

УДК 520.8.054, 621.396.946

Перспективы применения терагерцевых частот в космических системах

Д. М. Ермолаев¹, А. А. Таланов², В. А. Романюк³

¹к. ф.-м. н., ^{2,3}к. т. н.

АО «Российские космические системы»

e-mail: yermolayev.denis@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается возможный облик космической систем для работы в терагерцевом диапазоне частот (0,1–10 ТГц). Приводится конструкция и выбор антенн, чувствительных элементов и излучателей, перспективных для применения в космической связи на терагерцевых частотах. В качестве приемной антенны взят массив (квадрат со стороной 1 м) из рупорных антенн с входным диаметром 1 см с быстрым твердотельным детектором, а в качестве передающей антенны принята параболическая антенна с диаметром 10 см. Рассчитывается необходимая мощность передатчика для дальностей связи 1000, 4000, 20 000 и 40 000 км. Проводится оценка затухания сигнала в атмосфере за счет влаги, которая является основным источником поглощения терагерцевого излучения. Данное затухание составляет величину порядка 20 дБ. Однако выбранная конструкция антенн в терагерцевом диапазоне частот позволяет компенсировать сильное затухание как атмосферы, так и свободного пространства. Также одним из преимуществ терагерцевого диапазона станет возможность создания узких диаграмм направленности излучения, что повышает эффективность использования спектра. Для космической связи борт–борт мощности современных источников терагерцевого диапазона достаточно. Космическая связь земля–борт возможна с низкоорбитальными космическими аппаратам, а для высокоорбитальных космических аппаратов можно использовать импульсный режим передачи данных.

Ключевые слова: терагерцевый диапазон, космическая связь, приемник, передатчик, антенна

Prospects of Terahertz Frequencies Application in Space Systems

D. M. Ermolaev¹, A. A. Talanov², V. A. Romanyuk³

¹candidate of physics and mathematics, ^{2,3}candidate of engineering science
Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: yermolayev.denis@yandex.ru

Abstract. The article considers the possible concept of space systems capable of operating in the terahertz frequency range (0,1–10 THz). The design and selection of antennas, sensors and emitters are revealed for applications in space communications at terahertz frequencies. An array (a square of 1 m side) of horn antennas with an output diameter of 1 cm and a fast solid-state detector was considered as the receiving antenna, and a parabolic antenna with a diameter of 10 cm was taken as the transmitting antenna. The required transmitter power for the communication ranges of 1000, 4000, 20 000 and 40 000 km has been calculated. An atmospheric attenuation of the signal due to the moisture, which is the main source of absorption of the terahertz radiation, is evaluated. This attenuation is about 20 dB. However, the selected design of the terahertz frequency range antennas can compensate for strong attenuation both in the atmosphere and in empty space. Moreover, one of the benefits of the terahertz frequency range is an ability to create a narrow radiation pattern that increases the efficiency of spectrum application. The article shows that the power of modern sources of terahertz is enough for spacecraft-to-spacecraft communication. Earth-to-spacecraft communication is possible with low-orbit spacecraft; for high-orbit spacecraft, the pulse mode of data transmission can be used.

Keywords: terahertz frequency, space communication, receiver, transmitter, antenna

Введение

Непрерывное развитие электронных и фотонных технологий привело элементную базу к освоению терагерцевого диапазона частот (частота 0,1–10 ТГц, длины волн от 0,3 мм до 30 мкм, энергия фотонов между 0,4–40 эВ, эквивалентная температура черного тела 4–400 К). Взаимодействие терагерцевого излучения с веществом обладает рядом свойств:

- электромагнитные волны терагерцевого диапазона проникают сквозь мелкодисперсные безводные среды (пластмассы, бумага, текстильные материалы), поскольку резко понижается уровень рэлеевского рассеяния ($\sim \lambda^{-4}$), но отражаются металлическими поверхностями;
- квант терагерцевого излучения не является ионизирующим;
- частота терагерцевого излучения на порядок больше по сравнению с рабочей частотой существующей элементной базы, что может обеспечить передачу больших объемов информации.

Стали актуальными астрофизические исследования в терагерцевом диапазоне частот, поскольку приблизительно половина суммарного свечения и 98 % эмитированных фотонов со времени Большого взрыва находятся в субмиллиметровом и дальнем инфракрасном (ИК) диапазонах [1]. Был запущен ряд проектов, направленных на исследования в терагерцевом диапазоне. В 2003 г. был запущен космический телескоп «Спитцер» для изучения космоса в инфракрасном диапазоне на длинах волн от 3 до 180 мкм [2]. В 2009 г. запустили следующий космический телескоп «Гершель», работающий в диапазоне от 60 до 670 мкм [3]. В 2018 г. планируется к запуску космический телескоп «Джеймс Уэбб» [4], работающий в диапазоне от 0,6 до 28 мкм. Все эти космические телескопы работают на охлаждаемых приемниках и зеркалах, что ограничивает срок их службы. В телескопах «Спитцер» и «Гершель» уже закончился хладагент. «Спитцер» выведен на околосолнечную орбиту, а «Гершель» функционирует лишь частично. Технику терагерцевого диапазона имеет космический зонд «Розетта» [5]. В России в настоящий момент разрабатывается косми-

ческая обсерватория «Миллиметрон» для исследования Вселенной в миллиметровом и ИК-диапазонах на длинах волн от 0,02 до 17 мм [6]. На Земле терагерцевые исследования поддерживаются за счет телескопов воздушного и наземного базирования. Это Стратосферная обсерватория для инфракрасной астрономии (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy, SOFIA) с аппаратурой, базирующейся на самолете [7], и массив Атакамская большая (антенная) решетка миллиметрового диапазона (Atacama Large Millimeter Array, ALMA), состоящий из 66 12-метровых и 7-метровых антенн, построенных в горной пустыне в Чили [8].

Наличие вышеуказанных мощных космических проектов и наземной инфраструктуры показывает заинтересованность к продвижению техники в терагерцевый диапазон частот. Оценки [9–12] показывают, что скорость передачи информации в терагерцевой линии передачи может достигать сотен и тысяч гигабит. Проводятся демонстрационные эксперименты по передаче информации по эфиру [13, 14], которые показывают принципиальную возможность осуществления в настоящее время таких линий передачи информации на Земле. Проблема распространения терагерцевого излучения заключается в том, что в этом диапазоне находятся вращательные и колебательные степени свободы молекул, в особенности воды. Исследования по пропусканию излучения атмосферой [15–17] показывают, что в целом атмосфера для этого излучения не прозрачна и степень затухания излучения зависит от влажности. Однако, по данным экспериментов на ALMA [18], в этом диапазоне имеются окна прозрачности. Частичная прозрачность атмосферы жестко ограничивает возможности приемопередающих приложений на терагерцевых частотах. Однако системы с повышенной безопасностью могут извлечь выгоду от использования передачи информации на терагерцевых частотах за счет сильного затухания излучения вне целевого объекта. Также в этом диапазоне можно сделать антенны малых размеров с высокой направленностью излучения и при этом получить широкополосный канал передачи информации. Для радарных систем применение терагерцевых частот, по сравнению с инфракрасным и оптическим излучением, обеспечивает преимущества ввиду низкого рассея-

ния (сечение рассеяния зависит как 4-я степень частоты) и гораздо более высокой проникающей способностью при распространении излучения сквозь аэрозоли и облака. При этом, по данным экспериментов на Атакамской большой антенной решетке миллиметрового диапазона, существуют участки частотного диапазона (с центрами на частотах 0,4, 0,65, 0,85 и 1,5 ТГц [18]), где атмосфера обладает прозрачностью. В связи с этим представляется актуальным применение терагерцевого диапазона в космических системах связи и прежде всего проведение анализа радиолинии на выбранной базовой конструкции элементов (приемные и передающие антенны, детекторы и источники излучения).

Активные элементы терагерцевого диапазона

Развитие элементов терагерцевого диапазона разделило технику на свои ниши: до 1 ТГц, где эффективнее работают электронные устройства; выше 1 ТГц, где лучше работают фотонные устройства. Кроме этого, передача информации на частотах свыше 300 ГГц подразумевает увеличенную информационную скорость и, как следствие, детекторы должны обладать повышенным быстродействием. Этим требованиям удовлетворяют полупроводниковые детекторы на основе диодов Шоттки и транзисторов [19–21]. Эквивалентная мощность шумов таких детекторов лежит в диапазоне 10^{-11} – 10^{-10} Вт/Гц^{1/2}, чувствительность составляет около 1–10 кВ/Вт [22–24] при комнатной температуре.

Прежде всего, следует отметить, что в большинстве прикладных работ [25, 26] для приема и передачи терагерцевого излучения используются апертурные антенны (в основном рупорные антенны). Усиление для таких антенн при неизменной конструкции увеличивается при увеличении частоты, и в то же время в терагерцевом диапазоне они становятся компактнее, хотя и будут требовать более совершенную поверхность [27].

Компактные полупроводниковые источники терагерцевого излучения маломощны (мощность излучения менее 10 Вт) и в большинстве своем требуют охлаждения [28]. Мощными источниками терагерцевого излучения являются гиротроны.

В России был разработан гиротрон для частоты 0,67 ТГц с мощностью 200 кВт в импульсе длительностью 30 мс [29]. Наиболее распространенными источниками терагерцевого излучения стали лампы обратной волны. Была получена мощность до 1 кВт на частоте 300 ГГц [30]. Однако гиротронам и мощным лампам также необходимо охлаждение и при этом их мощность излучения сильно падает в зависимости от рабочей частоты [31].

Исходные данные для расчета терагерцевой линии связи

Для оценки характеристик терагерцевой линии связи принимаются следующие допущения:

- антенна передатчика терагерцевого излучения представляет собой параболическую антенну диаметром порядка 0,1 м;
- приемная антенна представляет собой массив рупорных антенн с входным круглым отверстием диаметра 1 см, плотно расположенных в квадрате со стороной 1 м;
- детектор терагерцевого излучения (чувствительность 1 кВ/Вт) в каждой рупорной антенне свой, и они соединяются между собой последовательно;
- сигнал на приемнике регистрируется при напряжении на приемной матрице в 1 мВ;
- поляризационные потери составляют 3 дБ;
- проводится оценка для частот, которые соответствуют окнам прозрачности атмосферы Земли — 0,4, 0,65, 0,85 и 1,5 ТГц (затухание в атмосфере соответственно составляет около 2, 5, 7 и 13 дБ при влажности 1 мм рт. ст. для ALMA [18]);
- для связи борт–борт потери в среде распространения излучения отсутствуют.

Усиление антенн оценивается по формуле (1)

$$G_a \cong 4\pi S k / \lambda^2, \quad (1)$$

где G_a — усиление антенны;

$S = \pi d^2 / 4$ — площадь раскрытия параболической антенны или входного отверстия рупорной антенны, м²;

k — коэффициент использования площади раскрытия антенны (принимается равным 0,5);

d — диаметр параболической антенны или диаметр входного отверстия рупорной антенны, м;

λ — длина волны падающего излучения, м.

Ширина диаграммы направленности апертурной антенны или массива апертурных антенн

$$\Theta_a \cong 65\lambda/A, \quad (2)$$

где Θ_a — ширина диаграммы направленности, °;

A — диаметр одиночной антенны или максимальный линейный размер массива антенн, м.

Чувствительность приемника можно оценить по формуле (3)

$$S_r \approx u/(R(D/d_h)^2), \quad (3)$$

где S_r — чувствительность приемника, Вт;

R — чувствительность детектирующего элемента, В/Вт;

D — диаметр массива рупорных антенн, м;

d_h — диаметр входного отверстия рупорной антенны, м.

Оценим необходимую мощность передатчика для осуществления связи на дальностях 1000, 4000, 20 000 и 40 000 км по формуле (4)

$$P_t = \frac{S_r L}{G_t G_r} \left(\frac{4\pi\rho}{\lambda} \right)^2, \quad (4)$$

где P_t — мощность передатчика, Вт;

L — затухание сигнала (в том числе учитываются и поляризационные потери);

G_t — усиление передающей антенны;

G_r — усиление приемной антенны;

ρ — дальность связи, м.

Усиление антенн и ширина диаграммы направленности приводятся в табл. 1.

Таблица 1. Усиление антенн и ширина диаграммы направленности

f , ТГц	0,4	0,65	0,85	1,5
G_t , дБ	49	54	56	61
Θ_t , мин	29,3	18,0	13,8	7,8
G_r , дБ	29	34	36	41
Θ_r , мин	2,1	1,3	1,0	0,6

Результаты для ALMA по необходимой мощности передатчика приведены в табл. 2 в зависимости от рабочей частоты передатчика и в отсутствие (условия космического пространства, связь борт–борт) или при наличии потерь (при прохождении сигнала через атмосферу и наличии потерь на поляризацию, связь Земля–борт).

Таблица 2. Мощность передатчика в зависимости от дальности

$f = 0,4$ ТГц				
ρ , км	1000	4000	20 000	40 000
P_t , кВт	0,80	12,0	288	1200
P_t (потери 2 дБ), кВт	1,16	18,5	462	1850
$f = 0,65$ ТГц				
ρ , км	1000	4000	20 000	40 000
P_t , кВт	0,32	4,8	112	440
P_t (потери 5 дБ), кВт	0,87	14,0	349	1400
$f = 0,85$ ТГц				
ρ , км	1000	4000	20 000	40 000
P_t , кВт	0,16	2,4	64	256
P_t (потери 7 дБ), кВт	0,81	13,0	324	1300
$f = 1,5$ ТГц				
ρ , км	1000	4000	20 000	40 000
P_t , кВт	0,08	0,8	24	80
P_t (потери 13 дБ), кВт	1,04	16,6	414	1660

Из таблицы можно сделать вывод, что в условиях отсутствия потерь, с ростом частоты уменьшается мощность передатчика, необходимая для связи. Это явилось следствием особенностей конструкции выбранных антенн, что, в свою очередь, позволяет компенсировать ослабление из-за потерь при распространении сигнала в свободном пространстве.

Влияние влажности в атмосфере на затухание терагерцевых волн

На затухание сигнала при прохождении атмосферы сильно влияет влажность [15–17]. Расчет в табл. 2 при учете затухания сделан по эмпири-

ческим данным, полученным в условиях сухой высокогорной пустыни в Чили (5100 м над уровнем моря), при влажности воздуха 1 мм рт. ст. Оценим добавочное затухание, связанное с применением радиолонии в условиях повышенной влажности и высоты наземной станции над уровнем моря. Оценка дается в предположении, что на уровне моря температура равна +15 °С, атмосферное давление нормальное, относительная влажность 100 %. Предполагается, что затухание на единичном интервале длины прохождения излучения пропорционально концентрации молекул воды, а значит [32],

$$L_{H_2O} \sim \int \frac{p(h)}{p(h_0)} P_{H_2O}(h_0) \partial h, \quad (5)$$

где L_{H_2O} — потери, связанные с поглощением излучения парами воды;

$P_{H_2O}(h_0)$ — известное парциальное давление паров воды в атмосфере на высоте h_0 , Па;

h — высота над уровнем моря, м;

p — парциальное давление насыщенных паров воды, Па;

h_0 — высота над уровнем моря, при которой известно P_{H_2O} , м.

Для экспериментов на ALMA [18] $h_0 = 5100$ м и $P_{H_2O} = 1$ мм рт. ст., для отсчета от уровня моря $h_0 = 0$ м и $P_{H_2O}(h_0) = p(h_0)$ при 100 %-й влажности. Интеграл (5) берется в пределах от h_0 до 11 000 м, поскольку после высоты ~11 км давление паров воды становится практически равно 0 [32]. Увеличение затухания — это отношение L_{H_2O} , рассчитанное для уровня моря и для ALMA.

Расчет показывает, что затухание увеличивается в 14 раз или на 12 дБ по сравнению с данными, полученными из [18]. Затухание терагерцевого сигнала при прохождении атмосферы от уровня моря до космического пространства при 100 %-й влажности приведено в табл. 3.

Таблица 3. Затухание терагерцевого сигнала при прохождении атмосферы

f , ТГц	0,4	0,65	0,85	1,5
L , дБ	14	17	19	25

Линия связи терагерцевого диапазона и направления совершенствования систем связи терагерцевого диапазона

С учетом данных табл. 3 результаты расчетов по формуле (4), отнесенные к уровню моря, приводятся в табл. 4 и 5 для связи борт–борт и Земля–борт.

Таблица 4. Необходимая мощность передатчика терагерцевого диапазона для организации связи борт–борт

r , км	1000	4000	20 000	40 000
$P(0,4$ ТГц), кВт	0,73	11,7	292	1170
$P(0,65$ ТГц), кВт	0,28	4,4	111	442
$P(0,85$ ТГц), кВт	0,16	2,6	65	258
$P(1,5$ ТГц), кВт	0,05	0,8	21	83

Таблица 5. Необходимая мощность передатчика терагерцевого диапазона для организации связи Земля–борт (борт–Земля)

r , км	1000	4000	20 000	40 000
$P(0,4$ ТГц), кВт	18	293	7330	29 300
$P(0,65$ ТГц), кВт	14	222	5540	22 200
$P(0,85$ ТГц), кВт	13	205	5130	20 500
$P(1,5$ ТГц), кВт	16	262	6560	26 200

Из табл. 4 и 5 видно, что на дальних дистанциях применение излучения терагерцевого диапазона становится нереальным, поскольку для этого потребуются единицы–десятки мегаватт мощности излучения.

Представляется возможным создание линии связи терагерцевого диапазона для расстояний до 1000 км (Земля–борт) и до 4000 км (борт–борт).

Для связи борт–борт следует применять более высокие частоты.

В терагерцевом диапазоне возможно создание диаграмм направленности малой ширины (табл. 1), что позволяет создавать КА с приемопередающими устройствами, выполненными в виде сот

с повторным использованием одних и тех же частот в нескольких сотах, что радикально повышает эффективность использования спектра.

Анализ космических миссий КА [2–8], работающих в терагерцевом диапазоне, показывает, что аппаратура работает в пассивном режиме приема, при этом применяется криогенное охлаждение детектирующего элемента и приемной антенны.

В работе [33] показывается, что в зависимости от температуры отклик терагерцевого твердотельного детектора может увеличиться по меньшей мере на 3 порядка величины. Это означает, что значения требуемой мощности в табл. 4 и 5 будут измеряться в единицах ватта. В этом случае снимается ограничение по мощности для организации связи борт–борт, а связь Земля–борт может быть реализована для низкоорбитальных КА, для высокоорбитальных КА возможна реализация импульсного режима.

Заключение

Продемонстрирована возможность реализации системы космической связи в терагерцевом диапазоне. В качестве приемной антенны взят массив (квадрат со стороной 1 м) из рупорных антенн с входным диаметром 1 см с быстрым твердотельным детектором, а в качестве передающей антенны принята параболическая антенна с диаметром 10 см. Расчет необходимой мощности передатчика показал возможность практической реализуемости терагерцевой фотонной космической системы связи.

Для улучшения характеристик систем связи терагерцевого диапазона необходимо применять охлаждение чувствительных элементов и конструкций антенн. В этом случае ограничение по мощности для связи борт–борт отсутствует для существующих источников, а связь Земля–борт может быть реализована для низкоорбитальных КА.

Список литературы

1. *Leisawitz D.* Scientific motivation and technology requirements for the SPIRIT and SPECS far-infrared/submillimeter space interferometers // *Proc. SPIE*, Munich, Germany, 2000, vol. 4013. P. 36–46.
2. *Werner M., Roellig T., Low F., Rieke G., Rieke M., Hoffmann W., Young E., Houck J., Brandl B., Fazio G., Hora J., Gehrz R., Helou G., Soifer B., Stauffer J., Keene J., Eisenhardt P., Gallagher D., Gautier T., Irace W., Lawrence C., Simmons L., Van Cleve J., Jura M., Wright E.* The Spitzer Space Telescope Mission // *ApJS*, 2004, v. 154, 1.
3. http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel
4. *Gardner J.P., Mather J.C., Clampin M.* The James Webb Space Telescope // *Space Sci Rev.*, 2006, v. 123. P. 485–606.
5. *Szopa C., Goesmann F., Rosenbauer H., Sternberg R.* The COSAC experiment of the Rosetta mission: Performance under representative conditions and expected scientific return // *Advances in Space Research*, 2007, v. 40, issue 2. P. 180–186.
6. *Wild W., Kardashev N.S.* Millimetron — a large Russia–European submillimeter space observatory // *Experimental Astronomy*, 2009, v. 23, issue 1. P. 221–244.
7. *Casey S.C.* The SOFIA program: astronomers return to the stratosphere // *Advances in Space Research*, 2004, v. 34. P. 560–567.
8. <http://www.apex-telescope.org>
9. *Piesiewicz R., Kleine-Ostmann T., Krumbholz N., Mittleman D., Koch M., Schoebel J., Kürner T.* Short-Range Ultra-Broadband Terahertz Communications: Concepts and Perspectives // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2007, v. 49, № 6. P. 24–39.
10. *Kleine-Ostmann T., Nagatsuma T.* A Review on Terahertz Communications Research // *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2011, v. 32, № 2. P. 143–171.
11. *Federici J., Moeller L.* Review of Terahertz and Subterahertz Wireless Communications // *Journal of Applied Physics*, 2010, v. 107, № 11. P. 22.
12. *Ho-Jin Song, Nagatsuma T.* Present and Future of Terahertz Communications // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, v. 1, № 1. P. 256–263.
13. *Koenig S., Lopez-Diaz D., Antes J., Boes F., Henneberger R., Leuther A., Tessmann A., Schmogrow R., Hillerkuss D., Palmer R., Zwick T., Koos C., Freude W., Ambacher O., Leuthold J., Kallfass I.* Wireless sub-THz communication system with high data rate // *Nature photonics*, 2013, v. 7. P. 977–981.

14. Song H.J. et al. 8 Gbit/s wireless data transmission at 250 GHz // Electron. Lett., 2009, v. 45. P. 1121–1122; Song H.J. et al. 24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications // Electron. Lett., 2012, v. 48. P. 953–954.
15. Siegel P.H. Terahertz technology // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, v. 50, № 3. P. 910–928.
16. Lettington A.H., Blankson I.M., Attia M., Dunn D. Review of imaging architecture // Proc. SPIE, 2002, № 4719. P. 327–340.
17. Rogalski A., Sizov F. Terahertz detectors and focal plane arrays // Opto-Electronics Review, 2011, v. 19, issue 3. P. 346–404.
18. <http://www.apex-telescope.org/sites/chajnantor/atmosphere/>
19. Муравьев В.М., Кукушкин И.В., Смет Ю., фон Клитцинг К. Миллиметровое/субмиллиметровое смешивание на основе нелинейного плазмонного отклика двумерных электронных систем // Письма в ЖЭТФ, 2009, т. 90, в. 3. С. 216–221.
20. Popov V.V., Ermolaev D.M., Maremyanin K.V., Maleev N.A., Zemlyakov V.E., Gavrilenko V.I., Shapoval S.Yu. High-responsivity terahertz detection by on-chip InGaAs/GaAs field-effect-transistor array // Applied Physics Letters, 2011, v. 98, № 153504.
21. Shashkin V.I., Drjagin Yu.A., Zakamov V.R. et al. Millimeter-wave Detectors Based on Antenna coupled Low-barrier Schottky Diodes // International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, v. 28, № 11. P. 945–952.
22. Sizov F. THz radiation sensors // Opto-electronics Review, 2010, v. 18, no. 1. P. 10–36.
23. Dyer G.C., Aizin G.R., Reno J.L., Shaner E.A. and Allen S.J. Novel tunable millimeter-wave grating-gated plasmonic detectors // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, v. 17, issue 1. P. 85–91.
24. Sizov F., Rogalski A. THz detectors // Progress in Quantum Electronics, 2010, v. 34, issue 5. P. 278–347.
25. Leech J. Experimental investigation of a low-cost, high performance focal-plane horn array // IEEE Trans. Terahertz Sc. Tech., 2012, v. 1, № 2. P. 61–70.
26. Cooper K.B., Dengler R.J., Llombart N., Thomas B., Chattopadhyay G., Siegel P.H. THz Imaging Radar for Standoff Personnel Screening // IEEE Trans. Terahertz Science and Tech., 2011, v. 1. P. 169–182.
27. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1976.
28. Chattopadhyay G. Technology, Capabilities, and Performance of Low Power Terahertz Sources // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, v. 1, № 1. P. 33–53.
29. Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Nusinovich G.S., Rodgers J., Kashyn D.G., Romero-Talamas C.A., Pu R. A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency // Applied physics letters, 2012, v. 101, № 153503.
30. Лысенко Е.Е., Пишко О.Ф., Чумак В.Г., Чурилова С.А. Состояние разработок клинотронов непрерывного действия // Зарубежная радиоэлектроника, 2004, № 8. С. 3–13.
31. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology // Nature Photonics, 2007, v. 1. P. 97–105.
32. Миняев В.В. Расчет параметров атмосферы с учетом влажности воздуха // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, № 2. С. 106–120.
33. Muravev V.M., Kukushkin I.V. Plasmonic detector/spectrometer of subterahertz radiation based on two-dimensional electron system with embedded defect // Applied physics letters, 2012, v. 100, № 082102.