



ТЕРАГЕРЦЕВЫЕ ФОТОМЕТРЫ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ИЗ КОСМОСА

Г.Кропотов, к.ф.-м.н., генеральный директор
ООО "Тидекс", Санкт-Петербург, Россия;
П.Кауфманн, проф., Высшая техническая школа
Макензи, Сан-Паулу, Центр полупроводниковых
компонентов, Университет Кампинас, Кампинас,
Бразилия

Впервые разработано бортовое устройство ТГц-детектирования для наблюдения солнечных вспышек из стратосферы. Прибор предназначен для определения загадочных и до сих пор не раскрытых спектральных форм терагерцевого излучения солнечных вспышек. Построенная система SOLAR-T, содержащая модули сбора данных и телеметрии, была успешно протестирована. В конструкции SOLAR-T использованы два детектора в виде ячеек Голея, расположенные за фильтрами низких частот, полосовыми фильтрами на 3 и 7 ТГц и резонансными камертонными модуляторами. SOLAR-T позволяет определить относительные изменения температуры, меньшие, чем 1К, с субсекундным временным разрешением. Длительные стратосферные полетные испытания на борту двух воздушных шаров над Антарктидой и Россией планируются к проведению в 2014–2016 годах.

Наземные наблюдения солнечных вспышек позволили обнаружить новые спектральные составляющие их излучения в субтерагерцевом диапазоне, а также на частоте 30 ТГц [1, 2]. Пока физическая природа этого излучения остается загадкой [3]. Полное описание ТГц-спектра, необходимое для дальнейших исследований, может быть получено из наблюдений, проводимых с помощью детекторов, расположенных за пределами земной атмосферы. На основе концепций, материалов, фильтров и детекторов, полученных на разных стадиях предыдущих разработок лаборатории, была создана опытная установка [4–6] двойной терагерцевой фотометрической системы для измерения температуры переходных процессов в континууме солнечных вспышек на частотах 3 и 7 ТГц. На практике недостаточная

THz PHOTOMETERS FOR SOLAR FLARE OBSERVATIONS FROM SPACE

G.Kropotov, *Cand.Sc.(Phys-Math.)*, Tydex Co. Saint Petersburg, Russia
P.Kaufmann, *prof.*, Escola de Engenharia, Craam, Universidade Presbiteriana Mackenzie São Paulo, SP, Brazil

The first detection device conceived to observed solar flare THz emissions on board of stratospheric balloons has been developed. It is intended to determine the still unrevealed spectral shape of the mysterious THz solar flares emissions The system, named SOLAR-T, has been built, integrated to data acquisition and telemetry modules, and tested. It utilizes two Golyay cell detectors preceded by low-pass filters, 3 and 7 THz band-pass filters, and choppers. SOLAR-T can detect relative temperature variations smaller than 1 K with sub second time resolution. The experiment is planned to fly on board of two long-duration stratospheric balloon flights over Antarctica and Russia in 2014–2016.

INTRODUCTION

Sub-THz and 30 THz ground-based observations indicate a new solar burst spectral component at that range [1,2]. The physical nature of this emission remains mysterious [3]. The complete THz spectral description required for further investigations can be obtained by observations with detectors placed outside the terrestrial atmosphere.

A double THz photometers system to measure solar transient temperature bursts in the continuum at 3 and 7 THz has been built, based on concept, materials, filters and detector characterized by various previous laboratory developments leading to the setup of a prototype model [4-6]. The practical problem to observe the whole solar disk with enough sensitivity to detect flares subtended by much smaller angular sizes on the Sun was solved with an innovative photon concentrator [7] that combines the formation a full solar disk image, with the physical size of the detecting surface at the focal plane, independently from the aperture size, with the relationship between the minimum

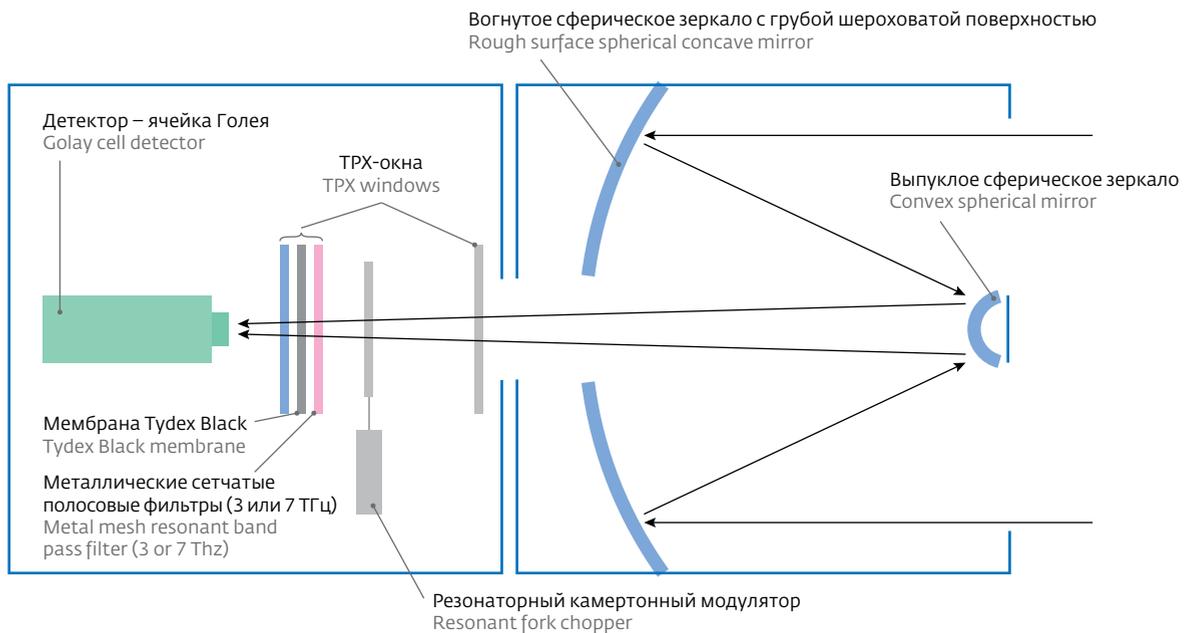
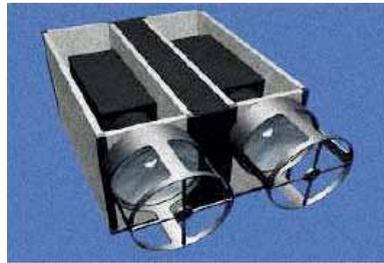


Рис.1. Фотометры SOLAR-T в сборе, внизу (слева направо): оптоакустический детектор Голея, мембранный фильтр низких частот TydexBlack, резонансный полосовой фильтр (металлическая сетка) и резонансный камертонный модулятор частотой 20 Гц. Поверхность касегреновского телескопа (76 мм) справа - шероховатая, для дальнейшего рассеяния излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. Окна из материала TPX отделяют телескопы от корпуса

Fig. 1. The SOLAR-T photometers assembly concept. The diagram in the bottom panel shows at left the Golay cell detector, preceded by TydexBlack low-pass filter membrane, a resonant metal mesh band-pass filter, and a resonant tuning fork 20 Hz chopper. The 76 mm Cassegrain telescope at right has a rough surface to further diffuse the visible and near IR radiation. TPX windows were added to separate the telescopes from the case.

чувствительность детекторов вносит существенную проблему в измерения излучения солнечных вспышек. Ведь многие из них видны под гораздо меньшим угловым размером, чем полный солнечный диск, на фоне которого их необходимо обнаружить. Проблема была решена путем использования инновационного устройства – комбинации концентратора фотонов [7] с узлом формирования полного изображения солнечного диска. Реальный размер поверхности детектора, расположенного в фокальной плоскости, не зависит от размера апертуры, при этом величина минимального обнаруживаемого потока обратно пропорциональна площади апертуры.

detectable fluxes inversely proportional to the aperture area.

FABRICATION OF FLIGHT MODEL

The THz photometers system, named SOLAR-T, was built by Tydex Co., St. Petersburg, Russia, where they were tested for electrical, electronics, low temperature and near vacuum environment performance.

A data acquisition system was developed Propertech Ltda., Jacareí, SP, Brazil, who integrated the whole system, to which was included a Iridium-satellite telemetry module, provided by Neuron, Ltda., São José dos Campos, SP, Brazil. Fig. 1 shows the SOLAR-T design concept. The 76 mm diameter

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПОЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

ТГц-фотометры для системы SOLAR-T были изготовлены специалистами компании "Тидекс" (Санкт-Петербург) в России, где затем были протестированы их электротехническая и электронная части, а также их работоспособность в условиях низкой температуры в среде, близкой к вакууму. Система сбора данных была разработана компанией Propertech Jacareí (Сан-Паулу) в Бразилии, которая является интегратором всей системы. В систему также был включен Iridium-модуль спутниковой телеметрии, это разработка компании Neigon (Сан-Жозе-дус-Кампус, Сан-Паулу). На рис.1 представлена концепция структуры SOLAR-T. Телескоп, реализованный по системе Кассегрена, с диаметром 76 мм позволяет получить на входе ячейки Голя 3 мм-изображение солнечного диска. Ячейка Голя [8] представляет собой оптико-акустический детектор, работающий при комнатной температуре. Основой детектора является заполненная ксеноном капсула, имеющая в своем составе гибкую мембрану со светоотражающей поверхностью. При падении на ячейку излучения газ, нагреваясь, стремится к расширению, и меняющая форму мембрана отклоняет падающий луч света в массив фотодетекторов. Прибор обладает высокой чувствительностью к малым изменениям входной мощности. И, хотя первоначально он предназначался для обнаружения ИК-излучения, но и в области от субтерагерц до видимого диапазона прибор имеет почти равномерную чувствительность. По сравнению с другими вариантами детекторов, работающих при комнатной температуре, - микроболометром и пирозлектрическим детектором, - модернизированная ячейка Голя [9] обладает улучшенной чувствительностью к мощности входного сигнала на разных ТГц-частотах [5, 6].

Фильтр нижних частот необходим для подавления фона от интенсивного излучения черного тела, каким является солнечный диск, в видимой и ближней ИК-области. Поэтому добавляются полосовые фильтры, центрированные на 3 и 7 ТГц. Шероховатая поверхность зеркал двух 76 мм-телескопов Кассегрена используется для частичного диффузионного отражения солнечного излучения в видимой и ближней ИК-области. Такая низкочастотная техника была ранее предложена для проведения эксперимента для ИК-излучения Солнца [10]. В дальнейшем она получила развитие и прошла испытания в кругу наших специалистов [11]. Два грубых зеркала доставляют "холодное" излучение в систему обнаружения [5, 6]. Мембрана

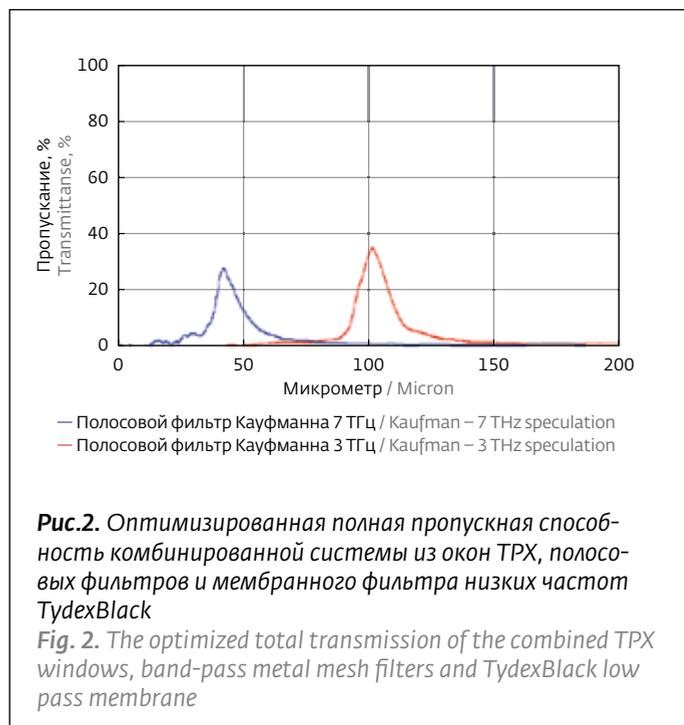


Рис.2. Оптимизированная полная пропускная способность комбинированной системы из окон ТРХ, полосовых фильтров и мембранного фильтра низких частот TydexBlack

Fig. 2. The optimized total transmission of the combined TPX windows, band-pass metal mesh filters and TydexBlack low pass membrane

Cassegrain telescopes have been designed to form a 3 mm solar disc image at the input of the Golay cell. The Golay cell [8] consists in a room temperature opto-acoustic detector based on a Xenon gas capsule with a light reflecting flexible membrane surface. With radiation incidence the gas tends to expand

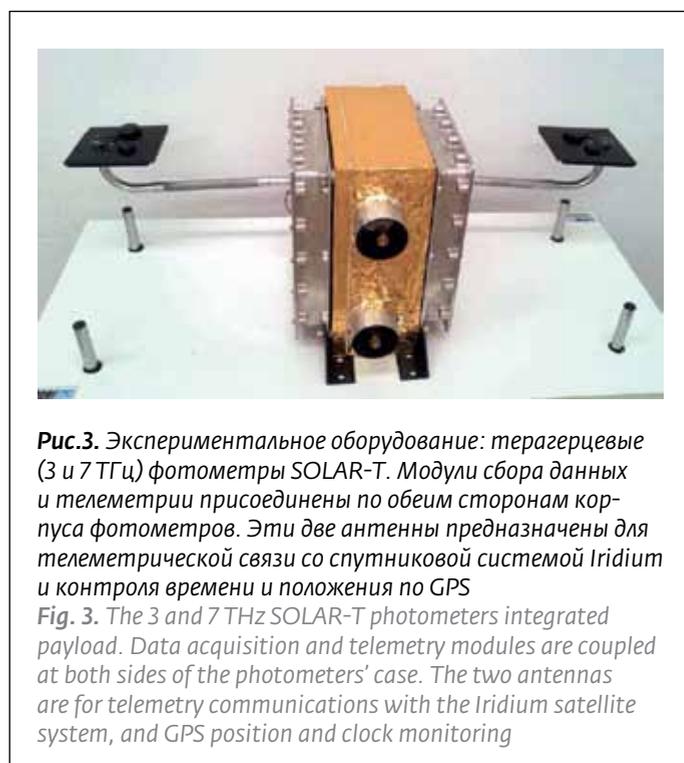
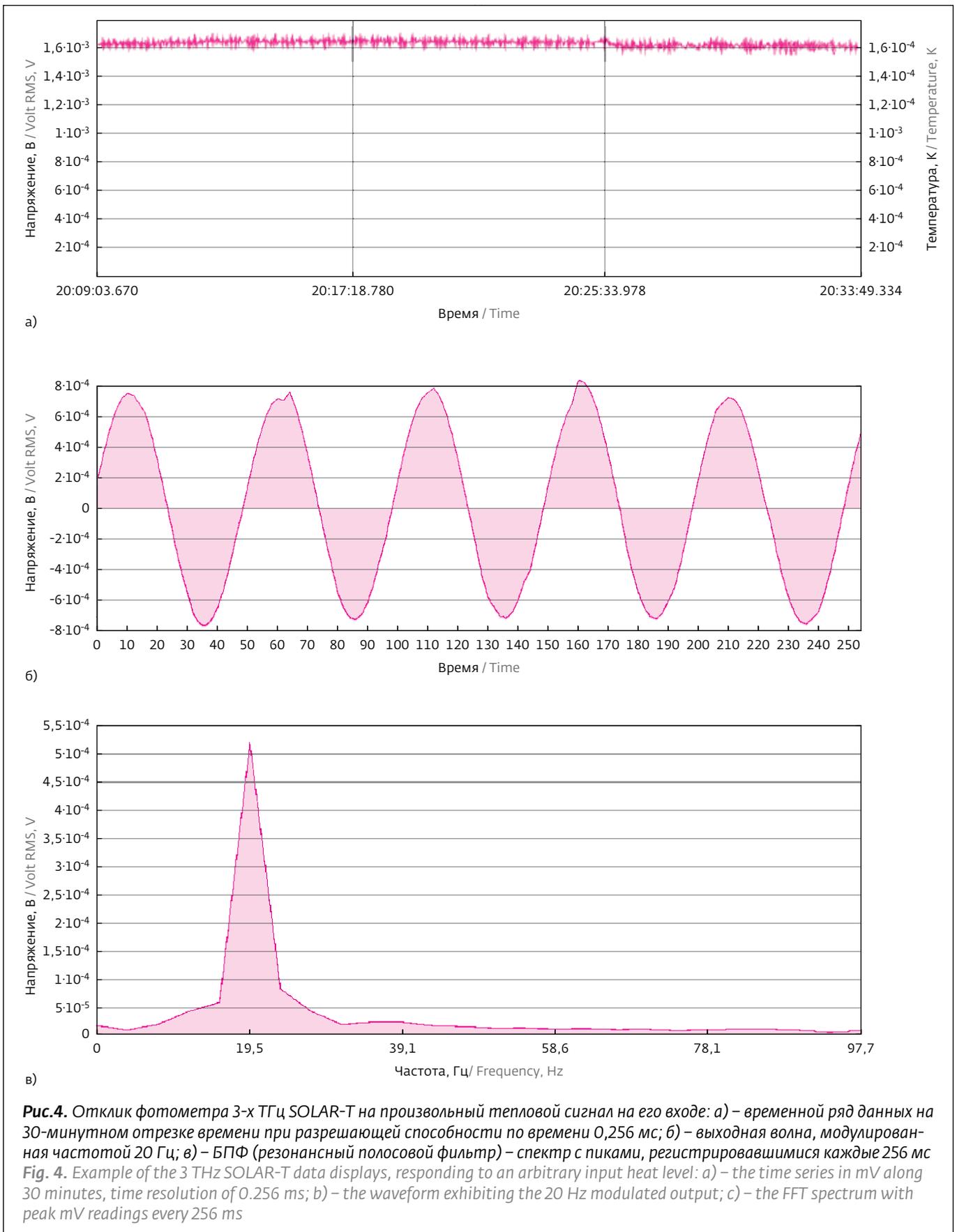


Рис.3. Экспериментальное оборудование: терагерцевые (3 и 7 ТГц) фотометры SOLAR-T. Модули сбора данных и телеметрии присоединены по обеим сторонам корпуса фотометров. Эти две антенны предназначены для телеметрической связи со спутниковой системой Iridium и контроля времени и положения по GPS

Fig. 3. The 3 and 7 THz SOLAR-T photometers integrated payload. Data acquisition and telemetry modules are coupled at both sides of the photometers' case. The two antennas are for telemetry communications with the Iridium satellite system, and GPS position and clock monitoring



BlackTydex [12] является дополнительным фильтром нижних частот, еще сильнее подавляя ближе ИК- и видимое излучение.

Резонансные металлические сетчатые полосовые фильтры были разработаны, а затем изготовлены и испытаны для различных частот в двух группах (в Университете Кампинас и в Высшей технической школе Макензи, Бразилия) [13]. Фильтры для 3 и 7 ТГц ограничивали полосу пропускания в пределах $\pm 13\%$ от центральной частоты по уровню половинной мощности [14]. Полное результирующее пропускание двух комбинированных окон из материала ТРХ, полосовых фильтров в виде металлических сеток и мембранного фильтра низких частот TydexBlack было оптимизировано и измерено специалистами компании Тидекс. Результаты показали хорошее согласие с расчетными прогнозами (рис.2).

Результаты заключительных испытаний SOLAR-T на ProPERTech, входящих в комплексный эксперимент (рис.3), представлены на рис.4. Входной резонансный камертонный модулятор работает на частоте 20 Гц. Модули обработки данных считывают результаты с выходов двух детекторов Голя с частотой 500 Гц (то есть 0,002 с). Организация сбора данных позволяет считывать результаты в различных выбранных режимах при разных увеличениях с помощью разработанной специально для этого эксперимента программы, получившей название ProSolarT. При проведении испытаний и тестов мы использовали последовательные быстрые преобразования Фурье выходных сигналов с каждой из 128 точек (то есть с временным разрешением 0,256 с). Показания сохраняются в модуле сбора данных, там же хранятся данные об опорной частоте и вспомогательных показаниях, используемых при описании статуса полезной нагрузки (напряжения, температуры и т.д.).

СИСТЕМНЫЕ БЛОКИ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для мониторинга процессов используются методы телеметрии. Для большей компактности данные пакетированы в блоки, содержащие в основном данные с точек, поступающие с разрешением 256 мс, времена отсчетов, и важные вспомогательные измерения. Характерные наблюдательные данные сохраняются и обрабатываются. Как пример, показан интерфейс для одного 3 ТГц-фотометра (рис.4.) Ячейки Голя обладают двумя типичными ответными характеристиками, соответствующими результатам наблюдений: во-первых, флуктуации их шума постоянны, и это

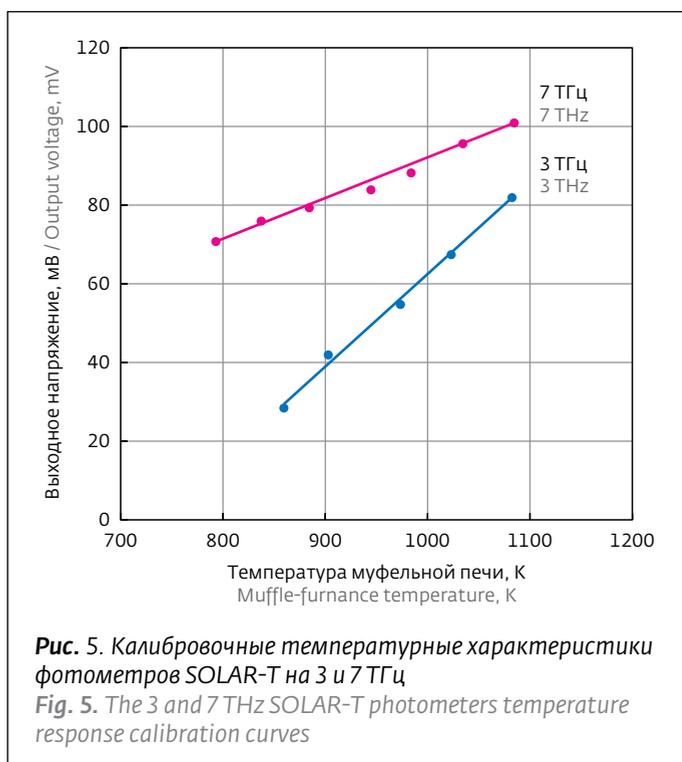


Рис. 5. Калибровочные температурные характеристики фотометров SOLAR-T на 3 и 7 ТГц
Fig. 5. The 3 and 7 THz SOLAR-T photometers temperature response calibration curves

the membrane which deflects the internal light ray into an array of photo-detectors. The device is highly sensitive to small input power variations. Although originally intended for infra-red detection, it has a nearly flat response from sub-THz to visible radiation. Modern Golay cell [9] exhibits the best sensitivity for input signal power variations at THz frequencies compared to other options for room temperature detectors: microbolometer and pyroelectric [5,6]

Low pass filters are required to suppress the intense background solar back-body radiation in the visible and near infrared. Band pass filters are added, centered at 3 and 7 THz. The two 76 mm Cassegrain telescopes have roughened surfaces for partial diffusion of solar visible and near infra-red radiation. This low pass technique has been proposed for a solar IR space experiment [10]. It was further developed, fabricated and tested by our group [11]. The two rough mirrors deliver "cool" radiation to the detecting system [5,6]. The BlackTydex membrane [12] low pass filter was added for further suppression of near IR and visible.

The resonant metal mesh band-pass filters have been developed, fabricated and tested by the Brazilian Campinas and Mackenzie groups for various frequencies [13], and for 3 and 7 THz, with a half power band of 13% of the central frequencies [14]. The total net transmission adding the two combined TPX windows, band-pass metal mesh filters and TydexBlack low pass

просматривается во всем диапазоне входных температур; во-вторых, значения выходного напряжения пропорциональны входным температурным сигналам. Калибровочные кривые (рис.5) обеспечивают преобразование изменения температуры с коэффициентами пересчета для 3 ТГц – 4,2 К/мВ и для 7 ТГц – 9,8 К/мВ. Как и ожидалось, результаты экспериментов качественно согласуются для двух однотипных ячеек Голея, так как мощность черного тела на частоте 3 ТГц меньше по сравнению с мощностью на 7 ТГц, а ширина полосового фильтра (т.е. около 13% от центральной частоты) значительно меньше на 3 ТГц, чем на 7 ТГц.

На рис.4а представлен ряд данных: серия из 7030 результатов наблюдений, полученных в течение 30 мин. Это среднеквадратические вариации температуры, преобразованные в среднеквадратические значения напряжения. В качестве примера на рис.6 представлены для сравнения результаты измерений среднеквадратического значения температурных флуктуаций, полученные с одной точки на частоте 3 ТГц через каждые 256 мс, и соответствующие результаты, полученные после обработки данных с пяти и десяти точек. Результат является очень стабильным, это обеспечивает необходимое условие обнаружения выбросов солнечных вспышек. А на частоте 7 ТГц значения величины оказываются почти в два раза больше. Терагерцевый фотометр SOLAR-T позволяет определить относительные изменения температуры порядка 1К с субсекундным временным разрешением. Это соответствует значению от умеренной до малой плотности потока от солнечной вспышки.

Можно оценить минимальное значение плотности потока ΔS , регистрируемой фотометрами SOLAR-T. Приближение Рэлея-Джинса для черного тела остается справедливым для выбросов солнечных вспышек и в ТГц-диапазоне частот [15]. Плотность мощности потока от вспышек связана с вариациями избыточной температуры ΔT , находящимися выше наблюдаемой базовой линии, хорошо известным соотношением [16]: $\Delta S = 2k\Delta T/A^e$, где k – константа Больцмана, а A^e – эффективная площадь диафрагмы (причем, $A^e = \eta^a A^p$, где η^a является апертурным коэффициентом, а A^p – это апертура реальной фактической диафрагмы). Поэтому в фокальной плоскости изображение световых источников (солнечных вспышек), чьи угловые размеры имеют меньший порядок, чем угловые размеры пучков, определяемых дифракционным пределом, будет выглядеть как размытые точки на фоне изображения солнечного диска. Для телескопов SOLAR-T, работающих на длине волны 76 мм,

membrane has been optimized, and measured at Tydex. The results agree with the project predictions and are shown in Fig. 2.

Fig. 4 illustrates the SOLAR-T integrated experiment undergoing final tests by Propertech (Fig. 3). The input resonant fork choppers operate at 20 Hz. The two Golay cells outputs are read by data processing modules that samples at a 500 Hz rate (i.e., 0.002 s). The data acquisition allows readings at various selectable modes and gains, by specific software developed for this experiment, named ProSolarT. For the tests, and the current operational test application, we have adopted successive fast Fourier transforms of output signals every 128 data points (i.e., 0.256 s time resolution). The readings are stored in the data acquisition module, together with clock reference and auxiliary readings describing the payload status (voltages, temperatures, etc.).

SYSTEM INTEGRATION AND PERFORMANCE

The telemetry is for monitoring purposes. The data packages are more compact, containing basically the 256 ms data points, clock, and principal auxiliary measurement. The characteristic monitoring data

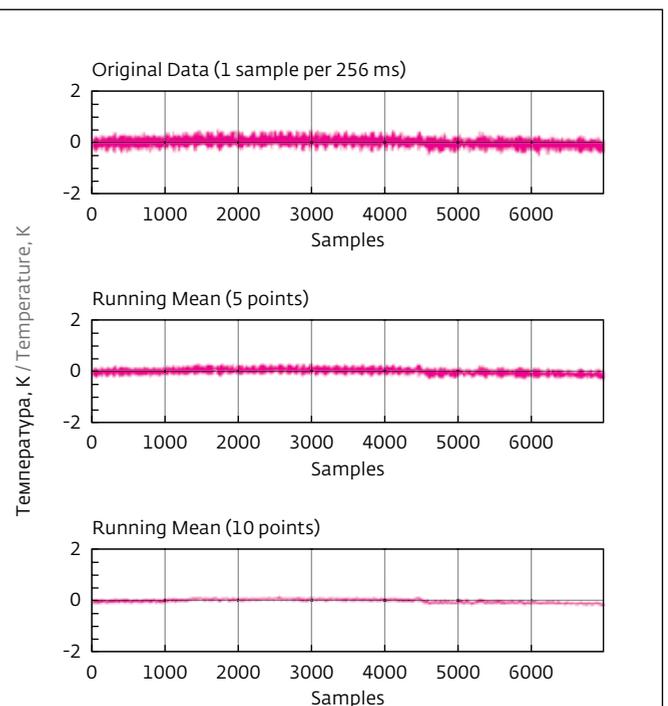


Рис.6. Пример среднеквадратичных отклонений входной температуры на частоте 3 ТГц на 30-минутном временном интервале (для результатов на рис. 4а)

Fig. 6. Example of 3 THz input temperature r.m.s. variations, on a 30 minutes time interval, as displayed in Fig. 4(a)

эти значения соответствуют 27" на 3 ТГц и 12" на 7 ТГц.

Эффективная диафрагма рассчитывается как произведение четырех коэффициентов пропускания: устройства TydexBlack, фильтра из ТРХ (около 0,85 на 3 ТГц и 0,7 в 7 ТГц [12]), полосового фильтра на основе металлической сетки, расположенного в передней части ячейки Голя (приблизительно около 0,35 на 3 ТГц и 0,29 на 7 ТГц, см. рис.2) и устройств реальной блокировки суботражательных структур (по оценкам, это составляет 0,85 для обеих частот) и отражателя грубой передачи (предварительная оценка дала коэффициент 0,9 для обеих частот). Таким образом, чистая эффективная диафрагма η оказывается равной примерно 0,23 на 3 ТГц и 0,15 в 7 ТГц соответственно. Поэтому для измерения на обеих частотах относительного изменения температуры $\Delta T \approx 0,5$ К получаем минимальный регистрируемый поток плотностью $\Delta S \approx 140$ sfu и 200 sfu на 3 и 7 ТГц соответственно, что показывает интенсивности вспышек от умеренных до малых (solar flux units - sfu - солнечные единицы потока; $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{Гц}^{-1}$).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для контроля за показаниями ТГц-фотометра основные бортовые данные, времена отсчетов и вспомогательные измерения передаются на землю с помощью телеметрии, используя возможности Iridium-сети. Телеметрический модуль (ТМ) состоит из модема (модель Iridium 9602) [17], электронных схем, которые являются основными компонентами микроконтроллеров, чипов памяти, линейного регулятора и DC/DC-преобразователя. Модем передает и принимает цифровые пакеты данных через сервис коротких пакетных данных Iridium SBD (Short Burst Data) [18]. Максимальный размер пакетов, передаваемых на Землю, должен иметь объем 340 байт, а размер передаваемых с Земли - 270 байт. ТМ модуль размещен в алюминиевом корпусе размером $15 \times 7 \times 5$ см, за исключением антенн, которые собираются в отдельно летающем баллоне. Существует задержка в передаче данных по линии баллон-земля, поэтому регулярно, примерно через каждые 20, с проводят обширные проверочные тесты.

Для проведения окончательного теста на работоспособность был собран полный комплект фотометрической системы SOLAR-T на 3 и 7 ТГц в соединении с модулями сбора данных и телеметрии (рис.7 и 8). Антенна Iridium для SOLAR-T требует для своей работы широкого углового поля зрения. Поэтому мы поместили ее в верхней части мачты,

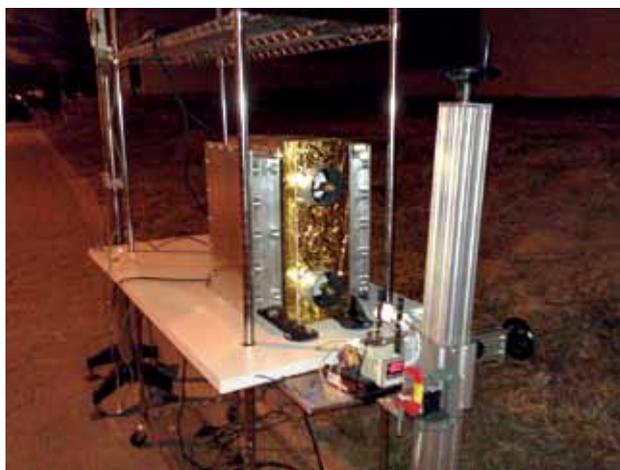


Рис.7. Фотометры SOLAR-T на 3 и 7 ТГц в сборе в ходе финальных эксплуатационных и приемо-сдаточных испытаний (на вход каждого телескопа подавали тепловой сигнал и осуществляли сбор, анализ, запись данных и их передачу в телеметрическую систему Iridium; антенны системы (не показаны) находятся в верхней части мачты)

Fig. 7. The SOLAR-T 3 and 7 THz photometers complete assembly, undergoing final performance and acceptance tests.. Each telescope received heat input signal, to acquire data, analyse, store and transmit to the Iridium telemetry system. The Iridium antennas are in the top of a mast, not seen in this picture.

acquired, stored and processed as displayed for one photometer (3 THz) in Fig. 4 (a-c).

The Goly cells have two typical response characteristics relevant for the observations: (1) their noise fluctuation is constant and the same for the whole range of input temperatures and (2) the voltage outputs are proportional to the input signal temperatures. The test calibration curves shown in Fig. 5 provide conversion factors for temperature variations of 4.2 K/mV at 3 THz and 9.8 K/mV at 7 THz. The result is qualitatively consistent, as expected for two similar Goly cells, since at 3 THz the blackbody power is smaller compared to 7 THz, and the frequency band-pass (i.e. about 13% of the central frequency) considerably smaller at 3 THz than at 7 THz.

The 30 minutes 7030 time series data points, as displayed in Fig. 4(a) are reduced into voltage r.m.s. variations relative to the mean value converted into temperature r.m.s. variations. As an example Fig. 6 shows the 3 THz relative r.m.s. temperature variations for one point every 256 ms, and with 5 and 10 points running means. The output is very stable, which is a necessary condition for the detections of excesses produced by burst transients. At 7 THz the values are

вместо того, чтобы поднимать вверх всю полезную нагрузку (рис.9).

Один некалиброванный высокотемпературный источник излучения помещали перед каждым фотометром и специальным поглотителем измеряли уровень мощности этого излучения снаружи и внутри фотометров. Двадцатиминутные наборы данных, полученные с разрешением 0,256 мс, сохраняли "на борту" SOLAR-T, далее передавали на спутник Iridium и снова принимали на наземной станции. Пример таких рядов наблюдений, полученных на 3 и 7 ТГц соответственно, проиллюстрирован (рис.10.). Они представляют собой зависимость напряжения в милливольтках от времени. Предварительно милливольтковые колебания напряжения были откалиброваны по эквивалентным изменениям температуры. Порядок изменения температурных величин составляет около 1 К и меньше (см. рис.6). Заметны последующие изменения в наборе данных, проявляющиеся в ходе их передачи (рис.10), но они вызваны не проявлением нестабильности инструмента, а являются следствием скоростных процедур и регулировки поглощения. Отдельно при проведении эксперимента в целях обеспечения избыточности экспериментальных результатов были использованы другие ряды идентичных данных: серии полученных результатов, а также сохраняемые результаты и переданные на Iridium-модуль [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы показали работоспособность 3- и 7-ТГц фотометров, использующих ячейки Голея в качестве детекторов, фильтры низких частот и полосовые фильтры, интегрированные с системами сбора, обработки данных и телеметрии. Уровень выходного напряжения фотометров очень стабильный, это обеспечивает необходимое условие для детектирования относительно небольших изменений потоков солнечных вспышек. Общее выходное напряжение пропорционально температуре от источника, расположенного перед телескопом. Величина флуктуаций выходного шума пропорциональна изменениям входной температуры и остается одинаковой для тепловых источников разной площади. Наблюдения во времени выявили, что относительное превышение величины флуктуаций над базовым уровнем не зависит от времени. Поэтому, учитывая пропорциональность $\Delta V \propto \Delta T$, наблюдаемые изменения среднеквадратичной величины свидетельствуют о появлении солнечной вспышки величиной 100 sfu, зафиксированной с субсекундным разрешением.

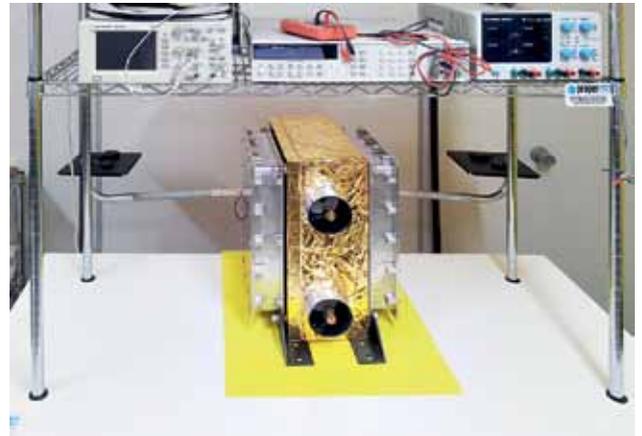


Рис.8. Экспериментальная установка для тестирования терагерцевых фотометров SOLAR-T, разработанная компанией Propertech (Жакареу, Сан-Паулу, Бразилия).
Fig.8. The completed SOLAR-T THz photometers experiment assembled by Propertech (Jacarei, SP, Brazil) laboratory, to be submitted to tests

nearly twice larger. The SOLAR-T THz photometers can detect relative temperature variations of the order of 1 K at sub second time resolution. This corresponds to moderate to small solar burst flux densities.

The SOLAR-T photometers minimum detectable flux densities ΔS can be estimated. The Rayleigh-Jeans approximation for blackbody emission remains valid in the THz range of frequencies [15]. The burst flux



Рис.9. Бортовая установка SOLAR-T, соединенная с антенной системы Iridium в верхней части мачты
Fig. 9. SOLAR-T "on-board" setup coupled to Iridium antenna at the top of the mast

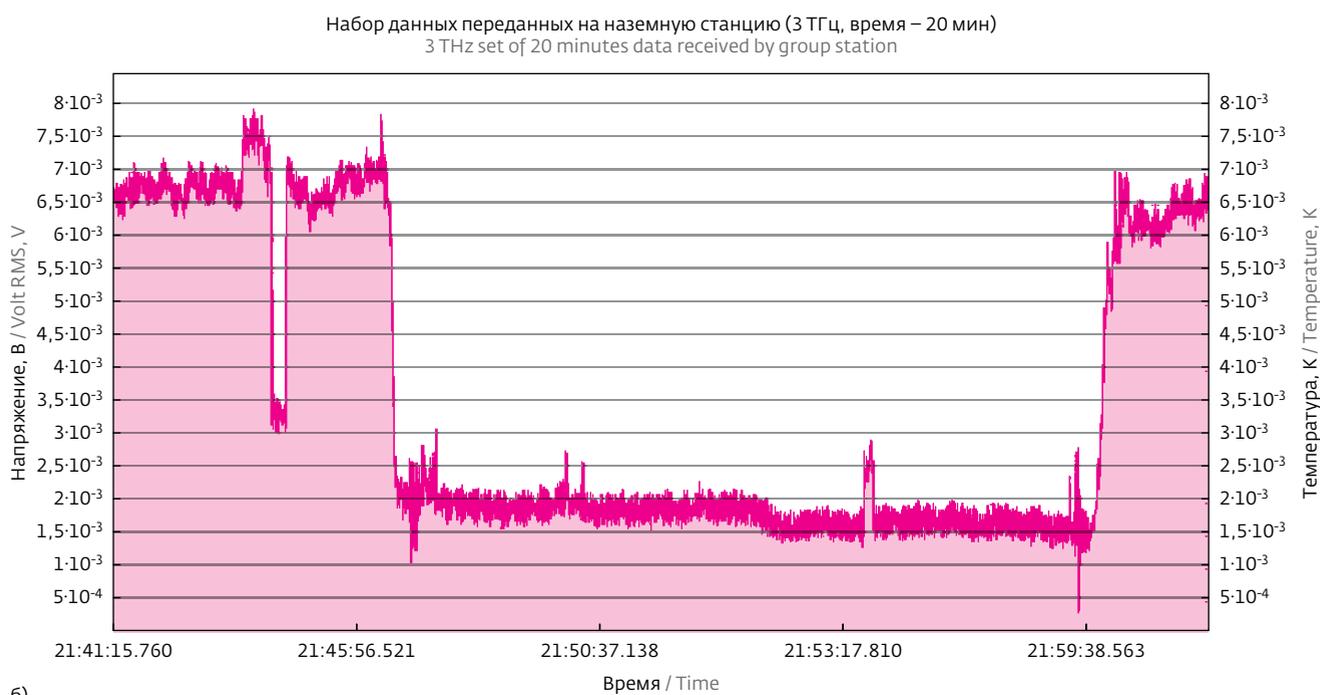
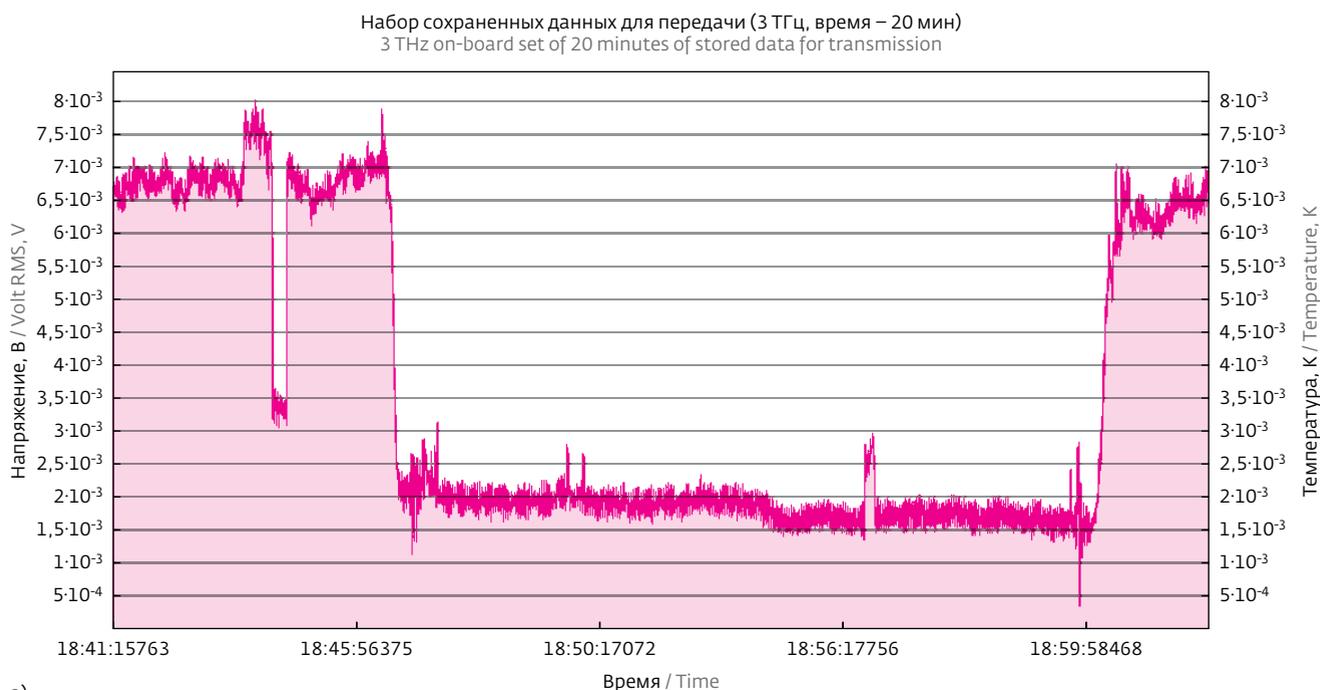


Рис.10. Ряд данных, зарегистрированных на 20-минутном интервале на частоте 3 ТГц при разрешающей способности по времени 256 мс: а) – сохраненных для последующей передачи с помощью службы передачи коротких сообщений (SBD) системы Iridium; б) – набор данных, переданный на наземную станцию без потери информации
Fig. 10. Example of 3 THz 20 minutes data time series, time resolution of 256 ms, acquired and stored for transmission at the top (a). After transmission via Iridium short-burst-data- services, the data set received by the ground station, in the bottom panel (b), without any loss of information

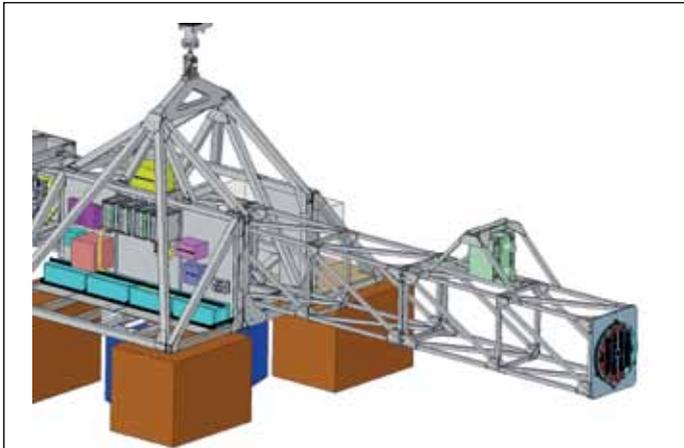


Рис.11. GRIPS-гондола. Положение экспериментальной установки SOLAR-T на штанге гамма-детектора (разработанного в Университете Беркли, Калифорния, США), который будет размещен на стратостате во время продолжительного полета над Антарктидой

Fig. 11. GRIPS-gondola. The designed position of SOLAR-T experiment on the boom of the UC Berkeley gamma ray detector GRIPS, to be carried on a stratospheric balloon long duration flight over Antarctica

Эксперименты в стратосфере с участием SOLAR-T пройдут в 2014–2016 годах, когда будут запущены два стратосферных шара в рамках GRIPS-эксперимента по изучению гамма-лучей [19]. Один из них будет предназначен для полета над Антарктидой, его осуществляет Университет Калифорнии, Беркли (США), планируемая продолжительность эксперимента – две недели. Второй – для полета над Россией, пройдет в сотрудничестве с Физическим институтом им.А.Н.Лебедева РАН (ФИАН), Москва (Россия), его длительность 7–10 дней. Автономные автоматические гондолы (рис.11) для наблюдения солнечных вспышек разработаны в Калифорнийском университете в Санта-Барбаре (США).

Мы выражаем признательность организациям, принявшим участие в финансировании нашей работы. Эта программа частично финансировалась агентствами Бразилии – FAPESP, CNPq INCT-NAMITEC, CNPq и Mackpesquisa, агентством Аргентины – CONICET и агентством США – AFOSR.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kaufmann P. et al. A new solar burst spectral component emitting only in the terahertz range. – *Astrophys. J.*, 2004, L121, v. 603.
2. Kaufmann P. et al. A bright impulsive solar burst detected at 30 THz. – *Astrophys. J.*, 2013, v. 768, p.134.

density is related to the excess temperature variations ΔT , above the observed baseline, according to the well known relationship [16] $\Delta S = 2 k \Delta T/A_e$ where k is the Boltzmann constant and A_e the effective aperture area, $A_e = \eta_a A_p$ where η_a is the aperture efficiency and A_p the aperture physical area. This assumption stands for burst sources with angular sizes of the order or smaller than the diffraction-limited beams angular sizes as seen from points located on the blurred solar disk image formed at the focal plane. For the 70 mm SOLAR-T telescopes they correspond to 27" and 12" at 3 and 7 THz respectively.

The aperture efficiency is estimated as the product of four transmissions: the TydexBlack, TPX and metal mesh band-pass filters in front of the Golay cell (about 0.35 at 3 THz and 0.29 at 7 THz as measured, see Fig. 2), the input TPX window (about 0.85 at 3 THz and 0.7 at 7 THz [12]), the physical blockage of subreflector structure (estimated 0.85 for both frequencies) and rough reflector transmission (preliminary estimate of 0.9 at both frequencies). The net aperture efficiencies η_a become approximately 0.23 at 3 THz and 0.15 THz at 7 THz, respectively. Thus for relative temperature variations $\Delta T \approx 0.5$ K at both frequencies we obtain the minimum detectable flux densities $\Delta S \approx 140$ sfu and 200 sfu at 3 and 7 THz, respectively ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W}^2\text{Hz}^{-1}$), corresponding to moderate to small burst intensities.

TELEMETRY PERFORMANCE

To monitor the THz photometers principal data acquired on board, clock, and auxiliary measurements are transmitted to ground by telemetry using the Iridium satellite network. The telemetry (TM) module is composed by a model 9602 Iridium modem [17] and an electronic circuitry which main components are a microcontroller, memory chip, linear regulator and a DC/DC converter. The modem transmits and receives digital data packages through the Iridium SBD – Short Burst Data – service [18]. Packages transmitted to ground have the maximum size of 340 bytes and those received from ground of 270 bytes. The TM module is housed in an aluminum milled box sized 15 x 7 x 5 cm, except by the antenna which is assembled in adequate position in the balloon boom. The balloon-to-ground transmission latency, still being verified through more extensive tests, is approximately 20 seconds.

The complete SOLAR-T 3- and 7-THz photometers system coupled to data acquisition and telemetry modules have been assembled for the definitive performance tests, as illustrated in Fig. 7 and 8. The SOLAR-T Iridium antenna requires a wide angular



3. **Fleishman G.D., Kontar E.** Sub-THz Radiation Mechanisms in Solar Flares. – *Astrophys. J.*, 2010, L127, v. 709.
4. **Marcon R. et al.** Terahertz photometer to observe solar flares in continuum. – *J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2012, v. 33, p.192-205.
5. **Kaufmann P. et al.** SOLAR-T : Terahertz Photometers to Observe Solar flare Emission on Stratospheric Balloon Flights. – *Proc. of SPIE*, 2008, v. 7012, 70120L, p.1-8.
6. **Fernandes L.O. T. et al.** Photometry of THz Radiation using Golay Cell Detector. – *Proc. XXX URSI GA, Paper JP2.10*, Istanbul, Turkey, 2011.
7. **Marcon R., Kaufmann P.** The method of maximum gain in the simultaneous detection of small sources of radiation in the vast field of view. Brazil Patent Application, Universidade Estadual de Campinas and Instituto Presbiteriano Mackenzie, Patent filed March 30, 2011.
8. **Golay M.J.E.** The theoretical and practical sensitivity of the pneumatic infra-red detector. – *Rev. Sci. Instrum.*, 1949, v. 20, p.816.
9. http://www.tydexoptics.com/pdf/Golay_cell.pdf.
10. **Kostiuk T., Deming D.** A solar infrared photometer for space flight application. – *Infrared Physics*, 1991, v. 32, p.225.
11. **Kornberg M.A. et al.** Rough mirrors for the THz frequency range. – *Proc. MOMAG 2008 – 13th SBMO and 8th CBMAC*, Florianopolis, SC, Brazil, 7-10 September, 367, 2008.
12. http://www.tydexoptics.com/pdf/THz_Low_Pass_Filter.pdf, 2012.
13. **Melo A.M. et al.** Metal mesh resonant filters for terahertz frequencies. – *Applied Optics*, 2008, v. 47, p.6064.
14. **Bortolucci E. et al.** THz band-pass resonant metal mesh filters for a space solar photometry experiment, VII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology – *Seminatec*, 77, 2012.
15. **Phillips T.G.** Techniques of submillimeter astronomy, in *Millimetre and submillimetre astronomy* (Ed. by R.D. Wolstencroft and W.B. Burton), Lectures at Summer School, Stirling, Scotland, June 21-27, 1987 (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL), p. 1-25, 1988.
16. **Kraus J.D.** *Radio Astronomy*, Cygnus-Quasar Books, Powell, Ohio, USA, 2nd. ed., Section 6-2, 1986.
17. <http://www.satrunner.com/en/iridium-9602-sbd-modem.html>
18. <http://www.wccip.com/SBD.asp>
19. **Shih A.Y. et al.** The Gamma-Ray Imager/Polarimeter for Solar Flares (GRIPS). – *American Geophysical Union, Fall Meeting*, abstract SM11B-1602, 200.

field of view. We have placed it at the top of a mast, instead of lifting up the entire payload (Fig. 9).

One uncalibrated high temperature source has been placed in and out of each photometer. Sets of 20 minutes of data acquired, with 0.256 ms resolution, were stored "on-board" the SOLAR-T, transmitted to the Iridium satellites, and received back by the ground station. We show in Fig. 10 examples of 20 minutes data set stored, transmitted and received, together with the clock indications, at 3 and 7 THz respectively. Data are in mV vs. time. The mV fluctuations were previously calibrated to equivalent temperature variations. They are of the order or smaller than about 1K (Fig. 6). Larger transient changes seen in the transmitted and received data sets (Fig. 10) are not due to the instrument instability, but to artifacts caused by rapid handlings and absorber adjustments.

A separated identical data acquisition, storage and Iridium transmission and reception were also built in the respective modules for redundancy purposes [5].

FINAL REMARKS

We have shown the performance of the 3 and 7 THz photometers, using Golay cell detectors, low pass and band-pass filters, integrated to data acquisition, processing, and telemetry. The output voltage level is very stable, which is a necessary condition to detect small relative changes. The total voltage output is proportional to the temperature of the source placed in front of the telescopes. The output noise fluctuations proportionality to the input temperature fluctuations remain the same for different input heat source areas. The relative excess fluctuations are irrespective from the baseline level of the time series. Relative one r.m.s. changes observed $\Delta V \propto \Delta T$ correspond to excess transient solar burst fluxes of the order of 100 SFU, at subsecond time resolution.

The SOLAR-T experiment shall fly on two long duration stratospheric balloon missions (2014-2016). One coupled to the gamma ray experiment GRIPS [19] of University of California, Berkeley, USA, over Antarctica (two weeks), and another over Russia (7-10 days) in cooperation with the Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia, on an autonomous automatic Sun tracking gondola (Fig. 11) developed by University of California, Santa Barbara, USA.

ACKNOWLEDGMENTS

This program was partially funded by Brazil agencies FAPESP, CNPq INCT-NAMITEC, CNPq, and Mackpesquisa, Argentina CONICET and US AFOSR.

