5. T. Kürner and S. Priebe, "Towards THz communications-status in research, standardization and regulation," *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 35, 53-62 (2014).
6. Glyavin M.Y., Chirkov A.V., Denisov G.G., Fokin A.P., Kholoptsev V.V., Kuftin A.N., Luchinin A.G., Golubyatnikov G.Y., Malygin V.I., Morozkin M.V., et al. Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media // *Review of Scientific Instruments*, Vol. 86, No. 5, 2015. P. 054705.
7. Glyavin M.Yu., Morozkin M.V., Tsvetkov A.I., Lubyako L.V., Golubiatnikov G.Y., Kuftin A.N., Zapevalov V.E., Kholoptsev V.V., Ereemeev A.G., Sedov A.S., et al. Automated Microwave Complex on the Basis of a Continuous-Wave Gyrotron with an Operating Frequency of 263 GHz and an Output Power of 1 kW // *Radyophys. Quantum Electron*, Vol. 58, No. 9, Feb 2016. pp. 1-10.
8. A. Fokin, M. Glyavin, G. Golubiatnikov, L. Lubyako, M. Morozkin, B. Movshevich, A. Tsvetkov, G. Denisov. High-power sub-terahertz source with a record frequency stability at up to 1 Hz // *Scientific Reports*, V. 8, 4317 (2018), doi:10.1038/s41598-018-22772-1
9. TeraSense [Электронный ресурс]: «Ultrafast Terahertz Detectors». URL: <http://terasense.com/products/detectors/> (дата обращения 30.04.2018).
10. North Star High Voltage [Электронный ресурс]: «High Voltage Probes». URL: <http://www.highvoltageprobes.com/high-voltage-probes> (дата обращения 30.04.2018).