

Определение направления ШАЛ по данным TAIGA HiSCORE с помощью полносвязных нейросетей

*Ю.Ю. Дубенская¹, А.П. Крюков¹, С.П. Поляков¹, А.А.
Власкина¹, П.А. Волчугов¹, Е.О. Гресь^{1,2}, А.П.
Демичев^{1,1}, Д.П. Журов^{1,2}, Е.Б. Постников¹
¹ – НИИЯФ МГУ, ² – НИИПФ ИГУ*

*Работа выполнена при поддержке Российского научного
фонда (грант № 24-11-00136)*

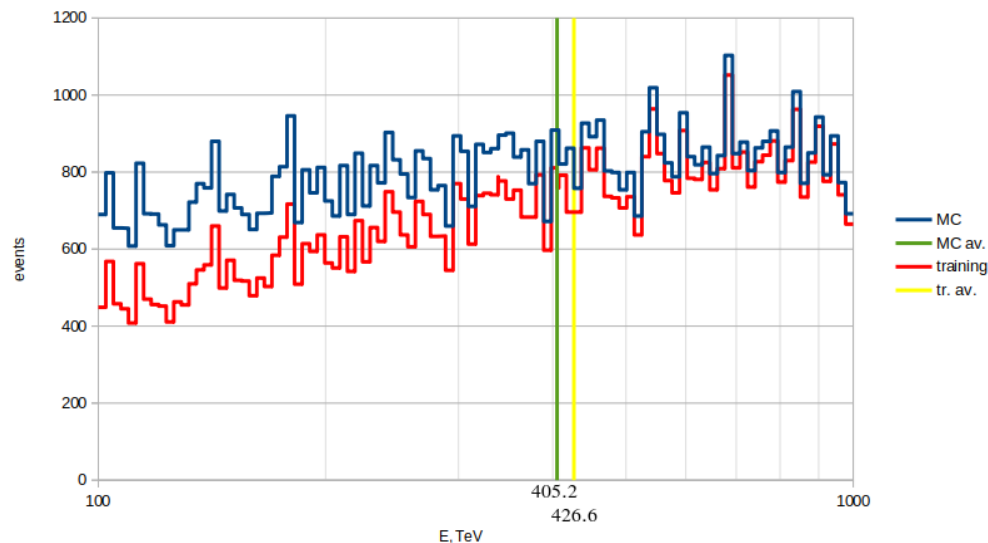
Изучение космических лучей высоких энергий возможно посредством анализа характеристик порождаемых ими широких атмосферных ливней (ШАЛ). ШАЛ могут наблюдаться посредством наземных телескопов и другие видов детекторов, регистрирующих черенковское излучение.

Рассматриваемая задача состоит в определении направления оси ШАЛ по данным черенковских широкоугольных детекторов NiSCORE эксперимента TAIGA. Около 100 таких детекторов распределены по площади $\sim 1 \text{ км}^2$ и регистрируют время прихода сигнала с наносекундной точностью, а также его амплитуду.



Для обучения нейросетей использовались данные станций HiSCORE, смоделированные методом Монте-Карло для ШАЛ, в которых первичной частицей является гамма-квант. Исключены события с менее чем 10 сработавшими станциями.

Зенитные углы θ осей смоделированных ШАЛ находятся в диапазоне от 30° до 40° , азимутальные углы φ — от -60° до 60° .



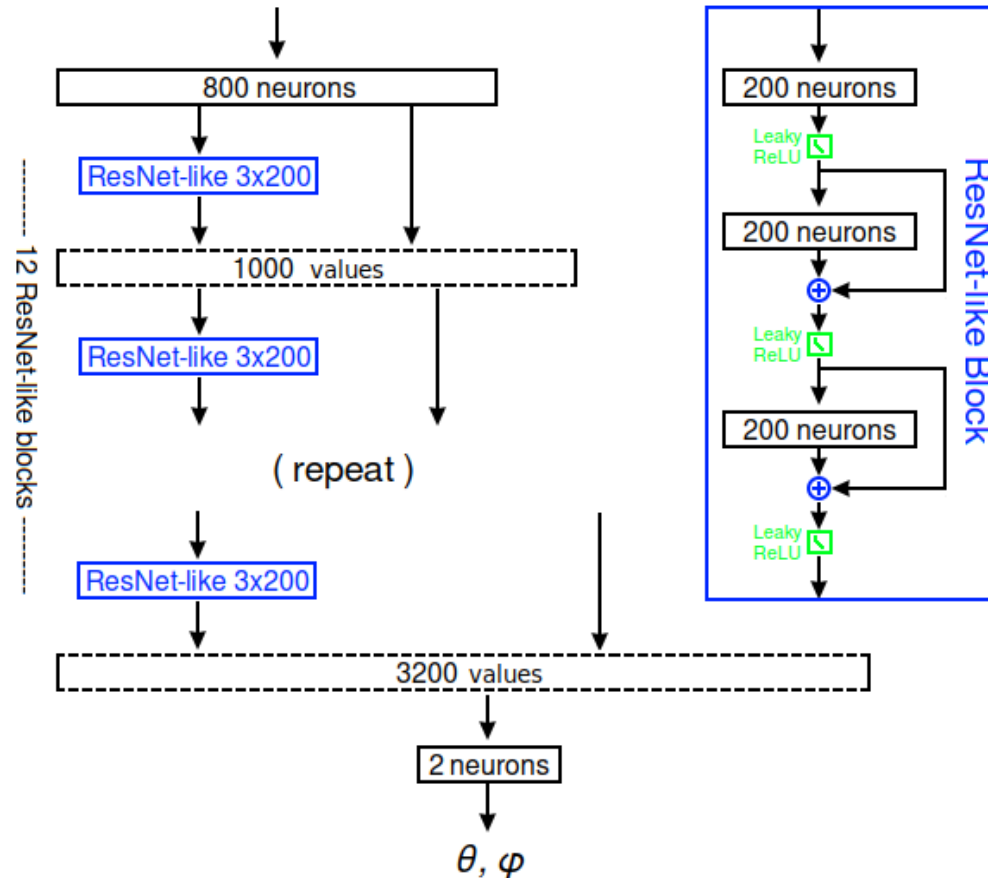
Распределение и средние значения энергии для исходной выборки событий, сгенерированной методом Монте-Карло, и обучающей выборки.

Для определения направления ШАЛ используются полносвязные нейросети, на вход которым подаются данные от фиксированного числа K станций HiSCORE: время регистрации сигнала, координаты станций и амплитуды.

Станции выбираются случайно из числа зарегистрировавших сигнал выше порогового уровня и упорядочиваются по времени. В качестве точки отсчета берется первая из выбранных станций, поэтому на вход нейросети подаются $5K-4$ значений.

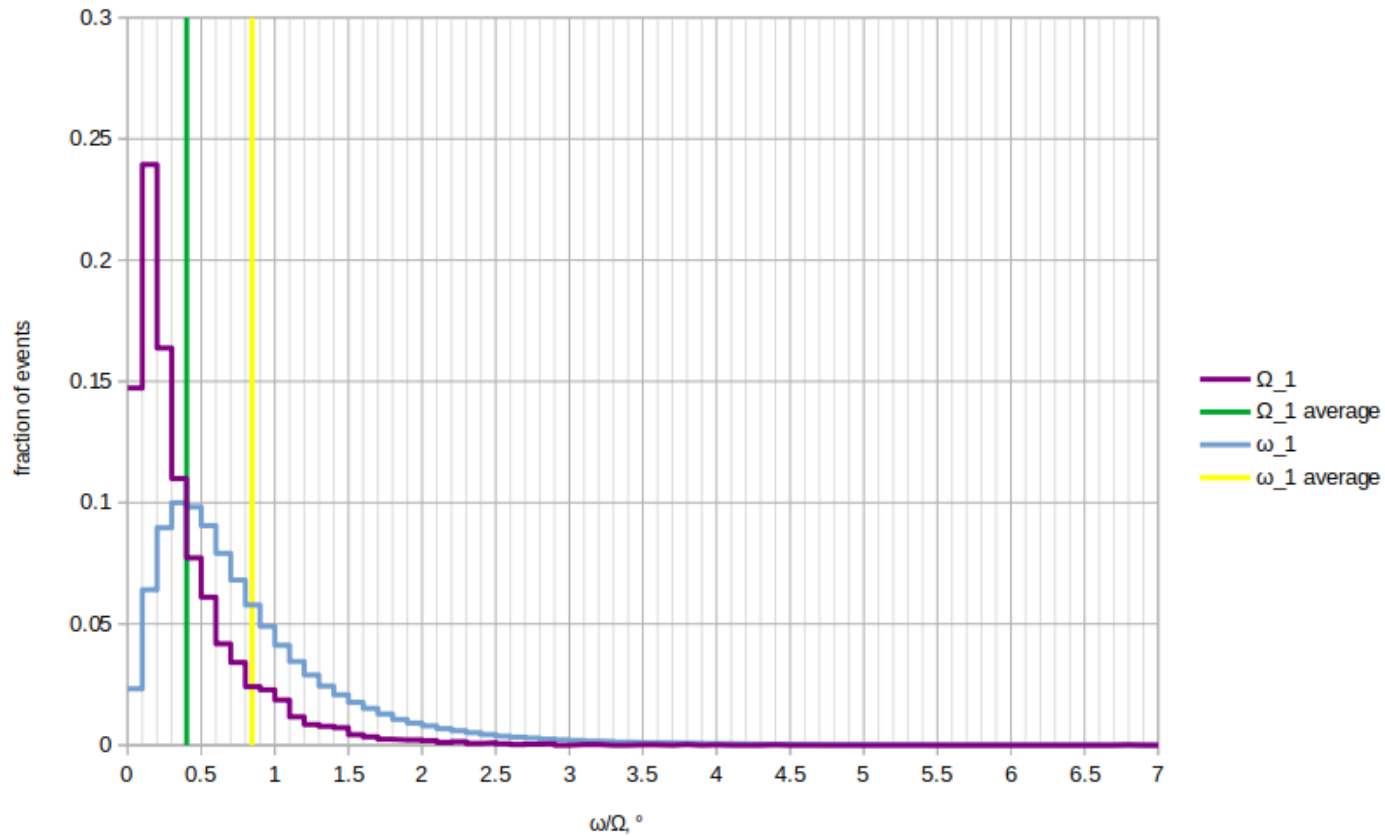
Первая нейросеть использует $K=8$. Сеть имеет 37 скрытых слоев, для предотвращения проблемы исчезающих градиентов используются подходы, аналогичные DenseNet и ResNet: конкатенация и арифметическое прибавление к выходным значениям промежуточных слоев значений, полученных в предыдущих слоях. Число весов сети около 5,56 млн. Два выходных значения соответствуют углам θ и φ .

Архитектура первой нейросети



Первая нейросеть обучена в течение 1000 эпох на 866 тысячах восьмерок, отобранных из 68256 событий обучающей выборки. В качестве функции потерь использовался $\sin^2\omega$, где ω — угол между направлением оси ШАЛ (θ_0, φ_0) и определенным сетью направлением (θ, φ) .

Для получения более точных оценок направления ШАЛ для тестовой выборки выбиралось большое число восьмерок станций (по 120 для всех событий с хотя бы 11 сработавшими станциями), для них строились отдельные оценки, и итоговая оценка (θ_1, φ_1) для каждого события вычислялась как взвешенная медиана оценок θ и φ для отдельных восьмерок.



Распределение ошибок оценок по отдельным восьмеркам (ω_1) и медианных оценок (Ω_1).
 Средние значения: $\langle \omega_1 \rangle = 0,846^\circ$, $\langle \Omega_1 \rangle = 0,401^\circ$.

Полученные оценки направлений можно уточнить. Для этого координаты станций проецируются на плоскость, перпендикулярную найденному направлению оси ливня (θ_1, φ_1) , и для спроецированных станций заново вычисляется время прихода сигнала.

Вторая нейросеть обучается по данным спроецированных станций оценивать необходимые поправки к (θ_1, φ_1) .

Нейросеть для уточнения оценок имеет схожую архитектуру с первой нейросетью, но имеет 46 входных значений (используются десятки станций вместо восьмерок), 61 скрытый слой и около 12,44 млн весов. Два выходных значения интерпретируются как поправки $\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$ к соответствующим углам.

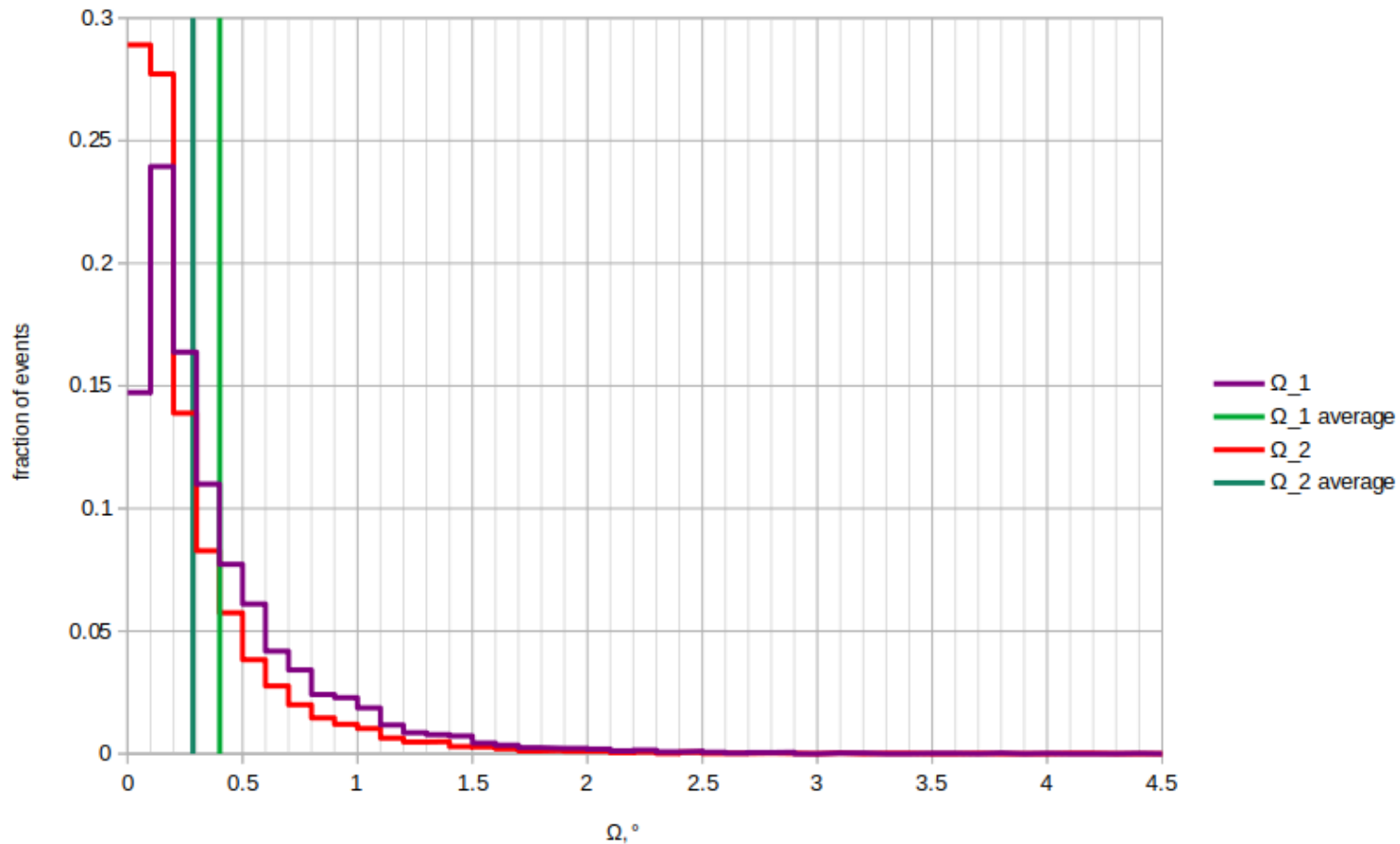
Для обучающей выборки второй сети направления (θ_1, φ_1) нормальных векторов к плоскости проекции выбирались случайно, что позволило создать из тех же 68256 событий обучающую выборку размером около 42,4 млн десятков. Нейросеть обучалась в течение 40 эпох с функцией потерь $(\Delta\theta)^2 + \sin^2\theta_1 (\Delta\varphi)^2$.

Для событий тестовой выборки в качестве (θ_1, φ_1) использовались направления, определенные первой нейросетью. Как и для первой нейросети, выбиралось большое число десятков станций (100 либо все возможные подмножества, если их менее 100) и итоговые поправки $(\Delta\theta_2, \Delta\varphi_2)$ вычислялись как взвешенные медианы поправок для отдельных десятков.

Результаты

Углы Ω_1 между направлениями оси ШАЛ (θ_0, φ_0) и полученными с помощью первой нейросети медианными направлениями (θ_1, φ_1) имеют среднее значение $0,401^\circ$, среднее квадратическое $0,574^\circ$, медиану $0,265^\circ$.

Углы Ω_2 между направлениями оси ШАЛ и полученными с помощью двух нейросетей направлениями $(\theta_1 + \Delta\theta_2, \varphi_1 + \Delta\varphi_2)$ имеют среднее значение $0,284^\circ$, среднее квадратическое $0,437^\circ$, медиану $0,168^\circ$.



Распределение и средние значения углов Ω_1 и Ω_2

Заключение

Нами продемонстрирована возможность использования полносвязных нейронных сетей для получения оценок направления широких атмосферных ливней с достаточно высокой точностью: средняя ошибка определенного направления около 0.4° при использовании одной нейросети, менее 0.3° при последовательном использовании двух нейросетей.