

УДК 53.082
EDN: HFABJS

PACS: 95.55.Ev

Характеристики и калибровка будущей научной аппаратуры «Солнце-Терагерц»

М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, М. В. Разумейко, С. В. Соков

Кратко описан космический эксперимент «Солнце-Терагерц», проведение которого планируется в 2025–2027 гг. на борту российского сегмента Международной космической станции. Цели указанного эксперимента – изучение Солнца в ранее неисследованном терагерцевом диапазоне, получение данных о терагерцевом излучении Солнца, а также изучение солнечных активных областей и солнечных вспышек. Рассмотрена разрабатываемая для эксперимента «Солнце-Терагерц» научная аппаратура, состоящая из восьми детектирующих каналов, которые чувствительны к излучению различной частоты в диапазоне 0,4–12,0 ТГц. Каждый канал содержит оптический телескоп, систему последовательных фильтров, оптический прерыватель и приёмник излучения с оптоакустическим преобразователем – ячейкой Голея. С помощью одноканального макета исследовано изменение чувствительности ячеек Голея аппаратуры при изменении их собственной температуры (температурный эффект). Проведена калибровка восьми детектирующих каналов при использовании имитатора чёрного тела. На основании полученных экспериментальных данных произведена оценка чувствительности аппаратуры.

Ключевые слова: Солнце, солнечные вспышки, терагерцевое излучение, оптическая система, температурный эффект, ячейка Голея.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-4-361-370

Введение

Солнце является источником электромагнитного излучения в широком диапазоне частот и энергий. В настоящее время проводятся

наземные и внеатмосферные наблюдения излучения практически во всём солнечном спектре [1–4] за исключением излучения терагерцевого диапазона, которое почти полностью поглощается земной атмосферой. Космический эксперимент «Солнце-Терагерц» направлен на исследование вспышечного излучения Солнца в терагерцевом диапазоне [5]. Главная цель эксперимента – получение новых экспериментальных данных для разработки и дальнейшего развития моделей физического механизма возникновения мощных солнечных протонных вспышек и их прогнозирование [6–14]. В ходе проведения космического эксперимента «Солнце-Терагерц» будет исследоваться терагерцевое излучение Солнца с целью определения физического механизма солнечных вспышек и развития метода их прогнозирования. Прогнозирование солнечных протонных вспышек необходимо для

Филиппов Максим Валентинович, высококвалифицированный научный сотрудник, к.ф.-м.н.

E-mail: filippovmv@lebedev.ru

Махмутов Владимир Салимгереевич, зав. лаб., д.ф.-м.н.

E-mail: mahmutovvs@lebedev.ru

Разумейко Михаил Викторович, вед. инженер-электроник.

Соков Сергей Витальевич, инженер 1 кат.

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53.

Статья поступила в редакцию 18.06.2024

После доработки 9.07.2024

Принята к публикации 15.07.2024

Шифр научной специальности: 1.3.2

© Филиппов М. В., Махмутов В. С., Разумейко М. В., Соков С. В., 2024

обеспечения радиационной безопасности космонавтов в длительных космических полётах.

Также, эти измерения позволяют определить физические характеристики и положение источника терагерцевого излучения в солнечной атмосфере, установить вклад теплового тормозного излучения и синхротронного излучения ускоренных электронов в наблюдаемом излучении.

Цель настоящей статьи – представить результаты калибровки детекторов научной аппаратуры «Солнце-Терагерц» и оценить их чувствительность.

Аппаратура для эксперимента «Солнце-Терагерц»

Разрабатываемая научная аппаратура для эксперимента «Солнце-Терагерц» (далее – аппаратура) представляет собой совокупность восьми детектирующих каналов, чувствительных к излучению на частотах 0,4; 0,7; 1,0; 3,0; 5,0; 7,0; 10,0 и 12,0 ТГц.

В состав каждого канала аппаратуры входят следующие приборы и устройства:

1. оптический телескоп [15], концентрирующий излучение в приёмник;

2. система последовательных фильтров, пропускающая излучение в заданном частотном диапазоне для каждого приёмника, состоящая из отсекающего фильтра LPF¹ и полосового фильтра BPF² и таким образом обеспечивающая селективность;

3. оптический прерыватель, модулирующий излучение во входном окне приёмника с частотой 10 Гц [16];

4. приёмник, в корпусе которого размещен оптоакустический преобразователь (ОАП) типа ячейки Голея³ и усилитель.

Блок электроники аппаратуры представляет собой совокупность электронных плат: платы усилителей, питания, электроники,

драйверов оптических прерывателей, автоматической системы обеспечения теплового режима.

Бортовая реализация космического эксперимента «Солнце-Терагерц» запланирована на 2025–2027 гг.

Вспомогательная аппаратура включает в себя одноканальный макет и имитатор чёрного тела (ИЧТ), используемые при сборке тестового стенда [17]. Детектирующие каналы аппаратуры исследовали на одноканальном макете, внутри которого устанавливали испытываемые телескоп, фильтры и приёмник. Работоспособность аппаратуры и её чувствительность при наземной экспериментальной отработке – проверках, юстировках и калибровках детектирующих модулей – оценивали с помощью ИЧТ, содержащего излучатель и блок управления и питания. С использованием нагреваемого керамического излучателя и внеосевого параболического зеркала ИЧТ формировал поток излучения в терагерцевом диапазоне волн, подобного излучению абсолютно чёрного тела в широком диапазоне яркостной температуры в радиочастотной области спектра.

Отбор приёмников для детекторов лётного образца

Для использования в аппаратуре был изготовлен комплект из 8 ОАП, на которые были установлены термодатчики TM-293-06. Каждый ОАП последовательно был смонтирован в одноканальный макет со следующей конфигурацией: установлен отсекающий фильтр LPF 23.1, не установлен полосовой фильтр BPF, резонансная частота оптического прерывателя – 10 Гц, температура излучателя ИЧТ – 473 К. В таблице 1 приведены результаты предварительной проверки ОАП. В первом столбце указан заводской номер ОАП. Второй столбец – средний размах сигнала за время измерения: приёмник в совокупности с оптическим прерывателем является источником переменного квазисинусоидального двухполярного сигнала, точкам экстремумов которого соответствуют факты закрытия-открытия лопаток оптического прерывателя, поэтому в дальнейшем анализе удобно использовать размах сигнала, то есть, разницу между двумя

¹ Характеристики отсекающих фильтров LPF23.1 [сайт]. URL: https://www.tydexoptics.com/pdf/ru/THz_Low_Pass_Filter.pdf (дата обращения: 27.01.24 г.)

² Характеристики отсекающих фильтров BPF [сайт]. URL: http://www.tydexoptics.com/ru/products/tgc-ustrojstva/thz_band_pass_filter/ (дата обращения: 27.01.24 г.)

³ Характеристики ОАП «Ячейка Голея» [сайт]. URL: http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_devices/golay_cell/ (дата обращения: 27.01.24 г.)

близлежащими экстремумами [17]. Третий столбец – номер канала аппаратуры, в котором планируется использовать данный ОАП. Четвёртый столбец – центральная частота, ответственная максимуму пропускания оптического тракта для данного канала. Пятый столбец – полоса пропускания совокупности фильтров для данного канала. Шестой столбец – оценка потоков солнечного излучения (Φ_s , Вт) регистрируемого приёмниками (с учётом характеристик телескопа, фильтров и входного окна ОАП). Солнце рассмотрено как абсолютно чёрное тело при температуре 5773 К. Данные были численно проинтегрированы в диапазоне от 0,01 до 2000 ТГц с шагом – 0,01 ТГц.

В каждый детектирующий канала подобран ОАП по принципу примерного равенства чувствительностей во всех каналах. Каналам, в которые поступают большие потоки излучения соответствуют ОАП с меньшей чувствительностью и наоборот.

Для каждого канала на одноканальном макете измерен размах сигнала приёмников при температуре излучателя ИЧТ от 373 до 873 К с шагом 100 К. Измерения проведены два раза, при различных значениях температуры на корпусе ОАП.

Таким образом для каждого приёмника определена зависимость $\Delta U_G/U_{G1} \times 100\%$ от ΔT_G , характеризующая температурный эффект ОАП [18]. Результаты приведены в таблице 2.

В первом столбце таблицы 2 указан номер канала. Второй столбец – центральная частота оптического тракта для данного канала. Третий столбец – заводской номер ОАП. Четвёртый столбец – угловой коэффициент температурной зависимости. Пятый столбец – коэффициент детерминации для аппроксимирующей прямой температурной зависимости. Шестой столбец – угловой коэффициент для аппроксимирующей прямой зависимости размаха сигнала приёмников от температуры

Таблица 1

Результаты предварительной проверки ОАП и схема их распределения по каналам детекторов

ОАП	U_G , мВ	Канал, №	v_{max} , ТГц	$\Delta v_{0,7}$, ТГц	Φ_s (5773 К), Вт
GC00392	7753,51	7	9,74	0,06	$(4,13 \pm 0,33) \times 10^{-6}$
GC00393	8010,66	6	6,72	0,04	$(4,76 \pm 0,38) \times 10^{-6}$
GC00394	8487,15	5	4,83	0,10	$(4,02 \pm 0,32) \times 10^{-6}$
GC00395	10703,83	3	0,98	0,28	$(4,37 \pm 0,35) \times 10^{-7}$
GC00396	11119,40	1	0,43	0,59	$(3,98 \pm 0,31) \times 10^{-7}$
GC00397	10488,14	4	2,85	1,12	$(1,34 \pm 0,11) \times 10^{-6}$
GC00398	13756,52	2	0,68	0,92	$(3,12 \pm 0,25) \times 10^{-7}$
GC00399	6720,55	8	11,46	0,62	$(4,26 \pm 0,34) \times 10^{-6}$

Таблица 2

Результаты расчёта угловых коэффициентов температурной зависимости для каждого канала

Канал, №	v_{max} , ТГц	ОАП	γ_G , %/°C	R_γ^2	$a_G(25\text{ °C})$, мВ/К	$b_G(25\text{ °C})$, мВ	R_G^2
1	0,40	GC00396	$-4,16 \pm 0,32$	0,80	$23,93 \pm 0,90$	$-8012,56 \pm 550,53$	0,99
2	0,68	GC00398	$-2,57 \pm 0,17$	0,84	$13,20 \pm 0,53$	$-4592,63 \pm 337,79$	0,99
3	0,98	GC00395	$-4,71 \pm 0,21$	0,95	$19,42 \pm 1,48$	$-7076,57 \pm 956,36$	0,98
4	2,90	GC00397	$-3,22 \pm 0,06$	0,94	$18,60 \pm 1,50$	$-6631,79 \pm 969,88$	0,97
5	4,84	GC00394	$-3,23 \pm 0,11$	0,86	$30,13 \pm 1,58$	$-10674,78 \pm 1021,35$	0,99
6	6,61	GC00393	$-5,78 \pm 0,29$	0,84	$41,34 \pm 1,97$	$-13428,34 \pm 1269,74$	0,99
7	9,69	GC00392	$-4,10 \pm 0,07$	0,87	$32,65 \pm 0,74$	$-12069,70 \pm 480,67$	0,99
8	11,16	GC00399	$-4,54 \pm 0,29$	0,96	$29,54 \pm 1,87$	$-10058,11 \pm 1286,96$	0,98

излучателя ИЧТ при температуре 25 °С на корпусе ОАП (формула 1). Седьмой столбец – свободный член аппроксимирующей прямой зависимости размаха сигнала приёмников от температуры (температурный эффект приёмников). Восьмой столбец – коэффициент детерминации.

$$U_G(T_{bb}) = \alpha_G T_{bb} + b_G. \quad (1)$$

На рисунке 1 (панель *a*) приведена зависимость относительного изменения размаха сигнала приемника $\Delta U_G/U_{G1} \times 100\%$ от изменения температуры приемника ΔT_G для

канала № 3 [18]. Используются данные измерений при температуре 473 К, 573 К, 673 К, 773 К, 874 К и точка (0;0). На панели *b* приведена зависимость размаха сигнала (U_G , мВ) приёмников от температуры излучателя ИЧТ (T , К) для канала № 3 при использовании оптического прерывателя на 10 Гц и расчётной температуре [18] на корпусе ОАП – 25 °С. Чёрные горизонтальные отрезки – величина инструментальной погрешности заданного значения температуры поверхности излучателя ИЧТ. Чёрные вертикальные линии – погрешность расчётного размаха сигнала приёмника.

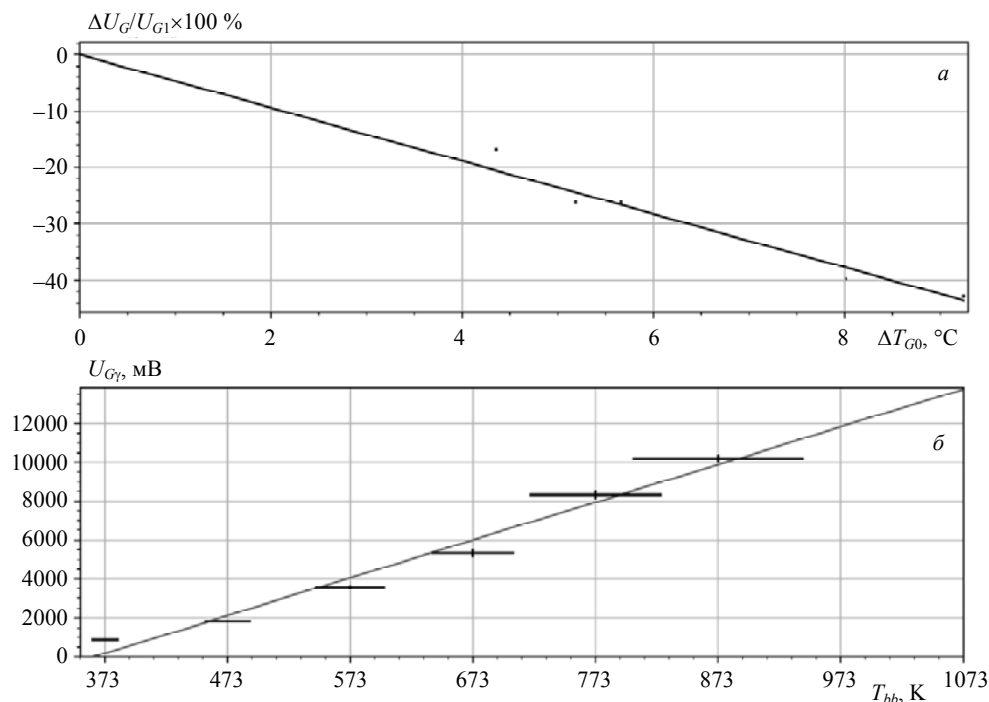


Рис. 1. Панель *a*: зависимость $\Delta U_G/U_{G1} \times 100\%$ от ΔT_G для канала № 3. Панель *b*: зависимость размаха сигнала (U_G , мВ) приёмников от температуры излучателя ИЧТ (T , К) для канала № 3 при использовании оптического прерывателя на 10 Гц и расчётной температуре на корпусе ОАП – 25 °С

Калибровка лётного образца научной аппаратуры

Ранее каждый приёмник из состава аппаратуры был в отдельности прокалиброван на одноканальном макете, однако таким образом не учитывается влияние на чувствительность оптических прерывателей (их частота), так как приёмники калибровались при использовании одного условно-эталонного прерывателя. Кроме того, необходимо испытать плату электроники аппаратуры и определить фактическую чувствительность аппаратуры. Также важным фактором является то, что при калибровке приёмников на одноканальном макете использовалось внешнее USB-АЦП, которое сохраняло полный исходный сигнал на компьютер, далее уже при обработке вычислялся размах сигнала за каждый период колебания оптического прерывателя. В аппаратуре вычисление локальных максимумов и минимумов происходит в микроконтроллере Платы

электроники аппаратуры и определить фактическую чувствительность аппаратуры. Также важным фактором является то, что при калибровке приёмников на одноканальном макете использовалось внешнее USB-АЦП, которое сохраняло полный исходный сигнал на компьютер, далее уже при обработке вычислялся размах сигнала за каждый период колебания оптического прерывателя. В аппаратуре вычисление локальных максимумов и минимумов происходит в микроконтроллере Платы

электроники и уже значения размаха сигнала сохраняются в памяти и далее передаются. Данный алгоритм (в том числе и зашумлённость итоговых данных) тоже необходимо было проверить и учесть.

Калибровка лётного образца аппаратуры была проведена 3 раза с помощью ИЧТ. Научная аппаратура запитывается и управляется с помощью контрольно-проверочной аппаратуры (КПА), а сбор, первичная визуализация и сохранение данных осуществляется с помощью тестового программного обеспечения. Измерения проводятся при температурах излучателя ИЧТ: 373–873 К с шагом 100 К. Перед каждым измерением проводится запись фоновых данных (около 2 мин). Далее ИЧТ устанавливается на входное окно канала № 1 (0,4 ТГц) на время 10–15 мин, после чего

вновь следует запись фоновых данных. Аналогичные измерения проводятся для остальных каналов.

На рисунке 2 приведена зависимость размаха сигнала (U_G , мВ) приёмника от температуры излучателя ИЧТ (T_{bb} , К) при фиксированной температуре на корпусе ОАП, равной 25 °С (расчётное значение). На верхней панели (а) приведён график размаха сигнала в канале № 1. Чёрные горизонтальные отрезки – инструментальная погрешность заданного значения температуры поверхности излучателя ИЧТ. Абсолютная погрешность размаха сигнала показана вертикальными линиями. Серая прямая линия – аппроксимации по МНК. На панелях (б) и (в) аналогично приведены графики для каналов № 5 и № 7, соответственно.

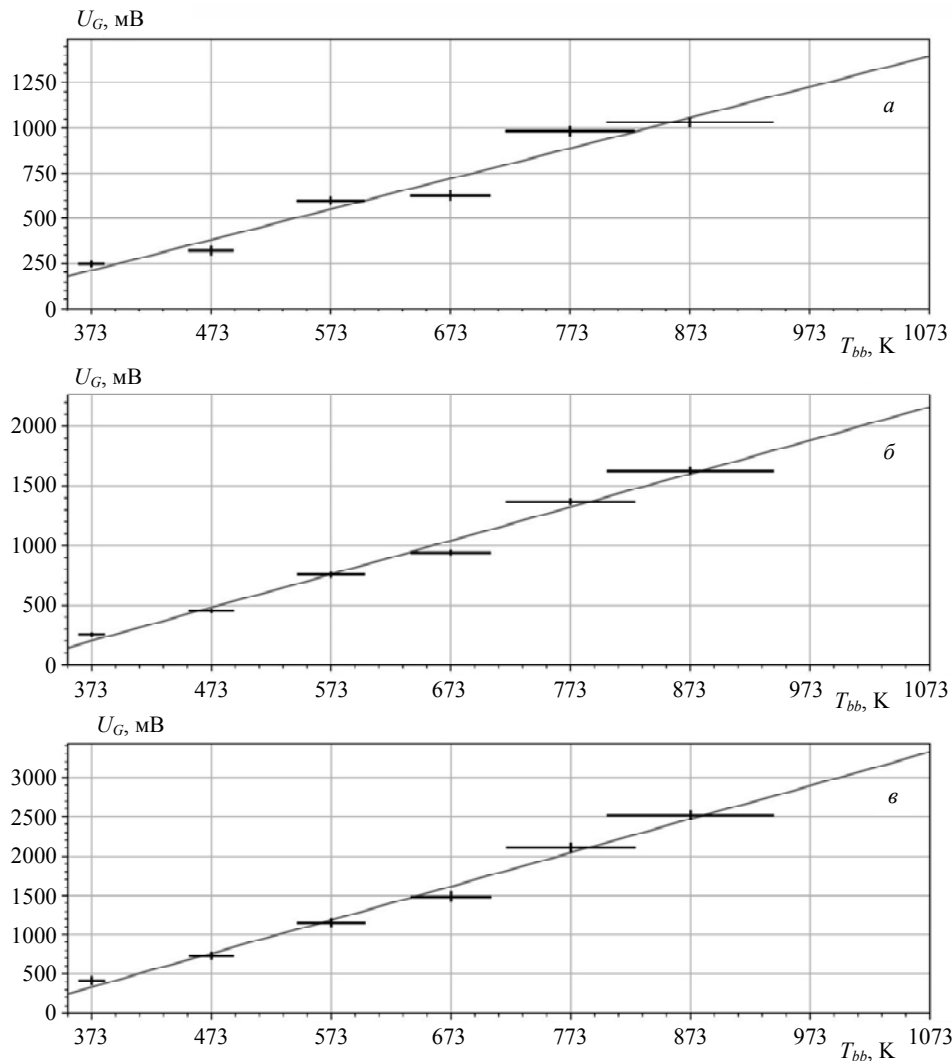


Рис. 2. Калибровка № 2. Зависимость размаха сигнала (U , мВ) приёмников от температуры излучателя ИЧТ (T_{bb} , К) для каналов № 1 (а), № 5 (б) и № 7 (в) при использовании оптического прерывателя на 10 Гц и расчётной температуре на корпусе ОАП – 25 °С

В таблице 3 приведены параметры (коэффициенты аппроксимирующей прямой) зависимости размаха сигнала (U_G , мВ) относительно температуры излучателя ИЧТ (T , К) по каждому каналу при частоте оптического прерывателя – 10 Гц и температуре на корпусе ОАП 25 °С. В первом столбце указаны номера каналов, во втором столбце – центральная частота пропускания системы фильтров в данном канале (ν_{\max} , ТГц), в третьем столбце – угловые коэффициенты ($a_G(\nu)$, мВ/К) аппрок-

симирующих прямых линий, в четвёртом столбце – свободные члены ($b_G(\nu)$, мВ), в пятом столбце – коэффициенты детерминации (R^2). Для каждого канала приведены результаты трёх калибровок.

Для проверки функционирования, научная платформа была установлена на специально изготовленную платформу и размещена вне помещения, где проводились непрерывные измерения солнечного фона в течении дня (рис. 3).

Таблица 3

Результаты расчёта зависимости размаха сигнала приёмников, относительно температуры излучателя ИЧТ

Канал, №	ν_{\max} , ТГц	$a_G(25\text{ °C})$, мВ/К	$b_G(25\text{ °C})$, мВ	R_G^2
1	0,40	$1,63 \pm 0,17$	$-414,49 \pm 110,03$	0,96
		$1,69 \pm 0,19$	$-419,07 \pm 123,99$	0,95
		$1,38 \pm 0,18$	$-283,28 \pm 117,96$	0,93
2	0,68	$4,59 \pm 0,33$	$-1155,03 \pm 213,20$	0,98
		$4,65 \pm 0,38$	$-1127,34 \pm 245,97$	0,97
		$4,46 \pm 0,25$	$-1047,33 \pm 160,21$	0,99
3	0,98	$2,13 \pm 0,17$	$-451,72 \pm 110,98$	0,98
		$2,34 \pm 0,20$	$-535,97 \pm 131,62$	0,97
		$2,20 \pm 0,11$	$-485,89 \pm 71,50$	0,99
4	2,90	$1,85 \pm 0,14$	$-186,69 \pm 89,21$	0,98
		$1,74 \pm 0,25$	$-62,57 \pm 162,49$	0,92
		$1,83 \pm 0,12$	$-138,55 \pm 76,37$	0,98
5	4,84	$2,62 \pm 0,10$	$-765,43 \pm 67,47$	0,99
		$2,80 \pm 0,15$	$-844,32 \pm 98,78$	0,99
		$2,74 \pm 0,08$	$-786,91 \pm 49,07$	0,99
6	6,61	$2,90 \pm 0,10$	$-915,40 \pm 63,94$	0,99
		$2,80 \pm 0,10$	$-869,65 \pm 62,78$	0,99
		$2,82 \pm 0,08$	$-873,72 \pm 50,77$	0,99
7	9,69	$4,15 \pm 0,13$	$-1222,98 \pm 82,90$	0,99
		$4,27 \pm 0,21$	$-1258,64 \pm 137,99$	0,99
		$4,00 \pm 0,07$	$-1114,28 \pm 44,88$	0,99
8	11,16	$2,18 \pm 0,12$	$-655,53 \pm 80,35$	0,99
		$2,27 \pm 0,12$	$-680,44 \pm 78,64$	0,99
		$2,09 \pm 0,06$	$-592,27 \pm 37,14$	0,99



Рис. 3. Измерение солнечного излучения научной аппаратурой на Долгопрудненской научной станции ФИАН

На рисунке 4 приведены графики данных для канала № 1, которые являются совокупностью восьми измерений, между которыми осуществлялась корректировка ориентации детекторов на Солнце.

Временной интервал примерно от 0 до 20000-й точки (скважность данным примерно составляет десять точек в секунду) соответствует установлению внутри аппаратуры теплового равновесия. Вследствие наличия тем-

пературного градиента между корпусом ОАП и датчиком температуры – температурный эффект ОАП скомпенсирован неполностью. Далее система входит в равновесие (снижается скорость изменения температуры корпуса ОАП) и 60000-й точки график размаха сигнала представляет собой практически прямую линию. После 60000-й точки научная аппаратура постепенно оказывается в тени, поэтому размах сигнала приёмника снижается.

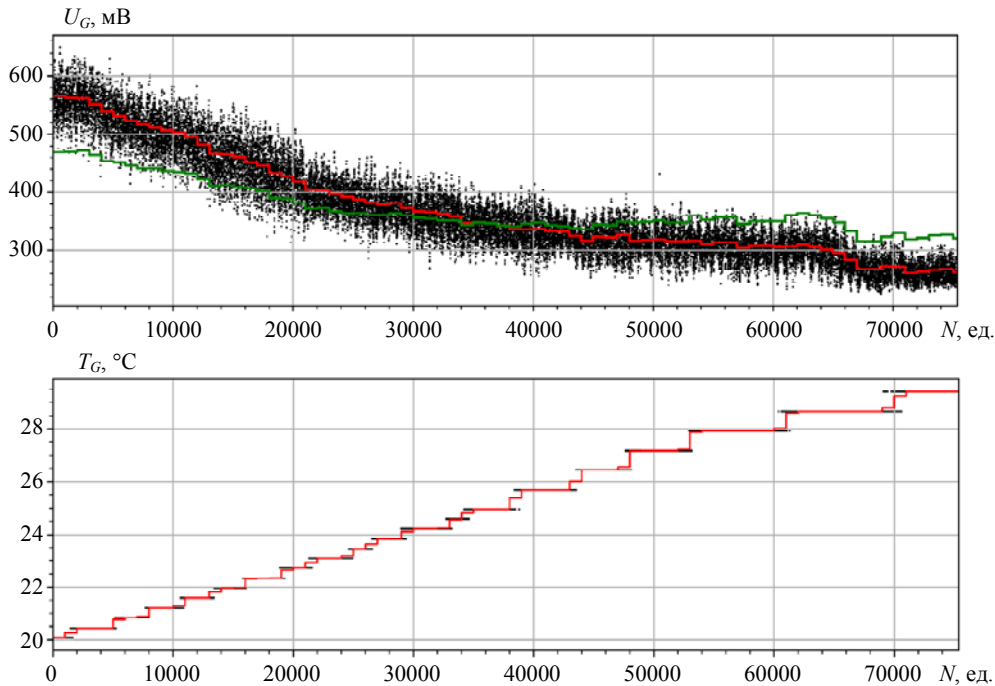


Рис. 4. Измерение солнечного излучения научной аппаратурой в канале № 1. Верхний график: чёрные точки – исходные значения измеренного размаха сигнала (мВ), красная кривая линия – усреднённые за 1000 (около 100 секунд) точек значения размаха сигнала (мВ), зелёная кривая линия – усреднённые за 1000 точек значения размаха сигнала (мВ) с учётом температурной поправки по данным датчика температуры на корпусе ОАП. Нижний график: чёрные точки – измеренная температуры по данным датчика на корпусе ОАП, красная кривая – данные о температуре с усреднением по 1000 точкам

Поток излучения ($\Phi_d(T_{bb})$, Дж) поступающий на входное окно телескопа детектора:

$$\Phi_d(T_{bb}) = S_{\text{тел}} \int_{\nu_1}^{\nu_2} r(\nu, T_{bb}) d\nu, \quad (2)$$

где $r(\nu, T_{bb})$ – спектральная плотность излучения на единицу площади в интервале частот ($\nu; d\nu$), Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{Гц}$); $S_{\text{тел}}$ – площадь входного окна телескопа (рассчитана как разность площади большого зеркала с площадью малого зеркала и крестовины), м^2 ; $S_{\text{тел}} = 3,84 \times 10^{-3} \text{ м}^2$.

Поток излучения от ИЧТ, проходящий через входное окно приёмника $\Phi_{\text{п}}$ (Вт) равен:

$$\Phi_{\text{п}}(T_{bb}) = S_{\text{тел}} \int_{\nu_1}^{\nu_2} d(\nu) r(\nu, T_{bb}) t_{\text{рез}}(\nu) d\nu, \quad (3)$$

где $d(\nu)$ – соотношение потока излучения, падающего на входное окно приёмника, к потоку излучения, падающего на входное окно телескопа, являющееся следствием дифракционных потерь на зеркалах; $t_{\text{рез}}(\nu)$ – коэффициент пропускания оптического трак-

та детектора: телескоп, система фильтров и входное окно ОАП.

Эффективность оптического тракта детектора (телескоп, система фильтров, входное окно приёмника) можно оценить, как отношение потока излучения, падающего на приёмник к потоку излучения, падающего на телескоп в полосе пропускания системы фильтров детектора: $\Phi_{\text{п}}/\Phi_{\text{д}}$.

Для этого уравнения из формул (2) и (3) следует интегрировать на частотах, находящихся в полосе пропускания системы фильтров для каждого детектора (таблица 1):

$$\begin{aligned} \nu_1 &= \nu_{\text{max}} - \Delta\nu_{0,7} / 2; \\ \nu_2 &= \nu_{\text{max}} + \Delta\nu_{0,7} / 2. \end{aligned} \quad (4)$$

С учётом формулы (1) формулу Планка можно представить в виде:

$$r(\nu, U_G) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{a_G h\nu}{k(U_G - b_G)}} - 1}. \quad (5)$$

Подставив уравнение (5) в формулы (2) и (3) при условии (4), для каждого канала получены значения потоков излучения на приёмнике $\Phi_{\text{п}}(U_G)$ и значения потоков излучения на входном окне телескопа детектора $\Phi_{\text{д}}(U_G)$ в полосе пропускания системы фильтров.

Чувствительность детекторов, в свою очередь, можно оценить, как отношение $U_G/\Phi_{\text{д}0}$ (В/Вт).

В таблице 4 приведены результаты расчёта чувствительности детекторов. В первом столбце указаны номера каналов, во втором столбце – центральная частота (ν_{max} , ТГц) пропускания системы фильтров в данном канале, в третьем столбце – потоки излучения ($\Phi_{\text{п}}$, Вт) на приёмнике при максимальном значении размаха сигнала на входе АЦП ($U_{G\text{max}} = 3,3$ В), в четвёртом столбце – потоки излучения ($\Phi_{\text{д}}$, Вт) на входном окне телескопа при выходном размахе сигнала приёмника $U_{G\text{max}}$, в пятом столбце – эффективность оптического тракта детектора ($\Phi_{\text{п}}/\Phi_{\text{д}}$, ед.), в шестом столбце – чувствительность детекторов ($U_{G\text{max}}/\Phi_{\text{д}}$, В/Вт).

Эффективность телескопов снижается с ростом частоты примерно с 50 % (канал 1) до 2 % (канал 8), что является следствием снижения коэффициента пропускания системы фильтров. Однако, увеличивается полоса пропускания, что в целом компенсирует снижение эффективности системы фильтров. Вследствие увеличения полосы пропускания канала, уменьшается его разрешающая способность.

Чувствительность детекторов при этом падает на 4 порядка, что в основном компенсируется большими потоками излучения на данных частотах.

Таблица 4

Результаты расчёта чувствительности детекторов

Канал, №	ν_{max} , ТГц	$\Phi_{\text{п}}(\Delta\nu_{0,7})$, Вт	$\Phi_{\text{д}}(\Delta\nu_{0,7})$, Вт	$\Phi_{\text{п}}(\Delta\nu_{0,7})/\Phi_{\text{д}}(\Delta\nu_{0,7})$, ед.	$U_{G\text{max}}/\Phi_{\text{д}}(\Delta\nu_{0,7})$, В/Вт
1	0,40	$4,32 \times 10^{-5}$	$7,96 \times 10^{-5}$	$5,43 \times 10^{-1}$	$2,51 \times 10^5$
2	0,68	$3,49 \times 10^{-5}$	$7,87 \times 10^{-4}$	$4,44 \times 10^{-1}$	$2,24 \times 10^5$
3	0,98	$2,86 \times 10^{-4}$	$6,57 \times 10^{-4}$	$4,35 \times 10^{-1}$	$1,64 \times 10^4$
4	2,90	$4,20 \times 10^{-3}$	$1,76 \times 10^{-2}$	$2,39 \times 10^{-1}$	$3,76 \times 10^2$
5	4,84	$1,38 \times 10^{-2}$	$8,47 \times 10^{-2}$	$1,63 \times 10^{-1}$	$2,36 \times 10^2$
6	6,61	$1,91 \times 10^{-2}$	$2,74 \times 10^{-1}$	$6,96 \times 10^{-2}$	$3,93 \times 10^1$
7	9,69	$1,39 \times 10^{-2}$	$3,30 \times 10^{-1}$	$4,21 \times 10^{-2}$	$5,34 \times 10^1$
8	11,16	$1,14 \times 10^{-2}$	$4,58 \times 10^{-1}$	$2,48 \times 10^{-2}$	$1,44 \times 10^1$

Заключение

В данной работе приведено краткое описание научной аппаратуры для эксперимента «Солнце–Терагерц», запланированного на борту Российского сегмента МКС. Основной задачей эксперимента является исследование Солнца в терагерцевом диапазоне излучения.

Можно сделать вывод, что многократное снижение чувствительности с ростом центральной частоты (вследствие снижения эффективности системы фильтров) – не приведёт к значительному снижению уровня сигналов детекторов, вследствие расширения полосы пропускания и, таким образом, увеличению интегральных потоков излучения. Также с ростом частоты – растёт спектральная плотность солнечного излучения, что, в свою очередь, также компенсирует снижение чувствительности.

Для увеличения точности калибровки и точности интерпретации научных данных в будущем, определена величина температурного эффекта приёмников излучения. Таким образом, задача определения потоков излучения, поступающих на приёмники, сводится к коррекции измеренных значений размаха сигнала на величину температурного эффекта, и, далее, пересчёта в величины потоков излучения, при использовании калибровочных кривых, полученных с помощью ИЧТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kinnison J., Vaughan R., Hill P., Raouafi N., Guo Y., Pinkine N. / IEEE Aerospace Conference. 2020. P. 1–14. <https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172703>
2. Howard R. A., Vourlidas A., Korendyke C. M. et al. / Solar Physics and Space Weather Instrumentation. 2013. P. 88620H. <https://doi.org/10.1117/12.2027657>
3. Domingo V., Fleck B., Poland A. I. / Space Science Reviews. 1995. Vol. 72. P. 81–84. <https://doi.org/10.1007/BF00768758>
4. Davila J. M., Rust D. M., Pizzo V. J., Liewer P. C. / Proceedings SPIE's 1996 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation. 1996. Vol. 2804. <https://doi.org/10.1117/12.259724>
5. Калинин Е. В., Филиппов М. В., Махмутов В. С. и др. / Космические исследования. 2021. № 1. С. 3–8. <https://doi.org/10.31857/S0023420621010040>
6. Kaufmann P., Raullin J.-P., de Castro C. G. G. et al. / Astrophysical Journal. 2004. Vol. 603. P. L121–L124. <https://doi.org/10.1086/383186>
7. Kaufmann P., Correia E., Costa J. E. R. et al. / Nature. 1985. Vol. 313. P. 380–382. <https://doi.org/10.1038/313380a0>
8. Kaufmann P. / Proceedings AIP conference. 1996. Vol. 374. P. 379–392. <https://doi.org/10.1063/1.50945>
9. Kaufmann P., Costa J. E. R., Castro C. G. G. et al. / Proceedings of the 2001 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. 2001. P. 439–442. <https://doi.org/10.1109/SBMOMO.2001.1008800>
10. Kaufmann P., Castro C. G. G., Makhmutov V. S. et al. / Journal of Geophysical Research. 2003. Vol. 108(A7). P. 1280. <https://doi.org/10.1029/2002JA009729>
11. Krucker S., Castro C. G. G., Hudson H. S. et al. / Astron Astrophys Review. 2013. Vol. 21. P. 58. <https://doi.org/10.1007/s00159-013-0058-3>
12. Luthi T., Magun A., Miller M. / Astronomy and Astrophysics. 2004. Vol. 415. P. 1123–1132. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034624>
13. Makhmutov V. S., Raulin J. P., Castro C. G. G., Kaufmann P., Correia E. / Solar Physics. 2003. Vol. 218. P. 211–220. <https://doi.org/10.1023/B:SOLA.0000013047.26419.33>
14. Махмутов В. С., Курт В. Г., Юшков Б. Ю. и др. / Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2011. Т. 75(6). С. 796–799.
15. Квашинин А. А., Логачев В. И., Филиппов М. В. и др. / Космическая техника и технологии. 2021. Т. 4(35). С. 22–30.
16. Филиппов М. В., Махмутов В. С., Максумов О. С. и др. / Космическая техника и технологии. 2023. Т. 1(40). С. 30–40. <https://www.elibrary.ru/wzamjn>
17. Филиппов М. В., Махмутов В. С., Логачев В. И., Разумейко М. В. / Журнал технической физики. 2023. Т. 93(9). С. 1377–1382. <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.09.56226.167-23>
18. Филиппов М. В., Махмутов В. С., Разумейко М. В. / Измерительная техника. 2024. Т. 3. С. 20–25. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-3-20-25>

Characteristics and issues of calibration of future scientific equipment “Sun-Terahertz”

M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, M. V. Razumeyko and S. V. Sokov

P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Science
53 Leninsky Ave., Moscow, 119991, Russia

Received 18.06.2024; revised 9.07.2024; accepted 15.07.2024

The future space experiment «Sun-Terahertz» is aimed at studying the Sun in the unexplored terahertz range, obtaining new data on the terahertz radiation of the Sun, solar active regions and solar flares. The scientific equipment being developed is a set of eight detectors sensitive to radiation of various frequencies in the range 0.4–12.0 THz. The Golay cell optoacoustic receiver was used as a sensitive element of the detectors. This paper examines the problem of changing the sensitivity of receivers of this type when their own temperature changes (temperature effect). Using a test bench based on a single-channel model of scientific equipment and a black body simulator. Eight detectors channels were calibrated using a black body simulator. Based on the experimental data obtained, the sensitivity of the detectors was assessed. The results of its testing are presented. This technique will be useful in the development of scientific equipment based on Golay cells, the operation of which is expected under conditions of temperature changes in the surrounding space.

Keywords: sun, solar flares, terahertz radiation, optical system, temperature effect, Golay cell.

REFERENCES

1. Kinnison J., Vaughan R., Hill P., Raouafi N., Guo Y. and Pinkine N., IEEE Aerospace Conference, 1–14 (2020). <https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172703>
2. Howard R. A., Vourlidas A., Korendyke C. M. et al., Solar Physics and Space Weather Instrumentation, 88620H (2013). <https://doi.org/10.1117/12.2027657>
3. Domingo V., Fleck B. and Poland A. I., Space Science Reviews **72**, 81–84 (1995). <https://doi.org/10.1007/BF00768758>
4. Davila J. M., Rust D. M., Pizzo V. J. and Liewer P. C., Proceedings SPIE's 1996 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation **2804** (1996). <https://doi.org/10.1117/12.259724>
5. Kalinin E. V., Philippov M. V., Makhmutov V. S. et al., Cosmic Research **59**(1), 1–5 (2021). <https://doi.org/10.1134/S0010952521010032>
6. Kaufmann P., Raullin J.-P., de Castro C. G. G. et al., Astrophysical Journal **603**, L121–L124 (2004). <https://doi.org/10.1086/383186>
7. Kaufmann P., Correia E., Costa J. E. R. et al., Nature **313**, 380–382 (1985). <https://doi.org/10.1038/313380a0>
8. Kaufmann P., Proceedings AIP conference **374**, 379–392 (1996). <https://doi.org/10.1063/1.50945>
9. Kaufmann P., Costa J. E. R., Castro C. G. G. et al., Proceedings of the 2001 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference 439–442 (2001). <https://doi.org/10.1109/SBMOMO.2001.1008800>
10. Kaufmann P., Castro C. G. G., Makhmutov V. S. et al., Journal of Geophysical Research **108**(A7), 1280 (2003). <https://doi.org/10.1029/2002JA009729>
11. Krucker S., Castro C. G. G., Hudson H. S. et al., Astron Astrophys Review **21**, 58 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00159-013-0058-3>
12. Luthi T., Magun A. and Miller M., Astronomy and Astrophysics **415**, 1123–1132 (2004). <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034624>
13. Makhmutov V. S., Raulin J. P., Castro C. G. G., Kaufmann P. and Correia E., Solar Physics **218**, 211–220 (2003). <https://doi.org/10.1023/B:SOLA.0000013047.26419.33>
14. Makhmutov V. S., Kurt V. G., Yushkov B. Yu. et al., Bulletin of the Russian Academy of Science: Physics **75**(6), 747–750 (2011). <https://doi.org/10.3103/S106287381106030X>
15. Kvashnin A. A., Logachev V. I., Philippov M. V. et al., Space engineering and technology **4**(35), 22–30 (2021). <https://doi.org/10.33950/spacetechn-2308-7625-2021-4-22-30>
16. Philippov M. V., Makhmutov V. S., Maksimov O. S. et al., Space engineering and technology **1**(40), 30–40 (2023).
17. Philippov M. V., Makhmutov V. S., Logachev V. I. and Razumeyko M. V., Technical Physics **93**(9), 1281 (2023). <https://doi.org/10.61011/TP.2023.09.57369.167-23>
18. Philippov M. V., Makhmutov V. S. and Razumeyko M. V., Izmeritel'naya Tekhnika **3**, 20–25 (2024) [in Russian]. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-3-20-25>