

УДК 536.483

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ КАНАЛОВ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

В. Ф. Вдовин, И. В. Леснов

**Институт прикладной физики РАН,
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева**

Статья получена 31 августа 2015 г., после доработки - 18 сентября 2015 г.

Аннотация. Целью работы было проведение анализа и уточнение предельных возможностей производительности беспроводных телекоммуникационных каналов, реализуемых на основе криостатируемой приемной аппаратуры. В результате формула Шеннона для оценки производительности телекоммуникационных каналов развита для случая использования криогенных приемных устройств, уточнены предельные значения производительности беспроводных каналов, теоретически доказана реализуемость их терабитных значений. Экспериментально подтвержден кратный эффект криогенного охлаждения на производительность приемного комплекса дальней космической связи.

Ключевые слова: телекоммуникации, дальняя космическая связь, ТГц волны, мм, субмм волны, шумовая температура, шум-фактор, криогенные приемники.

Abstract: This work deals with development of link budget analyses of telecommunication wireless links. Our presentation gives more optimistic evaluation of fundamental limits of maximum achievable data rates of such links up to Terabit per second values and presented more correct approach to calculations of a budget by well known Shannon formula if a cryogenically cooled extremely low noise receivers are used for communications. Effect of cryogenic cooling on the wireless link rate has been experimentally proven.

Key words: space telecommunication, low noise receivers, cryogenically cooled receivers, noise temperature, noise figure, THz waves, millimeter wave, submillimeter wave communications.

Введение

Потребность создания высокопроизводительных (свыше 100 Гб/с) беспроводных телекоммуникационных каналов для обеспечения космической и наземной связи с движущимися объектами, а в перспективе и сотовой связи нового поколения, неизбежно ставит задачу освоения для этих целей Терагерцового диапазона частот (0.3-3 ТГц). Наблюдается [1] и прогнозируется [2] бум интереса к созданию ТГц телекоммуникационного канала, сопровождаемым активным продвижением исследований и технологий телекоммуникаций к границам этого диапазона. Несомненно, что возрастающая коммуникативная активность потребителя и его потребности в ускорении коммуникаций приведет вскоре к существенному снижению стоимости элементной базы ТГц коммуникаций – одного из основных сдерживающих факторов развития. Рыночные аналитики уже сегодня обозначают скорые и обширные перспективы для ТГц телекоммуникаций [2] рис.1.

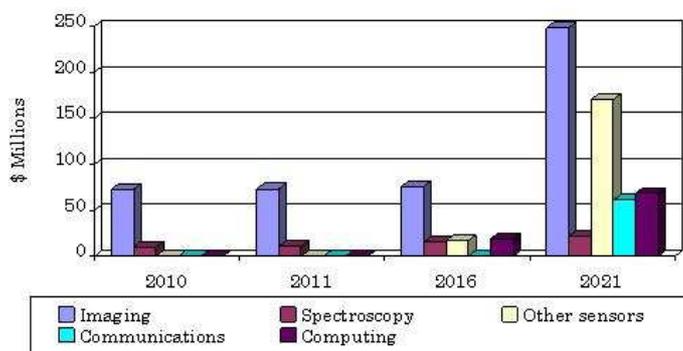


Рис. 1 Прогноз рыночных перспектив ТГц телекоммуникаций [2].

Исследователями [3] выполнены оценки возможностей ТГц каналов. В [3] представлена структурная схема канала с мобильными клиентами и разбивка терагерцового диапазона на 5 условных поддиапазонов, совпадающих с известными окнами прозрачности атмосферы. Авторами работы [3] проведена оценка предельной емкости канала с учетом поглощения в атмосферных газах, гидрометеорах, влияния наземной инфраструктуры и т.п. Оценка выполнена для условного (10 мВт) уровня мощности передатчиков, размеров антенной системы и чувствительности приемника ($F_n = 10dB$). При этом ими вычислен и

представлен как некий предел скорости передачи данных ТГц каналов - около 100 Гб/с. Увеличение мощности передатчиков, как резерв для повышения производительности канала, - дело возможное, но пока для ТГц диапазона не решенное технологически, за исключением исключительно дорогих гиротронов [4]. Но даже создание более мощных ТГц источников имеет ограничения в связи с недопустимостью чрезмерно больших уровней мощности, по соображениям как охраны здоровья, так и электромагнитной совместимости. Разумные размеры антенны также ограничены. Хотя авторы настоящей работы осуществляли экспериментальную проверку представленных в работе гипотез как раз на чрезвычайно крупной 64- метровой антенне дальней космической связи в Медвежьих Озерах под Москвой. Поэтому по существу авторами основополагающей работы [3] по ТГц телекоммуникациям не исследован лишь один из доступных ресурсов повышения производительности коммуникационного канала – повышение чувствительности приемника. Уровень чувствительности ТГц приемников, строго говоря, имеет ограничение лишь фундаментальные пределы, накладываемые соотношением Гейзенберга) [5]. Уже довольно давно созданы ТГц гетеродинные приемники [6,7], в том числе пригодные для серийного применения [6], с чувствительностью, близкой к фундаментальному квантовому пределу. Очевидно, что еще более чувствительные детекторные приемники ТГц диапазона, обладающие еще более высокой чувствительностью (квант за время наблюдения) [8], малоприспособны для телекоммуникационного канала.

Предельная емкость телекоммуникационного канала в [3], представленная как теоретический предел, получена на основе известной формулы Шеннона, включающей как параметр, характеризующий качество приемника, его отношение сигнал/шум, определяемое из формулы (1):

$$SNR = Prx / F k T B \quad (1)$$

где: F – шум-фактор приемника, $T = T_o = 300K$ – стандартная температура приемника, Prx – мощность передатчика, k – постоянная Больцмана, B – частотная полоса канала.

Представленные в [3] данные показывают реализуемость и характеристики каналов протяженностью до 1 км с предельной емкостью до 100 Гб/с, что вполне сопоставимо с куда более подверженными помехам и потерям оптическим (включая ИК диапазон) известным каналам *Ethernet* и *OTN* (Optical Transport Network), с предусмотренными стандартами IEEE 802.3b и ITU-T G.709 в объеме до 100 и 112 Гб/с соответственно. Что, впрочем, и было экспериментально подтверждено в более поздних работах по развитию ТГц телекоммуникационных каналов [1].

Целью данной работы являлось уточнение значения предельной емкости беспроводного канала с точки зрения использования уже созданной на сегодня сверхвысокочувствительной криоэлектронной приемной аппаратуры ТГц волн с чувствительностью, близкой к фундаментальному пределу, а поэтому, в сущности, и оценке фундаментального предела производительности канала в принятых допущениях условий атмосферы, размеров антенны и мощности передатчика.

Поскольку шум-фактор выбранного за прототип авторами [3] приемника в 10 дБ далек не только от идеала, но и от лучших имеющихся на сегодня разработок, очевидно, что возможно достижение более высокого отношения сигнал/шум при использовании лучшей современной криогенной элементной базы, близкой по шумам к фундаментальному пределу. Благодаря чему возможно и заметное повышение эффективности телекоммуникационного канала против оцененного в [3]. Лучшие криоэлектронные и сверхпроводниковые приемники ТГц волн на сегодня имеют шумы практически на порядок меньше указанных 10дБ [6]. Емкость канала, как показано в [3], связана с соотношением сигнал/шум по формуле Шеннона (2):

$$C = B \log_2 (1 + SNR) \quad (2)$$

Очевидно, что снижение шумов приемника на порядок приводит к увеличению емкости канала более чем в три раза, следовательно, достижимые емкости ТГц каналов при тех же прочих условиях уже могут практически достигать 300 Гб/с.

Дальнейшее снижение шумов приемника, теоретически возможное на основе современной и перспективной элементной базы [6-8], имеющее значительный смысл, скажем, для радиоастрономии и иных приложений, до значений ниже квантового предела (здесь имеется в виду возможность обнаружения кванта излучения за определенное время наблюдения, что легко пересчитывается как бы в чувствительность ниже величины кванта излучения – режим счетчика квантов), не имеет большого смысла для телекоммуникационных приложений¹. Информация передается потоком квантов, и для передачи значительных потоков информации требуется не сверхчувствительный детектор или счетчик квантов, а когерентный приемник супергетеродин с широким динамическим диапазоном, восприимчивый к одиночным квантам и в то же время способный одновременно преобразовать значимый по объему массив поступающих квантов, который уже скорее можно оценивать в категориях принимаемой и преобразуемой мощности сигнала. В итоге повышение чувствительности приемника за счет криогенного охлаждения его входных каскадов позволяет повысить предсказываемый в [3] предел производительности телекоммуникационного канала примерно в 3-4 раза.

Использование формулы Шеннона для криогенных приемников

Как отмечено выше в публикации [3], для оценки шумов приемника используется широко и давно применяемый в классической радиотехнике параметр: шум-фактор F . Однако столь же давно [9], в том числе и на страницах этого журнала [10], этот параметр критикуется исследователями как не вполне корректный. Корректнее использование другого параметра, характеризующего собственные шумы приемного устройства – эквивалентной температуры входа устройства или просто шумовой температуры T_n . Она не содержит в себе параметра стандартной температуры T_o , которая вообще говоря

¹ Кроме экзотических случаев сверхдальней космической связи к примеру с миссиями, нацеленными на выход за границы солнечной системы, тут вполне возможен побитный режим передачи и обнаружения информации.

для охлаждаемых приемников (а высокочувствительные приемники неизбежно требуют криогенного охлаждения) может заметно отличаться от стандартной $T_o=300\text{K}$, но при этом связана с F известной формулой (3):

$$F = 1 + T_n/T_o \quad (3)$$

В связи с этим предлагается использовать для оценки емкости телекоммуникационного канала, построенного на малошумящем охлаждаемом приемнике, именно T_o , а не F , как и предлагается в [10] не только для криогенных, но и для любых типов приемников. При этом формула для определения соотношения сигнал/шум приемной системы будет иметь вид (4):

$$SNR = Prx / k B (T_n + T_o) \quad (4)$$

Это в итоге приводит к получению развития формулы Шеннона для оценки емкости телекоммуникационного канала:

$$C = B \log_2 (1 + Prx / k B (T_n + T_o)) \quad (5)$$

Формула пригодна для любых приемников, для криогенных же она единственно возможная в силу некорректности в данном случае понятия шум-фактор.

Как уже отмечалось выше, достижение чувствительности, близкой к квантовому пределу чувствительности приемного устройства, которое позволит более чем втрое повысить производительность телекоммуникационного канала, невозможно без глубокого охлаждения приемного устройства. Использование громоздкой и дорогостоящей криогенной техники на сегодня является еще одним реальным ограничением использования такой технологии для массовых телекоммуникаций. Однако, уже сейчас довольно широко распространены коммерчески доступные криосистемы, которыми несложно оснастить самолеты и космические аппараты (имеются и бортовые, и космические рефрижераторы), особо нуждающиеся в продвижении в ТГц диапазон. Несложны проблемы оснащения такими устройствами и стационарных базовых станций сотовой связи. Но реальный прорыв с приходом массового телекоммуникационного

потребителя произойдет при создании криогенных систем нового поколения, основанных на реализации подходов локального охлаждения чувствительных элементов приемника и использования альтернативных используемым ныне газовым криомашинам термодинамических процессов (лазерное, термоэлектрическое и термомагнитное охлаждение).

И, наконец, обозначенная в оценках мощность передатчиков в 10 мВт, на сегодня представляющаяся резонной, вполне может быть поднятой до значений в единицы Ватта (уровни мощности систем мобильной связи), что вообще говоря соответствует санитарным нормам, следовательно, в этом направлении заложен дополнительный ресурс повышения отношения сигнал/шум примерно еще на один порядок, что позволяет говорить о потенциальной реализуемости терабитных терагерцевых телекоммуникационных каналов. Основания для оптимизма реализации этого потенциала имеются, и они лежат в совершенствовании технологий гетеродинов, к примеру, квантовых каскадных лазеров [11].

Экспериментальное подтверждение эффективности использования криогенных приемников для высокоэффективной дальней коммуникации.

Производительность каналов дальней космической связи драматически падает по мере удаления объектов коммуникации и снижения мощности приходящего сигнала. В известном предельном случае коммуникации с американскими космическими миссиями Voyager, уже покинувшими пределы солнечной системы, ведутся практически побитно в силу именно этого ограничения. Сходную проблему решали авторы настоящей работы при подготовке телекоммуникационного канала для неудавшейся миссии Фобос-Грунт. В результате была решена задача приема чрезвычайно слабого сигнала, который должен был приходиться от марсохода, лишь незначительно превышающего мощность сигнала мобильного телефона, звонящего с орбиты Марса на Землю. Криогенный МШУ был смонтирован на 64- метровой антенне ТНА -1500 в Медвежьих Озерах под Москвой [12], рис.2.



Рис.2. Антенна дальней космической связи ТНА-1500 и КриоМШУ в ее вторичном фокусе.

В середине августа 2015 года задача стала вновь актуальна и модернизированный криоэлектронный приемный комплекс был испытан по тестовым небесным источникам совместно со специалистами ESA в рамках подготовки телекоммуникационного канала к планируемой российско-европейской миссии Экзо Марс. Тесты показали уникальную чувствительность и чрезвычайно низкие шумы приемной системы: менее 6К шумы собственно приемника X диапазона и менее 25 К шумов вместе с антенной и небом. Протоколы проведенных испытаний надежно подтвердили как минимум удвоение возможной производительности телекоммуникационного канала по сравнению с тем же приемником, но работающим без охлаждения. Более высокий коэффициент (более 3) не был получен как в силу того, что чувствительность приемника была еще довольно далека от предельных значений, охлаждение также не было предельным (лишь 7К) и вклад антенны почти втрое превышал вклад приемника. Пока это подтверждение сделано экспериментально в более длинноволновом диапазоне и следовательно, с более узкой полосой и далекой от рекордов итоговой производительностью канала, но нет сомнения, что использование изложенных выше и проверенных в сантиметровом диапазоне подходов к созданию криоэлектронных ТГц приемников позволит реально достичь терабитных значений производительности, а предложенные модифицированные методы оценки

производительности на основе формулы Шеннона будут более корректны для систем с криогенными компонентами, чем подходы, развитые разработчиками ранее на основе шум-фактора.

Дискуссия

Как показано в [2], распространение терагерцовых волн в атмосфере драматически зависит от атмосферного поглощения, имеющего в приповерхностном слое значения от 0,4 до 10 000 дВ/км, в диапазоне от 0,1 до 1ТГц. Отбросив предельно большие значения (тысячи дБ) вне окон прозрачности, совпадающие с частотами поглощения основных атмосферных газов (вода, кислород), где коммуникация в принципе невозможна, все равно имеем значимое поглощение сигнала и следовательно, шум антенны заметно больший, нежели в сантиметровом диапазоне, где, как показано в предыдущем разделе, поглощение дает эквивалентный шум в окрестностях 15К. В ТГц диапазоне этот шум даёт эквивалентное значение от несколько десятков до ~150 - 200 Кельвин на входе приёмника и реально ограничивает эффект от более глубокого снижения шумов приёмного устройства ниже указанных значений шумов антенны, поскольку в данном случае итоговое соотношение сигнал/шум будет определяться в основном поглощением атмосферного канала. Однако рассмотренный в [2] пример содержал приемник со стандартной для неохлажденных ТГц приемников шумовой температурой в тысячи Кельвин, которая по прежнему будет заметно превалировать по сравнению с двумя сотнями К антенной температуры наземного канала, разумеется, если длина канала не будет превышать протяженностей, принятых в [2] или около 1 км. Поэтому даже для данного предельного случая приземной коммуникации на уровне моря криогенное охлаждение остается эффективным для повышения производительности канала, обеспечивая коэффициент 2-3 по сравнению с производительностью канала с неохлажденным приемником. Этот вывод касается наземной приповерхностной коммуникации. Атмосферное поглощение ТГц волн довольно быстро уменьшается по мере повышения высоты над уровнем моря [12], и уже на высоте 2-3 км атмосферное

ограничение практически исчезает.

Если рассматривать случай передачи сигнала между космическими объектами (станциями, спутниками, элементами космической группировки), то в таком случае играют роль только фундаментальные ограничения и при отсутствии поглощения можно повышать чувствительность приёмников путём более глубокого охлаждения и это будет чрезвычайно эффективно.

И наконец, промежуточный случай, когда телекоммуникационный канал реализуется на трассе Земля-космос. В случае коммуникации с высокогорья 3-5 км над уровнем моря, случай практически совпадает с коммуникацией между космическими объектами и атмосферное поглощение не влияет значимым образом на производительность канала. В случае, если наземный порт телекоммуникационного канала находится на уровне моря или на небольшой высоте, приходим к ограничениям наземного канала (50-200К к шумам приёмного устройства), рассмотренным для наземных коммуникаций, причем для случая зенитного направления канала общее поглощение такого канала будет сопоставимо с горизонтальным каналом протяженностью в 1-2 км, т.к. эффективно поглощают ТГц волны лишь первые два-три км атмосферы по вертикали, где еще значимо присутствует вода и концентрация кислорода заметно выше, чем в высокогорье и в верхней атмосфере.

Благодарности

Авторы признательны коллегам из ИПФ РАН, НГТУ и рецензентам настоящей статьи за полезные дискуссии, ОКБ Развития высоких технологий и ОКБ МЭИ за обеспечение блестящих экспериментов, подтверждающих радикальное повышение производительности каналов дальней космической связи за счет использования криоэлектронных приемных устройств, а также Gert de Lange за полезную информацию о рыночных перспективах ТГц коммуникаций. Работа выполнена при поддержке проектов по госзаданию ИПФ РАН 0035-2014-0021 и НГТУ 3.2054.2014/К, а также средств хоздоговора с ОКБ МЭИ.

Литература

1. T. Schneider. Ultrahigh-Bitrate Wireless Data Communications via THz-Links; Possibilities and Challenges.// Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Volume 36 Number 2 February 2015, p. 159.
2. Terahertz Radiation Systems: Technologies and Global Markets / BCC Research Report Code: IAS029B, <http://www.bccresearch.com/market-research/instrumentation-and-sensors/terahertz-radiation-technologies-markets-ias029b.html>, Published: March 2012 with a newer version Report Code: IAS029D, Published: June 2015
3. T.Schneider, A. Wiatrek, S. Preubler, M.Grigat, and R.-P. Braun, “Link budget analysis for Terahertz fixed wireless links,”// IEEE Trans. THz Sci. Technol., vol. 2, no. 2, pp. 250–256, Mar. 2012.
4. A.V.Arzhannikov, M.K.A.Thumm, A.V.Burdakov et al. Two Ways for High-Power Generation of Subterahertz Radiation by Usage of Strong Relativistic Electron Beams.// IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology Vol. 5, NO. 2, March 2015, Pages: 478 – 485
5. V. F. Vdovin and I. I. Zinchenko Modern Millimeter and Submillimeter receiver systems for Radio Astronomy.// Radiophysics and Quantum Electronics, Vol. 52, No. 7, 2009, p.461.
6. Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Борисов В.Б., и др. Интегральный сверхпроводниковый бортовой спектрометр субмиллиметрового диапазона длин волн для атмосферных исследований. // "Известия высших учебных заведений. Радиофизика" Том 50, № 10-11, 2007, С. 935-940
7. Vdovin V.F., Eliseev A.I., Zinchenko I.I., Koshelets V.P., et al. “A two-frequency two-polarization superconducting receiver for radio-astronomical investigations in the millimetric wave band”// "Journal of Communications Technology and Electronics" Vol. 50. 9. 2005. P. 1118-1122
8. Seliverstov, S. ; Maslennikov, S. ; Ryabchun, S. et al. Fast and Sensitive Terahertz Direct Detector Based on Superconducting Antenna-Coupled Hot

- Electron Bolometer Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, Volume: 25 , Issue: 3 , Part: 1 DOI: 10.1109/TASC.2014.2372171, 2015
9. Cohn S.B., The Noise figure muddle.// M.J. vol.2 N 3, p.7, (March 1959)
 10. К.А.Горонина, Ю.А.Дрягин. О шумовых параметрах диодных смесителей. // "ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ" - Электронный журнал, 2002. N 1. URL: <http://jre.cplire.ru/alt/jan02/5/text.html>
 11. Troccoli, M. High Power Emission and Single-Mode Operation of Quantum Cascade Lasers for Industrial Applications Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal, Volume: 21 , Issue: 6 , 2015
 12. В.Ф.Вдовин, В.Г.Грачев, С.Ю.Дрягин и др. Криогенный малошумящий усилитель для радиоастрономических наблюдений и систем дальней космической связи на сантиметровых волнах. // *Астрономический бюллетень*. 2015 (принято в печать)