

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 539.53.083

МОДЕРНИЗАЦИЯ И МЕТОДИКА УДЕРЖАНИЯ РАБОЧЕГО РЕЖИМА
УСТАНОВКИ ОГРАН (ОПТОАКУСТИЧЕСКАЯ
ГРАВИТАЦИОННАЯ АНТЕННА)

© 2020 г. В. Н. Руденко^{a, b, *}, Н. Л. Квашнин^c, А. А. Луговой^c, С. И. Орешкин^{a, b},
С. М. Попов^a, А. А. Самойленко^a, М. Н. Скворцов^c, И. С. Юдин^a

^aАстрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова,
Университетский проспект, 13, Москва, 119992 Россия

^bИнститут ядерных исследований РАН, пр.60-летия Октября, 7а, Москва, 117312 Россия

^cИнститут лазерной физики СО РАН, пр. Лаврентьева, 13/3, Новосибирск, 630090 Россия

*E-mail: valentin.rudenko@gmail.com

Поступила в редакцию 07.08.2020 г.

После доработки 10.08.2020 г.

Принята к публикации 12.08.2020 г.

Рассматривается модернизированный вариант комбинированного оптоакустического детектора гравитационного излучения ОГРАН. Эта подземная установка, расположенная в Баксанской нейтринной обсерватории, предназначена для поиска коллапсирующих звезд в Галактике совместно с нейтринным телескопом БПСТ. Оба инструмента обладают чувствительностью, позволяющей регистрировать коллапсы в нашей Галактике как редкие явления со средним темпом 0.03 события в год. Наблюдения проводятся в форме непрерывного синхронного мониторинга астрофизического фона по обоим каналам регистрации. Жесткие требования предъявляются к системам удержания рабочих режимов обоих установок. Проблема оказывается нетривиальной для гравитационного детектора ввиду сложности его систем автоматического регулирования и тонкой настройки рабочей точки. По этой причине методика и техника удержания ОГРАН в режиме мониторинга описана в деталях. Также, кратко представлены характеристики детектора ОГРАН после модернизации.

Ключевые слова: гравитационное излучение, гравитационные детекторы, лазерные интерферометры

DOI: 10.1134/S2079562920010157

1. ВВЕДЕНИЕ

После первой регистрации в 2015 г. всплеска гравитационно-волнового излучения от слияния релятивистской двойной системы с компонентами из черных дыр (ВН) [1], до конца 2017 г. удалось обнаружить и другие подобные события [2, 3]. Детектирование этих сигналов было выполнено с помощью установок ЛИГО [1] – больше-базовых (4 км) лазерных интерферометров на подвесных зеркалах, которые работают как измерители гравитационного градиента, переносимого гравитационной волной (ГВ). Важной ступенью явилась регистрация уже тремя детекторами (включая аналогичный интерферометр ВИРГО в Европе) всплеска GW170814 от слияния ВН-двойной ($M_{30} M$) с расстояния 540 Мпс [4], что позволило на порядок уменьшить зону локализации источника на небесной сфере, до ~60 кв. град. Наконец, был зарегистрирован ГВ-сигнал от слияния нейтронных звезд (NS), сов-

павший по времени с гамма импульсом GRB170817A (с задержкой 1.7 с) [5], подтвердив гипотезу рождения коротких гамма всплесков в результате слияния NS-двойной. Все эти факты позволяют уверенно говорить о фактическом возникновении нового гравитационно-волнового канала получения астрофизической информации. Они также прогнозируют эффективность многоканальной астрономии, то есть стратегии параллельного наблюдения за транзиентами на детекторах разной физической природы. С сожалением следует констатировать отсутствие гравитационно-волновых интерферометров типа ЛИГО и ВИРГО в России, хотя отечественной физической школе принадлежит ряд ключевых идей в развитии этого направления [6]. Единственным гравитационно-волновым детектором в килогерцевом диапазоне частот является установка ОГРАН в Баксанской Нейтринной Обсерватории (ИЯИ РАН), созданная совместными усилиями РАН и МГУ [7, 8].

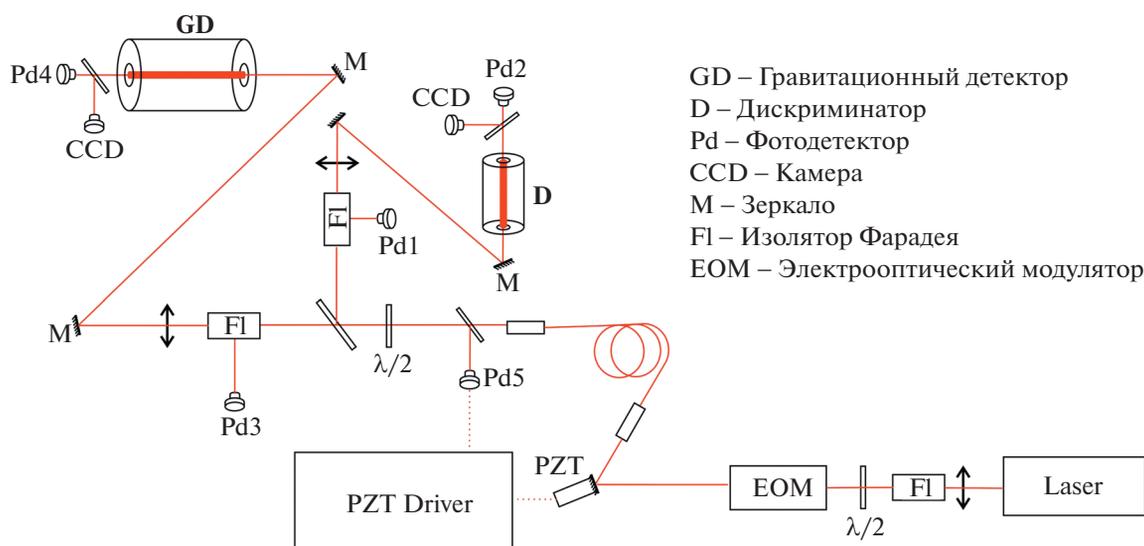


Рис. 1. Блок-схема установки ОГРАН.

Идея создания ГВ-детектора как акустического цилиндрического резонатора (болванки), соединенного с оптической полостью Фабри–Перо (ФП), образованной зеркалами, прикрепленными к торцам болванки, рассматривалась в [9, 10]. Было подчеркнуто новое качество такой комбинации: (а) более сложная структура отклика на ГВ-сигнал, содержащая отдельно акустические и оптические части, (б) возможность получения чувствительности на уровне акустических броуновских шумов в ограниченном спектральном частотном диапазоне из-за малого обратного флуктуационного влияния оптического считывания. Реализация этой идеи была воплощена в виде проекта ОГРАН. Начальная версия ОГРАН подробно описана в [7, 8].

Поскольку такой комбинированный оптоакустический детектор работает в зоне продольного акустического резонанса болванки, он неизбежно является узкополосным приемником. Однако ширина полосы приема зависит от уровня оптических (в пределе квантовых) шумов ФП интерферометра. Увеличивая оптическую добротность ФП резонатора (его резкость, или *finesse*) можно добиться заметного расширения полосы. Такого рода работы были выполнены в процессе модернизации ОГРАН в 2018–2020 гг. Результаты по снижению шумового уровня и расширению полосы детектора описаны ниже. Кроме того, представлена методика и техника автоматического поддержания рабочего режима ОГРАН, необходимая для выполнения длительных наблюдений в режиме не-

прерывного мониторинга грави-градиентного наземного фона.

2. КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА

Установка ОГРАН имеет в своем составе акустический резонансный детектор (цилиндр из алюминиевого сплава с центральным осевым каналом), лазер оптической накачки Nd:YAG и два интерферометра Фабри–Перо (рис. 1).

Оптическая часть включает в себя также три изолятора Фарадея, по одному в каждом плече и третий на выходе лазера в качестве вентильного элемента для исключения попадания обратного луча в лазер. В каждом плече установлено по два фотодетектора: Pd1, Pd3 – фотоприемники на отражение, Pd2, Pd4 – фотоприемники на пропускание; на выходе обоих каналов установлены CCD-камеры для визуального контроля оптической моды. Часть схемы, включающая в себя пьезо-манипулятор PZT с блоком управления PZT Driver и фотоприемником Pd5, служит для компенсации остаточной амплитудной модуляции (см. ниже). Основной детектор GD служит для стабилизации частоты лазера. Таким образом, его возмущения преобразуются в фазовые изменения частоты лазера. Второй детектор – дискриминатор D используется для преобразования полезного сигнала из светового в электрический.

Подробно конструкция и принцип работы антенны ОГРАН была описана в [7, 8]. Она имела следующие физико-технические характеристики: эффективная масса акустического детектора $M =$

$= 10^3$ кг, длина $L = 2$ м, частота акустического резонанса $\omega_0/2\pi = 1.3$ кГц при $Q = 10^5$. Параметры оптической части были следующими: длина волны лазера 1064 нм, полная мощность лазера $W = 2$ Вт, эффективная мощность в контурах полостей ФП – 0.05 Вт, резкость (finesse) $F = 3000$ в полости детектора, $F = 1500$ в полости дискриминатора, контраст интерференции $C \sim 0.2$. Кривая чувствительности (спектральная плотность шумовых деформаций – стрейнов) представлена в [7]. Откуда следует, что обнаруживаемыми являются деформации $(\Delta L/L)_f \sim 1 \cdot 10^{-18}$ Гц $^{-1/2}$ в полосе пропускания $\Delta f \sim 30$ Гц и $(\Delta L/L)_f \sim 1 \cdot 10^{-19}$ Гц $^{-1/2}$ в полосе $\Delta f \sim 4$ Гц вокруг центральной частоты 1.3 кГц.

3. ПЕРЕСТРОЙКА ЛАЗЕРА И СТРУКТУРА МОД ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ–ПЕРО

В процессе работы осуществляется непрерывная перестройка частоты лазера, которая необходима для двух целей. Во-первых, для настройки частоты лазера на частоту моды интерферометра Фабри–Перо. Во-вторых, для удержания частоты лазера на центральной частоте моды посредством работы цепей обратной связи. Такое удержание именуется “захватом за моду резонатора” или просто “захватом”.

Как подробно описано в [7, 8], лазер имеет три канала перестройки – один “медленный”, до нескольких сотен герц, и два “быстрых”. “Медленный” канал – единственный способный перестраивать частоту лазера в широком диапазоне – используется как для настройки частоты лазера на моду и для режима захвата. “Быстрые” каналы нужны только для реализации захвата.

Важнейшей частью установки является программноаппаратный комплекс, позволяющий дистанционно управлять всеми ее параметрами, а также автоматически поддерживать работу в режиме службы.

В зависимости от сигнала с фотодетектора от частоты излучения лазера во всем диапазоне перестройки лазера (1.2 ГГц), который обеспечивает “медленный” канал, присутствует набор повторяющихся пиков. Каждый пик соответствует случаю, когда одна из компонент лазерного излучения совпадает с частотой одной из мод резонатора Фабри–Перо.

Если бы частота лазера изменялась прямо пропорционально напряжению, прикладываемому к пьезокерамике “медленного” канала, то мы бы наблюдали моды, возникающие через равные промежутки, соответствующие межмодовому интервалу

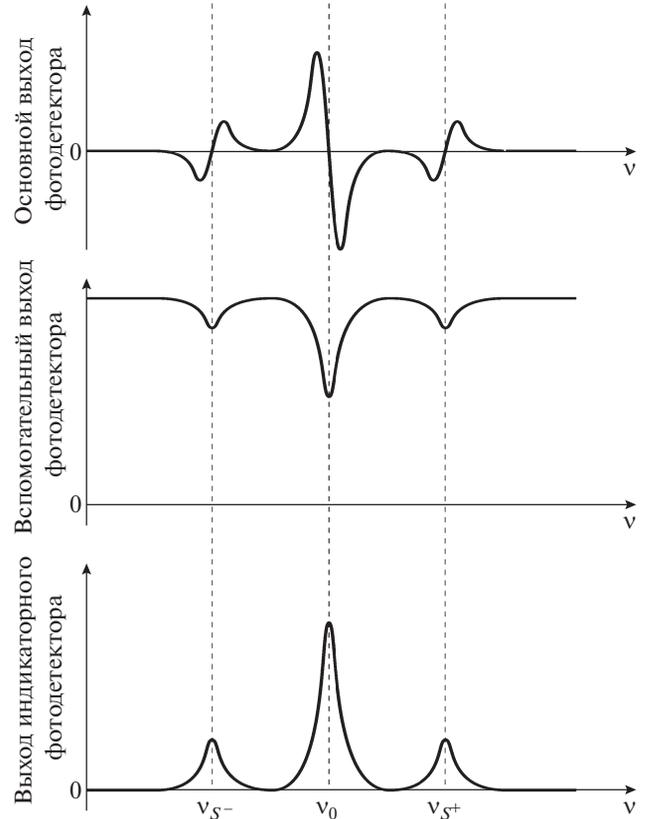


Рис. 2. Качественный вид зависимости выходных сигналов фотодетекторов от частоты лазерного излучения. Основной выход фотодетектора – выход фотодетектора на отражение по переменному току (AC out), вспомогательный выход фотодетектора – выход фотодетектора на отражение по постоянному току (DC out), индикаторный фотодетектор – фотодетектор на пропускание.

интерферомента Фабри–Перо. Однако, в процессе перестройки лазерного резонатора может произойти перескок мод лазера, что приводит к непрогнозируемому скачкообразному изменению частоты генерации. Частотные интервалы между такими перескоками больше межмодового расстояния интерферометра.

При идеальном согласовании лазерного пучка с основной модой интерферометра на графике зависимости сигнала с фотодетектора от частоты излучения лазера будут присутствовать только пики, соответствующие основной моде резонатора и их сайдбэнды, отстоящие по обе стороны на частоту модуляции (рис. 2). В действительности на графике будут присутствовать пики разной высоты, соответствующие другим пространственным модам.

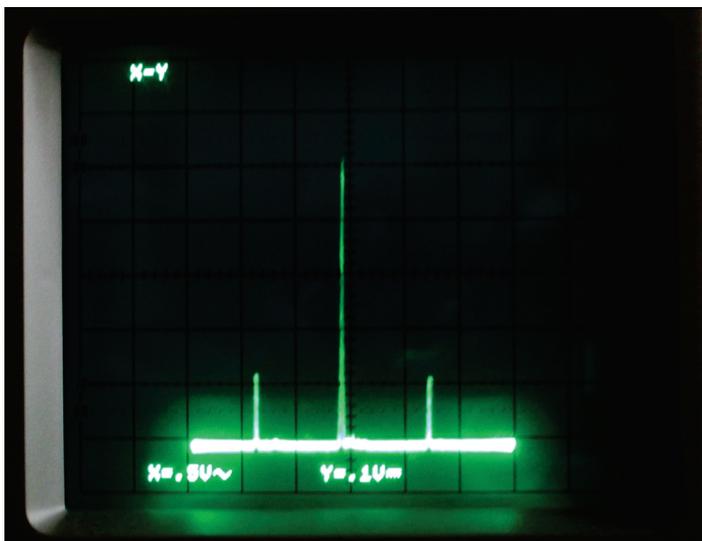


Рис. 3. Фотграфия осциллограммы, полученной в результате сканирования моды резонатора Фабри–Перо. Боковые пики – сайдбэнды, отстоящие от центральной частоты на частоту модуляции, в данном случае – 10.7 МГц.

4. СКАНИРОВАНИЕ, ЗАХВАТ И ПОДЗАХВАТ

Сканирование частотой лазера оптических резонаторов является одной из основных операций, используемых при настройке экспериментальной установки и при осуществлении захвата частоты лазера за резонансную частоту интерферометра Фабри-Перо.

В процессе настройки установки ОГАН требуется находить и выделять основную моду интерферометра Фабри–Перо. Наиболее удобным инструментом для этого является метод сканирования частотой лазера моды интерферометра. Суть этого метода заключается в следующем: в канал перестройки частоты лазера подается сигнал, который является суммой небольшого регулируемого по амплитуде периодического сигнала (раскачка) и некоторого постоянного напряжения (постоянное смещение). В результате частота лазера сканирует некоторый интервал, определяемый амплитудой раскачки, в районе фиксированной частоты, определяемой постоянным смещением. Форму резонансной кривой интерферометра можно наблюдать визуально на экране осциллографа в режиме XY. Соответствующая осциллограмма из реального эксперимента представлена на рис. 3.

В рабочем режиме интерферометры в обоих плечах установки находятся в захвате. Захват реализуется следующим образом: в режиме сканирования частота лазера подстраивается под частоту моды. Затем уменьшается амплитуда раскачки до минимальной, при которой еще возможно удерживать

частоту лазера на частоте пика интерферометра, после чего замыкаются цепи обратной связи. Если захват произведен успешно, то на изображении с видеокamеры соответствующего интерферометра наблюдается устойчивая картина светового пятна моды интерферометра Фабри–Перо.

Режим подзахвата реализуется постоянным включением высокочастотных петель обратной связи. В этом режиме захват осуществляется автоматически без участия оператора, но только если частота лазера не сильно отличается от частоты моды интерферометра, за которую осуществляется захват. При работающем подзахвате оператору достаточно подвести частоту лазера близко к частоте моды, и, когда мода “подзахватится”, включить полный захват, добавив к обратной связи низкочастотный канал с большим диапазоном удержания.

5. АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ, ИНТЕРФЕЙС И АЛГОРИТМЫ

Управление экспериментальной установкой ОГАН осуществляется от персонального компьютера по шине USB 2.0. Приемно-передающие блоки обоих каналов включают в себя коммерческие модули LCard E14-440, имеющие в своем составе АЦП 14 бит/400 КГц для подключения до 16 дифференциальных каналов или 32 с “общей землей”, 16 каналов цифрового ввода и вывода, совместимые с TTL логикой, а также по 2 канала ЦАП 12 бит/ ± 5 В.

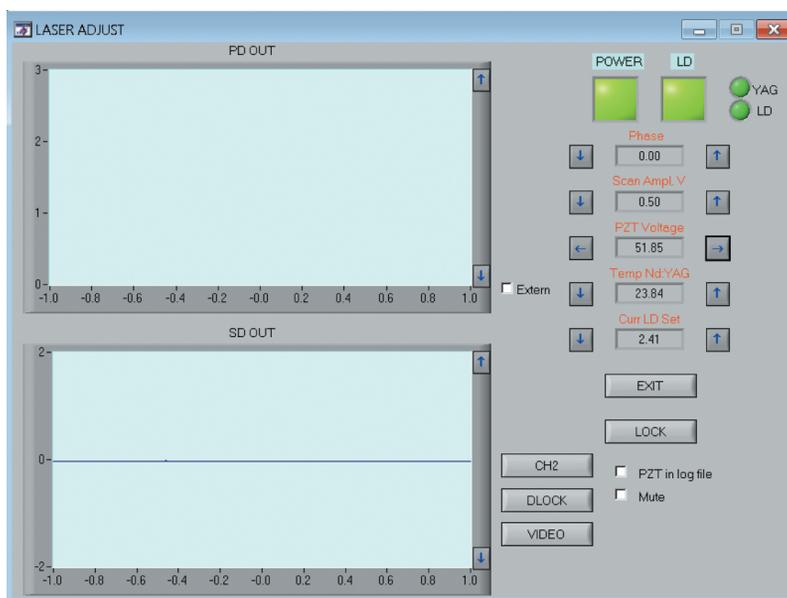


Рис. 4. Вид окна управления основным каналом с выключенным режимом захвата.

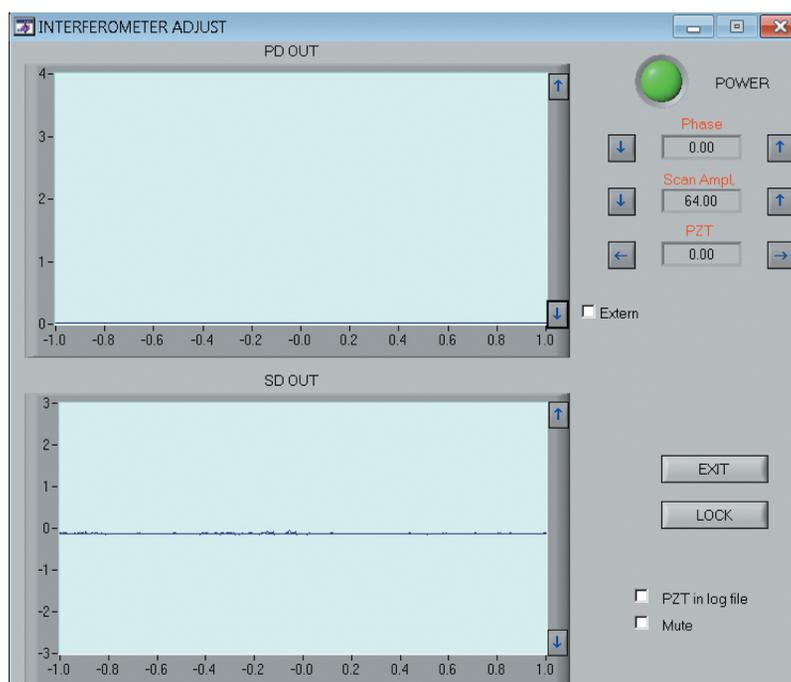


Рис. 5. Вид окна управления каналом интерферометра с выключенным захватом.

Программный интерфейс реализован в виде нескольких блоков. Окно управления основным каналом **LASER ADJUST** представлено на рис. 4:

POWER и **LD** – включение и выключение блока электроники и тока диодов накачки лазера;

PHASE – подстройка фазы сигнала, поступающего на синхронный детектор;

SCAN AMPL V – амплитуда сканирования частоты лазера;

PZT VOLTAGE – напряжение на “медленной” пьезокерамике (рабочая точка);

TEMP Nd:YAG и **Curr LD Set** – отображение состояния температурного режима лазера и тока диодов накачки;

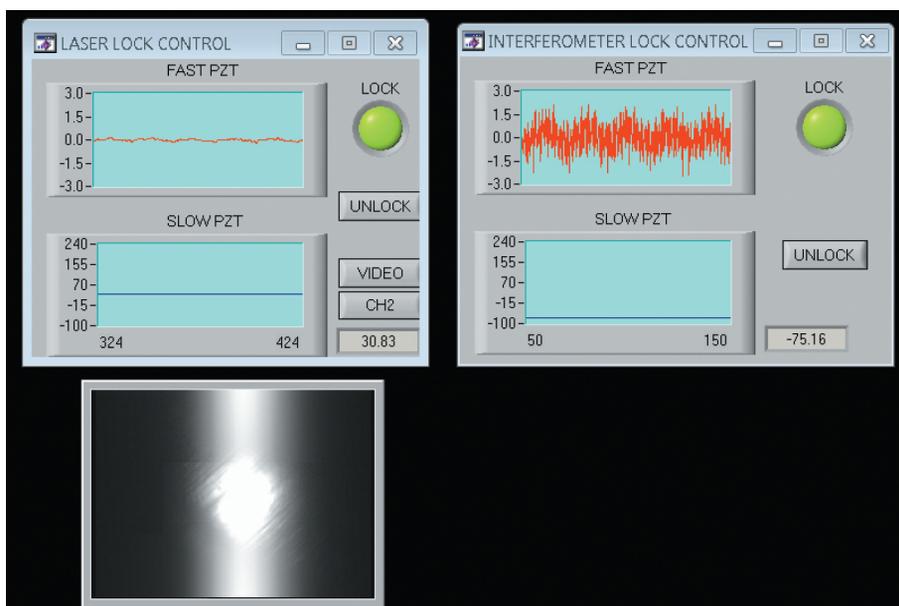


Рис. 6. Интерфейс программы управления в режиме полного захвата.

(d) настройка основных параметров работы лазера: температура, ток диодов накачки;

LOCK – управление захватом;

VIDEO – включение/выключение видеоканала, отображающего пространственную моду интерферометра первого канала;

CH2 – переключение на окно настройки второго канала.

В окнах **PD OUT** и **SD OUT** отображаются сигналы с выходов фотоприемников на отражение и на просвет. Проходы “вперед” и “назад” при ненулевой амплитуде сканирования прорисовываются красным и синим цветом соответственно.

Окно управления каналом интерферометра **INTERFEROMETER ADJUST** представлено на рис. 5:

PHASE – подстройка фазы сигнала, поступающего на синхронный детектор;

SCAN AMPL V – амплитуда сканирования длины интерферометра;

PZT VOLTAGE – напряжение на пьезокерамике интерферометра (рабочая точка);

LOCK – управление захватом.

В режиме полного захвата вид окон обоих каналов меняется, интерфейс программы управления выглядит следующим образом (рис. 6):

FAST PZT и **SLOW PZT** – отображение сигналов на “быстрой” и “медленной” керамике в режиме осциллографа;

UNLOCK – выключение захвата;

Кроме того, в дополнительном окне выводится сигнал с видеоканера, установленной на выходе интерферометра основного канала (на просвет).

На практике экспериментальная установка ОГРАН не может поддерживаться в режиме полного захвата бесконечно. Самопроизвольный выход из захвата обычно происходит в результате внешней электрической или сейсмической наводки, перескока моды лазера, выхода рабочей точки за пределы динамического диапазона и т.д. Так как это может произойти не на глазах оператора, нами разрабатывается методика автоматического захвата (захвата без участия оператора).

6. МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАХВАТА

Предварительный алгоритм автоматического захвата реализуется следующим образом. Начальные условия:

На основной вход канала 1 поступает сигнал с фотоприемника в отраженном сигнале (DC out), на дополнительный вход – сигнал с фотоприемника в отраженном свете (AC out), и, в качестве контрольного, – сигнал с фотоприемника в проходящем свете. Быстрые кольца обратных связей включены, медленное кольцо не включено, частота лазера (SlowPZT пьезокерамика) сканируется на величину меньше межмодового интервала

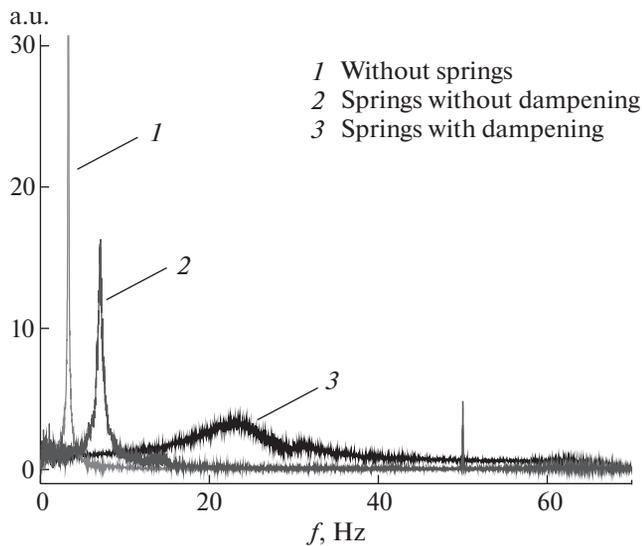


Рис. 7.

интерферометра и вручную установлена вблизи моды пропускания интерферометра.

После нажатия кнопки LOCK:

1) Отключаются каналы для сигналов обработки обратных связей по выходам EOM и FastPZT, таким образом отключается “подзахват”; в окне PDout форма сигнала становится лоренцевой с частотными возмущениями.

2) При нулевой амплитуде сканирования записываются сигналы с DC выходов фотоприемников в отраженном и в проходящем свете.

3) Определяется положение (напряжение на выходе SlowPZT) максимального уровня сигнала в пропускании и минимального в отражении.

4) При амплитуде сканирования порядка k (определяется заранее) ширины резонанса частота лазера итерационно подстраивается в область максимального по амплитуде резонанса интерферометра, включается “подзахват”, на канале FastPZT появляется сигнал обработки с некоторым смещением относительно нуля.

5) Изменением сигнала на SlowPZT сигнал с FastPZT подводится к нулю, амплитуда сканирования уменьшается до нуля, запоминается напряжение на SlowPZT и включается кольцо обратной связи на SlowPZT. После этого предполагается, что частота лазера стабилизирована по моде интерферометра.

6) Для проверки, что стабилизация осуществлена в нужной точке, измеряется напряжение на выходе SlowPZT и оно сравнивается с ранее запомненным. Возможен контроль уровня сигналов с фотоприемников в проходящем (отражен-

ном) свете и типа моды с камеры в проходящем свете. При разнице напряжений SlowPZT до и после стабилизации, превышающей некоторое заранее определенное значение, или невыполнение других условий, считается, что захват был неуспешным, и процедура автоматического захвата повторяется. После n неуспешных захватов выводится сообщение об ошибке, и процесс автоматической стабилизации прерывается.

7) Если п. 6 выполнен, то программа переходит в режим контроля состояния системы стабилизации. Контроль осуществляется по значению уровня мощности с фотоприемника в проходящем (отраженном) свете, изменению напряжения на выходе SlowPZT и FastPZT. Возможна проверка других критериев контроля состояния системы стабилизации.

7. ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ДЕТЕКТОРА

7.1. Улучшение сейсмо-акустической изоляции

Несмотря на подземное расположение антенны ОГАН, остаточные механические колебания окружающей среды отрицательно сказались на стабильности ее функционирования. Измерительная часть установки была наиболее восприимчива к их влиянию. Это в основном частотный дискриминатор, имеющий форму цилиндрической полости ФП, изготовленной из оптического стекла ULE (ситал), расположенного в вакуумной камере на тяжелом оптическом столе. Благодаря тому, что дискриминатор установлен в вакуумной камере в вертикальном положении, предъявляются повышенные требования к его сейсмоизоляции. Для этих целей была разработана антисейсмическая подвеска, которая включает в себя многосвязный антисейсмический фильтр и акустическую звукоизоляцию вакуумной камеры. Этот антисейсмический фильтр состоит из системы нескольких колец из нержавеющей стали, разделенных таблетками изолирующего материала (viton) Размер таблеток был выбран из расчета суммарной нагрузки верхних колец и корпуса дискриминатора. Нижние прокладки больше по размеру. Коническая система колец использовалась как более устойчивая к боковым колебаниям наклонной моды. Верхнее кольцо опиралось на пружинную подвеску из нержавеющей стали. Демпфирование мягкой сетчатой губкой применялось для понижения собственной частоты. Выбрав размер и жесткость демпферов, а также уменьшив размер таблеток витона между кольцами фильтра, можно было снизить собственную частоту всего фильтра до 3 Гц с добротностью около 0.3. Переходная ха-

рактеристика фильтра выглядит как ступенька с небольшим нарастанием резонанса 3 Гц и последующим спадом рис. 7. Крутизна спада определяется собственными частотами ступеней и их количеством.

Чтобы уменьшить внешнее акустическое воздействие, вакуумная камера дискриминатора была внешне покрыта двухслойной оболочкой из звукопоглощающего материала, такого как Com-*fort Mat* толщиной 10 мм.

7.2. Оптические и электронные компоненты

а) Оптические части установки ОГРАН были радикально обновлены. Зеркала обеих полостей ФП были заменены высококачественными зеркалами (изготовленными в *Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA), Lion France*). Новые зеркала имеют такую же геометрию, но очень низкие потери 1–2 ppm по поглощению и 3–6 ppm по рассеянию. После замены зеркал в ФП резонаторе акустического детектора его резкость повысилась до 25000, а в ФП дискриминатора до 75000, что привело к возрастанию коэффициента амплитудной передаточной функции больше одного порядка величины. Контрастность интерференции также была увеличена до 60%.

б) Следующий шаг был сделан в направлении подавления избыточных шумов. Одним из основных эффектов такого типа является нежелательная (паразитная) амплитудная модуляция оптической накачки. Стандартный режим антенны ОГРАН поддерживается системой обратной связи на частоте фазовой модуляции излучения накачки 10.5 МГц. Однако коммерческие фазовые электрооптические модуляторы из-за их неидеальных и неточных настроек приносят также остаточную (паразитную) амплитудную модуляцию излучения накачки. Детектирование такого излучения на фотоприемниках создает избыточный шум в опто-электронных цепях. Эффект остаточной амплитудной модуляции (ОЗУ) в электрооптических фазовых модуляторах до конца не изучен. Для борьбы с ним был использован эмпирический метод активного подавления ОЗУ на выходе фазового модулятора с использованием оптического волокна (детали см. в [11]). После применения подобной активной системы обратной связи шум ОЗУ подавляется более чем на 30 дБ.

в) Величина выходного сигнала ОГРАН пропорциональна мощности оптической накачки. Однако доступные фотоприемники имеют ограниченное рассеивание мощности. Кроме того, при работе на высоких частотах важна параллельная шунтирующая емкость фотодиода (для частоты

модуляции 10.7 МГц эффект является значительным). Существует противоречие между большой рабочей областью, которая уменьшает плотность мощности, и малой шунтирующей емкостью диода. Сама по себе работа на высоком уровне мощности приводит к нагреву чувствительного слоя фотодиодов, что также увеличивает их емкость.

В улучшенной установке ОГРАН кремниевые фотодиоды в старой версии заменяются фотодиодами *InGaAsP*, которые имеют лучшую квантовую эффективность – 0.7 против 0.4 на длине волны 1064 нм. На практике коммерчески доступные фотодиоды могут эффективно работать при мощности 30–50 мВт на частотах в десятки мегагерц. При более высокой мощности сигнал на частоте 10.7 МГц шунтируется с увеличением мощности и перестает расти. Это ограничение можно преодолеть при переключении на многоканальное обнаружение для больших мощностей ~1 Вт, где каждый фотодиод обслуживает свою долю света. С улучшенной версией ОГРАН предварительные эксперименты проводились с 4- и 16-канальными детекторными матрицами с использованием делителей света. На практике трудно получить одинаковую оптическую мощность в каждом луче и настроить все каналы с максимальной эффективностью. Для этой цели планируется перейти на волоконно-оптические фотодетекторы.

Выше отмечены только самые важные модернизации, реализованные в новой версии ОГРАН. Однако ключевым фактором явилась замена стандартных зеркал интерферометров *Фабри–Перо* в обоих плечах антенны на зеркала высоких технологий. Это привело к возрастанию коэффициента преобразования сигнала от гравитационно-деформационной формы к оптоэлектронной более чем на порядок. В результате полоса эффективно-го приема сигналов GW на антенне ОГРАН расширилась пропорционально корню из величины резкости. Это иллюстрируется на рис. 8, который показывает спектральную плотность шума в стрейнах для модернизированной антенны в сравнении с первоначальной версией (эксперимент описан в [10]). На уровне $h \sim 10^{-18} \text{ Гц}^{-1/2}$, полоса приема расширена с 7 до 30 Гц.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье были представлены новые качества ГВ детектора ОГРАН после его модернизации. Описана процедура и техника его удержания в режиме непрерывного мониторинга. Однако предельная чувствительность этой установки по-прежнему не может превышать уровня $10^{-20} \text{ Гц}^{-1/2}$ по возмущениям метрики, поскольку она ограни-

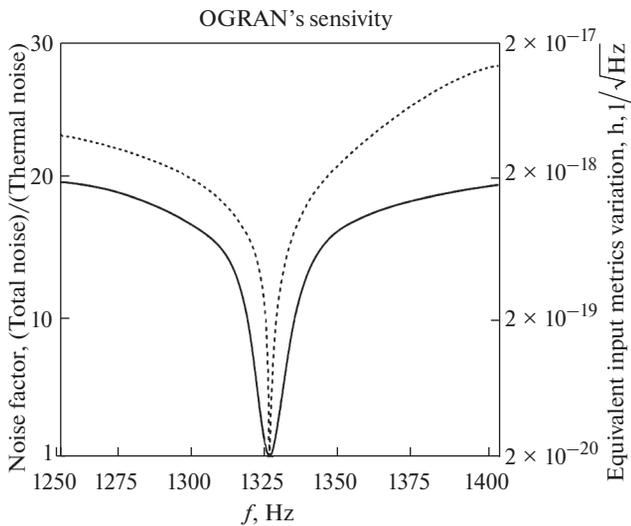


Рис. 8.

чивается тепловым броуновским шумом акустического детектора. Радикальный, но дорогостоящий способ преодоления этого барьера связан с глубоким охлаждением [12]. Менее затратный вариант, связанный с охлаждением акустического детектора до температуры жидкого азота 80 К предлагался в [13]. Результаты тестовых экспериментов [14] на пилотной модели не опровергают возможность повышения чувствительности такого “азотного варианта” антенны до уровня $3 \cdot 10^{-20} \text{ Гц}^{-1/2}$. Это уже соответствует сопоставимым радиусам зон расположения обнаруживаемых коллапсаров (взрывов сверхновых) по обоим наблюдательным каналам нейтринному и гравитационному.

Здесь уместно напомнить известный случай регистрации нейтрино и гравитационных сигналов от SN1987A [15, 16]. Это был пример поиска двухканальной корреляции между сигналами нейтринных телескопов и детекторами гравитационных волн, работавших при комнатной температуре. В последствии только нейтринные события были признаны “первым детектированием” нейтринного потока от коллапсирующей звезды [17].

Факт нейтрино-гравитационной корреляции в случае SN1987A не был подтвержден [18, 19] потому, что чувствительности твердотельных резонансных детекторов с пьезо регистраторами (детекторы Вебера) при комнатной температуре было недостаточно для обнаружения сигналов астрофизического происхождения. Опто-акустическая антенна ОГРАН даже без охлаждения имеет чувствительность на четыре порядка больше, чем у “веберов-

ских” детекторов. В версии с охлаждением до азотной температуры, преимущество по чувствительности нарастает до пяти порядков.

В заключение отметим важность самой проблемы обнаружения “нейтрино-гравитационных сигналов” от коллапса. По-видимому, скрытая здесь физика процесса гораздо богаче, чем содержащаяся информация в гравитационных всплесках, излучаемых при слиянии релятивистских двойных. Фактически, структура такого всплеска (“чирпа”) на спиральной стадии скручивания предсказывается достаточно хорошо уже в рамках теории Ньютона и дает информацию о параметрах двойной системы (масса, полуось, частота). Тонкие релятивистские детали двойной системы пока еще не разрешимы, как и ядерные процессы на стадии слияния. Напротив, временная структура нейтринных и гравитационных всплесков от коллапсирующей звезды – это есть индикатор происходящих в ней ядерных процессов [20–22]. В частности, “отскоки” в ходе монотонного сжатия указывают на изменение уравнения состояния ядерной материи при увеличении плотности, температуры и т.д. Этот аргумент является основным мотивом программы БНО ИЯИ РАН для двухканального поиска коллапсаров в Галактике и её ближайшей окрестности (50–100 кпс).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность академикам С.Н. Багаеву, В.И. Пустовойту и А.М. Черепашуку за неоднократные плодотворные обсуждения проблем с установкой ОГРАН и путей развития техники гравитационно-волновых детекторов в России. Данная работа поддержана грантом РФФИ 19-29-11010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al. (LIGO Collab. and Virgo Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. P. 061102.
2. Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al. (LIGO Collab. and Virgo Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. P. 241103.
3. Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al. (LIGO Collab. and Virgo Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 118. P. 221101.
4. Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al. (LIGO Collab. and Virgo Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. P. 141101.
5. Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al. (LIGO Collab. and Virgo Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. P. 161101.
6. Rudenko V.N. // Phys. Usp. 2017. V. 60. P. 830. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.11.038088>

7. *Bagaev S.N. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 114. <https://doi.org/10.1134/S1063778817100039>; Yad. Fiz. Inzhin. 2016. V. 7. P. 535 (2016). <https://doi.org/10.1134/S2079562916060038>
8. *Bagaev S.N., Bezrukov L.B., Kvashnin N.L., et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2015. V. 58. P. 257.
9. *Kulagin V.V., Polnarev A.G., and Rudenko V.N.* // Sov. Phys. JETP. 1977. V. 20. P. 319.
10. *Bichak I., Rudenko V.N.* Gravitatsionnyye volny v OTO i problema ikh obnaruzheniya [Gravitational Waves in GR and the Problem of Their Detection]. 1987. Moscow: MGU (in Russian).
11. *Zhang W. et al.* // Opt. Lett. 2014. V. 39. P. 1980.
12. *Astone P. et al. (IGEC-2 Collab.)* // Phys. Rev. D. 2007. V. 76. P. 102001.
13. *Kulagin V.V. et al.* // Phys. At. Nucl. 2016. V. 79. P. 1552. <https://doi.org/10.1134/S1063778816130056>; Yad. Fiz. Inzhin. 2016. V. 7. P. 59. <https://doi.org/10.1134/S2079562916010061>
14. *Kvashnin N.N. et al.* // Phys. At. Nucl. 2017. V. 80. P. 1606.
15. *Aglietta M. et al.* // Europhys. Lett. 1987. V. 3. P. 1321.
16. *Alexeyev E.N. et al.* // Phys. Lett. B. 1988. V. 205. P. 209.
17. *Hirata K.S. et al.* // Phys. Rev. D. 1988. V. 38. P. 448.
18. *Dickson C.A., Schutz B.F.* // Phys. Rev. D. 1995. V. 51. P. 2644.
19. *Rudenko V.N. et al.* // J. Exp. Theor. Phys. 2000. V. 91. P. 845. <https://doi.org/10.1134/1.1334976>
20. *Mayle R., Wilson J. R., and Schramm D. N.* // Astrophys. J. 1987. V. 318. P. 288.
21. *Melson T. et al.* // Astrophys. J. 2015. V. 808. P. L42.
22. *Bisnovatyi-Kogan G.S. and Moiseenko S.G.* // Phys. Usp. 2017. V. 60. P. 843. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.11.038112>

Modernization and Methods of Maintaining the Operating Mode of the OGRAN (Optoacoustic Gravity Antenna) Setup

V. N. Rudenko^{1, 2, *}, N. L. Kvashnin³, A. A. Lugovoi³, S. I. Oreshkin^{1, 2}, S. M. Popov¹, A. A. Samoilenko¹, M. N. Skvortsov³, and I. S. Yudin¹

¹*Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119992 Russia*

²*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

³*Institute of Laser Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

**e-mail: valentin.rudenko@gmail.com*

Received August 7, 2020; revised August 10, 2020; accepted August 12, 2020

Abstract—An upgraded version of the combined optoacoustic gravitational radiation detector OGRAN is considered. This underground setup located at the Baksan Neutrino Observatory is designed to search for collapsing stars in the Galaxy in conjunction with the neutrino telescope BUST. Both instruments possess the sensitivity sufficient for registering collapses in our Galaxy as rare events with an average rate of 0.03 events per year. Observations are carried out in the form of continuous synchronous monitoring of the astrophysical background through both recording channels. Strict requirements are imposed on the systems for maintaining the operating modes of both installations. For the gravity detector, the problem is nontrivial owing to the complexity of its automatic control systems and fine-tuning of the operating point. For this reason, the method and technique for maintaining the OGRAN detector in monitoring mode is described in detail. Also, the characteristics of the OGRAN detector after modernization are briefly presented.

Keywords: gravitational radiation, gravitational detector, laser interferometers