

Концептуальный проект активного когерентного локатора коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн на основе гиротрона для мониторинга космических объектов

А.И. Цветков, Л.В. Лубяко, Е.Д. Господчиков

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: в работе представлен концептуальный проект активного локатора на основе гиротрона с частотой 0.26 ТГц. Цель проекта – продемонстрировать возможность применения гиротрона для миллиметровой локации космических объектов, что в будущем может позволить реализовать радары указанного диапазона длин волн с высоким пространственным разрешением, используя преимущества когерентной локации.

Ключевые слова: гиротрон, радар, мониторинг космических объектов

1. Введение

Создание радиолокаторов коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн представляется весьма актуальным с точки зрения обнаружения опасных космических объектов (космического мусора, частей разрушенных спутников, астероидов и других природных объектов, особенно летящих от Солнца, и т.п.), мониторинга Луны с целью исследования физических процессов связанных с особенностями ее движения, сопоставления радиолокационных и радиометрических характеристик поверхности, исследования ландшафтных особенностей и т.д. Работы [1 - 5] можно привести в качестве некоторых примеров проектов локаторов в миллиметровом диапазоне длин волн.

Несмотря на то, что оптические системы, которые сканируют небо, остаются наиболее эффективными, они имеют ряд недостатков: обзор неба возможен только ночью; оптические системы не являются всепогодными; объекты, приближающиеся к Земле со стороны Солнца сложно обнаружить оптическими средствами. Иными словами, существует необходимость дополнить оптические системы наблюдения радиолокационными средствами, в том числе терагерцового диапазона частот.

Развитие активных космических радиолокационных систем терагерцового диапазона сдерживается, в том числе, отсутствием мощных источников излучения, отвечающих требованиям стабильности частоты. Предлагаемый проект активного локатора коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн был инициирован достижениями ИПФ РАН последних лет в области разработки гиротронов терагерцового диапазона частот [6]. В период 2016 – 2018 гг. разработан, создан и успешно испытан импульсный гиротрон, работающий на частоте 250 ГГц с уровнем выходной мощности 250 – 300 кВт при длительности импульсов до 40 мкс с частотой следования до 10 Гц [7], а также гиротрон непрерывного действия с частотой 263 ГГц и выходной мощностью до нескольких сотен ватт [8]. Второй гиротрон позволил добиться высокой степени когерентности за счет использования системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которая обеспечила стабильность частоты гиротрона лучше 10^{-10} . В частности, на частоте 263 ГГц удалось получить ширину спектра около 1 Гц [9].

Это очень привлекательно, поскольку позволяет использовать преимущества

когерентных радаров — апертурный синтез. Такие системы позволяют получать радиоизображения объектов с разрешением, приближающимся к оптическому, что создает широкий спектр приложений в ближнем и дальнем космосе. Более того, в перспективе такие радиолокационные приборы могли бы иметь преимущество при размещении на космических кораблях, обеспечивая высокую направленность излучения при малых размерах.

Следует отметить, что важной особенностью распространения радиоволн диапазона 200–300 ГГц является высокое поглощение в водяных парах [10], что создает ограничения для их использования в системах связи и радиолокации. Однако существуют применения волн ТГц диапазона, в которых влияние атмосферы сведено к минимуму, а особенности диапазона дают преимущества (низкое затухание в дыме и пыли). Примером может служить успешное развитие пассивных радиолокаторов на основе высокочувствительной радиометрической техники практически во всем спектре электромагнитных волн. Наилучшие результаты достигаются в высокогорных обсерваториях.

2. Общее описание локатора

На рисунке 1 представлена блок-схема предлагаемого локатора.

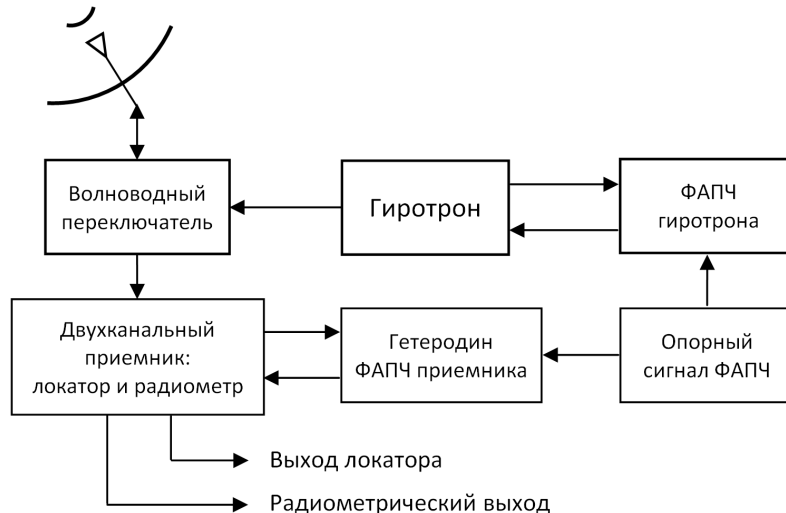


Рисунок 1. Концептуальная схема установки для локации Луны.

В качестве источника излучения предполагается использовать гиротрон с частотой 263 ГГц и выходной мощностью около 1 кВт, частота которого стабилизирована с помощью системы ФАПЧ. В нашем распоряжении в ИПФ РАН имеется антенна Кассегрена с диаметром основного зеркала 1 м с качеством поверхности, достаточным для работы в указанном диапазоне длин волн. Антенна оснащена поворотным устройством для точного наведения и слежения за объектом.

В качестве проверочного эксперимента предполагается реализовать активный мониторинг поверхности Луны. Расчеты показывают, что при использовании указанных источника излучения и антенны размер пятна на Луне составит около 247 км. При этом размер пятна на астероиде, находящемся на расстоянии 1000 км, составит уже около 1 км. При мощности передатчика 1 кВт мощность отраженного сигнала, достигающего приемной антенны, составит $10^{-11} - 10^{-12}$ Вт, что на несколько порядков превышает чувствительность современных приемников.

Транспортировка излучения от гиротрона к антенне будет осуществляться через многозеркальную квазиоптическую линию передачи. Предполагается использовать одну и ту же антенну на прием и на передачу. Поскольку время распространения сигнала до Луны и обратно составляет около 2,6 с, для переключения между каналами

приема и передачи будет использоваться электромеханический диплексер.

Предполагается использовать супергетеродинный приемник с субгармоническим смесителем и лампой обратной волны в качестве гетеродина. Система ФАПЧ гетеродина будет использовать тот же опорный сигнал, сгенерированный синтезатором, что и ФАПЧ гиротрона.

Планируется дополнить космический локатор радиометром – приемником теплового излучения. Для радиометрического приема будет использоваться та часть полосы усилителя ПЧ приемника, которая не занята радиолокационным сигналом. Радиометрический канал позволяет получить дополнительную информацию об объекте и атмосфере. Например, при наблюдении за Луной с его помощью можно управлять наведением антенны и при необходимости осуществлять ее автосопровождение.

3. Заключение

Реализация представленного проекта локатора для мониторинга космических объектов на основе гиротрона, а также выполнение экспериментов по локации Луны станет важным шагом вперед на пути создания терагерцовых космических радиолокационных систем, и в будущем может привести к созданию радаров с синтезированной апертурой с разрешением близким к оптическому.

Коллектив авторов выражает благодарность М.Ю. Глявину за ценные замечания и помощь при подготовке текста.

Работа выполнена при поддержке госзадания ИФ РАН (проекты № 0030-2021-0027, № 0030-2021-0008).

Список литературы

1. Kempkes M.A. et al. W-Band Transmitter Upgrade for the Haystack Ultra-Wideband Satellite Imaging Radar (HUSIR) // IEEE International Vacuum Electronics Conference, Monterey, CA, USA. – 2006, pp. 551- 552
2. Linde et. al WARLOC: A high-power coherent 94 GHz radar // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. – 2008, vol. 44. – № 3. – pp. 1102-1117.
3. Robert W. McMillan, Senior Member, IEEE, C. Ward Trussell, Jr., Ronald A. Bohlander, J. Clark Butterworth, and Ronald E. Forsythe, Experimental 225 GHz Pulsed Coherent Radar, IEEE transactions on microwave theory and techniques, vol. 39, no. 3, march 1991, 555.
4. A.A.Tolkachev, E.N.Yegorov, A.V.Shishlov. “Radar and communication systems: some trends of development” Proc. of the NATO Advanced Research Workshop on Quasi-Optical Control of Intense Microwave Transmission, 353-370, N. Novgorod, Russia, 2005.
5. Heysmsfield, G. M., and Coauthors, 1996: The EDOP radar system on the high-altitude NASA ER-2 aircraft. J. Atmos. Oceanic Technol., 13, 795–809.
6. A. Litvak, G. Denisov and M. Glyavin. “Russian Gyrotrons: Achievements and Trends”. IEEE Journal of Microwaves, 1, 1 260-268 (2021).
7. G.G. Denisov, M.Yu. Glyavin, A.P. Fokin et al., “First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective Thomson scattering diagnostics,” Rev. Sci. Instrum., 89, 084702 (2018), DOI:10.1063/1.5040242.
8. M.Yu. Glyavin, A.V. Chirkov, G.G. Denisov et al., “Experimental tests of a 263 GHz gyrotron for spectroscopic applications and diagnostics of various media,” Rev. Sci. Instrum., 86 (5), 054705, 2015, DOI: 10.1063/1.4921322.
9. A. Fokin, M. Glyavin, G. Golubiatnikov, L. Lubyako, M. Morozkin, B. Movshevich, A. Tsvetkov and G. Denisov, “High-power sub-terahertz source with a record frequency stability at up to 1 Hz,” Scientific Reports, vol. 8, issue 1, 4317 (2018), DOI: 10.1038/s41598-018-22772-1.
10. Y. Yang, A. Shutler and D. Grischkowsky, “Measurement of the transmission of the atmosphere from 0.2 to 2 THz,” Optics Express, vol. 19, issue 9, pp. 8830-8838, 2011, DOI: 10.1364/OE.19.008830.