ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 8, с. 1165–1168

УДК 524.1

МЕТОД ПОЛЕТНОЙ КАЛИБРОВКИ ОРБИТАЛЬНОГО ТЕЛЕСКОПА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ТУС

© 2021 г. П. А. Климов[1], *, К. Ф. Сигаева[1], С. А. Шаракин[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия*

**E-mail: pavel.klimov@gmail.com*

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.
После доработки 12.03.2021 г.
Принята к публикации 28.04.2021 г.

Предложен и реализован метод полетной калибровки фотоприемника ТУС, основанный на анализе флуктуаций стационарного сигнала. Метод проверен на лабораторном макете. Получены новые оценки коэффициентов усиления большинства каналов ТУС и проанализированы произошедшие изменения.

DOI: 10.31857/S0367676521080111

ВВЕДЕНИЕ

Телескоп ТУС (Трековая УСтановка) является орбитальным детектором космических лучей предельно высоких энергий, регистрирующим флуоресцентные треки широкого атмосферного ливня в диапазоне длин волн 300–400 нм. Детектирование с околоземной орбиты позволяет достичь большой, по сравнению с наземными флуоресцентными детекторами, экспозиции и равномерного обзора всего неба [1]. ТУС состоит из зеркала-концентратора площадью 2 м^2 и фотоприемника на 256 каналов регистрации. В качестве светочувствительных сенсоров в каналах фотоприемника использованы фотоэлектронные умножители (ФЭУ) Hamamatsu R1463 [2]. В составе фотоприемника 256 каналов сгруппированы в 16 одинаковых модулей, имеющих общую систему высоковольтного питания, систему сбора и первичной обработки данных (см. также [3]).

Важной особенностью электроники ТУС является наличие системы автоматической регулировки усиления (АРУ): в процессе работы происходит постоянная подстройка усиления ФЭУ за счет регулировки высокого напряжения. В условиях минимальной интенсивности свечения напряжение на ФЭУ и их чувствительность максимальны, при увеличении интенсивности фона напряжение понижается, а чувствительность падает. Это позволяет функционировать детектору в условиях сильно переменного излучения атмосферы на ночной стороне орбиты.

28 апреля 2016 г. детектор в составе научной аппаратуры спутника Ломоносов был запущен на солнечно-синхронную орбиту с наклонением 97.3° и периодом обращения 94 мин на высоте около 500 км. Срок активного существования аппарата на орбите составил около полутора лет (первые результаты измерений приведены в [4–6]). Во время первых включений прибора на орбите произошел сбой в работе системы АРУ – не происходило понижения напряжения при частичной мощной засветке модуля фотоприемника. До исправления алгоритма работы АРУ прибор провел некоторое время на дневной стороне орбиты с максимальным усилением. В результате этого часть ФЭУ вышла из строя, а все остальные каналы изменили свою чувствительность. В работе [7] рассмотрен вариант относительной калибровки фотоприемника ТУС на основе данных, полученных самим прибором. В настоящей работе предложена методика абсолютной калибровки, т.е. определение коэффициентов усиления ФЭУ, которая проверена на лабораторном макете и применена фотоприемнику детектора ТУС.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КАНАЛОВ

Стационарный поток фотонов на входе фотоприемника в канале преобразуется в цифровой сигнал (код АЦП), флуктуирующий вокруг определенного среднего значения – базового уровня. Базовый уровень определяется интенсивностью

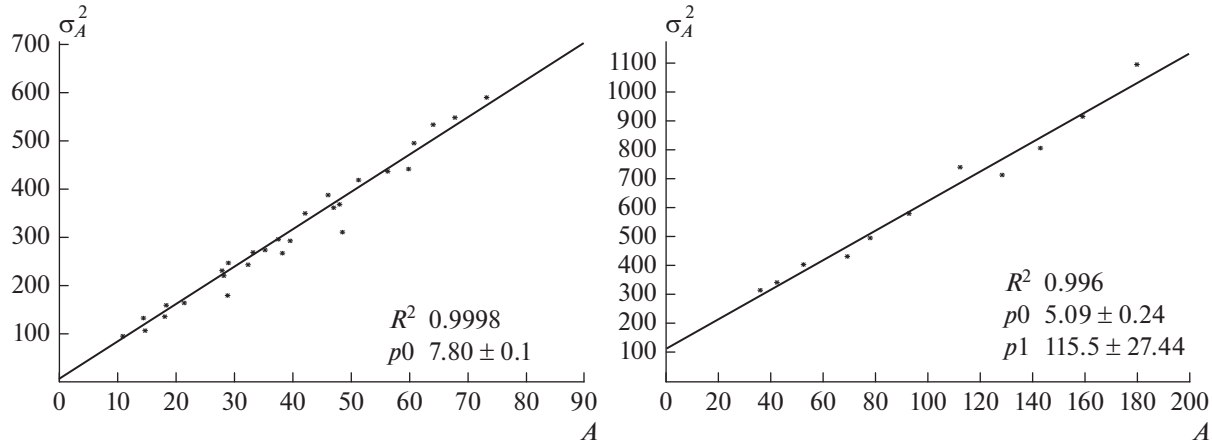

Рис. 1. Диаграмма Базовый уровень–Дисперсия, слева – прямая пропорциональность в канале 211, справа – линейная зависимость, полученная для ФЭУ VE0689 в ходе лабораторного эксперимента.

входного потока, а величина флуктуаций – случайным процессом образования фотоэлектронов на фотокатоде ФЭУ.

Традиционным способом калибровки ФЭУ в режиме постоянного тока является расчет коэффициента усиления G по базовому уровню A стационарного потока света: $G \sim A/(pI)$, где I – интенсивность потока фотонов на фотокатоде ФЭУ, p – его квантовая эффективность.

Существенным для реализации данного метода является наличие калибровочного сигнала с известной интенсивностью. В отсутствии калибровочного сигнала можно воспользоваться тем, что в простейшем случае “нешумящего” усилителя дисперсия кода АЦП σ_A^2 линейным образом связана с базовым уровнем. Точнее, $\sigma_A^2 \sim pIG^2$, и в этом приближении зависимость $\sigma_A^2(A)$ является прямой пропорциональностью, а ее угловой коэффициент p_0 позволяет определить усиление ФЭУ:

$$G_f = p_0 2C/(\alpha q_e) \quad (1)$$

(здесь C – емкость анодной цепи, α – коэффициент трансформации аналогового сигнала в цифровой, q_e – фундаментальный заряд). Пример зависимости $\sigma_A^2(A)$ для одного из каналов детектора приведен на рис. 1 слева.

Для проверки методики был проведен лабораторный эксперимент на макете фотоприемника, представляющем собой один модуль и материнскую плату обработки сигнала, идентичные используемым в детекторе ТУС. В измерениях при фиксированной мощности определялся базовый уровень и дисперсия. Варьируя интенсивность излучения источника, были получены наборы точек на диаграмме Базовый уровень-Дисперсия, позволяющие оценить угловой коэффициент p_0 и коэффициент усиления G_f из (1). На рис. 1 справа приведен пример применения данной процедуры для одного из ФЭУ макета. Основным отличием от теоретической модели является замена пропорциональности линейной зависимостью (ненулевой свободный член связан с наличием в канале аддитивного шума АЦП).

Одновременно с этим на специально собранном стенде производились измерения интенсивности излучения непосредственно на входе ФЭУ. Это позволяло провести прямое измерение коэффициента усиления G. В рамках лабораторного эксперимента для каждого канала макета были получены обе оценки коэффициента усиления. Оказалось, что оценка усиления по флуктуациям кода АЦП почти в три раза превышает значение, полученное в ходе прямого измерения: $K = G_f/G = 2.7 \pm 0.9$.

Отличие K от единицы вызвано наличием в электронике шумов, существенно увеличивающих флуктуации сигнала, не изменяя его среднего значения (в частности, шум вносит импульсный источник высокого напряжения). Большой разброс значений K связан с тем, что коэффициент усиления зависит как от самого ФЭУ, так и от его положения в модуле (т.е. от распределения напряжения питания по динодной системе). Как следствие, данная методика обладает достаточно большой погрешностью, более 30%.

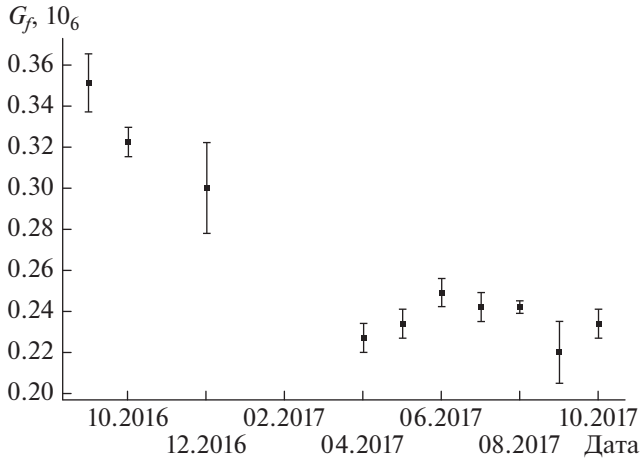

Рис. 2. Вариации коэффициента усиления G_f канала 24 с сентября 2016 по октябрь 2017 г.

КАЛИБРОВКА ФОТОПРИЕМНИКА ДЕТЕКОТОРА ТУС

Для калибровки фотоприемника ТУС предварительно из базы данных были отобраны события со стационарным сигналом, зарегистрированные при максимально возможной чувствительности каналов с базовым уровнем, превышающим значение 10, – в этом случае можно пренебречь ошибкой, связанной с дискретностью оцифровки слабых сигналов. Для каждого из 196 каналов (для остальных калибровку провести не удалось) по отобранным стационарным сигналам строилась линейная аппроксимация зависимости $\sigma_A^2(A)$, что позволяло рассчитать G_f и $G = G_f/2.7$. Медианное значение полученных коэффициентов усиления G составило 0.51×10^6. По сравнению с результатами предполетной калибровки распределение G стало заметно шире: стандартное отклонение увеличилось от 0.21×10^6 до 0.38×10^6.

Действие мощного излучения на солнечной стороне орбиты может вызывать постепенное уменьшение чувствительности. Для анализа такого “эффекта старения” было проведено отдельное исследование зависимости G от времени функционирования на орбите. В качестве примера на рис. 2 изображены вариации чувствительности одного из каналов, построенные по ежемесячным данным в течение года. Видно, что в 2016 г. происходило постепенное снижение чувствительности канала, а в 2017 г. – ее стабилизация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена полетная калибровка фотоприемника орбитального детектора, основанная на линейной зависимости дисперсии стационарного сигнала от его базового уровня. Получаемый таким образом коэффициент усиления с точностью до поправочного множителя (оценка которого получена в рамках лабораторного эксперимента с макетом) совпадает коэффициентом усиления, измеряемом по калиброванному источнику. На основании этого была осуществлена полетная калибровка фотоприемника ТУС по отобранным из базы зарегистрированных данных стационарным сигналам и проведен анализ произошедшие изменений чувствительности каналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГК Роскосмос и МГУ им. М.В. Ломоносова в рамках программы “Перспективные направления развития”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adams J., Ahmad S., Albert J.-N. et al.* // Astropart. Phys. 2013. V. 44. P. 76.
2. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R1463_TPMH1349E.pdf.
3. *Klimov P.A., Panasyuk M.I., Khrenov B.A. et al.* // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. P. 1687.
4. *Khrenov B.A., Klimov P.A., Panasyuk M.I. et al.* // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2017. V. 2017. No. 9. Art. No. 006.
5. *Klimov P.A., Kaznacheeva M.A., Khrenov B.A. et al.* // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2018. V. 15. No. 8. Art. No. 1139.
6. *Khrenov B.A., Garipov G.K., Kaznacheeva M.A. et al.* // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2020. V. 2020. No. 3. Art. No. 033.
7. *Grinyuk A., Lavrova M., Tkachenko A., Tkachev L.* // Phys. Atom. Nucl. 2020. V. 82. No. 6. P. 754.

Method of the inflight calibration of the orbital telescope TUS

P. A. Klimov[a], *, K. F. Sigaeva[a], S. A. Sharakin[a]

[a] *Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: pavel.klimov@gmail.com*

The method of inflight calibration of the TUS photoreceiver based on the analysis of the stationary signal fluctuations has been proposed and implemented. The method was tested with a laboratory model. New estimates of the majority of TUS channels PMT gains have been obtained and their changes have been analyzed.