

УДК 53.084

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «СОЛНЦЕ – ТЕРАГЕРЦ»

© 2024 г. Е. Д. Тульников^{1,2,*}, В. И. Логачев¹, В. С. Махмутов^{1,2}, М. В. Филиппов¹,
А. А. Квашнин¹, М. В. Разумейко¹, С. В. Соков¹, С. В. Мизин¹

¹Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Московская обл., Долгопрудный, Россия

*e-mail: tulnikov.ed@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.03.2024

После доработки 27.04.2024

Принята к публикации 01.05.2024

В работе представлено краткое описание основных научных задач космического эксперимента «Солнце – Терагерц». В рамках указанного проекта в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук проводится изготовление научной аппаратуры (НА) для установки на Российском сегменте МКС. Оптическая система каждого из восьми приемников излучения НА состоит из системы зеркал, оптического прерывателя, отрезающего и полосового фильтров. Для каждого элемента данной системы получены спектральные характеристики. При калибровке прибора используется тепловой источник — имитатор черного тела (ИЧТ). Для оценки сигнала спокойного Солнца методами численного интегрирования рассчитана интенсивность излучения, проходящего через систему фильтров с использованием стандартного солнечного спектра ASTM E-490.

DOI: 10.31857/S0023420624060023, EDN: IGQQCJ

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнце является источником электромагнитного излучения в широком диапазоне частот и энергий. В настоящее время проводятся наземные и внеатмосферные наблюдения излучения практически по всему солнечному спектру [1–4] за исключением излучения терагерцевого диапазона, которое почти полностью поглощается земной атмосферой. Космический эксперимент «Солнце – Терагерц», на борту Российского сегмента МКС, направлен на измерение излучения Солнца в терагерцевом диапазоне на частотах 10^{12} – 10^{13} Гц [5]. Главная цель эксперимента — получение новых данных о терагерцевом излучении Солнца, солнечных активных областей и солнечных вспышек [6–14] одновременно на 8 частотах в диапазоне 0.4–12.0 ТГц. Эти данные необходимы для выяснения природы солнечной активности, определения физического

механизма ускорения заряженных частиц на Солнце и других астрофизических объектах.

Разрабатываемая научная аппаратура (НА) представляет собой прибор из восьми детекторов (блок детекторов), чувствительных к излучению различной частоты: 0.4; 0.7; 1.0; 3.0; 5.0; 7.0; 10.0 и 12.0 ТГц.

В состав каждого детектора входят:

- оптический телескоп [15], концентрирующий излучение на оптоакустическом преобразователе (ОАП);

- система последовательных фильтров, пропускающая излучение в заданном частотном диапазоне для каждого детектирующего модуля, состоящая из отрезающего фильтра (LPF) [16] и полосового фильтра (BPF) [17]; таким образом обеспечивается селективность.

– оптический прерыватель, модулирующий излучение на входном окне приемника с частотой 10 Гц [18];

– оптоакустический преобразователь «Ячейка Голея» (ОАП), который, в совокупности с усилителем, является приёмником излучения [19].

Блок электроники НА «Солнце – Терагерц» представляет собой совокупность электронных плат: платы усилителей, драйверы оптических прерывателей, платы питания, платы электроники и автоматической системы обеспечения теплового режима (АСОТР).

В настоящей работе для каждого приёмника (детектора) получены спектральные характеристики. При калибровке прибора использован тепловой источник — имитатор черного тела (ИЧТ) [20]. Рассчитана интенсивность излучения от ИЧТ, которая регистрировалась приёмниками после прохождения излучения через систему фильтров телескопа. Для оценки сигнала от спокойного Солнца рассчитана интенсивность излучения, проходящего через систему фильтров, с использованием стандартного солнечного спектра ASTM E-490 [21].

Бортовая реализация космического эксперимента «Солнце – Терагерц» запланирована на 2024–2025 гг.

2. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПРИБОРА

Оптическая система каждого из восьми приёмников излучения НА состоит из системы зеркал (TEL), оптического прерывателя, отсекающего (LPF) и полосового (BPF) фильтров и входного окна приёмника терагерцевого излучения (HDPE). Примеры пропускных характеристик приведены на рис. 1. Так как пропускные характеристики изначально были измерены изготовителем на различных сетках частот, для удобства проведения расчётов данные измерений были дополнены линейной интерполяцией внутри диапазона исходных измерений. Вне этого диапазона пропускные характеристики

приняты равными нулю, так как за пределами диапазона измерений пропускная характеристика совокупной оптической системы находится на уровне аппаратных шумов оптических стендов (на базе Bruker Vertex 70 и MenloSystems TERA K8), на которых проводились измерения их спектральных характеристик. Особенностью оптической системы каналов на 3, 5, 7 и 12 ТГц является то, что они имеют в области низких частот пропускание сравнимое с пропусканием в окрестности целевой частоты (рис. 2). Погрешность, с которой будут вычисляться интегралы по интерполированным функциям, определялась по формуле (1), то есть вычислялось среднее взвешенное отношение полуразности значений в двух соседних точках к среднему значению в этих точках. Для системы зеркал эта величина составила 0.002 %, для фильтра LPF — 0.122%, для HDPE — 0.191%, для фильтра BPF0.4 — 8.422%, для фильтра BPF0.7 — 9.112%, для фильтра BPF1 — 0.157%, для фильтра BPF3 — 0.052%, для фильтра BPF5 — 0.006%, для фильтра BPF7 — 0.006%, для фильтра BPF10 — 0.008%, для фильтра BPF12 — 0.009%. Погрешность для произведения фильтров определялась по формуле (2), то есть погрешности отдельных фильтров складывались как относительные погрешности (табл. 1). Также был определен диапазон частот по полувысоте основного пика пропускания системы фильтров (см. табл. 1, где v_1 , v_2 — левая и правая границы полосы пропускания по полувысоте).

$$\epsilon = \sum_{i=1}^n \frac{|p[i+1]-p[i]|}{p[i+1]+p[i]} \cdot \frac{v[i+1]-v[i]}{v[i+1]+v[i]} \tag{1}$$

где ϵ — относительная погрешность интерполяции; n — размер массива с данными; $p[i]$ — пропускание i -ой точки массива; $v[i]$ — частота i -ой точки массива;

$$\epsilon_{sys} = \sqrt{\epsilon_{TEL}^2 + \epsilon_{LPF}^2 + \epsilon_{BPF}^2 + \epsilon_{HDPE}^2} \tag{2}$$

где ϵ_{sys} , ϵ_{TEL} , ϵ_{LPF} , ϵ_{BPF} , ϵ_{HDPE} — относительная погрешность интерполяции пропускной характеристики элементов оптической системы:

Таблица 1. Относительные ошибки интерполяции пропускных характеристик оптических систем и границы по полувысоте пиков

	Канал, ТГц							
	0.4	0.7	1.0	3.0	5.0	7.0	10.0	12.0
$\epsilon_{sys}, \%$	8.425	9.115	0.275	0.232	0.226	0.226	0.227	0.227
v_1 , ТГц	0.354	0.646	0.906	2.624	4.306	5.430	8.742	9.386
v_2 , ТГц	0.455	0.723	1.071	3.076	5.241	7.354	10.430	12.537

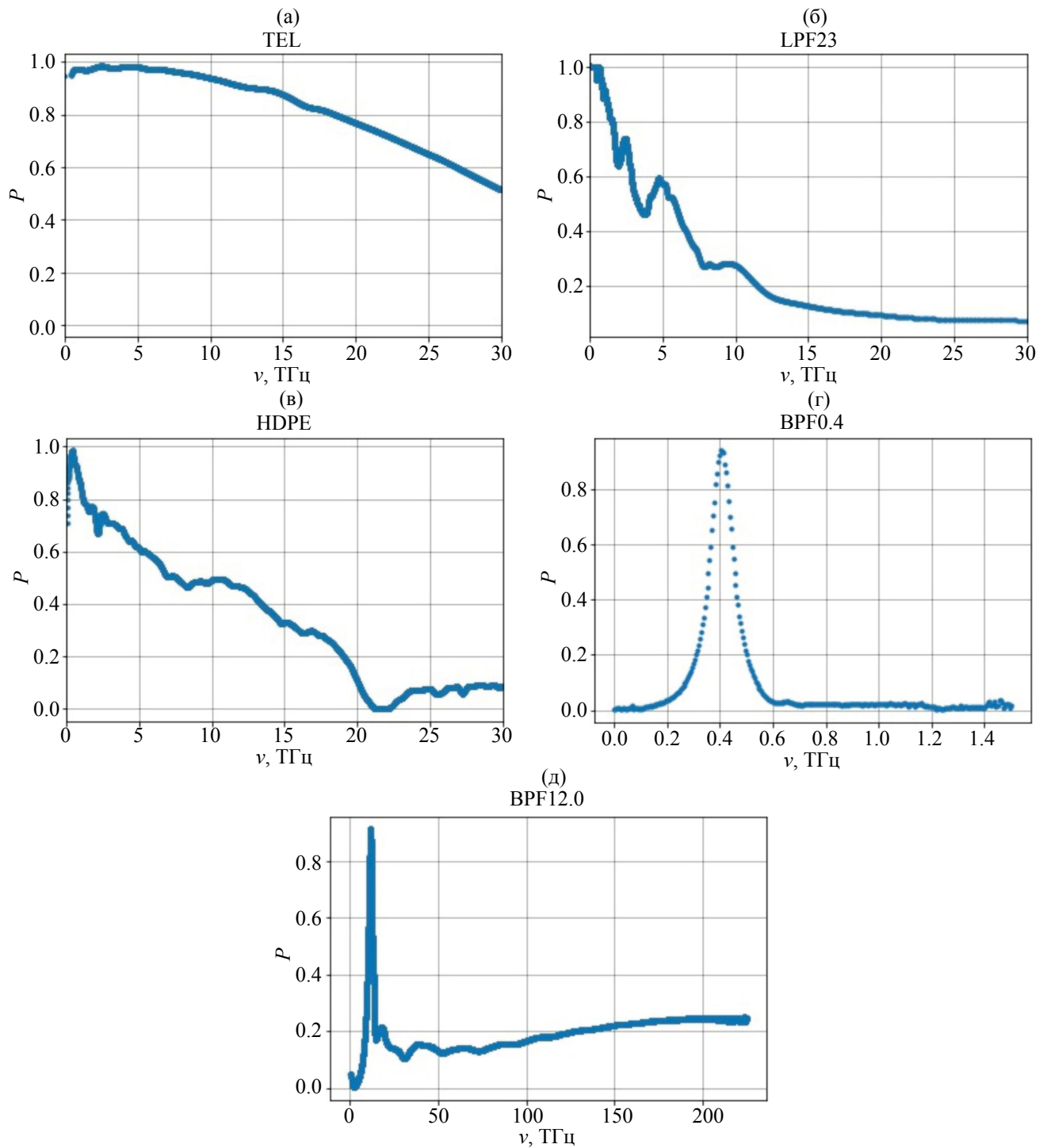


Рис. 1. Пропускные характеристики системы зеркал (а), отрезающего фильтра (б), входного окна терагерцевого приёмника (в), полосового фильтра канала 0.4 ТГц (г) и полосового фильтра канала 12 ТГц (д).

зеркал телескопа (TEL), отрезающего фильтра (LPF), полосового фильтра (BPF) и входного окна (HDPE);

Характеристики оптических трактов лётного образца НА приведены в табл. 2. В первом

столбце — номера каналов, во втором — конфигурация оптического тракта, в третьем — измеренные частоты максимума пропускания (центральная частота), в четвёртом — коэффициент пропускания на уровне 0.7 от максимума

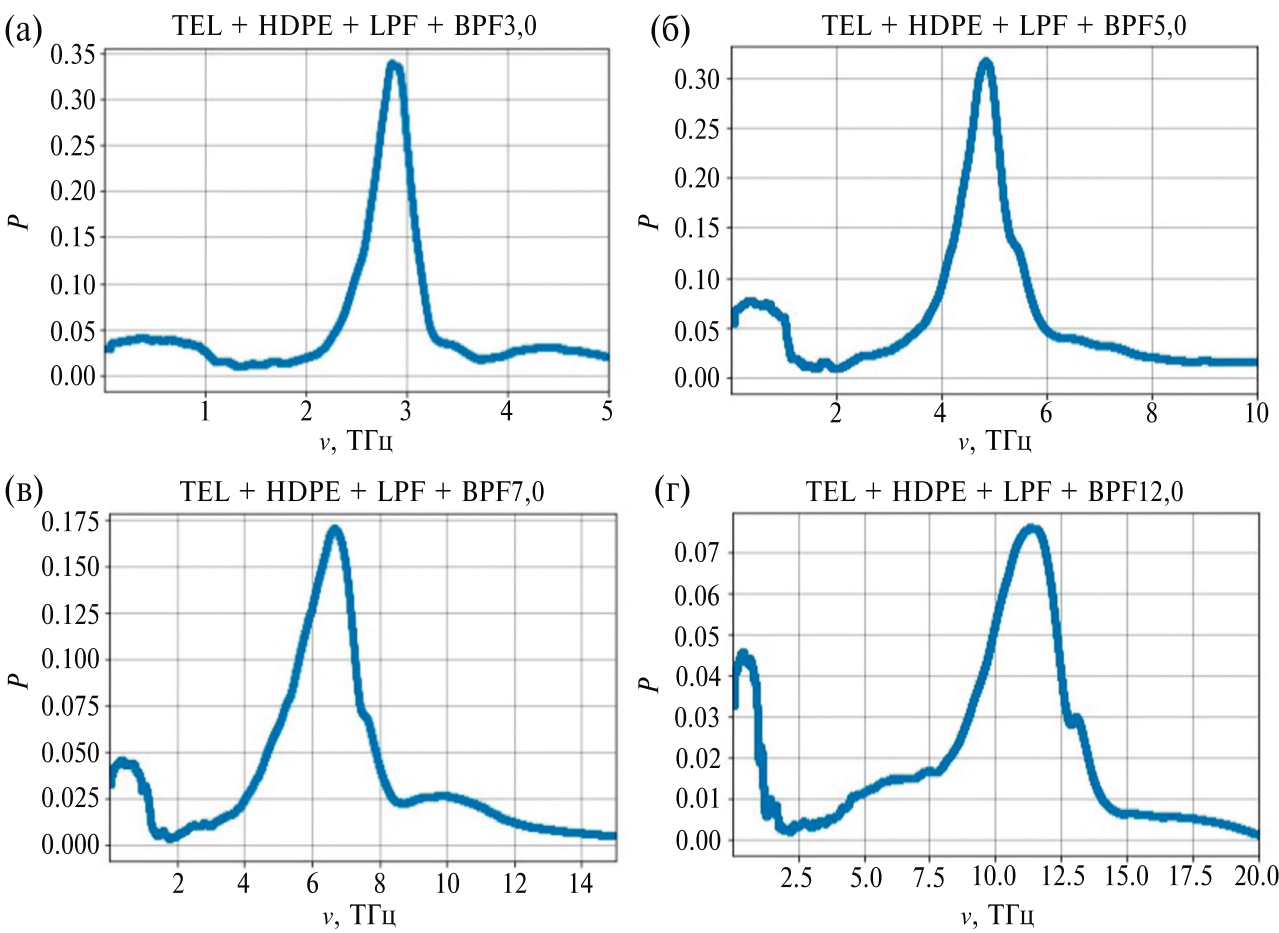


Рис. 2. Пропускные характеристики оптической системы канала 3 ТГц (а), канала 5 ТГц (б), канала 7 ТГц (в) и канала 12 ТГц (г).

пропускания и в пятом столбце — полоса пропускания фильтра.

Итоговые коэффициенты пропускания оптических трактов, в целом, значительно ниже, чем исходные коэффициенты передачи полосовых фильтров ВРФ. Для каналов на 0.4–1.0 ТГц коэффициенты пропускания уменьшились примерно

в 1.5 раза. Для каналов на 3.0–12.0 ТГц — примерно в 2–8 раз, что в основном связано с характеристикой отрезающего фильтра LPF.

Оптический тракт детектора на 12.0 ТГц демонстрирует наибольшее отклонение максимума коэффициента передачи в сторону снижения частоты и, одновременно с этим, расширение

Таблица 2. Характеристики оптических трактов

Номер канала	Оптический тракт	ν_{max} , ТГц	$t_{0.7}$, ед.	$\Delta\nu_{0.7}$, ТГц
1	TEL+HDPE+LPF+BPF 0.4	0.40	0.59	0.06
2	TEL+HDPE+LPF+BPF 0.7	0.68	0.49	0.04
3	TEL+HDPE+LPF+BPF 1.0	0.98	0.45	0.10
4	TEL+HDPE+LPF+BPF 3.0	2.85	0.23	0.29
5	TEL+HDPE+LPF+BPF 5.0	4.84	0.22	0.57
6	TEL+HDPE+LPF+BPF 7.0	6.63	0.12	1.28
7	TEL+HDPE+LPF+BPF 10.0	9.76	0.07	1.11
8	TEL+HDPE+LPF+BPF 12.0	11.31	0.05	2.25

полосы пропускания, что связано с сильной неоднородностью прозрачности входного окна HDPE и отрезающего фильтра LPF в окрестности 12 ТГц.

3. ПРОХОЖДЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ИМИТАТОРА ЧЕРНОГО ТЕЛА

При калибровке прибора используется источник — имитатор черного тела (ИЧТ). Методами численного интегрирования рассчитана интенсивность излучения ИЧТ, проходящего через систему фильтров. Для этого полученные ранее пропускные характеристики оптических систем отдельных каналов умножались на спектр ИЧТ при заданной температуре. Спектр ИЧТ является спектром абсолютно чёрного тела (АЧТ) с относительной погрешностью 10%. Полученные величины численно интегрировались в диапазоне от 0 до 200 ТГц (табл. 3, верхние строки) и по полувысоте основного пика пропускания системы фильтров (табл. 3, нижние строки). Относительные погрешности данных результатов (учитывается погрешность интерполяции и погрешность спектра ИЧТ) совпадают и приведены в последней строке табл. 3.

Для оценки доли полезного сигнала вычислено отношение интенсивности излучения, проходящего через оптическую систему в диапазоне частот по полувысоте основного пика пропускания системы фильтров, к интенсивности излучения, проходящего в диапазоне от 0 до

200 ТГц: для канала на 0.4 ТГц это отношение оказалось равно 0.33; для канала на 0.7 ТГц оно принадлежит диапазону 0.39–0.41; для канала на 1.0 ТГц — (0.023–0.038), для канала на 3.0 ТГц — (0.13–0.17); для канала на 5.0 ТГц — (0.19–0.24); для канала на 7.0 ТГц — (0.29–0.35); для канала на 10.0 ТГц — (0.35–0.39); для канала на 12.0 ТГц — (0.46–0.50).

Значительное отличие отношения, полученного для канала на 1.0 ТГц, является следствием выбранных параметров расчётов. Пропускные характеристики полосовых фильтров для каналов 0.4 и 0.7 ТГц были представлены в диапазоне до 1.5 ТГц, а для каналов 1 и 3 ТГц — в диапазоне до 20 ТГц. Вне измеренного диапазона пропускание фильтров принималось равным нулю, что привело к значительному увеличению расчётного значения интенсивности излучения, проходящего в диапазоне от 0 до 200 ТГц, и, как следствие, к уменьшению отношения для канала на 1.0 ТГц. Заметное различие полученных отношений для каналов на 1.0 и 3.0 ТГц связано с тем, что оптическая система канала на 1.0 ТГц имеет практически в три раза меньшую полосу пропускания по полувысоте, чем оптическая система канала на 3.0 ТГц.

Полученные отношения интенсивности излучения, проходящего через оптическую систему в диапазоне частот по полувысоте основного пика пропускания системы фильтров, к интенсивности излучения, проходящего в диапазоне от 0 до 200 ТГц, показывают, что использование ИЧТ

Таблица 3. Результаты численного интегрирования проходящего излучения ИЧТ

Т, °С	Канал, ТГц							
	0.4	0.7	1.0	3.0	5.0	7.0	10.0	12.0
100	0.011	0.015	0.65	1.6	5.0	6.3	5.6	6.8
	0.0036	0.0062	0.025	0.26	1.2	2.2	2.2	3.4
200	0.014	0.020	1.0	2.3	7.4	9.3	8.5	10.6
	0.0045	0.0079	0.032	0.35	1.7	3.1	3.2	5.2
300	0.017	0.024	1.4	3.1	10.0	12.6	11.7	14.7
	0.0055	0.010	0.039	0.43	2.1	4.0	4.3	7.0
400	0.020	0.029	1.8	3.8	12.7	16.0	15.0	19.0
	0.0065	0.011	0.046	0.51	2.5	4.9	5.4	9.0
500	0.023	0.033	2.2	4.6	15.6	19.6	18.4	23.5
	0.0075	0.013	0.053	0.60	3.0	5.8	6.5	10.9
600	0.026	0.037	2.6	5.4	18.5	23.2	22.0	28.1
	0.0085	0.015	0.060	0.68	3.4	6.7	7.6	12.9
ε, %	13.1	13.5	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

Примечание. Верхняя строка — от 0 до 200 ТГц; нижняя строка — по полувысоте в Вт/м², относительные ошибки результатов. Данные приведены для температуры ИЧТ от 100 до 600°С (столбец слева).

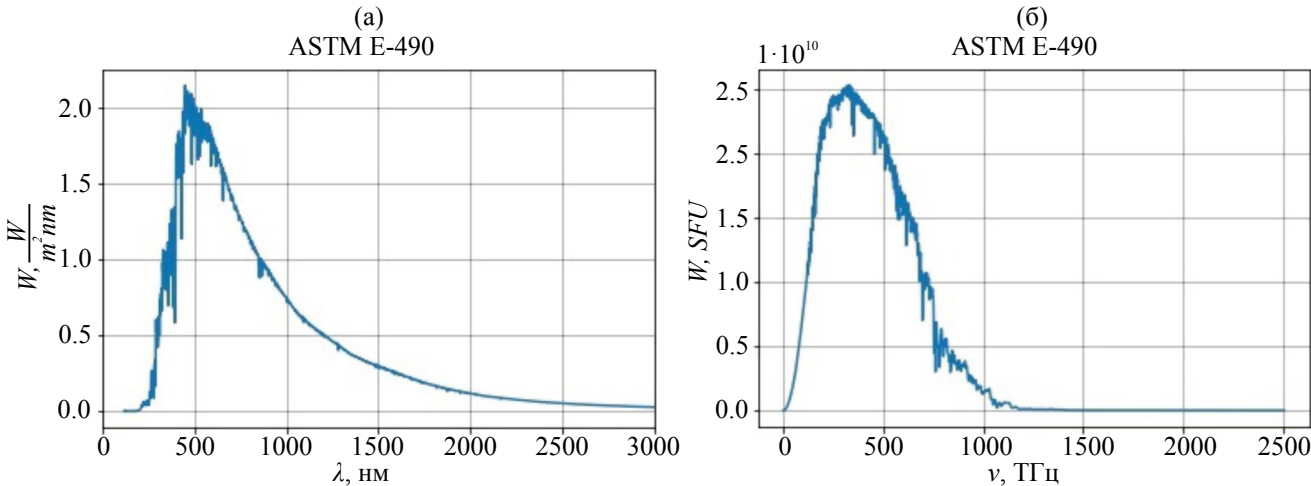


Рис. 3. Спектр излучения Солнца ASTM E-490 в зависимости от длины волны (а) и в зависимости от частоты (б).

для калибровок оправдано, так как значительная доля интенсивности, проходящего излучения, приходится на интересующие частоты. Так же рассчитанные значения проходящей интенсивности позволят произвести анализ экспериментальных данных, полученных при калибровке приемников научной аппаратуры.

4. ПРОХОЖДЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СПОКОЙНОГО СОЛНЦА

Для оценки сигнала от спокойного Солнца методами численного интегрирования рассчитывалась интенсивность излучения, проходящего через систему фильтров с использованием стандартного солнечного спектра ASTM E-490 [21]. Исходный спектр ASTM E-490 представляет зависимость спектральной плотности излучения Солнца от длины волны, поэтому он был пересчитан в зависимость спектральной плотности от частоты (рис. 3). Так как данный спектр дискретен, он интерполировался внутри диапазона, где был измерен. Рассчитанная по формуле (1) погрешность составила 9.4 %. В области низких частот спектр экстраполировался линией,

проходящей через ноль при частоте 0 Гц, а в области высоких частот спектр экстраполировался гиперболой, проходящей через самую высокочастотную точку спектра. Для определения интенсивности проходящего излучения рассчитанный солнечный спектр умножался на характеристики оптических систем отдельных каналов и численно интегрировался в диапазоне от 0 до 200 ТГц и по полувысоте основного пика пропускания системы фильтров (табл. 4). Так же были вычислены отношения интенсивности излучения, проходящего через оптическую систему в диапазоне частот по полувысоте основного пика пропускания системы фильтров, к интенсивности излучения, проходящего в диапазоне от 0 до 200 ТГц (см. табл. 4).

Полученные результаты позволяют предположить, что спектр излучения солнечных вспышек может быть измерен, так как превышение над фоновым уровнем будет в основном происходить из-за увеличения интенсивности в пределах полосы пропускания оптической системы приёмников, что и будет детектироваться.

Таблица 4. Результаты численного интегрирования спектра спокойного Солнца.

	Канал, ТГц							
	0.4	0.7	1.0	3.0	5.0	7.0	10.0	12.0
Интенсивность 0–200 ТГц, мВт/м ²	0.0035	0.0045	0.39	0.76	4.3	5.0	4.2	5.6
Интенсивность по полувысоте, мВт/м ²	0.0015	0.0021	0.0075	0.090	0.48	0.97	1.2	2.1
Относительная ошибка ε, %	12.7	13.1	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4
Отношение интенсивности по полувысоте к интенсивности 0–200 ТГц	0.38	0.42	0.019	0.12	0.11	0.19	0.28	0.38

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен расчёт пропускных характеристик оптических систем каналов прибора. Рассчитаны интенсивности излучения, проходящего через оптические системы каналов от имитатора черного тела, которые будут использоваться при калибровке научной аппаратуры «Солнце – Терагерц». Также был произведён расчёт интенсивности излучения, проходящего через оптические системы каналов от спокойного Солнца, необходимый для анализа экспериментальных данных.

В работе представлены результаты численных расчетов характеристик 8 приемников (детекторов) научной аппаратуры, которые указывают на возможность регистрации терагерцевого излучения солнечных вспышек. Следует также отметить, что для определения величин чувствительности детектирующих приемников будет проведен сравнительный анализ результатов проведенных расчетов и экспериментальных данных, полученных при калибровке приемников летного образца научной аппаратуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kinnison J., Vaughan R., Hill P. et al. Parker Solar Probe: A Mission to Touch the Sun // 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. The solar and heliospheric imager (SoloHI) instrument for the solar orbiter mission // Proc. SPIE Solar Physics and Space Weather Instrumentation. 2013. V. 8862 Art.ID 88620H. <https://doi.org/10.1117/12.2027657>
3. Domingo V., Fleck B., Poland A.I. SOHO: The Solar and Heliospheric Observatory // Space Science Reviews. 1995. V. 72. P. 81–84. <https://doi.org/10.1007/BF00768758>
4. Davila J.M., Rust D.M., Pizzo V.J. et al. Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO) // Proc. SPIE. Missions to the Sun. V. 2804. 1996. <https://doi.org/10.1117/12.259724>
5. Калинин Е.В., Филиппов М.В., Махмутов В.С. и др. Исследование температурного эффекта резонансных оптических прерывателей в космической научной аппаратуре // Косм. исслед. 2021. № 1. С. 3–8. <https://doi.org/10.31857/S0023420621010040>
6. Kaufmann P., Raullin J.-P., de Castro C.G.G. et al. A New Solar Burst Spectral Component Emitting Only in the Terahertz Range // Astrophysical J. 2004. V. 603. P. L121–L124. <https://doi.org/10.1086/383186>
7. Kaufmann P., Correia E., Costa J.E.R. et al. Solar burst with millimetre-wave emission at high frequency only // Nature. 1985. V. 313. P. 380–382. <https://doi.org/10.1038/313380a0>
8. Kaufmann P. Submillimeter/IR solar bursts from high energy electrons // Proc. AIP conference 1996. V. 374. P. 379–392. <https://doi.org/10.1063/1.50945>
9. Kaufmann P., Costa J.E.R., Castro C.G.G. et al. The new submillimeter-wave solar telescope // Proc. 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. Launch of solar coronal mass ejections and submillimeter pulse bursts // J. Geophysical Research. 2003. V. 108(A7). Art.ID 1280. <https://doi.org/10.1029/2002JA009729>
11. Krucker S., Castro C.G.G., Hudson H.S. et al. Solar flares at submillimeter wavelengths // Astron Astrophys Review. 2013. V. 21. Iss. 58. <https://doi.org/10.1007/s00159-013-0058-3>
12. Luthi T., Magun A., Miller M. First observation of a solar X-class flare in the submillimeter range with KOSMA // Astronomy and Astrophysics. 2004. V. 415. P. 1123–1132. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034624>
13. Makhmutov V.S., Raulin J.P., Castro C.G.G. et al. Wavelet Decomposition of Submillimeter Solar Radio Bursts // Solar Physics. 2003. V. 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. Спектральные особенности высокоэнергичного рентгеновского, гамма-излучения и субмиллиметрового радиоизлучения в импульсной фазе солнечной вспышки // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2011. Т. 75. № 6. С. 796–799.
15. Квашин А.А., Логачев В.И., Филиппов М.В. и др. Оптическая система прибора для измерения солнечного терагерцевого излучения // Космическая техника и технологии. 2021. № 4(35). С. 22–30. <https://doi.org/10.33950/spacetechn-2308-7625-2021-4-22-30>
16. Характеристики отрезающих фильтров LPF23.1 [сайт]. Режим доступа: https://www.tydexoptics.com/pdf/ru/THz_Low_Pass_Filter.pdf (дата обращения 22.02.2024)
17. Характеристики отрезающих фильтров BPF [сайт]. Режим доступа: http://www.tydexoptics.com/ru/products/tgc-ustrojstva/thz_band_pass_filter/ (дата обращения 22.02.2024)
18. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Максумов О.С. и др. Исследование температурного эффекта резонансных оптических прерывателей в космической на-

- учной аппаратуре // Космическая техника и технологии. 2023. №1(40). С. 30–40. EDN: WZAMJN.
19. Характеристики ОАП «Ячейка Голя» [сайт]. Режим доступа: http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_devices/golay_cell/ (дата обращения 22.02.24 г.)
20. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Логачев В.И. и др. Расчет чувствительности детекторов для космического эксперимента «Солнце –Терагерц» // Журнал технической физики. 2023. Т. 93. № 9. С. 1377–1382. <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.09.56226.167-23>.
21. 2000 ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00. (n.d.). Grid Modernization NREL. <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-astm-e490.html>