

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский государственный университет»
(ФГБОУ ВО «ИГУ»)
Физический факультет

Кафедра радиофизики и радиоэлектроники
Допускается к защите
И.О. зав. кафедрой,
Доцент, к.ф.м.н. _____ Колесник С.Н
«____» _____ 20__ г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА
по направлению 03.03.03 Радиофизика
направленность (профиль)
«Телекоммуникационные системы и информационные технологии»

ПРИМЕНЕНИЕ СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ
ПОНИЖЕНИЯ ПОРОГА РЕГИСТРАЦИИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ TUNKA-
REX

Нормоконтролёр: Ланин Ю. Б.

(подпись)

Студент 4 курса очного отделения,
Группа 01421 - ДБ
_____ Маршалкина Татьяна Николаевна
(подпись)
Руководитель: д.ф.-м.н., профессор
_____ Афанасьев Н.Т.
(подпись)
Консультант: к.ф.-м.н., НС
_____ Казарина Ю.А.
(подпись)

Работа защищена:
«____» _____ 20__ г.
С оценкой _____
Протокол № _____

Иркутск 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Регистрация широких атмосферных ливней	6
1.1 Радиоизлучение широких атмосферных ливней	6
1.2 Эксперимент Tunka Radio Extension	10
1.3 Программная среда Offline	13
2 Методы восстановления сигнала	14
2.1 Стандартный метод	14
2.2 Согласованная фильтрация	15
3 Реализация согласованной фильтрации	19
3.1 Шаблоны сигналов	19
3.2 Порог регистрации	20
3.2 Радиомодуль для согласованной фильтрации в Offline . .	23
Заключение	26
Список использованных источников	28

ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи являются заряженными частицами высокой энергии внеземного происхождения. Их состав и распространение представляют интерес для исследователей, также как и космические лучи с высокой энергией, которая пока не может быть достигнута на ускорителях.

Единственный наземный способ исследовать космические лучи - это детектировать широкие атмосферные ливни (ШАЛ). ШАЛ состоит из нескольких компонент, одной из которых является электромагнитное излучение, порожденное заряженными частицами. Для регистрации этого излучения используются разные способы, в том числе и антенные решетки, расположенные на большой площади. Эксперимент Tunka-Рех регистрирует радиоизлучение широких атмосферных ливней в диапазоне от 30 до 80 МГц.

Однако, при детектировании в реальных условиях неизбежно зашумление радиоимпульса от ШАЛ, что повышает порог восстановления сигнала.

В данной работе рассмотрен метод восстановления сигнала с применением согласованной фильтрации, в основе которого лежит взаимная корреляция шаблона сигнала и зашумленного сигнала.

Актуальность данной работы состоит в том, что методики, разработанные и примененные в данной работе позволят понизить порог регистрации ШАЛ на эксперименте Tunka-Рех.

Объект этой работы – улучшение обработки и анализа данных эксперимента Tunka-Рех. Предмет – восстановление параметров радиоимпульса.

Целью данной работы было рассмотрение и поиск путей внедрения согласованной фильтрации для анализа данных и понижение порога реги-

страции. В связи с данной целью были поставлены следующие задачи:

- разработать шаблоны сигналов;
- определить порог регистрации сигнала;
- показать корреляцию между истинной амплитудой принятого сигнала и корнем из максимума взаимной корреляции;
- внедрить согласованную фильтрацию в программную среду Offline.

Были использованы следующие методы исследования:

- анализ литературы
- сравнение
- измерение
- идеализация
- эксперимент

Следует ожидать, что использование согласованной фильтрации позволит достигнуть большей точности в восстановлении параметров радиосигнала.

1 Регистрация и анализ широких атмосферных ливней

1.1 Радиоизлучение широких атмосферных ливней

Космические лучи (КЛ) – это поток заряженных частиц (электроны, позитроны, ядра тяжелых атомов) внеземного происхождения. Энергии этих частиц оцениваются в пределах 10^6 – 10^{20} эВ.

Источники космических лучей условно разделяют на три типа: ближние (солнечные), дальние (галактические) и сверхдальние (внегалактические).

Солнечные КЛ проявляются эпизодически после крупных хромосферных вспышек во время повышенной активности Солнца. Их частицы имеют диапазон энергий 10^7 – 10^{10} эВ [1].

Источниками галактических космических лучей в основном являются взрывы сверхновых нашей Галактики. Их энергии располагаются в пределах 10^6 – 10^{21} эВ.

Внегалактические космические лучи имеют энергии в диапазоне 10^{10} – 10^{20} эВ [2]. Среди их предполагаемых источников можно назвать радиогалактики, квазары, активные ядра галактик и гамма-всплески. Такие космические лучи содержат частицы с очень большой энергии [3].

Происхождение частиц космических лучей сверхвысоких энергий (выше 10^{19} эВ) является пока ещё неразрешенным вопросом – существуют разные объяснения их происхождения [4].

Достигая атмосферы Земли, КЛ порождают широкие атмосферные ливни. [1]

Общая картина развития широкого атмосферного ливня, представленная на рис. 1, выглядит так: первичная частица очень большой энергии, проникая в атмосферу Земли, вызывает цепь ядерно-электромагнитных взаимодействий, в результате которых, в основном, рождаются протоны, нейтроны и π -мезоны, которые в свою очередь, вызывают новые взаимодействия [5].

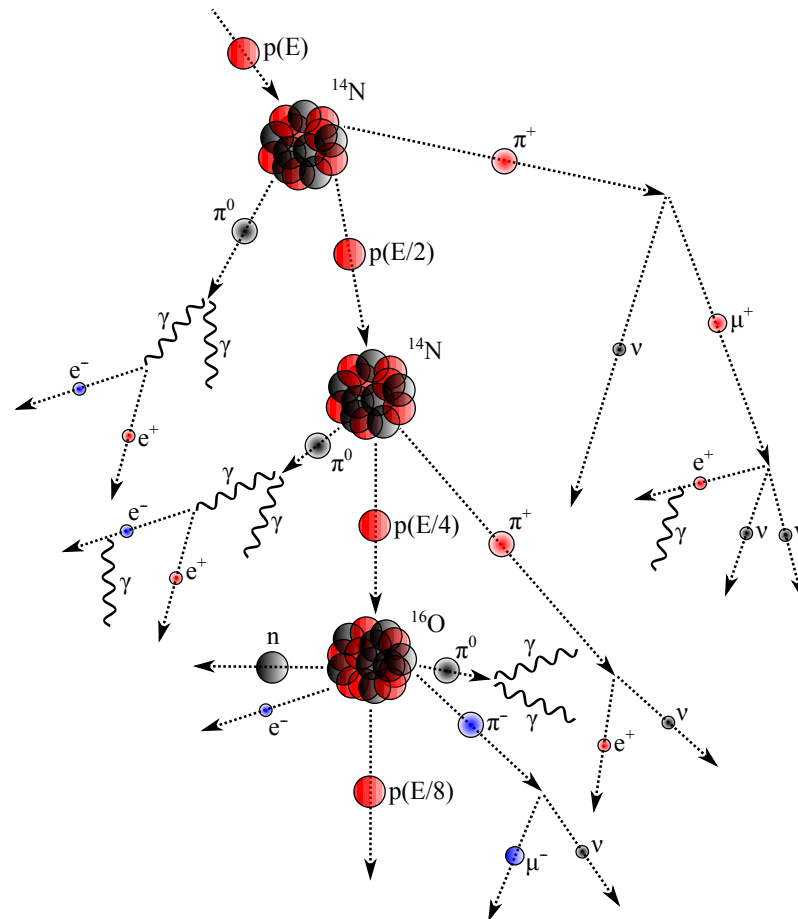


Рис. 1: Ядерно-электромагнитный каскад, рожденный взаимодействием первичного КЛ с ядрами атмосферы (в основном, кислородом и азотом).

Для рождения каскада первичные частицы должны иметь энергии выше 10^{15} эВ. Каскады, рожденные космическими лучами, имеют следующий состав:

- электромагнитная компонента, включающая e^+ , e^- и γ , которая содержит около 95% энергии ШАЛ;
- мюонная компонента, содержащая около 4% энергии;
- адронная компонента, включающая мезоны, протоны и нейтроны и содержащая около 1% энергии.

Отношение вкладов этих компонент варьируется от ливня к ливню в зависимости от типа первичной частицы, энергии, направления прихода и статистических флуктуаций.

Однако, в любом случае, наибольший в процентном соотношении вклад в энергию ливня дают электромагнитная и мюонная компонента, так на них приходится суммарно около 99% энергии ШАЛ [1].

Радиоизлучение от широкого атмосферного ливня порождается его заряженными частицами. Основной вклад дает геомагнитный эффект, заключающийся в отклонении электронов и позитронов от своей первоначальной траектории под влиянием магнитного поля Земли. Это приводит к появлению линейно поляризованного радиоизлучения.

Меньший вклад дает эффект Аскарьяна. Позитроны ливня с течением времени аннигилируют и общий заряд ливня меняется. Происходящее из-за этого изменение электрического поля приводит к образованию поляризованного радиоизлучения [6].

Схематичное изображение этих механизмов можно увидеть на рис. 2.

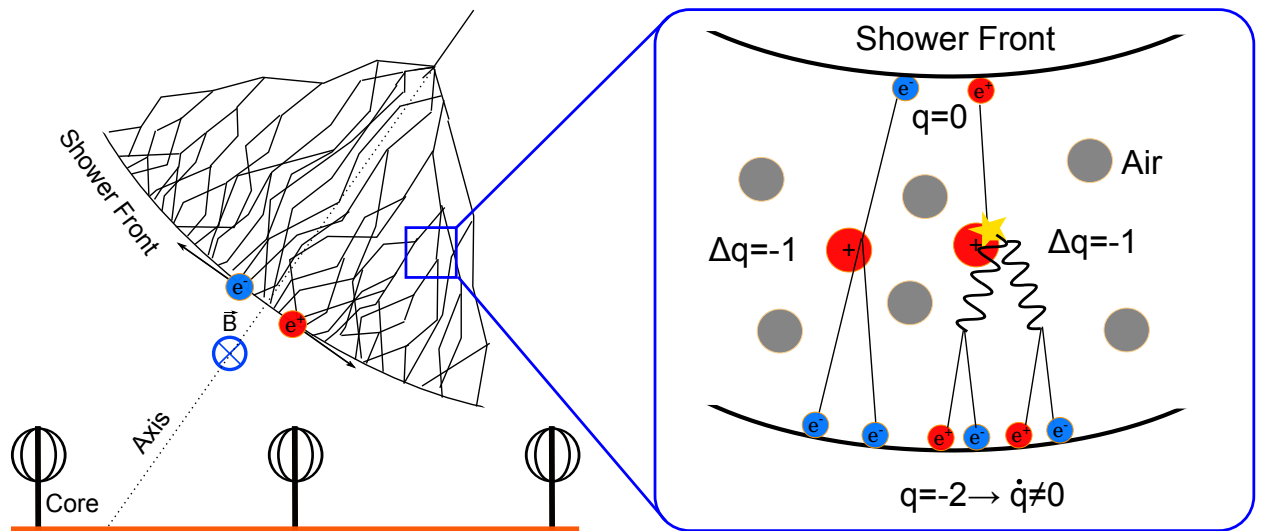


Рис. 2: Механизмы радиоизлучения. Слева: геомагнитный эффект. Справа: эффект Аскарьяна.

Радиоизлучение когерентно, если толщина фронта ливня (несколько метров) меньше, чем длина волны радиоизлучения (до 100 МГц). Это приводит к усилению радиоизлучения на этих частотах. Это основная причина того, почему эксперименты, измеряющие радио компоненту широких атмосферных ливней, обычно работают на частотах ниже 80 МГц.

Более широкий диапазон частот может быть полезен, но на высоких и низких частотах появляются шумы, удаление которых требует более сложной электроники – такой, как различные фильтры и АЦП с большим динамическим диапазоном.

В свою очередь, в полосе 30–80 МГц присутствует меньше шумов, что делает ее более благоприятной при проведении измерений.

С этим диапазоном частот связан временной масштаб радиоимпульса, который составляет порядка десятков наносекунд, в зависимости от расстояния до источника излучения.

Амплитуда радиоимпульса, соответствующая напряженности поля,

пропорциональна числу электронов в широком атмосферном ливне, то есть примерно пропорциональна первичной энергии ливня. [7]

1.2 Эксперимент Tunka Radio Extension

Эксперимент Tunka Radio Extension (Tunka-Rex) – это антенная решетка, регистрирующая радиоизлучение от широких атмосферных ливней в диапазоне от 30 до 80 МГц и с энергиями в пределах до 10^{18} эВ.

Tunka-Rex работает совместно с другими установками, расположенными в Тункинской долине и регистрирующими различные компоненты ШАЛ – Tunka-133 и Tunka-Grande.

Tunka-133 изучает черенковское излучение ШАЛ в диапазоне энергий 10^{15} – 10^{18} эВ, а Tunka-Grande занимается сбором данных о мюонной и электронной компонентах ШАЛ.

Основной целью эксперимента Tunka-Rex является измерение энергетического и массового спектра КЛ для энергий, начиная с 10^{17} эВ.

Преимуществами Tunka-Rex является:

- достаточно высокая точность восстановления параметров ШАЛ;
- экономичность;
- относительная независимость от погодных условий.

К недостаткам установки можно отнести потребность во внешнем триггере.

В настоящее время Tunka-Rex состоит из 25 антенных станций, подключенных к центрам кластеров ФЭУ детекторов Tunka-133 и 38 антенных станций подключенных к Tunka-GRANDE.

Каждая антенная станция состоит из двух перпендикулярных апериодических петлевых нагруженных антенн SALLA, ориентированных в направлении магнитных северо-востока и северо-запада. Хотя антенны SALLA имеют более слабое усиление, чем другие типы антенн, они имеют ряд преимуществ. Во-первых, эти антенны очень экономичны, а во-вторых их диаграмма направленности слабо зависит от подстилающей поверхности [8].

Tunka-Rex работает в условиях с низким соотношением сигнала к шуму (SNR), что требует усложненной постобработки записанных данных. В стандартном подходе для увеличения SNR, сначала используются различные полосовые фильтры, а затем определяется пик сигнала [9].

Для анализа радиоизмерений используется модифицированный радиомодуль программной среды Offline, разработанной коллаборацией Pierre Auger [10].

Схематичное изображение экспериментальных установок в Тункинской долине можно увидеть на рис. 3.

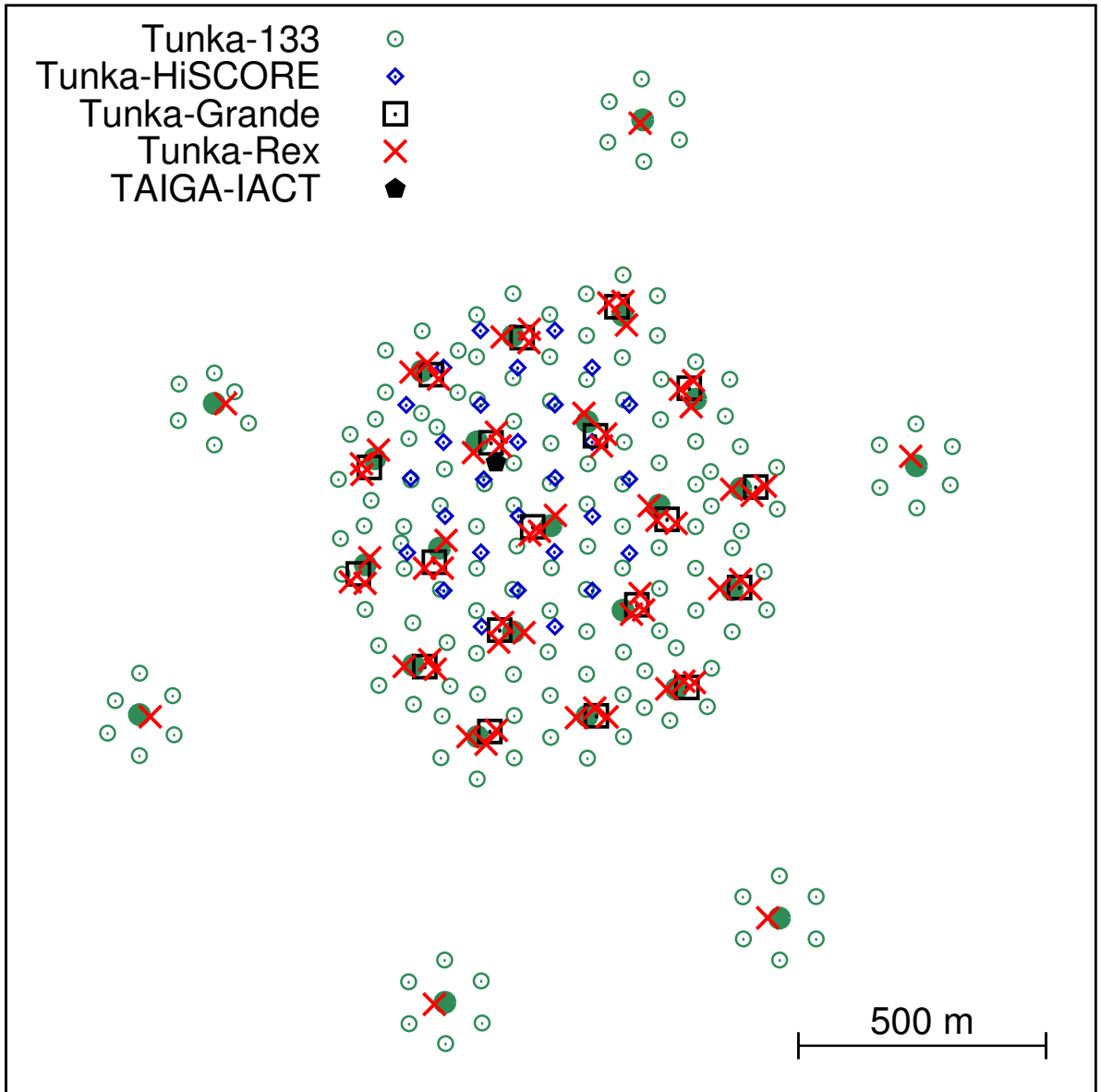


Рис. 3: Расположение экспериментов в Тункинской долине

1.3 Программная среда Offline

Изначально, программная среда Offline была создана для целей анализа данных обсерватории Пьера Оже, занимающейся детектированием космических лучей высоких энергий. Однако, благодаря модульной структуре, она была успешно использована и в других экспериментах, таких, как, например, AERA и Tunka-Rex.

Offline в своей основе содержит такие части:

- централизованный механизм конфигурации
- библиотека модулей
- описание детектора
- An Event-based Data Model

Также, в дополнение к этому используется ряд инструментов, классов и пакетов, обеспечивающих, например, тестирование, регистрацию ошибок, установку сопутствующих программ, чтение и запись данных в файлы и т. п.

Однако, особый интерес представляет библиотека модулей. Необходимый модуль можно получить с помощью использования уже существующего шаблона. Благодаря этому, относительно несложно может быть добавлен модуль с необходимыми свойствами и характеристиками.

2 Методы восстановления сигнала

2.1 Стандартный метод

Стандартный метод восстановления пиковой амплитуды и времени прихода сигнала в эксперименте Tunka-Rex включает в себя следующие шаги:

- Дискретизация записанных дорожек повышается в 4 раза, затем применяются фильтры: сначала полосно-заграждающий фильтр подавляет узкополосные помехи, возникающие через каждые 5 МГц, затем полосно-пропускающий фильтр ограничивает полосу 35-76 МГц.
- Амплитуда измеренного сигнала S определяется как максимум огибающей (полученной путем преобразования Гильберта) в заданном окне сигнала записанной дорожки.
- Уровень шума N определяется как среднеквадратичное значение амплитуд в шумовом окне.

Соотношение сигнала к шуму (SNR) вычисляется как мощность отношения амплитуд сигнала и шума:

$$SNR = \frac{S^2}{N^2}$$

Антенные станции с SNR менее 10 исключаются из анализа. Остальные станции используются для восстановления направления прихода, которое определяет ось ливня. Зная это направление, можно восстановить электрическое поле путем применения диаграммы направленности антенны и при приближении, что электрическое поле вдоль оси ливня равно нулю [9].

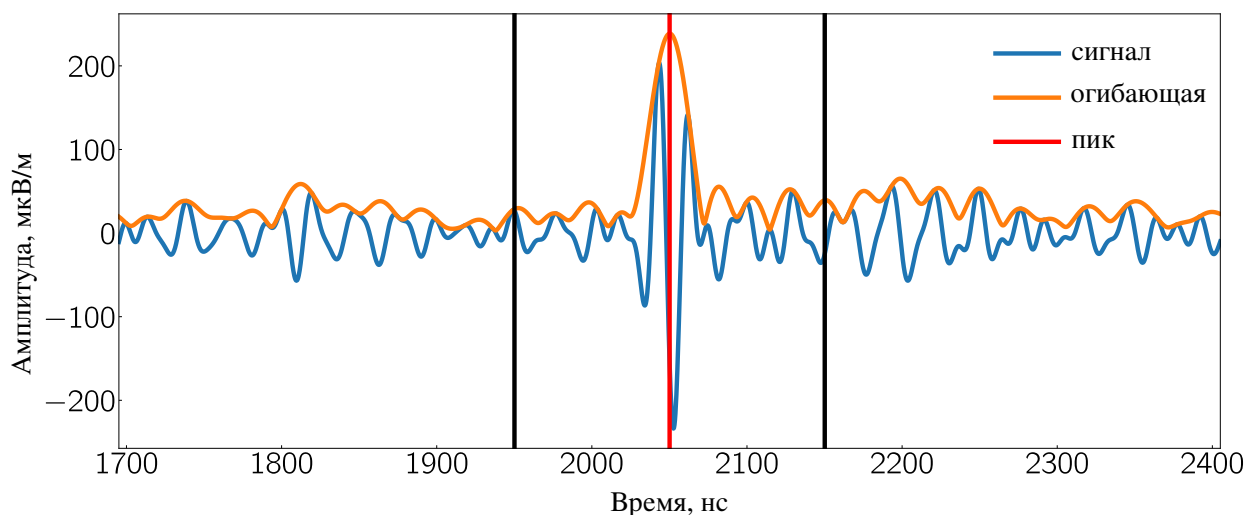


Рис. 4: Схематичное представление стандартного метода определения пика радиоимпульса ШАЛ.

Графическое отображение этого метода можно увидеть на рис. 4.

Этот метод доказал свою работоспособность, однако для улучшения точности восстановления данных, необходимо применение других методов - таких, как согласованная фильтрация.

2.2 Согласованная фильтрация

Как определить, встречается ли определенный сигнал в другом сигнале? С помощью корреляции. Корреляция – это математическая операция, очень похожая на свертку. Также как свертка, корреляция использует два сигнала, чтобы получить третий. Этот сигнал будет взаимокорреляцией двух входных сигналов. Например, есть принятый сигнал $x(t)$, взаимокорреляционный сигнал $y(t)$ и $p(-t)$ - форма волны, которую нужно найти, по другому, это целевой сигнал (шаблон) [12].

Другими словами, согласованную фильтрацию сигнала можно свести

к пропусканию сигнала $x(t)$ через фильтр с импульсным откликом $p(-t)$.

Как известно, линейная фильтрация – это эквивалент математической операции свертки:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (2.1)$$

В случае согласованного фильтра, при $h(t) = p(-t)$:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)p(\tau - t)d\tau \quad (2.2)$$

В итоге, согласованная фильтрация $x(t)$ посредством $p(t)$ – это свертка $x(t)$ и $p(-t)$, или, другими словами, вычисление взаимокорреляционной функции $x(t)$ и $p(t)$, $y(t)$.

Также, производится усреднение по времени произведения двух функций, причем одна сдвинута во времени относительно другой [13].

С помощью, например, программного обеспечения, согласованная фильтрация может реализоваться так: если шаблон не совмещен с тем местом в принятом сигнале, где предполагается пиковый сигнал, то он последовательно сдвигается и перемножается со всеми значениями полученного сигнала, а та часть взаимокорреляционного сигнала, где получается максимальный пик, будет относительно соответствовать пику принятого сигнала.

Таким, образом, основная идея, стоящая в основе согласованного фильтра - это корреляция с использованием свертки. В этом случае, амплитуда каждой точки в сигнале после свертки – это мера того, насколько хорошо шаблон совпадает с соответствующей частью пришедшего сигнала. Однако, выходной сигнал с согласованного фильтра может не выглядеть как обнаруженный сигнал. С другой стороны, если форма сигнала заранее из-

вестна, это не имеет значения.

Согласованный фильтр также называют оптимальным, так как получаемая после него вершина пика намного больше, чем может быть получена в любом другом линейном фильтре. Еще одна причина – это то, что соотношение сигнала к шуму при гауссовом шуме для согласованного фильтра максимально среди линейных фильтров.

Если в принятом сигнале присутствует шум, он, соответственно, будет и в сигнале, полученном после корреляции. К тому же, часть случайного шума может выглядеть также, как и используемый шаблон. [12]

Схематичное представление согласованной фильтрации можно увидеть на рис. 5.

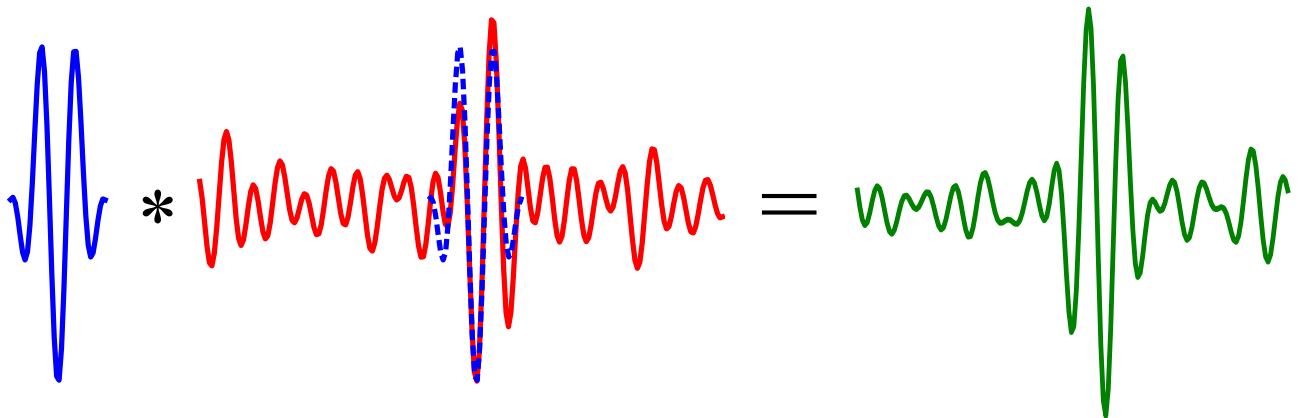


Рис. 5: Схематичное представление согласованной фильтрации. Синим обозначен шаблон, красным – зашумленный сигнал, зеленым – сигнал после взаимной корреляции

Основная область применения согласованной фильтрации – это исследования, в которых форма получаемого сигнала заранее известна, в частности, в сонарах и радарах. Также, согласованная фильтрация играет центральную роль в гравитационно-волновой астрономии [12].

К недостаткам согласованной фильтрации можно отнести снижение

ее эффективности, если шум в принятом сигнале отличается от белого, а также необходимость в шаблоне, что ограничивает ее применение в областях, где нет возможности получить шаблон, похожий на предполагаемый пришедший сигнал.

3 Реализация согласованной фильтрации

3.1 Шаблоны сигналов

Для работы согласованного фильтра нужно иметь сигнал, который уже известен. Поэтому, на основе моделирований в CoREAS с помощью усреднения были созданы шаблоны различной длины. Для этого было взят набор моделирований, не содержащих шум.

На рис. 6 можно увидеть примеры такого сигнала, а также зашумленный сигнал.

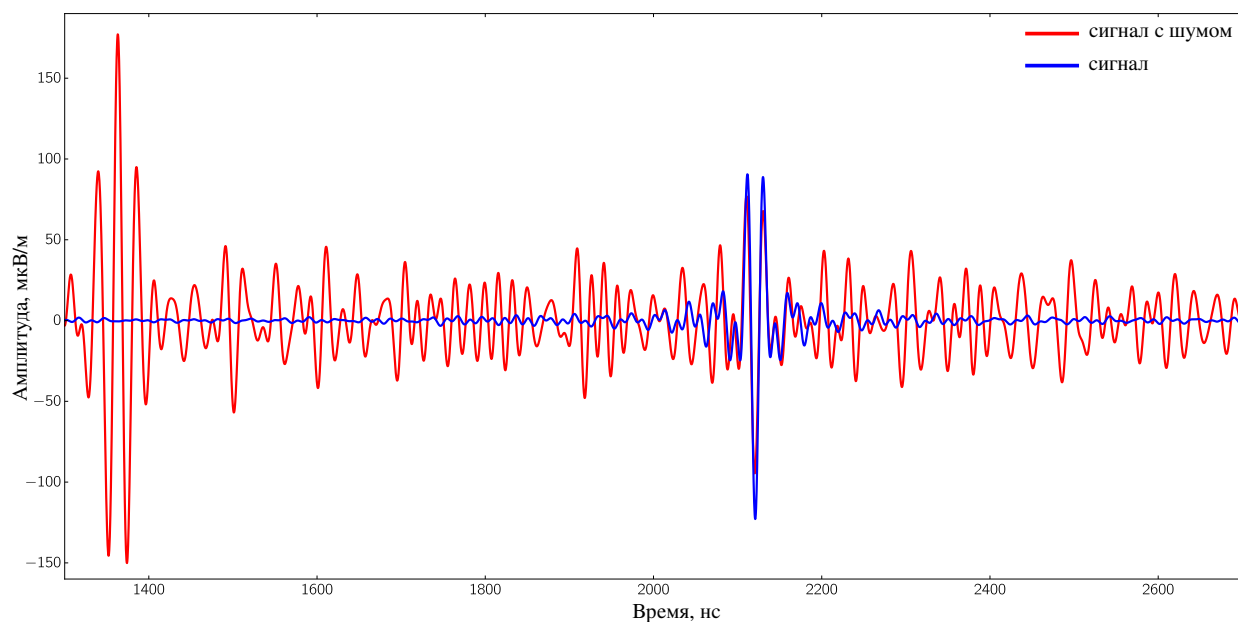


Рис. 6: Примеры сигнала с шумом и без шума

На рис. 7 представлены полученные шаблоны.

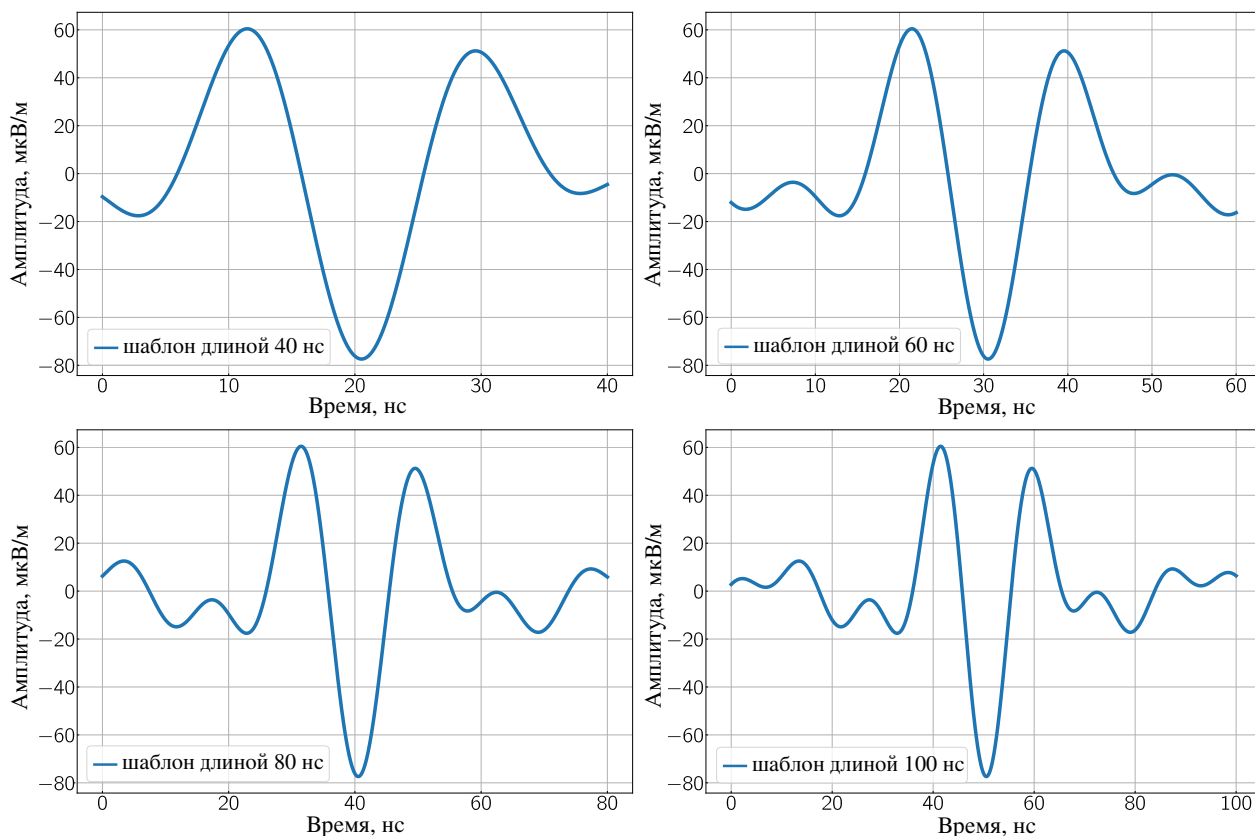


Рис. 7: Шаблоны сигналов

В сравнении со стандартным методом, шаблоны всех размеров дают улучшение точности.

Для дальнейшего использования был выбран шаблон с длиной 60 наносекунд, так как он оптимален с точки зрения быстроты и точности получаемого результата.

3.2 Порог регистрации

Для того, чтобы выяснить, присутствует ли полезный сигнал в принятом сигнале, нужно установить порог. То есть, если значение амплитуды сигнала в некоторый момент времени превышает определенное значение,

сигнал присутствует, а если нет, то отсутствует. Существует четыре случая:

- Правильное срабатывание, когда полезный сигнал присутствует и имеет значения больше порогового.
- Правильное не срабатывание, когда полезного сигнала нет и нет пересечения порога.
- Пропуск сигнала, когда полезный сигнал в принятом сигнале есть, но не пересекает пороговое значение.
- Ложное срабатывание – случайный всплеск амплитуды, который оказывается больше порога.

Пропуск сигнала и ложное срабатывание - это ошибочные случаи [14].

Для обработки данных эксперимента Tunka-Рех важно, чтобы происходило минимальное количество ложных срабатываний. Однако, при уменьшении вероятности ложного срабатывания, увеличивается вероятность пропуска сигнала.

Для определения порога, при котором согласованную фильтрацию можно считать сработавшей, было построено распределение максимумов сверток на шуме. Далее было получено значение амплитуды, соответствующее 5% вероятности ложного срабатывания – так называемый квантиль. Он и является пороговым значением, при котором еще может быть произведено восстановление параметров сигнала.

Для использованного набора моделирований порог был определен при помощи функции из языка программирования Python - percentile, из распределения корней из максимумов свертки на шуме, то есть амплитуда принятого была оценена как $f(\sqrt{A_{cc}})$. Значение квантиля – $Q =$

854.099856808. Само распределение представлено на рис. 8.

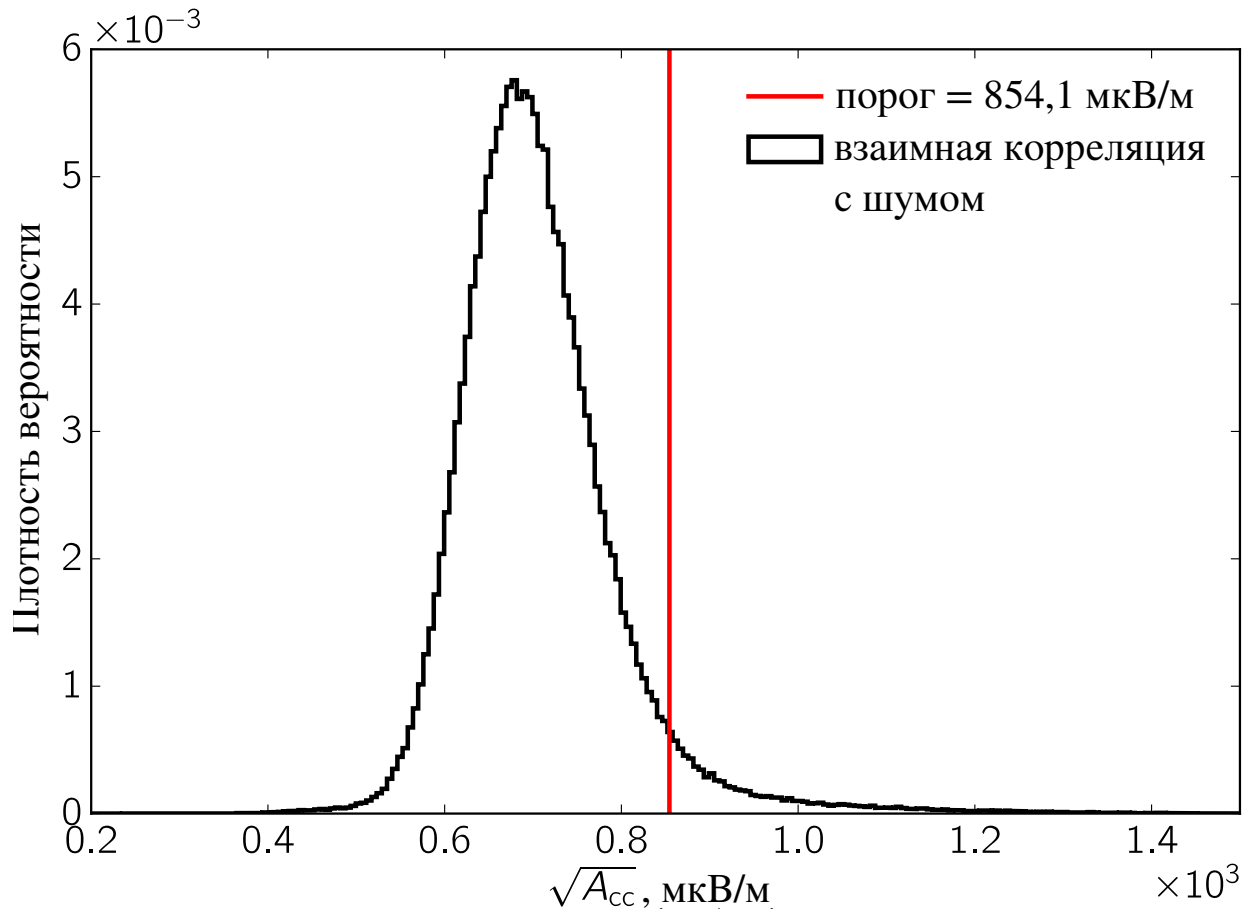


Рис. 8: Распределение значений квадратного корня из корреляции на шумовом окне

На рис. 9 представлен результат применения порога регистрации сигнала для наборов модельных сигналов с шумом и без шума распределению истинной амплитуды относительно квадратного корня из максимума взаимной корреляции. Такой результат поможет точнее определять получаемые сигнал и снизит порог регистрации в эксперименте Tunka-Rex.

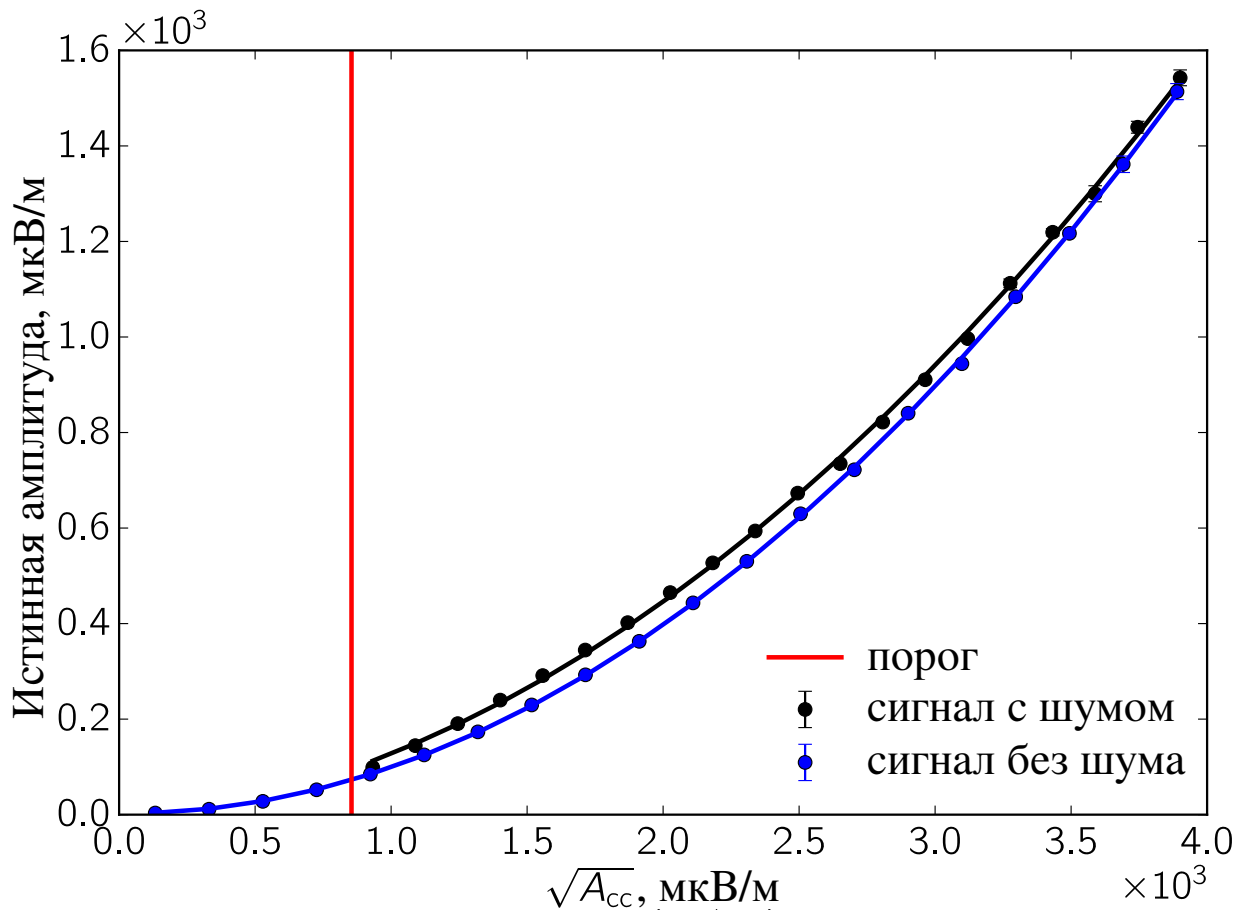


Рис. 9: Распределение истинной амплитуды относительно квадратного корня из максимума корреляции

3.3 Радиомодуль для согласованной фильтрации в Offline

Данные результаты были использованы для модификации радиомодуля программной среды Offline, предназначенного для поиска пика сигнала.

Согласованный фильтр, включенный в Offline показал свою эффективность по сравнению со стандартным методом и был успешно применен на модельных данных.

На рис. 10 и 11 представлены результаты восстановления моделирований:

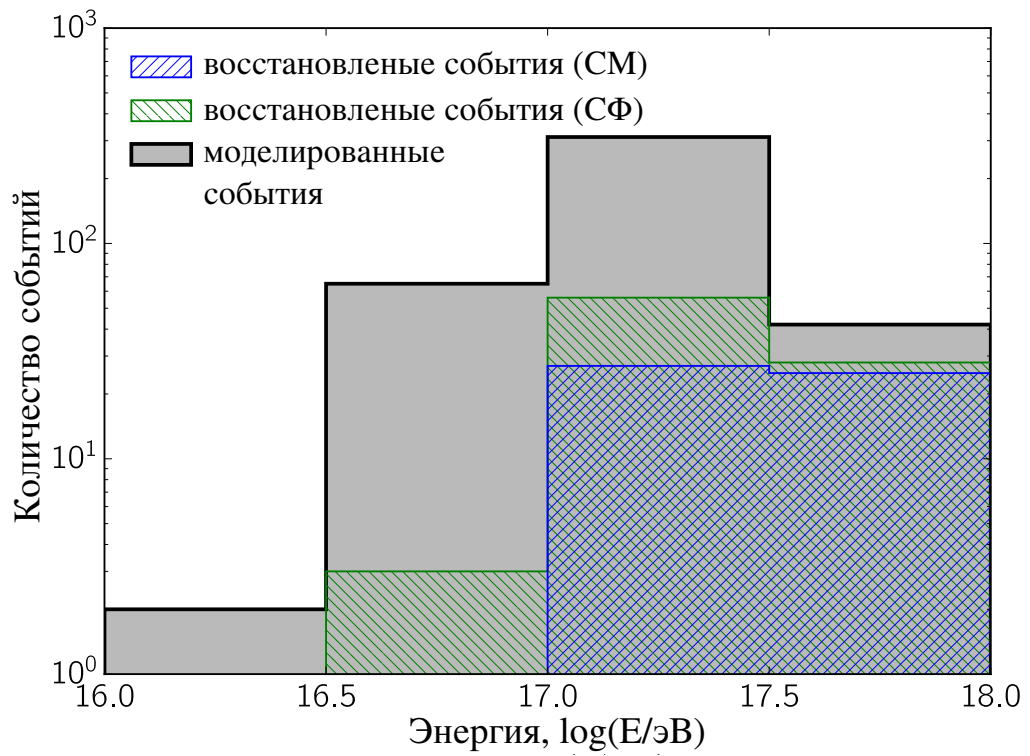


Рис. 10: Распределение количества событий энергиям

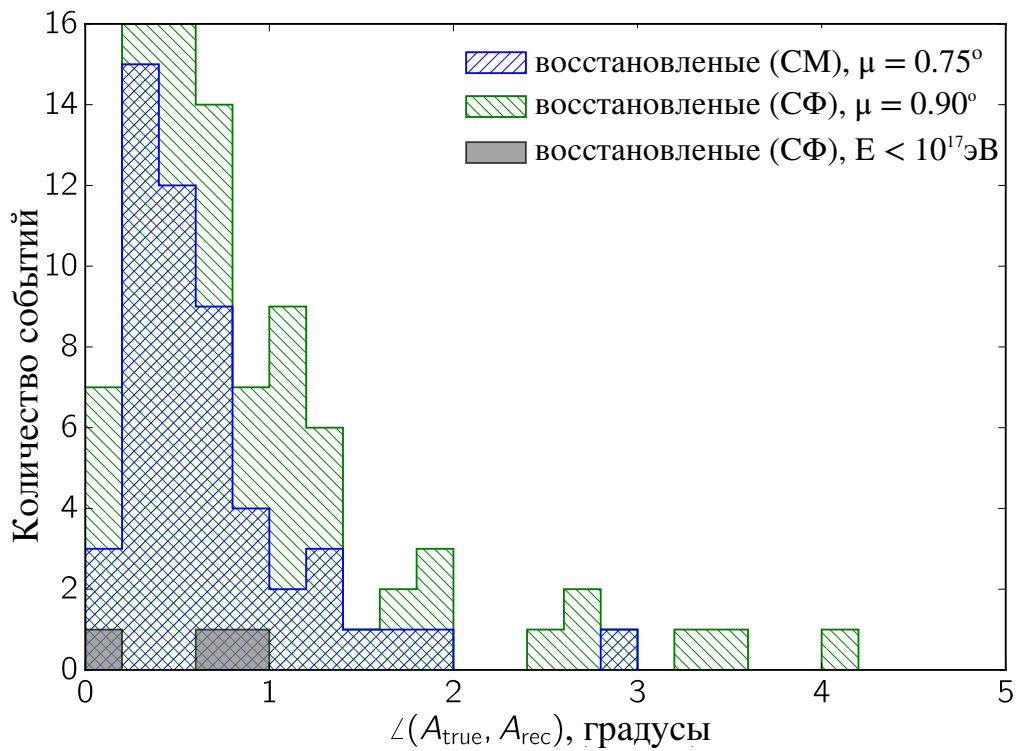


Рис. 11: Распределение количества событий по углам

Согласованная фильтрация показала низкоэнергитические события, которые не были выявлены при помощи стандартного метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе данных остро стоит проблема выделения полезного сигнала из шума. Для этого используются разнообразные техники, обеспечивающие фильтрацию сигнала, одной из которых является согласованная фильтрация. В её основе стоит взаимная корреляция между двумя сигналами - пришедшим, состоящим из полезного сигнала и шума и шаблоном, который, по предположению, соответствует форме исходного сигнала.

В связи с необходимостью шаблона для осуществления согласованной фильтрации, были созданы примеры шаблонов разной длины и выполнено сравнение их эффективности в восстановлении параметров сигнала.

Было определено значение порога регистрации радиосигнала, которое поможет обеспечить правильное обнаружения радиосигналов от широких атмосферных ливней и снижение значения порога по сравнению с текущим.

Была показана корреляция между истинной амплитудой принятого сигнала и корнем из максимума взаимной корреляции. Полученные значения были применены для осуществления внедрения согласованной фильтрации и модификации модуля, используемого в Offline.

В результате анализа модельных данных, близких к реальным данным эксперимента Tunka-Rex методом согласованной фильтрации с помощью модифицированного радиомодуля программной среды Offline были получены указания на то, что данный метод снижает порог и позволяет восстановить большее количество событий по сравнению со стандартным методом.

Результаты данной работы будут представлены на международных конференциях ARENA (Acoustic and Radio EeV Neutrino Detection Activities) и E+CRS (26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Славатинский С. А. Космические лучи и их роль в развитии физики высоких энергий и астрофизики / С. А. Славатинский // Соросовский образовательный журнал.–1999.–№10.– С. 68–74
2. Гвоздев А. А. Введение в релятивистскую астрофизику и современную космологию / А. А. Гвоздев, И. С. Огнев, М. В. Чистяков. – Ярославль: ЯрГУ, 2013.– 100 с.
3. Тулина Т. А. Космические лучи. Методические материалы к дистанционной лабораторной работе / Т. А. Тулина – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2008. – 18 с.
4. Мурзин В. С. Введение в физику космических лучей / В. С. Мурзин – М. : Атомиздат, 1979. – 304 с.
5. Alkhofer O. C. Introduction to cosmic radiation / O. C. Alkhofer // Munchen. – Verlag Karl Thiernig, 1975. – 221 p.
6. Аскарьян Г. А. Избыточный отрицательный заряд электрон-фотонного ливня и когерентное радиоизлучение от него / Г. А. Аскарьян // ЖЭТФ. – 1961. – Т. 41. – С. 618–618
7. Schröder F. G. Instruments and Methods for the Radio Detection of High Energy Cosmic Rays: Doctoral Thesis / F. G. Schröder; Karlsruhe Institute of Technology – Germany, 2012. – 188 p.
8. Overview on the Tunka-Rex antenna array for cosmic-ray air showers / F.G. Schröder [et al] // Proc. of the 35th ICRC 2017. – 2017. – V. 459.
9. Improving reconstruction methods for radio measurements with Tunka-Rex / P.A. Bezyazeev [et al] // XXV ECRS 2016 Proceedings. – 2016. – p. 4.

10. The Pierre Auger Observatory offline software / J. Allen [et al] // Journal of Physics: Conference Series. – 2008. – V. 119
11. The Offline Software of the Pierre Auger Observatory: Lessons Learned / Javier G. Gonzalez [et al] // 10th IEEE Internat.Symp.on Parallel and Distributed Processing with Applications (ISPA-12). – 2012. – p. 8.
12. Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing / S. W. Smith. – San Diego, California: California Technical Publishing, 1999. – 650 p.
13. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. / Ж. Макс – М.: Мир, 1983. – Т.2. 256 с.
14. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов / В. И. Тихонов – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.