

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ ОТ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ ДЛЯ УСТАНОВКИ TUNKA-REX

¹Д.А. Шипилов, ¹П.А. Безъязыков, ¹Н.М. Буднев, ¹О. Гришин, ¹О.А. Гресс, ¹А.В. Загородников, ¹Ю.А. Казарина, ⁴М. Кляйфгес, ⁶Е.Е. Коростелева, ⁵Д.Г. Костюнин, ⁶Л.А. Кузьмичев, ²В.В. Ленок, ⁶Н. Лубсандоржиев, ¹С. Малахов, ¹Т.Н. Маршалкина, ¹Р.Д. Монхоев, ⁶Э.А. Осипова, ¹Л.В. Паньков, ¹А.Л. Пахоруков, ⁶В.В. Просин, ¹О.Л. Федоров, ²А. Хаунгс, ^{2,3}Т. Хьюге, ^{2,7}Ф.Г. Шредер

¹Научно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
justforprince@gmail.com

²Технологический институт Карлсруэ, Институт ядерной физики, Карлсруэ, Германия

³Свободный университет Брюсселя, Астрофизический институт, Брюссель, Бельгия

⁴Технологический институт Карлсруэ, Институт обработки данных и электроники, Карлсруэ, Германия

⁵Немецкий электронный синхротрон, Цойтен, Германия

⁶Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

⁷Университет Дэлавера, Факультет физики и астрономии, Ньюарк, США

APPLYING NEURAL NETWORKS TO RECONSTRUCT RADIO SIGNALS FROM EXTENSIVE AIR SHOWERS AT TUNKA-REX

¹D. Shipilov, ¹P. Bezyazeev, ¹N. Budnev, ¹O. Grishin, ¹O. Gress, ¹A. Zagorodnikov, ¹Y. Kazarina, ⁴M. Kleifges, ⁶E. Korosteleva, ⁵D. Kostunin, ⁶L. Kuzmichev, ²V. Lenok, ⁶N. Lubsandorzhev, ¹S. Malakhov, ¹T. Marshalkina, ¹R. Monkhoev, ⁶E. Osipova, ¹L. Pankov, ¹A. Pakhorukov, ⁶V. Prosin, ¹O. Fedorov, ²A. Haungs, ^{2,3}T. Huege, ^{2,7}F.G. Schröder

¹Applied Physics Institute of the Irkutsk State University, Irkutsk, Russia
justforprince@gmail.com

²Institut für Kernphysik, KIT, Karlsruhe, Germany

³Astrophysical Institute, Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2, Brussels, Belgium

⁴Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik, KIT, Karlsruhe, Germany

⁵DESY, Zeuthen, Germany

⁶Skobel'syn Institute of Nuclear Physics MSU, Moscow, Russia

⁷Bartol Research Inst., Dept. of Phys. and Astron., Univ. of Delaware, Newark, USA

Аннотация. Tunka-Rex — антенное поле, расположенное в Тункинской долине и регистрирующее радиоизлучение широких атмосферных ливней (ШАЛ), инициированных космическими лучами (КЛ) с энергиями выше 100 ПэВ в диапазоне 30–80 МГц. Регистрируемые импульсы представляют собой широкополосные сигналы продолжительностью порядка десятков наносекунд. Регистрация импульсов осложнена как внутренними шумами радиодетектора, так и внешними помехами различного происхождения. Для решения проблемы восстановления параметров импульса (а именно, амплитуды и временной отметки) предлагается использовать нейросеть архитектуры «автоэнкодер», выделяющую характерные особенности шума и удаляющую его из записанных данных. Приведена оценка эффективности восстановления параметров КЛ с использованием автоэнкодера в сравнении со стандартным методом на моделированных данных, а также результаты обработки реальных данных. Обсуждаются возможности применения данной нейросети для радиодетекторов различных типов.

Ключевые слова: космические лучи, радиофизика, машинное обучение.

Abstract. The Tunka Radio Extension (Tunka-Rex) is a digital antenna array, which measures the radio emission of the cosmic-ray air-showers in the frequency band of 30–80 MHz. In the present work we discuss the improvements of the signal reconstruction applied for the Tunka-Rex. To recognize hidden features of the noise and treat them, we decided to use convolutional neural network. Taking the recorded trace as an input, the autoencoder returns denoised trace, i.e. removes all signal-unrelated amplitudes. We discuss the prospects of application of neural networks for lowering the threshold of digital antenna arrays for cosmic-ray detection.

Keywords: cosmic rays, radiophysics, machine learning.

ВВЕДЕНИЕ

Широкий атмосферный ливень (ШАЛ) представляет собой комплексный каскадный процесс, являющийся продуктом взаимодействия космических лучей (КЛ) с атмосферой Земли. Радиоизлучение ШАЛ в основном обусловлено взаимодействием движущихся заряженных частиц ливня с геомагнитным полем, а также эффектом Аскарьяна [Аскарьян, 1961]. Задача регистрации и восстановления параметров ШАЛ по

данным радиодетектора сопряжена со сложностями. На сегодняшний момент не существует эффективной методики триггера импульсов ШАЛ только по данным радио, (исключение — подход антарктических экспериментов [Barwick, 2014; Gorham, 2009], где низкий уровень фонового шума позволяет использовать триггер по порогу амплитуды), поэтому большинство существующих радиодетекторов ШАЛ работают совместно с детекторами других типов (оптические, сцин-

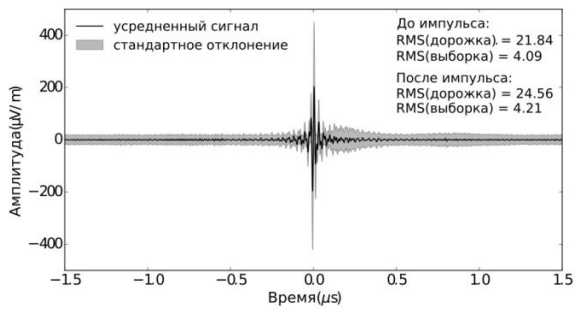


Рис. 1. Усреднение дорожек с сигналом ШАЛ, измеренным на Tunka-Rex, по выборке из 400 событий. В случае белого шума ожидаемое уменьшение амплитуды шума — $\sqrt{400}=20$ раз. Меньшее фактическое снижение амплитуды (около 5) и помехоподобный сигнал сразу за импульсом ШАЛ приводят к выводу о невозможности использования модели белого шума

тиляционные) и получают от них триггер на запись данных. Регистрация и восстановление параметров низкоэнергетических событий (<100 ПэВ) осложнены тем, что уровень фонового шума сопоставим с уровнем сигнала (или превышает его), что приводит к искажению формы импульса ШАЛ до невозможности его восстановления. В настоящей работе мы обсуждаем результаты и перспективы применения нейросетей типа «автоэнкодер» для удаления шума из оцифрованных данных и восстановления исходного импульса ШАЛ.

РЕГИСТРИРУЕМЫЙ СИГНАЛ

Антенная станция Tunka-Rex измеряет сигнал ШАЛ в двух перпендикулярных поляризациях с помощью антенны SALLA [Krömer, 2009] по внешнему триггеру от установок черенковского света Тунка-133 [Prosin, 2015] и сцинтилляционных детекторов Tunka-Grande [Буднев, 2015]. Регистрируемый сигнал проходит через аналоговый фильтр-усилитель, выделяющий полосу 30–80 МГц, после чего оцифровывается с частотой дискретизации 200 МГц и динамическим диапазоном 12 бит, дополнительно фильтруется цифровым фильтром в диапазоне 35–80 МГц и записывается в дорожку длиной 5 микросекунд. Как показало исследование среднего RMS по отдельной сигнальной дорожке и по выборке из 400 дорожек (рис. 1), шум на установке Tunka-Rex не может быть приближен как белый и обладает характерными особенностями, доступными для выделения методами машинного обучения.

АВТОЭНКОДЕР

Автоэнкодер — класс нейронных сетей, позволяющий решать задачи «обучения без учителя». Понимается, что сеть состоит из двух частей: энкодер и декодер. Количество выходных нейронов данной сети должно быть тождественно количеству входных. Основная задача сети: получить на выходе отклик максимально близкий ко входу. Используется следующее граничное условие: количество нейронов на внутреннем слое должно быть меньшим, чем количество входных нейронов. Таким образом, сеть учится искать корреляции между входными признаками и сжимать

входные данные, это называется «внутреннее представление». На вход также можно передавать данные со сверточных слоев, подобный класс называется «сверточный автоэнкодер». Обычно автоэнкодеры используют для следующих целей: аналог метода главных компонент для понижения размерности данных, очистка данных от шума.

ПРОЦЕСС ОБУЧЕНИЯ

Выборка данных для обучения и тестирования автоэнкодера сформирована с помощью программного обеспечения CORSIKA [Heck, 1998] и состоит из 25 тыс. модельных пар из симуляций сигнала (дорожек) и наложенного на него шума (измеренного на Tunka-Rex) с увеличением частоты дискретизации в 16 раз (1 отсчет = 0.3125 наносекунды).

Автоэнкодер принимает на вход последовательность из 4096 отчетов. Сигнал ШАЛ расположен в центре дорожки с возможным отклонением ± 100 наносекунд. Структурно сеть состоит нескольких кодирующих и несколько декодирующих слоев. Для выбора наиболее подходящей конфигурации было создано более 20 различных архитектур сетей, они отличались количеством слоев, способами субдискретизации. Итоговая структура сети: энкодер, состоящий из трех сверточных слоев, на каждом последующем слое количество фильтров увеличивается с 4 до 16, декодер симметричен. Для получения обученной модели используется программа, на вход которой подается пара массивов, содержащих дорожки с шумом и без. Полученную модель можно использовать в программе для очистки подготовленных дорожек с шумом, входные параметры: массив с зашумленными дорожками, используемая модель. Для оценки нейросети создается таблица, содержащая данные по истинному и восстановленному положению пика сигнала, истинной и восстановленной амплитуде. На основе этой таблицы можно построить необходимые оценки. Для использования нейросети в процессе восстановления, используется ПО, которое позволяет автоматически получать данные для очистки из программы Offline [Abreu, 2011] и передавать их обратно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проверка автоэнкодера на моделированных и реальных данных показала возможность его применения для выделения сигнала ШАЛ при высоком уровне шума. Автоэнкодер успешно удаляет шумовую составляющую, которая превышает амплитуду импульса ШАЛ. В настоящее время мы работаем над повышением эффективности работы автоэнкодера и внедрением его в систему обработки данных Tunka-Rex.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика выделения импульсов КЛ на фоне шума с использованием автоэнкодера показала свою работоспособность на моделированных и реальных данных.

Практические перспективы связаны с использованием для обработки данных радиодетектора КЛ с целью снижения амплитудного порога, а в случае использования высокопроизводительного оборудова-

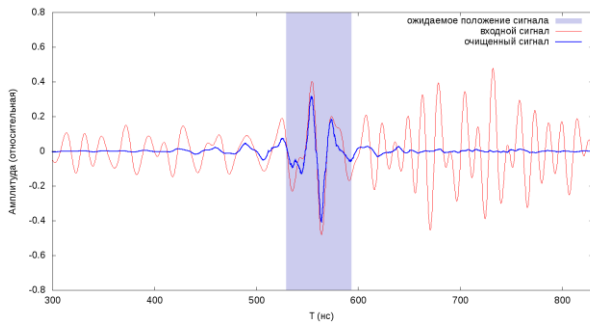


Рис. 2. Результат обработки реальной сигнальной дорожки автоэнкодером. Как можно видеть, высокоамплитудная помеха сразу за импульсом успешно удалена

ния для обработки данных в реальном времени — для реализации независимого триггера для радио. Кроме того, на эксперименте Tunka-21cm[21cm], нацеленном на исследование космологического радиоизлучения, мы планируем использовать автоэнкодер для решения обратной задачи — выделения дорожек с ШАЛ-подобными сигналами для последующего удаления их из исследуемой выборки. В дальнейшем мы планируем провести детальное исследование влияния архитектуры нейросети на эффективность и точность восстановления первичного радиоимпульса и параметров ШАЛ.

Данная работа поддержана грантами РФФИ №18-32-00460 и № 18-32-20220, а также грантом ФГБОУ ВО ИГУ № 091-18-215

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буднев Н.М., Иванова А.Л., Калмыков Н.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79, № 3. С. 430.
- Askaryan G.A. // Sov. Phys. JETP. 1961. V. 14. P. 441.
- Barwick S.W., et al. Design and Performance of the ARIANNA Hexagonal Radio Array Systems. arXiv:1410.7369, 2014.
- Gorham P.W., et al. The Antarctic Impulsive Transient Antenna ultra-high energy neutrino detector: Design, performance, and sensitivity for the 2006–2007 balloon flight // Astroparticle Physics. 2009. V. 32. P. 10–41.
- Krömer O., et al. (LOPES Collaboration), New Antenna for Radio Detection of UHECR // Proc. of the 31st ICRC, Łódź, Poland. 2009. N 1232. URL: <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/html>.
- Prosin V.V., et al. // EPJ Web Conf. 2015. V. 99, N 04002.
- Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N., et al. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive AirShowers, Report FZKA 6019, Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, 1998.
- Abreu P., et al. Nucl.Instrum. Meth. 2011. V. 92. A635. P. 1101.4473.
- URL: <http://tunka-21cm.astroparticle.online> (дата обращения: 4.05.2019).