Спектрально-графовый метод подавления шумов в Baikal-GVD

Александр Аврорин от коллаборации Baikal-GVD
ИЯИ РАН

1. Мотивация

В темпах счета регистрирующих каналов Baikal-GVD доминирует шум, обусловленный в основном фоновым свечением воды озера. Для восстановления зарегистрированных мюонныых траекторий по черенковским импульсам шумовые срабатывания ФЭУ должны быть подавлены. В этой работе представлен метод, развивающий текущий алгоритм шумоподавления [1], и устраняющий его недостатки: в частности, снижение эффективности отбора черенковских импульсов для высоких энергий мюонов и существенное увеличение времени работы для периодов с повышенным уровнем шума.

Рис. 1. Динамика шумовых темпов счёта на гирлянде Baikal-GVD, Апрель 2024 - Апрель 2025

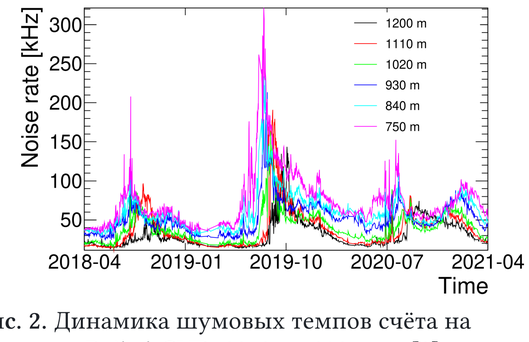


Рис. 2. Динамика шумовых темпов счёта на гирлянде Baikal-GVD, 2019 по 2021 год [2] .

2. Условие направленной причинности

Для заданного направления мюона $\boldsymbol{\mu}$, разность времён прихода прямых черенковских фотонов на оптические модули i и j будет лежать в окне, определяемом продольным Δz_{ij} и поперечным R_{ij} расстояниями между оптическими модулями [3]:

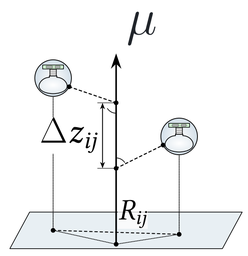


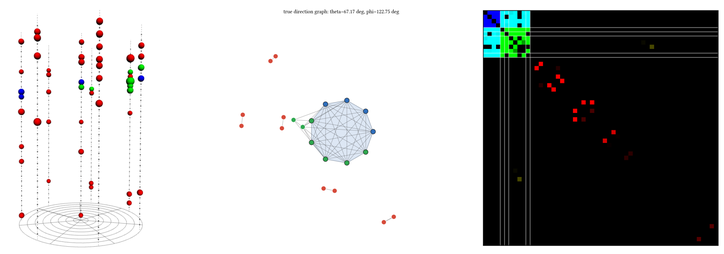
Рис. 3. Схема для (1)

$$\Delta t_{ij} \in \left[\frac{-KR_{ij} - \Delta z_{ij}}{c} - \tau, \frac{KR_{ij} - \Delta z_{ij}}{c} + \tau\right], R_{ij} < R_{max} \quad (1)$$

Здесь τ - окно причинности, включающее в себя ожидаемую ошибку измерения, K - константа, определяемая углом черенковского конуса, а R_{max} - длиной поглощения.

3. Графы причинности

Отклику телескопа можно сопоставить граф, вершины которого соответствуют зарегистрированным импульсам, а рёбра - парам импульсов, удовлетворяющим (1). Граф параметризуются матрицей смежности A, где $A_{ij} = 1$ если между вершинами i и j есть ребро, и $A_{ij} = 0$ в противном случае.



а) б) в)

Рис. 4. а) МК событие от восходящего атмосферного нейтрино, красным обозначены каналы, сработавшие от шумов, синим - от мюона, зелёным - от каскадов сопровождения; б) граф причинности события для истинного направления; в) матрица смежности графа, цветные ячейки соответствуют ненулевым элементам A.

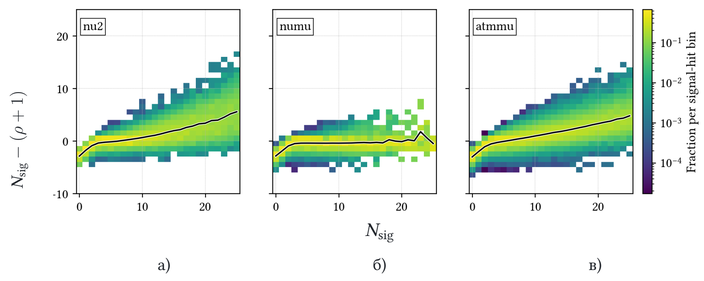
Мы определяем $\boldsymbol{\mu}^*$ как направление, для которого число Перрона ρ, определяемое как максимальное по модулю собственное значение $A(\boldsymbol{\mu})$, - максимально:

$$\boldsymbol{\mu}^* = \arg\max_{\boldsymbol{\mu}} \rho(A(\boldsymbol{\mu})) \quad (2)$$

Собственный вектор $\boldsymbol{v}$, соответствующий ρ, называется вектором Перрона. Согласно спектральной теории графов [4], $\rho > 0$, $\boldsymbol{v}$ единственнен, а координаты v_i вещественны и имеют общий знак.

4. Оценка множественности события

Получив $A(\boldsymbol{\mu}^*)$, мы можем использовать $\rho(A(\boldsymbol{\mu}^*))$ для оценки числа черенковских импульсов N_{sig}ещё до того, как определили какие из импульсов - шум. Как видно на Рис. 5, для событий с $N_{sig} \leq 12$, $\rho \approx N_{sig} - 1$. Это позволяет использовать разные механизмы шумоподавления для событий с низкой ($\rho \leq 12$) и с высокой ($\rho > 12$) множественностью, независимо от уровня шума.



а) б) в)

Рис. 5. Невязка оценки N_{sig} по ρ для событий от а) астрофизических нейтрино, б) атмосферных нейтрино и в) атмосферных мюонных групп.

5. Отбор импульсов

Располагая графом причинности для направления $\boldsymbol{\mu}^*$, для каждого импульса k можно вычислить рейтинг s_k. Если s_k ниже заданного порога T, то импульс считается шумовым. Порог по ρ позволяет комбинировать условия для s_k, которые оптимальны только для низкой, либо только для высокой множественности.

Низкая множественность: $\rho \leq 12$

$$s_k^L = v(B)_k, B_{ij} = \begin{cases} \left(A^2 - P^2\right)_{ij}, & i \neq j, \\ \sum_j A_{ij} - \sum_j P_{ij}, & i = j. \end{cases} \quad (3)$$

Высокая множественность: $\rho > 12$

$$s_k^H = \frac{\sum_j (A^2)_{ik} - \alpha \sum_j (P^2)_{ik}}{N_{\text{hit}}} \quad (4)$$

Здесь,

- α - константа, параметр шумоподавления.
- N_{hit} - число импульсов в событии.
- $P_{ij} = 1 - e^{W_{ij}(\lambda_i + \lambda_j)}$ - мат. ожидание A от шума.
- λ_i - шумовой темп счёта на канале с импульсом i
- W - матрица временных окон, полученных из (1)

6. Алгоритм

1. Входные данные

- Отклик телескопа
- Шумовые темпы счёта для каждого канала
- Параметр α
- Пороговые значения рейтинга импульса в режимах малой и высокой множественности.

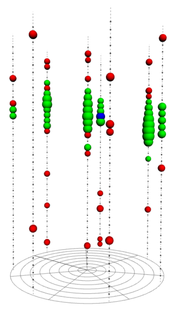


Рис. 6. Пример отклика телескопа на восходящий мюон. Энергия 94 ТэВ, $\theta = 49°$.

2. Определение направления мюона

Определяется направление $\boldsymbol{\mu}^*$, для которого число Перрона соответствующего графа причинности максимально.

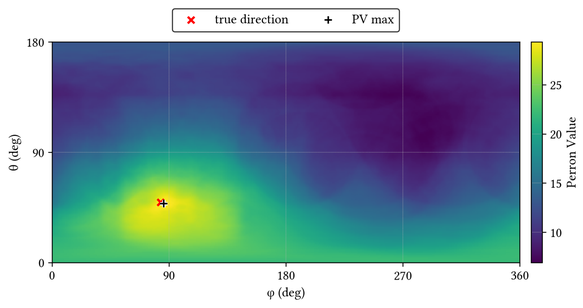


Рис. 7. Скан числа Перрона по небу для события, приведённого на Рис. 1. Расхождение между $\boldsymbol{\mu}^*$ и истинным направлением мюона составляет $4°$

.

3. Отбор импульсов

- Строится граф причинности $A(\boldsymbol{\mu}^*)$
- По $\rho(A(\boldsymbol{\mu}^*))$ выполняется оценка множественности события.
- Для каждого импульса расчитывается рейтинг: $s_k^L(A(\boldsymbol{\mu}^*))$ в режиме низкой множественности, $s_k^H(A(\boldsymbol{\mu}^*))$ в режиме высокой множественности.
- Импульсы со значением рейтинга ниже порога обозначаются как шумовые.

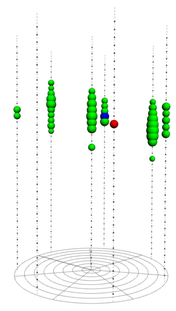


Рис. 8. Событие, представленное на Рис. 1, после отсева шумовых импульсов.

7. Результаты

Для анализа работы разработанной методики использовалась конфигурация телескопа 2019 года со средним темпом счёта шумов 30 кГц и следующими наборами данных моделирования:

- Астрофизические нейтрино: восходящие мюонные нейтрино со спектром E^{-2}
- Восходящие атмосферные мюонные нейтрино.
- Нисходящие группы атмосферных мюонов.

Отобраны события с не менее чем 8 черенковскими импульсами на не менее чем 3 гирляндах.
На Рис. 9 и 10 представлены итоговые характеристики шумоподавления. Для оценки качества отбора импульсов используются:

- Чистота P - процент черенковских импульсов среди всех импульсов события, прошедших отбор.
- Эффективность E - процент черенковских импульсов прошедших отбор, относительно всех черенковских импульсов события.

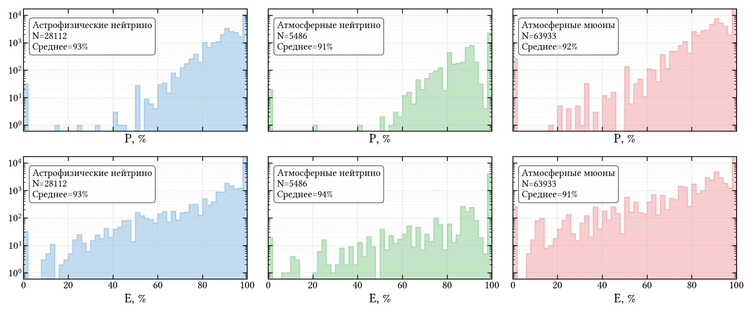


Рис. 9. Распределение чистоты и эффективности шумоподавления для разных наборов данных моделирования.

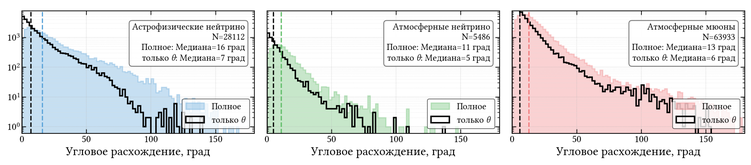


Рис. 10. Угловое расхождение между $\boldsymbol{\mu}^*$ и истинным $\boldsymbol{\mu}$.

Полученная средняя эффективность для астрофизических нейтрино и мюонных групп превышает значения из [1], составляющие 74% и 79% соответственно, в то время как средняя чистота упала с 98% до 93%. Для атмосферных нейтрино показатели [1] составляли $P = 95\%$, $E = 95\%$. Обработка события с ≤ 300 импульсами на видеокарте занимает менее $500\mu c$ и в среднем менее 50 мс на процессоре; для метода [1] время обработки одного события могло составлять больше минуты в зависимости от числа импульсов и морфологии отклика телескопа.

8. Заключение

1. Для Baikal-GVD разработан новый метод шумоподавления, позволяющий получить прирост в эффективности сбора импульсов для астрофизических событий и событий от мюонных групп на 20%.
2. На GPU обработка большинства событий составляет $< 500\mu s$
3. Медианная точность определения направления мюона составила $\sim 15°$, зенитного угла $5 - 7°$

9. Список литературы

[1]. V. A. Allakhverdyan et al. (Baikal-GVD Collaboration), *An efficient hit finding algorithm for Baikal-GVD muon reconstruction*, PoS(ICRC2021) 1063, 2021, doi:10.22323/1.395.1063.

[2]. A. D. Avrorin et al. (Baikal-GVD Collaboration), *The optical noise monitoring systems of Lake Baikal environment for the Baikal-GVD telescope*, 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019), 2019, arXiv:1908.06509.

[3]. R. Bruijn, *The Antares Neutrino Telescope: Performance Studies and Analysis of First Data*, PhD thesis.

[4]. A. E. Brouwer and W. H. Haemers, *Spectra of Graphs*, Springer New York, 2012.