

Расчет чувствительности детекторов для космического эксперимента „Солнце-Терагерц“

© М.В. Филиппов, В.С. Махмутов, В.И. Логачев, М.В. Разумейко

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН),
119991 Москва, Россия
e-mail: office@lebedev.r, mfilippov@frtk.ru

Поступило в Редакцию 5 июля 2023 г.

В окончательной редакции 12 июля 2023 г.

Принято к публикации 12 июля 2023 г.

Кратко описаны цели и задачи планируемого космического эксперимента „Солнце-Терагерц“ на борту Российского сегмента МКС. Рассмотрены основные компоненты оптического тракта научной аппаратуры. С помощью имитатора черного тела и одноканального макета проведена калибровка детекторов научной аппаратуры, исследовано влияние качества оптической поверхности зеркал телескопа на размах сигнала детекторов в терагерцевом диапазоне, проведена предварительная оценка чувствительности детекторов.

Ключевые слова: Солнце, солнечные вспышки, терагерцевое излучение, оптическая система.

DOI: 10.21883/JTF.2023.09.56226.167-23

Введение

Космический эксперимент „Солнце-Терагерц“ на борту Российского сегмента МКС направлен на изучение излучения Солнца в неисследованном терагерцевом диапазоне на частотах $10^{12} - 10^{13}$ Hz [1]. Главная цель эксперимента — получение новых данных о терагерцевом излучении Солнца, солнечных активных областей и солнечных вспышек [2–6]. Эти данные необходимы для выяснения природы солнечной активности, определения физического механизма ускорения заряженных частиц на Солнце и других астрофизических объектах.

В настоящей работе рассмотрены основные компоненты оптического тракта научной аппаратуры (далее — НА). С помощью имитатора черного тела и одноканального макета проведена калибровка детекторов научной аппаратуры, исследовано влияние качества оптической поверхности зеркал телескопа на размах чувствительности детекторов в терагерцевом диапазоне, проведена предварительная оценка чувствительности детекторов.

Старт космического эксперимента „Солнце-Терагерц“ запланирован на 2024–2025 гг.

1. Основная аппаратура

Разрабатываемая аппаратура (рис. 1) представляет собой совокупность восьми детекторов, чувствительных к излучению различной частоты — 0.4, 0.8, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0 и 12.0 THz. В состав каждого детектора входят:

— оптический телескоп [7], концентрирующий излучение на оптоакустическом преобразователе (ОАП) через систему фильтров и оптический прерыватель;

— система последовательных фильтров, пропускающая излучение в заданном частотном диапазоне для

каждого детектирующего модуля, таким образом обеспечивая селективность;

- оптический прерыватель, модулирующий излучение на входном окне приемника с частотой 10 или 20 Hz;
- ОАП, входящий в состав приемника излучения.

2. Вспомогательная аппаратура

Одноканальный макет — устройство для проведения испытаний детекторов научной аппаратуры, внутри которого устанавливаются испытуемые телескоп, фильтры и приемник.

Имитатор черного тела (ИЧТ) предназначен для проверки работоспособности научной НА „Солнце-Терагерц“ при наземной экспериментальной отработке, а именно для проведения проверок, юстировок и калиб-

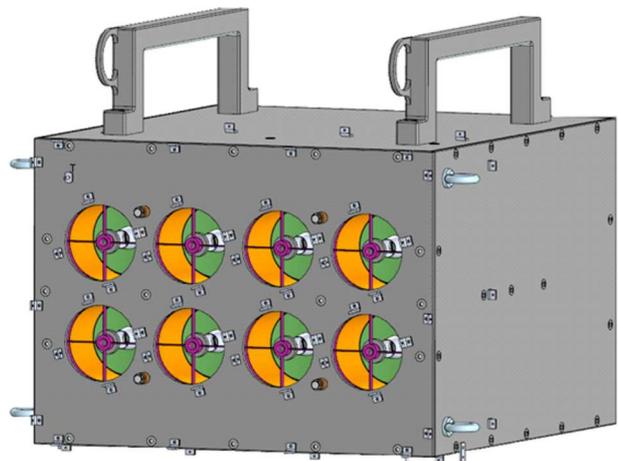


Рис. 1. Внешний вид НА „Солнце-Терагерц“ (трехмерная модель) со стороны лицевой панели.

Таблица 1. Сравнение заданных и измеряемых температур излучателя ИЧТ

Температура излучателя ИЧТ по данным измерителя-регулятора t_{bb} (К)	Температура излучателя ИЧТ по данным инфракрасного пирометра t_p (К)	$\frac{t_{bb}-t_p}{t_{bb}} \cdot 100\%$
373	363	2.68
473	455	3.80
573	546	4.71
673	636	5.49
773	721	6.72
873	805	7.79

ровок детектирующих модулей. ИЧТ состоит из двух блоков: излучатель ИЧТ и блок управления и питания.

Принцип действия ИЧТ заключается в формировании потока энергии в терагерцевом диапазоне волн с помощью нагреваемого керамического излучателя и внеосевого параболического зеркала.

В качестве средства контроля температуры излучателя ИЧТ используется инфракрасный пирометр Кельвин-Компакт Д [8], с помощью которого произведено сравнение температуры излучателя ИЧТ по данным регулятора и температуры, измеренной пирометром с поверхности ИЧТ. В табл. 1 приведены результаты измерений. Разница между заданными и измеренными значениями температур излучателя ИЧТ на отрезке 373 до 873 К не превышает 8% и, вероятно, обусловлена характеристиками излучающего элемента (шайба из алюмо-нитридной керамики AlN-230 с теплопроводностью 230 W/(m·K) и степенью черноты в терагерцевом диапазоне волн не менее 0.88).

3. Приемники излучения

ОАП „Ячейка Голея“ GC-1P [9] относится к классу неселективных неохлаждаемых приемников. Спектральная чувствительность ОАП в основном зависит от характеристик входного окна. В ОАП GC-1P входное окно изготавливается из полиэтилена высокой плотности (HDPE).

Приемник (в совокупности с оптическим прерывателем) является источником переменного квазисинусоидального двуполярного сигнала, точкам экстремумов которого соответствуют положения закрытия-открытия лопаток оптического прерывателя.

В дальнейшем анализе использован размах сигнала — разница между двумя близлежащими экстремумами сигнала:

$$U_i = V_{2i-1} - V_{2i}, \quad (1)$$

где U_i — размах сигнала i , [mV]; V_{2i-1} — локальный экстремум $2i - 1$, [mV]; V_{2i} — локальный экстремум $2i$, [mV]; i — номер измерения.

Для определенности точка V_{2i-1} соответствует открытым лопаткам оптического прерывателя, а точка V_{2i} — закрытым лопаткам.

4. Система фильтров

В состав оптического тракта детекторов НА „Солнце-Терагерц“ входит система фильтров, состоящая из следующих компонентов:

- отрезающий фильтр (LPF) [10], предназначенный для пропускания терагерцевого излучения и блокирования коротких волн;

- полосовой фильтр (BPF) [11], формирующий требуемую полосу пропускания детектора в терагерцевом диапазоне.

Характеристики систем фильтров (испытанный комплект на 8 каналов) приведены в табл. 2. В первом столбце указаны номера каналов, во втором столбце — наименование используемых фильтров, в третьем столбце — измеренная частота максимума пропускания (центральная частота), в четвертом столбце — коэффициент пропускания на уровне 0.7 от максимума и в пятом столбце — полоса пропускания фильтра.

5. Чувствительность детекторов

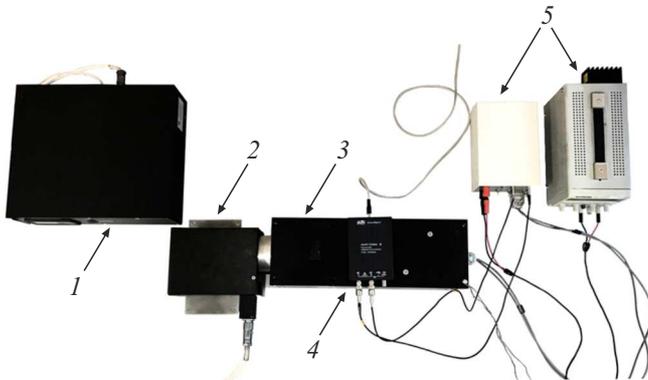
Поток излучения от излучателя ИЧТ, проходящий через входное окно приемника (без учета влияния оптического качества поверхности зеркал телескопа) Φ_r , равен

$$\Phi_r(T) = S_{tel} \int_{\nu_1}^{\nu_2} d(\nu) r(\nu, T) t_{res}(\nu) d\nu, \quad (2)$$

где ν — частота излучения, [Hz]; T — температура абсолютно черного тела, [K]; $t_{res}(\nu)$ — результирующий коэффициент пропускания системы фильтров и входного окна ОАП; $r(\nu, T)$ — спектральная плотность излучения на единицу площади в интервале частот (ν ; $d\nu$), W/(m²·Hz); $d(\nu)$ — соотношение потока излучения,

Таблица 2. Характеристики испытанных систем фильтров

№	Фильтр	ν_{\max} , THz	$t_{0.7}$	$\Delta\nu_{0.7}$, THz
1	HDPE+LPF+BPF 0.4	0.37	0.38	0.38
2	HDPE+LPF+BPF 0.8	0.79	0.44	0.07
3	HDPE+LPF+BPF 1.0	1.00	0.38	0.10
4	HDPE+LPF+BPF 3.0	2.97	0.22	0.40
5	HDPE+LPF+BPF 5.0	4.82	0.16	0.62
6	HDPE+LPF+BPF 7.0	6.78	0.06	1.26
7	HDPE+LPF+BPF 10.0	9.93	0.05	0.81
8	HDPE+LPF+BPF 12.0	11.17	0.03	0.52

**Рис. 2.** Сборка стенда из одноканального макета и имитатора черного тела: 1 — блок управления и питания ИЧТ; 2 — излучатель ИЧТ; 3 — одноканальный макет; 4 — АЦП; 5 — блоки питания.

падающего на входное окно приемника, к потоку излучения, падающего на входное окно телескопа, являющееся следствием дифракционных потерь на зеркалах [7]; $S_{tel} = 3.84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ — площадь входного окна телескопа [7].

С помощью стенда (рис. 2), собранного на основе одноканального макета, была получена зависимость выходного сигнала приемника от температуры излучателя ИЧТ. Внутри одноканального макета были установлены приемник, оптический прерыватель на частоту 20 Hz, телескоп (с гладкими зеркалами), набор фильтров (отрезающий фильтр LPF23.1 и один полосовой фильтр BPF на 0.4, 0.8, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0 или 12.0 THz). Сигнал приемника поступает на вход USB-осциллографа. На компьютере формируется файл данных в формате CSV с дискретизацией по времени 1 ms за интервал не менее 10 min. С помощью программы-обработчика вычисляются локальные экстремумы и размах сигнала за каждый период колебания оптического прерывания, а также максимальное, минимальное и среднее арифметическое

значения размаха сигнала за интервал измерения и его среднеквадратичное отклонение.

Средние значения размаха сигнала приемника далее используются для расчета корреляционной зависимости размаха сигнала от температуры излучателя ИЧТ по методу наименьших квадратов (МНК).

На рис. 3 приведена зависимость размаха сигнала (U , [mV]) приемника от температуры излучателя ИЧТ (T , [K]) при установленном полосовом фильтре BPF 0.4. Данные о размахе сигналов получены путем усреднения измеренных значений за время не менее 10 min. Черные горизонтальные отрезки — величина систематической погрешности заданного значения температуры поверхности излучателя ИЧТ. Среднеквадратичное отклонение размаха сигнала не превышает толщины горизонтальных линий. Серая прямая линия — аппроксимация данных по МНК.

В табл. 3 приведены результаты по каждому каналу. В первом столбце указаны номера каналов, во втором столбце — угловые коэффициенты ($a_0(\nu)$, [mV/K]) аппроксимирующих прямых линий, в третьем столбце — свободные члены ($b_0(\nu)$, [mV]), в четвертом столбце — коэффициент детерминации (R_0^2).

Таким образом, зависимость размаха сигнала приемника от температуры излучателя ИЧТ может быть представлена в виде

$$U(T) = aT + b, \quad (3)$$

где a — угловой коэффициент аппроксимирующей прямой, [mV/K]; b — свободный член аппроксимирующей прямой, [mV].

С целью обеспечения дополнительного рассеяния излучения в видимом диапазоне спектра, зеркала проходят специальную обработку поверхности с притиркой порошком Al_2O_3 зернистостью от 600 до 1200 единиц и кратковременным травлением в растворе NaOH с последующей промывкой в деионизованной воде.

Подобная техника также использована в эксперименте SOLAR-T [12].

В столбцах с пятого по седьмой табл. 3 приведены данные, полученные при измерениях с шероховатыми зеркалами.

В приближении, что коэффициент отражения для необработанного (гладкого) зеркала $\rho = 1$, можно запи-

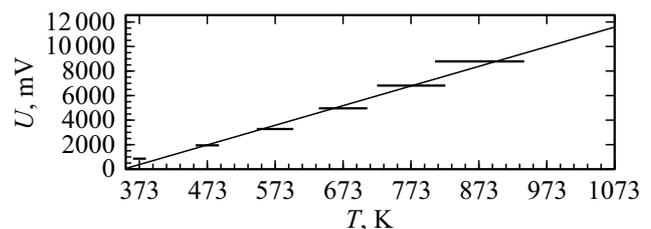
**Рис. 3.** Зависимость размаха сигнала (U , [mV]) приемника от температуры излучателя ИЧТ (T , [K]) при установленном полосовом фильтре BPF 0.4.

Таблица 3. Распределение гранул нержавеющей стали по размерам

№	$a_0(\nu)$, mV/K	$b_0(\nu)$, mV	R_0^2	$a_1(\nu)$, mV/K	$b_1(\nu)$, mV	R_1^2	$\rho_t(\nu)$	$\rho_m(\nu)$
1	16.0 ± 0.8	-5500.3 ± 538.0	0.99	11.7 ± 0.2	-3772.0 ± 113.1	0.99	0.73	0.85
2	12.9 ± 0.8	-4614.8 ± 485.7	0.99	8.7 ± 0.1	-2877.2 ± 90.8	0.99	0.67	0.82
3	13.1 ± 0.6	-4608.2 ± 360.9	0.99	8.3 ± 0.3	-2794.3 ± 211.6	0.99	0.63	0.79
4	18.9 ± 1.1	-6941.4 ± 703.0	0.99	11.3 ± 0.2	-3782.7 ± 138.7	0.99	0.60	0.77
5	33.1 ± 2.7	-12435.4 ± 1741.6	0.97	18.4 ± 0.6	-6132.8 ± 389.8	0.99	0.56	0.75
6	35.9 ± 2.3	-13154.8 ± 1492.6	0.98	18.4 ± 0.6	-6186.2 ± 358.4	0.99	0.51	0.71
7	26.0 ± 1.7	-9272.0 ± 1092.0	0.98	14.1 ± 0.2	-4600.5 ± 103.1	0.99	0.54	0.74
8	39.1 ± 2.2	-14015.5 ± 1423.9	0.99	21.2 ± 0.5	-7107.8 ± 349.9	0.99	0.54	0.74

сать

$$\rho_t(\nu, T) = \frac{U_1(\nu, T)}{U_0(\nu, T)} \approx \frac{a_1(\nu)}{a_0(\nu)}, \quad (4)$$

где $\rho_t(\nu, T)$ — спектральный коэффициент отражения системы зеркал в телескопе; $U_0(\nu, T)$ — размах сигнала приемника при установленных гладких зеркалах в телескопе, [mV]; $U_1(\nu, T)$ — размах сигнала приемника при установленных шероховатых зеркалах в телескопе, [mV].

Поскольку в состав телескопа входят два зеркала [7], спектральный коэффициент отражения одиночной зеркальной поверхности есть

$$\rho_m(\nu) = \sqrt{\rho_t(\nu)}. \quad (5)$$

В восьмом столбце табл. 3 приведены спектральные коэффициенты отражения телескопа $\rho_t(\nu)$, а в девятом столбце — спектральные коэффициенты отражения одного зеркала $\rho_m(\nu)$.

С учетом влияния качества оптической поверхности зеркал телескопа поток излучения, проходящий через входное окно приемника Φ_r , равен

$$\Phi_r(T) = S_{tel} \int_{\nu_1}^{\nu_2} \rho_t(\nu) d(\nu) r(\nu, T) t_{res}(\nu) d\nu, \quad (6)$$

где $\rho_t(\nu)$ — спектральный коэффициент отражения системы зеркал в телескопе.

С учетом соотношения (3) формулу Планка [13] можно представить в виде

$$r(\nu, U) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{ah\nu}{k(U-b)}} - 1}, \quad (7)$$

где $r(\nu, U)$ — спектральная плотность излучения на единицу площади в интервале частот (ν ; $d\nu$), [W/(m²·Hz)]; ν — частота излучения, [Hz].

Поток излучения $\Phi_d(T)(J)$, поступающий на входное окно телескопа

$$\Phi_d(T) = S_{tel} \int_{\nu_1'}^{\nu_2'} r(\nu, T) d\nu. \quad (8)$$

Эффективность оптического тракта детектора (телескоп, система фильтров, входное окно приемника) можно оценить как отношение потока излучения на приемнике к потоку излучения на телескопе в полосе пропускания системы фильтров детектора — Φ_r/Φ_d . Для этого выражения (6) и (8) следует проинтегрировать на частотах, находящихся в полосе пропускания системы фильтров для каждого детектора (табл. 2.):

$$\nu_1 = \nu_{max} - \Delta\nu_{0.7}/2;$$

$$\nu_2 = \nu_{max} + \Delta\nu_{0.7}/2. \quad (9)$$

Динамический диапазон размаха выходного сигнала приемника ΔU , в первую очередь, определяется конструкцией усилителя и составляет примерно 27 V.

При подстановке $U_0 = 0V$ и $U_1 = 27V$ в (6)–(8) с условием (9) получены значения потоков излучения на приемнике $\Phi_r(U_0)$ и $\Phi_r(U_1)$, а также значения потоков излучения на входном окне телескопа детектора $\Phi_d(U_0)$ и $\Phi_d(U_1)$.

Чувствительность детекторов оценивается, как отношение $\Delta U/\Delta\Phi_d$, где $\Delta U = U_1 - U_0$, [V]; $\Delta\Phi_d = \Phi_d(U_1) - \Phi_d(U_0)$, [W].

Из соотношения (3) выражается абсолютная погрешность размаха сигнала, обусловленная конструкцией излучателя ИЧТ:

$$\sigma_{BVI} \approx \sigma_a T + \sigma_T a + \sigma_b, \quad (10)$$

где σ_{BVI} — абсолютная погрешность размаха сигнала $U(T)$ приемника, обусловленная отклонением фактического значения температуры излучателя ИЧТ от заданного, [mV]; σ_a — абсолютная погрешность a , [mV/K]; σ_b — абсолютная погрешность b , [mV]; σ_T — абсолютная погрешность температуры T излучателя ИЧТ, [K].

Рассмотрим случай, когда полная абсолютная погрешность σ_U размаха сигнала приемника зависит только от точности задания температуры излучателя ИЧТ:

$$\sigma_U \approx \sigma_{BVI}.$$

Таблица 4. Результаты расчета чувствительности детекторов

№	$\Phi_r(0\text{ V}), \text{ W}$	$\Phi_r(27\text{ V}), \text{ W}$	$\Phi_d(0\text{ V}), \text{ W}$	$\Phi_d(27\text{ V}), \text{ W}$	Φ_r/Φ_d	$\Delta U/\Delta\Phi_d, \text{ V/W}$
1	$(1.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-6}$	$(8.4 \pm 1.2) \cdot 10^{-6}$	$(5.1 \pm 0.9) \cdot 10^{-6}$	$(3.1 \pm 0.5) \cdot 10^{-5}$	$(2.7 \pm 1.0) \cdot 10^{-1}$	$(1.1 \pm 0.5) \cdot 10^6$
2	$(1.7 \pm 0.4) \cdot 10^{-5}$	$(1.3 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$	$(5.5 \pm 1.1) \cdot 10^{-5}$	$(3.9 \pm 0.6) \cdot 10^{-4}$	$(3.2 \pm 1.3) \cdot 10^{-1}$	$(8.0 \pm 3.4) \cdot 10^4$
3	$(3.4 \pm 0.5) \cdot 10^{-5}$	$(2.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$	$(1.3 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$	$(8.8 \pm 1.2) \cdot 10^{-4}$	$(2.7 \pm 0.8) \cdot 10^{-1}$	$(3.6 \pm 1.3) \cdot 10^4$
4	$(6.2 \pm 1.4) \cdot 10^{-4}$	$(3.6 \pm 0.6) \cdot 10^{-3}$	$(3.9 \pm 0.9) \cdot 10^{-3}$	$(2.3 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$	$(1.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-1}$	$(1.5 \pm 0.7) \cdot 10^3$
5	$(1.6 \pm 0.6) \cdot 10^{-3}$	$(6.2 \pm 1.4) \cdot 10^{-3}$	$(1.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-2}$	$(5.8 \pm 1.3) \cdot 10^{-2}$	$(1.1 \pm 0.8) \cdot 10^{-1}$	$(6.2 \pm 5.3) \cdot 10^2$
6	$(2.0 \pm 0.6) \cdot 10^{-3}$	$(8.4 \pm 1.8) \cdot 10^{-3}$	$(4.9 \pm 1.5) \cdot 10^{-2}$	$(2.1 \pm 0.4) \cdot 10^{-1}$	$(4.0 \pm 2.5) \cdot 10^{-2}$	$(1.7 \pm 1.3) \cdot 10^2$
7	$(1.3 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$	$(8.8 \pm 1.8) \cdot 10^{-3}$	$(5.0 \pm 2.0) \cdot 10^{-2}$	$(3.5 \pm 0.7) \cdot 10^{-1}$	$(2.5 \pm 2.0) \cdot 10^{-2}$	$(9.1 \pm 5.6) \cdot 10^1$
8	$(7.7 \pm 2.8) \cdot 10^{-4}$	$(4.0 \pm 1.0) \cdot 10^{-3}$	$(3.7 \pm 1.4) \cdot 10^{-2}$	$(2.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-1}$	$(2.0 \pm 1.5) \cdot 10^{-2}$	$(1.7 \pm 1.2) \cdot 10^2$

Абсолютная погрешность спектральной плотности излучения на единицу площади $r(\nu, U)$:

$$\sigma_R = \frac{\partial(r(\nu, U))}{\partial U} \sigma_U,$$

$$\sigma_R = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{\frac{ah\nu}{k} \cdot e^{\frac{ah\nu}{k(U-b)}}}{(e^{\frac{ah\nu}{k(U-b)}} - 1)^2 (u-b)^2} \sigma_U. \quad (11)$$

С помощью подстановки (11) в (6) и (8) получены выражения для абсолютных погрешностей потоков излучения на приемнике и на входном окне телескопа детектора соответственно

$$\sigma_r = S_{tel} \int_{\nu_1}^{\nu_2} \rho_i(\nu) d(\nu) \sigma_R(\nu, U) t_{res}(\nu) d\nu, \quad (12)$$

$$\sigma_d = S_{tel} \int_{\nu_1}^{\nu_2} \sigma_R(\nu, U) d\nu. \quad (13)$$

В табл. 4 приведены результаты расчета чувствительности детекторов. В первом столбце указаны номера каналов, во втором столбце — потоки излучения на приемнике при выходном размахе сигнала приемника $U_0 = 0\text{ V}$, в третьем столбце — потоки излучения на приемнике при выходном размахе сигнала приемника $U_1 = 27\text{ V}$, в четвертом столбце — потоки излучения на входном окне телескопа при выходном размахе сигнала приемника $U_0 = 0\text{ V}$, в пятом столбце — потоки излучения на входном окне телескопа при выходном размахе сигнала приемника $U_1 = 27\text{ V}$, в шестом столбце — эффективность оптического тракта детектора, в седьмом столбце — чувствительность детекторов.

Заключение

В работе экспериментально был определен спектральный коэффициент отражения зеркал телескопа НА в интересующем нас диапазоне частот от 0.4 до 12 THz, что далее позволило рассчитать эффективность оптического тракта детекторов и их чувствительность.

Эффективность телескопов снижается с ростом частоты примерно с 30 (детектор на 0.4 THz) до 2% (детектор на 12.0 THz), 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.

Также следует отметить, что для увеличения точности калибровки, т.е. для уточнения зависимости $U(T)$, в дальнейшем необходимо провести калибровки приемников как при различных температурах ИЧГ, так и при вариациях собственной температуры приемников, чтобы определить температурную зависимость ОАП „Ячейка Голея“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Е.В. Калинин, М.В. Филиппов, В.С. Махмутов, О.С. Максумов, Ю.И. Стожков, А.А. Квашнин, Г.Н. Измайлов, В.В. Озолин. Космические исследования, **59** (1), 3 (2021). DOI: 10.31857/S0023420621010040 [E.V. Kalinin, M.V. Philippov, V.S. Makhmutov, V.S. Maksumov, Yu.I. Stozhkov, A.A. Kvashnin, G.N. Izmailov, V.V. Ozolin. Cosmic Research, **59** (1), 1 (2021). DOI: 10.1134/S0010952521010032]
- [2] P. Kaufmann, J.-P. Raullin, C.G.G. de Castro, H. Levato, D.E. Gary, J.E.R. Costa, A. Marun, P. Pereyra, A.V.R. Silva, E. Correia. Astrophys. J., **603**, L121 (2004). DOI: 10.1086/383186
- [3] P. Kaufmann. AIP conference Proceedings, **374**, 379 (1996). DOI: 10.1063/1.50945

- [4] P. Kaufmann, C.G.G. Castro, V.S. Makhmutov, J.-P. Raulin, R. Schwenn, H. Levato, M. Rovira. *Journal of Geophysical Research*, **108**(A7), 1280 (2003). DOI: 10.1029/2002JA009729
- [5] S. Krucker, C.G.G. Castro, H.S. Hudson, G. Trotter, T. Bastian, A. Hales, J.K. Sparova, K.-L. Klein, M. Kretzschmar, T. Luthi, A.L. Mackinnon, S. Pohjolainen, S.M. White. *Astron. Astrophys. Rev.*, **21**, 58 (2013). DOI: 10.1007/s00159-013-0058-3
- [6] T. Luthi, A. Magun, M. Miller. *Astron. Astrophys.*, **415**, 1123 (2004). DOI: 10.1051/0004-6361:20034624
- [7] А.А. Квашнин, В.И. Логачев, М.В. Филиппов, В.С. Махмутов, О.С. Максумов, Ю.И. Стожков, Е.В. Калинин, А.А. Орлов, В.В. Озолин, Г.Н. Измайлов, А.Г. Гайфутдинова, О.Ю. Криволапова. *Космическая техника и технологии*, **4** (35), 22 (2021). DOI: 10.33950/spacetechn-2308-7625-2021-4-22-30
- [8] *Характеристики инфракрасного пирометра Кельвин-Компакт Д*. Электронный ресурс. URL: <https://zaoeuromix.ru/files/docs/KelvinD.pdf> (дата обращения 15.01.23 г.)
- [9] *Характеристики ОАП Ячейка Голея* Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_devices/golay_cell/ (дата обращения 15.01.23 г.)
- [10] *Характеристики отрезающих фильтров LPF23.1* Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.tydexoptics.com/pdf/ru/THz_Low_Pass_Filter.pdf (дата обращения 15.01.23 г.)
- [11] *Характеристики отрезающих фильтров BPF* Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.tydexoptics.com/ru/products/tgc-ustrojstva/thz_band_pass_filter/ (дата обращения 15.01.23 г.)
- [12] P. Kaufmann, R. Marcon, A. Abrantes, E.C. Bortolucci, L.O.T. Fernandes, G.I. Kropotov, A.S. Kudaka, N. Machado, A. Marun, V. Nikolaev, A. Silva, C.S. da Silva, A. Timofeevsky. *Exp Astron*, **37**, 579 (2014). DOI: 10.1007/s10686-014-9389-y
- [13] Д.В. Сивухин. *Общий курс физики, т. 3. Оптика* (Физматлит МФТИ, М., 2002)