

РЕКОНСТРУКЦИЯ СИГНАЛОВ ШИРОКОУГОЛЬНОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА

А.А. Иванов, Л.В. Тимофеев, С.В. Матаркин

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН»,
Якутск, Россия
timofeevlev@ikfia.ysn.ru

RECONSTRUCTION OF SIGNALS FROM THE WIDE FIELD-OF-VIEW CHERENKOV TELESCOPE

A.A. Ivanov, L.V. Timofeev, S.V. Matarkin

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, Russia
timofeevlev@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Описана работа черенковского телескопа с широким углом обзора. Регистрация широких атмосферных ливней (ШАЛ) порожденных космическими лучами (КЛ) основана на совпадении с сигналами от якутской комплексной установки ШАЛ. Система сбора данных телескопа выдает сигналы, связанные с параметрами развития ШАЛ предположительно, возрастом ливня и высотой максимума ливня в атмосфере. Здесь мы опишем применение цифровой обработки сигналов, с целью восстановить сигналы черенковского излучения, индуцированными ливнями КЛ.

Ключевые слова: космические лучи; широкие атмосферные ливни; Черенковское излучение.

Abstract. The operation of a wide field-of-view (WFOV) Cherenkov telescope is described. The detection of extensive air showers (EAS) of cosmic rays (CR) is based upon the coincidence with signals from the Yakutsk array. The data acquisition system of the telescope yields signals connected with EAS development parameters: presumably, shower age and position of shower maximum in the atmosphere. Here we describe the application of digital signal processing in order to reconstruct Cherenkov radiation signals induced by CR showers.

Keywords: Cosmic rays; extensive air showers; Cherenkov radiation.

ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи сверхвысоких энергий, попадающие в атмосферу Земли, создают каскад вторичных частиц. В этом каскаде имеется множество заряженных частиц, движущихся со скоростями, превышающими $c=n$, где c — скорость света в вакууме, а n — показатель преломления в воздухе. Эти частицы испускают когерентное черенковское излучение [Франк, Тамм, 1937], которое содержит информацию об энергии, составе и направлении прибытия первичной частицы, которая инициировала широкий атмосферный ливень [Буднев, 2017]. Со времени первого наблюдения [Galbraith, Jelleu, 1953] и систематического измерения свойств черенковского излучения в воздухе во время эксперимента на Памире [Нестерова, Чудаков, 1955] несколько установок ШАЛ были оснащены детекторами черенковского излучения. В большинстве предыдущих измерений использовались аналоговые системы считывания сигналов, которые имели узкую полосу пропускания, что ограничивало возможность реконструкции формы импульса черенковского излучения от ШАЛ; или детекторы предназначены для измерения интегрального сигнала [Дьяконов, 1986; Hammond, 1987; Fowler, 2001]. В этой статье мы описываем метод восстановления формы импульса черенковского излучения от ШАЛ, регистрируемого с помощью широкоугольного черенковского телескопа, работающего на совпадении с мастерным сигналом вырабатываемым Якутской комплексной установки ШАЛ.

ОБРАТНАЯ СВЕРТКА СИГНАЛОВ ЧЕРЕНКОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА

Все компоненты системы сбора данных телескопа — усилители, АЦП и т. д. — являются линей-

ными устройствами; выходной сигнал может быть представлен как свертка входного сигнала $f_{in}(t)$ с системной передаточной функцией $g(t)$

$$f_{out}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{in}(\tau) g(t-\tau) d\tau = (f_{in} g). \quad (1)$$

Применяя дельта-функцию в качестве входного сигнала, свертка представляет собой импульсную характеристику системы. Здесь импульс — это сигнал, состоящий из всех нулей, кроме одной ненулевой точки: цифрового эквивалента дельта-функции. Простой способ восстановления входного сигнала — обратная свертка с использованием преобразования Фурье-сигналов

$$\hat{f}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i v t} f(t) dt \quad (2)$$

В частотной области отношение свертки имеет вид $\hat{f}_{out} = \hat{f}_{in} \hat{g}$, а развертка задается как $\hat{f}_{in} = \hat{f}_{out} / \hat{g}$, где шляпы символизируют преобразования Фурье [Nakhostin, 2014].

ИМПУЛЬСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ

В первом случае мы использовали пластиковый сцинтиллятор, такой же как на сцинтиляционных детекторах якутской установки, состоящий из куска полиметилметакрилата с растворенным *n*-терфенилом (PPP) и 1,4-ди-5-фенил-2-оксазолбензолом (PPOP). Постоянная времени затухания сцинтилляции составляет 2.7 нс [Колосов, 2001].

Вторым проверенным источником является импульс темного тока экранированного ФЭУ, создаваемый электронным пучком, испускаемым при

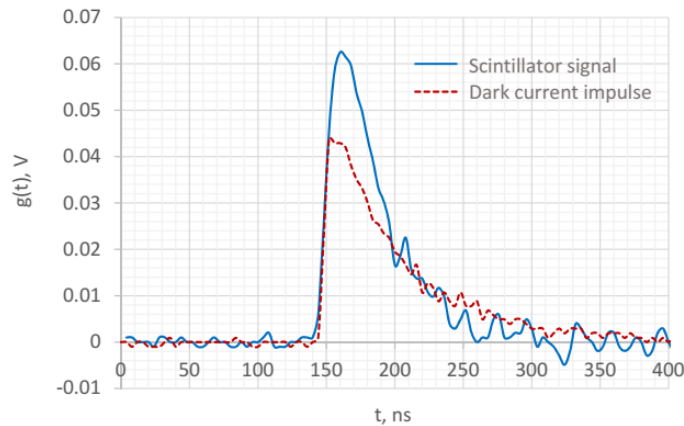


Рис. 1. Импульсная реакция системы на короткие входные сигналы

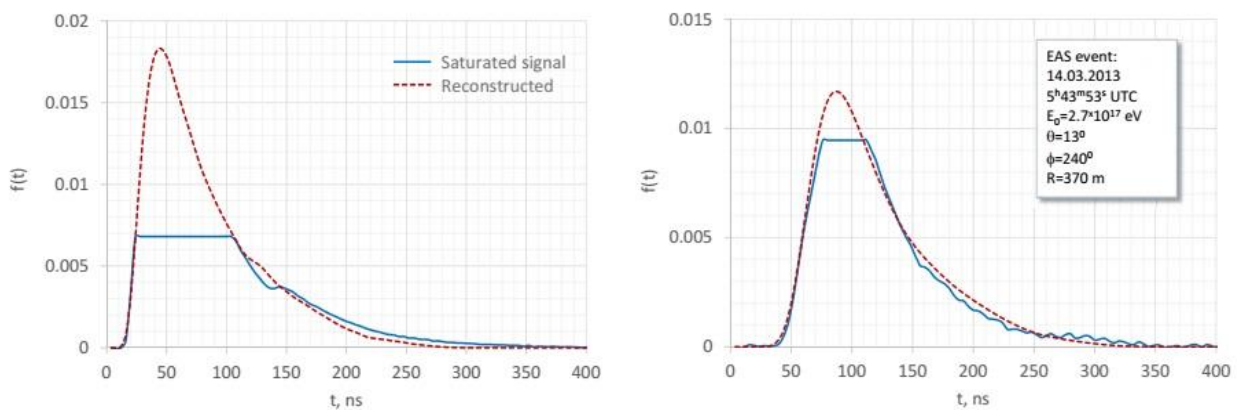


Рис. 2. Реконструкция двух насыщенных выходных сигналов от события ШАЛ, обозначенного на панели внизу

перенапряжении. Важно поддерживать анодное напряжение на минимальном превышении его предела напряжения, чтобы генерировать один импульс, а не множество импульсов, формирующих ток. Форма импульса определяется конкретной временной характеристикой ФЭУ. Наш многоканальный ФЭУ Hamamatsu R2486 имеет время нарастания 5.5 нс.

На рис. 1 показаны отклики от двух источников. Действительно, длительности выходных сигналов в нашей системе намного больше, чем используемые входные сигналы. Для анализа, представленного здесь, мы использовали импульсный отклик на импульсы темнового тока, усредненные по 18 измерениям, проведенным 14 марта 2018 г.; этот выбор не требует дополнительного экспериментального оборудования.

РЕКОНСТРУКЦИЯ НАСЫЩЕННЫХ СИГНАЛОВ

Некоторая часть обнаруженных в эксперименте сигналов перенасыщены из-за превышения максимальной емкости наблюдательного инструмента. Такое поведение является обычным явлением в физике космических лучей, особенно в исследованиях ШАЛ, в которых существует широкий динамический диапазон энергии (10^{14} ; 10^{20}) эВ.

Хотя традиционный подход к восстановлению насыщенных сигнала состоит в том, чтобы его избежать, в некоторых случаях, когда теряется наиболее

интересная физическая информация или измерение является уникальным, предпочтительно восстанавливать сигнал в первичной области насыщения. Несколько методов восстановления насыщенных сигналов были предложены ранее (см., например, [Yang, Ben-Zion 2010]).

В нашем случае входной сигнал черенковского излучения может быть аппроксимирован с помощью гамма-распределения, предлагая простой метод восстановления насыщенного сигнала. Алгоритм такой же, как в предыдущем разделе, за исключением игнорирования отрезанной части сигнала. Очевидно, что точность восстановления зависит от доли сигнала, который был потерян до насыщения. На рис. 2 показаны два сигнала, восстановленные с использованием этого способа. Для события ШАЛ, обнаруженного 14.03.2013, 5 ч 43 мин 53 с UTC, сигналы для двух из 32 каналов телескопа насыщены. Во втором случае относительно незначительная часть сигнала теряется, и реконструкция является более надежной — по крайней мере, с точки зрения длительности сигнала.

ВЫВОДЫ

Мы описали применение цифровой обработки сигналов для восстановления сигналов черенковского излучения, индуцированных ШАЛ, по данным широкоугольного черенковского телескопа, работающего на совпадение с сцинтилляционными счетчи-

ками якутской установки. Передаточная функция системы оценивается с использованием импульса темнового тока многоанодного ФЭУ. Входной сигнал восстанавливается с помощью передаточной функции и алгоритма развертки Винера. Влияние шума, параметризованного отношением сигнал/шум, оценивается с использованием игрушечной модели. Установлено, что сигнал/шум широкоугольного черенковского телескопа должен быть более 56 дБ для точной реконструкции входного сигнала. Следовательно, предлагается простой способ восстановления таких сигналов, который не требует деконволюции. Кроме того, способ восстановления может использоваться для восстановления насыщенных сигналов.

Работа частично поддержана Президиумом РАН (программа 3), Сибирским отделением РАН (программа П.16.2.3) и РФФИ (проект № 16-29-13019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буднев Н. и др. Эксперимент TAIGA: современное состояние и перспективы // J. Inst. 2017. Т. 12. C08018.
- Колосов В.А. Тезисы. Физический институт им. Лебедева. Москва, 2001.
- Нестерова Н.М., Чудаков А.Е. О наблюдении черенковского излучения, сопровождающего широкие атмосферные ливни КР ЖЭТР. 1955. Т. 28. С. 384.
- Франк И.М., Тамм И.Е. Когерентное излучение быстро движущегося электрона в среде. Докл. Акад. Наук СССР. 1937. Т. 14. С. 107.
- Dyakonov M.N., et al. The use of Cherenkov detectors at the Yakutsk CR EAS array // Nucl. Instrum. Meth. A. 1986. V. 248. P. 224.
- Fowler J.W., et al. A measurement of CR spectrum and composition at the knee // Astropart. Phys. 2001. V. 15. P. 49.
- Hammond R.T., et al. Cherenkov radiation in large CR air showers // IL Nuovo Cimento. 1987. 1С. P. 315.
- Nakhostin M., Podolyak Zs., Regan P.H. Digital processing of signals from LaBr3:Ce scintillation detectors // J. Inst. 2014. V. 9. P. C12049.
- Galbraith W., Jelley J. Light pulses from the night sky associated with CRs // Nature. 1953. V. 171. P. 349.
- Liu Y., et al. Recovery of Saturated g Signal Waveforms by Artificial Neural Networks, arXiv:1810.08200, (submitted to Nucl. Instrum. Meth. A).
- Yang W., Ben-Zion Y. An algorithm for detecting clipped waveforms and suggested correction procedures // Seism. Res. Lett. 2010. V. 81. P. 53.