ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 5, с. 171–173

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 520.8.052

АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ДЕТЕКТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2025 г. А. А. Иванов, С. В. Матаркин, И. С. Петров

Поступила в редакцию 24.04.2025 г.
После доработки 05.06.2025 г.
Принята к печати 01.07.2025 г.

DOI: 10.7868/S3034564225050214

Детекторы излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ) в атмосфере находят применение для регистрации потока фотонов, порождаемых элементарными частицами в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) космических лучей (КЛ) в атмосфере, где релятивистские заряженные частицы движутся быстрее фазовой скорости света в воздухе [1, 2].

Недавно мы разработали простой и дешевый детектор ИВЧ, названный CheD [3], на основе которого может быть (как из блоков) собрана автономная система для регистрации ШАЛ в ночном безлунном небе. Быстродействие ФЭУ и системы сбора данных с Domino Ring Sampler (DRS4 [4]) позволяет разместить детекторы с расстоянием между детекторами 20–30 м и более в зависимости от желаемой точности определения углов прихода ШАЛ. Нижняя граница этого расстояния определяется в основном разбросом времени пролета электронов в ФЭУ.

Конструкция базового детектора CheD описана в статье [3], здесь можно кратко его охарактеризовать следующим образом: он состоит из ФЭУ ET Enterprises Type 9305KB диаметром 51 мм в фокусе линзы Френеля с размерами 28×28 см^2 для увеличения светосбора в ящике с светонепроницаемой крышкой на геодезическом штативе. Система сбора данных состоит из операционного усилителя и удаленного регистратора на основе DRS4, где происходит оцифровка и отсекаются ложные события, вызываемые шумами. Цифровая обработка сигналов проводится на ноутбуке в станции наблюдения установки ШАЛ.

Для проверки функционирования такой системы детекторов в минимальной конфигурации, названной CheD_4, мы использовали четыре идентичных детектора (рис. 1), размещенных в вершинах квадрата со сторонами, примерно равными 18.5 м. Регистрация событий ШАЛ происходит, когда все четыре детектора выдают сигнал, прошедший отбор по качеству (как минимум позволяющий определить начало сигнала относительно остальных детекторов). Установка CheD_4 в минимальной конфигурации не предназначена для определения энергии первичной астрочастицы, порождающей ШАЛ, она подходит скорее для измерения формы и длительности импульса ИВЧ от ливня в атмосфере, связанных с глубиной максимума и химическим составом [5, 6], а также направления прихода ШАЛ.

Другими словами, система CheD_4 относится к разновидности черенковских детекто-

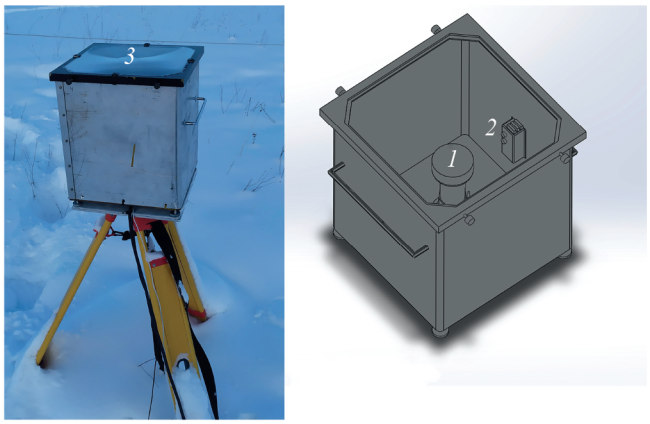

Рис. 1. Один из четырех одинаковых детекторов CheD на геодезическом штативе, составляющих автономную систему детекторов излучения Вавилова–Черенкова для регистрации широких атмосферных ливней космических лучей: *1* – фотоумножитель, *2* – операционный усилитель, *3* – линза Френеля.

ров полного поглощения, предназначенных для измерения плотности потока фотонов от релятивистских электронов в широком атмосферном ливне. Подобные детекторы применялись на Якутской установке ШАЛ [2], на установках Haverah Park [7] и BLANCA [8], где вертикально направленные ФЭУ измеряли интегральный поток черенковских фотонов, связанный с энергией первичной астрочастицы, порождающей ШАЛ. На установке “Тунка-133”, состоящей из 133 ФЭУ, расположенных в кластерах на расстояниях около 85 м, внедрена цифровая система сбора и обработки данных [9].

Три предыдущие аналоговые системы не обеспечивают возможность измерения формы импульса ИВЧ – они дают только интегральные параметры, такие как полный поток и ширина импульса. Системы же “Тунка-133” и CheD_4 теоретически равноценны в части восстановления формы входного черенковского сигнала, за исключением того, что в системе “Тунка-133” применяется моделирование сигнала ИВЧ с помощью пакета программ CORSIKA для анализа данных вместо модельно-независимого преобразования Фурье.

К недостаткам детектора CheD_4 относится приблизительность метода аппроксимации отклика системы сбора данных с помощью импульса темнового тока ФЭУ вместо дельта-функции.

Детектор CheD_4 предназначен для существенного улучшения точности измерения черенковского света ШАЛ, особенно формы импульса. Решетка таких детекторов с современной быстродействующей системой сбора данных с цифровой обработкой сигналов, встроенная в наземную установку ШАЛ, со своим независимым триггером событий ливней может повысить точность определения углов прихода ШАЛ, а также улучшить оценку параметров продольного развития ливней, в том числе глубины максимума ШАЛ и массового состава первичных астрочастиц.

Синхронизацию детекторов мы выполнили, собрав детекторы в рабочей конфигурации в одно место – внутри круга радиусом около 30 см, что дает взаимное запаздывание черенковских сигналов от детекторов порядка 1 нс. Аппаратурное запаздывание сигналов мы определили таким способом с точностью примерно 4 нс. Детекторы “Тунка” регистрируют ИВЧ с частотой дискретизации 200 МГц [9], тогда как у CheD_4 частота дискретизации 950 МГц. Конечно, это не означает пятикратное преимущество в разрешении по времени, но в измерении формы коротких импульсов ИВЧ детектор CheD_4 имеет явное преимущество.

Форма импульса входного сигнала определяется с использованием цифровой обработки сигналов – обратным преобразованием Фурье выходного сигнала [6]. При этом для моделирования отклика системы сбора данных на входной сигнал в виде дельта-функции используется импульс темнового тока ФЭУ при перенапряжении.

Для очистки полезного сигнала от шумов естественного и аппаратурного происхождения используются цифровые фильтры. В простейшем случае это фильтр нижних частот. Полоса пропускания фильтра определяется в частотном

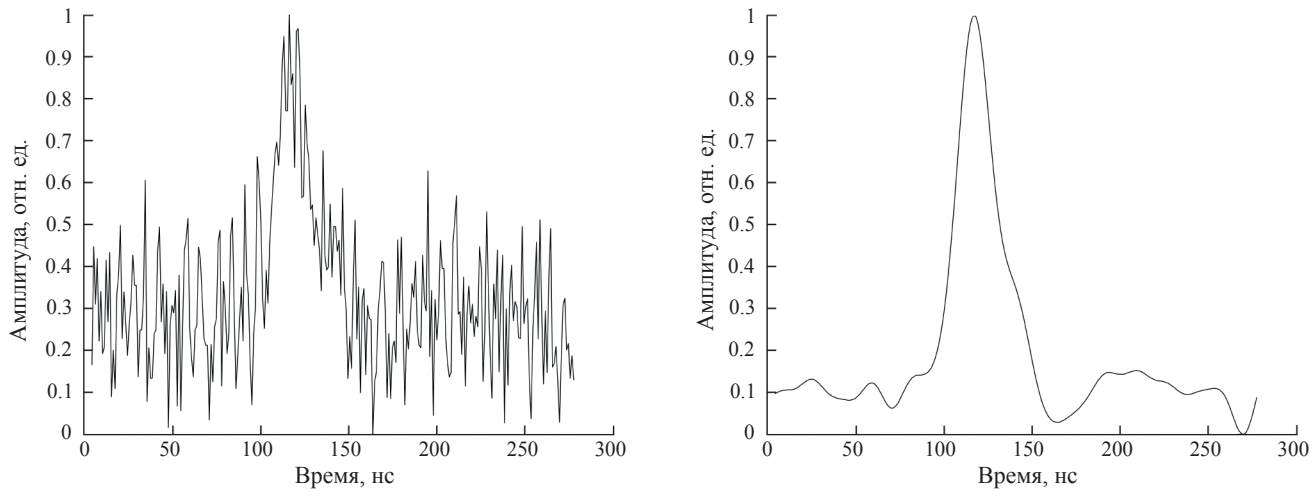

Рис. 2. Входной сигнал черенковского света от ШАЛ, восстановленный обратным преобразованием Фурье (левая панель); входной сигнал после подавления шумов с применением фильтра нижних частот (правая панель).

представлении полученного входного сигнала. Остальные параметры фильтра определяются при его конструировании, они незначительно влияют на результат (рис. 2).

Для выявления связи аппаратной задержки сигнала в одном из четырех детекторов CheD с искажением истинного углового распределения направлений прихода ШАЛ мы использовали геометрическую модель в приближении плоского фронта ливня, в которой время прихода фронта на i-й детектор с координатами (x_i, y_i) задается формулой

$$t_i = -\left(x_i \cos\varphi_0 + y_i \sin\varphi_0\right)\sin\theta_0 / c.$$

Для искаженного распределения находим амплитуду первой гармоники как функции задержки сигнала. Для заданного зенитного угла возрастание задержки сигнала приводит к почти линейному возрастанию амплитуды. В общем случае естественным способом уменьшения ошибок определения углов прихода ШАЛ является увеличение количества и расстояния между детекторами установки [2].

Изготовленная система детекторов CheD_4 позволяет улучшить частоту дискретизации при измерении формы импульса сигналов ИВЧ в широких атмосферных ливнях космических лучей с частотой от 200 до 950 МГц, а система-демонстратор подтвердила возможность создания рабочих систем из этих детекторов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-22-20048, https://rscf.ru/project/24-22-20048).

Адрес для справок: Россия, 677027, Якутск, пр. Ленина, 31. Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера. E-mail: MatarkinSV@ikfia.ysn.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Франк И.М., Тамм И.Е.* // ДАН СССР. 1937. Т. 14. С. 109.
2. *Иванов А.А., Кнуренко С.П., Слепцов И.Е.* // ЖЭТФ. 2007. Т. 131. № 6. С. 1001. https://elibrary.ru/item.asp?id=9539237
3. *Матаркин С.В., Иванов А.А.* // ПТЭ. 2023. V. 6. С. 216. https://doi.org/10.31857/S0032816223060101
4. *Ritt S., Dinapoli R., Hartmann U.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 2010. V. 623. P. 486. https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.03.045
5. *Ivanov A.A, Matarkin S.V., Timofeev L.V.* // Physical. Rev. D. 2022. V. 105. P. 042008. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.042008
6. *Ivanov A.A, Matarkin S.V., Timofeev L.V.* // Int. J. Mod. Phys. D. 2020. V. 29. P. 2050033. https://doi.org/10.1142/S0218271820500339
7. *Hammond R.T., Orford K.J., Protheroe R.J. et al.* // Il Nuovo Cimento C. 1978. V. 1. P. 315. https://doi.org/10.1007/BF02525044
8. *Fowler J.W., Fortson L.F., Jui C.C.H. et al.* // Astropart. Phys. 2001. V. 15. P. 49. https://doi.org/10.1016/S0927-6505(00)00139-0
9. *Prosin V.V.* (*Tunka Collab.*) // Nucl. Phys. B Proc. Suppl. 2009. V. 190. P. 247. https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2009.03.095