

УДК 524.1

## УЛУЧШЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИГНАЛА ПРИ ПОМОЩИ СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА TUNKA-REX

© 2019 г. Т. Н. Маршалкина<sup>1</sup> \*, П. А. Безъязыков<sup>1</sup>, Н. М. Буднев<sup>1</sup>, О. А. Гресс<sup>1</sup>,  
А. В. Загородников<sup>1</sup>, Ю. А. Казарина<sup>1</sup>, М. Кляйфес<sup>2</sup>, Е. Е. Коростелева<sup>3</sup>, Д. Г. Костюнин<sup>4</sup>,  
Л. А. Кузьмичев<sup>3</sup>, В. В. Ленок<sup>4</sup>, Н. Б. Лубсандоржиев<sup>3</sup>, Р. Д. Монхоев<sup>1</sup>, Э. А. Осипова<sup>3</sup>,  
А. Л. Пахоруков<sup>1</sup>, Л. В. Паньков<sup>1</sup>, В. В. Просин<sup>3</sup>, О. Л. Федоров<sup>1</sup>, Р. Хиллер<sup>4</sup>, А. Хонгс<sup>4</sup>,  
Т. Хьюге<sup>4</sup>, Д. О. Черных<sup>1</sup>, Д. А. Шипилов<sup>1</sup>, Ф. Г. Шрёдер<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Иркутский государственный университет”, Научно-исследовательский институт прикладной физики,  
Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Технологический институт Карлсруэ, Институт обработки технологических процессов и электроники,  
Карлсруэ, Германия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобелыцына, Москва, Россия

<sup>4</sup>Технологический институт Карлсруэ, Институт ядерной физики, Карлсруэ, Германия

<sup>5</sup>Университет штата Делавэр, Отдел физики и астрономии, Ньюарк, США

\*E-mail: marshalkintatjana@rambler.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Установка Tunka-Rex – это антенная решетка, предназначенная для регистрации радиоизлучения от широких атмосферных ливней, рожденных космическими лучами сверхвысоких энергий. Это излучение имеет широкополосный спектр, отвечающий импульсам длительностью порядка десятков наносекунд, и измеряется в диапазоне от 30 до 80 МГц. Для улучшения обработки сигналов, регистрируемых Tunka-Rex, мы использовали согласованную фильтрацию и искусственные нейронные сети. Согласованная фильтрация способна определить пик сигнала достаточно точно, но ее максимальная эффективность может быть достигнута только в случае белого шума. Чтобы улучшить распознавание шумовых особенностей в дорожках, мы применили сверточные нейронные сети с архитектурой автоэнкодера. В этой работе мы представляем реализацию этих методов в обработке сигналов эксперимента Tunka-Rex и обсуждаем их эффективность в сравнении со стандартным методом.

DOI: 10.1134/S0367676519080271

### ВВЕДЕНИЕ

Tunka-Rex – это антенная решетка, решающая задачи регистрации радиоизлучения широких атмосферных ливней (ШАЛ), инициированных космическими лучами с энергиями выше 100 ПэВ. Эксперимент работает в диапазоне частот от 30 до 80 МГц и состоит из 63 антенных станций, расположенных в Тункинской долине, Бурятия [1].

Для работы установки необходим внешний триггер, поэтому Tunka-Rex работает совместно с другими детекторами – черенковским детекто-

ром Tunka-133 [2] и сцинтилляционным детектором Tunka-Grande [3].

Типичные сигналы, регистрируемые Tunka-Rex, представляют собой когерентные широкополосные импульсы с длиной порядка десятков наносекунд. Восстановление амплитуды и положения пика такого импульса происходит путем нахождения максимума огибающей [1]. Этот метод хорошо себя зарекомендовал, однако для улучшения реконструкции параметров сигнала возможно использовать и другие методы, в частности, согласованный фильтр и нейронные сети.

## 1. СОГЛАСОВАННЫЙ ФИЛЬТР

В основе согласованного фильтра лежит корреляция принятого сигнала и его шаблона с использованием свертки. Амплитуду каждой точки свертки можно считать мерой того, насколько хорошо шаблон совпадает с соответствующей частью пришедшего сигнала. При помощи программного обеспечения фильтр может реализовываться так: начиная с начала дорожки, шаблон последовательно перемножается со всеми значениями принятого сигнала, полученные значения суммируются, а затем шаблон сдвигается на шаг. Пик полученного в результате этих действий сигнала будет соответствовать пику принятого сигнала.

Для работы согласованного фильтра необходимо иметь сигнал, который уже известен, поэтому в данной работе был использован шаблон сигнала длиной 60 нс, созданный при помощи усреднения нескольких тысяч импульсов ШАЛ, смоделированных при помощи программной среды CoREAS [4]. Такая длина шаблона оптимальна с точки зрения быстроты и точности получаемого результата. Его можно увидеть на рис. 1, слева.

Чтобы определить порог срабатывания согласованной фильтрации, было построено распределение квадратных корней от максимумов свертки шаблона с окном фонового шума (т.е. с дорожками, заведомо не содержащими сигнала). На этом распределении был определен квантиль, соответствующий вероятности 5% регистрации ложного сигнала. В результате было получено значение амплитуды свертки —  $854 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^{-1}$ , при котором восстановление пика и позиции сигнала еще может быть произведено.

Справа на рис. 1, представлен результат применения согласованного фильтра для восстановления амплитуд набора модельных сигналов с шумом и без шума, а также использования порога для распределения истинной амплитуды относительно квадратного корня из максимума взаимной корреляции.

Согласованный фильтр был включен в программную среду Offline [5] и проверен на наборе моделированных событий. Было показано, что этот фильтр способен восстанавливать импульсы с меньшей амплитудой, а разрешение по углу прихода получается сходным со стандартным методом.

## 2. НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

Другой метод, который был использован в этой работе — это автоэнкодер. Это нейронная сеть на основе одномерных сверхточных слоев с выпрямленной линейной единицей и максималь-

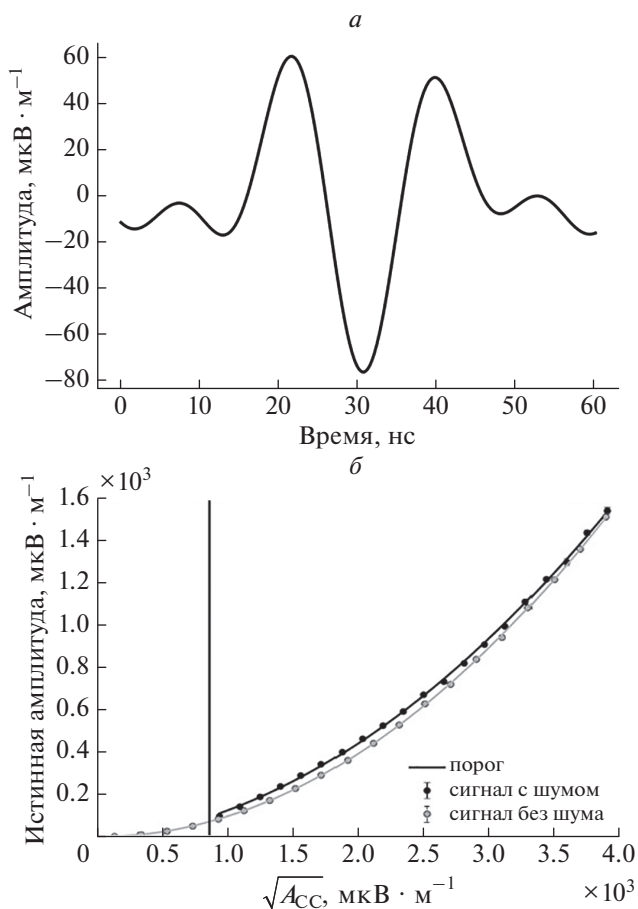


Рис. 1. *a* — Шаблон сигнала длиной 60 нс; *б* — распределения истинной амплитуды относительно квадратного корня из максимума взаимной корреляции.

ным объединением после сверхточного слоя. Бинарная кросс-энтропия в этом случае используется как функция потерь. В отличие от согласованной фильтрации, автоэнкодер нацелен именно на выделение и устранение шумовых особенностей.

Для того, чтобы оценить качество сетей, были использованы две метрики: эффективность,  $N_{rec}/N_{tot}$ , соответствующая той части событий, которые пересекли порог, и чистота,  $N_{hit}/N_{rec}$ , обозначающая те события, для которых восстановлено положение пика с условием  $|t_{rec} - t_{true}| < 5 \text{ нс}$ . Здесь  $N_{rec}$ ,  $N_{tot}$ ,  $N_{hit}$  — количество восстановленных событий, общее количество событий и количество восстановленных событий, чей пик попадает в  $|t_{rec} - t_{true}| < 5 \text{ нс}$  соответственно.  $t_{rec}$  и  $t_{true}$  — восстановленная и истинная позиция пика сигнала по времени.

Как и согласованный фильтр, автоэнкодер способен восстановить сигналы с меньшей энергией, чем при стандартном методе, а его угловое

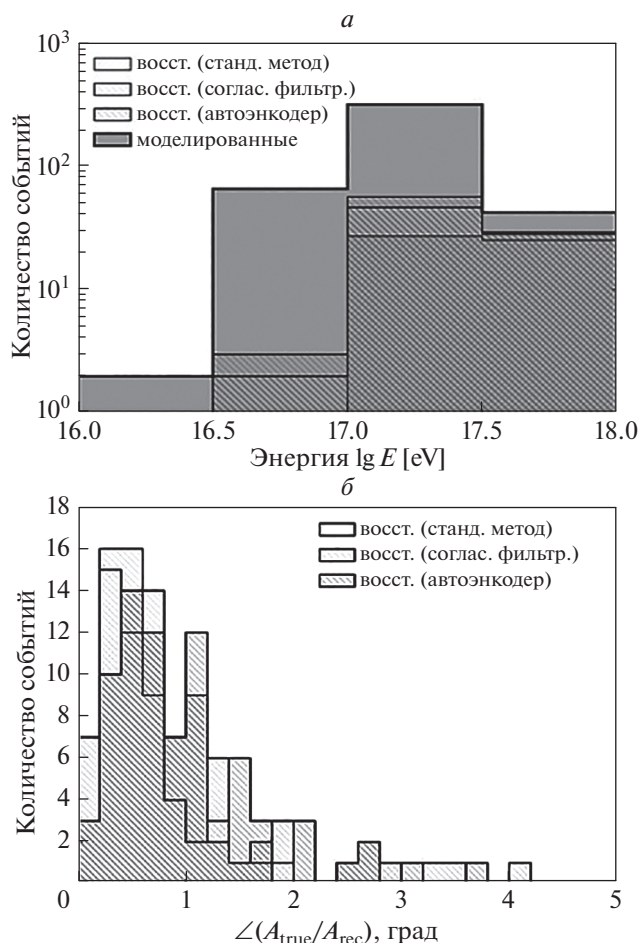


Рис. 2. *a* – Распределение восстановленных энергий; *b* – распределение отклонений в направлении прихода.

разрешение остается на том же уровне. Это можно увидеть на рис. 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реконструкция сигнала была улучшена как в случае согласованной фильтрации, так и в случае автоэнкодера. Оба метода показали сходную эффективность, которая оказалась выше, чем при использовании стандартного метода. Программное обеспечение, включающее в себя эти методы, уже готово и практически включено в стандартную обработку эксперимента Tunka-Rex. Также ведется работа по повышению эффективности этих методов путем создания библиотеки шаблонов для согласованного фильтра и оптимизации архитектуры автоэнкодера.

Работа поддержана Минобрнауки России (гос. задания 3.9678.2017/БЧ, 3.904.2017/ПЧ, 3.6787.2017/ИТР, 1.6790.2017/ИТР), грантами РФФИ (16-02-00738, 17-02-00905, 18-32-00460). Работа выполнена с использованием оборудования ТАЦКП в рамках выполнения соглашения с Минобрнауки России (уникальный идентификатор RFMEFI59317X0005).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bezyazeev P.A., Budnev N.M., Gress O.A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. V. 802. P. 89.
2. *Prosin V.V., Berezhev S.F., Budnev N.M. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 756. P. 94.
3. *Буднев Н.М., Иванова А.Л., Калмыков Н.Н. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 430; *Budnev N.M., Ivanova A.L., Kalmykov N.N. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. № 3. P. 395.
4. *Huege T., Ludwig M., James C.W.* // AIP Conf. Proc. 2013. V. 1535. P. 128.
5. *Abreu P., Aglietta M., Ahn E.J. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 635. P. 92.