

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи

Кулешов Денис Александрович

**СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ ГЛУБОКОВОДНОГО
НЕЙТРИННОГО ТЕЛЕСКОПА НТ1000**

01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

*Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук*

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук,
В. М. Айнутдинов

Москва, 2014 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ УСТАНОВОК: ANTARES, AMANDA, ICECUBE, KM3NET, NT200+	10
1.1 Глубоководные нейтринные телескопы	10
1.2 ANTARES	14
1.3 AMANDA	21
1.4 IceCube	24
1.5 KM3Net	30
1.6 Байкальский нейтринный телескоп	38
ГЛАВА 2. ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ ПРОЕКТИРУЕМОГО ТЕЛЕСКОПА NT1000	48
2.1 Измерительный канал	50
2.2 Секция оптических модулей	58
2.3 Гирлянда ОМ	72
2.4 Кластер	76
ГЛАВА 3. ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ ТЕЛЕСКОПА NT1000 В ОЗ. БАЙКАЛ	92
3.1 Исследование параметров системы передачи данных	96
3.2 Качество работы измерительных каналов	105
3.3 Работа системы сбора данных в режимах амплитудной и временной калибровки	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
Библиографический список	121
Приложение	126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Крупномасштабные глубоководные/подледные черенковские детекторы элементарных частиц – нейтринные телескопы, создаваемые в первую очередь для решения задач астрофизики и космологии, являются также мощным инструментом исследования проблем, возникших на современном этапе развития физики элементарных частиц. Нейтринные телескопы позволяют исследовать свойства нейтрино в экспериментах по регистрации атмосферных нейтрино и нейтрино от ускорителей, осуществлять поиск частиц темной материи, исследовать потоки нейтрино астрофизической природы [1]. До недавнего времени, уровень знаний о природных потоках нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, в основном, определялся результатами, полученными в экспериментах на нейтринных черенковских детекторах NT200/NT200+ [2,3] и AMANDA [4], а также на нейтринном телескопе ANTARES [5] в Средиземном море, осуществляющем набор данных с 2008 года. Эти три детектора относятся к первому поколению нейтринных телескопов и характеризуются эффективным объемом регистрации вторичных мюонов и ливней порядка 10^7 м^3 по отношению к регистрации нейтрино с энергией выше 10 ТэВ. Результаты, полученные в экспериментах на нейтринных телескопах первого поколения, мотивировали разработку и создание нейтринных телескопов с характерным эффективным объемом масштаба кубического километра, которые позволят увеличить чувствительность детекторов к природным потокам нейтрино более чем на порядок.

В настоящее время в мире активно развиваются три проекта крупномасштабных нейтринных телескопов следующего поколения в естественных средах: IceCube [6] на Южном полюсе, KM3NeT [7] в Средиземном море и NT1000 [8] на оз. Байкал, которые находятся на разных

стадиях разработки и реализации. Конфигурация, архитектура системы сбора и передачи данных, а также потенциальные возможности при решении конкретных задач каждого из этих детекторов обусловлены их местоположением, свойствами среды, степенью сложности инженерно-технических решений при создании и эксплуатации установки, затратами на создание и поддержку инфраструктуры, а также возможностью модификации и увеличения светосилы телескопа.

Байкальский телескоп НТ1000 и средиземноморский KM3NeT, расположенные в северном полушарии, а также детектор IceCube на Южном полюсе, в силу их географического местоположения, будут взаимно дополнять друг друга в исследованиях природных потоков нейтрино по всей небесной сфере. Потребность как минимум в двух телескопах, расположенных в южном и северном полушариях, обусловлена их ограниченной угловой апертурой для широкой области энергий нейтрино. В области энергий ниже ПэВ, в силу высокого уровня фоновых событий от атмосферных мюонов, выделение нейтринных событий возможно лишь для нейтрино из-под горизонта. В области энергий выше ПэВ фон от атмосферных мюонов становится приемлемым для регистрации нейтрино сверху, однако, для нейтрино таких энергий Земля становится непрозрачной и апертура телескопа оказывается ограниченной для событий снизу. Детекторы, расположенные в северном полушарии, обладают важным преимуществом – они способны вести практически непрерывное наблюдение центра Галактики (НТ1000 - 18 часов и KM3NeT - 15 часов в сутки) и Галактической Плоскости, где сконцентрирована основная часть потенциальных галактических источников космических лучей (пульсары, остатки сверхновых, двойные системы и т.д.), включая массивную черную дыру Sgr A* в центре Галактики.

Одним из наиболее важных факторов, определяющих реализуемость проектов крупномасштабных нейтринных телескопов, является создание и

поддержка инфраструктуры, а также степень сложности технической реализации проекта. Проект IceCube использует инфраструктуру полярной антарктической станции Амундсен-Скотт. Технология развертывания телескопа основана на оригинальном методе “вмораживания” оптических модулей в лед, что исключает возможность извлечения и ремонта научного оборудования и изменения конфигурации телескопа. Все эти факторы определяют принцип реализации системы сбора данных детектора, в котором все оптические модули работают независимо друг от друга, и связаны только с общим центром сбора информации. В случае средиземноморского проекта KM3NeT, создание береговой инфраструктуры не вызывает принципиальных трудностей. Однако, развертывание и долговременная эксплуатация нейтринного телескопа на больших глубинах в соленой морской воде, предъявляет повышенные требования к надежности электронных, коммуникационных и несущих конструкций телескопа, что является сложной и дорогостоящей инженерно-технической задачей.

Проект телескопа NT1000 предполагает использование при его создании и эксплуатации существующей инфраструктуры Байкальской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Рельеф дна озера Байкал позволяет проводить развертывание установки на расстоянии 4 – 6 км от берега, что существенно меньше характерных расстояний 25 – 150 км, обсуждаемых для средиземноморских проектов. Наличие в течение примерно двух месяцев (с середины февраля до середины апреля) устойчивого ледового покрова позволяет вести работы по развертыванию телескопа, а также ремонтные, профилактические и исследовательские работы непосредственно со льда, используя его как прочную и неподвижную монтажную платформу. Эта же специфика Байкальского проекта позволяет организовать модульную архитектуру телескопа NT1000, сохраняя тем самым возможность последующего наращивания его объема путем постановки дополнительных, функционально законченных кластеров.

Цель работы.

Целью диссертационной работы является разработка, аппаратная реализация и долговременные испытания системы сбора данных нейтринного телескопа НТ1000.

Научная новизна и практическая ценность работы.

Созданная система сбора данных предназначена для работы в составе глубоководного нейтринного телескопа на оз. Байкал, принципиально нового детектора, как с точки зрения его масштабов, так и возможностей решения физических задач в области астрофизики и космологии. Разработанная система является первым опытом реализации в распределенных глубоководных физических установках экономичных линий связи на основе xDSL технологий, обеспечивающих скорость обмена данными около 10 Мбит/с при длине линий 1.2 км. Сочетание разработанных линий связи с новой методикой фильтрации событий подводной системой обработки данных представляет собой новый подход к организации системы передачи данных крупномасштабных нейтринных телескопов.

Ввод в эксплуатацию первого кластера НТ1000 из пяти гирлянд является определяющим шагом на пути к созданию детектора нового поколения: кубокилометрового нейтринного телескопа на оз. Байкал. В созданной системе сбора данных заложена возможность ее расширения до масштабов кубокилометрового нейтринного телескопа на оз. Байкал.

Методики аппаратной и программной реализации сбора данных, отбора и фильтрации событий, контроля аппаратуры и калибровки могут быть использованы в детекторах с пространственно разнесённой решёткой регистрирующих элементов (в т.ч. в нейтринных телескопах).

Личный вклад автора.

1. Автором разработана архитектура системы управления, мониторинга и сбора данных НТ1000.

2. Определено функциональное назначение, оптимизирован состав и сформулированы технические требования для электронных узлов (как блоков, разработанных участниками проекта, так и стандартной промышленной сетевой аппаратуры) на базе которых осуществлено построение системы сбора данных.
3. Автором были собраны и подготовлены к установке в оз. Байкал глубоководные модули системы сбора данных экспериментальных гирлянд в 2010-2011 годах и первого кластера НТ1000 2012-2014 гг.
4. Проверена в реальных условиях эксплуатации на оз. Байкал аппаратура, обеспечивающая управление работой, сбор данных и контроль состояния нейтринного телескопа НТ1000.
5. На протяжении последних семи лет автор принимал непосредственное участие в развертывании установок на оз. Байкал и дежурил на нейтринном телескопе во время проведения долговременных серий измерений.

Автор защищает.

1. Архитектуру систем управления, мониторинга и сбора данных НТ1000.
2. Аппаратурный комплекс глубоководных модулей системы сбора данных НТ1000.
3. Результаты испытаний системы сбора данных в оз. Байкал на первом кластере НТ1000 2013-2014 гг.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы представлены в виде докладов на Научных школах МФТИ (Школа-семинар студентов и молодых учёных «Фундаментальные взаимодействия и космология», Долгопрудный, 2010, 2012), докладывались на рабочих совещаниях коллаборации Байкал (2010 – 2014), и Международных конференциях и совещаниях: VLVNT (2009, 2011), MANTS (2011, 2013), ICRC (2011, 2013), Baikal-GVD Scientific Advisory Committee (2014).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в числе которых 9 статей в международных рецензируемых журналах, 7 статей в материалах международных научных семинаров и 2 статьи в материалах российских научных конференций. Список опубликованных работ приведён в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 135 страниц, включая 68 рисунков и 10 таблиц. Список цитируемой литературы включает 53 наименования.

Содержание работы.

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, основанной на особой роли нейтринной астрофизики высоких энергий в построении современной картины мира и понимании процессов, происходивших на ранних этапах образования Вселенной. Описывается метод глубоководного детектирования нейтрино в естественных средах и основные эксперименты, основанные на данном методе. Формулируется цель и основные задачи исследования. Излагается научная новизна полученных результатов диссертационной работы, перечисляются положения, выносимые на защиту, и указываются данные о публикациях и апробации работы.

В **первой главе** представлен исторический обзор развития и современного состояния экспериментов по детектированию нейтрино высоких энергий в естественных средах. Представлены основные принципы построения системы сбора данных нейтринных телескопов. Описаны проблемы, возникающие при организации больших распределённых подводных и подлёдных измерительных систем, и методы их решения в различных проектах по созданию крупномасштабных нейтринных

телескопов. Определяется оптимальный вариант организации системы сбора и передачи данных, а также обосновывается преимущество водной среды и естественного ледового покрова оз. Байкал для развёртывания современного нейтринного детектора кубокилометрового масштаба.

Во **второй главе** представлено подробное описание структуры и технической реализации системы сбора данных проектируемого телескопа НТ1000. Обосновывается конструктивная особенность организации сбора данных установки в виде разветвленной “древовидной” иерархической структуры. Рассматривается работа измерительного канала детектора, секции оптических модулей, гирлянды и кластера – законченного узла детектора, на базе которого могут проводиться физические исследования. Также данная глава посвящена вопросам системы фильтрации и передачи данных, синхронизации работы гирлянд и выработки триггера, управления аппаратным комплексом установки.

Третья глава посвящена долговременным натурным испытаниям системы сбора данных телескопа НТ1000 в оз. Байкал. В данной главе представлены результаты исследования параметров системы передачи данных. Оценивается надёжность и стабильность работы сетевых узлов глубоководной локальной сети. Также анализируется качество работы измерительных каналов и измеряется мертвое время каналов с учётом одинарной и двойной буферизации памяти плат АЦП. В итоговой части главы рассматривается комплексная проверка функциональности системы управления и сбора данных в режиме обслуживания калибровочных процедур детектора. Приводятся примеры трёх основных режимов калибровки: режим амплитудной калибровки каналов, режим временной калибровки каналов и режим временной калибровки межсекционных задержек.

В **Заключении** приводятся основные результаты работы и выражаются благодарности тем, кто оказывал помощь и содействие в реализации работы.

ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ УСТАНОВОК: ANTARES, AMANDA, ICECUBE, KM3NET, NT200+

1.1. Глубоководные нейтринные телескопы

В настоящее время в мире существуют пять, кроме Байкальского, финансируемых проектов нейтринных телескопов – IceCube(AMANDA) на Южном полюсе и ANTARES, NESTOR [9], NEMO [10], KM3NeT в Средиземном море. Анализ основных подходов и методов построения систем сбора данных перечисленных установок позволит выбрать оптимальные направления исследований в рамках представленной работы.

Базовыми элементами нейтринных телескопов являются фотодетекторы, заполняющие геометрический объем порядка $10^5 - 10^7$ м³ в случае телескопов первого поколения (NT200/NT200+, AMANDA, ANTARES), и объем порядка кубического километра в случае телескопов следующего поколения (IceCube, NT1000, KM3NeT). Прозрачная среда естественных природных водоёмов является не только мишенью, но также средой генерации и распространения черенковского излучения мюонов и ливней высоких энергий от источника до фотодетекторов нейтринного телескопа. Амплитудно-временной отклик фотодетекторов, а также топология отклика телескопа на черенковское излучение мюонов и ливней высоких энергий являются той информацией, которая позволяет выделить нейтринные события и определить параметры регистрируемых нейтрино.

Коллаборация ANTARES (Франция, Нидерланды, Италия, Россия, Испания, Германия) на протяжении последних десяти лет ведет работы по созданию глубоководного черенковского нейтринного телескопа в Тулонском заливе Средиземного моря, рассматривая его как промежуточный этап на пути создания телескопа кубокилометрового масштаба. Телескоп расположен на расстоянии 25 км от берега на глубине около 2400 м и содержит 900 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), сгруппированных в

триплеты и размещенных на 12-ти гирляндах длиной 350 м, разнесенных на 70 метров друг от друга. В 1999 году были проведены натурные испытания первого небольшого (с семью ФЭУ) действующего прототипа одиночной гирлянды телескопа, а в 2003 году предпринята попытка постановки штатной гирлянды с расчетом на её длительную эксплуатацию. Однако, из-за проникновения воды в один из системных модулей, гирлянда была эвакуирована с целью анализа причин потери герметичности и подготовки её к новым испытаниям. В конце февраля 2006 года выполнена повторная постановка модернизированной гирлянды, которая функционирует уже в течение нескольких лет. На протяжении 2006 – 2007 годов были развернуты еще девять гирлянд, а в марте 2008 года нейтринный телескоп ANTARES приступил к набору данных в проектной конфигурации. В течение 3-х первых месяцев набора данных в 2006 году, уровень собственного свечения воды, обусловленный процессами биолюминесценции, оказался существенно выше характерных значений, наблюдавшихся при тестовых измерениях в предыдущие годы. В результате, данные за этот период были исключены из последующего анализа. Опыт эксплуатации телескопа ANTARES дает однозначный ответ на вопрос о возможности создания детектора кубокилометрового масштаба в Средиземном море. Телескоп ANTARES примерно в 3-4 раза превосходит по своей светосиле Байкальский детектор НТ200 с точки зрения регистрации нейтрино при энергиях до 10-100 ТэВ, и сравним по своему эффективному объему с телескопом НТ200+ в задаче исследования диффузного потока нейтрино сверхвысоких энергий (>10 ТэВ) [11].

Коллаборация NESTOR (Греция, Германия, Россия, Швейцария, США) ведет работы по созданию нейтринного телескопа первого поколения в Средиземном море у берегов Греции с начала 90-х годов прошлого века. Следует отметить, что географические, гидрооптические и гидрологические свойства среды и уровень фона, обусловленный процессами

биолюминесценции, в месте расположения телескопа наиболее адекватны требованиям, предъявляемым к водной среде при создании нейтринного телескопа в Средиземном море. Наиболее значимым результатом, достигнутым в рамках работ по реализации проекта за последние 15 лет, является постройка в 2003 году прототипа уменьшенного масштаба (12 ФЭУ) одного этажа будущего детектора. После месяца эксплуатации этого детектора набор данных был прерван в связи с возникшими неполадками в системе энергопитания. В настоящее время коллаборация NESTOR ведет работы по созданию нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба в рамках эксперимента KM3NeT.

Коллаборация NEMO (Италия) несколько лет назад начала активные исследования района Средиземного моря вблизи Сицилии с целью развертывания там детектора, который послужит прототипом будущего кубокилометрового общеевропейского нейтринного телескопа. В декабре 2006 года была осуществлена постройка, и начались натурные испытания прототипа одной башни будущего детектора, содержащей 16 оптических модулей. Однако после месяца работы прототип потерял плавучесть и лег на дно.

KM3NeT является общеевропейским проектом по созданию нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба в Средиземном море. Первоначально условием финансовой поддержки проекта из общего бюджета стран ЕС являлось объединение усилий всех трех средиземноморских коллабораций (ANTARES, NEMO и NESTOR) для его разработки и реализации. На данный момент концепция будущей установки в целом сформирована: масштабный нейтринный детектор с суммарным инструментальным объемом более пяти кубических километров предполагают распределить по трем частям Средиземноморья: KM3NeT-Fr (Тулон, Франция), KM3NeT-It (Портопало-ди-Капо-Пассеро, Сицилия, Италия) и KM3NeT-Gr (Пилос, Пелопоннес, Греция). Полный детектор будет

содержать порядка 12000 стеклянных сфер высокой прочности, прикрепленных к 600 вертикальным струнам, высотой около одного километра. Каждая сфера оптического модуля (KM3NeT-DOM) будет содержать 31 фотоумножитель, и подключаться к берегу посредством высокоскоростной оптической линии. Береговые компьютерные кластеры установок KM3NeT-Fr, KM3NeT-It и KM3NeT-Gr будут выполнять первичную фильтрацию данных и поиск сигнала от космических нейтрино и, в дальнейшем, передавать их в потоковом режиме в общий центр обработки KM3NeT для хранения и последующего детального анализа сотрудниками коллаборации.

Наиболее интенсивно развивается в последние годы проект AMANDA (США, Швеция, Германия), а ныне IceCube, который предусматривает создание черенковского детектора на Южном полюсе путем вмораживания регистрирующих модулей в ледовый массив Антарктиды. Работы по реализации проекта AMANDA были начаты без предварительного изучения оптических свойств льда на больших глубинах и замороженная в 1994 году на глубине 800 м аппаратура (примерно треть планировавшегося детектора) оказалась практически неинформативной из-за интенсивного рассеяния света на пузырьках воздуха (длина рассеяния на этой глубине составляет примерно 10 см). В начале 1996 года после пересмотра проекта было осуществлено вмораживание 86-ти оптических модулей, размещенных на четырех гирляндах, на глубине (1.5-1.9) км. Оптические свойства льда на этих глубинах оказались значительно лучше. В последующие годы осуществлялось планомерное развертывание детектора, и в феврале 2000 года детектор AMANDA был введен в эксплуатацию в проектной конфигурации, содержащей 677 оптических модулей. На основе результатов анализа данных можно сказать, что для регистрации мюонов от атмосферных нейтрино эффективная площадь детектора AMANDA примерно в 5-10 раз превышает эффективную площадь Байкальского телескопа NT200, в то время

как для задачи поиска ливней от нейтрино сверхвысоких энергий их эффективные объемы довольно близки, ибо большая длина рассеяния байкальской воды (по сравнению с антарктическим льдом) позволяет идентифицировать сигнал от ярких объектов с гораздо больших, чем это возможно во льду, расстояний. Работы по созданию на Южном полюсе телескопа IceCube завершились к 2011 году. В 2013 году коллаборацией IceCube были опубликованы результаты по обнаружению более двух десятков событий от нейтрино высоких энергий астрофизического происхождения, в диапазоне нескольких ПэВ, что является наибольшим значением энергии нейтрино, обнаруженным на сегодняшний день [12].

1.2 ANTARES

Нейтринный телескоп ANTARES [13] расположен в Средиземном море на глубине 2500 м, приблизительно в 40 км к юго-востоку от французского города Тулон. Телескоп представляет собой трехмерный массив фотодетекторов (около 900 ФЭУ), укрепленных на тринадцати вертикальных гирляндах, разделённых на 25 этажей. Этажи соединены кабельными линиями, которые обеспечивают механическую прочность всей конструкции, а также позволяют передавать электроэнергию по электрическим жилам и информацию по волоконно-оптической линии связи. Каждая гирлянда зафиксирована на морском дне посредством якоря и поддерживается в вертикальном положении благодаря бую, расположенном в верхней части гирлянды длиной 450 метров. Одиннадцать из тринадцати гирлянд содержат в себе по 25 этажей с тремя сгруппированными детекторами черенковского света в каждом, размещенных на расстоянии 14,5 м друг от друга, начиная со 100 м над уровнем морского дна. На каждом этаже расположены по три глубоководные стеклянные сферы с 10” ФЭУ фирмы Hamamatsu в каждой, ориентированные своими осями вниз под углом 45 градусов к вертикали. Одна из гирлянд содержит 20 этажей, а последняя гирлянда оснащена

морским глубоководным оборудованием. В состав каждого этажа телескопа входит титановый контейнер, в котором находится электроника системы сбора данных и блок системы управления (slow control).

Система сбора данных детектора, базирующаяся на концепции “все данные на берег”, формируется из подводной (Off-shore hardware) и надводной частей (On-shore hardware), соединенных оптоэлектронным кабелем. Основная задача системы сбора данных телескопа ANTARES состоит в преобразовании аналоговых сигналов ФЭУ в такой формат данных, который был бы удобен для их физического анализа. Для достижения этой цели сигнал ФЭУ оцифровывается, все данные передаются в общий центр сбора информации, где происходит процесс фильтрации реальных физических событий от шумов и запись отфильтрованной информации для долговременного хранения и вариативной обработки различными триггерными схемами. Внешний вид одного этажа и блок-схема системы сбора данных телескопа ANTARES представлены на рисунке 1.2.1.

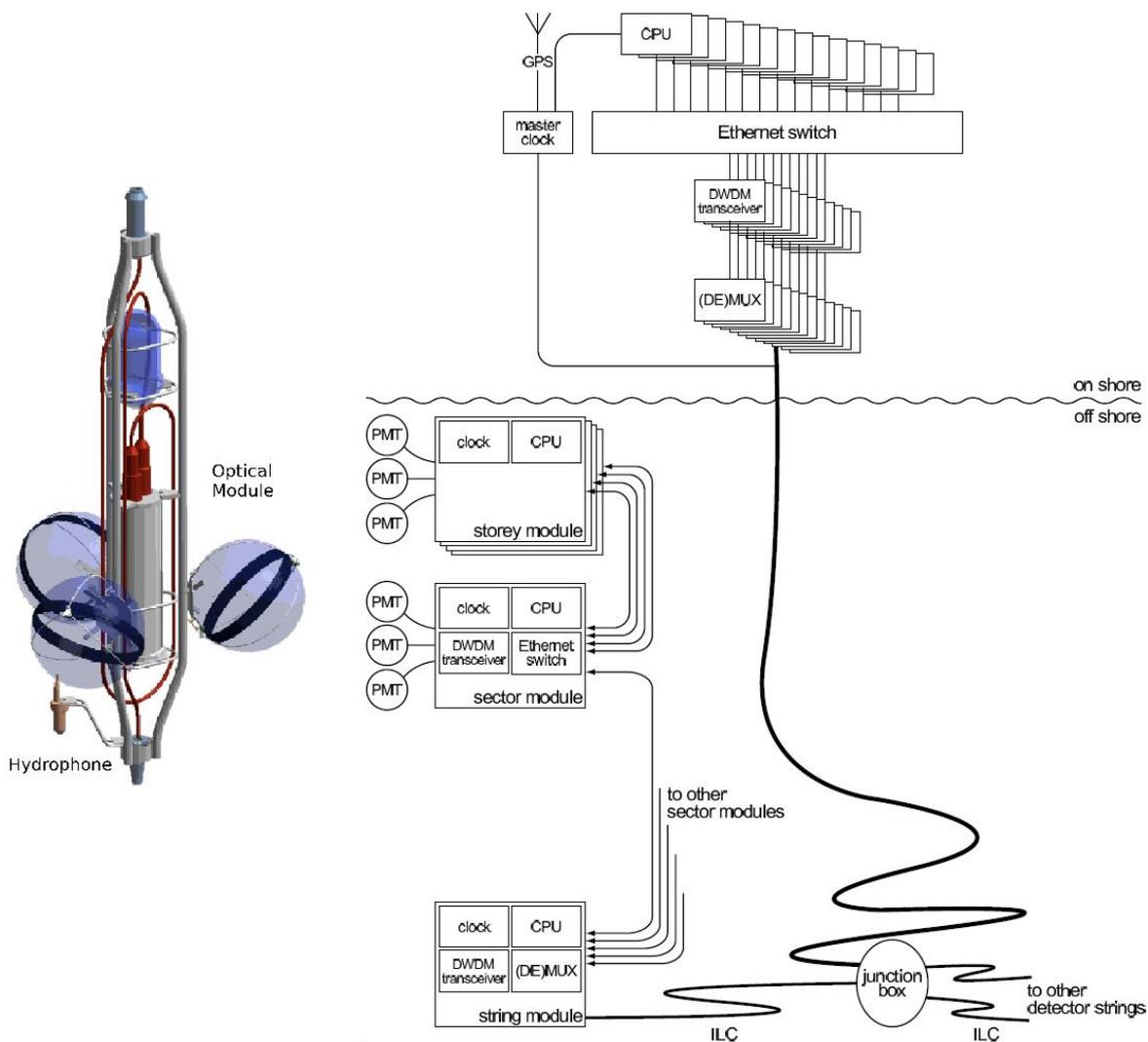


Рисунок 1.2.1. Внешний вид одного этажа и блок-схема системы сбора данных телескопа ANTARES

Электроника гирлянд сгруппирована в пяти секторах, каждый из которых состоит из пяти этажей. Каждый этаж состоит из трёх ФЭУ и электронного модуля этажа (storey module), включающего в себя компьютер и локальные часы системы калибровки. Модуль каждого пятого этажа именуется sector module и содержит дополнительно Ethernet коммутатор и DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) трансивер для передачи данных по оптической линии связи. Каждая гирлянда оснащена отдельным контрольным модулем (String Control Module). В нижней части гирлянды находится string module с оптическим демультиплексором ((DE)MUX). Все гирлянды присоединены к общему модулю коммутации (Junction box),

который соединяет подводную часть ANTARES с надводной частью одним единым кабелем.

Основное назначение электроники, расположенной на этаже гирлянды - оцифровка аналогового сигнала ФЭУ и дальнейшая передача оцифрованного сигнала. Для осуществления этих задач задействована схема, включающая по два ARS-чипа на каждый ФЭУ (ARS - Analog Ring String), электронный блок логической обработки сигнала (FPGA - Field Programmable Gate Array), блок памяти (64 Mb SDRAM), процессор, Ethernet-порт и часы. Оцифровка сигнала выполняется посредством ARS-чипов, при этом есть возможность гибкой настройки порога срабатывания и окна интегрирования. Обычно заданы параметры: для порога по напряжению - 0.3 фотоэлектрона; 35 нс - для времени интегрирования, что позволяет регистрировать все сигналы ФЭУ и исключает влияние электронных шумов. Часы (Local Clock) позволяют осуществить временную привязку оцифрованного сигнала. После срабатывания одного ARS-чипа в течение интервала 35 нс возникает "мертвое время" с длительностью 200 нс, что вызвано ограничением скорости передачи аналогового сигнала. С целью исключения эффекта "мертвого времени" в схему обработки включено второе устройство ARS, которое подключается сразу же после наступления "мертвого времени" у первого. И только наступление "мертвого времени" у второго ARS-чипа начинает влиять на эффективность регистрации. В исключительных случаях (например, при больших или двойных импульсах) сигналы могут оцифровываться с регулируемой частотой от 150 МГц до 1 ГГц. Блок-схема основных узлов электроники модуля этажа представлена на рисунке 1.2.2.

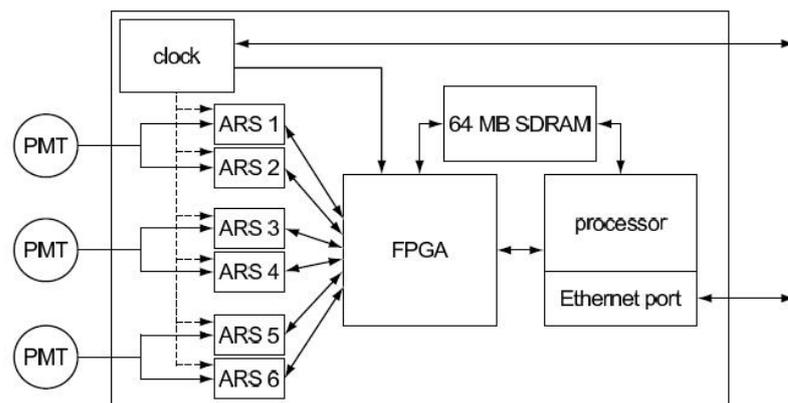


Рисунок 1.2.2. Блок-схема основных узлов электроники модуля этажа

Система вывода информации с ARS-чипов интегрирована с системой FPGA (Xilinx Virtex-E XCV1000E). При помощи FPGA оцифрованные данные загружаются в буфер памяти (64 MB SDRAM) блоками, длительностью от 10 до 100 мс. Длительность блоков пересчитывается с учётом заданного периода отсчёта локальных часов. Процессоры модуля этажа (Motorola MPC860P), являющиеся связующим звеном между ARS-чипами и потоковой системой сбора данных, имеют порт Ethernet (100 Mb/s) и работают под управлением операционной системы VxWorks. Передача данных осуществляется по протоколу TCP/IP.

В основании каждой гирлянды размещён специализированный модуль для обеспечения работы систем питания и медленной связи, калибровки, передачи данных и контроля временной синхронизации. Передача данных между берегом и подводной частью телескопа основана на использовании метода волнового уплотнения (DWDM - dense wavelength division multiplexing technique), используемом в оптической связи для передачи различных информационных потоков по одному общему волокну. Передача реализуется с помощью DWDM-трансивера. Таким образом, для каждой гирлянды используется пять DWDM-каналов (для пяти секторных модулей) плюс один канал для нижнего модуля гирлянды.

Гирлянды соединены с берегом через один общий модуль коммутации - Junction box, к которому подключён электрооптический кабель длиной 40 км. Береговая часть электронного оборудования содержит мультиплексоры и демультимплексоры для каждой гирлянды. Данная система связи также используется для передачи команд инициализации и конфигурирования телескопа. Посланные с берега в мультиплексированном виде команды декодируются в каждом нижнем модуле гирлянды и далее исполняются.

Процесс сбора данных осуществляется как подводными процессорами, так и береговыми в компьютерном кластере. Существует три основных типа процесса: процессы передачи данных; процессы, ответственные за функционирование детектора; процессы, ответственные за сбор данных и их обработку. Все процессы синхронизованы и функционируют независимо. Для синхронизации процессов применяется специализированная программная машина идентификации состояния процессов и переходов между процессами. Переход между состояниями сопровождается действиями, являющимися специфическими для каждого из возможных процессов. Программная машина требует исполнения необходимых действий, специфицированных для каждого из состояний и процессов перехода между состояниями. Каждый вид данных сопровождается специальной меткой, что позволяет передавать различные виды данных только процессам, специализированным для данного вида действий. Управление передачей данных основано на требовании не допустить превышения загрузки общего Ethernet-канала при функционировании управляющей программы более чем на 5% от максимально допустимой пропускной способности (~ ГБит/с). Такой подход позволяет оптимизировать соотношение между ресурсами, требуемыми для управляющих программ и необходимых для надёжной передачи и сохранения данных. Важный момент в программной организации бесперебойной работы системы - обеспечение иерархии подчиненности при выполнении команд управления, сбора и

сохранения данных, конфигурирования, распараллеливания процессов. Продуманная иерархия позволяет интеллектуально обработать возможные ситуации при одновременном исполнении сотен процессов.

Резюмируя, можно выделить основные особенности архитектуры системы сбора данных телескопа ANTARES. Во-первых, система сбора данных базируется на концепции “все данные на берег”, что минимизирует потери реальных физических событий и позволяет проводить параллельный отбор событий с различными триггерными условиями для разных физических задач, таких как поиск нейтрино от локальных астрофизических объектов, поиск тёмной материи, магнитных монополей и других экзотических частиц. Однако данная концепция накладывает существенные ограничения на пропускную способность линии передачи данных, что в совокупности с многокилометровыми расстояниями от центра данных до телескопа позволяет применять исключительно волоконно-оптические линии связи. Вдобавок, обработка больших потоков сырых данных требует значительных аппаратных затрат и организации распределённой системы вычислений на компьютерных кластерах. Второй особенностью системы сбора данных является оцифровка сигналов в центре связки из трёх оптических модулей. Это позволяет уменьшить влияние длинных кабельных линий на искажения и временные задержки аналоговых сигналов ФЭУ. Третья особенность тесно связана с первой и заключается в применении технологически сложных и финансово затратных электрооптических линий коммуникации, что повышает стоимость проекта и значительно усложняет монтажные работы на этапах развёртывания установки, а также в процессе ремонта и обслуживания подводного оборудования при долговременной эксплуатации детектора.

1.3 AMANDA

В эксперименте AMANDA (Антарктический Детектор Мюонов и Нейтрино) природный антарктический лед используется одновременно и как мишень, и как среда для черенковского сигнала. Детектор представляет собой решётку вертикальных гирлянд, несущих оптические модули (ОМ), замороженные в лед Южного Полюса на глубине около 2 км. Оптический модуль детектора содержит ФЭУ 8' Hamamatsu R5912-2, который защищён от избыточного давления высокопрочной глубоководной стеклянной сферой. Гирлянды с ОМ опускаются в шахты, вплавленные во лёду с помощью распыляемой под высоким давлением горячей воды. Образованная таким способом шахта с горячей водой замерзает в течение 35-40 часов, после чего гирлянды с ОМ оказываются жестко зафиксированными. В базисном проекте к каждому ОМ должен подводиться кабель, по которому одновременно происходит передача сигнала и подача высокого напряжения на фотоумножитель. Вследствие невозможности проведения ремонтных работ или модернизации уже замороженных в лёд гирлянд, конструкция подледных компонентов детектора должна быть настолько простой, насколько возможно, а система по сбору и обработке данных в такой конфигурации будет находиться в лаборатории на поверхности. Простота конструкции подледной части детектора делают его крайне надёжным.

На рисунке 1.3.1 представлена конфигурация детектора AMANDA [14, 15]. Находящийся на глубине 800 - 1000 м детектор AMANDA-A был развернут в 1993-1994 гг. как пробный вариант. Измерения оптических свойств льда для AMANDA-A показали, что высокая концентрация пузырьков воздуха во льду на этой глубине приводит к сильному рассеянию света, что делает невозможным точное восстановление трека детектируемых частиц.

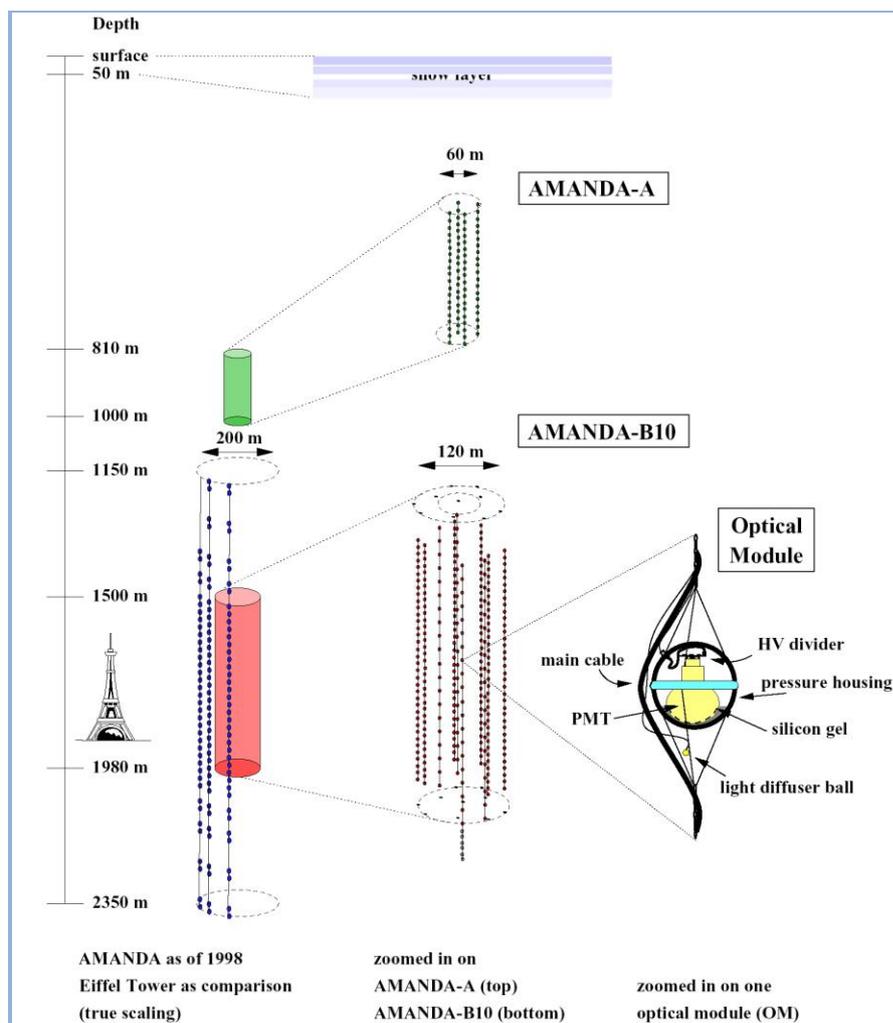


Рисунок 1.3.1. Детектор AMANDA 1998 г. Рисунок слева выполнен с соблюдением масштаба, справа - увеличенное изображение детекторов AMANDA-A и AMANDA-B10. На вставке справа показан оптический модуль

В связи с дефектом льда на малых глубинах в 1995-1996 гг. на глубине 1545 - 1978 м бы развернут детектор AMANDA-B, состоящий из 80 оптических модулей, расположенных на 4 гирляндах. В 1996-1997 гг. детектор был дополнен 216 ОМ, расположенных на 6-ти гирляндах. Этот детектор, состоящий из 10 гирлянд, был назван AMANDA-B10. В 1997-1998 гг. детектор AMANDA-B10 был дополнен 3-мя дополнительными гирляндами, вмороженными на глубине 1150-2350 м. Их задачей состояло, во-первых, в исследование свойств льда одновременно на малых и больших глубинах для нужд будущего кубокилометрового детектора, во-вторых гирлянды образовывали часть будущего детектора AMANDA-2 [16],

который должен был содержать около 700 Ом, и, в-третьих, они использовались для тестирования передачи данных по оптоволоконным линиям.

Размещение нейтринного детектора на Южном Полюсе имеет ряд преимуществ, в первую очередь связанных с уникальным географическим положением и свойствами среды. Телескоп, расположенный на Южном Полюсе, позволяет регистрировать нейтрино, прилетевшие из северной полусферы, таким образом, дополняя данные других станций. Сам антарктический лёд является стерильным веществом, поэтому источником фона могут быть только темновой шум ФЭУ и распады ^{40}K в стеклянных сферах оптического модуля, что дает для нашего случая темп счёта канала от 0.1 до 1 кГц. Эксперименты в океанах и озерах имеют дело с уровнем шума 100 кГц и более, вследствие биолюминесценции и распадов ^{40}K (25-30 кГц в пересчете на площадь используемого в AMANDA 8' ФЭУ). Это обстоятельство не только облегчает постановку экспериментов, в которых используются темпы счета, например поиск низкоэнергитичных нейтрино от сверхновых или поиск гамма-всплесков, но и снижает уровень случайных срабатываний в мюонных событиях, что является важным фактором для выработки триггерных условий и восстановления траекторий детектируемых частиц.

Вследствие наличия в течение всего года ледового покрова над детектором, AMANDA может работать в паре с наземной установкой ШАЛ, расположенной на поверхности. Кроме проведения совместных сеансов измерений, информация, полученная от установки ШАЛ, может быть использована для калибровки детекторов AMANDA.

Немаловажным фактором успешного строительства и последующей долговременной работы детектора AMANDA является наличие на полярной станции Амундсен-Скотт развитой инфраструктуры. Спутниковая связь, обеспечение электроэнергией, транспорт – все это развивалось и

тестировалось в течение многих лет. Технология бурения шахт и размещение в них гирлянд с оптическими модулями за годы также претерпела множество модернизаций и улучшений. Сейчас необходимо немногим более 5-ти дней для бурения 2000 м шахты и погружения в неё гирлянды с модулями.

1.4 IceCube

Нейтринная обсерватория IceCube располагается вблизи Южного полюса на полярной станции Амундсен-Скотт и является дальнейшим развитием проекта AMANDA. Как и его предшественник, детектор AMANDA, IceCube состоит из множества замороженных в лёд сферических оптических датчиков, называемых Цифровыми Оптическими Модулями (DOMs), в каждом из которых размещаются ФЭУ и плата оцифровщика сигналов с процессором, позволяющая передавать оцифрованные данные на поверхность. Строительство IceCube [17, 18] было завершено к концу 2010 года. На рисунке 1.4.1 представлено схематическое изображение архитектуры детектора IceCube.

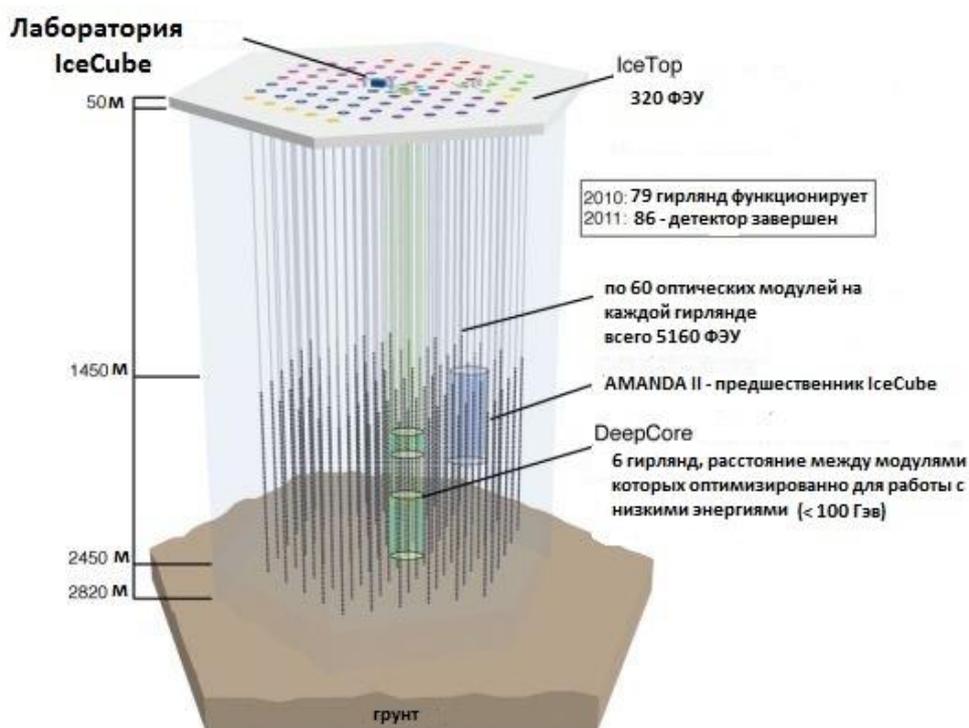


Рисунок 1.4.1. Базовая конфигурация IceCube

IceCube состоит из двух основных компонентов: ледовый массив “InIce” и массив на поверхности “IceTop” [19]. Комбинирование этих компонентов позволяет изучать космические лучи в большом диапазоне энергий. В качестве рабочего тела детектора и среды для развертывания установки используется 2800-метровая толщина полярных льдов. Установка IceCube состоит из собранных в решетку 86 вертикальных гирлянд, замороженных в лёд. Каждый гирлянда содержит 60 DOM модулей, равномерно распределенных на глубине от 1450 до 2450 метров с шагом 17 метров. В центре IceCube находится массив DeepCore - шесть гирлянд с более компактным расположением оптических модулей в наиболее чистом льду вблизи дна, для более эффективной регистрации событий с энергиями менее 100 ГэВ.

Система сбора данных детектора IceCube разработана главным образом для оптимальной фиксации и записи с высокой точностью самых разнообразных сигналов во всем динамическом диапазоне ФЭУ. Для достижения этой задачи архитектура системы сбора данных децентрализована. Опыт эксперимента AMANDA выявил, что связь по коаксиальному кабелю и по витой паре имеет ограничение по пропускной способности, а передача аналогового сигнала ФЭУ по оптоволокну ограничена по динамическому диапазону. Поэтому оцифровку событий в IceCube было решено проводить индивидуально в каждом модуле DOM, а затем передавать уже оцифрованные данные в лабораторию на поверхности. Модули DOM в IceCube напоминают собой группу спутников, соединённых между собой и лабораторией на поверхности посредством медных витых пар. Передача данных, а также питания модулей происходит по этим витым парам. Этот децентрализованный подход в конфигурации детектора не оставляет возможности для какого либо доступа и технического обслуживания электронных подсистем установки, что в целом оправданно невозможностью извлечения замороженных гирлянд на поверхность. Таким

образом, в процессе инженерной разработки детектора основными критериями были надёжность и возможность перепрограммирования электроники.

Модуль DOM и процесс оцифровки сигнала

Основными элементами модулей DOM являются 25 см ФЭУ (Hamamatsu R7081-02), модуль блока высоковольтного питания (2 кВ), главная плата модуля (MB), плата задержки сигнала и высокопрочная стеклянная сфера толщиной 13 мм. На рисунке 1.4.2 показан модуль DOM и его компоненты.

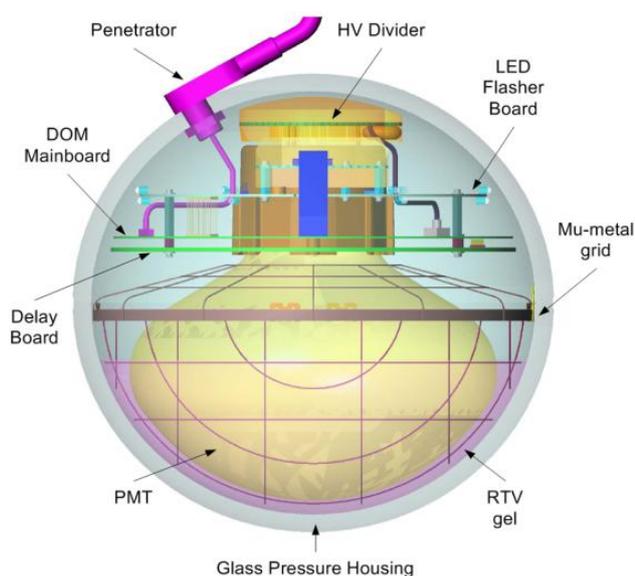


Рисунок 1.4.2. Модуль DOM и его компоненты

Главная плата цифрового модуля DOM, которую можно назвать "центральным процессором" модуля, получает сигналы от ФЭУ. После их оцифровки, DOM MB формирует полученные данные и создаёт пакет события, именуемый "Hit", который содержит в себе временную метку и дорожку с оцифрованным импульсом, размером от 12 до сотен байт. Запись сигналов с высоким временным и амплитудным разрешением осуществляется на базе специализированных интегральных схем Analog Transient Waveform Digitizer (ATWD). Данные заносятся в буфер, пока DOM MB не получит запрос на передачу данных на поверхность. В дополнение к системе захвата и оцифровки сигнала, в цифровых оптических модулях

работает высокостабильный осциллятор, который позволяет добиться точной временной синхронизации данных, и в то же время создаёт незначительное влияние на пропускную способность сети. Блок-схема главной платы DOM (DOMs Mainboard) представлена на рисунке 1.4.3.

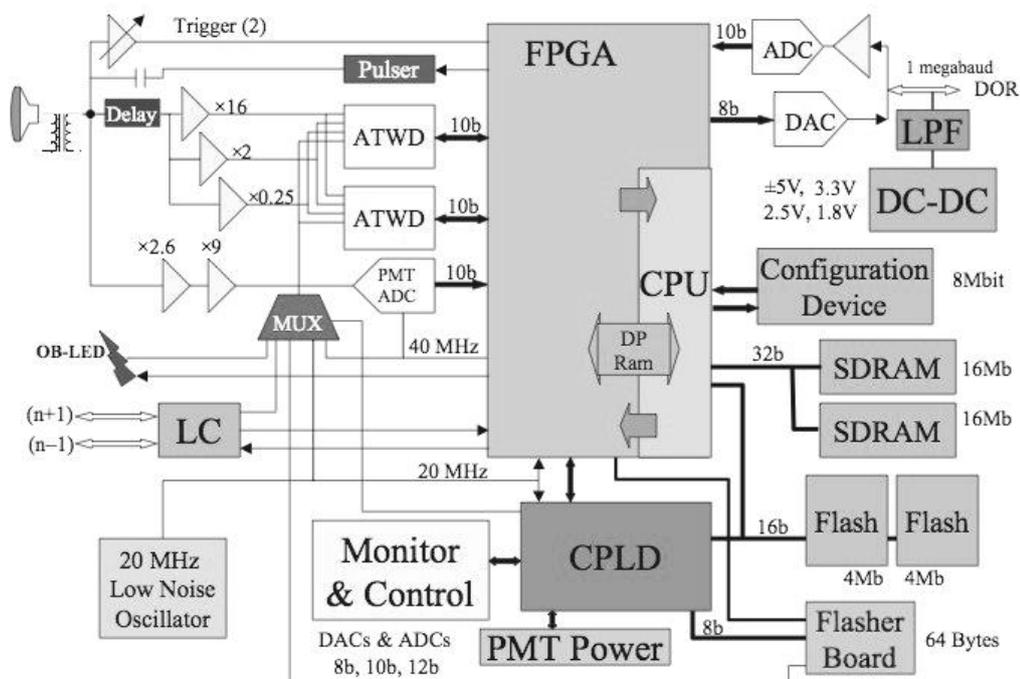


Рис. 1.4.3. Блок-схема главной платы DOM (DOMs Mainboard)

Аналоговый сигнал ФЭУ через коаксиальный разъём приходит прямо на усилитель для триггерной схемы основной платы модуля. С этого же входа сигнал, пройдя через 75 нс задержку, разводится на три широкополосных усилителя (x16, x2 и x0.25), сохраняющие форму сигнала с минимальными потерями. Сигналы с выхода каждого из усилителей попадают на входы оцифровщика сигналов ATWD. Входной сигнал оцифровщика ограничен от 0 до 3 вольт. ATWD - это специально разработанная микросхема для оцифровки аналоговых сигналов с четырьмя входами. Её аналоговая память хранит 128 сэмплов для каждого канала. Три усиленных сигнала с ФЭУ подаются на три первых входа оцифровщика. Четвертый вход соединен с коммутатором, позволяющим ему выполнять несколько функций, в частности калибровки скорости сэмплирования сигнала с помощью

внутреннего устройства отсчёта времени, так и снятие сигнала с динодов. В состоянии покоя оцифровщик потребляет мало электричества и начинает преобразовывать сигнал только после срабатывания триггера.

Сигнал с дискриминатора ФЭУ инициирует последовательность считывания формы импульса оцифровщиком. Результат сохраняется в 128 аналоговых ячейках для каждого из 4 каналов. После окончания считывания сигнала, цифровое преобразование является опциональным и инициируется логической схемой оцифровщика при соблюдении логических условий, определяемыми локальными настройками схемы совпадений и режимом работы детектора. Если условия запуска не соблюдены, микропрограмма оцифровщика сбрасывает ячейки за два такта 40 МГц таймера. Если триггерные условия оцифровки достигнуты, то оцифровщик преобразовывает аналоговый сигнал, сохраненный в 128 ячейках. Цифровая информация сохраняется в 128-ми словном сдвиговом регистре.

После преобразования данные попадают в ПЛИС (FPGA). В оцифровщике канал пришедший с усилителя $\times 16$ преобразовывается первым. Для хорошего перекрытия больших сигналов канал с усилением $\times 2$ оцифровывается если в наибольшем канале больше 768 отсчетов. Если при этом несколько каналов переполняются, то оцифровывается вход с $\times 0.25$. Все процессы по оцифровке занимают 29 мкс. Для уменьшения мертвого времени в модуле стоят два оцифровщика, причем пока один занимается оцифровкой, второй в это время доступен для считывания формы сигнала.

Представление оцифрованного сигнала включает в себя 128 10-битных точек, а также 54-битную временную метку, при этом, если сигнал выходит из динамического диапазона одного канала, происходит оцифровки сигнала с канала с более низким коэффициентом усиления, что приводит к добавочным 1280-ти битам и так далее. Без сжатия и фильтрации поток информации при поступлении сигналов с фотокатода со скоростью в 300 Гц составит не менее 50 Кб/с, большинство из которой составляют шумовые события. Для

уменьшения ширины потока используются принципы отбора событий, локальных совпадений и отбрасывания нулей.

Отбор событий реализован непосредственно в оптических модулях и заключается в сопоставлении одиночным фотоэлектронам, превалирующим в потоке информации, только амплитуды и временной метки взамен полной 170-ти (или более) байтной картине. После такой обработки оцифрованный одиночный импульс занимает 8 байт. Хотя для многоэлектронных событий могут потребоваться все заявленные 170 байт на событие, их доля не велика. Предполагая их частоту равной 5% от всех событий, при скорости счёта 300 Гц, суммарный с поток данных с канала с учётом отбора не будет превышать 5 Кб/с.

Метод локальных совпадений основан на отсутствии корреляции откликов соседних модулей при срабатывании от собственных случайных шумов ФЭУ. Так как скорость темнового счёта в модуле приблизительно в 100 раз превышает скорость счёта индуцированного частицами с высокой энергией, этот метод снижает ширину потока данных примерно в 10 раз. При этом доля шума среди прошедших отбор данных приблизительно 75%, а среди данных отбор не прошедших – порядка 99%. Для реализации метода, каждый цифровой оптический модуль соединён с соседним двадцатиметровой витой парой, по которой могут передаваться короткие сигналы шириной 50 нс. Программно настраиваемая вентиляционная матрица позволяет производить запись сигнала только в случае выполнения определённых требований локальных совпадений.

Система связи

Основными требованиями, предъявляемыми к системе связи телескопа IceCube, были высокая надёжность, экономичность и операционная гибкость. После длительных тестов и анализа, полностью медная проводная коммуникационная сеть была признана подходящей в рамках данных требований. Таким образом, вся связь между отдельными оптическими

модулями и лабораторией на поверхности осуществляется по витой паре с диаметром жилы порядка миллиметра и волновым сопротивлением пары в диапазоне 100 Ом. За счёт подключения сразу двух цифровых оптических модулей к одной витой паре, громоздкость и стоимость кабельных коммуникаций существенно уменьшается. Процесс развертывания установки также упрощается за счет такой методики, поскольку количество соединительных разъёмов на поверхности, которые требуют проверки, уменьшается вдвое. Ширина информационного канала при парном подключении модулей к одной витой паре должна быть не менее 10 Кб/с, что ниже технических возможностей витой пары на расстояниях в 2-3 километра, по которой достигается скорость 50 Кб/с со штатным оборудованием цифрового модуля DOM.

Одной из особенностей системы передачи данных детектора IceCube является отказ от использования оптоволоконных каналов связи, которые хотя и могли бы предоставить более быстрый канал для аналогового сигнала, совершенно не обязательны для передачи низкоинтенсивного потока оцифрованных данных. К тому же в подготовительных экспериментах попытки использования оптоволокна потерпели неудачу вероятно из-за эффекта промерзания. Искажение сигнала либо вовсе его отсутствие наблюдалось повсеместно приблизительно на 5-15% всех каналов, что представляет собой недопустимый коэффициент потери информации для установки класса IceCube. В целях экономии, упрощения и ускорения процесса развёртывания установки, а также повышения надёжности, было решено исключить оптоволокно из установки полностью.

1.5 KM3NeT

Разработка, создание и эксплуатация нейтринных телескопов как в естественных водоёмах (DUMAND [20], Baikal, ANTARES, NEMO, NESTOR) так и во льду (AMANDA, Ice-Cube) дало возможность получить

большой объем ценной информации и опыта, что позволило европейской коллаборации KM3NeT [21] начать проект крупномасштабного нейтринного детектора кубокилометрового масштаба в Средиземном море. Одним из главных условий успешной работы такого детектора является достижение высокой надежности функционирования всех его элементов, работающих в агрессивной морской среде. Помимо высокого давления воды (до 5 км глубины), необходимо учитывать такие неблагоприятные факторы, как высокие фоновые шумы от биолюминесценции и распадов ^{40}K , сильные подводные течения, большая удалённость подходящих мест размещения детектора от берега. Хотя, по сравнению с телескопами, вмороженными в лед, у средиземноморского проекта есть возможность ремонта или замены глубоководных частей установки, при работе в открытом море это требует больших усилий и времени. В результате длительных исследований и анализа различных подходов к построению системы сбора данных нейтринных телескопов, коллаборация KM3NeT остановила свой выбор на концепции “все данные на берег” и использовании многокомпонентного цифрового оптического модуля с 31 3' ФЭУ и оцифровкой сигнала непосредственно внутри модуля. Схематический вид базовой конфигурации телескопа KM3NeT [22] представлен на рисунке 1.5.1.

Одна детектирующая гирлянда будет состоять из 20 цифровых оптических модулей (KM3NeT-DOM) [23], расположенных на расстоянии 40 м друг от друга и поддерживаемых двумя параллельными тросами. В полной конфигурации детектора планируется развернуть около 600 гирлянд, содержащих 12000 цифровых оптических модулей. В зависимости от места положения телескопа, оптические модули будут располагаться на глубинах от 2500 м до 5000 м, достигая при этом полного инструментального объёма в несколько кубических километров. Огромный поток данных от всех цифровых модулей будет передаваться на береговую станцию с помощью волоконно-оптической сети, где, пройдя первичную фильтрацию и сжатие,

отправится по сети Интернет в центральное хранилище данных для дальнейшей обработки.

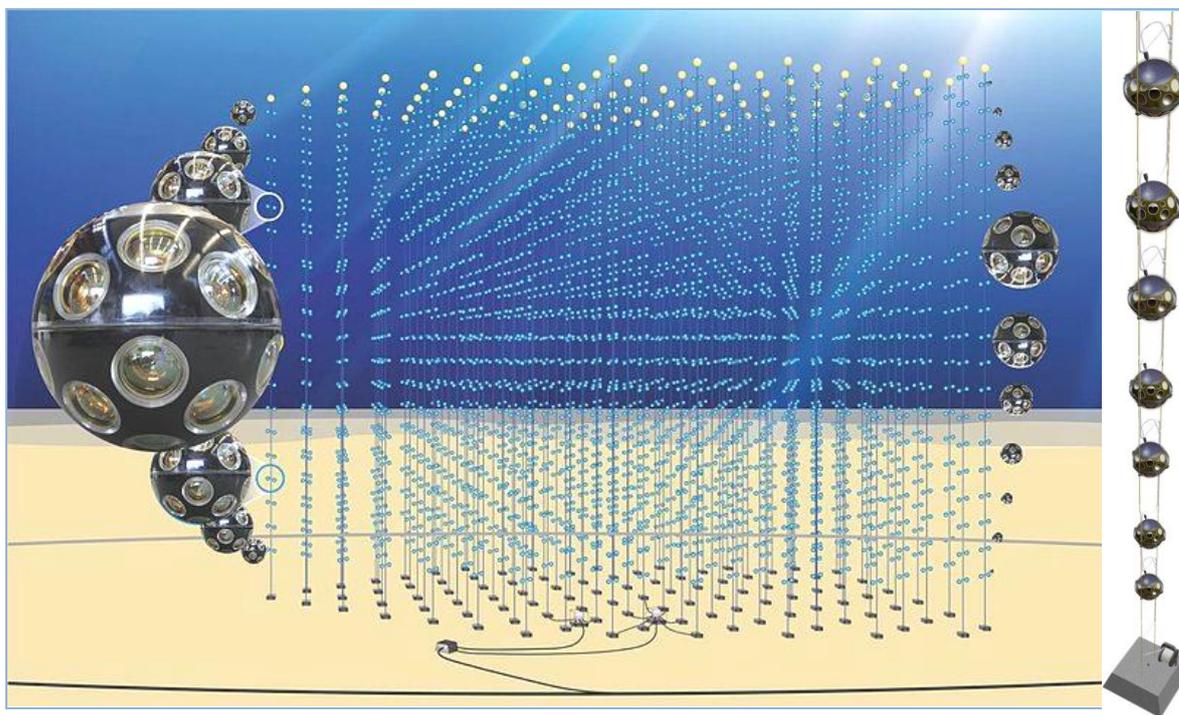


Рисунок 1.5.1. Базовая конфигурация КМЗNeT и внешний вид одной гирлянды цифровых оптических модулей (DOM)

Специально разработанный гибридный оптический модуль с 31 ФЭУ небольшой площади, являющийся элементарной детектирующей единицей будущей установки, имеет ряд преимуществ перед системами со стандартной схемой компоновки и одним большим ФЭУ: большая суммарная площадь фотокатода (1260 см^2), нечувствительность небольших ФЭУ к электромагнитному полю Земли, хорошее различение одиночных фотонных событий от многофотонных за счёт сегментация изучаемого пространства, низкий уровень снижения эффективности работы модуля в случае выхода из строя одного из ФЭУ. На передней части каждого ФЭУ предусмотрено размещение оптического концентратора для дополнительного увеличения площади сбора света на 25%. Цифровой оптический модуль также содержит калибровочные датчики наподобие акустических пьезо-датчиков, компас и инклинометр. Вся электроника для считывания и оцифровки сигналов ФЭУ,

а также калибровки датчиков расположена внутри 17' стеклянной сферы оптического модуля, которая имеет только один разъём для подключения к магистральной кабельной линии блока детектирования (Master Module), находящегося в нижней части гирлянды.

Система сбора данных

Основной задачей системы сбора данных детектора KM3NeT является конвертация аналоговых сигналов ФЭУ в массив данных, пригодных для последующего анализа. Кроме того, глубоководная инфраструктура содержит большое количество оборудования для различной научно-исследовательской деятельности, поток данных от которого также необходимо включать в общую систему считывания. Оптимальным для системы сбора данных было выбрано решение, когда вся оцифрованная информация, передаваемая на берег, обрабатывается в режиме реального времени.

Предполагая, что 64 бит достаточно для описания однофотонного события, и учитывая ожидаемую суммарную площадь фотокатодов всех ФЭУ, общий поток данных может достигать до 0,2 Тб/с. Такой поток данных в береговую лабораторию могут поддерживать несколько оптических линий с использованием технологии спектрального уплотнения каналов, позволяющей одновременно передавать несколько информационных каналов по одному оптическому волокну на разных несущих частотах. Однако при таких объемах данных встаёт вопрос об их фильтрации, поскольку их хранение требует на несколько порядков более вместительных устройств накопления данных, чем те, что доступны в настоящее время. В основе механизма фильтрации лежит метод выделения достаточно редких нейтринных (мюонных) сигналов из шума, используя пространственно-временную корреляцию событий в режиме реального времени.

В первом приближении мюонное происхождение детектируемого сигнала определяется минимальным заданным количеством

пространственно-временных корреляций превышения порогового уровня входного сигнала на ФЭУ (обычно 0.3 ф.э.). В береговом центре поток данных должен быть ужат в 10^4 раз, чтобы его можно было передавать в исследовательские центры Европы в режиме реального времени.

Оцифровкой сигналов ФЭУ занимаются специализированные интегральные схемы (ASIC), разработанные с учётом ряда требований: временное разрешение 2 нс, динамический диапазон порядка 100 ф.э. в окне 25 нс, различие двух импульсов на интервале менее 25 нс, общая процедура обработки данных для одно- и многофотонных событий, обеспечение скорости счета 250 кГц без мёртвого времени, энергопотребление менее 500 мВт. Система считывания оцифровщика, выполненная в однокристалльной компоновке, позволяет осуществить второй уровень обработки данных, к которому относится сжатие пакетов и обеспечение интерфейса связи с электроникой системы передачи данных. Обработка сигнала ФЭУ основывается на пороговом принципе, проиллюстрированном на рис 1.5.2.

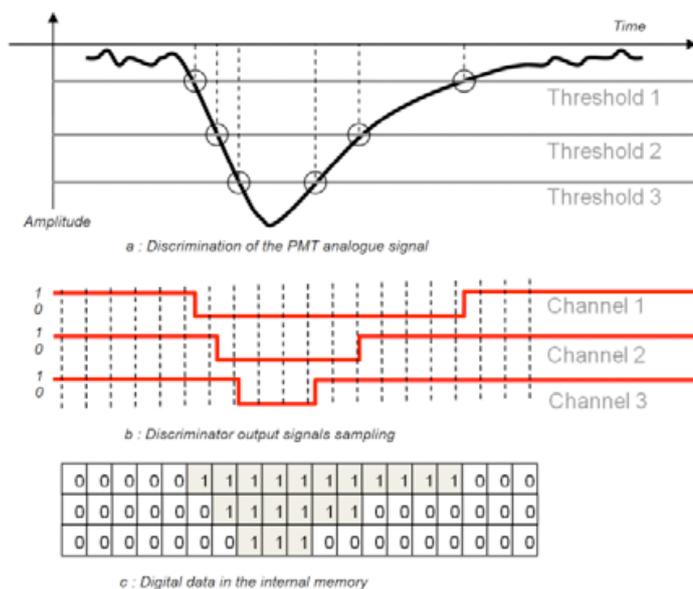


Рисунок 1.5.2. Пороговый принцип оцифровки сигнала ФЭУ

Аналоговый сигнал от ФЭУ сравнивается с несколькими пороговыми уровнями. Значения этих соответствий хранятся в памяти с фиксированным

интервалом времени между выборками. Использование амплитудной информации из пороговых значений и временных меток оцифрованных данных позволяет провести реконструкцию исходного сигнала.

В плату оцифровщика входят быстрые компараторы и программируемые 10-битные цифро-аналоговые преобразователи. Блок памяти выборок включает в себя модуль автоподстройки задержки (DLL), для гарантии точности времени выборки, и два банка памяти (рисунок 1.5.3). В блоке памяти используется принцип FIFO, чтобы упорядочить поток данных и сохранить их в буфере для последующего считывания. Также в схему входит 16-битный счётчик для проверки синхронизации с системой сбора данных, блок “отбрасывания нулей” и драйвер медленной связи для программирования регистров.

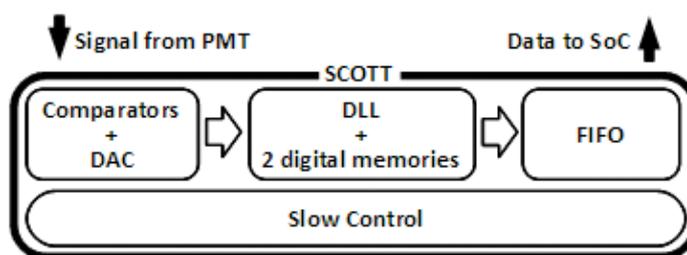


Рисунок 1.5.3. Блок-схема платы оцифровщика сигналов ФЭУ

Интегральная схема способна производить многоканальную оцифровку аналогового сигнала от целой группы ФЭУ. В случае резкого увеличения потока данных, в основном в случае люминесценции биологического происхождения, должна быть возможность сохранять данные на протяжении сотен миллисекунд непосредственно на интегральной схеме для последующей пересылки на берег без потери данных.

Передача данных

Каждая гирлянда проектируемого телескопа КМЗNeT содержит в себе большое количество цифровых модулей, расположенных один над другим на расстояниях в сотни метров [24]. Из-за большого расстояния до берега единственный способ передачи данных от каждого модуля – оптоволоконные

линии. Цифровой модуль транслирует данные на своей несущей частоте, что позволяет технология спектрального уплотнения каналов (DWDM), таким образом, уменьшая количество и длину оптоволоконных соединений в установке для повышения надежности системы и уменьшения её стоимости.

Поток данных крайне ассиметричен – на берег идет колоссальная масса информации от модулей, обратный поток пренебрежимо мал. Основную часть потока данных в сторону береговой лаборатории занимают оцифрованные сигналы оптических модулей (200 Мб/с), информация от акустических датчиков, необходимая для определения пространственного положения модулей занимает только 10 Мб/с, остальная же аппаратура добавляет лишь порядка нескольких сотен Кб/с в общий поток. Наилучшим образом для работы с разнообразными периферийными интерфейсами и большим потоком данных от детекторов подходят электронные системы на базе программируемых вентильных матриц (FPGA). Большое количество входных и выходных каналов, а также поддержка множества стандартов способствуют её легкой интеграции с различными устройствами. Преобразование электрического сигнала в оптический будет осуществляться посредством отражающего электро-абсорбирующего модулятора (REAM). Ключевой особенностью этого устройства является гибкость изменения скорости потока данных (до 10 Гб/с) и отсутствие активного передатчика, что повышает общую надежность системы. Поскольку REAM представляет собой своего рода зеркало, способное включаться или выключаться под воздействием электрического модулированного сигнала, оно отражает входящий волны, следовательно, необходима только одна длина волны для передачи данных в обоих направлениях.

Система передачи данных спроектирована с учётом поддержки до 6400 цифровых оптических модулей, объединённых по 20 штук в гирлянду с одним мастерным модулем (Master Module) в основании. Подразумевается, что по 80 различным магистральным оптоволоконным каналам будет

транслироваться сигнал на 80 несущих частотах. Такое количество оптических волокон легко помещаются в подводный кабель, рассчитанный на 96 волокон, а оставшиеся 16 волокон могут быть использованы для калибровки установки или транслирования сигналов от других подводных датчиков. Блок-схема системы передачи данных КМ3NeT представлена на рисунке 1.5.4.

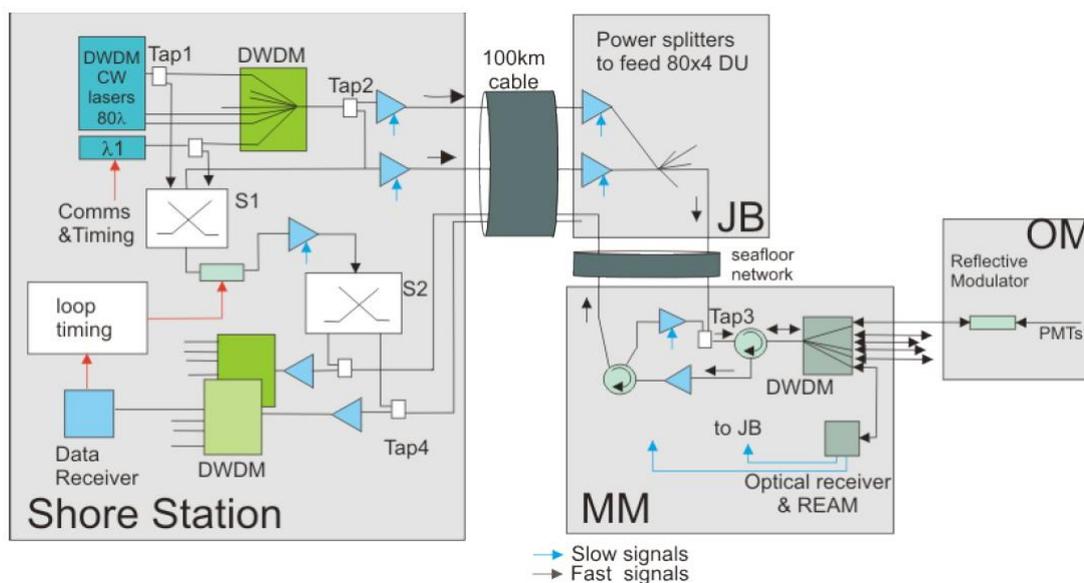


Рисунок 1.5.4. Блок-схема системы передачи данных телескопа КМ3NeT на основе технологии DWDM

Свет от 80 отдельных оптических источников, расположенных на берегу и работающих на различных частотах с разносом каналов 50 ГГц (0,4 нм), спектрально уплотняется в единый сигнал. После дублирования, сигнал подаётся на два усилителя, которые передают как основной, так и запасной (дублирующий) световой сигнал к подводной аппаратуре по кабелю длиной порядка 100 км. По прибытии в подводную часть установки, основной, либо дублирующий сигнал будет усилен и передан в каждую из 80 групп четырех гирлянд, после чего, в мастерном модуле (MM) гирлянды из сигнала выделяются моды, соответствующие определённым оптическим модулям.

Отраженные сигналы от каждого электро-абсорбирующего модулятора в цифровом оптическом модуле претерпевают обратное спектральное

уплотнение в мультиплексе мастерного модуля гирлянды. Затем в центральной подводной станции они смешиваются с сигналами ещё трех ММ (по 20 мод в каждом) и отправляются на берег. На берегу моды снова будут разделены по массиву фотоприёмников. Каждому оптическому модулю в береговой лаборатории соответствует фотоприёмник с полосой пропускания 10 Гб/с.

Система сбора данных детектора KM3NeT, базирующаяся на методе передачи информации “от точки к точке” и использующая современные телекоммуникационные технологии DWDM, обладает рядом достоинств, среди которых прозрачная в смысле различимости данных от разных оптических модулей широкополосная связь (10Гб/с). Все коммуникационные лазеры расположены на берегу, под водой в оптических модулях используются лишь светодиоды и отражающие электро-абсорбирующие модуляторы (REAM), таким образом, повышается надежность преобразования оптического сигнала в электрический. Архитектура детектора, разработанная с использованием современных коммуникационных технологий, поддерживает поэтапное развёртывание и предусматривает возможность последующего улучшения с появлением новых технологий.

1.6 Байкальский нейтринный телескоп

На заре становления нейтринной астрофизики высоких энергий Байкальская коллаборация поставила своей задачей создание первого крупномасштабного глубоководного нейтринного телескопа NT200 с эффективной площадью регистрации (2-10) тыс.м² (в зависимости от энергии частиц) и проведение на нём широкой программы физических исследований. Монтаж и развёртывание этой установки проводились с 1993 г. по 1998 г. на оз. Байкал [25]. Детектор был создан на основе 192 глубоководных оптических модулей, в состав которых входят специально разработанные для

Байкальского эксперимента высокочувствительные фотоприемники "КВАЗАР-370" с диаметром фотокатода 370 мм.

Нейтринный телескоп НТ-200 расположен на глубине около 1100 м на расстоянии 3.6 км от берега. Глубина озера в месте расположения телескопа составляет 1366 м. Телескоп связан с береговым центром управления и сбора данных донными линиями связи, прокладка которых осуществляется в период зимних экспедиций с ледового покрова озера. Концы кабельных линий связи закреплены на буйковых станциях на глубине 20 м от поверхности и соединяются с помощью кабельных перемычек с центральным электронным блоком телескопа. При этом все соединения производятся с ледового покрова озера. Такой метод выполнения монтажных работ не требует сложной и дорогостоящей аппаратуры для подключения глубоководных кабельных линий связи непосредственно под водой.

Нейтринный телескоп представляет собой трехмерную решетку из оптических модулей, размещенных на вертикальных грузонесущих кабель-тросах, нижние концы которых прикреплены к донным якорям, а верхние - к буйам. Каждый вертикальный кабель-трос с оптическими модулями формирует структурную единицу телескопа - гирлянду оптических модулей (ОМ). Телескоп содержит 192 ОМ, размещенных на 8 гирляндах длиной 68 м каждая. Вокруг центральной гирлянды равномерно вдоль окружности с радиусом 21.5 м расположены периферийные гирлянды (рисунок 1.6.1).

Каждая гирлянда содержит 24 ОМ. С целью подавления темнового темпа счета фотоприемников и фонового свечения глубинных вод озера оптические модули объединены в пары и включены по схеме совпадения регистрируемых сигналов во временном окне порядка 15 нс. Каждая пара ОМ образует один измерительный канал телескопа. В качестве амплитуды сигнала регистрируемого измерительным каналом, выбирается амплитуда одного из двух ОМ пары, заранее выбранного по результатам калибровки регистрирующей системы телескопа.

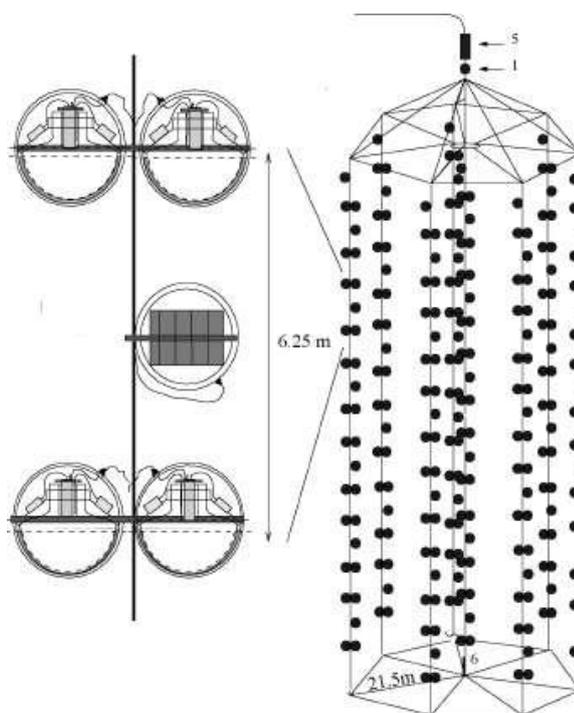


Рисунок 1.6.1. Схема телескопа HT200 (справа). Слева изображен структурный элемент телескопа связка, состоящий из двух пар оптических модулей, подключенных на совпадение, и электронный модуль, обеспечивающий их функционирование

Время срабатывания канала соответствует времени первого сработавшего оптического модуля пары. На каждой гирлянде фотоприемники оптических модулей второго и одиннадцатого каналов (счет каналов ведется сверху вниз) ориентированы фотокатодами вверх, а все остальные фотоприемники гирлянды ориентированы вниз. Пространственное расположение фотоприемников контролируется с помощью гидроакустической системы измерения координат ГАСИК, функционирующей в составе нейтринного телескопа. Погрешность измерения координат составляет 20 см.

Каждый оптический модуль содержит светодиод, предназначенный для амплитудной калибровки фотоприемника. Оптические модули соединены с системными электронными модулями (СМ) четырьмя глубоководными коаксиальными кабелями для подачи питания и управления, для передачи

анодного и диодного сигналов и для управления калибровочным светодиодом.

Система сбора данных и триггерная система состоят из отдельных функциональных модулей и блоков, формирующих иерархическую структуру. Системный модуль обеспечивает работу двух измерительных каналов. 3 СМ связаны с блоком электроники гирлянды (БЭГ). Каждая гирлянда имеет два БЭГа, соединенных с блоком электроники детектора (БЭД). Анодные и диодные сигналы четырех оптических модулей двух измерительных каналов передаются в соответствующий системный модуль (СМ). Анодный сигнал дискриминируется как амплитудным регулируемым порогом, так и порогом, не пропускающим сигналы короче 8 нс на уровне амплитудного порога. Далее, сигналы с ОМ измерительного канала проверяются на совпадение в окне 15 нс. Затем формируется временная отметка, в качестве которой выбирается время первого сработавшего ОМ, и вместе с амплитудной информацией передается в БЭГ. В БЭГе информация каждого измерительного канала оцифровывается, вырабатывается локальный триггер и формируется сигнал запроса в БЭД. Если в БЭДе накоплено достаточное количество сигналов запроса с БЭГов в интервале 500 нс, формируется сигнал подтверждения, поступающий во все БЭГи. После этого, в БЭГах событию присваивается номер, и накопленные данные передаются в береговой центр управления и сбора данных.

Телескоп НТ200+

С целью повышения эффективности регистрации нейтрино высоких энергий в 2004 - 2005 годах телескоп НТ200 был модернизирован [26]. Новая установка получила название НТ200+ и обеспечила как увеличение эффективного объема для регистрации каскадов от нейтрино, так и существенное повышение энергетического разрешения телескопа в целом. Детектор НТ200+ является не только установкой для исследований космического излучения, но и первой версией структурной единицы

будущего Байкальского нейтринного телескопа с эффективным объемом порядка кубического километра [27,28].

Нейтринный телескоп НТ200+ был введен в эксплуатацию 9 апреля 2005 года. Телескоп состоит из центральной части (НТ200) и трех внешних гирлянд (НТ+) расположенных на расстоянии 100 м от центральной части детектора (рисунок 1.6.2). На каждой внешней гирлянде размещается по 12 оптических модулей, сгруппированных попарно, аналогично ОМ телескопа НТ200.

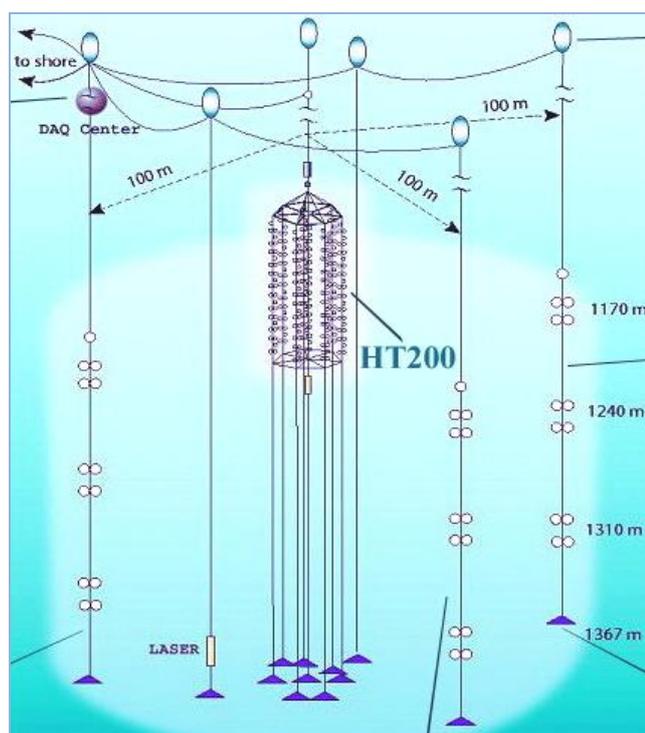


Рисунок 1.6.2. Детектор НТ200+

Расстояние между нижней и верхней парами ОМ составляет 140 м. Каждая пара оптических модулей, включенная в режим совпадений для подавления шумовых импульсов, формирует измерительный канал. Оптические модули содержат гибридные фотоприемники "КВАЗАР-370".

Регистрирующая система НТ200+ включает установку НТ200 и три внешних гирлянды. Электронные системы внешних гирлянд в значительной степени повторяют по своему составу и принципу функционирования установку НТ200. Оптические модули в паре включены на совпадения и

образуют информационный канал. Две пары ОМ имеют общий электронный системный модуль (СМ) и образуют функциональную единицу гирлянды - связку. Информация о временах срабатывания и амплитудах сигналов ФЭУ передается с системных модулей на блок электроники гирлянды. В состав внешней гирлянды входит также светодиодная калибровочная система (LED), световые сигналы которой передаются по индивидуальным оптическим волокнам ко всем ОМ гирлянды. Все информационные связи внутри гирлянды осуществляются коаксиальными кабелями РК-50-2-13, покрытыми дополнительной резиновой оболочкой.

В состав СМ входят два блока выработки локального триггера, блок преобразования амплитуды, запуска светодиодов и блок управления. Блок управления служит для установки режимов работы регистрирующей системы и считывания информации о темпах счета фотоприемников. Анодные импульсы фотоприемников канала поступают на вход блока выработки локального триггера, который содержит схему совпадений и два двухуровневых дискриминатора: временной привязки с фиксированным порогом 0.25 - 0.5 ф.э. и амплитудного отбора с управляемым порогом. Временная привязка осуществляется по первому пришедшему от пары оптических модулей импульсу. Выходной сигнал подается на блок преобразования амплитуды для формирования переднего фронта сигнала локального триггера (ЛТ). Динодные импульсы с каждого канала поступают на аналоговые сумматоры блока преобразования амплитуды, выполненного на основе стробируемых преобразователей заряд - длительность. На выходе блока формируются выходные сигналы системного модуля - локальные триггеры двух каналов связки, длительность которых пропорциональна входным зарядам, а передний фронт определяет время срабатывания канала.

Локальные триггеры (запросы каналов) со всех системных модулей гирлянды поступают в блок электроники внешней гирлянды БЭГ. В состав

БЭГ входят шесть измерительных каналов, контроллер и модемы каналов данных и управления.

В то время как оптические модули, системные модули и измерительные каналы внешней гирлянды полностью идентичны аппаратуре НТ200, электроника контроллера БЭГ потребовала существенной модернизации. Каждый измерительный канал содержит 11-ти разрядный преобразователь время-код, 10-ти разрядный преобразователь длительность-код и схему записи номера события. Дискретность временного преобразователя составляет две наносекунды. Сигнал запрос гирлянды формируется блоком запросов контроллера БЭГа при условии двойных совпадений сигналов запрос канала во временных воротах 0.5 мкс. Запросы от всех внешних гирлянд передаются в центральный коммутационный модуль установки (DAQ-центр), расположенный вблизи поверхности воды. В этом модуле формируется сигнал подтверждение, который возвращается ко всем внешним гирляндам с задержкой около 11 мкс, обеспечивая синхронизацию их работы.

При наличии сигнала подтверждение информация о каждом локальном триггере (время, амплитуда, номер события и номер измерительного канала) передается через контроллер БЭГа. Номер события (6-ти разрядный счетчик) при этом используется для объединения информации о различных локальных триггерах одной гирлянды. Кроме номера события гирлянды, в БЭГе формируется глобальный номер события, равный количеству пришедших сигналов подтверждение. Эта информация необходима для объединения информации с разных внешних гирлянд в одно событие.

Передача данных с внешних гирлянд осуществляется через контроллер БЭГа. Принципиальной проблемой, которую необходимо было решить при модернизации электроники, являлась низкая скорость передачи данных в контроллере БЭГа НТ200 - не более 6 Кбайт/сек. Такая скорость недостаточна для решения ряда физических задач, запланированных для детектора НТ200+. Отличительными признаками нового контроллера БЭГа

внешних гирлянд являются переход на более современную электронную компонентную базу, унификация протоколов обмена данными и командами управления между различными частями детектора, существенное упрощение компоновки физических событий детектора. Внедрение нового контроллера БЭГа обеспечило возможность использования современных высоконадежных протоколов и сетевой аппаратуры при создании системы передачи данных внешних гирлянд: Ethernet коммутаторов, DSL-модемов, протокола TCP/IP.

Для интеграции НТ200 и внешних гирлянд в единый детектор НТ200+ необходимо было решить две основные задачи: модернизировать систему управления и сбора данных внешних гирлянд и обеспечить временную синхронизацию работы отдельных частей установки с точностью до нескольких наносекунд. Поскольку простое дублирование систем управления и сбора данных для НТ200+ и внешних гирлянд было несовместимо ни с количеством доступных кабелей, связывающих детектор с берегом, ни с планами будущей модернизации установки, было принято решение изменить архитектуру системы в целом. Впервые были использованы промышленные DSL-модемы (сеть Ethernet) и так называемые одноплатные промышленные компьютеры, размещаемые под водой. Все кабельные коммуникации систем управления и сбора данных НТ200+ коммутируются через центральный коммуникационный узел (DAQ-центр), расположенный на глубине 20 м. DAQ-центр обеспечивает объединение потоков данных и трансляцию всей полученной информации в береговой центр. Подводный коммутационный центр состоит из пяти электронных модулей, размещенных в глубоководных стеклянных сферах: общий БЭГ, ретранслятор канала управления (РУ), модуль DSL-модемов и два подводных компьютера: РС-НТ+, обслуживающий внешние гирлянды, и РС-НТ200.

Информация необходимая для синхронизации и объединения событий НТ200 и внешних гирлянд формируется модулем "Общий БЭГ", разработанным специально для НТ200+. Общий БЭГ соединен с системами

сбора данных телескопа НТ200 и внешними гирляндами коаксиальными кабелями длиной более 1 км, по которым передаются сигналы запрос гирлянд и триггер НТ200. Сигнал запрос от любой внешней гирлянды инициирует формирование общего сигнала подтверждения. Общий БЭГ содержит четыре временных преобразователя, подобных измерительным каналам БЭГов НТ200, сигналом СТАРТ для которых служат запросы внешних гирлянд и триггер НТ200, а сигналом СТОП - подтверждение. Информация с этих временных каналов используется для определения относительных времен срабатывания каналов НТ200 и внешних гирлянд. Таким образом, система измерения времени НТ200+ имеет два уровня. На первом уровне в БЭГе измеряются задержки срабатываний каналов гирлянды относительно сигнала запрос гирлянды с дискретностью 1 нс. На втором уровне измеряются задержки сигналов запрос гирлянды относительно общего сигнала подтверждения с дискретностью 2 нс. В модуле "Общий БЭГ" также предусмотрен счетчик количества триггеров, сформированных установкой НТ200. В результате, каждое событие от внешних гирлянд содержит соответствующий ему номер события НТ200, что позволяет синхронизировать потоки данных установки от этих двух детекторов.

Данные с внешних гирлянд передаются в коммутационный центр по каналу Ethernet на основе DSL-модемов (FlexDSL-PAM-SAN). Необходимость использования модемов обусловлена значительной удаленностью внешних гирлянд от коммутационного центра - 1.2 километра. Три DSL-модема, принимающие данные от гирлянд, размещены в одной глубоководной стеклянной сфере. Передача данных на берег осуществляется под управлением двух подводных компьютеров коммутационного центра, размещенных в глубоководных стеклянных сферах. Каждая из сфер содержит одноплатный компьютер PC/104 (PC104: Advantech-PCM9340), DSL-модем, управляемый коммутатор Ethernet и модем для управления аппаратурой гирлянд (С-мод - модем медленной связи). Передача данных на

берег (быстрая связь) осуществляется через DSL модем по двум жилам подводного кабеля со скоростью до 2 Мбит/с.

Выводы

Проведя анализ подходов и методов построения нейтринных телескопов как в естественных водоёмах, так и во льду различными коллаборациями по всему миру, можно сформулировать основные требования к построению архитектуры нейтринного детектора:

- Возможность объединения разнородных систем:
 - регистрации, позиционирования, управления и калибровки.
- Безболезненное реконфигурирование установки:
 - различные комбинации детектирующих единиц;
 - гибкое управление триггером.
- Возможность проводить физические исследования по мере развёртывания установки – модульность и наращиваемость.
- Эффективное использование географических условий.
- Надежность компонентов системы:
 - системы дублирования;
 - промышленная аппаратура и протоколы передачи данных.

Предметом данной работы является создание системы сбора данных глубоководного нейтринного телескопа НТ1000 на основе опыта эксплуатации современных нейтринных телескопов с учетом особенностей проектируемой Байкальской установки: развертывание аппаратуры с ледяного покрова озера, ограниченность времени монтажа детектора, возможность реконфигурирования регистрирующей системы и проведения профилактических работ на установке (замена вышедших из строя узлов и модулей).

ГЛАВА 2. ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ ПРОЕКТИРУЕМОГО ТЕЛЕСКОПА НТ1000

Проектирование системы сбора данных было основано на ряде требований, основанных на особенностях места расположения, способов развертывания, подходах к подготовке регистрирующей аппаратуры и эксплуатации Байкальского глубоководного нейтринного телескопа.

Принципиальным требованием к аппаратуре Байкальского телескопа является надежность ее эксплуатации в режиме длительной экспозиции. Для обеспечения максимального уровня надежности было принято решение о предельном упрощении конструкции оптического модуля – основного детектирующего элемента установки. В отличие от установок IceCube и KM3Net, в оптическом модуле отсутствует система цифрового преобразования сигналов. Блоки цифрового преобразования вынесены в отдельный глубоководный модуль, обслуживающий группу оптических модулей. Такой подход требует создания интегрированных систем связи с оптическими модулями, состоящих как из линий передачи данных управления, так и передачи аналоговых сигналов [29-31].

В целях минимизации объема работ при развертывании детектора и уменьшения его стоимости в базовой конфигурации Байкальского телескопа минимизировано количество оптических линий передачи данных. Это потребовало разработки новых подходов к системе передачи информации на большие расстояния, основанных на сочетании использования относительно медленных линий связи с медными жилами с on-line процедурами фильтрации данных, подавляющих фоновые сигналы.

Важным преимуществом Байкальского телескопа является возможность развертывания глубоководной аппаратуры со льда оз. Байкал. Реализация такой возможности требует размещения всей аппаратуры на вертикальных гирляндах с ограниченными возможностями связи друг с другом. Это конструктивная особенность однозначно требует организации системы сбора

данных в виде разветвленной “древовидной” иерархической структуры с вершиной в центральной части группы гирлянд.

Для реализации перечисленных выше требований, система сбора данных была построена из четырех базовых элементов:

- Измерительного канала, включающего в свой состав фотодетектор и удаленный от него на расстояние до 100 метров аналого-цифровой преобразователь сигналов.
- Секции оптических модулей, состоящей из 12 измерительных каналов. Все каналы секции объединяются в одном блоке электроники, обеспечивающем преобразование аналоговых сигналов, анализ триггерных условий, фильтрацию и передачу данных, управление режимами работы оптических модулей. Секция является основным структурным элементом системы сбора данных установки.
- Гирлянды, объединяющей несколько секций. Предусмотрена возможность объединения в общую систему сбора данных до 4-х секций на одной гирлянде.
- Кластера, в состав которого включены несколько гирлянд. В базовой конфигурации установки предполагается объединение 8 гирлянд в один кластер. Кластер гирлянд является законченным детектором, на базе которого могут проводить физические исследования.

В данной главе представлено подробное описание указанных базовых элементов системы сбора данных Байкальского телескопа.

2.1 Измерительный канал

Измерительный канал установки включает в свой состав фотодетектор, усилитель сигналов фотодетектора, коаксиальный кабель длиной около 90 метров, по которому передается усиленный сигнал, и блок измерения времени поступления и амплитуды сигнала [32,33]. Схематический вид канала показан на рисунке 2.1.1.

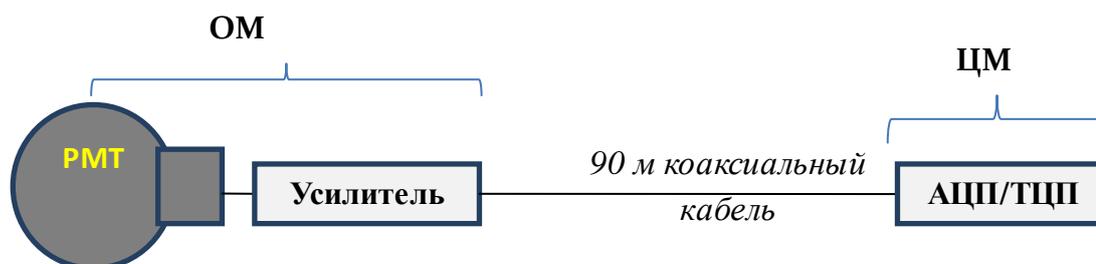


Рисунок 2.1.1. Схема измерительного канала установки

Основой регистрирующей системы телескопа НТ1000 являются оптические модули (ОМ), оснащенные фотоэлектронными умножителями R7081-100 фирмы Hamamatsu с полусферическими фотокатодами диаметром 25 см и квантовой эффективностью более 30%. ФЭУ регистрируют черенковское излучение, генерируемое в воде заряженными релятивистскими частицами – мюонами либо электромагнитными или адронными ливнями. На основании информации, полученной от группы оптических модулей, зарегистрировавших излучение, можно восстановить тип, направление движения и энергию частицы. Оптические модули для Байкальского телескопа НТ1000 были разработаны и подготовлены к работе в составе телескопа НТ1000 сотрудником ИЯИ РАН А. А. Шейфлером. Функциональная схема и внешний вид оптического модуля представлена на рисунке 2.1.2.

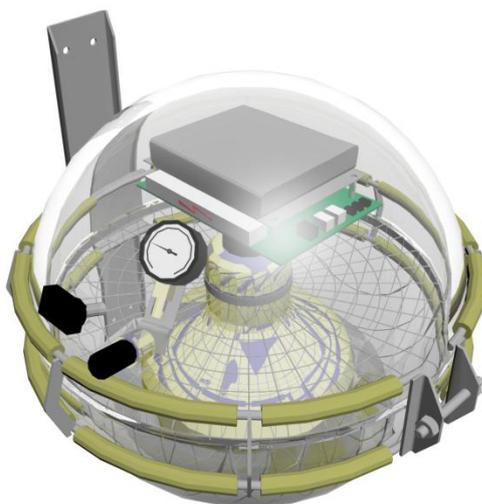
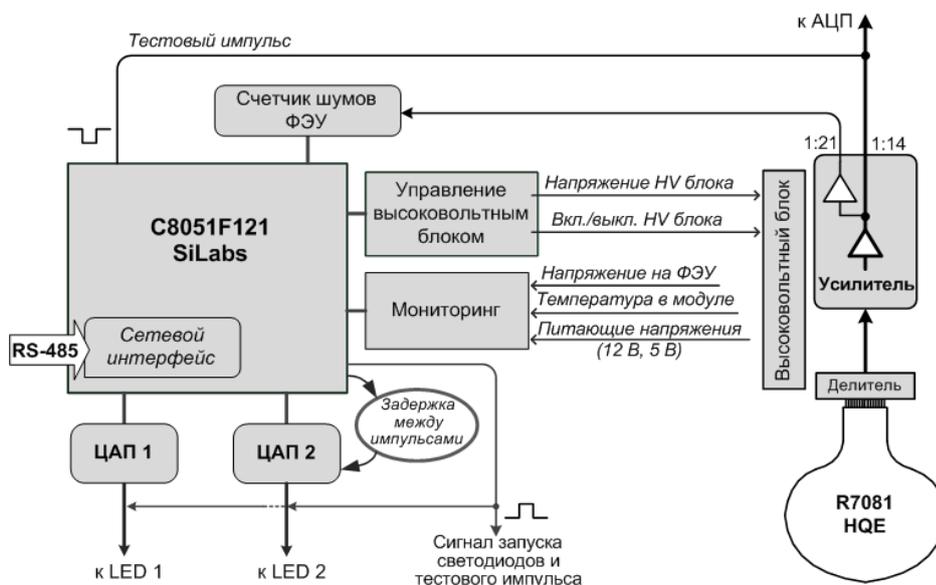


Рисунок 2.1.2. Функциональная схема и внешний вид оптического модуля

Формируемые в ФЭУ аналоговые сигналы, пройдя через двухканальный усилитель и специализированный глубоководный кабель длиной 90 метров, попадают в центр секции оптических модулей (ЦМ) на плату АЦП для оцифровки и обработки. Блок высокого напряжения (Traco Power SHV 12-2.0 К 1000 Р) обеспечивает питание делителя ФЭУ (18 МОм) в диапазоне от 0 до 2.2 кВ. Используется напряжение положительной полярности. Коэффициент усиления ФЭУ устанавливается на уровне 10^7 при напряжении питания делителя в диапазоне 1250...1650 В. С учетом предусилителя ($K_{yc} = 14$), общее усиление спектрометрического канала ОМ составляет $\sim 10^8$ при

длительности выходного сигнала 20 нс и амплитуде одноэлектронного сигнала ~ 30 мВ. Такой уровень усиления с одной стороны обеспечивает достаточно высокое значение средней величины одноэлектронного сигнала по отношению к собственным шумам электроники канала (~ 8 мВ), а с другой стороны позволяет работать в линейном диапазоне сигналов до ~ 100 фотоэлектронов. Второй выход усилителя используется для мониторинга темпа счёта одноэлектронных сигналов ФЭУ (коэффициент усиления по амплитуде $K_{yc} = 25$). В оптическом модуле также установлены два светодиода L-7113 фирмы Kingbright на основе нитрида индия-галлия (InGaN) с характерной яркостью ~ 1000 мКнд. Они используются для временной и амплитудной калибровки измерительного канала. Длина волны в максимуме излучения светодиодов составляет 470 нм при ширине импульса около 5 нс. Возможность независимого регулирования интенсивности светодиодов и достаточно низкие перекрестные наводки между светодиодными каналами ($< 1\%$) позволяют производить проверку линейности спектрометрического канала. Система управления оптическими модулями разработана на основе микроконтроллера C8051F121 SiLabs. С его помощью осуществляется управление напряжением на ФЭУ, частотой и интенсивностью свечения светодиодов системы калибровки, а также мониторинг в реальном времени шумов ФЭУ и других параметров электроники. Управление контроллером оптического модуля осуществляется по линии медленной связи (линии управления), организованной на базе интерфейса RS-485.

Решение о применении коаксиальных кабельных линий длиной 90 метров при передаче сигнала от оптического модуля до блока оцифровки имеет под собой несколько важных оснований. Так, длинная линия всегда имеет паразитную ёмкость и проходящий по ней сигнал “интегрируется”, его фронты растягиваются, а амплитуда уменьшается. Т.е. кабель играет роль естественного фильтра, необходимого для обеспечения высокой точности измерения формы импульса амплитудно-временным анализатором. Стоит

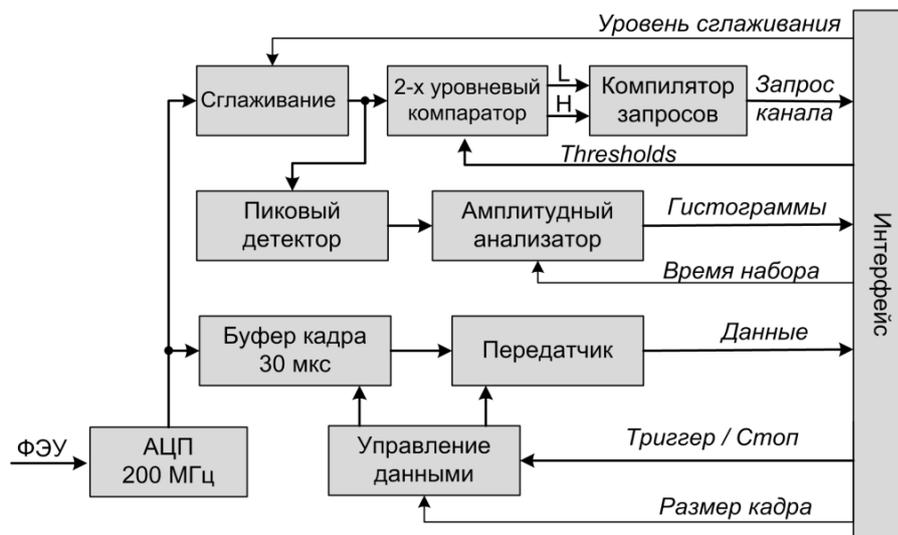


Рисунок 2.1.4. Функциональная схема канала платы АЦП

Каждый спектрометрический канал реализован на базе АЦП AD9430 с разрешением 12 бит и частотой дискретизации 200 МГц. Оцифрованный сигнал с АЦП транслируется в FPGA (Xilinx Spartan 6). Программное обеспечение FPGA, загружаемое по Ethernet-каналу передачи данных, обеспечивает управление, буферизацию и первичную обработку поступающих от АЦП данных. Буфер памяти FPGA позволяет накапливать информацию о форме входного сигнала во временном интервале до 30 мкс с шагом 5 нс (время, необходимое для прохождения сигналов от гирлянд в центр кластера для формирования общего триггера и возвращения триггера в гирлянду). Длина кадра канала и его положение на временной дорожке программируется в диапазонах 0...5мкс и 0...30мкс соответственно. Пример временного кадра канала представлен на рисунке 2.1.5. Временной кадр характеризуется длительностью (до 5 мкс), временным шагом измерения (5 нс), амплитудным разрешением (1.2 мВ на отсчет АЦП) и диапазоном измерения амплитуды (-2.4В ... +2.4В). Характерная ширина шумовой дорожки канала составляет величину около 10 мВ, что позволяет работать с порогами на уровне 0.3 одноэлектронных сигнала.

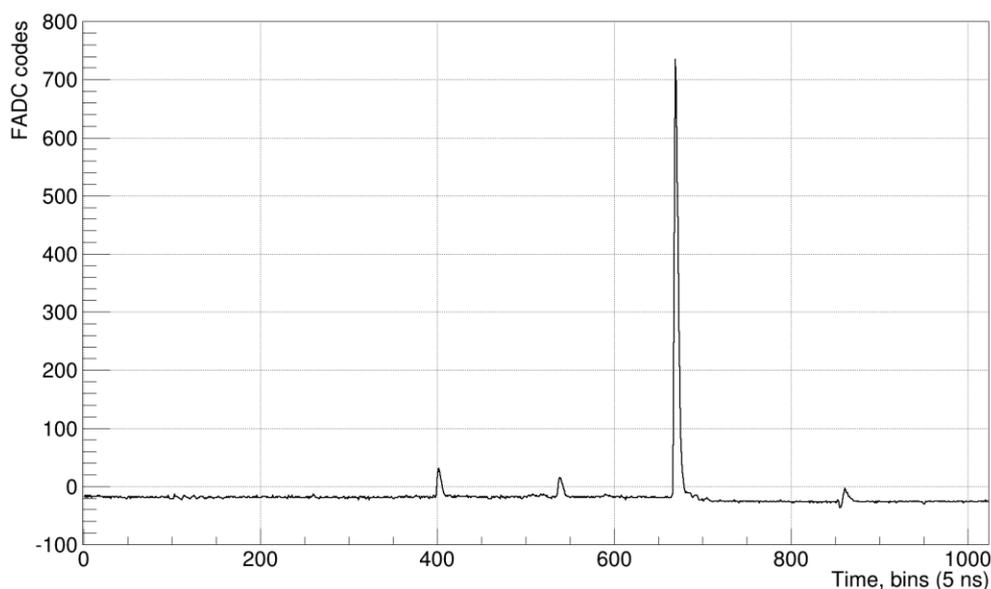


Рисунок 2.1.5. Временной кадр канала, содержащий два одноэлектронных сигнала, сигнал большой амплитуды и отраженный биполярный сигнал

К измерительному каналу подключен пиковый детектор и амплитудный анализатор, которые аккумулируют мониторинговую информацию (амплитудные гистограммы), позволяющую контролировать работу измерительного канала. На рисунке 2.1.6 представлен пример амплитудных гистограмм, накопленных анализатором за 10 секунд в режиме регистрации шумовых импульсов и регистрации сигналов от калибровочного светодиода оптического модуля. Количество каналов гистограммы – 1024, цена деления канала 3.2 мВ (~ 0.1 одноэлектронной амплитуды). Помимо оперативного контроля работы канала, амплитудные гистограммы позволяют измерять темп поступления сигналов запроса канала при реальном установленном пороге регистрации, контролировать уровень порога и осуществлять оперативную настройку режимов работы калибровочного источника света (оптимизировать амплитуду светового сигнала).

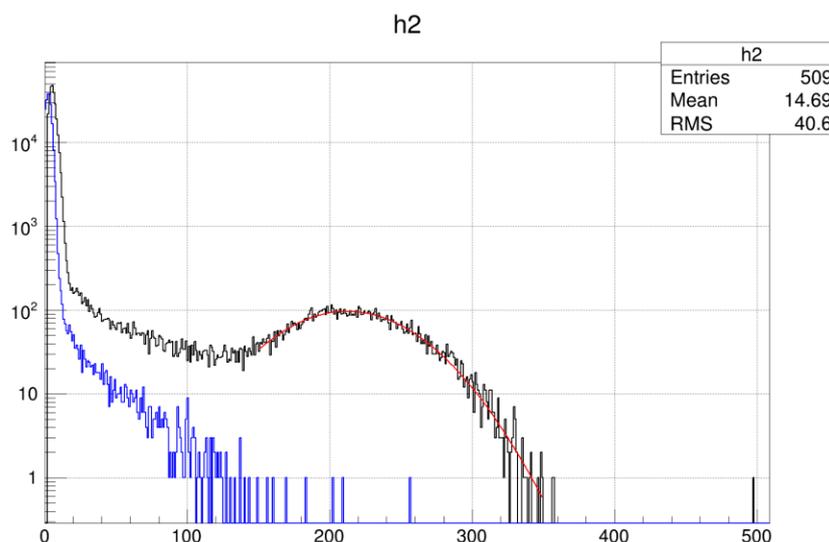


Рисунок 2.1.6. Аппаратно-формируемые амплитудные гистограммы канала в режиме регистрации шумов (синяя линия) и сигналов от калибровочного светового источника (черная линия)

Выработка триггера осуществляется на основе информации, формируемой в каналах запросов плат АЦП. Каждый канал запросов включает в свой состав устройство сглаживания сигналов (уровень сглаживания от 1 до 8), двухуровневый цифровой компаратор с управляемыми порогами (низкий порог L и высокий порог H) и компилятор запросов L и H, транслируемых в триггерный блок платы Мастер. Значения порогов компаратора в зависимости от поставленной физической задачи могут варьироваться для разных каналов и, при штатном режиме работы детектора, равны 0.3 и 3 ф.э. для L и H соответственно. Ожидаемый темп регистрации событий кластера из 8 гирлянд при данных значениях порогов составляет величину порядка 100...200 Гц.

Система внешних кабельных коммуникаций оптических модулей выполнена на основе глубоководных разъемов SubConn, волновое сопротивление которых отличается от волнового сопротивления коаксиальной линии передачи аналоговых сигналов 50 Ом. Необходимость использования таких разъемов обусловлена их высокой надежностью и

удобством в эксплуатации, что существенно сокращает время монтажа гирлянд в оз. Байкал. Однако, в результате применения этих разъемов в кабелях возникают отражения сигналов, что несколько усложняет процедуру анализа физических событий. На рисунке 2.1.7 показан пример отраженного сигнала.

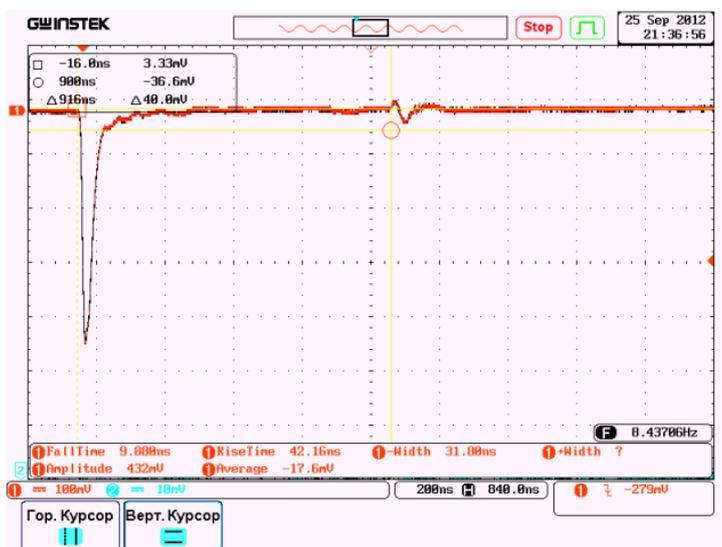


Рисунок 2.1.7. Пример отраженного сигнала в кабеле ОМ

Величина отраженного сигнала составляет $\sim 5\%$ основного сигнала и может достигать 100 мВ для сигналов максимальной амплитуды. Подавление таких импульсов осуществляется в процессе обработки данных на основании информации о задержке сигнала относительно предыдущего. Время задержки отраженного импульса строго фиксировано и составляет удвоенное время прохождения сигнала через кабель - около 900 нс. Следует отметить, что указанный недостаток в значительной мере компенсируется возможностью автоматизированной калибровки длин кабелей по отраженному сигналу, необходимой для определения временных сдвижек каналов.

Конструкция телескопа предполагает наличие большого количества оптических модулей - детекторов черенковского излучения, коммуникации которых образуют участки, где кабельные линии измерительных каналов проходят в непосредственной близости друг от друга. Длина таких участков в

зависимости от места установки ОМ на гирлянде варьируется от 20 до 70 метров. Таким образом, сигнал, регистрируемый на одном измерительном канале, может наводить импульс на другой канал. Для оценки величины этого эффекта была измерена амплитуда перекрестных наводок на двух 90-метровых кабелях ОМ, проложенных в непосредственной близости друг от друга.

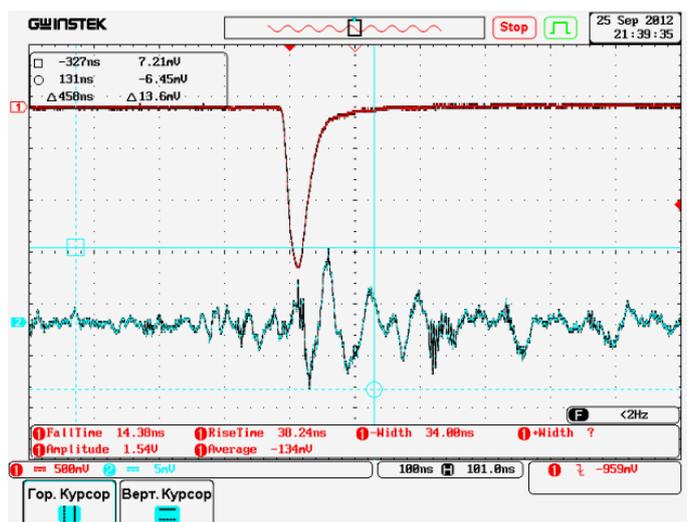


Рисунок 2.1.8. Пример перекрёстной наводки между каналами

Величина наводки линейно зависит от амплитуды сигнала. На рисунке 2.1.8. показана наводка на канал от сигнала с амплитудой ~ 1500 мВ, близкой к предельно возможной. Величина наводки не превышает 10 мВ и составляет величину $\sim 0.5\%$ от инициирующего наводку сигнала. Наводки такой амплитуды не превышают порога триггерной системы и не влияют на процесс регистрации событий.

2.2 Секция оптических модулей

Оптические модули каждой из гирлянд проектируемого телескопа НТ1000 сгруппированы в две секции. Секция представляет собой функционально законченный узел, включающий в себя системы регистрации излучения, обработки сигналов, калибровки, формирования триггера и передачи данных. Базовая конфигурация секции, являющаяся в настоящее

время основой для дальнейшего проектирования, включает в свой состав 12 оптических модулей, расположенных на расстоянии 15 м друг от друга и центральный модуль (ЦМ) [34-37]. Функциональная схема электроники Центрального Модуля секции ОМ показана на рис. 2.2.1.

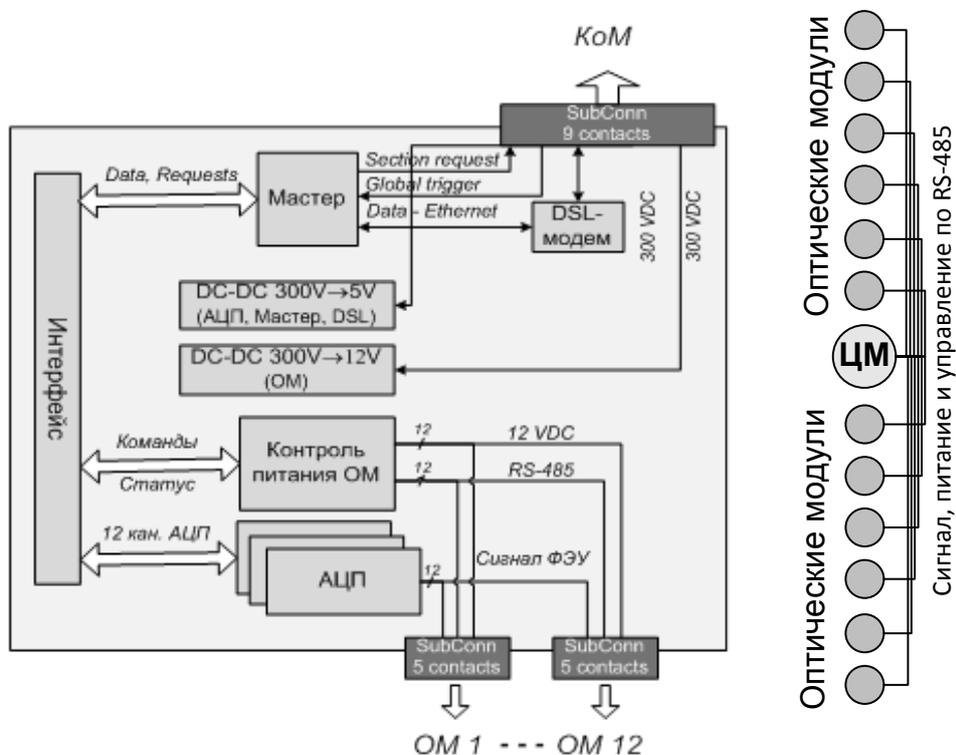


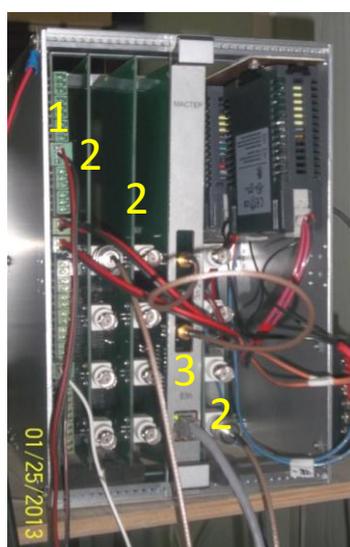
Рисунок 2.2.1 Функциональная схема электроники центрального модуля (ЦМ) секции оптических модулей

ЦМ секции оптических модулей включает в свой состав 3 платы АЦП по 4 канала каждая, блок контроля питания ОМ, плату Мастер (контролер АЦП), интерфейсный бок и DSL-модем для передачи данных секции в коммуникационный модуль гирлянды (КоМ). На рисунке 2.2.2 представлены фотографии основных блоков электроники ЦМ. Платы АЦП, Мастер и Блок управления были разработаны сотрудниками НИИЯФ МГУ, участниками Байкальского проекта, А. В. Скурихиным и В. А. Кожиним.



Рисунок 2.2.2 Фотографии блоков электроники центрального модуля секции

Электронные модули устанавливаются в специализированный кейт (механический стандарт VME) и подключаются через 96-контактные VME-разъемы к кросс-плате. На рисунке 2.2.3 показан кейт с установленными электронными модулями и кейт без электронных блоков, с установленной кросс-платой.



- 1 - Плата управления ОМ
- 2 - Три платы АЦП
- 3 - Плата Мастер



- 4 - Плата интерфейса
- 5 - Конвертер 300-12В
- 6 - Конвертер 300-5В

Рисунок 2.2.3. Кейт с установленными электронными модулями (слева) и кейт без электронных блоков (показана кросс-плата, к разъемам которой подключаются модули)

Для работы в оз. Байкал крейт с электроникой устанавливается в глубоководный корпус, аналогичный корпусу оптического модуля (см. рисунок 2.2.4). Для связи с оптическими модулями используются глубоководные 5-контактные разъемы. Связь с модулем гирлянды осуществляется через 9-контактный глубоководный разъем, по которому передаются сигналы запроса и подтверждения, транслируются данные и поступает электропитание 300В.



Рисунок 2.2.4. Крейт с электроникой ЦМ, установленный в глубоководный корпус

Подача электропитания 300 Вольт в Центральный Модуль секции осуществляется по двум независимым линиям от модуля гирлянды. Важной особенностью организации системы питания оптических модулей является её разделение с питанием электроники центра секции. Это позволяет снизить наводки от высокочастотных узлов плат оцифровки сигнала на измерительные каналы. Для электропитания оптических модулей используется конвертер 300В/12В/60Вт (Traco Power) со временем наработки на отказ около 3 млн. часов. Электропитание электроники ЦМ обеспечивает конвертер 300В/12В/24Вт того же типа. Максимальное энергопотребление секции составляет величину $0.2 \text{ A} \times 300 \text{ В}$.

Для передачи данных от секции и управления её работой в плате Мастер предусмотрен порт Ethernet 100 Мбит. Учитывая значительные расстояния от ЦМ до модуля гирлянды (до 300 метров) и ограничения на максимальную длину стандартной Ethernet-линии, канал Ethernet удлиняется за счет использования DSL-модемов, установленных в ЦМ. Передача данных в пределах одной секции осуществляется по медленному каналу связи на основе двухпроводной глубоководной шины RS-485. Эта шина соединяет между собой центральный модуль и оптические модули. Управление передачей данных осуществляется через порт RS-485, входящий в состав платы управления ОМ.

Формирование триггера секции

Плата Мастер предназначена для формирования триггера секции, чтения данных с плат АЦП и их трансляции по каналу Ethernet (интегрированный сетевой интерфейс стандарта 100BASE-TX) в центр сбора данных, а также управления работой аппаратуры. Функциональная схема платы Мастер представлена на рисунке 2.2.5.

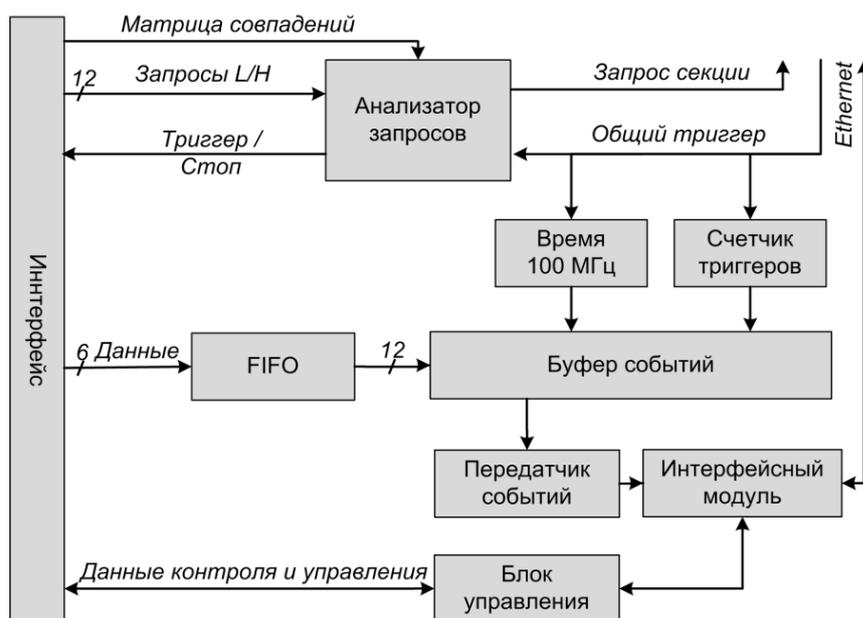


Рисунок 2.2.5. Функциональная схема платы Мастер

Эффективное подавление шумовых событий в измерительных каналах секции оптических модулей возможно благодаря введению гибких настраиваемых триггерных условий в блок анализатора запросов платы Мастер. Анализатор запросов платы Мастер формирует запрос секции в результате обработки поступающих в него запросов каналов L и H со всех плат АЦП секции. Для обработки запросов каналов используется встроенный программно-аппаратный модуль "матрица совпадений" (12H×12L), который обеспечивает максимально простой и быстрый способ генерации запроса секции. Предусмотрены два режима работы триггерной системы: мажоритарные совпадения сигналов запросов L в выбранном временном окне ("триггер L"), и совпадения L и H запросов с любых соседних оптических модулей ("триггер L&H").

Сигналы запросов всех секций направляются в центр кластера, где формируется сигнал подтверждения, являющийся общим триггером для всех гирлянд. Триггерный сигнал инициирует генерацию общего сигнала "Стоп" для всех измерительных каналов, чтение буфера данных АЦП, формирование выходного буфера (временного кадра) в модуле Мастер и его передачу в центр сбора данных. Временная задержка общего триггера составляет около 20 мкс (задержка в 1.2 км кабеля и задержки в электронных блоках). Для каждого канала начало временного кадра может варьироваться в диапазоне от 0 до 30 мкс относительно момента поступления триггера, при этом длительность самого кадра ограничена 5 микросекундами. Предусмотрено два режима работы аппаратуры платы Мастер. В первом режиме с каналов АЦП считывается вся информация в пределах заданного временного кадра. Во втором осуществляется обработка информации в режиме реального времени, в результате которой в центр сбора данных передаются только те участки временного кадра, где наблюдалось превышение порога регистрации канала (режим фильтрации). Коэффициент сжатия данных в таком случае может достигать величины порядка 100. Во время штатной работы детектора

режим с фильтрацией сигналов на временном кадре является основным, поэтому эффективная скорость передачи данных с секции повышается на два порядка. Каждый кадр помимо информации о форме сигналов содержит данные о номере триггера и локальное время (разрешение 10нс). Информация о номере триггера позволяет синхронизировать события приходящие от разных секций. Данные из буфера событий передаются по линии Ethernet в центр кластера.

Фильтрация данных

Каждое событие, формируемое регистрирующей системой, представляет собой набор временных кадров всех каналов установки. Каждый кадр содержит временную развертку амплитуды сигнала с фотоэлектронного умножителя в интервале от 5 нс до 5 мкс, т.н. временную дорожку. Длина временной дорожки в базовом режиме работы установки составляет 1024 отсчета (5 нс на отсчет). Задачей фильтрации является on-line выделение полезных сигналов из временных дорожек каналов на аппаратном уровне и формирование набора данных, содержащего только полезную информацию. Сигнал ФЭУ (полезный сигнал) представляет собой импульс положительной полярности с характерной длительностью 5 – 10 отсчетов. Увеличение длительности сигналов происходит при превышении их амплитуды диапазона линейности канала (около 2 В), но доля таких сигналов относительно невелика. На временной дорожке как правило фиксируются единичные полезные сигналы. Отсюда следует, что выделение полезных сигналов из временной дорожки сокращает объем данных более чем на порядок практически без потери информативности событий.

В основе алгоритма фильтрации лежит последовательное сравнение данных временной дорожки с заданной для каждого канала величиной порога. Превышение сигналом порога является признаком начала полезного сигнала, а уменьшение значения сигнала ниже уровня порога – окончанием сигнала. Для уменьшения влияния шумов электроники на процесс

фильтрации (шумовые импульсы этого типа имеют биполярный характер) сравнение может производиться со сглаженным по 1, 2, 4 или 8 точкам сигналом. Кроме того, для правильной оценки параметров полезного сигнала необходимо иметь информацию о поведении шумовой дорожки до и после сигнала. Чтобы это обеспечить, диапазон выделения сигналов необходимо расширить (в области перед сигналом и после него). Для того, чтобы избежать потерь полезной информации после сигналов с большой амплитудой, нужно предусмотреть увеличение диапазона расширения сигналов после большого импульса.

Аппаратная реализация алгоритма осуществляется в плате Мастер на базе FPGA XILINX Spartan 6. Данные (временные кадры) с 12 каналов АЦП поступают в плату Мастер, где и производится их обработка в режиме реального времени. Программа фильтрации автоматически загружается в плату Мастер при ее инициализации. Кроме того предусмотрена возможность удаленной загрузки программы, что позволяет изменять и оптимизировать алгоритмы фильтрации в зависимости от класса решаемых задач. Входные параметры алгоритма задаются внешней управляющей программой, которая записывает их во входные регистры FPGA.

В настоящий момент времени используется следующий набор входных параметров фильтрации данных:

- Версия алгоритма фильтрации (номер фильтра);
- Расширение сигнала перед началом полезного сигнала: T_1 ;
- Расширение сигнала после окончания сигнала для импульсов меньших Q : T_2 ;
- Расширение сигнала после окончания сигнала для импульсов больших Q : T_3 ;
- Параметр, определяющий величину расширения сигнала после импульса: Q ;
- Коэффициент пересчета K : для каждого K -го события дополнительно к

отфильтрованным данным записывается полная дорожка.

- Значения порогов выделения полезных сигналов (индивидуальные для каждого канала 0 -11): Trsh[12].

Формат пакета событий с фильтрацией совместим с форматом не фильтрованных данных. Пакет состоит из заголовка длиной 24 байта и данных. Формат данных отличается от не фильтрованных, поскольку представляет собой не дорожку данных, а набор сигналов дорожки. Для пакета с фильтрацией используется идентификатор пакета 3009.2. Фильтрованные данные состоят из заголовков сигналов и самих сигналов. Заголовок сигнала состоит из 8 байт и имеет следующий формат: 1 байт - номер канала, 1 байт - номер фильтра; 2 байта - число байт в сигнале; 2 байта - положение сигнала на дорожке; 2 байта - порог. Далее идут данные сигнала. Сигналы одного канала идут подряд. Если в каком-то канале сигнала нет, записывается нулевой сигнал (т.е. число байт в сигнале указывается 0, и данных сигнала нет).

Сложность технической реализации описанного выше алгоритма заключается в необходимости получить достаточно высокое быстродействие: время обработки одного события не должно превышать 5 мс. В настоящее время алгоритм фильтрации реализован на “программном” уровне - используется процессор организованный на базе FPGA платы Мастер. Такой подход минимизирует время отладки, позволяя оперативно менять алгоритмы фильтрации. Однако время обработки событий на программном уровне составляет около 10 мс. Чтобы обеспечить необходимое быстродействие, наиболее критические (затратные по времени) части алгоритма необходимо переложить на аппаратный уровень. Наиболее критические, и в тоже время возможные в аппаратной реализации части алгоритма связаны с обработкой массивов данных. Это первоначальная сортировка данных по каналам, сглаживание сигнала и последующее сравнение его с порогом для данного канала, выделение полезного сигнала,

подсчет его размера и запись данных о полезных сигналах вместе с данными канала в буфер канала для последующей передачи на программный уровень.

Испытания канала передачи данных со встроенной системой фильтрации событий проводились в сентябре 2013 года с использованием четырех каналов одной секции кластера NT1000. Задачами исследования являлись отладка алгоритма в реальных условиях работы, определение коэффициента сжатия данных алгоритмом фильтрации, оценка максимального темпа регистрации событий в режиме фильтрации данных.

Результаты работы алгоритма фильтрации данных временных дорожек иллюстрируют рисунки 2.2.7 – 2.2.9. Для иллюстрации использовались события, запись которых производилась одновременно в двух режимах: полная необработанная временная дорожка и выделенные полезные сигналы (как указывалось выше, программа фильтрации позволяет записывать полную информацию о дорожках для части событий в целях контроля). На рисунках представлено наложение данных двух типов: необработанная дорожка показана синим цветом, а выделенные сигналы красным.

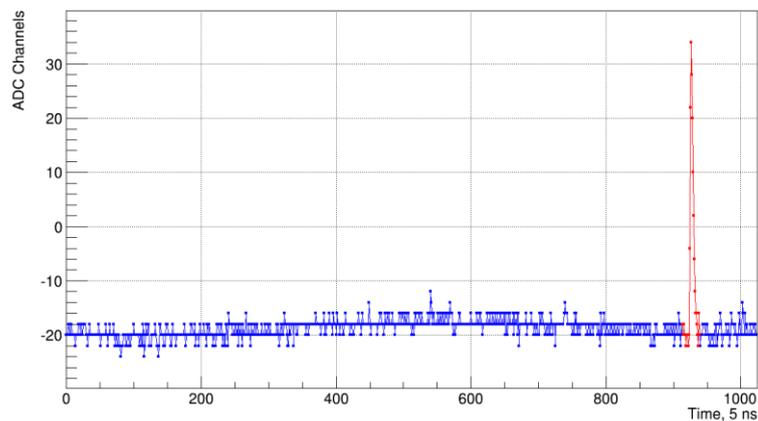


Рисунок 2.2.7. Выделенный единичный сигнал на временной дорожке

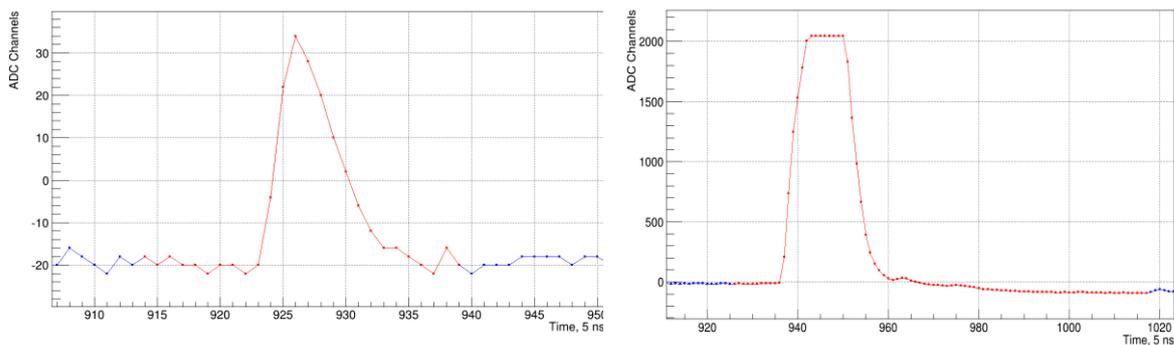


Рисунок 2.2.8. Выделенные сигналы малой и большой амплитуды

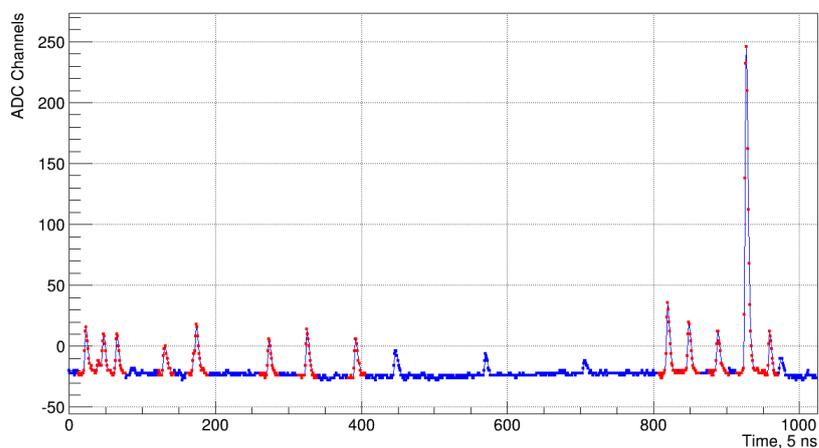


Рисунок 2.2.9. Пример выделения сигналов в “многоимпульсных” событиях

Рисунок 2.2.7 иллюстрирует величину фактора сжатия данных для сигналов с относительно малой амплитудой (1 – 2 ф.э). В данном конкретном случае фактор сжатия составляет величину около 30. Рисунок 2.2.8 показывает длительности выделенных сигналов с малой и большой амплитудой. Для сигналов малой амплитуды полезный сигнал расширяется на 10 каналов в обе стороны. При увеличении амплитуды выше заданного порога область расширения после полезного сигнала увеличивается до 50 отсчетов. Рисунок 2.2.9 показывает достаточно экзотический случай выделения полезных сигналов из многоимпульсного события. В частности, на этом рисунке виден порог выделения импульсов (25 каналов АЦП, ~ 0.7 ф.э.). Импульсы, превышающие порог фильтрации (13 сигналов) записываются, 4 сигнала не достигающие порога теряются. Результаты

экспериментальной оценки коэффициента сжатия данных представлены в зависимости от порога в таблице 2.2.1.

Таблица 2.2.1. Экспериментальный коэффициент сжатия данных

Порог фильтрации, ф.э.	Коэф. сжатия
0.9	42.5
1.1	93.4
1.3	311.3

Для оценки максимальной частоты регистрации событий был проведен ряд серий измерений с различной частотой регистрации событий. Частота регистрации событий менялась путем изменения триггерных порогов каналов. Для эталонной серии измерений “z0080” с частотой регистрации 6 Гц низкий порог триггерной системы составлял 0.5 ф.э., высокий порог триггерной системы ~4.0 ф.э., порог фильтрации ~ 1ф.э. Набор данных осуществлялся в режиме совпадения соседних каналов с низким и высоким порогами. Результаты определения максимальной частоты регистрации событий представлены в таблице 2.2.2.

Таблица 2.2.2. Частота регистрации событий установкой

Серия измерений	Темп поступления событий, с ⁻¹	Темп регистрации событий, с ⁻¹
z0080	6.2	6.2
z0075	12.0	12.0
z0078	13.3	13.3
z0081	16.8	16.8
z0084	31.8	31.8
z0083	72.5	72.5
z0085	96.0	96.0
z0082	114.5	Потеря данных

Таким образом, реализованный в настоящее время алгоритм фильтрации данных обеспечивает коэффициент сжатия информации на уровне 30 – 40. Максимальный темп регистрации событий при включении алгоритма фильтрации близок к 100 Гц. Ограничение в скорости обусловлено временем on-line обработки дорожек в плате Мастер. Существенного увеличения быстродействия можно добиться путем реализации критических вычислительных процедур на аппаратном уровне FPGA.

Управление оптическими модулями

Основные функции управления и мониторинга регистрирующей системы телескопа выполняет аппаратура контроллера ОМ и плат АЦП и Мастер: установку режимов работы детектора, порогов и временных диапазонов регистрации каналов, коэффициентов усиления ФЭУ, мониторинг состояния аппаратуры и фоновых условий регистрации. Функциональная схема блока управления ОМ представлена на рисунке 2.2.10.

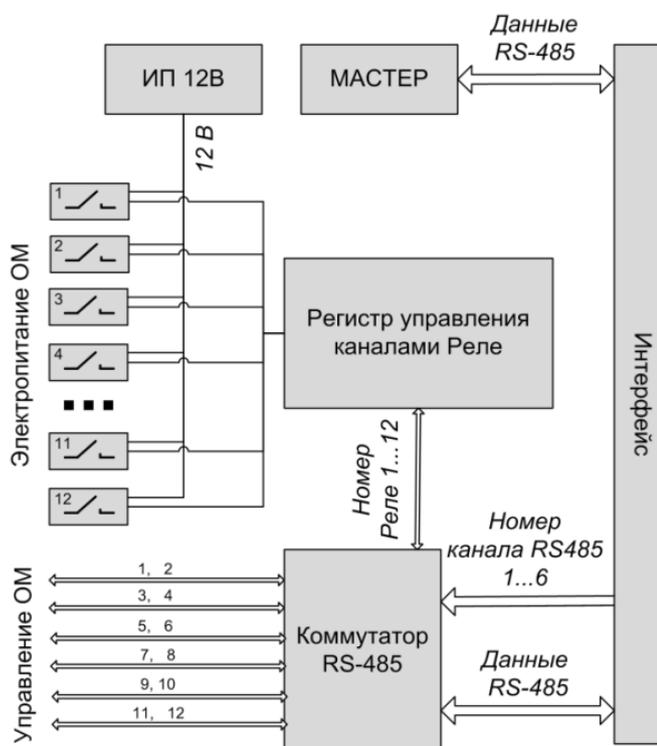


Рисунок 2.2.10. Функциональная схема блока управления ОМ

Блок управления ОМ включает в свой состав 6 коммутируемых каналов управления RS-485 и блок управляемых реле. Включение и выключение напряжения ОМ (12 В) каждой секции осуществляется 12 канальным блоком реле. Данные, необходимые для работы платы управления, поступают по каналу Ethernet из центра сбора данных на плату Мастер, которая транслирует их в коммутатор RS-485. Коммутатор в свою очередь пересылает пакет данных в контроллер оптического модуля, адрес которого указан в заголовке пакета. К каждому каналу коммутатора RS-485 подключено два оптических модуля. Скорость передачи информации может быть установлена 9600 или 115200 бит/с. Выбор интерфейса RS-485 для управления ОМ обусловлен несколькими факторами: высокая надёжность, простота реализации, хорошая помехозащищённость и стабильность связи. Суть интерфейса RS-485 заключается в передаче одного сигнала по двум проводам. В качестве физического носителя применяется витая пара с волновым сопротивлением 120 Ом. Такой способ передачи обеспечивает высокую устойчивость к синфазной помехе. Линии RS-485 могут быть длиной до 1200 метров с пропускной способностью 62,5 кбит/с. Логические уровни интерфейса имеют повышенные значения напряжений (уровень логического “0” от +5 до +12 В, а логической “1” от –12 до –5 В), что способствует улучшению помехозащищённости обмена данными, а так же позволяет реализовать длинные линии передачи данных (более километра).

RS-485 является промышленным интерфейсом в котором сигналы, передаваемые по линии, имеют достаточно крутые фронты. Поэтому линия управления может являться источником наводок на измерительные каналы установки. Это связано с тем, что среда передачи RS-485 представляет собой не экранированную пару жил, размещённую в том же 90-метровом кабеле, в котором смонтирована коаксиальная линия передачи аналоговых сигналов, а в процессе регистрации событий предусмотрен периодический опрос

показаний счетчиков шумов оптических модулей, необходимый для мониторинга фоновых условий регистрации.



Рисунок 2.2.11. Наводка на измерительный канал от линии управления ОМ

На рисунке 2.2.11 показан пример наводки на измерительный канал от сигнала управления. Амплитуда наводки составляет величину ~ 20 мВ, сравнимую с амплитудой одноэлектронного сигнала ФЭУ, и может превышать порог регистрации триггерной системы. Однако, учитывая то, что частота таких сигналов составляет менее 0.1% от частоты шумов фотоэлектронного умножителя (шумы ФЭУ ~ 20 кГц, период опроса оптического модуля в процессе проведения штатного мониторинга составляет около 10^3 секунд) и перекрестная наводка с канала на канал для сигналов управления в лабораторных условиях не наблюдалась (т.е. отсутствуют коррелированные во времени сигналы с каналов), влияние данного эффекта на процесс регистрации событий является несущественным.

2.3 Гирлянда оптических модулей

Глубоководные модули регистрирующей системы детектора НТ1000 размещаются на вертикальных грузонесущих кабельных линиях, формируя гирлянды. Выбор такого подхода к организации системы регистрации

НТ1000 обусловлен методикой развертывания установки со льда, разработанной для детекторов НТ200 и НТ200+ и прошедшей многолетние испытания во время их развертывания и ежегодных профилактических работ. Компоновка регистрирующих электронных систем гирлянды, в первую очередь оптических модулей, оптимизируется для решения конкретных физических задач с учетом минимизации кабельных подводных коммуникаций. Электроника гирлянды позволяет реализовывать достаточно широкий набор конфигураций регистрирующей системы, и обеспечивает возможность различных способов группировки ОМ. В результате исследований глубины проникновения солнечного света в водный слой озера Байкал было выявлено, что гирлянда не должна состоять более чем из 4 секций, с расстоянием между оптическими модулями - 15 метров. В противном случае происходит засветка верхних модулей гирлянды, которые выходят за границу досягаемости солнечных лучей, образуя вследствие поглощения и рассеяния света в толще воды (примерно 600 м от поверхности озера) [38-42].

Конфигурация оптических модулей в секции может быть практически произвольной. Возможна установка ОМ на различных расстояниях друг от друга индивидуально или попарно. На одной гирлянде можно разместить несколько секций в различных конфигурациях. На рисунке 2.3.1 представлена блок-схема гирлянды оптических модулей состоящей из двух секций. На данный момент такая конфигурация является базовой для построения первого кластера телескопа НТ1000. 12 оптических модулей размещаются на расстоянии 15 м один под другим, формируя секцию длиной 180 м. Центральный Модуль располагается посередине секции, на равном расстоянии от крайних ОМ. Все глубоководные модули крепятся на стальном грузонесущем тросе. На этот же трос монтируются межмодульные кабельные коммуникации. Накладной кабель состоит из двух коаксиальных линий для передачи сигналов “запрос” и “подтверждение”, витой пары для передачи

данных по модемной линии связи и жил питания 300 В. На одной гирлянде размещается две идентичные секции оптических модулей. В верхней части гирлянды находится Коммутационный Модуль (КоМ), который обеспечивающий прием и передачу данных гирлянды по каналам на базе DSL-модемов, синхронизацию работы секций (сигналы запрос и подтверждение) и управление электропитанием гирлянды (коммутатор 300В). Также, в состав гирлянды входят несколько акустических маяков, позволяющих организовать систему позиционирования установки [43, 44]. Расстояние между верхним модулем нижней секции и нижним верхней составляет 15 м. Таким образом, общая длина гирлянды составляет величину 360 м - вертикальный размер установки НГ1000. Блок-схема гирлянды показана на рисунке 2.3.1.

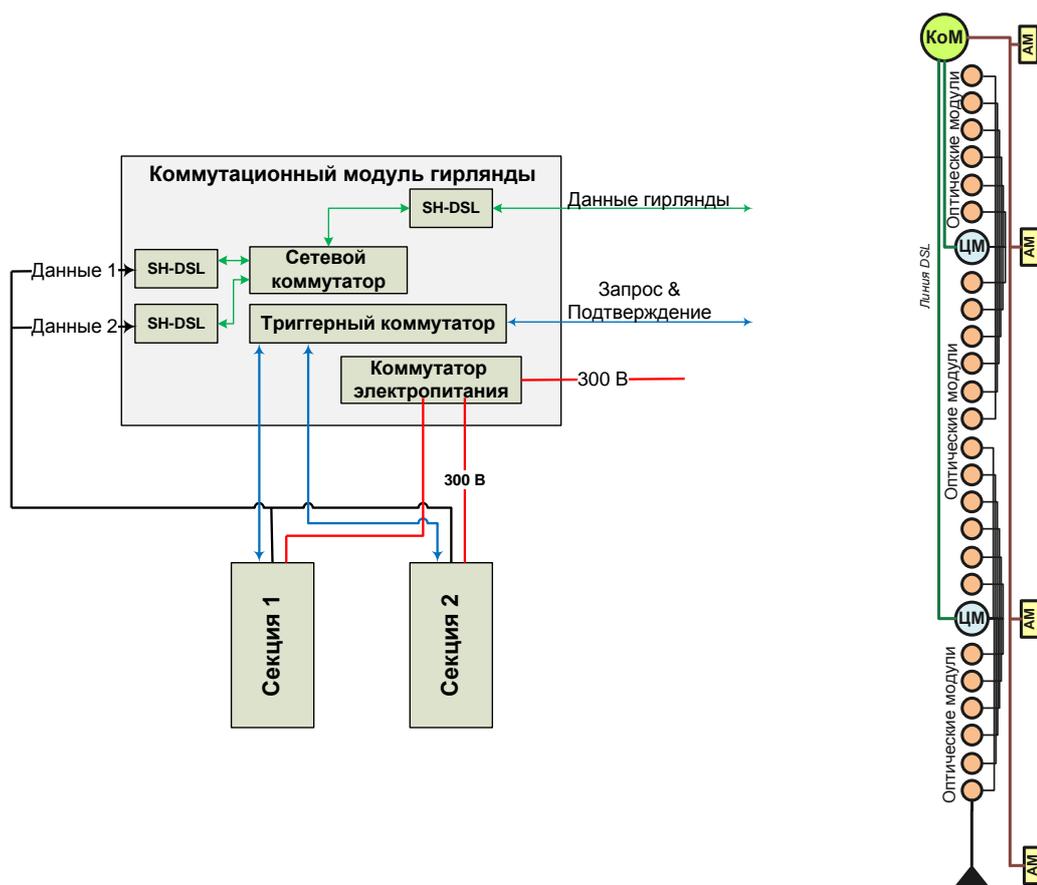


Рисунок 2.3.1. Блок-схема гирлянды оптических модулей, состоящей из двух секций

В качестве интерфейсного модуля, связывающего секции оптических модулей с центром сбора данных кластера, используется модуль коммутации гирлянды. В состав этого модуля входит три основных узла: сетевой коммутатор, коммутатор электропитания и коммутатор триггерных сигналов. Сетевой коммутатор представляет собой сборку из 3-х DSL модемов, связанных через MOXA Switch EDS-405A-T. Его функцией является объединение двух линий данных секций в один канал, соединяющий гирлянду с центром кластера. Триггерный коммутатор позволяет объединить сигналы запросов, поступающие от секций, и разветвить сигнал подтверждения (общий триггер установки) на каждый блок Мастера гирлянды. Управляемый коммутатор электропитания 300В позволяет независимо включать и выключать электропитания узлов гирлянд: блоков АЦП и оптических модулей. Электрическая схема модуля КоМ показана на рисунке 2.3.2.

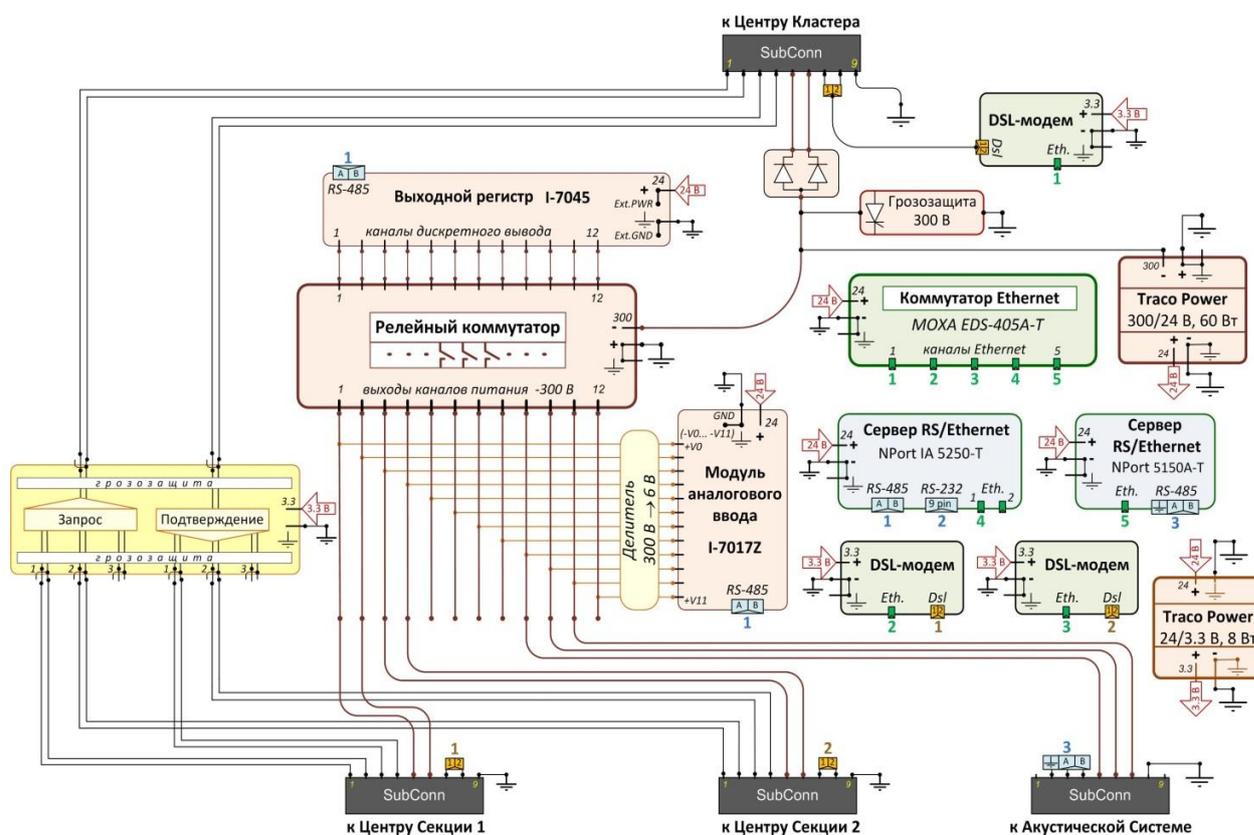


Рисунок 2.3.2. Электрическая схема модуля коммутации гирлянды

Модуль коммутации, размещенный в глубоководном корпусе, показан на рисунке 2.3.3.



Рисунок 2.3.3. Модуль коммутации гирлянды в глубоководном корпусе

2.4 Кластер

Конфигурация телескопа НТ1000 предполагает гибкую модульную структуру, которая формируется из независимых кластеров вертикальных гирлянд оптических модулей. Каждый кластер будет представлять собой полностью законченную регистрирующую систему, способную работать как в автономном режиме, так и в составе полномасштабного детектора. В результате выполненных оптимизационных расчетов и математического моделирования телескопа НТ1000 показано, что для обеспечения оптимального объема регистрации каскадов и эффективной площади для мюонов, кластер должен состоять из 8 гирлянд, расположенных на расстоянии 60 м друг от друга. Дистанция между оптическими модулями при этом должна быть около 15 м. При этом каждая гирлянда будет состоять из 24 оптических модулей, а кластер будет включать в себя 192 ОМ [45-47]. Схема размещения гирлянд в кластере показана на рисунке 2.4.1.

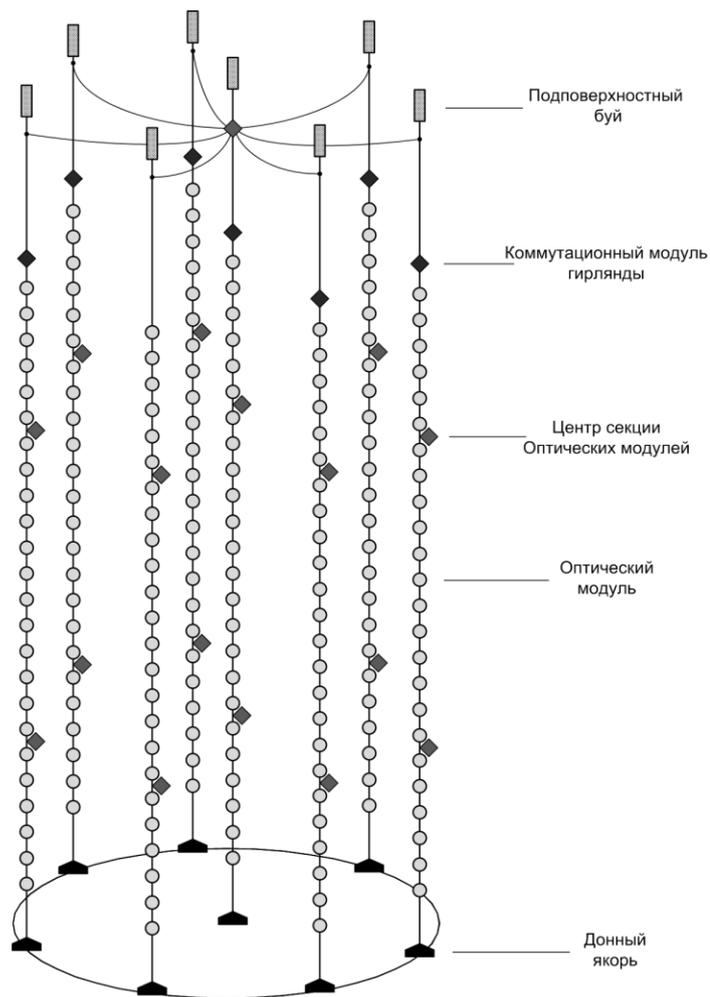


Рисунок 2.4.1. Схема размещения гирлянд кластера

Для управления работой гирлянд в состав кластера включен дополнительный узел – центр сбора данных кластера (Центр Кластера). Центр кластера располагается вблизи поверхности воды на глубине ~ 30 м. Он обеспечивает работу триггерной логики кластера в целом, передачу питания к каждой гирлянде и связь с береговым центром. Блок-схема электроники центра кластера показана на рисунке 2.4.2.

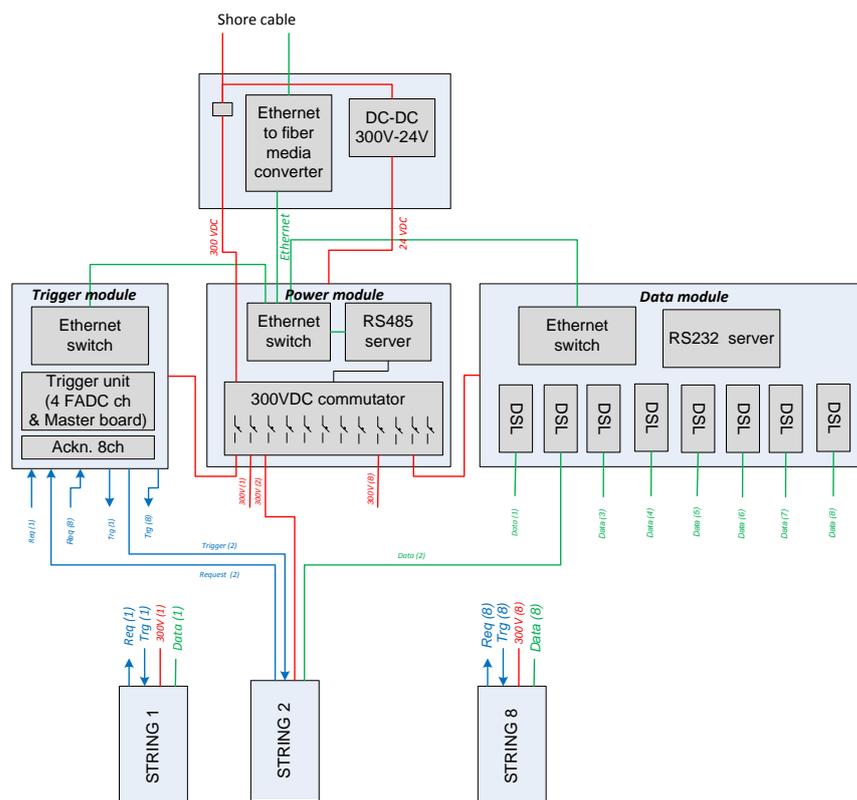


Рисунок 2.4.2. Блок-схема и общий вид центра сбора данных кластера

В состав центра кластера (ЦК) входят четыре основных узла, размещенных в четырех глубоководных корпусах: триггерный модуль, модуль электропитания, модуль данных и оптический наконечник (см. рис. 2.4.2). Необходимость распределения аппаратуры по разным корпусам связана с ограничением на максимальное энерговыделение в стеклянном глубоководном корпусе ~40 Ватт. Использование единого металлического

корпуса для всей электроники центра кластера возможно, но затрудняет оперативную отладку системы и не эффективно на этапе проектирования кластера.

Фотография триггерного модуля в корпусе показана на рисунке 2.4.3. Его основными элементами являются плата Мастер и два блока 4-х канальных АЦП, аналогичных блокам, входящим в состав спектрометрических каналов телескопа, и имеющих тот же механизм формирования триггера.

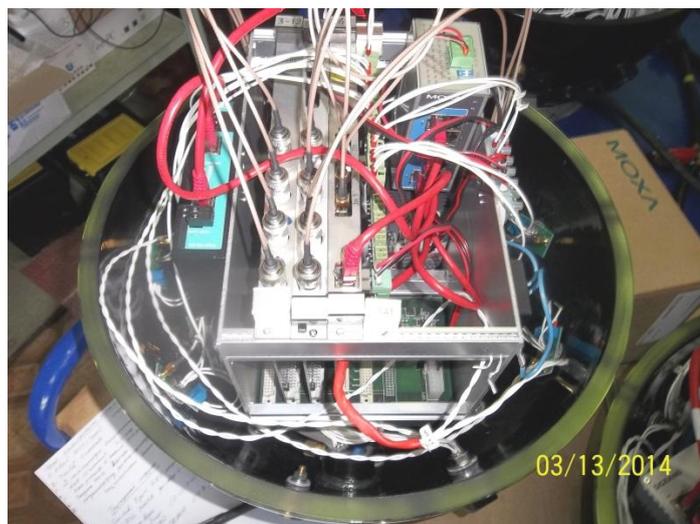


Рисунок 2.4.3. Триггерный модуль центра кластера в глубоководном корпусе

Кроме указанной аппаратуры, в триггерном модуле установлен разветвитель сигналов подтверждения на 8 гирлянд, коммутатор Ethernet и преобразователь напряжения 300/24 Вольт.

Модуль электропитания показан на рисунке 2.4.4. В состав модуля питания входит управляемый многоканальный коммутатор электропитания 300 Вольт, оснащенный системой мониторинга величины напряжения на выходе каждого канала.

Модуль данных предназначен для сбора информации со всех гирлянд. Внешний вид модуля показан на рисунке 2.4.5. Он состоит из 8 DSL-модемов и 8-канального сервера RS-232 для управления скоростью работы модемов.



Рисунок 2.4.4. Модуль электропитания центра кластера в глубоководном корпусе

Центр Кластера подключен к Береговому Центру (БЦ) через оптический наконечник с помощью двух оптоволоконных линий Ethernet (технология 1000Base-LX), пропускная способность которых составляет 1 Гбит/с. Организации такого высокоскоростного канала данных стала возможной после прокладки по дну оз. Байкал электрооптического кабеля длиной 6 км с тремя парами оптических волокон и шестью медными токопроводящими жилами.



Рисунок 2.4.5. Модуль данных центра кластера

Триггерная система кластера

Система формирования триггера кластера телескопа HT1000 имеет двухуровневую структуру [48-51]. Триггера нижнего уровня формируют платы АЦП и Мастер секций гирлянд. Платы АЦП не только измеряют форму импульсов оптических модулей, но и вырабатывают триггерные сигналы измерительных каналов L и H , соответствующие превышению входного импульса низкого и высокого порогов регистрации. Значения порогов могут устанавливаться программно во всем динамическом диапазоне АЦП с дискретностью ~ 1 мВ (~ 0.05 ф.э.). В штатном режиме регистрации низкий порог L имеет значение ~ 0.3 ф.э., обеспечивая эффективность регистрации одноэлектронных сигналов на уровне, превышающем 80%. Высокий порог может варьироваться в пределах 2 – 3 ф.э. в зависимости от величины шумов ФЭУ и пропускной способности системы передачи данных. Натурные испытания ФЭУ показывают, что средняя частота следования сигналов L достигает значения ~ 50 кГц, и обусловлена главным образом свечением байкальской воды. Характерная зависимость отношения R темпов счета сигналов L и H от порога регистрации в одноэлектронном режиме работы ФЭУ показана на рис. 2.4.6. Таким образом, с увеличением порога от 2 ф.э. до 3 ф.э. частота шумовых сигналов ФЭУ уменьшается от ~ 1 кГц до 300 Гц.

Триггерные сигналы каналов поступают в плату Мастер центра секции, где формируется триггер секции – сигнал “запрос” – как совпадение триггеров каналов L и H от любых соседних оптических модулей секции в варьируемом окне.

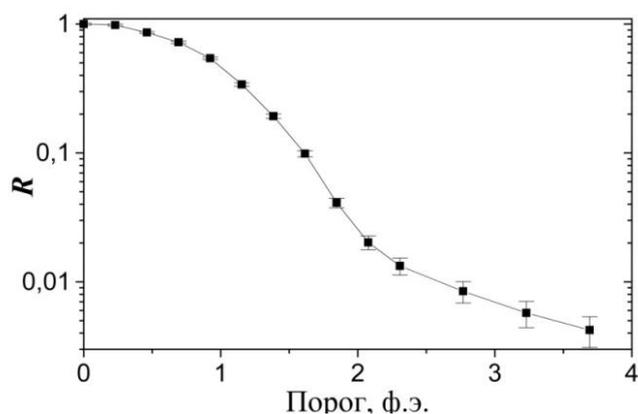


Рис. 2.4.6. Зависимость фактора подавления шумов ФЭУ от порога регистрации

Триггера от всех секций гирлянды поступают в Коммутационный Модуль, где они объединяются в плате коммутатора запросов (триггерный коммутатор) в единый сигнал “запрос” гирлянды. Схема организации триггера и системы синхронизации гирлянд и кластера в целом представлена на рисунке 2.4.7.

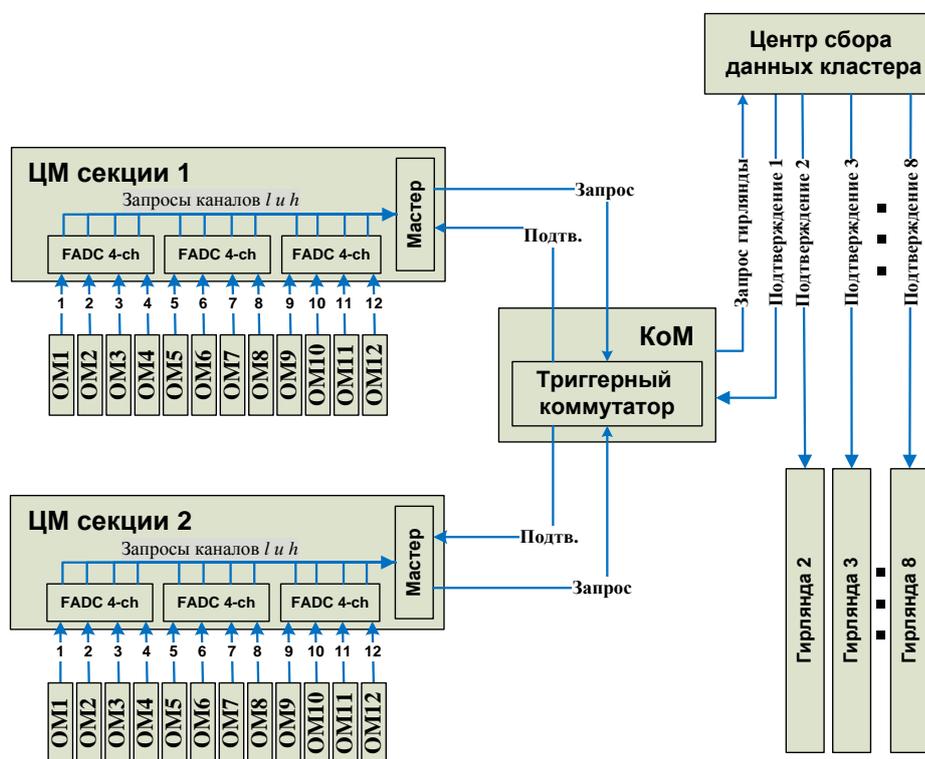


Рисунок 2.4.7. Схема организации триггера и системы синхронизации гирлянд и кластера в целом

Сигналы “запрос” гирлянд передается по коаксиальным кабелям длиной ~1250 м в центр сбора данных кластера, где формируется триггер кластера – общий для всех гирлянд сигнал “подтверждение”. Задержка между сигналами “запрос” и “подтверждение” определяется главным образом длиной кабеля и составляет величину около 20 мкс. Сигнал “подтверждение” возвращается на все гирлянды кластера, разветвляется в Коммутационных Модулях и транслируется на все секции гирлянд, обеспечивая синхронную обработку данных всеми платами АЦП. Аппаратура, обеспечивающая формирование сигнала “подтверждение” (триггер второго уровня) аналогична электронике Центрального Модуля секции. Она включает в свой состав две платы 4-х канальных АЦП и плату Мастер. Сигналы “запрос” от гирлянд поступают на входы плат АЦП, которые обеспечивают измерение их времен прихода. Непосредственное формирование триггера кластера осуществляется в плате Мастер на основании анализа времен поступления и множественности триггерных сигналов гирлянд. Конкретная триггерная логика определяется параметрами, загружаемыми в систему управления работой платы Мастер. В простейшем случае возможно формирование сигнала “подтверждение” кластера как логическое “ИЛИ” всех “запросов” гирлянд. По сигналу “подтверждение” данные от всех гирлянд передаются в центр сбора данных кластера, а затем транслируются в Береговой центр, где на программном уровне в режиме реального времени осуществляется кластеризация и окончательный отбор полезных событий.

Система управления электропитанием

Концепция системы управления питанием телескопа НТ 1000, также как и регистрирующей системы детектора, основана на базовых принципах построения иерархических структур, где каждый элемент системы более низкого уровня находится под управлением элемента более высокого уровня. Основными функциями системы управления и контроля являются управление электропитанием установки, управление регистрирующей

системой (режимами работы оптических модулей, каналов АЦП, триггерной системы) и мониторинг работы аппаратуры детектора.

Электропитание аппаратуры кластера НТ1000 осуществляется от берегового источника питания (БИП) с постоянным напряжением ~ 450 В. Падение напряжения на 6 километровом магистральном электрооптическом кабеле составляет около 150 В, поэтому все вторичные подводные преобразователи питания рассчитаны на напряжение 300 В. В соответствии с иерархической структурой установки, система электропитания кластера разделена на два уровня (рисунок 2.4.8).

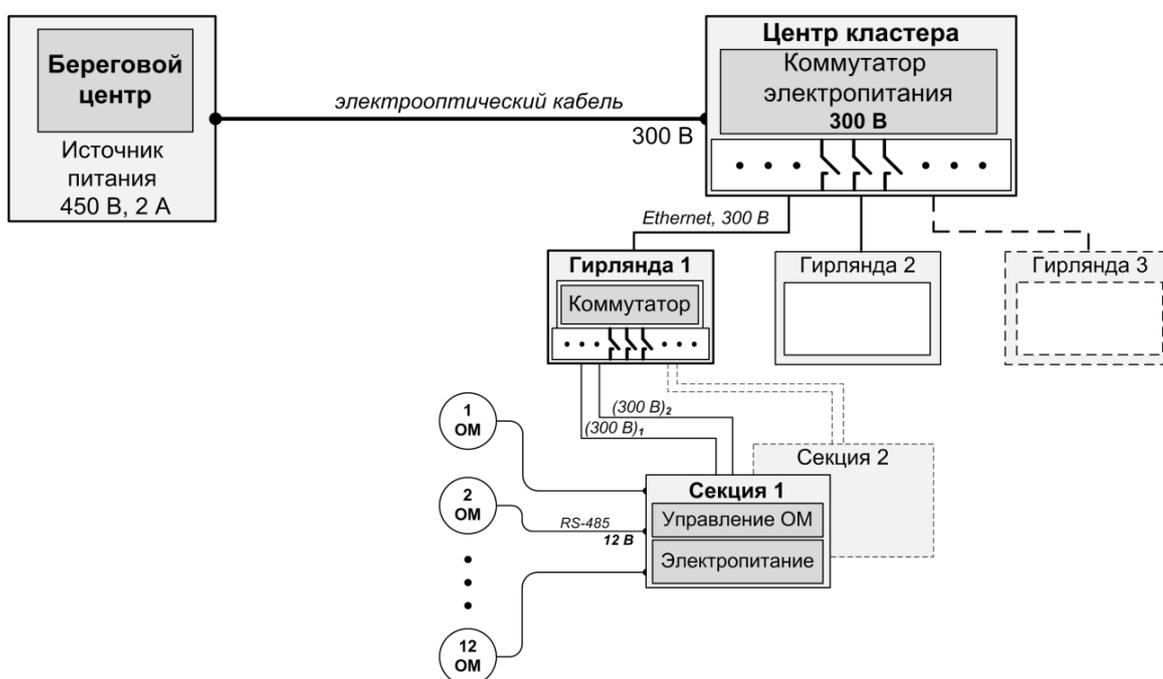


Рисунок 2.4.8. Функциональная схема системы электропитания кластера

Первый уровень включает в себя управляемый 12-канальный коммутатор электропитания гирлянд, который размещен в центре кластера. Коммутаторы второго уровня установлены на каждой гирлянде в глубоководных модулях коммутации (КоМ). Они позволяют производить независимое включение и отключение электропитания секций гирлянд. Такая организация электропитания обеспечивает устойчивую работу системы в целом при выходе из строя отдельных ее элементов (гирлянд и секций).

Возможность удаленного отключения электропитания отдельных узлов установки особенно актуальна в условиях работы под водой, когда нарушение герметичности глубоководных модулей или элементов кабельных коммуникаций может привести к короткому замыканию линий электропередачи.

Функциональная схема коммутатора приведена на рисунке 2.4.9. Независимое включение и выключение каждого канала осуществляется по локальной сети Ethernet через COM-сервер (преобразователь Ethernet-RS485) и I-порт (промышленный модуль дискретного 16-канального вывода ICP DAS I-7045). Мониторинг питающего напряжения осуществляется 20-канальным модулем аналогового ввода ICP DAS I-7017Z. Питающее напряжение 300 В предварительно понижается на высокоомном делителе. Показания АЦП каналов коммутаторов (значение первичного напряжения электропитания телескопа -300 В) записываются в отдельном блоке информации и передаются для обработки в береговой центр.

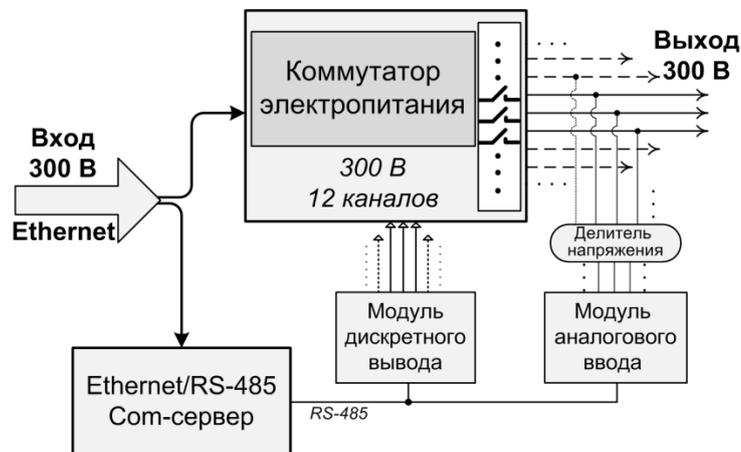


Рисунок 2.4.9. Схема управления коммутатором электропитания.

Система передачи данных кластера

Подводная локальная сеть телескопа НТ1000 представляет собой разветвлённую структуру топологии “звезда”, состоящую из группы каналов связи, по которым производится обмен информацией между различными

На рисунке 2.4.10 представлена структура подводной локальной сети с точки зрения потоков данных и необходимых пропускных способностей линий. При штатном синхронном режиме работы кластера с триггером, основанном на совпадении сигналов двух соседних оптических модулей с порогами 0.3 и 3 ф.э., ожидаемый темп регистрации событий с 8 гирлянд составляет величину порядка 100...200 Гц. Размер несжатого кадра с каждого из каналов 12 бит АЦП составляет 2 КБ, поэтому при темпе счёта 200 Гц поток данных со всех каналов АЦП к плате Мастер в центре секции равен ~ 40 Мбит/с. На данном участке сети внутренний интерфейс обмена данными позволяет работать на скоростях до 1000 Мбит/с и, таким образом, не ограничивает общий темп счёта установки.

Следующий уровень сети центр секции – модуль гирлянды, имеет протяжённость порядка нескольких сотен метров, и пропускная способность линии ограничена возможностями DSL модемов (до 15 Мбит/с). Аппаратно-программный модуль платы Мастер позволяет проводить фильтрацию дорожек в режиме реального времени с фактором сжатия $\times 50 \dots 100$. Таким образом, реальный поток данных от одной секции будет не более 1 Мбит/с. В штатной конфигурации гирлянды из 2-х секций скорость SHDSL-модемов вручную ограничена до 5696 Кбит/с.

Потоки данных секций собираются в коммутационном модуле гирлянд и транслируются в центр кластера (рассматриваются варианты компоновки детектора с 3-мя или 4-мя секциями в составе гирлянды). Длина линии данных от КоМ до центра кластера чуть более 1 км и SHDSL-модемы ограничивают пропускную способность на уровне 10 Мбит/с. Реальный поток данных от 2-х секций с учётом фильтрации составит около 2 Мбит/с, что в пять раз ниже максимально возможного.

Данные от 8-ми гирлянд с максимальным потоком до 80 Мбит/с поступают на сетевой коммутатор центра кластера, а далее, через оптическую муфту, в Береговой центр сбора данных. На этом участке

локальной сети используется технология Ethernet со скоростями от 100 до 1000 Мбит/с, что заведомо больше теоретического потока данных всего кластера.

Оптическая связь

Глубоководные регистрирующие системы, входящие в состав нейтринного телескопа, распределены в пространстве на значительные расстояния, и одной из актуальных задач при разработке детектора гигатонного объёма является организация быстрого информационного канала между каждым кластером установки и центром сбора данных (береговым центром). Первая версия высокоскоростной глубоководной системы передачи данных для нейтринного телескопа НТ1000 была разработана и включена в состав прототипа кластера в 2011 года. Локальная подводная сеть организована на основе Ethernet-технологии со скоростью передачи данных 1 Гбит/с.

Работа такого быстрого канала данных стала возможна после прокладки в 2011 году по дну оз. Байкал электрооптического кабеля длиной 6 км с тремя парами оптических волокон и шестью медными токопроводящими жилами. Спроектированная и собранная оптико-электрическая подводная муфта, расположенная в коммутационном центре, позволила осуществить эффективную передачу питания к кластеру и преобразовать оптический сигнал в электрический (Ethernet). Внешний вид и блок-схема подводного оптического наконечника представлена на рисунке 2.4.11.

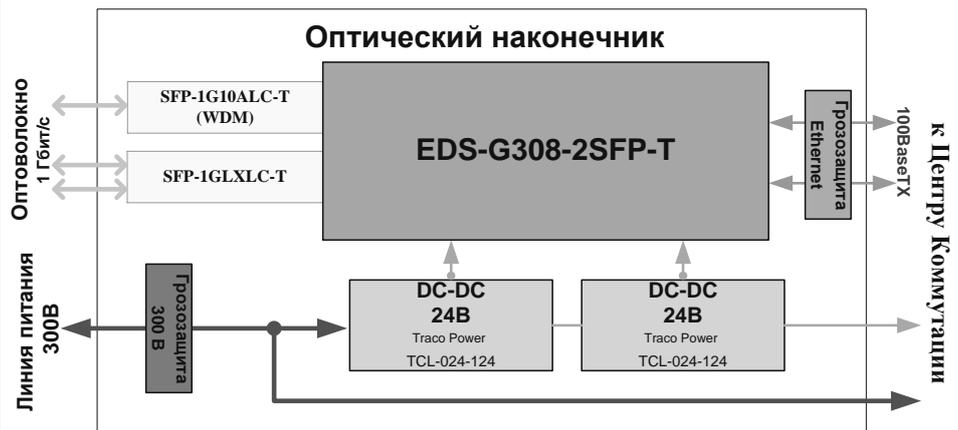


Рис. 2.4.11. Внешний вид и блок-схема оптического наконечника

Центр прототипа кластера и оптико-электрическая подводная муфта располагаются вблизи поверхности воды на глубине около 30 м. Данные от каждой гирлянды поступают в модуль связи и далее на сетевой коммутатор MOXA EDS-G308-2SFP-T, расположенный непосредственно в наконечнике. Данный коммутатор имеет 6 портов Fast Ethernet и два Combo Gigabit порта для подключения различных SFP интерфейсных модулей под одномодовое или многомодовое волокно. Коммутатор оснащен резервированными входами электропитания и подключён к двум высоконадёжным блокам Traco Power с питающим напряжением 24 В.

Благодаря наличию встроенного реле, устройство может автоматически сигнализировать об обрыве Ethernet-связи или отключении одного из блоков питания. Преобразование электрического сигнала в оптический происходит в SFP модулях двух типов: один из них (SFP-1GLXLC-T) работает в стандартном режиме с использованием пары волокон для передачи в прямом и обратном направлениях, другой (SFP-1G10ALC-T WDM) работает по технологии спектрального уплотнения каналов и использует только одно

оптоволокну. Оптические сигналы распространяются к сетевому коммутатору Берегового Центра по одномодовым волокнам AllWave® FLEX ZWP с рабочим диапазоном длин волн 1275...1625 нм.



Рис. 2.4.7. Внешний вид SFP интерфейсных модулей MOXA

Питание кластера 300 Вольт поступает по отдельным медным жилам глубоководного электрооптического кабеля. Для защиты линии данных стандарта 100BaseTX и линий питания от грозовых разрядов и скачков напряжения в оптическом наконечнике предусмотрены устройства защиты от импульсных перенапряжений. Повышение надежности работы оптического преобразователя и кластера в целом достигается путём резервирования линий питания, оптических линий и вторичных преобразователей напряжения в особо критичных узлах установки.

В настоящее время система кабельных коммуникаций и волоконно-оптическая линия передачи данных успешно прошла лабораторное и натурное тестирование в составе прототипа кластера 2011-2014 гг., и готова к штатному использованию в будущем полномасштабном детекторе.

Выводы

В заключение второй главы можно выделить структурные особенности разработанной системы сбора данных телескопа НТ1000:

- Унификация системных блоков: секция, гирлянда, кластер.
- Распределённая система регистрации в пределах секции: ФЭУ-ОМ-ЦМ.
- Элементарная детектирующая единица - Оптический Модуль, сочетающий максимальную простату и надёжность, при этом измерительная электроника находится за пределами ОМ (АЦП в центре секции).
- Использование наносекундных аналогово-цифровых преобразователей, позволяющих получать временную развертку по каждому из измерительных каналов телескопа.
- Синхронная работа кластера. В противовес асинхронной работе, для которой необходимы быстрые линии передачи данных и жёсткие триггерные условия.
- Использование экономичных линий передачи данных по технологии DSL с дополнительной фильтрацией данных.

ГЛАВА 3. ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ ТЕЛЕСКОПА НТ1000 В ОЗ. БАЙКАЛ

Начиная с 2009 г. работы по созданию НТ1000 находятся на стадии комплексных долговременных испытаний его элементов и функциональных систем в составе автономных модулей функционирующих в натуральных условиях [52,53]. Первый этап реализации программы комплексных испытаний в течение 2010-2012 гг. был нацелен на изучение характеристик элементов регистрирующей системы НТ1000 – оптических модулей, спектрометрических каналов, триггерной системы, узлов электропитания, калибровочной системы и ряда других в режиме долговременной эксплуатации. Для решения задач первого этапа в 2011 г. на оз. Байкал был развернут автономный модуль из трех гирлянд, каждая из которых содержала по 8 оптических модулей на базе фотоэлектронных умножителей трех типов с полусферическими фотокатодами - R8055, R7081HQE и XP1807. Исследования, выполненные в течение 2011 г. позволили определить основной набор комплектующих элементов гирлянды телескопа НТ1000. В частности, в качестве светочувствительного элемента оптического модуля был выбран ФЭУ R7081HQE фирмы Hamamatsu.

В 2012 году была развёрнута первая полномасштабная гирлянда из 24 ОМ, которая являлась опытным образцом гирлянды телескопа НТ1000. Конфигурация и структурные особенности данной гирлянды послужили базисом для дальнейшего укрупнения установки и увеличения количества гирлянд в последующие годы. В дополнение к полной гирлянде были смонтированы две коротких с 6 ОМ в каждой и одна инструментальная с калибровочным лазером (рисунок 3.1.1).

измеренных амплитуд входных сигналов. Каждый кадр содержит информацию обо всех сигналах, поступивших с канала в течение 5 мкс. Использование методики сканирования при помощи быстрых АЦП существенно увеличивает информативность физических событий. Для передачи данных от гирлянд к центру кластера и от секций к центрам гирлянд используется канал на основе DSL-модемов. В 2012 году на участках ЦК – КоМ и ЦМ – КоМ применялись SHDSL-модемы Sigrand SG-17B.

Весной 2013 года в оз. Байкал была введена в эксплуатацию установка, состоящая из трех гирлянд оптических модулей, расположенных на глубинах ~900 – 1200 м, и технологическая гирлянда с 8 оптическими модулями, предназначенная для исследований светового фона оз. Байкал на относительно малых глубинах (до 600 м). В 2014 году установка была дополнена ещё двумя гирляндами: одной с 24 оптическими модулям, другой с 16 оптическими модулями и отдельной сферой со светодиодными источниками (LED-матрица) для временной калибровки каналов детектора. Структурная схема установки показана на рисунке 3.1.2.

На этапах разработки первого кластера НТ1000 в 2013-2014 годах был окончательно сформирован состав аппаратуры центральных модулей секций и коммутационных модулей гирлянд, подготовлен универсальный центр кластера (ЦК), поддерживающий подключение до восьми гирлянд, оптимизированы состав аппаратуры и технология передачи данных (SHDSL) с учётом необходимой пропускной способности подводной локальной сети.

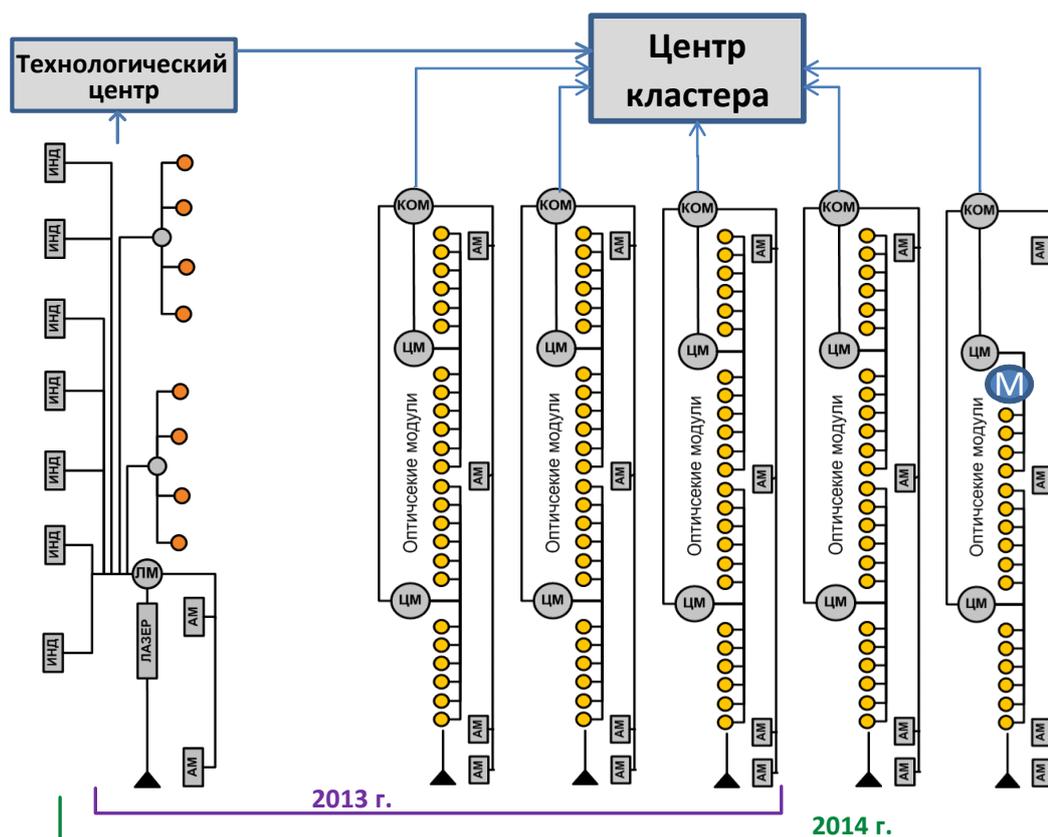


Рисунок 3.1.2. Пять гирлянд НТ1000 и технологическая гирлянда, установленные в оз. Байкал в 2013-2014 гг.

Эффективность работы системы сбора данных (мертвое время, доля потерянных событий, информативность данных) определяется темпом поступления физических событий, размером событий, скоростью передачи и возможностями промежуточной буферизации получаемой информации. Темп поступления событий определяется порогами регистрации каналов, условиями формирования триггера и величиной фонового свечения. Необходимость регистрации установкой сверхслабых световых потоков (вплоть до единичных фотонов) требует установки порогов каналов на одноэлектронном уровне (0.3 – 1 ф.э.) и использование предельно “мягких” триггерных условий (двойные совпадения соседних оптических модулей). В этих условиях фактором, определяющим темп счета каналов, является собственное свечение воды оз. Байкал. Характерная величина темпа счета

каналов составляет 15 – 20 КГц и может существенно увеличиваться в период повышенной световой активности озера.

Размер события зависит от частоты дискретизации аналогово-временных преобразователей, амплитудного разрешения и временного окна, используемого для регистрации события. Для того, что бы обеспечить регистрацию событий без потери полезной информации частота дискретизации составляет 200 МГц, амплитудное разрешение 12 бит, а временное окно – 5 мкс. Скорость передачи определяется мощностью наименее быстродействующего сегмента канала данных (в нашем случае – сегмент, связывающий гирлянды с центром кластера).

Основными задачами исследований с прототипами новой измерительной системы были долговременные испытания аппаратуры системы регистрации и сбора данных, оптимизация временных и амплитудных характеристик измерительных каналов на базе 200 МГц АЦП с разрядностью 12 бит, комплексная проверка триггерной системы и систем передачи информации, проверка выбранных конструктивных решений.

3.1 Исследование параметров системы передачи данных

Глубоководную информационную сеть телескопа НТ1000 можно разделить на несколько уровней, каждый из которых использует свою технологию и среду передачи данных. Длина соединения, необходимая для связи между береговым центром сбора данных (БЦ) и центром кластера (ЦК), более 6 км. На этом сегменте информационной сети установки используются оптоволоконную линию связи, как единственную возможность передачи данных под водой на большие расстояния при скоростях не менее 100 Мбит. Для связи Центра кластера с коммутационными модулями гирлянд (КоМ) используются линии передачи длиной ~ 1000 м на основе DSL технологии. Связь между КоМ и секциями оптических модулей осуществляется по линиям длиной 100 – 300 метров, для которых также

применяются DSL-технологии. Последний сегмент сети – линия связи между Центральными Модулями секции и оптическими модулями, где длина соединения порядка 90 метров. На этом участке применяется “витая пара” и интерфейс RS-485. Архитектура информационной сети кластера показана на рисунке 3.1.3.

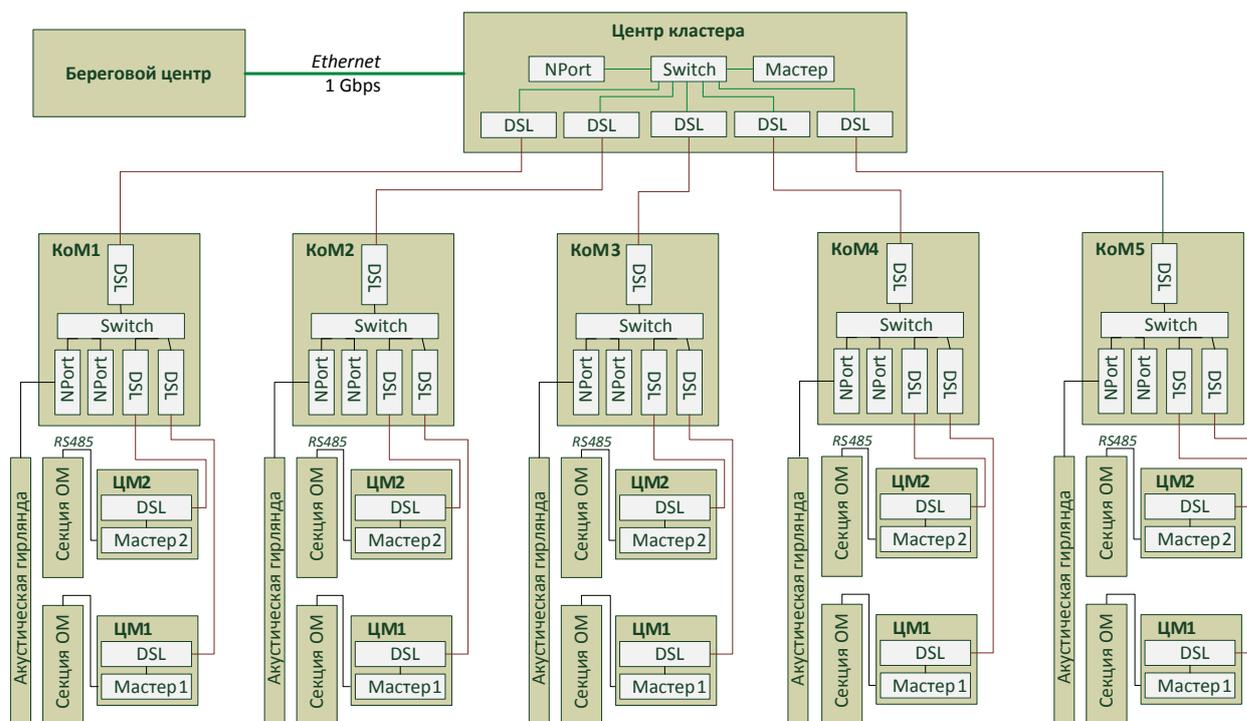


Рис. 3.1.3. Архитектура глубоководной информационной сети кластера 2014 г.

В узлах сети используется промышленная сетевая аппаратура: интеллектуальные управляемые коммутаторы Ethernet EDS-405A-T (Switch) и конвертеры Ethernet-RS485 NPort IA-5250-T (NPort). Конвертеры предназначены для управления аппаратуры гирлянды по шине RS-485: акустических модемов, коммутаторов электропитания, модулей системы медленного мониторинга. Управление работой оптических модулей осуществляется посредством платы “Мастер” и специализированной платы блока управления в центральном модуле секции.

Проверка качества связи осуществляется для каждого узла береговой и подводной сети посредством периодической отправки пакетов до исследуемого узла и определения времени отклика данного узла. Для единичной проверки используется утилита для проверки соединений в сетях на основе TCP/IP (ping). Утилита отправляет запросы (ICMP Echo-Request) протокола ICMP указанному узлу сети и фиксирует поступающие ответы (ICMP Echo-Reply). Время между отправкой запроса и получением ответа позволяет определять двусторонние задержки по маршруту и частоту потери пакетов, кроме того, по отправке пакетов разной длительности можно оценить скорость линии связи.

Для накопления данных по мониторингу линии связи на различных уровнях сети и для визуализации результатов использовалась специализированная программа SmokePing (<http://oss.oetiker.ch/smokeping>), которая в реальном времени накапливает данные с заданной скважностью по времени отклика различных сетевых узлов, и позволяет представлять результаты в графическом виде в веб-интерфейсе. Таким образом, результаты могут быть доступны для удаленного пользователя от начала набора данных до момента последнего опроса. В данном случае программа сконфигурирована таким образом, что проверка всех интересующих узлов сети осуществляется каждые 5 мин по 20 запросов пакетами по 56 байт. Таким образом, получаемая каждые 5 минут информация содержит среднее время отклика, количество прошедших пакетов и дисперсию временного разброса прохождения отклика. Пример графического представления данных для одного из сетевых узлов в центре кластера представлен на рисунке 3.1.4.

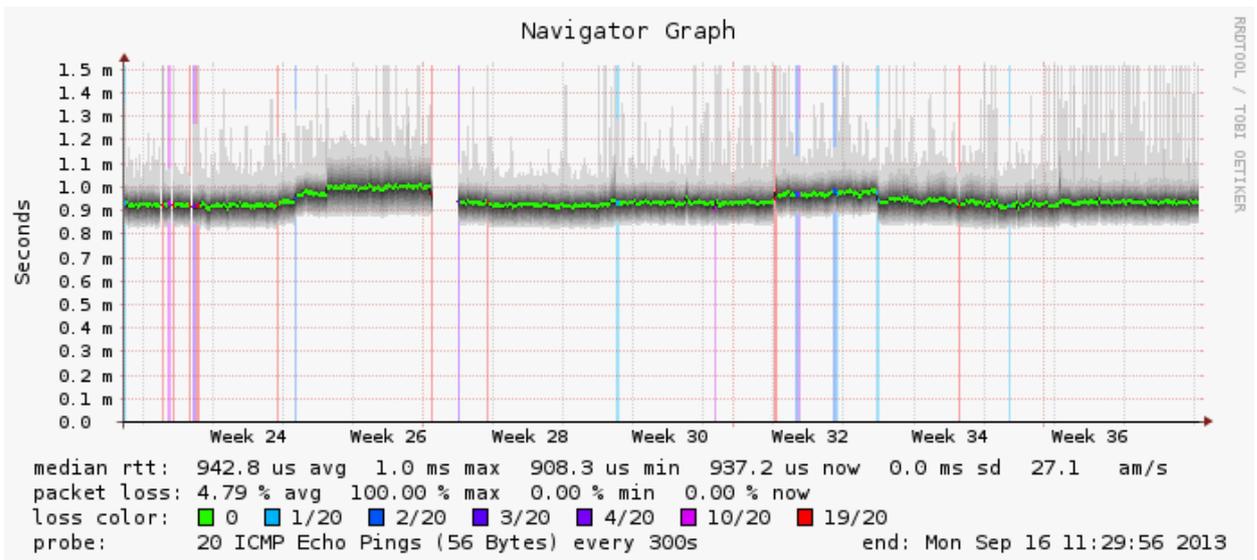


Рисунок 3.1.4. Временной отклик сетевого узла центра кластера с 1.06.2013 до 16.09.2013

Из рисунка видно, что характерное время отклика на короткий пакет составляет около 1 мс, дисперсия временного отклика составляет около 0.2-0.4 мс. На протяжении всего времени наблюдения связь стабильная, что обусловлено применением оптоволоконной линии с пропускной способностью 1 Гб/с. Промежутки отсутствия связи происходили вследствие штатного отключения питания установки для ремонтных работ на береговом центре.

Следующим уровнем сети являются сегменты, связывающие центр кластера (ЦК) с коммуникационными модулями гирлянд (КоМ). В процессе оптимизации данного уровня подводной сети в кластере из трёх гирлянд 2013 года были применены VDSL2-модемы с автоматической подстройкой скорости передачи, в зависимости от качества кабельной линии и наличия на ней паразитных шумов. Более детально специфика и особенности работы применяемых VDSL2 и SHDSL модемов рассмотрены в приложении. На рис. 3.1.5 приводится состояние связи на участке Береговой Центр (БЦ) – КоМ 3-ей гирлянды. Как и в предыдущем случае, полное отсутствие связи означает отсутствие питания на установке. Время отклика на сетевой пакет, как видно из рисунка составляет 12-15 мс, при этом наблюдается отсутствие потерь

пакетов. Этот факт означает, что поток данных с данной гирлянды ниже пропускной способности линии связи.

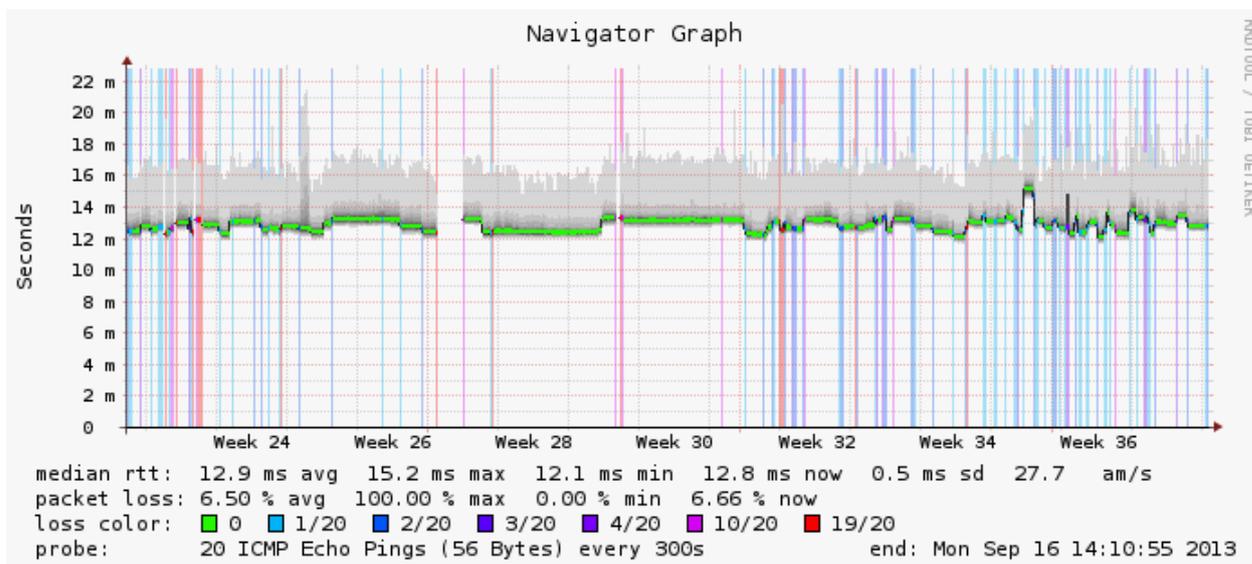


Рисунок 3.1.5. Временной отклик сетевого узла КоМ 3-ей гирлянды с 1.06.2013 до 16.09.2013

На рисунке 3.1.6 представлен мониторинг состояния связи берегового хоста с центральным модулем (ЦМ) нижней секции 3-ей гирлянды — 3-его уровня сети. Как видно из рисунка, среднее время отклика меняется от 25 до 40 мс при дисперсии 10-15 мс. Кроме того, значительную часть времени наблюдения происходят потери 1 сетевого пакета на каждые 20. Этот факт объясняется тем, что мониторинг проводится всегда, т. е. и во время набора экспериментальных данных с установки, т. е. тогда, когда по линии связи идет поток данных, сравнимый с пропускной способностью линии, который может влиять как на временной отклик данного сетевого узла, так и на прохождение дополнительных пакетов. Также как и в случае с узлом в центре кластера, периоды полного отсутствия связи обусловлены отключением питания установки.

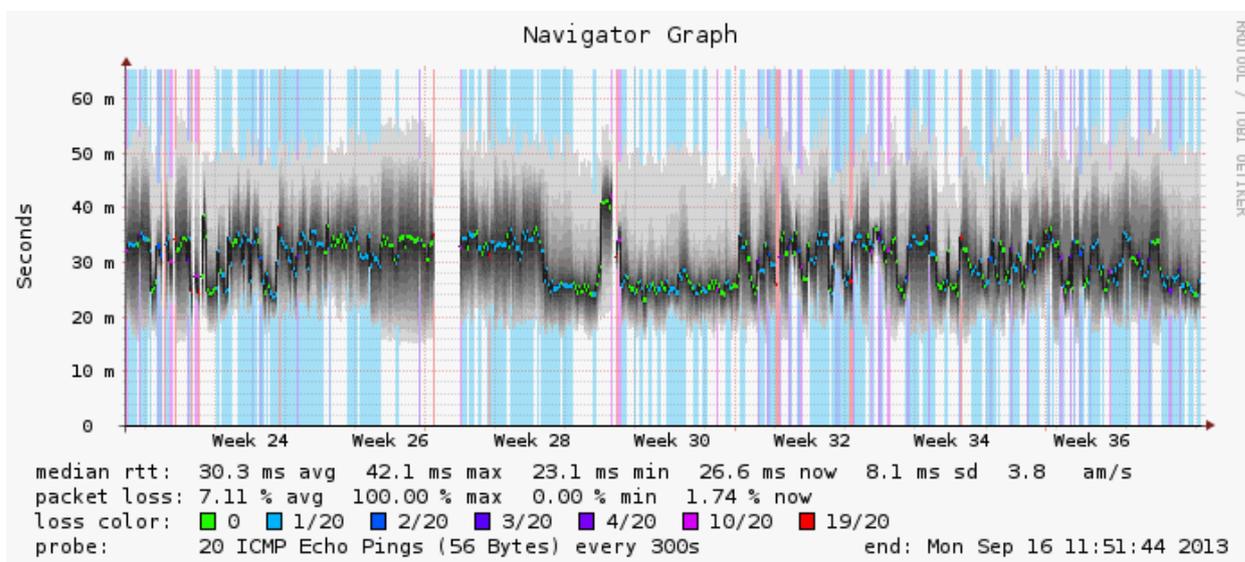


Рисунок 3.1.6. Временной отклик ЦМ нижней секции 3-ей гирлянды с 1.06.2013 до 16.09.2013

Точное определение текущей скорости соединения между 2-я сетевыми узлами возможно при использовании программ подобных Iperf, PCATTCP, Netcps. Но использование таких утилит предполагает клиент-сервер структуры. Другими словами, необходимо на обоих концах соединения иметь компьютеры с установленной одной из программ. В существующей конфигурации такой подход невозможен. Поэтому для оценки скорости связи использовалась утилита ping с различной длиной пакета. Аппаратная задержка каждого узла учитывалась с использованием коротких пакетов. Скорость передачи по линии за вычетом аппаратной задержки определялась при посылке длинных пакетов (в зависимости от разной архитектуры сети для различных узлов от 10008 до 40008 байт).

Автоматическая настройка скорости соединений для используемых в кластере 2013 года VDSL2-модемов имеет градации 64 Кбит/с. Такой точности нельзя добиться используемым методом. Поэтому приводимые ниже результаты носят оценочный характер. Ниже приводится таблица результатов измерения скорости линии связи БЦ - сетевой узел (таблица 3.1.1). Как показали измерения, скорость меняется от времени. Поэтому приводятся наиболее характерные и максимальные измеренные скорости.

Таблица 3.1.1. Скорость передачи данных в сегментах информационной сети кластера 2013 г.

Сетевой адрес (узел)	Характерная скорость (Мбит/сек)	Максимальная скорость (Мбит/сек)
1.33 (КоМ 2)	~1.2-1.3	~1.2-1.3
1.196 (Мастер 2 гирл. 2)	~1.0-1.1	~1.0-1.1
1.191 (Мастер 1 гирл. 2)	~1.0-1.1	~1.0-1.1
1.37 (КоМ 3)	~2.1-2.2	~6.4
1.193 (Мастер 2 гирл. 3)	~1.7-1.8	~2.2
1.194 (Мастер 1 гирл. 3)	~1.7-1.8	~4.3

В 2014 году на сегменте сети береговой центр – коммутационный модуль гирлянды были применены SHDSL технологии, которые рассчитаны на максимальную скорость передачи данных до 15296 Кб/с. При этом центр кластера был дополнительно оснащён специализированным COM-сервером для управления скоростью SHDSL-модемов непосредственно с берега. Таким образом, появилась возможность жёстко зафиксировать скорость соединения с гирляндами кластера, а также получать информацию о соотношении сигнал/шум на линии и количестве ошибок. Ниже представлены результаты мониторинга сетевых узлов установки программой SmokePing, а также установленные скорости передачи данных от ЦК до каждой из гирлянд.

На рисунке 3.1.7 представлен мониторинг связи с коммутатором модуля гирлянды, проведённый с начала мая 2013 г. по конец мая 2014 г. После замены VDSL2-модемов на более помехозащищенные SHDSL-модемы видно характерное уменьшения времени отклика и улучшение качества связи. Время отклика составило около 2 мс, при этом количество временных интервалов с потерей одного пакета из 20-ти существенно сократилось. Скорость соединения возросла примерно в 7 раз. Участок графика с отсутствием связи в марте вызван отключением установки в период экспедиционных работ.

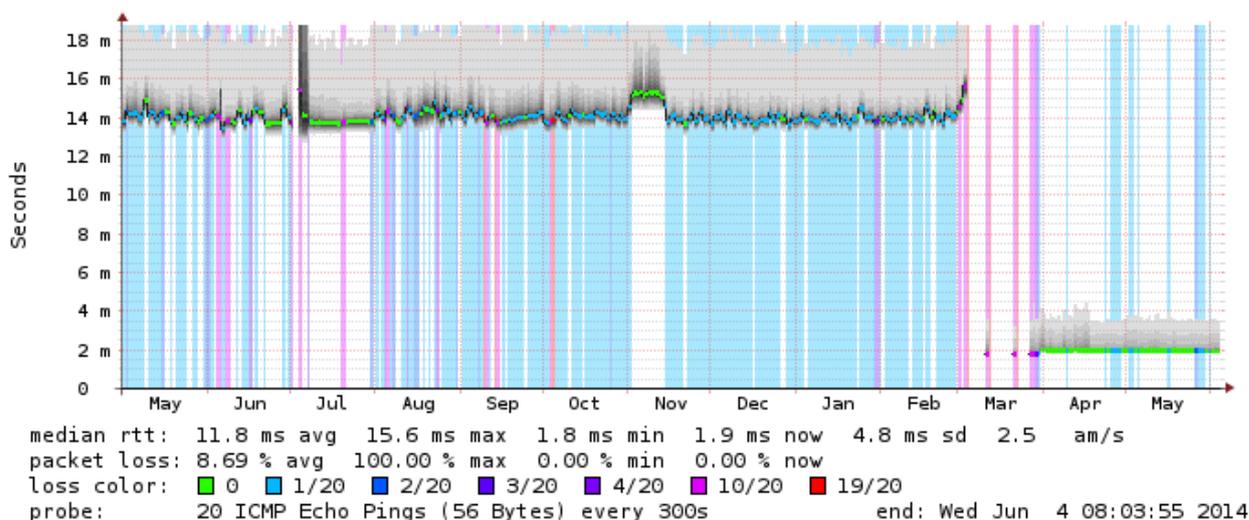


Рисунок 3.1.7. Временной отклик сетевого узла КоМ 2-ой гирлянды с начала мая 2013 г. по май 2014 г.

В таблице 3.1.2 представлены установленные скорости передачи данных от ЦК до гирлянд и соотношение сигнал/шум на линии.

Таблица 3.1.2. Скорость передачи данных в сегменте информационной сети ЦК-КоМ кластера 2014 г.

Гирлянда	Установленная скорость, Кб/с	Отношение Сигнал/Шум, dB
1	7040	11
2	7552	12
3	10048	11
4	10048	10
5	10048	12

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- Сегмент, связывающий Береговой центр с центром кластера, благодаря применению оптической линии связи, работает надежно и обеспечивает необходимую скорость передачи данных.
- Скорость передачи данных в сегментах, связывающих гирлянды с центром кластера, варьируется от 1 до 6 Мбит/с для VDSL2-модемов и от 7 до 10 Мбит/с для SHDSL-модемов.

- Темп регистрации событий детектора определяется скоростью передачи данных наименее быстродействующего сегмента подводной локальной сети, которая составляет от 7 до 10 Мбит/с для участка ЦК-КоМ.
- При размере несжатого события с каждого канала - 2 Кб, необходимый темп счёта гирлянды из 24 ОМ равный 100...200 Гц достигается только путем аппаратной фильтрации дорожек в центральных модулях секций.

В рамках работы по проверке системы передачи данных была исследована линия медленной связи оптических модулей на основе интерфейса RS-485. Для контроля качества работы линии передачи данных RS-485 осуществлялся подсчет количества ошибок передачи данных для каждого канала. Результаты мониторинга количества ошибок за 3 месяца работы установки представлены в таблице 3.1.3. За все время работы записей с количеством ошибок больше 1 не обнаружено. Следует отметить, что наличие единичной ошибки не указывает на плохое качество линии связи. Одна ошибка может возникать при приеме контроллером первого байта данных после включения электропитания – по этому байту определяется скорость системы передачи (работа производится в режиме автоматического определения скорости). При каждом считывании буфера ошибок передачи, счетчик ошибок обнуляется. Соответственно, о качественной работе линии связи RS-485 должно говорить отсутствие записей с состоянием счетчика ошибок больше 1 для первого считывания в ране, и больше 0 при последующих считываниях. Как видно из таблицы, исследуемая линия связи демонстрирует высокую надёжность и стабильность передачи.

Таблица 3.1.3. Результаты мониторинга состояния счетчика ошибок передачи данных по линии RS-485 3-й гирлянды кластера.

Номер гирлянды	Номер секции	Номер канала	Количество записей с 1-ой ошибкой передачи	Количество записей без ошибок передачи	Количество записей с числом ошибок большим 1
3	1	1	147	19793	0
		2	76	10030	0
		3	76	10027	0
		4	123	19902	0
		5	74	10029	0
		6	0	10097	0
		7	44	10055	0
		8	0	10096	0
		9	76	10019	0
		10	75	10018	0
		11	74	10020	0
		12	74	10017	0
	2	1	76	9688	0
		2	74	19583	0
		3	75	9681	0
		4	0	9754	0
		5	76	9674	0
		6	74	9673	0
		7	0	9748	0
		8	0	9746	0
		9	76	9666	0
		10	74	9663	0
		11	0	9738	0
		12	73	9665	0

3.2 Качество работы измерительных каналов

Для контроля качества работы каналов использовался стандартный подход, включающий анализ распределений временных интервалов между событиями и распределений по количеству событий, зарегистрированных за фиксированный промежуток времени. Значимых отклонений от ожидаемых распределений при анализе данных не было выявлено. В качестве примера указанные распределения показаны на рисунках 3.2.1 и 3.2.2 для одного из каналов.

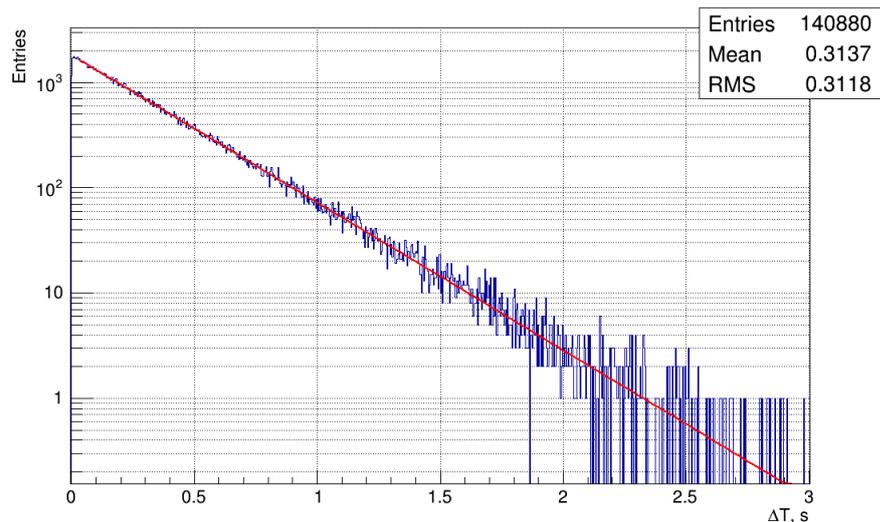


Рисунок 3.2.1. Пример распределение временных интервалов между событиями. Сплошная линия – результат фитирования экспоненциальной функцией

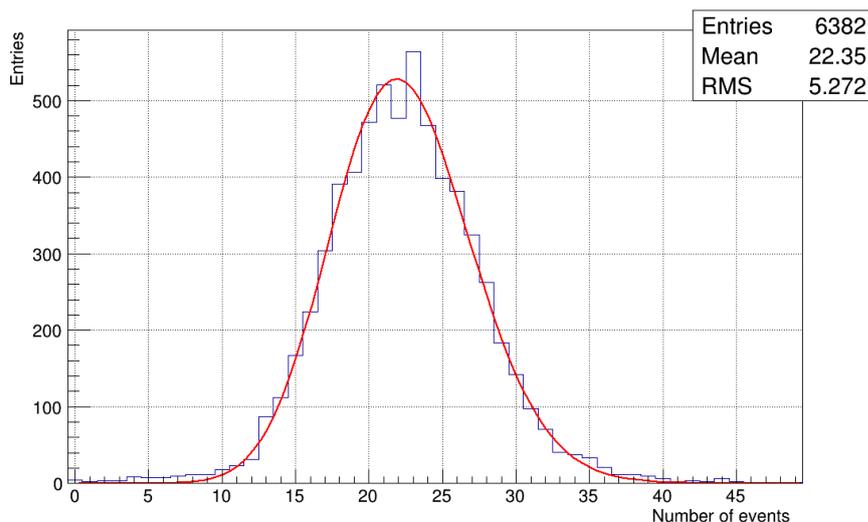


Рисунок 3.2.2. Пример распределения по количеству событий, зарегистрированных каналом за фиксированные промежутки времени (7 секунд). Сплошная линия – результат фитирования Пуассоновским распределением

Анализ распределений временных интервалов позволяет контролировать также и мертвое время каналов. На рисунке 3.2.3 представлено распределение интервалов между событиями в области от 0 до 2 мс для двух

режимов работы АЦП: запись данных в один буфер памяти и использование двойной буферизации. В первом случае мертвое время канала определяется временем считывания информации из буфера АЦП и составляет величину ~0.8 мс. Во втором режиме работы мертвое время определяется величиной времени блокировки триггерных сигналов, установленной на плате Мастер, и составляет 0.1 мс. Режим однократной буферизации обеспечивает эффективную работу установки до частот регистрации событий, не превышающих 100 Гц. Во время периодов повышенной световой активности оз. Байкал, темп регистрации событий может быть заметно выше (200 ...300 Гц). В этих условиях использование двойной буферизации существенно повышает эффективность работы установки.

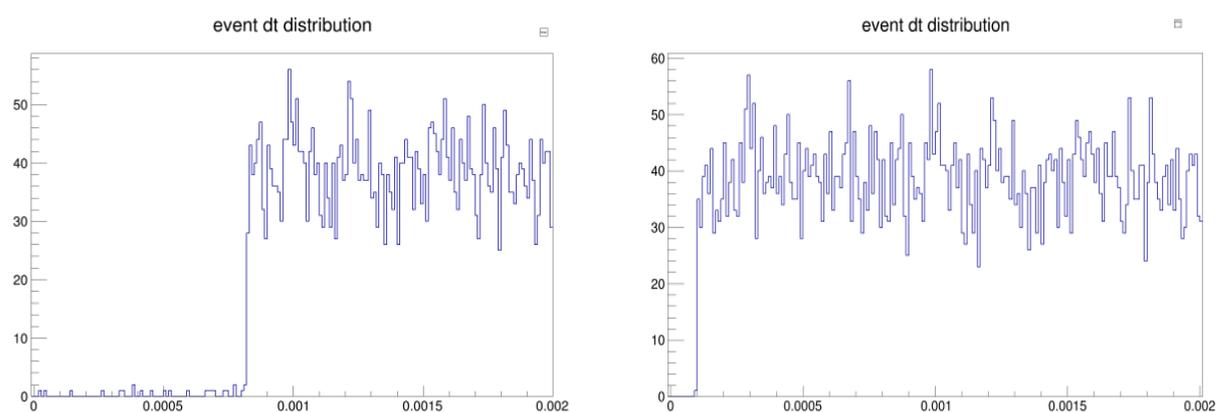


Рисунок 3.2.3. Распределение временных интервалов между событиями в диапазоне до 2 мс, позволяющее оценить мертвое время канала: режима работы с одним буфером АЦП (слева) и режима с двойной буферизацией данных (справа)

Каждый канал, помимо кадра данных, может формировать т.н. запросы канала, которые поступают в плату Мастер и используются для формирования запроса секции. Условием формирования запроса канала является превышение входного сигнала заданного значения порога. В плате Мастер осуществляется анализ запросов от каналов секции. Для этого в

FPGA организована т.н. матрица совпадений, описывающая разрешенные комбинации входных сигналов, формирующих запрос. Основным параметром матрицы совпадений является разрешающее время совпадений, которое задается программным образом с шагом в 10 нс. Запросы каналов поступают в матрицу совпадений по индивидуальным линиям связи и, в случае возникновения задержек при передаче запросов, схема совпадений работает не корректно (разрешающее время становится не постоянным). Этот эффект наблюдался в первых версиях электроники, собранных на FPGA XILINX Spartan 3 (из-за ограниченных аппаратных ресурсов Spartan 3 линии передачи запросов был объединен с линиями передачи данных). После перехода на XILINX Spartan 6 линии данных и запросов были разделены.

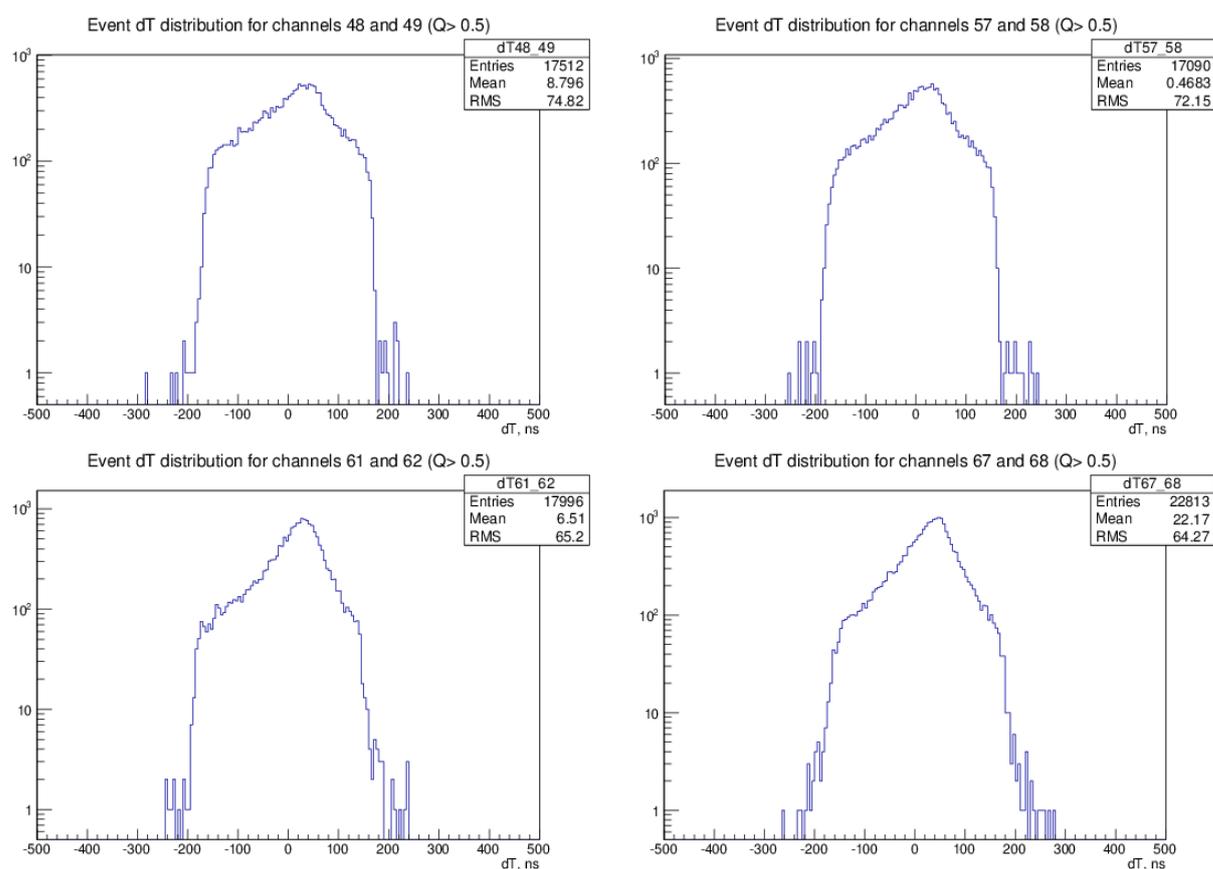


Рисунок 3.2.4. Временные распределения между сигналами, зарегистрированными на соседних каналах секций, для разрешающего времени схемы совпадений 200 нс

Для проверки работы системы формирования запросов (как каналов, так и секций) анализировалось временное распределение между сигналами, зарегистрированными на соседних каналах секций. Выборочные результаты анализа представлены на рисунке 3.2.4 для 4-х пар каналов установки (для разных плат Мастер). Из рисунков видно, что в пределах 10-наносекундных отклонений (временное разрешение плат Мастер), разрешающее время схем совпадений согласуется с установленным значением – 200 нс.

3.3 Работа системы сбора данных в режимах амплитудной и временной калибровки

Комплексной проверкой функциональности системы управления и сбора данных является качество ее работы в режиме обслуживания калибровочных процедур детектора. Калибровка установки предполагает возможность гибкого управления и точной настройки режимов функционирования калибровочной аппаратуры, оптических модулей, измерительных каналов, триггерной системы. В данном параграфе будут рассмотрены возможности системы управления и сбора данных для реализации калибровочных процедур.

Калибровка регистрирующей системы телескопа осуществляется в трех основных режимах работы системы сбора данных: режиме амплитудной калибровки каналов, режиме временной калибровки каналов и режиме временной калибровки межсекционных задержек. Для проведения калибровочных процедур используются светодиоды оптических модулей (предусмотрено два светодиода в каждом ОМ) и тестовые импульсы, генерируемые контроллерами ОМ. Амплитуды сигналов светодиодов и задержка между их световыми импульсами устанавливаются в зависимости от режима калибровки. Кроме светодиодных источников в отдельных случаях для калибровки используются лазерный источник света, атмосферные мюоны и собственное свечение воды оз. Байкал.

Для амплитудной калибровки канала применяется общепринятый подход, основанный на измерении одноэлектронных распределений фотоэлектронных умножителей. В этом режиме калибровки используются импульсы с двух светодиодов оптического модуля. Первый импульс имеет одноэлектронную амплитуду (вероятность его регистрации подбирается на уровне 10%). Он используется для измерения одноэлектронного распределения сигналов канала. Второй импульс с амплитудой ~ 50 ф.э. задерживается относительно первого на 500 нс. Он используется в качестве триггера, позволяя подавлять фоновые события с малой амплитудой, инициированные темновым током ФЭУ и свечение воды оз. Байкал.

Для оперативного контроля амплитудных калибровочных коэффициентов применяется и другой подход, основанный на регистрации шумовых импульсов (основную их часть составляют шумы, связанных с регистрацией свечения воды оз. Байкал). В этом режиме калибровки считывание данных с каналов осуществляется по запросу управляющей системы. Полученные таким образом временные дорожки каналов содержат шумовые сигналы, распределение амплитуд которых близко к одноэлектронному.

На рисунке 3.3.1 сопоставляются калибровочные амплитудные распределения, полученные при светодиодной подсветке ФЭУ и в результате анализа “шумовых” дорожек. Видно, что примесь шумов электроники в распределении, полученном по шумовым импульсам, не влияет на оценку параметров одноэлектронного пика.

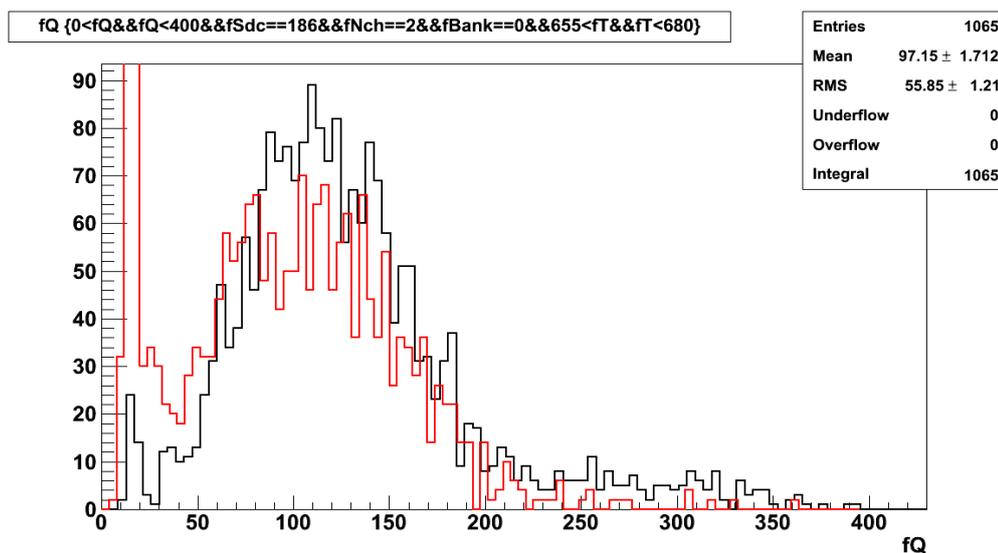
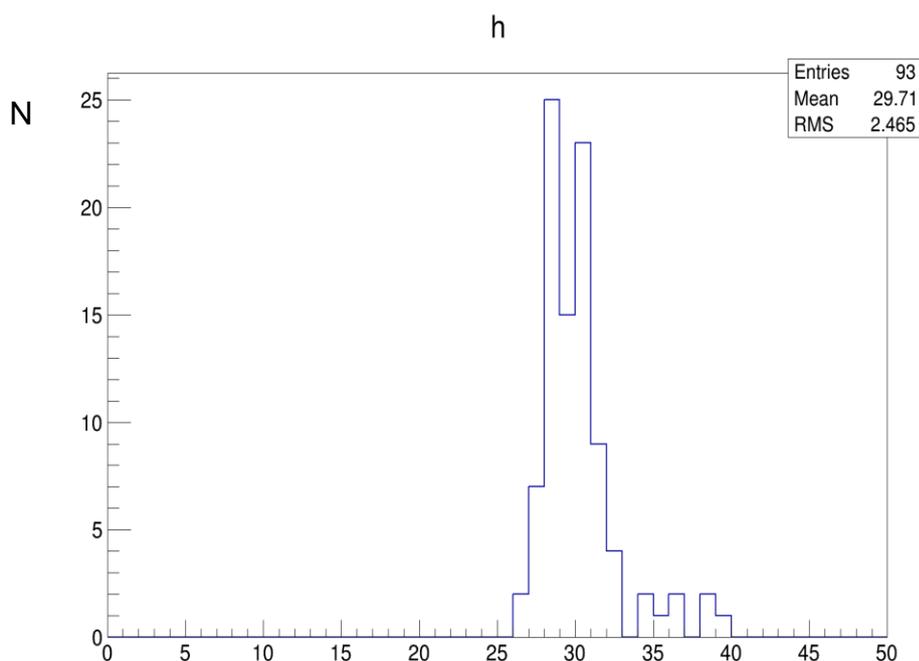


Рисунок 3.3.1. Однофотозлектронные распределения, полученные с помощью шумовых сигналов (красная гистограмма) и светодиодных импульсов (черная гистограмма)

На рисунке 3.3.2 показано распределение измерительных каналов установки по величине одноэлектронной амплитуды, определенной при анализе шумовых дорожек каналов. Средняя одноэлектронная амплитуда составляет величину около 30 каналов АЦП, ширина распределения около 10%. Полученные распределения подтверждают эффективность работы системы сбора данных в режиме амплитудной калибровки каналов. Для реализации указанных выше процедур используются следующие возможности системы управления и сбора данных:

- Регулировка интенсивности свечения калибровочных светодиодов в широком динамическом диапазоне;
- Регулировка задержки между импульсами светодиодов;
- Возможность подбора частоты формирования светодиодных калибровочных импульсов;

- Возможность переключения режимов работы триггерной системы и формирования т.н. “принудительного” триггера: этот режим предназначен для анализа шумовых сигналов на временных дорожках, не искаженных триггерными условиями.



Амплитуда одноэлектронного сигнала, каналы АЦП

Рисунок 3.3.2. Распределение измерительных каналов установки по величине средней одноэлектронной амплитуды

Временная калибровка каналов заключается в измерении относительных задержек сигналов каналов установки. Задержка канала складывается из двух основных составляющих: задержки кабеля и ФЭУ. Задержка кабеля измеряется в лабораторных условиях (измеряется время прохождения сигнала через кабель) и не меняется со временем. Задержка, возникающая в ФЭУ, зависит от величины высоковольтного напряжения фотоэлектронного умножителя и требует периодической калибровки в натуральных условиях. Для определения задержек ФЭУ в системе управления оптическим модулем предусмотрена возможность формирования специализированного тестового импульса, который подаётся в точку формирования сигнала на

предусилителе ФЭУ. Запуск тестового импульса синхронизирован с моментом включения светодиода оптического модуля (амплитуда сигнала подбирается на уровне ~ 50 ф.э., величина задержки включения светодиода устанавливается на 500 нс). По разности времён прихода светодиодного сигнала с ФЭУ и тестового импульса определяется задержка формирования импульсов в ФЭУ. На рисунке 3.3.3 представлена временная дорожка с тестовым и светодиодными импульсами, иллюстрирующая процедуру временной калибровки.

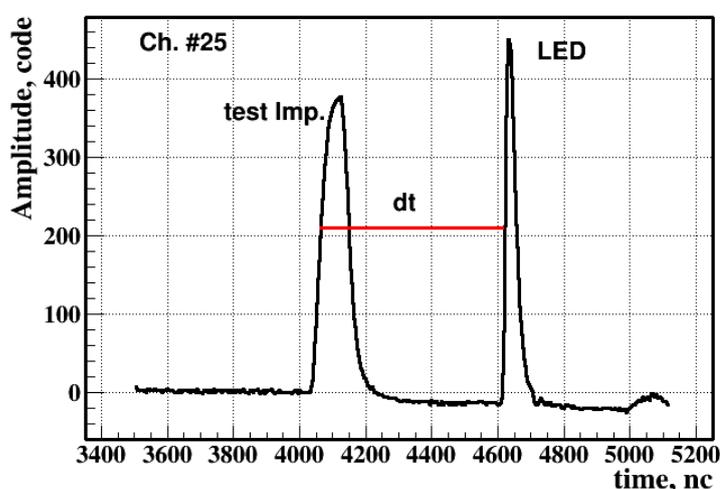


Рисунок 3.3.3. Временная дорожка с тестовым импульсом и сигналом от светодиода

В 2013 году была изменена конструкция калибровочных светодиодных источников оптических модулей. До этого времени сигналы от светодиодов передавались к ФЭУ по оптическим волокнам. Более эффективной оказалась конструкция, в которой светодиодные драйверы монтируются в верхней части ОМ (устанавливаются непосредственно на разъемы контроллера), а сами светодиоды ориентированы в направлении, противоположном ФЭУ (см. рисунок 3.3.4). Свет на ФЭУ поступает по стеклу глубоководного корпуса ОМ. При использовании калибровочных источников новой конструкции световой импульс может регистрироваться как оптическим модулем, в

котором установлены светодиоды, так и модулями, расположенными выше на гирлянде.

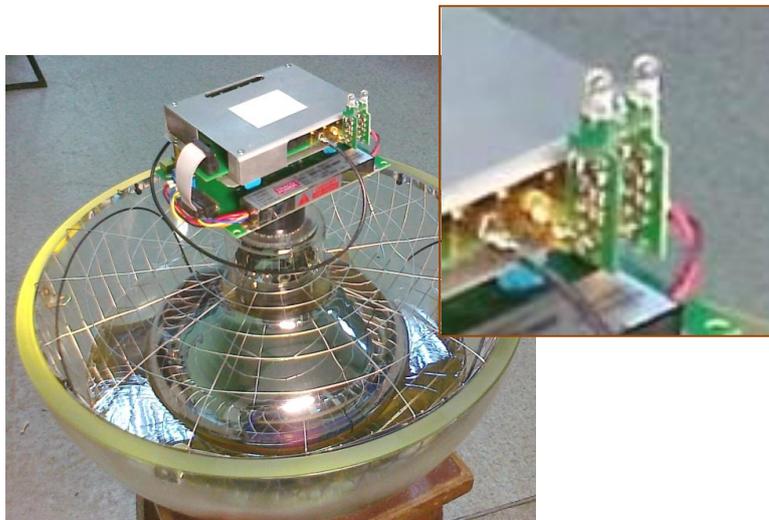


Рисунок 3.3.4. Светодиодные калибровочные источники оптического модуля, установленные на разъемы контроллера

На рисунке 3.3.5 показаны временные дорожки двух каналов установки, на которых зарегистрированы импульсы от вспышки калибровочного светодиода. Сопоставление ожидаемой из геометрии задержки между импульсами (расстояние между ОМ 15 м) с измеренной позволяет провести альтернативную калибровку временных каналов установки (метод попарной светодиодной калибровки).

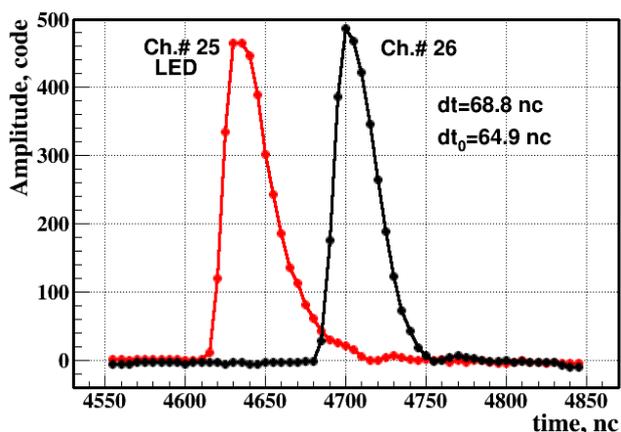


Рисунок 3.3.5. Светодиодная временная калибровка каналов: показаны временные дорожки на двух соседних ОМ с сигналами, инициированными вспышкой светодиода

Калибровочные светодиодные источники ОМ позволяют провести временную калибровку гирлянд. Благодаря достаточно большой интенсивности вспышек, сигналы, генерированные светодиодами оптического модуля, регистрируются ФЭУ, установленными в секциях соседних гирлянд. Калибровочные коэффициенты определяются на основании информации о взаимном расположении гирлянд и оптических модулей в установке. В этом режиме калибровки система управления оптическими модулями генерирует пары световых импульсов, задержанных во времени друг относительно друга на 500 нс. Это обеспечивает надежный способ выделения калибровочных сигналов из шумов ФЭУ.

Независимый контроль качества проведения калибровки под управлением системы сбора данных установки может быть осуществлен по данным, полученным при регистрации потока атмосферных мюонов. Для этого измеренные распределения задержек сигналов соседних ОМ, зарегистрировавших излучение мюона, сопоставляются с результатами моделирования. Измерения осуществляются в режиме экспозиции установки в потоке космического излучения. В качестве триггера используются четырехкратные совпадения сигналов от оптических модулей одной секции. Выборочные результаты проверки представлены на рисунке 3.3.6.

Критерием корректности временной калибровки является совпадение задних фронтов моделированных и измеренных распределений задержек сигналов. Для подавляющего большинства каналов расхождение между фронтами находится в пределах временного разрешения регистрирующей системы – 5 нс.

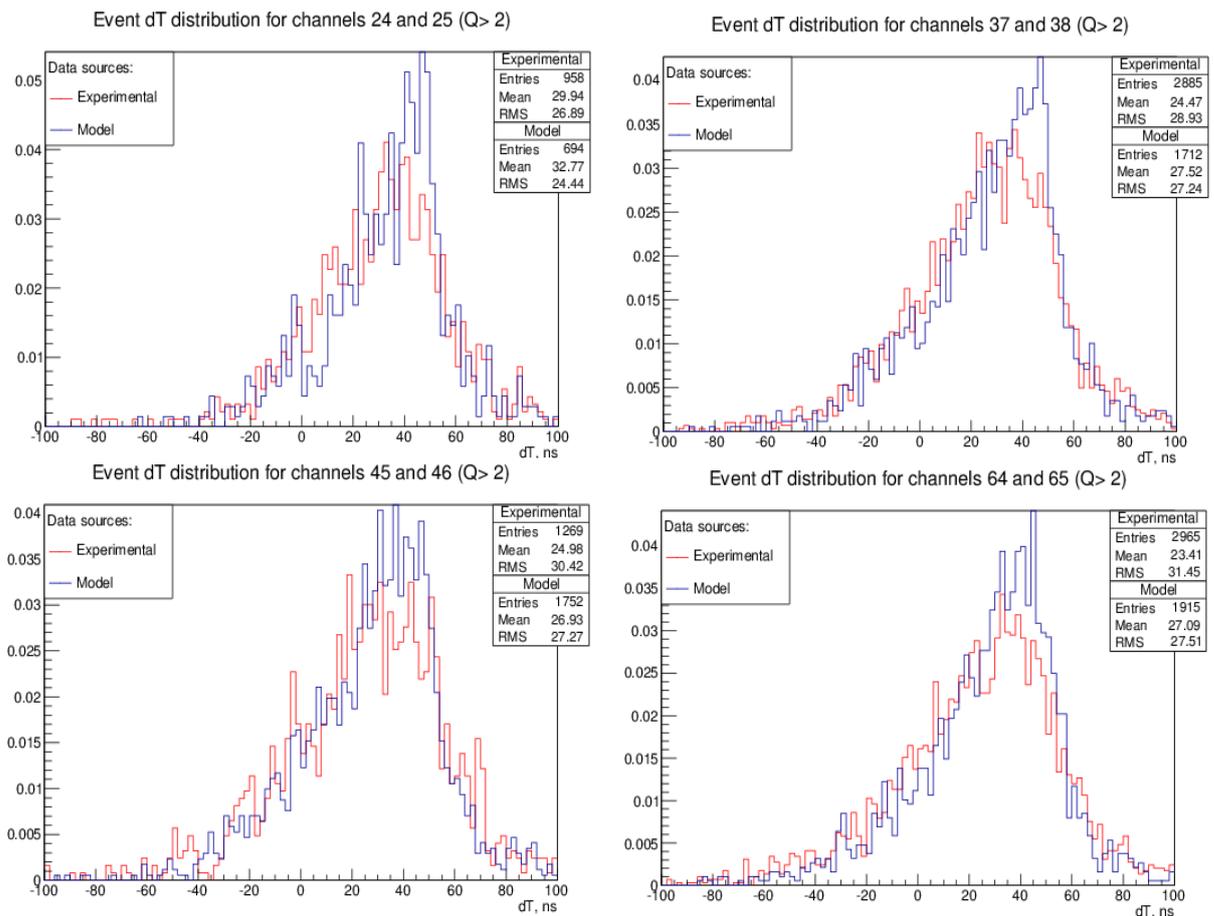


Рисунок 3.3.6. Мюонная временная калибровка каналов

В качестве комплексной проверки качества реализации калибровочных процедур, полученные временные калибровочные коэффициенты каналов были использованы для восстановления положения лазерного источника света (взаимное расположение гирлянд и лазера определяется независимым методом с использованием акустической системы позиционирования установки). В режиме регистрации сигналов от лазерного источника света используется режим совпадений сигналов от пар гирлянд, устанавливаемый в Мастерной плате центра кластера. На рисунке 3.3.7 показаны результаты восстановления расстояния ρ от второй гирлянды кластера до лазерного источника. Восстановление производилось для двух наборов калибровочных коэффициентов: полученных методом измерения задержек ФЭУ и кабельных линий (распределение выделено черным цветом) и методом попарной

светодиодной калибровки ОМ (распределение выделено красным цветом). Пунктиром показано реальное расстояние до лазера. Из рисунка видно, что светодиодная калибровка обеспечивает несколько лучшую точность восстановления.

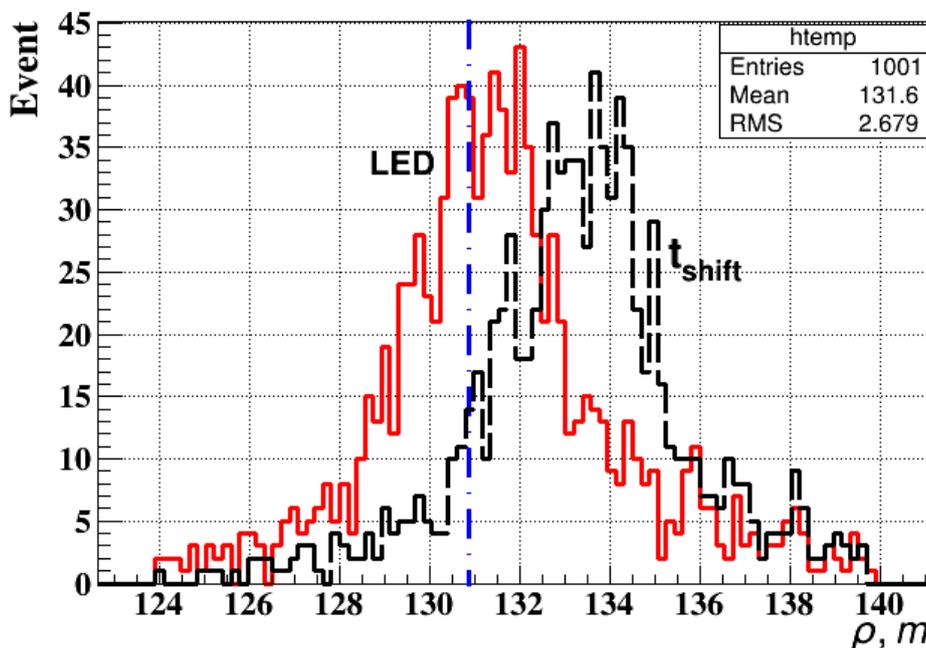


Рисунок 3.3.7. Результаты восстановления расстояния до лазерного источника света с использованием калибровочных коэффициентов, полученных методом измерения задержек ФЭУ и методом попарной светодиодной калибровки

На рисунке 3.3.8 представлены результаты восстановления положения лазера двумя гирляндами кластера: ρ и z – положение кластера в цилиндрической системе координат, звездочкой показано реальное местоположение лазера. Для восстановления были использованы калибровочные коэффициенты, полученные методом измерения задержек ФЭУ.

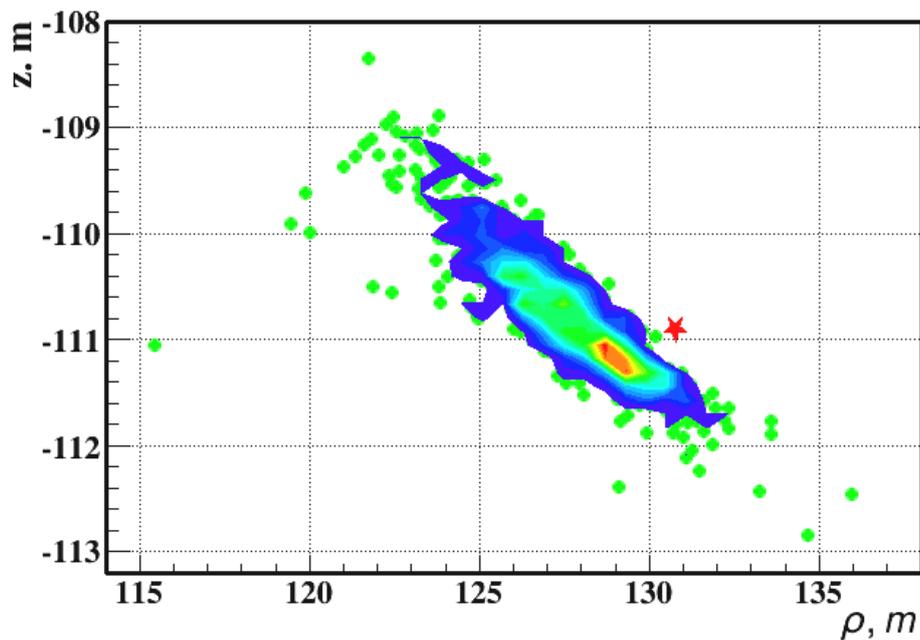


Рисунок 3.3.8. Восстановление положения лазера двумя гирляндами кластера: ρ и z – положение кластера в цилиндрической системе координат, звездочкой показано реальное местоположение лазера

На основании представленной информации можно сделать вывод, что разработанная система управления и сбора данных предоставляет все необходимые возможности для осуществления амплитудной и временной калибровки детектора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведём основные результаты работы по созданию системы сбора данных глубоководного нейтринного телескопа NT1000:

1. Разработана системы сбора данных, обеспечивающая интегрирование разнородных регистрирующих и информационных систем (оптической системы регистрации, акустической системы позиционирования, калибровочной и мониторинной аппаратуры) в составе единой регистрирующей системы.
2. Разработанный подход к построению системы передачи данных, основанный на использовании относительно медленных линий передачи в сочетании с процедурами фильтрации информации с временных дорожек, позволил отказаться от оптических линий передачи данных, тем самым существенно сократив время развертывания установки.
3. Разработана конструкция и созданы глубоководные модули для установки аппаратуры системы управления и сбора данных, размещаемые в центре секций, на каждой из гирлянд и в центре кластера. Оптимизирована система подводных межмодульных коммуникаций.
4. Обеспечена достаточно высокая надёжность работы системы. Сбои в системе передачи данных от одной из гирлянд в 2013 году, обусловленные использованием не промышленных VDSL-модемов были устранены в 2014 году за счет перехода на более защищенные SHDSL-модемы. При этом скорость передачи данных повысилась более чем в пять раз.
5. Проверка работы системы сбора данных в различных режимах работы – экспозиции в потоке космического излучения, амплитудной и временной калибровки каналов и гирлянд, регистрации сигналов от светодиодных и лазерных источников света – показала достаточно высокий уровень ее

функциональности, обеспечивающий поддержку всех необходимых режимов работы установки.

- б. Проведены долговременные натурные испытания созданной системы сбора данных на первой очереди кластера НТ1000 2013 – 2014 гг.

В заключение я хотел бы поблагодарить заведующего лабораторией нейтринной астрофизики высоких энергий Г. В. Домогацкого – руководителя Байкальского эксперимента, без которого выполнение данной работы было бы невозможным. Искренне благодарю Н. А. Айрапетову за неоценимую поддержку и внимание на всех этапах работы. Отдельно выражаю глубокую благодарность своему научному руководителю В. М. Айнутдинову за постановку задачи, ценные советы и всестороннюю помощь при написании диссертационной работы. Также благодарю И. А. Белолоптикова, Ж.-А. М. Джилкибаева и Б. А. Шайбонова за анализ данных эксперимента, позволивший провести исследования эффективности работы системы сбора данных установки. Благодарю сотрудников НИИЯФ МГУ А. В. Скурихина и В. А. Кожина за разработку и создание ключевых элементов системы сбора данных: плат АЦП, Мастер и блоков управления оптическими модулями. Выражаю признательность Е. Н. Плисковскому за подготовку программного обеспечения для управления аппаратным комплексом детектора, А. П. Кошечкину за разработку и создание боков коммутации электропитания детектора и полезные обсуждения работы. Я благодарен своему коллеге А. А. Шейфлеру за качественную подготовку оптических модулей для регистрирующей системы телескопа. Благодарю всех сотрудников коллаборации Байкал, в соавторстве с которыми выполнена большая часть работ по теме диссертации, за помощь и полезные замечания по ходу работы.

Библиографический список

1. M. A. Markov On high energy neutrino physics // Proc. 1960 Annual Int. Conf. on High Energy Physics. Rochester. – 1960. – P. 572-575.
2. Л. Б. Безруков Глубоководный нейтринный телескоп НТ-200: возможность реализации // Докторская диссертация, Москва, ИЯИ РАН, 1993.
3. The Baikal Neutrino Telescope NT-200 (proposal), Ed. by C. Spiering, I. Sokalsky. INR RAS, 1992.
4. E.Andres et al. The AMANDA Neutrino Telescope: Principle of Operation and First Results // Astroparticle Phys. – 2000. – Vol. 13. – Iss. 1. – P. 1-20.
5. Aguilar J. A. et al. The ANTARES Deep-Sea Neutrino Telescope: status and First Results // Proc. of the 31st ICRC. Lodz, 2009.
6. DeYoung T. et al. Recent results of the IceCube and AMANDA // Proc. of the DPF-2009 Conf. Detroit: 2009. <http://arxiv.org/abs/0910.3644>.
7. KM3NeT collaboration. KM3NeT: Conceptual design report. <http://www.km3net.org/CDR/CDR-KM3NeT.pdf>
8. Avrorin A. et al. The Baikal experiment from Megaton to Gigaton // J. of Phys.: Conf. Ser. – 2010. – Vol. 203. – Iss. 1. id. 012123.
9. B. Monteleoni et al. NESTOR a deep sea physics laboratory for the Mediterranean // Proc. of the 17th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, (Neutrino 96) Helsinki, Finland, 1996.
10. De Marzo C. et al. // The Proc. of the 6th Intern. Workshop on Topics in Astroparticle and Underground Physics. Paris, France, 1999. – P. 433.
11. U. F. Katz, Ch. Spiering High-energy neutrino astrophysics: Status and perspectives // Progress in Particle and Nucl. Phys. – 2012. – Vol. 67. – Iss. 3. – P. 651-704.

12. J.D. Zornoza Results and prospects of deep under-ground, under-water and under-ice experiments // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2014. – Vol. 742. – P. 130-138.
13. J.A. Aguilar, et al. The data acquisition system for the ANTARES neutrino telescope // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2007. – Vol. 570. – Iss. 1. – P. 107-116.
14. E. Andres, et al. The AMANDA neutrino telescope // Nucl. Phys. B. – Proc. Suppl. – 1999. – Vol. 77. – Iss. 1-3. – P. 474-485.
15. E. Andres, et al. The AMANDA neutrino telescope: principle of operation and first results // Astroparticle Phys. – 2000. – Vol. 13. – Iss. 1. – P. 1-20.
16. R. Wischnewski The AMANDA-II neutrino telescope // Nucl. Phys. B. – Proc. Suppl. – 2002. – Vol. 110. – P. 510-512.
17. P. Berghaus IceCube: Status and First Results // Nucl. Phys. B. – Proc. Suppl. – 2009. – Vol. 190. – P. 127-132.
18. R. Abbasi, et al. The IceCube data acquisition system: Signal capture, digitization, and timestamping // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2009. – Vol. 601. – Iss. 3. – P. 294-316.
19. R. Abbasi, et al. IceTop: The surface component of IceCube // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2013. – Vol. 700. – P. 188-220.
20. Peter C. Bosetti DUMAND status report // Nucl. Phys. B. – Proc. Suppl. – 1996. – Vol. 48. – Iss. 1-3. – P. 466-468.
21. P. Kooijman KM3NeT status and plans // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2013. – Vol. 725. – P. 13-17.
22. KM3NeT collaboration. KM3NeT: Technical Design Report. <http://www.km3net.org/TDR/TDRKM3NeT.pdf>
23. H. Löhner, et al. The multi-PMT optical module for KM3NeT // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2013. – Vol. 718. – P. 513-515.

24. R. Cocimano KM3NeT deep-sea cabled network: The star-like layout // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2013. – Vol. 725. – P. 223-226.
25. I. A. Belolaptikov et al. The Baikal underwater neutrino telescope: Design, performance, and first results // Astroparticle Phys. – 1997. – Vol. 7. – Iss. 3. – P. 263-282.
26. V. Aynutdinov et al. The BAIKAL neutrino experiment: From NT200 to NT200+ // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2006. – Vol. 567. – Iss. 2. – P. 433-437.
27. C. Spiering The Baikal neutrino telescope: Results and prospects // Nucl. Phys. B. – Proc. Suppl. – 2005. – Vol. 138. – P. 175-178.
28. V. Aynutdinov et al. BAIKAL experiment: Main results obtained with the neutrino telescope NT200 // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2006. – Vol. 567. – Iss. 2. – P. 423-427.
29. V. Aynutdinov et al. The Baikal Neutrino experiment: NT200+ and beyond // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2007. – Vol. 572. – Iss. 1. – P. 511-514.
30. Baikal Collaboration. BAIKAL-GVD: Gigaton Volume Detector in Lake Baikal (Scientific-Technical Report). http://baikalweb.jinr.ru/gvd/BAIKAL-GVD_En.pdf
31. V. Aynutdinov et al. The BAIKAL neutrino experiment: status, selected physics results and perspectives // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2008. – Vol. 588. – Iss. 1-2. – P. 99-106.
32. V. Aynutdinov et al. The BAIKAL neutrino experiment - physics results and perspectives // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2009. – Vol. 602. – Iss. 1. – P. 14-20.
33. V. Aynutdinov et al. Baikal neutrino telescope: An underwater laboratory for astroparticle physics and environmental studies // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2009. – Vol. 598. – Iss. 1. – P. 282-288.

34. V. Aynutdinov et al. The prototype string for the km³-scale Baikal neutrino telescope // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2009. – Vol. 602. – Iss. 1. – P. 227-234.
35. Аврорин А. В. и др. Статус Байкальского нейтринного эксперимента // Известия РАН. Серия физическая. – 2009. – том 73, – № 5, – С. 682-684.
36. A. Avrorin et al. The BAIKAL neutrino telescope and km³ perspective // Proceedings of 13th International Workshop on Neutrino Telescopes, Ed. by Milla Baldo Ceolin. Venice, Italy. – 2009 – P. 195-204.
37. A. Avrorin et al. Status of the BAIKAL neutrino experiment // 31st ICRC, Lodz, Poland. – 2009.
38. Aynutdinov V. M. et al. Baikal neutrino project: history and prospects // Russ. Phys. J. – 2010. – Vol. 53. – Iss. 6. – P. 601-610.
39. Кулешов Д. А., Айнутдинов В. М. Байкальский глубоководный нейтринный телескоп НТ1000 // Труды 53-й научной конференции МФТИ, ч. VIII «Проблемы современной физики» / МФТИ. – Долгопрудный, 2010.
40. Avrorin A. et al. The Baikal neutrino experiment // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2011. – Vol. 626-627. – Suppl. – P. S13–S18.
41. Aynutdinov V. et al. The Baikal neutrino project: Present and perspective // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2011. – Vol. 628. – Iss. 1. – P. 115-119.
42. Аврорин А. В. и др. Экспериментальная гирлянда Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 // Приборы и Техника Эксперимента. – 2011. – № 5. – С. 55-65.
43. K. G. Kebkal et al. 3D acoustic imaging applied to the Baikal neutrino telescope // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2009. – Vol. 602. – Iss. 1. – P. 177-179.
44. Аврорин А. В. и др. Гидроакустическая система позиционирования экспериментального кластера нейтринного телескопа масштаба

- кубического километра на озере Байкал // Приборы и Техника Эксперимента. – 2013. – № 4. – С. 87-97.
45. Avrorin A. et al. The Baikal neutrino telescope - Results and plans // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2011. – Vol. 630. – Iss. 1. – P. 115-118.
 46. Avrorin A. et al. The Gigaton Volume Detector in Lake Baikal // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2011. – Vol. 639. . – Iss. 1. – P. 30-32.
 47. Аврорин А. В. и др. Статус Байкальского нейтринного эксперимента // Известия РАН. Серия физическая. – 2011. – том 75, – № 3, – С. 443-444.
 48. Avrorin A. et al. Status of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2012. – Vol. 692. – P. 46-52.
 49. Avrorin A. et al. Current status of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2013. – Vol. 725. – P. 23-26.
 50. Avrorin A. et al. Present status of the BAIKAL-GVD project development // J. of Phys.: Conf. Ser. – 2013. – Vol. 409. – Iss. 1.
 51. Avrorin A. et al. The prototyping/early construction phase of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2014. – Vol. 742. – P. 82-88.
 52. Кошель Ф. К., Кулешов Д. А., Смагина А. А. Анализ работы аппаратуры и фоновых условий регистрации экспериментального кластера глубоководного нейтринного телескопа НТ1000 // Труды 55-й научной конференции МФТИ, «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» / МФТИ. – Долгопрудный, 2012.
 53. Аврорин А. В. и др. Система сбора данных Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 // Приборы и Техника Эксперимента. – 2014. – № 3. – С. 28-39.

Приложение

Передача данных гирлянды на основе технологий xDSL

Основные параметры линии передачи данных, такие как пропускная способность и стабильность работы определяются, помимо возможностей самих DSL модемов, также характеристиками кабельных линий и уровнем помех. Поэтому, важно проводить тестирование и подбор подходящих устройств только совместно со штатным кабельными коммуникациями. При создании каналов передачи данных нейтринного телескопа НТ1000 было проведено исследование пропускной способности и помехоустойчивости линии на основе нескольких DSL-модемов: SHDSL-модемов фирм Sigrand и MOXA, и VDSL2 модему qBRIDGE-307i фирмы NSGate. Внешний вид исследуемых модемов представлен на рисунке 1.

DSL-модемы являются на сегодняшний день одной из наиболее эффективных систем передачи информации на большие расстояния. xDSL (Digital subscriber line) - семейство технологий, позволяющих значительно расширить пропускную способность линии передачи данных путем использования эффективных линейных кодов и адаптивных методов коррекции искажений линии на основе современных достижений микроэлектроники и методов цифровой обработки сигнала. Технологии xDSL позволяют передавать данные со скоростями до нескольких Мбит/с, в зависимости от длины и качества линии передачи данных, что значительно превышает те скорости, которые доступны даже самым лучшим аналоговым и цифровым модемам. В качестве среды передачи сигнала используют экономичные кабели типа “витая пара”. Существующие типы технологий xDSL, различаются в основном по используемой форме модуляции и скорости передачи данных.

Устройство SG-17B-3.3-M фирмы Sigrand представляет собой SHDSL модем с функциями Ethernet-бриджа и предназначен для объединения

распределенных локальных сетей, подключения удаленных компьютеров и оборудования, оснащенных интерфейсом Ethernet. Бридж позволяет транслировать теги VLAN IEEE 802.1Q, как по DSL, так и через Ethernet-интерфейс. Применённый в модеме SHDSL интерфейс соответствует редакции ITU-T G.991.2.bis и использует для передачи набор кодировок TC-РAM - Trellis-Coded Pulse Amplitude Modulation. Модем обеспечивает симметричную дуплексную передачу информации на скоростях от 192 Кбит/с до 15296 Кбит/с по обычной двухпроводной медной линии связи.



Рисунок 1. Внешний вид SHDSL модема Sigrand SG-17B-3.3-M, MOXA IEX-402-SHDSL и VDSL2 модема qBRIDGE-307i

В технологии SHDSL эффективно используется адаптация скорости передачи данных. Для этого с помощью протокола «G.hs.bis» в процессе установления соединения модемы на обоих концах линии тестируют условия распространения сигнала и в результате обмена сообщениями определяют максимальную скорость передачи, допустимую при данных условиях. При этом максимальная длина соединения оказывается больше, чем у других симметричных xDSL технологий, работающих при тех же скоростях передачи. Применение эхоподавления обеспечивает полностью дуплексную связь при всех значениях скорости. Использование системы кодирования TC-РAM и смещения частот для нисходящего и восходящего трафика позволило наиболее оптимальным образом использовать всю полосу частот для

передачи трафика. Кодирование TC-PAM, используемое для передачи модемами стандарта G.991.2 (G.SHDSL), имеет несколько вариантов, отличающихся степенью сложности алгоритма кодирования. Большим скоростям передачи соответствует режим с большим количеством позиций модуляции (TC-PAM64, TC-PAM128), на меньших скоростях используются режимы с меньшим числом позиций модуляции (TC-PAM16, TC-PAM32). Скоростные характеристики модемов Sigrand SG-17B-3.3-M, полученные витой паре ТПП – 0,5 мм, приведены в таблице 1.

*Таблица 1. Соотношение скорости передачи и дальности связи
Sigrand SG-17B-3.3-M*

Скорость, кбит/с	Кабель сечением 0,5 мм, км	Скорость, кбит/с	Кабель сечением 0,5 мм, км
15296	0,6	5120	3,8
14080	1,0	4608	4,0
12800	1,2	4096	4,4
11520	1,4	3072	5,0
10240	2,0	2304	5,4
9216	2,2	2048	6,2
8192	2,4	1536	7,0
7168	3,0	1024	7,8
6144	3,4	768	8,4
5696	3,6	512	9,0

Результаты измерений пропускной способности линии данных на основе Sigrand SG-17B-3.3-M с учётом паразитных наводок (см. тестирование MOXA IEX-402-SHDSL) представлены в таблице 2. Следует отметить, что для кабеля типа ВП 2x0,5Э-У “витая пара” вплоть до длин порядка 800 метров достигается практически максимально возможная для данного типа модемов скорость передачи данных (более 10 Мбит/с). Обобщающий график зависимости скорости передачи данных от длины линии для модемов Sigrand SG-17B-3.3-M представлен на рисунке 2.

Таблица 2. Тестирование SG-17B-3.3-M на кабельной линии ВП 2x0,5Э-У(0.5 мм²)

Длина линии, м	Скорость передачи данных, Кбит/с
600	10648
800	9832

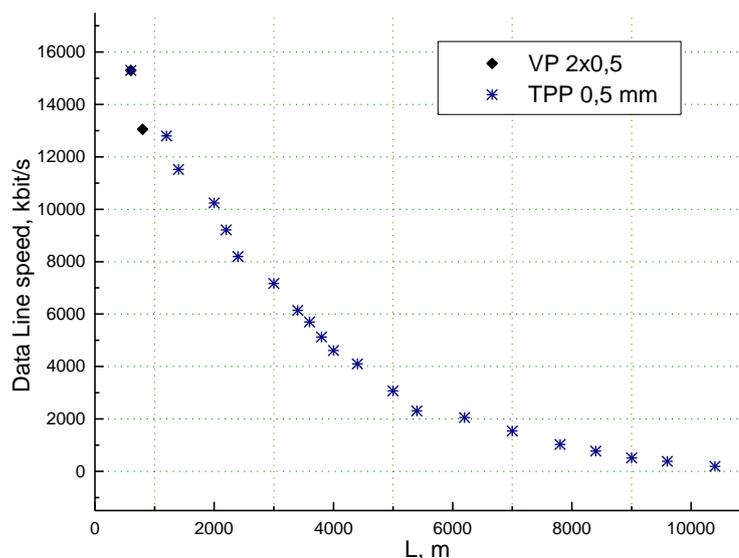


Рисунок 2. График зависимости скорости передачи данных от длины линии для модемов Sigrand SG-17B-3.3-M

Другим исследованным представителем технологии SHDSL, является модем MOXA IEX-402-SHDSL. Фирма MOXA, уже давно работающая на рынке электроники и зарекомендовавшая себя как производитель высоконадёжного сетевого оборудования, выпустила промышленные управляемые DSL-удлинители сетей Ethernet с расширенным диапазоном температур - IEX-402-SHDSL.

Основными преимуществами Ethernet удлинителей MOXA перед представителями SHDSL технологии, модемами Sigrand SG-17B, а также VDSL2 технологии - модемами qBRIDGE-307i, является высокое время наработки на отказ и возможность дистанционного управления устройствами по линии Ethernet. Дополнительно, стоит отметить удобный Web-интерфейс

устройств MOXA, который позволяет мониторить состояние линии передачи данных и предоставляет информацию о скорости подключения и соотношении сигнал/шум в линии. Автоматическое определение главного устройства на линии (Central Office) позволяет минимизировать ошибки при построении системы передачи данных. Также, фирма MOXA гарантирует высокую совместимость своего оборудования, что очень важно при использовании устройств разных типов в сложной, разветвлённой локальной подводной сети. Скоростные характеристики модемов IEX-402-SHDSL, полученные непосредственно от производителя, приведены в таблице 3. Тестирование проводилось с использованием витой пары европейского типа с диаметром каждой жилы 0.4 мм.

Таблица 3. Соотношение скорости передачи и дальности связи модемов IEX-402-SHDSL

IEX-402-SHDSL Series

Distance		Data Rate (kbps)
meter	feet	Annex B & PE.04
500	1640	15304
900	2953	13112
1100	3609	11320
1500	4921	9272
1900	6234	6712
2300	7546	5696
2800	9100	3840
3000	9800	2688
3200	10490	2048
3750	12300	1024
4500	14750	512
5700	18700	384
8000	26240	192

Тестирование пропускной способности модемов IEX-402-SHDSL в условиях помех на линии, а также с использованием комбинированных кабельных коммуникаций, коаксиальная линия совместно с витой парой, производилось на лабораторном макете канала сбора и передачи данных гирлянды NT1000. Для наглядности, метод организации тестирования канала

данных с дополнительным введением в линию передачи паразитных помех, представлен на рисунке 3.

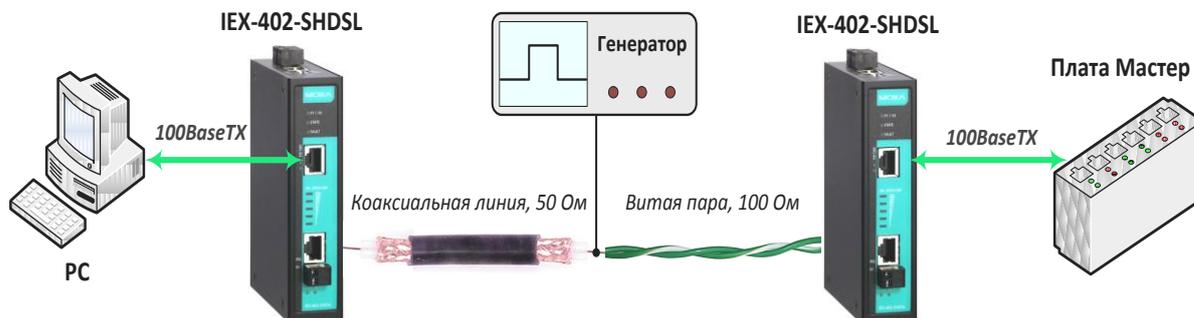


Рисунок 3. Схема тестирования канала данных с внедрением в линию передачи паразитных помех

Измерения скорости передачи данных проводились на 500 метровой коаксиальной линии, объединённой с витой парой, длиной 300 и 600 метров. Для имитации реальных наводок, которые присутствуют в кабельных коммуникациях подводной локальной сети телескопа, стенд был дополнен генератором прямоугольных импульсов. Ввод шумовых импульсов происходил в месте соединения витой пары и коаксиальной линии, на экранирующую оболочку витой пары. Амплитуда наведённых импульсов достигала 500 мВ, при частоте повторений до 100 кГц. Измеренное потребление модемов IEX-402-SHDSL при напряжении питания 24 В, составило: 3.5 Вт в простое, 4.2 Вт в процессе передачи данных. Результаты измерений установившейся скорости передачи данных модемов IEX-402-SHDSL, а также соотношение сигнал/шум на линии представлены в таблице 4. Результаты тестирования двух представителей технологии SHDSL (модемов MOXA и Sigrand) показывают, что наиболее эффективной областью применения таких устройств являются расстояния порядка нескольких километров. Ещё одна важная особенность технологии SHDSL – симметричная скорость передачи данных в обоих направлениях, что несколько избыточно в процессе реальной работы детектора, когда основной

поток информации идёт из-под воды, а от сервера берегового центра лишь изредка поступают командные запросы различным блокам электроники кластера. В данном случае одним из альтернативных решений может стать использование другой передовой DSL технологии – VDSL2.

Таблица 4. Скорость передачи данных и соотношение сигнал/шум на комбинированной кабельной линии с наводкой для модемов IEX-402-SHDSL

	Установившаяся скорость на линии, бит/с	Соотношение сигнал/шум, dB
Коаксиал 500 м. + Витая пара 300 м.	12344000	6
Коаксиал 500 м. + Витая пара 600 м.	11320000	6

VDSL2 (Very-high data rate Digital Subscriber Line 2) – технология доступа, которая использует существующую инфраструктуру медных проводов, первоначально развернутую для телефонных сетей. VDSL2 является новейшим и самым передовым стандартом xDSL широкополосных проводных коммуникаций, поддерживающих передачу голоса, видео, данных, телевидения высокой четкости (HDTV). Протокол был стандартизирован как ITU G.993.2 и является расширением G.993.1 (VDSL). Позволяет передавать данные в асимметричном и симметричном режимах с совокупной скоростью нисходящего и восходящего потоков до 200 Мбит/с, по витой паре с пропускной способностью вплоть до 30 МГц. Стоит отметить, что с учётом больших заявленных скоростей передачи данных, технология VDSL2 предъявляет и более жёсткие требования к качеству кабельных линий.

Проверка возможностей технологии VDSL2 была проведена на модемах qBRIDGE-307i компании NSGate. Данное устройство имеет один линейный порт VDSL2, один порт Ethernet и DIP-переключатели для настройки. Светодиодные индикаторы показывают состояние портов и работоспособность всего устройства. Предусмотрен выбор специальных

режимов: для обеспечения защиты от импульсных помех длительностью до 250 мкс, режим минимальной задержки прохождения пакетов и режим избыточного соотношения сигнал/шум в линии для обеспечения дополнительной помехозащищённости (повышение с 6 дБ до 9 дБ).

В таблице 5 представлены результаты тестирования скорости передачи данных устройством qBRIDGE-307i, предоставленные непосредственно производителем. Тестирование проводилось как в симметричном, так и в асимметричном режимах. Различие в скоростях нисходящего (Down) и восходящего (Up) потоках обусловлено разными способами распределения частот для передачи данных в направлениях от провайдера к пользователю (downstream) и обратно (upstream).

Таблица 5. Соотношение скорости передачи и дальности связи для qBRIDGE-307i (витая пара, сечение жилы 0.2 мм²)

Ассиметричный режим						
Длина линии, м	300	500	800	1000	1300	1500
Скорость, Mbps (Down/UP)	87/74	75/62	44/28	39/13	28/6	26/3
Симметричный режим						
Длина линии, м	300	500	800	1000	1300	1500
Скорость, Mbps (Down/UP)	83/80	72/62	43/27	33/18	23/9	20/5

Проверку оборудования на лабораторном макете канала сбора и передачи данных гирлянды NT1000 можно разделить на два этапа: тестирование максимальной скорости приёма/передачи модемов на основе VDSL2 технологии и изучение общей помехозащищённости полученной линий связи (см. схему тестирования модемов MOXA). На первом этапе измерялась зависимость устойчивой скорости передачи данных между двумя VDSL2-модемами от длины линии. В качестве среды передачи использовался коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом. На рисунке 4 представлены результаты измерения скорости передачи в различных режимах работы qBRIDGE-307i. Модем, подключенный напрямую к плате

Мастер, работал в режиме СО (Central Office), а соединённый с компьютером, был в режиме СРЕ (Customer Premise Equipment) (см. рисунок 3). Скорость передачи данных от СО к СРЕ в асимметричном режиме существенно выше, чем в обратном направлении. Эта конфигурация отражает реальную нагрузку на подводную локальную сеть, когда основной большой поток данных идёт от каждой гирлянды в центр кластера и далее на береговой сервер, при этом асимметричный режим работы VDSL2-модемов позволяет эффективно использовать эту разницу в скорости.

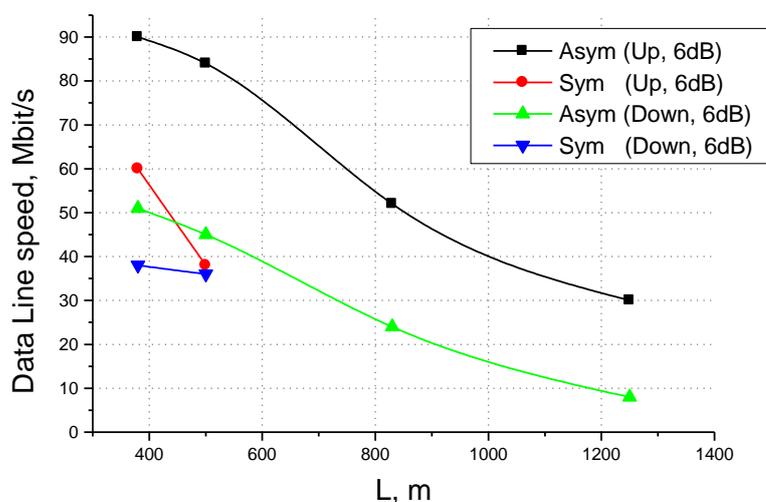


Рисунок 4. Скорость передачи данных модемов qBRIDGE-307i

Защита от импульсных помех во время первого этапа тестирования была отключена. Включение этого режима позволяет защитить данные от единичных помех длительностью до 250 мкс, но при этом увеличивается задержка прохождения данных через устройства. При выключенном режиме защиты от импульсных помех (Fast) задержка прохождения данных через устройства составляет менее 1мс, при включенном (Int, Interleaved) - до 10 мс. Тестирование в симметричном и асимметричном режиме проводилось при пороговом отношении сигнал/шум равном 6 дБ, когда скорость соединения максимальна. Режим с отношением сигнал/шум 9 дБ даёт более надёжное соединение и меньшие скорости передачи, однако, при штатном

использовании протокола TCP с повторным запросом данных в случае потери, необходимость такого режима пропадает.

На втором этапе тестирования с использованием регулируемого источника внешних помех, аналогично описанному выше в эксперименте с модемами MOXA, была проанализирована общая надёжность линии связи модемов qBRIDGE-307i, а также полученная установившаяся скорость передачи данных. В режиме работы Fast, без защиты от кратковременных помех, устройства теряли связь уже при амплитуде наводки 350 мВ и частоте повторения 100 кГц. Режим защиты Int позволял модемам qBRIDGE-307i сохранять стабильную связь, но при этом значительно падала скорость соединения, вплоть до 1 Мбит/с. Реальная скорость полученного соединения с учётом штатных помех на линии данных, связанных с работой системы питания установки, составила от 1 до 5 Мбит/с. Таким образом, полученная пропускная способность канала данных на основе VDSL2 модема qBRIDGE-307i на линии с помехами как минимум в два раза ниже скоростей устройств на основе технологии SHDSL – Sigrand SG-17B-3.3-M и MOXA IEX-402-SHDSL.

В процессе разработки системы передачи данных телескопа НТ1000 были испытаны DSL-модемы разных типов и производителей, в том числе и VDSL2-модемы, которые сочетает в себе высокую пропускную способность и возможность работы в асимметричном режиме передачи данных. К настоящему моменту времени лучшие показатели скорости передачи по глубоководным кабелям Байкальского телескопа (витая пара сечением 0,5 мм²) были получены с SHDSL-модемами фирмы Sigrand – до 10 Мбит/с. Однако, с учетом бурного развития DSL-технологий и появления на рынке электроники DSL-модемов от ведущих фирм, производителей промышленной аппаратуры (в частности, MOXA), окончательный выбор типа модема в настоящее время не осуществлен.