

УДК 53.082

МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ТРАКТОВ КОСМИЧЕСКОЙ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ “СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ” В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 0.4–20 ТГц

© 2025 г. М. В. Филиппов^{а, *}, В. С. Махмутов^а, М. В. Разумейко^а, Г. И. Кропотов^б,
В. А. Николаев^б

^а Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва, Россия

^б ООО “Тидекс”, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: mfilippov@frtk.ru, filippovmv@lebedev.ru

Поступила в редакцию 08.11.2024 г.

После доработки 20.11.2024 г.

Принята к публикации 03.12.2024 г.

В работе приведено описание космического эксперимента “Солнце-Терагерц”, запланированного на 2025–2027 гг. на борту российского сегмента Международной космической станции. Цели эксперимента — получение данных о терагерцевом излучении Солнца, а также изучение солнечных активных областей и солнечных вспышек. Научная аппаратура “Солнце-Терагерц” состоит из восьми детектирующих каналов, которые чувствительны к излучению различной частоты в диапазоне 0.4–12.0 ТГц. Цель данной работы: проверка соответствия фактических спектральных характеристик научной аппаратуры расчетным в рабочем диапазоне частот 0.4–20 ТГц при помощи вспомогательной аппаратуры и разработанной методики.

Ключевые слова: Солнце, солнечные вспышки, терагерцевое излучение, оптическая система, ячейка Голя

DOI: 10.31857/S0320930X25020038, EDN: KXKFFE

ВВЕДЕНИЕ

Солнце является источником электромагнитного излучения в широком диапазоне частот и энергий. В настоящее время проводятся наземные и внеатмосферные наблюдения излучения практически во всем солнечном спектре (Domingo и др., 1995; Davila и др., 1996; Howard и др., 2013; Kinnison и др., 2020) за исключением излучения терагерцевого диапазона, так как оно практически полностью поглощается земной атмосферой, кроме окна прозрачности с центральной частотой около 30 ТГц (Kaufmann и др., 2015). Космический эксперимент “Солнце-Терагерц” направлен на исследование вспышечно-го излучения Солнца в терагерцевом диапазоне (Калинин и др., 2021). Главная цель эксперимента — получение новых экспериментальных данных для разработки и дальнейшего развития моделей физического механизма возникновения

мощных солнечных протонных вспышек и их прогнозирование (Kaufmann и др., 1985; 2001; 2003; 2004; Kaufmann, 1996; Makhmutov и др., 2003; Luthi и др., 2004; Махмутов и др., 2011; Krucker и др., 2013). В ходе проведения космического эксперимента “Солнце-Терагерц” будет исследоваться терагерцевое излучение Солнца с целью определения физического механизма солнечных вспышек и развития метода их прогнозирования.

Изучение солнечных вспышек на различных частотах позволяет исследовать процессы, происходящие на разных уровнях солнечной атмосферы. Например, данные по субмиллиметровому излучению Солнца позволяют изучать процессы ускорения и переноса потоков энергичных электронов в нижних слоях солнечной атмосферы от переходной области до хромосферы (Wedemeyer и др., 2016). Некоторые вспышки имеют второй спектральный компонент:

вместо ожидаемого уменьшения потоков гиротронного излучения с ростом частоты наблюдается их рост на частотах 212 ГГц, 405 ГГц и выше (Kaufmann и др., 2004; Krucker и др., 2013). Получение новых экспериментальных данных, особенно в терагерцевом диапазоне волн порядка 1–10 ТГц, позволит изучить характеристики и физическую природу этой особенности частотного спектра, определить частоту, на которой происходят изменения наклона спектра в различных солнечных вспышках.

АППАРАТУРА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА “СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ”

Научная аппаратура “Солнце-Терагерц” (рис. 1) состоит из восьми детектирующих каналов (детекторов), чувствительных к излучению в окрестности частот 0.4; 0.7; 1.0; 3.0; 5.0; 7.0; 10.0 и 12.0 ТГц.

В состав каждого детектора излучения входят следующие компоненты:

- оптический телескоп (Квашнин и др., 2021), концентрирующий излучение в приемник;

- система последовательных фильтров, пропускающая излучение в заданном частотном диапазоне для каждого приемника, которая состоит из отрезающего фильтра LPF 23.1 (https://www.tydexoptics.com/pdf/ru/THz_Low_Pass_Filter.pdf) и полосового фильтра BPF (<http://www.tydexoptics.com/ru/products/tgc-ustrojstva/>

thz_band_pass_filter/) и обеспечивает таким образом селективность;

- оптический прерыватель, модулирующий излучение во входном окне приемника с частотой 10 Гц (Филиппов и др., 2023а);

- приемник, в корпусе которого размещен оптоакустический преобразователь (ОАП) “ячейка Голя” и усилитель (Кропотов, Kaufmann, 2013; Kaufmann и др., 2014; Филиппов и др., 2023б; 2024а; 2024б).

Блок электроники научной аппаратуры представляет собой совокупность электронных плат, обеспечивающих: питание, усиление сигналов ОАП, оцифровку, первичную обработку и передачу данных на борт МКС и т.д. (Филиппов и др., 2023в).

Бортовая реализация космического эксперимента “Солнце-Терагерц” запланирована на 2025–2027 гг.

Вспомогательная аппаратура, задействованная в эксперименте, включает в себя одноканальный макет детектора и ИЧТ — имитатор черного тела (Филиппов и др., 2023б).

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИЕМНИКОВ ЛЕТНОГО ОБРАЗЦА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ

При помощи одноканального макета для приемника проведена серия измерений размаха шумового сигнала (с установленной алюминиевой заглушкой во входное окно испытуемого

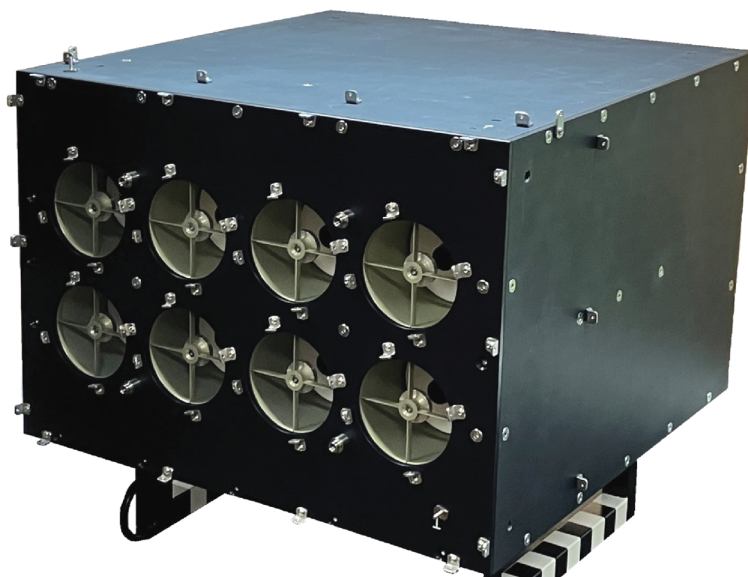


Рис. 1. Фотография научной аппаратуры “Солнце-Терагерц”: вид со стороны лицевой панели. Показаны входные окна телескопов, малые и большие зеркала.

приемника) при различных комнатных температурах. Данные приведены в табл. 1. В первом столбце — номер измерения, во втором столбце — средняя температура на корпусе ОАП, в третьем столбце — средний размах шумового сигнала приемника. В последней строке (1–7) приведены результаты, полученные по совокупности семи измерений.

Как видно, корреляция между температурой на корпусе ОАП и размахом шумового сигнала (при изменении температуры в интервале 4°C) отсутствует, поэтому далее собственные шумы приемника, обусловленные, в первую очередь, усилителем, будут считаться постоянными в пределах рабочих температур ОАП, а измеренное усредненное значение собственных шумов приемника: $U_G(\text{шум}) = (38.42 \pm 21.77) \text{ мВ}$.

Таким образом, можно оценить минимальный сигнал, к которому чувствительны приемники аппаратуры, как величину $U_G(\text{шум})$.

ПРОВЕРКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРА С ПОМОЩЬЮ ОДНОКАНАЛЬНОГО МАКЕТА И ИЧТ В ДИАПАЗОНЕ 0.4–20 ТГц

В данном эксперименте была исследована зависимость выходного сигнала приемника при фиксированной температуре излучателя ИЧТ: $T_{\text{bb}} = 873 \text{ К}$ для случаев одиночного и двойного установленных фильтров LPF 23.1.

Суть метода заключается в измерении отношения размаха сигналов приемника для одиночного отрезающего фильтра LPF 23.1 при максимально большой температуре, которую может

поддерживать ИЧТ в течение длительного времени ($U_G(873 \text{ К})$) и размаха сигналов приемника для двойного (два последовательных комплекта) отрезающего фильтра LPF 23.1 ($U_G^1(873 \text{ К})$).

Так как сигнал приемника пропорционален величине входного потока излучения, то можно предполагать, что отношение размаха сигналов приемника будет равно отношению расчетных потоков излучения для одиночного ($\Phi_R(873 \text{ К})$) и двойного отрезающего фильтра LPF 23.1 ($\Phi_R^1(873 \text{ К})$).

В оптические тракты детекторов входят: телескоп с двумя зеркалами, отрезающий фильтр LPF 23.1, полосовой фильтр BPF, также влияние оказывает спектральная характеристика входного окна ОАП. Результирующая спектральная характеристика оптического тракта получается путем перемножения спектральных характеристик пропускания и отражения (для зеркал). Спектральные характеристики как зависимость коэффициента пропускания или отражения от длины волны излучения получены в ООО “Тидекс”. Спектры пропускания отрезающего фильтра LPF 23.1 и полосовых фильтров BPF 1.0–BPF 12.0 были измерены с помощью спектрометра Bruker VERTEX 70, а спектры полосовых фильтров BPF 0.4 и BPF 0.7 измерены с помощью спектрометра Menlo Systems TERA K8 (Кропотов и др., 2023). Для снижения влияния инструментальных шумов, измерения проводятся четыре раза и, далее, усредняются в каждой точке. Таким образом, получается исходная спектральная характеристика. Далее исходные файлы характеристик от сетки длин волн приводятся к сетке частот с шагом 0.01 ТГц (промежуточные значения получены линейной интерполяцией) в диапазоне от 0.01 до 2000 ТГц.

Уровень инструментальных шумов измерительной аппаратуры оценен следующим образом: рассмотрены участки спектров, на которых спектральные коэффициенты пропускания (или отражения) исследуемых образцов стремятся к нулю. Среди близких к нулю значений также встречаются отрицательные величины, являющиеся следствием инструментальных шумов, либо смещения в усилительных каскадах измерительной аппаратуры. Характерная величина: 5×10^{-4} отн. ед.

Так как спектральная плотность потоков излучения спокойной атмосферы Солнца возрастает с ростом частоты, умножение малых величин спектрального коэффициента пропускания, являющегося инструментальными шумами,

Таблица 1. Измеренные значения размаха шумового сигнала для приемника № GC00284 при различных температурах корпуса ОАП

Номер измерения	$T_G, ^\circ\text{C}$	$U_G(\text{шум}), \text{мВ}$
1	21.92 ± 0.27	38.75 ± 21.91
2	22.55 ± 0.27	38.69 ± 22.14
3	23.15 ± 0.25	38.50 ± 21.76
4	23.69 ± 0.22	38.77 ± 21.84
5	24.22 ± 0.24	38.82 ± 22.04
6	25.07 ± 0.30	38.15 ± 21.59
7	25.96 ± 0.21	37.99 ± 21.64
1–7	24.14 ± 1.23	38.42 ± 21.77

на большие величины плотностей потоков излучения может дать существенный вклад в ошибку расчетных потоков солнечного излучения. Для снижения данного эффекта каждая спектральная характеристика проходит дополнительную обработку: из каждой точки вычитается величина 5×10^{-4} , после чего все отрицательные значения приравниваются нулю.

Возвращаясь к методу измерения отношения размахов сигналов для одиночного и двойного фильтров LPF 23.1 в оптическом тракте детектора: для компенсации температурного эффекта ОАП все измеренные значения следует приводить к одинаковой температуре на корпусе ОАП согласно формуле (1) (Филиппов и др., 2024б)

$$U_G(T_{bb}, T_{G2}) = \frac{U_G(T_{bb}, T_{G1})}{1 - \gamma_G \Delta T_G}, \quad (1)$$

где (T_{bb}, T_{G01}) – измеренный размах сигнала приемника (мВ) при температуре излучателя ИЧТ: T_{bb} и температуре T_{G1} на корпусе ОАП, мВ; $U_G(T_{bb}, T_{G2})$ – поправленный на температуру размах сигнала приемника (мВ); $\Delta T_G = T_{G2} - T_{G1}$; $T_{G2} = 25^\circ\text{C}$; $\gamma_G = (-3.52 \pm 0.06)\%$ на 1°C .

Однако, как было показано в табл. 1, собственные шумы приемника практически не зависят от температуры. Таким образом, для повышения точности расчета размах сигнала следует условно разделить на два компонента: полезный сигнал и характерный постоянный шумовой сигнал – и производить температурную поправку только на разницу полезного и шумового сигнала. Формула (1) с учетом шумового компонента сигнала принимает следующий вид:

$$U_G(T_{bb}, T_{G2}) = \frac{U_G(T_{bb}, T_{G1}) - \gamma_G \Delta T_G U_G(\text{шум})}{1 - \gamma_G \Delta T_G}, \quad (2)$$

где $U_G(\text{шум}) = (38.42 \pm 21.77)$ мВ.

Среднеквадратичное отклонение $\sigma U_G(T_{bb}, T_{G2})$ размаха сигнала приемника при температуре $T_{G2} = 25^\circ\text{C}$ на корпусе ОАП пересчитывается из среднеквадратичного отклонения $\sigma U_G(T_{bb}, T_{G1})$ размаха сигнала при температуре T_{G1} на корпусе ОАП аналогично:

$$\sigma U_G(T_{bb}, T_{G2}) = \frac{\sigma U_G(T_{bb}, T_{G1}) - \gamma_G \Delta T_G \sigma U_G(\text{шум})}{1 - \gamma_G \Delta T_G}. \quad (3)$$

Также следует отметить, что помимо того, что излучатель ИЧТ не является абсолютно черным телом (степень черноты в терагерцевом диапазоне волн не менее 0.88), необходимо учитывать воздушную прослойку (примерно 0.6 м) между излучающим элементом ИЧТ и входным окном

приемника, так как терагерцевое излучение в диапазоне 1–10 ТГц испытывает существенное (от 100 дБ/км до более чем 100000 дБ/км в зависимости от частоты) ослабление вследствие поглощения на молекулах воздуха (Cui и др., 2011; Yasuko, Takamasa, 2008).

Поток излучения от ИЧТ, проходящий через входное окно приемника Φ_R (Вт), равен

$$\Phi_R(T_{bb}) = S_{\text{tel}} \int_{\nu_1}^{\nu_2} d(\nu) r(\nu, T_{bb}) t(\nu) a(\nu) d\nu, \quad (4)$$

где S_{tel} – площадь входного окна телескопа ($S_{\text{tel}} = 3.84 \times 10^{-3} \text{ м}^2$); ν – частота излучения (в Гц) ($\nu_1 = 0.01$ ТГц, $\nu_2 = 2000$ ТГц); $d(\nu)$ – спектральный коэффициент дифракционных потерь на зеркалах телескопа; $r(\nu, T_{bb})$ – спектральная плотность излучения на единицу площади в интервале частот ($\nu; d\nu$), Вт/($\text{м}^2 \times \text{Гц}$); $t(\nu)$ – коэффициент пропускания оптического тракта детектора: телескоп, система фильтров и входное окно ОАП; $a(\nu)$ – спектральный коэффициент, определяющий поглощение излучения в воздухе.

На рис. 2 приведены спектры пропускания оптических трактов детекторов на 0.4; 5.0; и 10.0 ТГц при использовании одиночного отрезающего фильтра LPF 23.1 (синяя кривая) и двойного фильтра LPF 23.1 (красная кривая) с учетом поглощения излучения в воздухе.

Можно сделать предварительные выводы, что для каналов на 0.4, 0.7 и 1.0 ТГц при использовании двойного фильтра LPF 23.1 коэффициент пропускания ослабевает в пределах 70%, однако селективность каналов по частоте излучения резко возрастает. Поэтому для данных каналов возможно использовать двойной фильтр LPF 23.1 как штатный в научной аппаратуре. Для каналов на 3.0, 5.0, 7.0 ТГц применение двойного фильтра LPF 23.1 было бы не целесообразно, но возможно. Для каналов на 10.0 и 12.0 ТГц ввиду крайне низкого коэффициента пропускания и смещения его в нецелевую область частот – использование двойного фильтра LPF 23.1 невозможно.

В табл. 2 приведены результаты измерений размаха сигнала приемника с одиночным и двойным отрезающими фильтрами. В первом столбце приведены номера каналов. Во втором столбце – измеренное значение размаха сигнала приемника (U_G , мВ) при температуре излучателя ИЧТ $T_{bb} = 873 \text{ К}$, одиночном полосовом фильтре и температуре на корпусе ОАП 25°C . В третьем столбце – измеренное значение размаха сигнала приемника (U_G^1 , мВ) при температуре излучателя

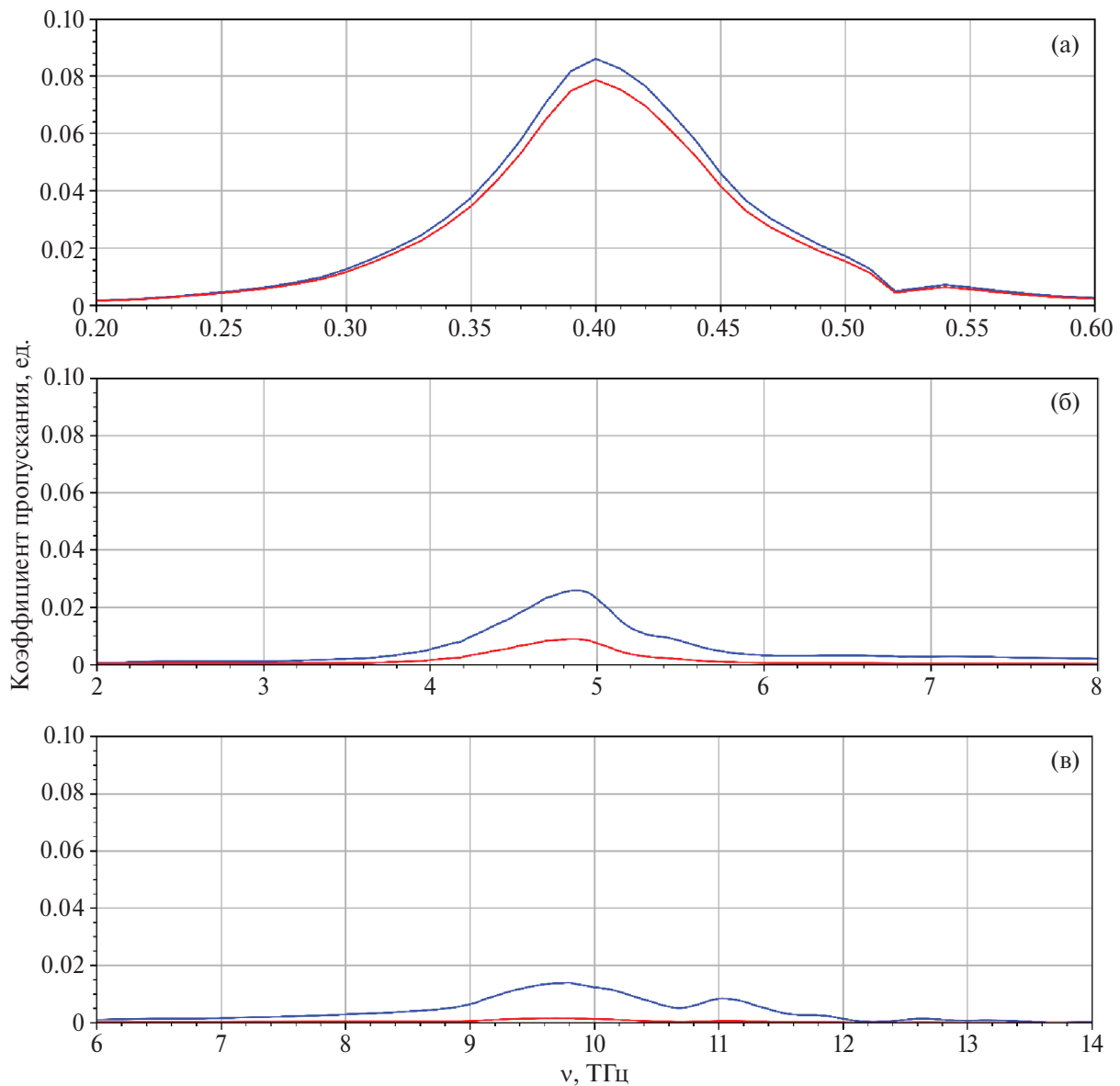


Рис. 2. Спектр пропускания оптических трактов детекторов с установленным одиночным фильтром LPF 23.1 (синяя кривая) и двойным фильтром LPF 23.1 (красная кривая) с учетом поглощения в воздухе: (а) – на 0.4 ТГц; (б) – на 5.0 ТГц; (в) – на 10.0 ТГц.

ИЧТ $T_{bb} = 873$ К, двойном полосовом фильтре и температуре на корпусе ОАП 25°C . В качестве измеренных значений размаха сигнала взяты средние значения, полученные за время эксперимента и приведенные к температуре 25°C по формуле (2). В четвертом столбце приведено отношение размаха сигнала при установленном одиночном отрезающем фильтре LPF 23.1 к размаху сигнала при установленном двойном фильтре LPF 23.1. В пятом столбце приведено рассчитанное по формуле (4) отношение потока излучения от ИЧТ при установленном

одиночном отрезающим фильтре LPF 23.1 к потоку излучения при установленном двойном фильтре LPF 23.1, рассчитанные в диапазоне 0.01–2000 ТГц. В шестом столбце приведено отношение расчетных значений потоков излучения от ИЧТ при температуре $T_{bb} = 873$ К и установленном одиночном фильтре LPF 23.1 $\Phi_R^2(873\text{K})$ – поток излучения от ИЧТ, поступающий в ОАП, рассчитанный в диапазоне частот 0.01–20 ТГц. $\Phi_R(873\text{K})$ – поток излучения от ИЧТ, поступающий в ОАП и рассчитанный в диапазоне частот 0.01–2000 ТГц.

Таблица 2. Результаты измерений размаха сигнала приемника с одиночным и двойным отрезающими фильтрами

Номер канала	$U_G(873\text{ K}), \text{ мВ}$	$U_G^1(873\text{ K}), \text{ мВ}$	U_G / U_G^1	$\Phi_n(873\text{ K}) / \Phi_n^1(873\text{ K})$	$\Phi_n^2(873\text{ K}) / \Phi_n(873\text{ K})$
1	5296.68 ± 90.40	493.25 ± 90.87	10.74 ± 2.17	11.44 ± 1.04	0.98 ± 0.09
2	3284.88 ± 57.13	202.86 ± 87.55	16.19 ± 7.27	10.32 ± 0.92	0.98 ± 0.09
3	3919.08 ± 161.89	324.04 ± 101.11	12.09 ± 4.27	8.03 ± 0.71	0.98 ± 0.09
4	9139.36 ± 75.83	894.55 ± 81.84	10.22 ± 1.01	8.64 ± 0.76	0.98 ± 0.09
5	12016.99 ± 80.87	1572.68 ± 34.85	7.64 ± 0.20	7.52 ± 0.66	0.98 ± 0.09
6	12164.82 ± 51.14	1249.19 ± 35.17	9.74 ± 0.32	9.53 ± 0.84	0.98 ± 0.09
7	9232.31 ± 120.32	681.11 ± 26.37	13.55 ± 0.70	13.01 ± 1.19	0.99 ± 0.09
8	11014.04 ± 102.75	491.95 ± 106.63	22.39 ± 5.06	17.28 ± 1.70	0.98 ± 0.14

Величина $\Phi_R^2(873\text{ K})/\Phi_R(873\text{ K})$ близка к единице (0.98–0.99), таким образом, согласно расчету, для каждого канала научная аппаратура чувствительна лишь к излучению, лежащему в примерном диапазоне 0.01–20 ТГц. Оставшееся излучение от ИЧТ практически полностью рассеивается элементами оптических трактов.

Отношение размахов сигналов с достаточной точностью (в пределах среднеквадратичных отклонений) согласуется с отношением входящих потоков излучения. В связи с этим можно сделать вывод, что фактическая спектральная пропускная характеристика оптических трактов не противоречит исходным измеренным и расчетным параметрам.

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.

Была разработана и опробована методика проверки соответствия расчетных характеристик оптических трактов научной аппаратуры экспериментальным данным. Данная методика пригодна для испытания приемников на базе ОАП “ячейка Голея” в любом целевом диапазоне частот.

Как показывают расчеты, научная аппаратура чувствительна к излучению в диапазоне частот 0.01–20 ТГц, что удовлетворяет условиям предстоящего эксперимента. С учетом примерного (в пределах среднеквадратичных отклонений) равенства отношений U_G / U_G^1

и $\Phi_R(873\text{ K})/\Phi_R^1(873\text{ K})$ можно сделать вывод, что отношение $\Phi_R^2(873\text{ K})/\Phi_R(873\text{ K})$ также рассчитано верно.

Эта работа финансировалась за счет бюджета организации. Никаких дополнительных грантов для выполнения этого исследования не получено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Е.В., Филиппов М.В., Махмутов В.С., Максумов О.С., Стожков Ю.И., Квашинин А.А., Измайлов Г.Н., Озолин В.В. Исследование температурного эффекта резонансных оптических прерывателей в космической научной аппаратуре // Космич. исслед. 2021. Т. 59. № 1. С. 3–8. <https://doi.org/10.31857/S0023420621010040>
2. Квашинин А.А., Логачев В.И., Филиппов М.В., Махмутов В.С., Максумов О.С., Стожков Ю.И., Калинин Е.В., Орлов А.А., Озолин В.В., Измайлов Г.Н., Криволапова О.Ю., Гайфутдинова А.Г. Оптическая система прибора для измерения солнечного терагерцевого излучения // Космич. техника и технологии. 2021. Т. 4. № 35. С. 22–30.
3. Кропотов Г., Кауфманн П. Терагерцевые фотометры для наблюдений солнечных вспышек из космоса // Фотоника. 2013. Т. 5. № 41. С. 40–50.
4. Кропотов Г.И., Шахмин А.А., Каплунов И.А., Роголин В.Е. Применение спектральных приборов в оптическом производстве и научных исследованиях // Фотоника. 2023. Т. 5. № 17. С. 378–393. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.5.378.392>
5. Махмутов В.С., Курт В.Г., Юшков Б.Ю., Гречнев В.В., Кауфманн П., Ролан Ж.-П., Базилевская Г.А., Стожков Ю.И. Спектральные

- особенности высокоэнергичного рентгеновского, гамма-излучения и субмиллиметрового радиоизлучения в импульсной фазе солнечной вспышки // Изв. Российской академии наук. Сер. физич. 2011. Т. 75. № 6. С. 796–799.
6. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Максумов О.С., Квашинин А.А., Калинин Е.В., Логачев В.И., Гайфутдинова А.Г., Криволапова О.Ю., Соков С.В., Мизин С.В. Исследование температурного эффекта резонансных оптических прерывателей в космической научной аппаратуре // Космич. техника и технологии. 2023а. Т. 1. № 40. С. 30–40. <https://www.elibrary.ru/wzamjn>
 7. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Логачев В.И., Разумейко М.В. Расчет чувствительности детекторов для космического эксперимента “Солнце-Терагерц” // Журнал технич. физики. 2023б. Т. 93. № 9. С. 1377–1382. <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.09.56226.167-23>
 8. Филиппов М.В., Логачев В.И., Махмутов В.С., Разумейко М.В., Гайфутдинова А.Г., Криволапова О.Ю. Расчет потоков солнечного терагерцевого излучения, регистрируемого приемниками научной аппаратуры на борту Международной космической станции // Космич. техника и технологии. 2024а. Т. 2. № 45. С. 68–83. <https://www.elibrary.ru/xdheun>
 9. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Разумейко М.В. Научная аппаратура для космического эксперимента “Солнце-Терагерц”: исследование температурного эффекта ячейки Голя // Измерит. техника. 2024б. № 3. С. 20–25. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-3-20-25>
 10. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Максумов О.С., Квашинин А.А., Квашинин А.Н., Разумейко М.В., Логачев В.И., Мизин С.В., Соков С.В. Блок электроники для научной аппаратуры “Солнце-Терагерц” // Приборы и техника эксперимента. 2024в. № 3. С. 108–117.
 11. Cui H., Yao J., Wan Ch. The study on THz wave propagation feature in atmosphere // J. Phys. Conf. Ser. 2011. V. 276. Id. 012225. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/276/1/012225>
 12. Davila J.M., Rust D.M., Pizzo V.J., Liewer P.C. Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO) // Proc. SPIE's 1996 Int. Symp. Optical Sci. Engineering and Instrumentation. V. 2804. Missions to the Sun. 1996. <https://doi.org/10.1117/12.259724>
 13. Domingo V., Fleck B., Poland A.I. SOHO: The Solar and Heliospheric Observatory // Space Sci. Rev. 1995. V. 72. P. 81–84. <https://doi.org/10.1007/BF00768758>
 14. Howard R.A., Vourlidas A., Korendyke C.M., Plunkett S.P., Carter M.T., Wang D., Rich N., Lynch S., Thurn A., Socker D.G., Thernisien A.F., Chua D., Linton M.G., Koss S., Tun-Beltran S., Dennison H., Stenborg G., McMullin D.R., Hunt T., Baugh R., Clifford G., Keller D., Janesick J.R., Tower J., Grygon M., Farkas R., Hagood R., Eisenhauer K., Uhl A., Yerushalmi S., Smith L., Liewer P.C., Velli M.C., Linker J., Bothmer V., Rochus P., Halain J.-P., Lamy P.L., Auchère F., Harrison R. A., Rouillard A., Patsourakos S., Cyr O.C.St., Gilbert H., Maldonado H., Mariano C. and Cerullo J. The solar and heliospheric imager (SoloHI) instrument for the Solar Orbiter mission // Sol. Phys. and Space Weather Instrument. 2013. V. 8862. Id. 88620H. <https://doi.org/10.1117/12.2027657>
 15. Kaufmann P., Raullin J.-P., de Castro C.G.G., Levato H., Gary D.E., Costa J.E.R., Marun A., Pereyra P., Silva A.V.R., and Correia E. A new solar burst spectral component emitting only in the terahertz range // Astrophys. J. 2004. V. 603. P. L121–L124. <https://doi.org/10.1086/383186>
 16. Kaufmann P., Correia E., Costa J.E.R., Zodi Vaz A. M., Dennis B.R. Solar burst with millimetre-wave emission at high frequency only // Nature. 1985. V. 313. P. 380–382. <https://doi.org/10.1038/313380a0>
 17. Kaufmann P. Submillimeter/IR solar bursts from high energy electrons // Proc. AIP Conf. 1996. V. 374. P. 379–392. <https://doi.org/10.1063/1.50945>
 18. Kaufmann P., Costa J.E.R., Gimenez De Castro C.G., Hadano Y.R., Kingsley J.S., Kingsley R.K., Levato H., Marun A., Raulin J.-P., Rovira M., Correia V., Silva A.V.R. The new submillimeter-wave solar telescope // Proc. 2001 SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Optoelectron. Conf. 2001. P. 439–442. <https://doi.org/10.1109/SBMOMO.2001.1008800>
 19. Kaufmann P., Castro C.G.G., Makhmutov V.S., Raulin J.-P., Schwenn R., Levato H., Rovira M. Launch of solar coronal mass ejections and submillimeter pulse bursts // J. Geophys. Res. 2003. V. 108 (A7). P. 1280. <https://doi.org/10.1029/2002JA009729>
 20. Kaufmann P., Marcon R., Abrantes A., Bortolucci E.C., Fernandes L.O.T., Kropotov G.I., Kudaka A.S., Machado N., Marun A., Nikolaev V., Silva A., da Silva C.S., Timofeevsky A. THz photometers for solar flare observations from space // Exp. Astron. 2014. V. 37. P. 579–598. <https://doi.org/10.1007/s10686-014-9389-y>
 21. Kaufmann P., White S.M., Marcon R., Kudaka A.S., Cabezas D.P., Cassiano M.M., Francile C., Fernandes L.O.T., Hidalgo Ramirez R.F., Luoni M., Marun A., Pereyra P., de Souza R. V. Bright 30 THz

- impulsive solar bursts // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. V. 120. P. 4155.
<https://doi.org/10.1002/2015JA021313>
22. Kinnison J., Vaughan R., Hill P., Raouafi N., Guo Y., Pinkine N. Parker Solar Probe: A Mission to Touch the Sun // *IEEE Aerospace Conf.* 2020. P. 1–14.
<https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172703>
23. Krucker S., Castro C.G.G., Hudson H.S., Trotter G., Bastian T.S., Hales A.S., Kašparová J., Klein K. -L., Kretzschmar, M., Lüthi, T., Mackinnon, A., Pohjolainen, S., White S.M. Solar flares at submillimeter wavelengths // *Astron. and Astrophys. Rev.* 2013. V. 21. Id. 58.
<https://doi.org/10.1007/s00159-013-0058-3>
24. Luthi T., Magun A., Miller M. First observation of a solar X-class flare in the submillimeter range with KOSMA // *Astron. and Astrophys.* 2004. V. 415. P. 1123–1132.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034624>
25. Makhmutov V.S., Raulin J.P., Castro C.G.G., Kaufmann P., Correia E. Wavelet decomposition of submillimeter solar radio bursts // *Sol. Phys.* 2003. V. 218. P. 211–220.
<https://doi.org/10.1023/B:SOLA.0000013047.26419.33>
26. Wedemeyer S., Bastian T., Brajša R., Hudson H., Fleishman G., Loukitcheva M., Fleck B., Kontar E.P., De Pontieu B., Yagoubov P., Tiwari S.K., Soler R., Black J.H., Antolin P., Scullion E., Gunár S., Labrosse N., Ludwig H.-G., Benz A.O., White S.M., Hauschildt P., Doyle J.G., Nakariakov V.M., Ayres T., Heinzel P., Karlicky M., Van Doorselaere T., Gary D., Alissandrakis C.E., Nindos A., Solanki S.K., Rouppe van der Voort L., Shimojo M., Kato Y., Zaqarashvili T., Perez, E., Selhorst C.L., Barta M. Solar science with the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array – A new view of our Sun // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 200. P. 1–73.
<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0229-9>
27. Yasuko K., Takamasa S. Atmospheric propagation model of terahertz-wave // *J. Nat. Inst. Informat. and Communicat. Technology.* 2008. V. 55. № 1. P. 73–77.