

УДК 681.883+551.48.03

ПРИБОР ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ КАСКАДНЫХ ЛИВНЕЙ, ОБРАЗОВАННЫХ НЕЙТРИНО СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

**Н.М. Буднев, А.А. Кочанов, Р.Р. Миргазов, А.А. Павлов,
Г.Л. Паньков, Л.В. Паньков**

THE INSTRUMENT FOR ACOUSTIC DETECTION OF CASCADE SHOWS GENERATED BY SUPER HIGH ENERGY NEUTRINO

**N.M. Budnev, A.A. Kochanov, R.R. Mirgazov, A.A. Pavlov,
G.L. Pankov, L.V. Pankov**

Приводится описание прибора, предназначенного для поиска акустических сигналов от каскадных ливней, образованных нейтрино сверхвысокой энергии. Прибор предназначен для стационарной постановки на буйковой станции над Байкальским нейтринным телескопом NT200+.

The instrument for detection of acoustic signals from high energy cascade showers generated with super high energy neutrino is presented. The instrument should be installed above the Baikal Neutrino Telescope NT-200+ for long term measurement.

Введение

Изучение природных потоков нейтрино сверхвысоких энергий является одной из наиболее актуальных задач астрофизики. Для их поиска необходимы установки с эффективным объемом существенно больше, чем кубический километр. Потенциально возможный метод детектирования – регистрация акустических сигналов от каскадных ливней, которые возникают при взаимодействии нейтрино со средой [1, 2]. Основной трудностью является выделение сигналов от ливней из акустического фона, создаваемого другими источниками.

Модуль для поиска акустических сигналов от нейтрино сверхвысоких энергий

В рамках терморрадиационного механизма каскадные ливни, возникающие при взаимодействии нейтрино с водой, должны порождать биполярные акустические импульсы с длительностью порядка 30–50 мкс. Основная доля энергии акустического сигнала должна быть сосредоточена в пределах диска с осью, совпадающей с осью ливня. Эти особенности сигналов могут быть использованы для их поиска. В качестве элементарной ячейки акустического детектора нейтрино целесообразно использовать приборы, позволяющие выделять сигналы заданной формы, которые могут быть интерпретированы в терминах плоской волны, порожденной квазилокальным источником. Для этого прибор должен иметь как минимум 4 распределенных в пространстве гидрофона. При оптимизации

геометрии расположения гидрофонов надо учитывать, что чем больше расстояние между гидрофонами, тем выше точность восстановления направления на источник, но и тем выше вероятность того, что сигналы, зарегистрированные разными гидрофонами, в действительности будут рождены разными источниками и будут только имитировать истинный сигнал. Результаты моделирования показали, что при расположении гидрофонов в вершинах пирамиды со стороной порядка 1 м можно получить точность восстановления направления прихода сигнала не хуже чем 1° и иметь приемлемую вероятность имитаций.

На рис. 1 представлена схема 4-канального прибора, который может рассматриваться как прототип элементарной ячейки будущего глубоководного акустического детектора нейтрино. Антенна прибора состоит из четырех гидрофонов, изготовленных на основе цилиндрической пьезокерамики ЦТС-19 с тангенциальной поляризацией (Hf1, 2, 3, 4), расположенных в вершинах правильной четырехгранной пирамиды с длиной ребра 1 м. Коэффициент усиления предварительных усилителей – (Preampl1, 2, 3, 4) не менее 40 дБ на частотах выше 2 кГц. Для подавления низкочастотных гидроакустических шумов усилители имеют частотную коррекцию с ослаблением около –20 дБ на декаду в области частот до 1 кГц. Ограничение высокочастотных составляющих спектра помех обеспечивается submodule ADM416x200. Подсистема сбора данных акустического детектора создана на базе

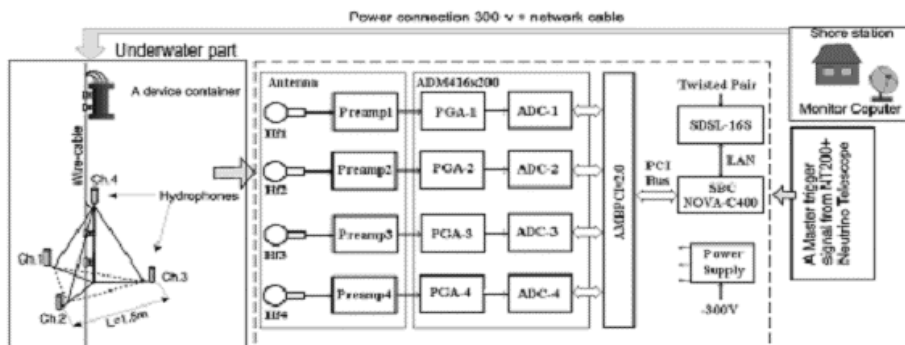


Рис. 1. Блок-схема прибора для акустической регистрации каскадных ливней.

встраиваемого одноплатного компьютера SBC NOVA-C400 и платы сбора данных. Последняя состоит из базового модуля аналогового ввода/вывода (AMBPCI v2.0), обеспечивающего связь с шиной PCI (PCI Bus), и submodule аналогового ввода (ADM416×200), который предназначен для исследования сигналов с амплитудами от 10 мкВ до 2.5 В в диапазоне частот 0÷100 кГц. Submodule ADM416×200 выполнен на четырех 16-разрядных дельта-сигма-АЦП AD7722 (ADC-1, 2, 3, 4) и содержит программно управляемые усилители с коэффициентами усиления 1-2-4-8 (PGA-1, 2, 3, 4). Для связи с внешним компьютером используется модем (SDSL-16S).

Прибор предназначен для стационарной постановки на буйковой станции на глубине порядка 200 м над Байкальским нейтринным телескопом NT200+ [3]. Для уменьшения акустического фона из верхней полусферы над гидрофонами будут установлены звукопоглощающие колпаки. Предусмотрено 3 режима работы:

1. Измерение статистических характеристик акустических шумов (математическое ожидание, дисперсия и т.д).
2. Выделение коротких биполярных импульсов, удовлетворяющих критериям принадлежности к акустической волне от квазилокального источника звука.
3. Набор данных по получению управляющего сигнала от NT200+. (Задача с максимальным приоритетом).

Методика выделения акустических сигналов от каскадных ливней

Для выделения акустических сигналов с заданными свойствами разработана программа, которая производит непрерывный поиск редких импульсов малой длительности ($\tau < 50 \mu s$) на фоне постоянного шума среды. Процедуру выделения сигналов из шума можно разделить на несколько этапов:

Статистическая обработка

Временные ряды блоками по N отсчетов в виде массивов данных $A_i(t)$ (где $I = 1 \dots N$) поступают с 4-х каналов на блок статистической обработки. На данном этапе рассчитываются математическое ожидание и смещенные оценки дисперсии исследуемого временного ряда:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i(t) - \text{математическое ожидание исследуемого временного ряда}$$

$$D_{\text{int}} = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (x_i - y_i)^2, \quad D_{\text{ext}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - M)(y_i - M),$$

$$D_{\text{tot}} = D_{\text{int}} + D_{\text{ext}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i(t) - M)^2,$$

где $x_i = A_{2i-1}$; $y_i = A_{2i}$; $N = 2m$; D_{int} – собственная дисперсия (позволяет контролировать качество работы аппаратуры); D_{tot} – полная дисперсия (служит для контроля шумов окружающей среды). На этом этапе обработки происходит оценка окружающего акустического фона. Поиск коротких

импульсов осуществляется в относительно спокойные промежутки времени, когда дисперсия мала.

Выделение сигналов в 4-канальном режиме

Программа на основе рассчитанных статистических характеристик и выставленных порогов производит поиск сигналов. При превышении порога срабатывает алгоритм анализа предполагаемого сигнала-претендента. Вычисляются такие его параметры, как координаты сигнала во временном ряде (время начала, время конца), длительность, число смен знака амплитуды, максимальная амплитуда сигнала и т.д. Импульсы классифицируются по числу смен знака амплитуды, и информация о них записывается в соответствующие динамические массивы.

Фильтрация найденных сигналов по временному окну

Выбирается временное окно, равное времени прохождения акустического сигнала от одного гидрофона к другому:

$$\tau = \frac{L}{c_{\text{звука}}},$$

где L – расстояние между любыми двумя гидрофонами равно, 1.5 м; $c_{\text{звука}}$ – скорость звука в воде на глубине погружения акустического модуля.

Далее происходит выборка сигналов определенного типа из динамических массивов для каждого из 4-х каналов и проверка их на совпадение во временном окне. Таким образом фильтруются случайные импульсы, возникшие в одном из гидрофонов за счет интерференции волн, а также всевозможные помехи.

Определение направления до источника шума

Для 4-х импульсов, которые удовлетворяют условию временного окна, определяется направление на источник. Для этого строится функционал

$$S = \sum_{i=1}^4 [t_i - t_i^{\text{изм}}]^2 \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad t_i = t_0 + (\vec{r}_i - \vec{r}_0) \vec{n},$$

где $(t_1^{\text{изм}}, t_2^{\text{изм}}, t_3^{\text{изм}}, t_4^{\text{изм}})$ – измеренные «времена старта» импульсов в 4-х каналах; \vec{r}_0 – положение центра антенны в выбранной системе координат; t_0 – момент прохождения звуковой волны через точку \vec{r}_0 ; σ_i^2 – ошибка измерения времени прихода импульса; \vec{r}_i – координаты гидрофонов в выбранной системе координат, рассчитанные по маякам; $\vec{n}(\theta, \varphi)$ – единичный вектор нормали к фронту звуковой волны.

Процедура нахождения направления θ, φ сводится к минимизации функционала $S(\theta, \varphi)$.

Также по распределению значений $S(\theta, \varphi)$ фильтруются сигналы, не удовлетворяющие геометрии антенны.

Результаты

В апреле 2005 г. проведены испытания прибора в природных условиях на озере Байкал. Измерения проводились на глубине 100 м в пределах ледового лагеря Байкальской комплексной экспедиции. В результате эксперимента зарегистрировано большое

число коротких акустических импульсов различной формы. Получено дифференциальное распределение их углов прихода. Предварительный анализ показывает, что, как и следовало ожидать, подавляющая часть импульсов приходит из верхней полусферы, т.е. их источники находятся на поверхности озера или на небольшой глубине. Незначительное количество импульсов приходит из нижней полусферы, но под углами не более 15° к горизонту. Эти сигналы также могли быть рождены в поверхностной зоне, но изменили направление своего движения за счет рефракции (рис. 2). В течение 20 ч тестовых измерений не зарегистрировано ни

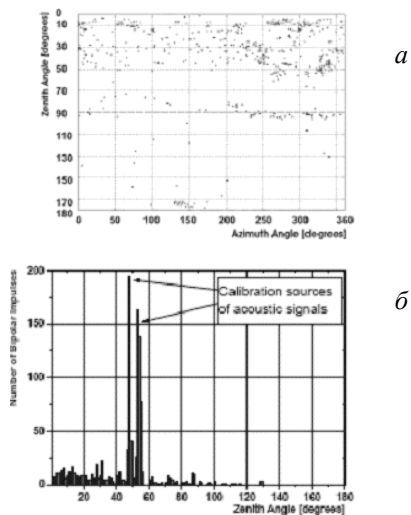


Рис. 2. Распределение направления на источники импульсов: *a* – распределение всех зафиксированных импульсов; *б* – распределение зенитного угла для биполярных импульсов.

одного акустического сигнала, пришедшего из нижней полусферы под углом более 20° к горизонту.

В 2006 г. планируется стационарная постановка прибора для совместной работы с глубоководным Байкальским нейтринным телескопом НТ200+ сроком на один год. Следующим шагом будет создание сети антенн для акустического детектора.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ, Федерального агентства по образованию РФ, Министерства науки и образования Германии, Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 02-02-17427, 03-02-310011, 04-02-31003, 04-02-31006, 05-02-16593), Программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 4006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Askarian G.A., Dolgoshein B.A., Kalinovsky A.N., Mokhov N.V. Acoustic detection of high energy particles showers in water // Nucl. Instr. and Methods. 1979. V. 164, N 2. P. 267–278.
2. Learnd J.G. Acoustic radiation by charged atomic particles in liquids: Ananalysis // Phys. Rev. D. 1979. V. 19. P. 3293–33036.
3. Ainutdinov V. et al. The Baikal neutrino project: status, results and perspectives // Nucl. Phys. B. 2005. V. 143. P. 335–342.