



Метод обработки сигналов гидроакустической регистрации нейтрино сверхвысоких энергий

Бецис Дарья, студентка 5 курса,
кафедра общей ядерной физики,
физический факультет МГУ

Астрофизика нейтрино

Нейтрино - нейтральные лептоны (ν_e ν_μ ν_τ) :

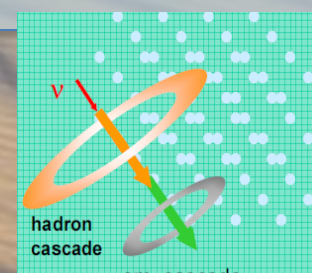
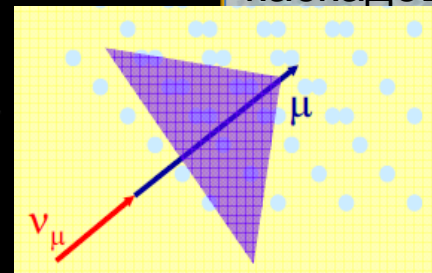
- слабое взаимодействие,
- диапазон энергий – от кэВ до 10^{21} эВ,
- сечение: $\sim 10^{-43}$ см²
- различное происхождение

Глубоководные телескопы:

использование черенковского излучения в воде.

Альтернативные методы:

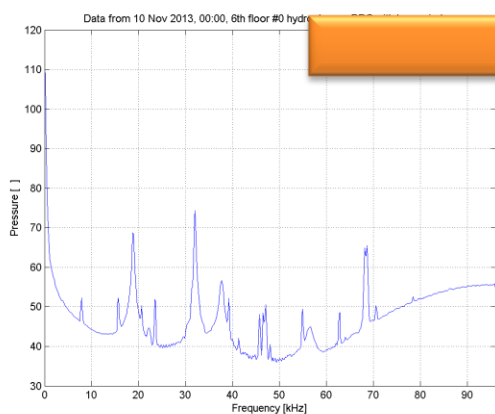
- Гидроакустика
- Регистрация в радио-диапазоне
- Регистрация горизонтальных каскадов



Глубоководные телескопы

Роль акустики: - позиционирование черенковских модулей
- нейтринные сигналы
- биология и сейсмология

- 1) Проблема выделения сигнала из шума (идентификация компонент фона, калибровка сенсоров, и пр.)
- 2) Определение точных характеристик сигнала (время прихода, направление => установление координат источника)
- 3) Соединение измерений, полученных разными методами



Повышение эффективности регистрации нейтрино

Фурье-анализ

Четыре формы преобразования Фурье

1. Ряд Фурье
2. Непрерывное преобразование Фурье
3. Дискретное преобразование Фурье
4. Дискретно-непрерывное преобразование Фурье

Достоинства:

- является ортогональным оператором, т.е. оператор обратного преобразования совпадает с выражением для комплексно-сопряженного оператора
- разработаны эффективные вычислительные процедуры
- область определения - пространство L_2 интегрируемых с квадратом - широкий класс функций

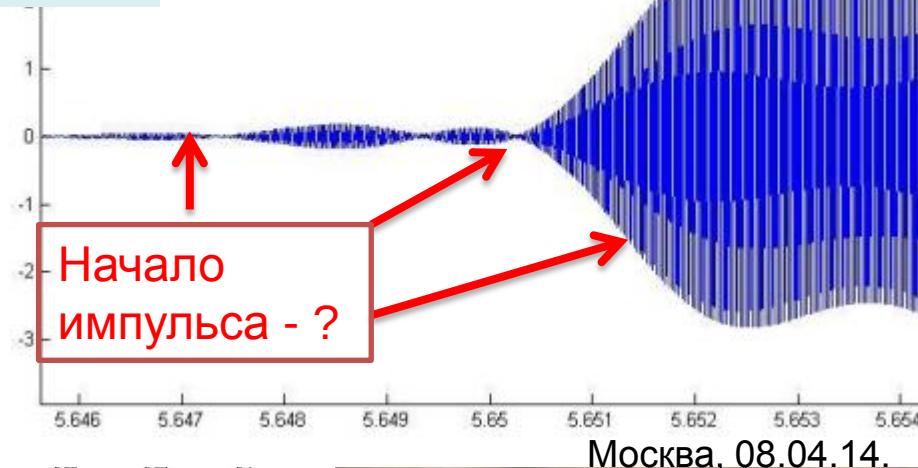
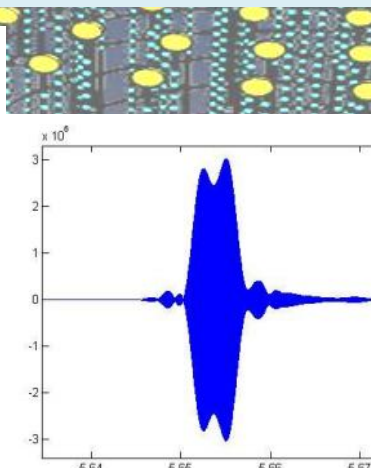
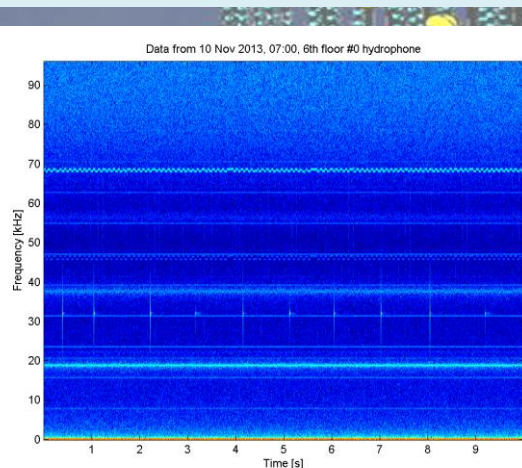
Акустический сигнал

Зависимость от времени

Зависимость от частоты

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega$$



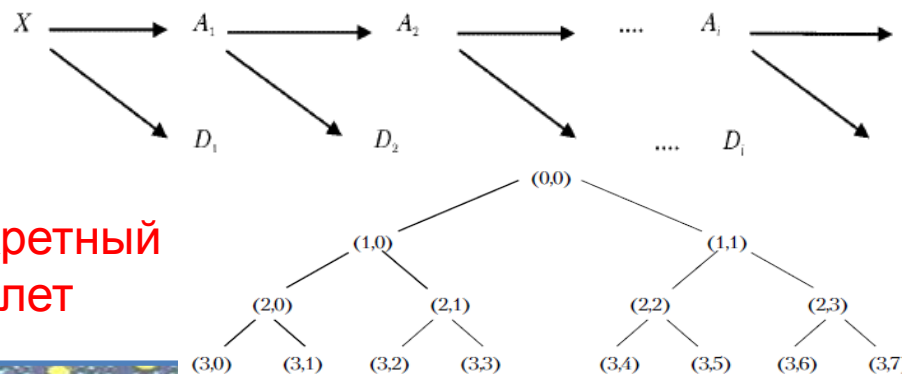
Вейвлет-анализ - альтернатива

- **Дискретное преобразование** - разложение сигнала на низкочастотную и высокочастотную составляющую

$$A_n = \sum_{k \in \mathbb{Z}} x_{2n-k} h_k \quad D_n = \sum_{k \in \mathbb{Z}} x_{2n-k} g_k$$

h, g - фильтры разложения,
 $\tilde{h}, \tilde{g}$ - фильтры восстановления

} **Дискретный вейвлет**



- **Непрерывное преобразование**

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

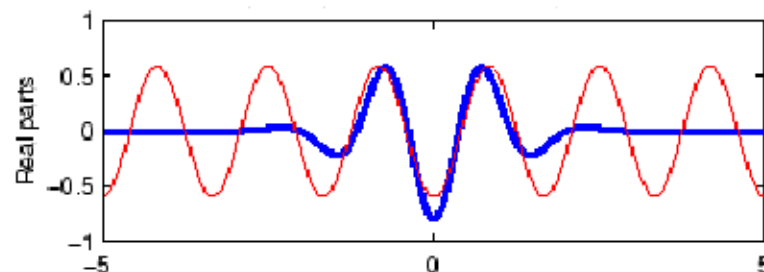
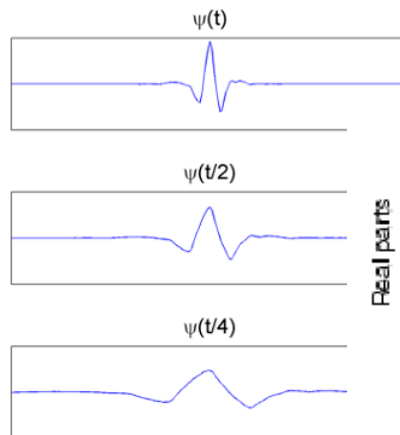
- **Материнский вейвлет**. Характеризуется: центральная частота, длительность носителя, форма и пр.
- **Дочерние вейвлеты**. Получаются сдвигом и масштабированием

Маленькие значения $a \Rightarrow$ "Сжатый" вейвлет $\Rightarrow$ Быстро меняющиеся детали $\Rightarrow$ Лучшее отображение высоких частот.

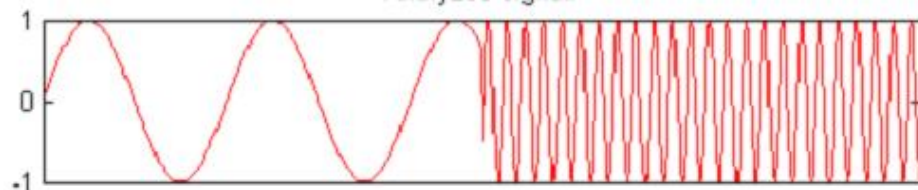
Большие значения $a \Rightarrow$ "Растянутый" вейвлет $\Rightarrow$ Медленно меняющиеся детали $\Rightarrow$ Лучшее отображение низких частот.

Подбор параметров – математические предположения, оценки, «вслепую»...

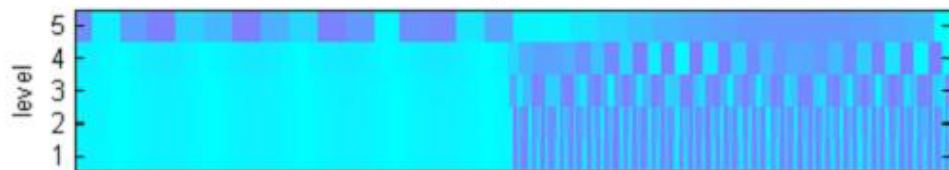
$$C_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt$$



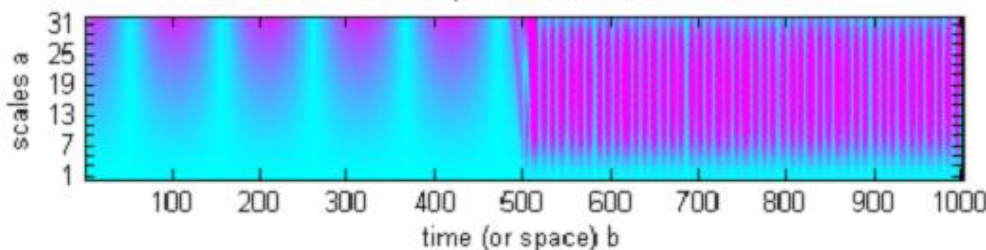
Analyzed signal.



Discrete Transform, absolute coefficients.



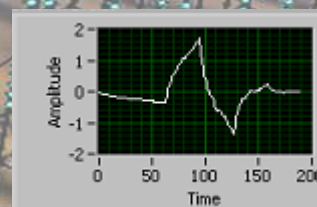
Absolute Values of $C_{a,b}$ Coefficients for $a = 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ \dots$



Частота с
наилучшим
откликом

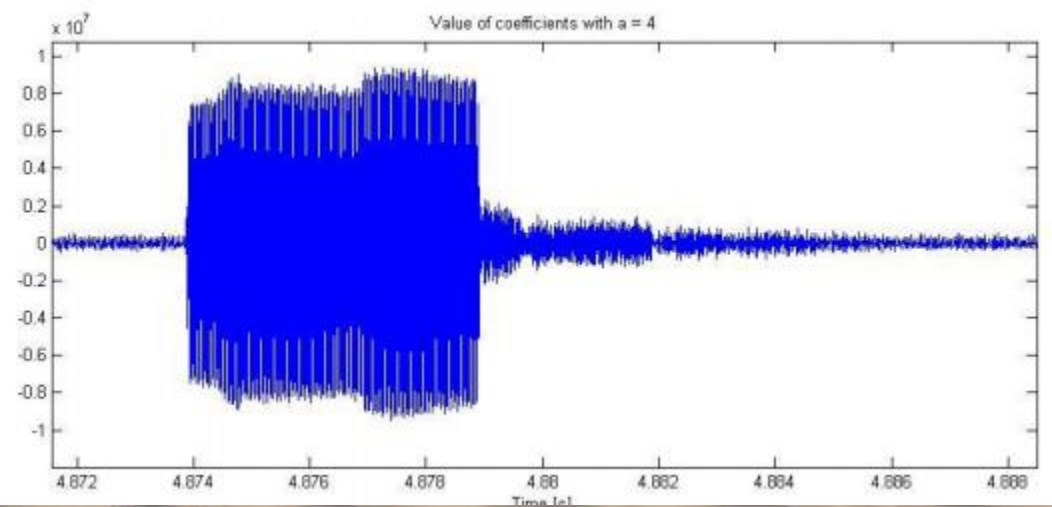
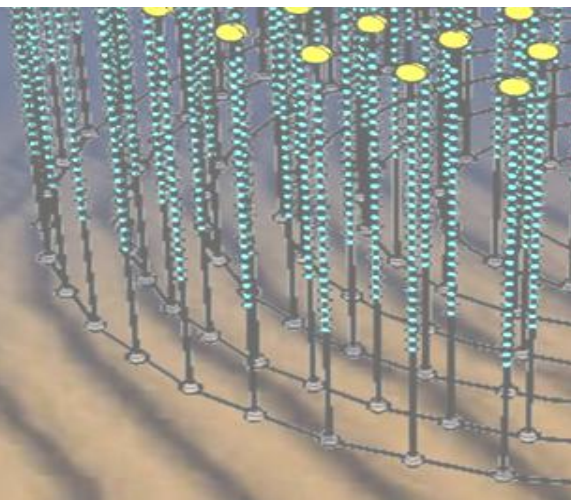
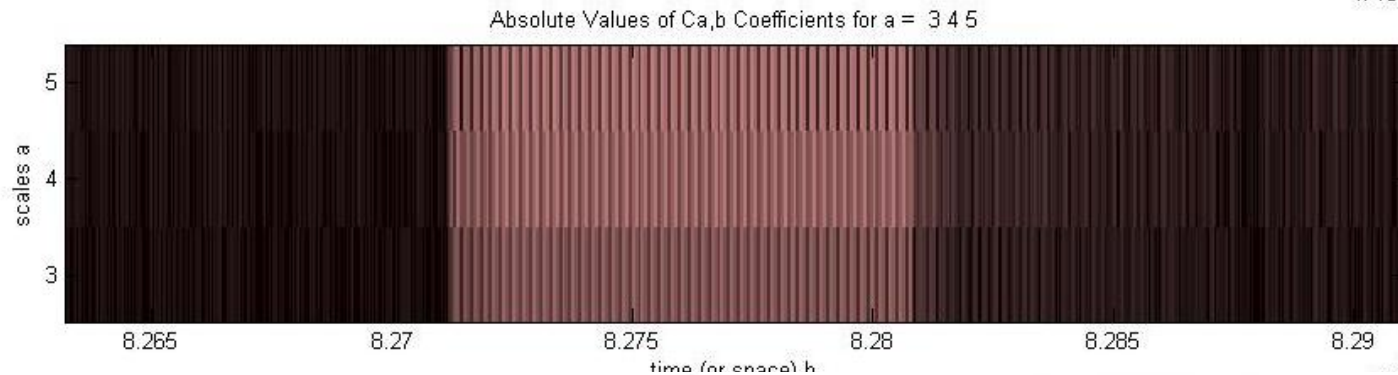
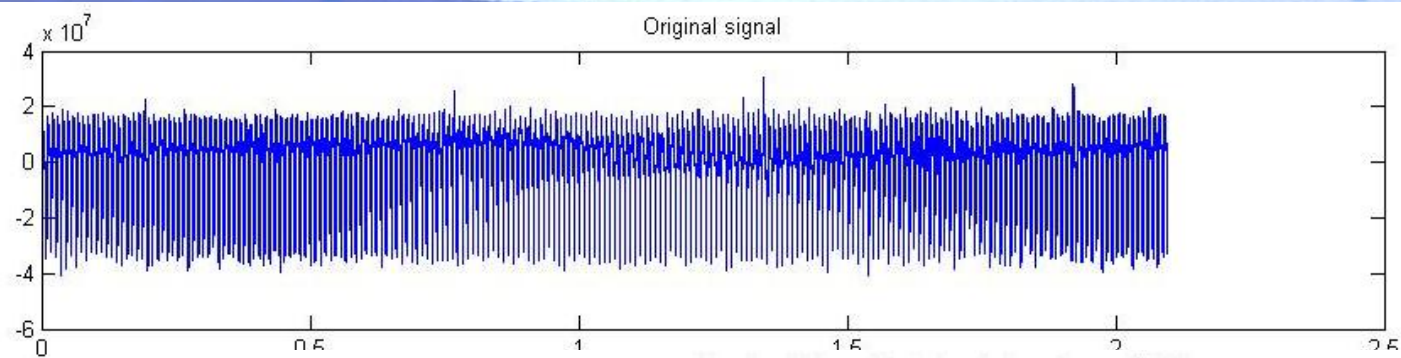
$$= \frac{F_c \cdot F_s}{a}$$

Пример: для акустического излучателя с частотой 32 кГц – вейвлет Добеши с $a=4$



0,667 Гц

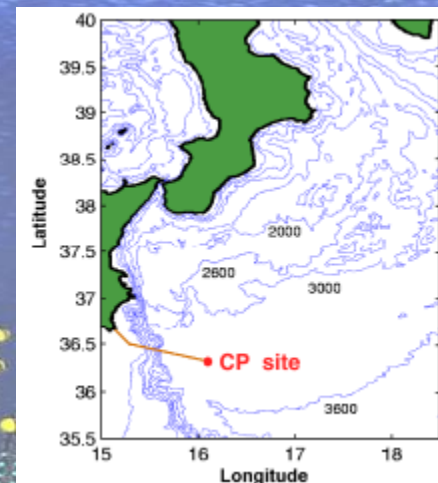
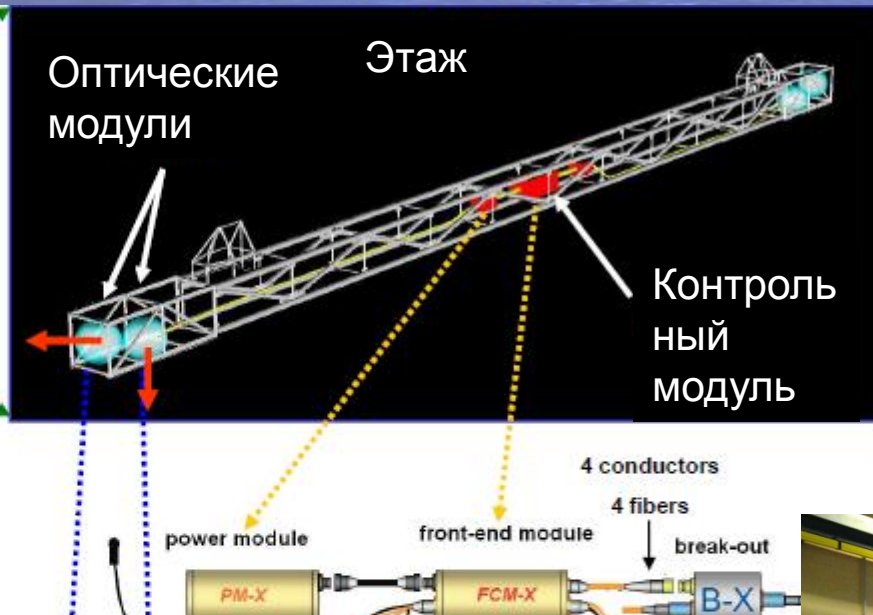
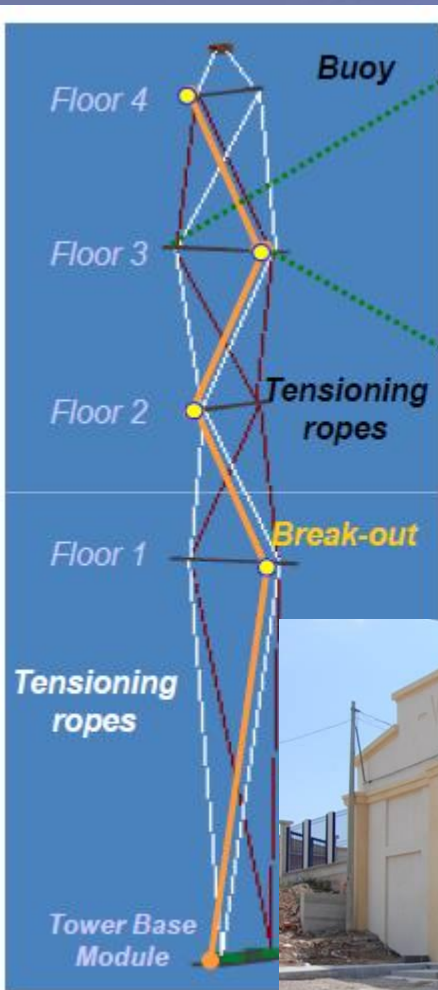
Вейвлет-преобразование одиночного импульса системы позиционирования



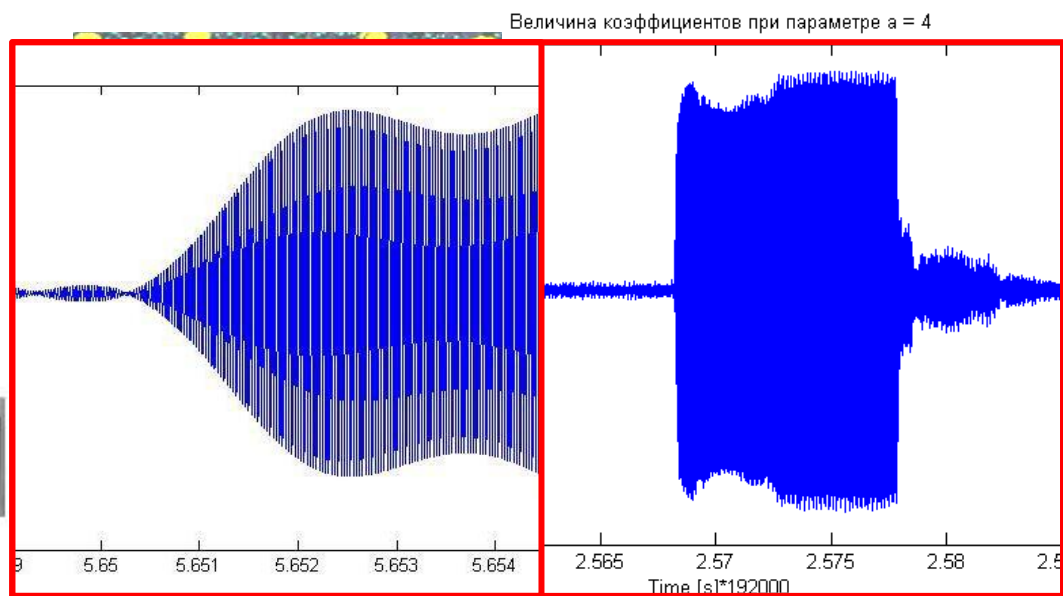
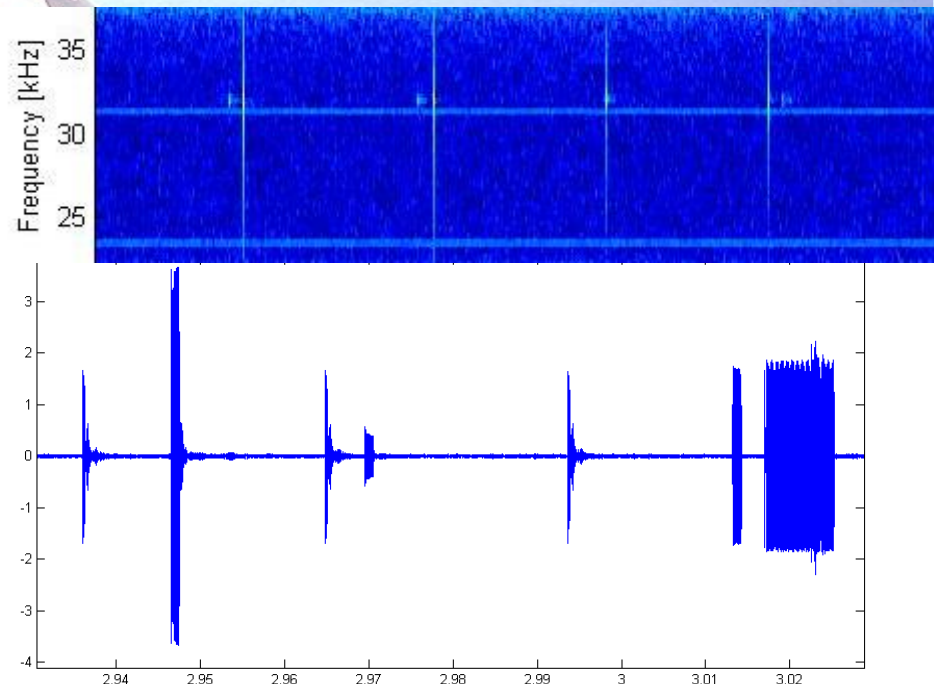
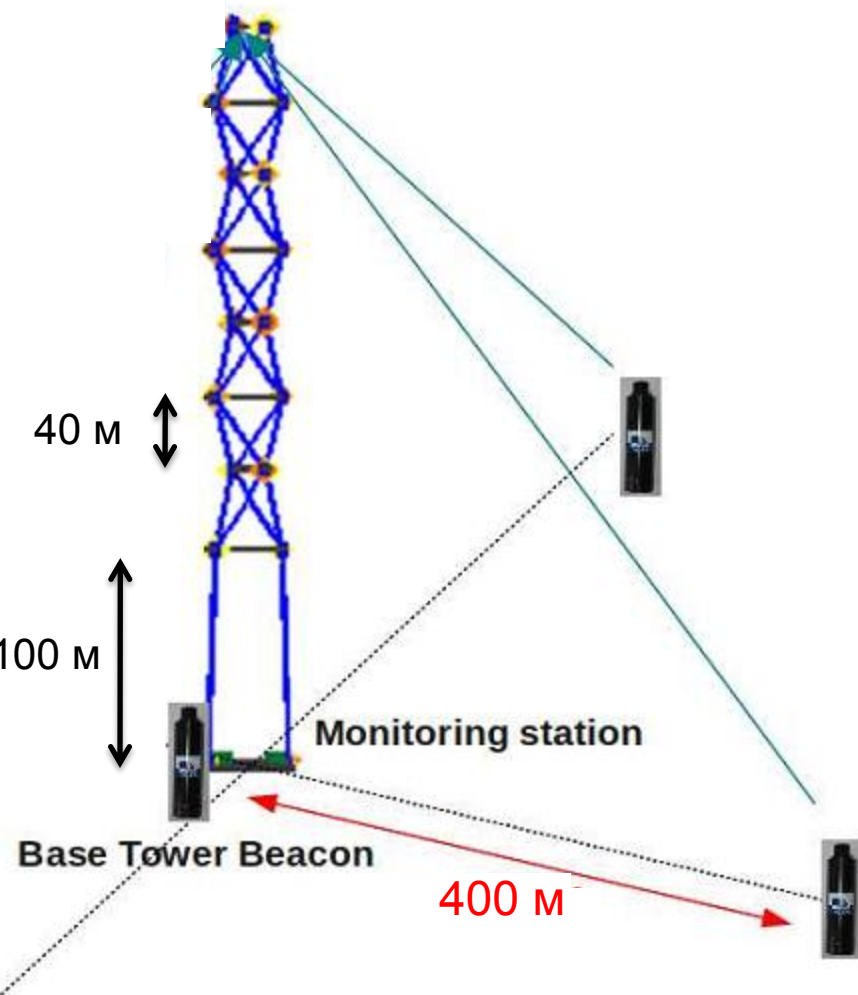
NeMO фаза-II

Башня высотой 400 м, 8 этажей

Спущена 23 марта 2013 года на глубину 3500 м, 96 км от берега мыса Капо-Пассеро

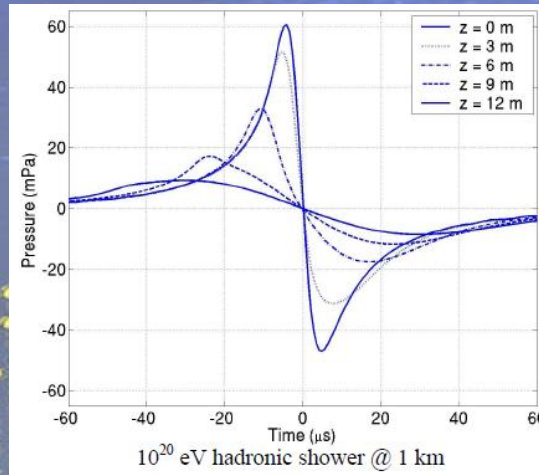
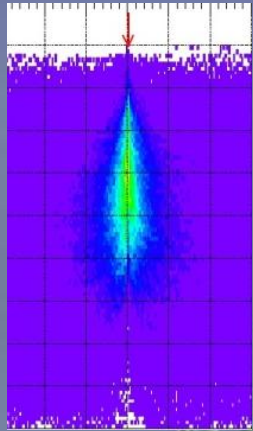


Система позиционирования на основе акустических датчиков



Нейтринная гидроакустика

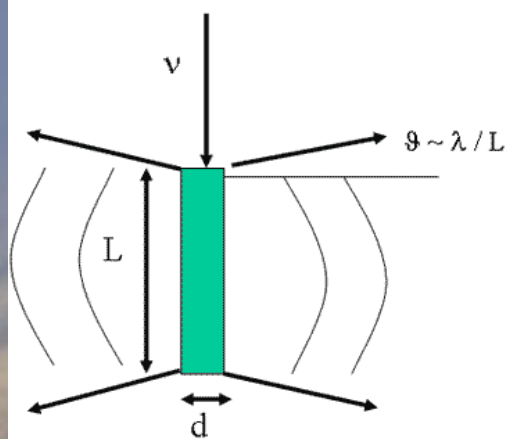
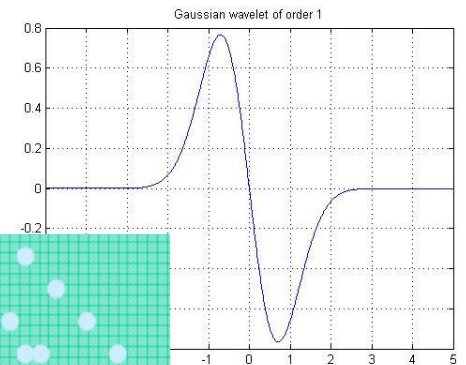
- Термоакустический механизм генерации звука:



Аскарьян, 1957 год.

Гауссов вейвлет 1 порядка

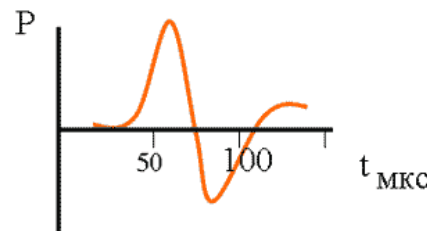
$$g^{(N)}(x) = \frac{d^N}{dx^N} e^{-x^2/2},$$



$d \sim 10 \text{ cm}$

$L \sim 10 \text{ m}$

Форма сигнала



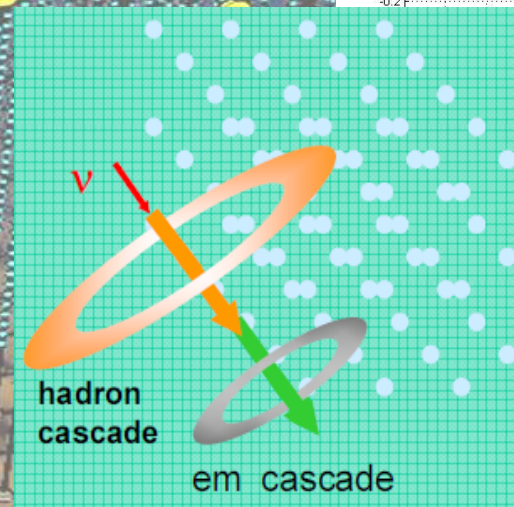
Длительность

$$T \sim d / c_s \sim 100 \text{ мкс}$$

Спектр

10 - 30 кГц

$$\lambda_{\text{max}} \sim d$$



Москва, 08.04.14.

Заключение:

- Быстрый, эффективный и правильный анализ акустических данных важен для физики нейтрино;
- Вейвлет-преобразования могут быть полезны и применимы к обработке акустических данных на подводных нейтринных телескопах;
- Предварительные тесты демонстрируют хорошие результаты;
- Среда MATLAB обладает достаточным набором инструментов, но возможны и реализации в других программах



*Благодарю за
внимание!*