

Введение

Терагерцевыми частотами (ТГЧ) называют диапазон электромагнитных волн с частотами от 0,3 до 3 ТГц, лежащий между микроволновым и инфракрасным диапазонами. Связь с использованием ТГЧ может комбинировать преимущества обоих соседних диапазонов частот и преодолевать их ограничения [1–3]. По сравнению с микроволновым диапазоном ТГЧ более предпочтительны для ультраширокополосной связи. В отличие от оптических каналов связи ТГЧ не являются видимым светом и проблемы лазерной связи, такие как низкая чувствительность при высокой скорости модуляции (СВЧ) с прямым детектированием, усложненность когерентного приема и узкого луча, должны отсутствовать в ТГЧ-системах связи. Скорость передачи данных в ТГЧ предсказывается в ~ 10 –100 Гбит/с [4, 5], поэтому к этому диапазону частот в последнее время проявляется повышенный интерес, так как по прогнозам объемы передачи данных возрастут в 10 раз в течение 5 лет [6] как в локальных вычислительных сетях, так и в мобильных устройствах беспроводной связи.

На сегодняшний день высокая скорость передачи информации обеспечивается частотами Ка-диапазона. Однако радиочастотный ресурс для организации радиолиний высокоскоростной передачи информации в Ка-диапазонах полностью исчерпан [7, 8]. В то же время в соответствии с Регламентом радиосвязи диапазон радиочастот 275–1000 ГГц не распределен и предназначен для совместного использования (ограничения 5.565 381) [7], а диапазон частот 1000–3000 ГГц может использоваться как активными, так и пассивными службами (ВКР-12), и жесткие ограничения на плотность потока мощности для работы передающих бортовых и наземных устройств в настоящее время отсутствуют [7]. Таким образом, рассмотрение возможности организации межспутниковой высокоскоростной радиолинии передачи информации, определение требований к бортовой и наземной аппаратуре в терагерцевом диапазоне и их характеристик является актуальной задачей.

В работе [9] был проведен анализ возможности связи на терагерцевых частотах (0,3–3 ТГц) для работы с объектами в космосе. При этом

основным ограничивающим фактором становится мощность передатчика. Для связи «земля–борт» и «борт–земля» даже для низкоорбитальных космических аппаратов (КА) необходимо иметь 10–1000 кВт мощности, что достижимо только для импульсных клистронов с криогенным охлаждением [1]. Для связи между КА в условиях космоса мощность исчисляется в 1–100 Вт на расстояниях между КА от 1000 до 10 000 км. Сейчас непрерывные источники терагерцевого излучения с мощностью 1–100 Вт создаются и описываются в ряде публикаций [11–14]. В настоящей работе рассматриваются элементы конструкции терагерцевых передатчиков и приемников с учетом наличия реальных образцов источников терагерцевого излучения, анализируются конструкции приемной и передающих антенн, массогабаритные характеристики.

Комплексный анализ элементов конструкций приемника и передатчика

Терагерцевый диапазон можно разделить на две части: от 0,3 ТГц до 1 ТГц и от 1 ТГц до 3 ТГц. Это связано с тем, что в низкочастотной части ТГЧ-диапазона более эффективно работают устройства, основанные на принципах электроники, а в высокочастотной более эффективны фотонные устройства [15]. В настоящей работе используются радиочастотные принципы создания техники для работы до 1 ТГц. Проблема разработки и создания связи в терагерцевом диапазоне возникает из-за отсутствия хорошей твердотельной пары приемник/передатчик. Если детекторы терагерцевого излучения уже достаточно проработаны и представляют собой достаточно простые и дешевые конструкции с экспериментально подтвержденными вольт-ваттными чувствительностями до ~ 100 кВ/Вт [16], то получение терагерцевого излучения для дальней связи, особенно необходимой мощности, является непростой задачей. Параметры источников ТГЧ показаны в таблице.

В работе [20] приводится масса гиротронов терагерцевого диапазона около 30 кг с длиной не более 1,6 м, в поперечном разрезе размеры гиротронов сравнимы с размером оптического

Таблица. Характеристики источников терагерцевого излучения

ЛОВ [11, 12, 14, 18]						
Частота, ТГц	0,1	0,14	0,18	0,3	0,6	1
Мощность, Вт	0,08	0,03	0,01	0,01	0,001	0,001
Гиротрон [10, 13, 17, 19–21]						
Частота, ТГц	0,26	0,384	0,395	0,527	0,576	0,874
Мощность, Вт	100	1300*	50	50	800*	600*
* Импульсный режим работы						

CD-диска [21]. Для сравнения: масса передатчика с лазерной оптической системой составляет около 150 кг [22]. Перспективными источниками терагерцевого излучения считаются квантово-каскадные лазеры [23], но они наиболее эффективны в верхнем диапазоне терагерцевых частот свыше 1 ТГц и также должны иметь криогенное охлаждение [15].

Для практической реализации космической связи в диапазоне ТГц, помимо охлаждения генератора, необходимо также обеспечить хорошо отполированные поверхности антенн. Например, для частоты 0,26 ТГц размер шероховатости не должен превосходить величину $\lambda/8 = 144$ мкм, а для частоты 1 ТГц уже 38 мкм. Это накладывает серьезные ограничения на размеры антенн. В этом случае для приемника технологичнее сделать массив рупорных антенн и суммировать сигнал, а передатчик следует выполнять с одной апертурной антенной. Подобные системы приема и передачи тестируются на земле в условиях передачи ТГц-сигнала от точки к точке и показывают свою работоспособность [24, 25]. Разрабатываемые поляризаторы ТГц-излучения [26, 27] имеют потери мощности излучения не более 1 дБ в широком диапазоне частот, при настройке на соответствующую частоту потери можно уменьшить до 0,1 дБ. В случае связи между КА приемник и передатчик могут двигаться друг относительно друга со скоростью 1–10 км/с, поэтому в связи с уменьшением ширины диаграмм направленности антенн и увеличением частоты излучения повышаются требования к точности наведения приемной и передающей антенн. В работах [28–31] приводятся примеры

разработки перспективных платформ с улучшенными характеристиками позиционирования и точности наведения.

Исходные данные

Рассчитывается дальность связи между КА в терагерцевом диапазоне. За исходные данные берутся ряд параметров:

- точность наведения (вплоть до $0,0005^\circ$) антенн КА [28–31];
- мощность передатчика 100 Вт [19–21];
- антенна передатчика представляет собой рупорную/параболическую антенну с круговой апертурой, размер антенны 0,3 м;
- приемная антенна представляет собой массив круговых рупорных антенн (апертура массива для удобства расчетов в зависимости от формулы считается или квадратной, или круглой с максимальным размером стороны/диаметра 0,6 м) с диаметром одного рупора в приемном массиве 5 см;
- детектор терагерцевого излучения с вольтваттной чувствительностью $Res = 1$ кВ/Вт [32] и сопротивлением $R_{det} = 50$ Ом (детекторы в массиве приемной антенны считаются соединенными параллельно);
- ширина рабочей полосы приема Δf принимается равной 400 МГц;
- предельная чувствительность приемника определяется из условия превышения мощности наведенного сигнала на 3 дБ (соотношение сигнал/шум, S/N) над мощностью тепловых шумов в рабочей полосе приема (температура приемной матрицы детекторов $T = 300$ К);
- поляризационные потери составляют 0,1 дБ.

Расчетные формулы

В расчетах считается, что точность наведения антенны не хуже ширины диаграммы направленности антенны. В таком случае повышается надежность канала связи.

Ширина диаграммы направленности апертурной антенны

$$\Theta_a \cong 65\lambda/H, \quad (1)$$

где Θ_a — ширина диаграммы направленности, $^\circ$;

λ — длина волны падающего излучения, м;
 H — размер апертуры приемной или передающей антенны, м.

Из формулы (1) следует

$$H = 65\lambda/\Theta_a. \quad (2)$$

Усиление антенн оценивается по формуле

$$G_a \cong 4\pi Ak/\lambda^2, \quad (3)$$

где G_a — усиление антенны;

A — площадь апертуры антенны, м²;

k — коэффициент использования площади раскрытия антенны (принимается равным 0,5 для передающей антенны и 0,25 для приемной антенны).

Число детектирующих элементов в матрице приемной антенны n определяется по формуле (4)

$$n = \left(\text{floor}(\sqrt{A}/d_1) \right)^2, \quad (4)$$

где d_1 — диаметр одного рупора в приемной антенне, м;

floor — функция целой части числа.

Мощность шума в полосе приема вычисляется по формуле (5)

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{4R_{\text{matr}}k_{\text{Б}}T\Delta f}, \quad (5)$$

где R_{matr} — сопротивление матрицы детекторов, Ом;

$k_{\text{Б}}$ — константа Больцмана, $1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К.

В зависимости от соединения (параллельного или последовательного) детекторов в приемной матрице рассчитывается сопротивление матрицы и продетектированный ток в случае параллельного соединения детекторов или продетектированное напряжение в случае последовательного соединения детекторов. При расчете сопротивления матрицы детекторов учитывается остаточное сопротивление контактов и кабельной сети, $R_{\text{ост}}$, оно принимается равным ~ 10 Ом.

При последовательном соединении детекторов

$$R_{\text{matr}} = R_{\text{ост}} + nR_{\text{det}}. \quad (6)$$

Напряжение на матрице детекторов при максимальной дальности связи

$$U_{\text{matr}} = \sqrt{2}U_{\text{ш}}. \quad (7)$$

Чувствительность приемника можно оценить по формуле (8)

$$S_r \approx U_{\text{matr}}/(n\text{Res}). \quad (8)$$

При параллельном соединении детекторов

$$R_{\text{matr}} = R_{\text{ост}} + R_{\text{det}}/n. \quad (9)$$

Ток на матрице детекторов при максимальной дальности связи

$$I_{\text{matr}} = \sqrt{2}U_{\text{ш}}/R_{\text{matr}}. \quad (10)$$

Чувствительность приемника можно оценить по формуле (11)

$$S_r \approx I_{\text{matr}}/(n\text{Res}/R_{\text{det}}). \quad (11)$$

Дальность связи вычисляется по формуле (12)

$$\rho = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{G_r G_t P_t}{S_r L}}, \quad (12)$$

где ρ — дальность связи, м;

P_t — мощность передатчика, Вт;

G_t — усиление передающей антенны по формуле (3);

G_r — усиление приемной антенны по формуле (3);

L — потери в сигнале (поляризационные потери).

Результаты расчетов

Результаты расчетов максимальной дальности связи в зависимости от точности наведения антенн представлены на рис. 1, из которого видно, что характеристика дальности связи имеет ступенчатый характер. Это связано с тем, что имеются ограничения на размеры антенн, а число единичных рупоров в приемной антенне изменяется скачкообразно (на площади приемной антенны может укладываться только целое число рупоров). Для частоты 0,26 ТГц (длина волны 1,15 мм) предельная минимальная ширина диаграммы направленности передающей антенны диаметром 0,3 м по формуле (1) составляет $0,25^\circ$, для приемной антенны диаметром 0,6 м — $0,12^\circ$. При измерении углов Θt от максимального к минимальным значениям

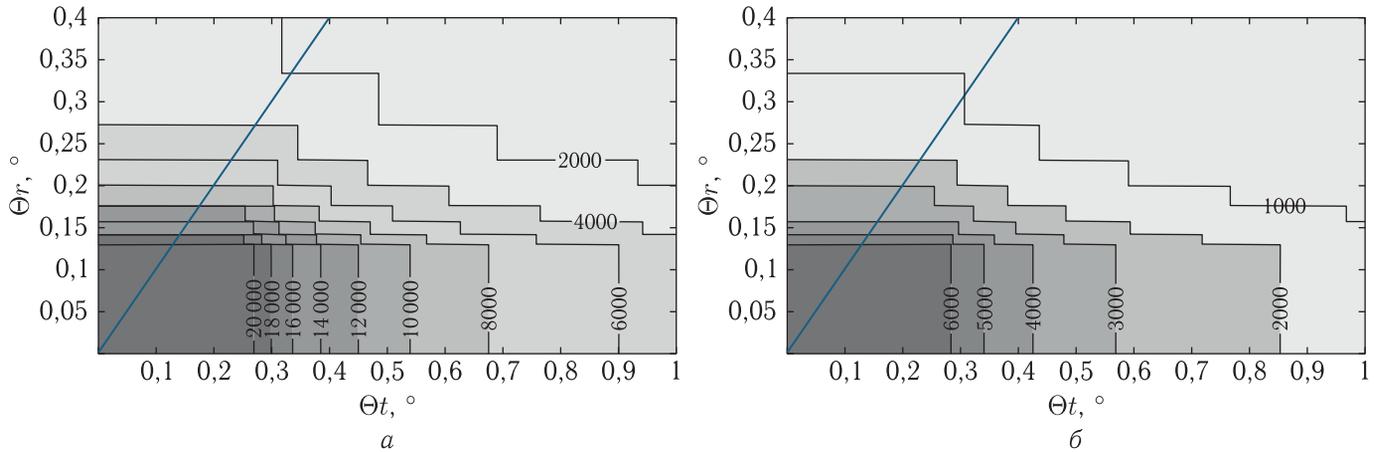


Рис. 1. Дальность ТГц-связи (км) в зависимости от точности наведения приемной и передающей антенн

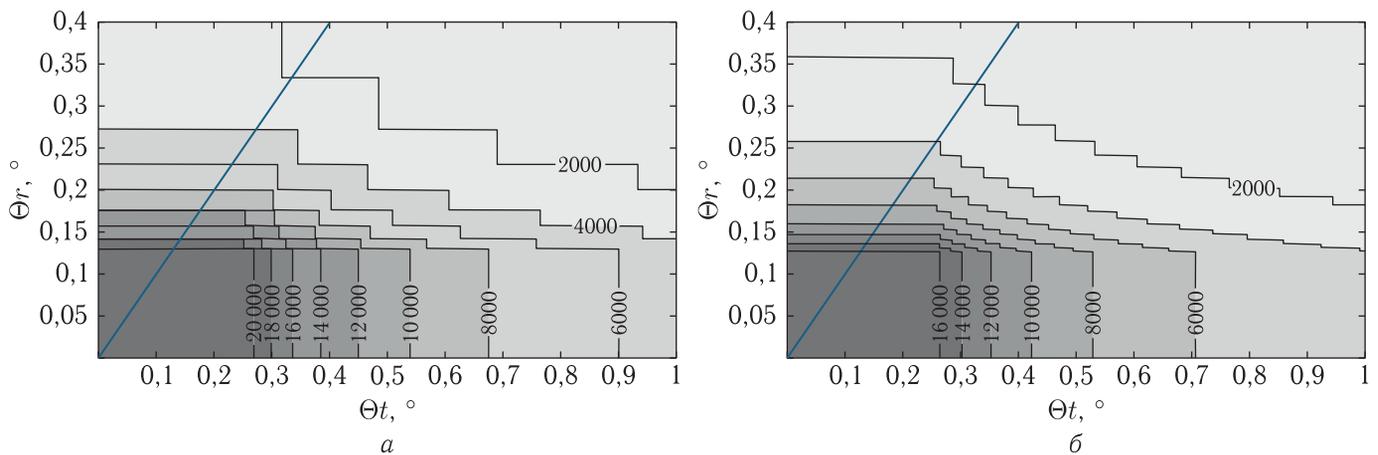


Рис. 2. Дальность ТГц-связи (км) в зависимости от точности наведения приемной и передающей антенн

апертура приемной антенны растет в соответствии с формулой (2), пока не достигает максимального значения в 0,3 м, далее апертура постоянна. Аналогично и для приемной антенны. Линией $\Theta_r = \Theta_t$ задаются дальности связи для КА, имеющих одинаковые параметры ориентации или точности наведения антенн.

Дальности ТГц-связи в 20 000 км (рис. 1, а) хватает для обмена информацией между низкоорбитальными КА. Для повышения надежности радиолинии лучше использовать маломощные источники ТГц. На рис. 1, б показана дальность ТГц-связи при уменьшении мощности передатчика до 10 Вт.

На рис. 1 вольт-ваттная чувствительность детектора составляла 1 кВ/Вт [32], но лучшие мировые образцы быстрых ТГц-детекторов достигают

величины вольт-ваттной чувствительности, близкой к 10 кВ/Вт [33].

На рис. 2, а показана дальность ТГц-связи при вольт-ваттной чувствительности детектора 10 кВ/Вт и мощности передатчика в 10 Вт.

Также можно оптимизировать диаметр одного рупора в массиве приемной антенны. На рис. 2, б показана дальность ТГц-связи при диаметре одного рупора в массиве приемной антенны 2 см.

В соответствии с формулой (5) мощность шумов в приемнике можно изменять тремя способами: изменять сопротивление матрицы детекторов, охлаждать детекторы и антенну, а также изменять ширину полосы частот приема. Сопротивление матрицы детекторов зависит от сопротивления самого детектора и соединения их между собой (последовательное или параллельное, или их комбинация).

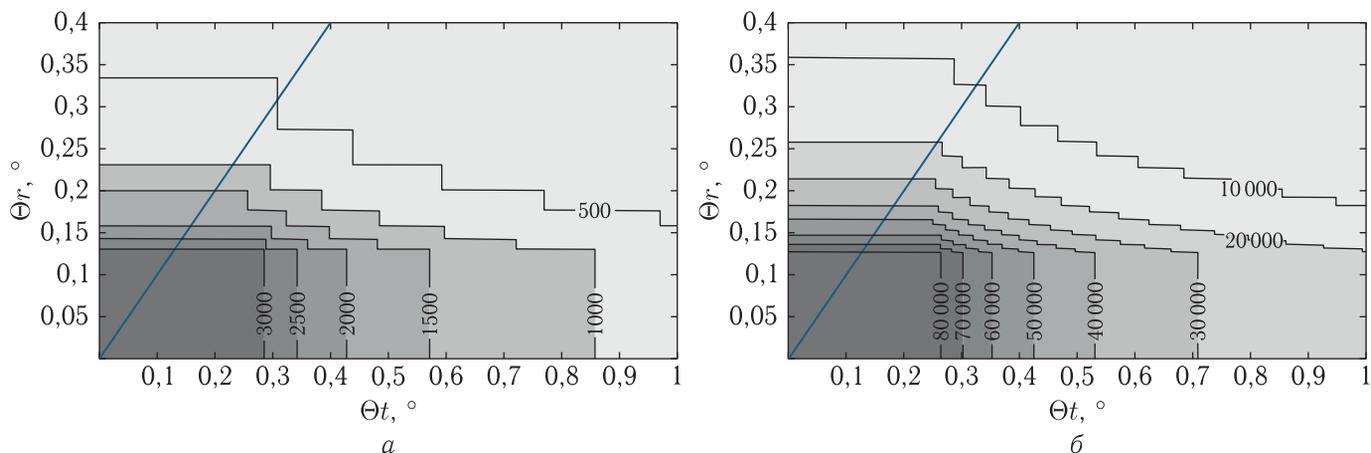


Рис. 3. Дальность ТГЧ-связи (км) в зависимости от точности наведения приемной и передающей антенн при $\Delta f = 6,31$ ГГц

Для уменьшения уровня шумов необходимо соединять детекторы параллельно, но при этом нужно учитывать, что остается паразитное сопротивление контактов.

Охлаждение детекторов и при криогенных температурах самой антенны — эффективный путь для достижения высоких показателей линии ТГЧ-связи. При этом уменьшается сопротивление детекторов, уровень флуктуирующих шумов и увеличивается чувствительность детекторов в ~ 1000 раз (при температуре жидкого гелия) [34]. Изменение рабочей полосы приема — хороший способ поддерживать связь на дальних расстояниях, но при этом уменьшается пропускная способность линии ТГЧ-связи. В работе [35] рассматривает адаптивная линия ТГЧ-связи, в которой ширина полосы подстраивается под необходимую дальность связи.

В настоящем расчете считается, что предельное соотношение сигнал/шум равно 3 дБ, ширина рабочей полосы приема 400 МГц и по формуле (13)

$$CN = \frac{E_b}{N_0} \frac{B}{\Delta f}, \quad (13)$$

где E_b — энергия, приходящаяся на один бит информации, Дж;

N_0 — спектральная плотность шума, Вт/Гц;

B — скорость передачи информации, бит/с, можно вычислить соотношение E_b/N_0 . Для $B = \Delta f/10 = 40$ Мбит/с, соотношение $E_b/N_0 = 20$. Однако для линии ТГЧ-связи скорость передачи

данных 40 Мбит/с мала, поэтому проведем расчет максимальной дальности связи для передачи информации со скоростью 10 Гбит/с. При этом по закону Шеннона (14)

$$B_{\max} = \Delta f \log_2(1 + CN), \quad (14)$$

где B_{\max} — максимальная скорость передачи данных в канале, бит/с, необходимая ширина рабочей полосы (при $CN = 2$)

$$\Delta f = 6,31 \text{ ГГц.}$$

На рис. 3,а показана дальность связи при $\Delta f = 6,31$ ГГц. При условиях, что вольт-ваттная чувствительность детектора составляет 10 кВ/Вт, диаметр рупора в массиве приемной антенны 2 см, ширина рабочей полосы $\Delta f = 6,31$ ГГц и мощность передатчика составляет 100 Вт, дальность связи продемонстрирована на рис. 3,б.

Рис. 3,б показывает возможность для связи высокоорбитальных КА между собой на расстояниях до 80 000 км со скоростью передачи информации 10 Гбит/с на ТГЧ-частотах.

Сравнительный анализ рис. 1–3 показывает, что наибольший эффект увеличения дальности связи связан с увеличением чувствительности детектирующих элементов. При построении систем космической ТГЧ-связи необходимо учитывать расстояния между объектами связи. Если оно меняется мало, то можно конструировать приемник и передатчик с постоянной полосой пропускания. Если происходит сильное варьирование изменения дальностей

между КА, то представляется оптимальным проектировать приемник и передатчик с изменяемой шириной рабочей полосы в канале. Поскольку ТГЧ-диапазон частот еще жестко не регламентирован, ширина канала связи может быть от 0 до сотен гигагерц. Первое будет перспективным в системах созвездий спутников. Второе лучше использовать при связи между высокоорбитальными и низкоорбитальными КА или между высокоорбитальными КА.

Заключение

Проведен предварительный анализ построения терагерцевой линии связи между космическими аппаратами. Расчет дальности терагерцевой связи «борт–борт» в зависимости от ширины диаграммы направленности приемной и передающих антенн показал возможность создания таких систем на существующей и перспективной элементной базе. Антенна передатчика для выходной мощности 100 Вт на частоте 0,26 ТГц имеет размер 0,3 м. Приемная антенна представляет собой массив рупорных антенн с матрицей приемных детекторов с размерами до 0,6 м и размером единичного рупора 5 см. При этом в зависимости от точности ориентации КА дальность связи может быть ~80 000 км и скорость передачи данных — десятки гигабит в секунду.

Список литературы

1. *Akyildiz I. F., Jornet J. M. and Han C.* Ternets: Ultra-broadband Communication Networks in the TerahertzBand // *IEEE Wireless Communication*, 2014. P. 130–135.
2. *Ostmann T. K. and Nagatsuma T.* A Review on Terahertz Communications Research // *Journal Infrared Milli Terahz Waves*, 2011, 32. P. 143–171.
3. *Huang K. C. and Wang Z. C.* Terahertz Terabit Wireless Communication // *IEEE Microwave Magazine*, 2011. P. 108–116.
4. *Jastrow C., Mütter K., Piesiewicz R., Kürner T., Koch M., Kleine-Ostmann T.* 300 GHz transmission system // *Electronics Letters*, 2008, vol. 44, № 3. P. 213–214.
5. *Nagatsuma T., Horiguchi S., Minamikata Y., Yoshimizu Y., Hisatake S., Kuwano S., Yoshimoto N., Terada J., Takahashi H.* Terahertz wireless communications based on photonics technologies // *Optics Express*, 2013, vol. 21, № 21. P. 23 736–23 747.
6. IEEE 802.15.3d Task Group, 2014.
7. Регламент радиосвязи. Т. 1. Статьи ИТУ, 2016. 442 с.
8. Таблица распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации, Постановление Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2011 г. № 1049-34. С. 98.
9. *Ермолаев Д. М., Таланов А. А., Романюк В. А.* Перспективы применения терагерцевых частот в космических системах // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2017, т. 4, вып. 1. С. 46–52.
10. *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, vol. 101, № 153503.
11. *Komandin G. A., Chuchupal S. V., Lebedev S. P., Goncharov Yu. G., Korolev A. F., Porodinkov O. E., Spektor I. E., Volkov A. A.* BWO generators for terahertz dielectric measurements // *Terahertz Science and Technology*, 2013, vol. 3, № 4. P. 440–444.
12. *Chattopadhyay G.* Technology, capability, and performance of low power terahertz sources // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, vol. 1, № 1. P. 33–53.
13. *Samoska L. A.* An overview of solid-state integrated circuit amplifiers in the submillimeter-wave and THz regime // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, vol. 1, № 1. P. 9–24.
14. Design and fabrication of a 1 THz backward wave amplifier / C. Paolini, A. D. Carlo, F. Brunetti et al. *Terahertz science and technology*, 2011, vol. 4, № 4. P. 149–163.
15. *Tonouchi M.* Cutting-edge terahertz technology // *Nature Photonics*, 2007, vol. 1. P. 97–105.
16. *Sizov F.* THz Radiation sensors // *Opto-Electronics Review*, 2010, vol. 18, № 1. P. 10–36.
17. *Григорьев А. Д.* Мощные источники когерентного излучения терагерцового диапазона // *Актуальные проблемы электронного приборостроения: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Саратов, 2014.* С. 11–18.

18. <http://www.terasence.com> (дата обращения: 24.08.2018).
19. <http://www.cpii.com> (дата обращения: 04.09.2018).
20. <http://www.etd.canon/en/index/html> (дата обращения: 13.09.2018).
21. <http://www.gycom.ru> (дата обращения: 17.10.2018).
22. Гавриленко С.В., Феоктистов Н.Н., Хегай Д.К. Особенности современного этапа развития оптических линий межспутниковой связи // Известия вузов. Приборостроение, 2008, т. 51, №3. С. 54–60.
23. Scalari G., Walther C., Fischer M., Terazzi R., Beere H., Ritchie D., Faist J. THz and sub-THz quantum cascade lasers // Laser & Photonics Review, 2009, vol. 3, №1–2. P. 45–66.
24. 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, vol. 7. P. 977–981.
25. Song H.J. et al. 8 Gbit/s Wireless Data Transmission at 250 GHz // Electronics Letters, 2009, vol. 45. P. 1121–1122. Song H.J. et al. 24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications // Electronic Letters, 2012, vol. 48. P. 953–954.
26. Ferraro A., Zografopoulos D.C., Missori M., Pecianti M., Caputo R. and Beccherelli R. Flexible terahertz wire grid polarizer with high extinction ratio and low loss // Optics letters, 2016.
27. Amer N., Hurlbut W.C., Norton B.J. and Yun-Shik Lee T.B. Norris Generation of terahertz pulses with arbitrary elliptical polarization // Applied physics letters, 2008, 87, 221111.
28. Зимин И.И., Валов М.В., Яковлев А.В. Перспективные унифицированные платформы малого класса // Вестник СибГАУ, 2017, т. 17, №1. С. 118–124.
29. Зимин И.И. и др. Перспективная унифицированная платформа НТ-100-01 // Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли: Тезисы докладов III Междунар. науч.-техн. конф. М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. С. 15–17.
30. Зимин И.И., Валов М.В., Яковлев А.В. КА ДЗЗ на базе универсальной платформы НТ-400 // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований / Сост. В.В. Ефанов. Химки : ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», 2015. С. 86–89.
31. Универсальная космическая платформа «СибМП». <http://nrc-mka.ru/ru/проекты/платформы-для-аппаратов-микрокласса/312-универсальная-космическая-платформа-«сибмп».html> (дата обращения: 24.03.2018).
32. 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, vol. 98, №153504.
33. Watanabe T., Stephane Boubanga Tombet, Yudai Tanimoto, Yuye Wang, Hiroaki Minamide, Hiromasa Ito, Fateev D., Popov V., Dominique Coquilat, Wojciech Knap, Yahya Meziani, Taiichi Otsuji. Ultrahigh sensitive plasmonic terahertz detector based on an asymmetric dual-grating gate HEMT structure // Solid-State Electronics, 2012, 78. P. 109–114
34. Murav'ev V.M., Kukushkin I.V., Smet Yu., von Klitzing K. Millimetrovye/submillimetrovye smeshivanie na osnove nelineynogo plazmonnogo otklika dvumernykh elektronnykh sistem [Millimeter/submillimeter mixing based on the nonlinear plasmon response of two-dimensional electron systems] // Pis'ma v ZhETF [JETP Letters], 2009, vol. 3, №90. P. 216–221. (in Russian)
35. Chong Han, Member, IEEE, and Ian F. Akyildiz. Distance-Aware Bandwidth-Adaptive Resource Allocation for Wireless Systems in the Terahertz Band // IEEE transactions on terahertz science and technology, 2016, vol. 6, №4.