

На правах рукописи

Данилишин Штефан Леонтьевич

**Методы преодоления Стандартного квантового  
предела чувствительности в лазерных  
гравитационных антеннах**

Специальность 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

*Автореферат*

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2004 г.

Работа выполнена на кафедре физики колебаний Физического факультета Московского Государственного Университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Ф. Я. Халили;  
Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник М. В. Чехова;  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник Е. А. Зубова.  
Ведущая организация: Институт Спектроскопии РАН (г. Троицк).

Защита состоится 16 декабря 2004 г. в 15.00 час. на заседании Диссертационного совета Д 501.001.66. в МГУ им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, аудитория 5-19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан 15 ноября 2004 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д 501.001.66.  
кандидат физико-математических наук

А. П. Ершов

# 1 Общая характеристика работы

## 1.1 Актуальность темы

К настоящему времени во всем мире уже построены и функционируют несколько больших лазерных гравитационно-волновых детекторов, которые позволят ученым понять процессы, происходящие в глубоком космосе. Успешная регистрация гравитационного излучения от космических источников также позволит доказать, что общая теория относительности Альберта Эйнштейна описывает действительность адекватным образом. Уже сейчас работают в режиме записи наземные установки в Северной Америке (LIGO), Европе (GEO 600) и Японии (TAMA), достраивается совместный итало-французский детектор гравитационных волн VIRGO, а совместный Американско-Европейский проект космической антенны LISA (Laser Interferometric Space Antenna - лазерная интерференционная космическая антенна) будет близок к завершению, либо уже завершен к концу текущего десятилетия. Основной целью этих инструментов будет открытие нового раздела физики — гравитационно-волновой астрономии.

Тем не менее, в ходе разработки и введения в строй первых детекторов гравитационного излучения было обнаружено, что для успешной регистрации гравитационного излучения чувствительность их должна быть настолько высока, что измеряемые смещения зеркал интерферометра не должны превышать  $10^{-20} \div 10^{-19}$  м. При столь ничтожных масштабах уже нельзя пользоваться классическими представлениями о движении макроскопических объектов, и для описания процесса измерения в такого рода устройствах приходится руководствоваться принципами квантовой механики и квантовой теории измерений.

Так, например, для гравитационной антенны оказывается неприменим принцип идеального измерительного прибора, точность показаний которого связана только с внутренними свойствами самого прибора, то есть с его аппаратной функцией. Здесь приходится принимать во внимание влияние, оказываемое прибором на измеряемую величину — обратное флуктуационное влияние. Например, в интерферометрическом детекторе гравитационная волна регистрируется посредством измерения сдвига фаз на выходе модифицированного интерферометра Майкельсона. Этот сдвиг фаз возникает, когда через интерферометр проходит гравитационная волна, изменяя длины плеч интерферометра. Но изменение длин плеч может вызывать также и флуктуирующее вследствие дробового шума фотонов световое давление лазерного луча на зеркала. Причем это давление, как показывают расчеты, по величине сравнимо со смещением, вызываемым гравитационной волной. При этом оказывается, что с одной стороны для более точного измерения положения зер-

кала необходимо увеличивать мощность лазера (число взаимодействующих с лазером фотонов), в то время как с другой стороны при этом возрастает и обратное флуктуационное влияние, ухудшая точность измерений. Очевидно, существует некоторый оптимальный режим, при котором чувствительность системы будет иметь максимально возможное значение. Соответствующая минимальная ошибка измерения, которая имеет место в силу квантовых свойств объекта, называется Стандартным квантовым пределом (СКП) чувствительности [1, 2].

Как показывают оценки астрофизиков, уровень гравитационного сигнала оказывается сравним с уровнем СКП в гравитационно-волновых детекторах. Чувствительность существующих лазерных гравитационных антенн уже вплотную приблизилась к уровню СКП, а чувствительность проектируемых гравитационно-волновых детекторов должна превзойти этот уровень. В связи с этим весьма актуальными представляются усилия по разработке новых, перспективных методов измерения слабых сил и малых смещений, чувствительность которых превосходит Стандартный квантовый предел.

В данной диссертационной работе предложен и проанализирован ряд методов измерения, позволяющих преодолеть Стандартный квантовый предел чувствительности при регистрации малых сил и смещений в лазерных гравитационных антеннах. Диссертация состоит из двух частей.

В первой части рассматривается новая процедура дискретного вариационного измерения и процедура вариационно-стробоскопического измерения, которая является ее дальнейшим усовершенствованием. Получены выражения, определяющие предельные чувствительности предложенных процедур в двух случаях. В первом случае для описания динамического поведения пробного тела выбрана модель свободной массы, а во втором — модель гармонического осциллятора.

Во второй части рассмотрена схема лазерной гравитационно-волновой антенны на базе оптического измерителя скорости. Проанализированы квантовые шумы, ограничивающие чувствительность данного измерителя, в том числе и шумы, возникающие вследствие наличия поглощения в оптических элементах схемы. Получены выражения для предельной чувствительности схемы оптического измерителя скорости с учетом поглощения в зеркалах. Рассмотрены также две возможные реализации оптического измерителя скорости на базе интерферометра Майкельсона с резонаторами Фабри-Перо в плечах и с дополнительным зеркалом рециркуляции сигнальной волны, соответственно. Проанализированы преимущества и недостатки рассмотренных схем.

## 1.2 Цель работы

1. Разработка нового метода регистрации действия классической силы неизвестной формы и с неизвестным временем прихода на квантовый пробный объект, например, пробную массу гравитационной антенны - дискретного вариационного измерения. Получение выражения для предельной чувствительности оптического детектора смещений, использующего дискретное вариационное измерение.
2. Разработка комбинированной процедуры вариационно-стробоскопического измерения, отличающейся от метода дискретного вариационного измерения одновременной модуляцией мощности накачки и фазы опорного генератора. Получение выражения для предельной чувствительности оптического детектора смещений, основанного на предложенном методе вариационно-стробоскопического измерения.
3. Теоретический анализ схемы квантового оптического измерителя скорости с учетом поглощения в оптических элементах схемы. Получение выражения для предельной чувствительности лазерной гравитационной антенны, основанной на квантовом измерителе скорости, с учетом поглощения в оптических элементах антенны. Получение выражений для оптимальных значений параметров рассматриваемой схемы обеспечивающих наилучшую чувствительность.
4. Анализ двух возможных топологий квантового оптического измерителя скорости, в одной из которых применяются резонаторы Фабри-Перо (как, например, в проекте LIGO), а в другой — дополнительное зеркало рециркуляции сигнальной волны (как в проекте GEO 600) для повышения чувствительности. Вывод и сравнение выражений для предельной чувствительности схем, имеющих ту или иную из рассматриваемых топологий.

## 1.3 Научная новизна работы

Вычислена предельная чувствительность нового метода обнаружения слабой классической силы, действующей на квантовый пробный объект, форма и время прихода которой не известна — дискретное вариационное измерение. Разработана процедура оптимальной фильтрации сигнала для этого метода.

Предложена и детально проанализирована улучшенная по сравнению с дискретным вариационным измерением процедура обнаружения слабой классической силы на квантовый пробный объект — вариационно-стробоскопическое измерение.

Получено выражение для предельной чувствительности лазерной гравитационно-волновой антенны на базе оптического измерителя скорости с учетом поглощения в оптических элементах. Рассчитаны значения параметров схемы, при которых достигается наибольшая чувствительность.

Проанализированы две возможные реализации схемы оптического измерителя скорости, в одной из которых используются резонаторы Фабри-Перо в плечах, а в другой — дополнительное зеркало рециркуляции сигнальной волны. Получены выражения для предельных чувствительностей обеих схем. Проведено сравнение полученных результатов и сделан вывод о целесообразности применения резонаторов Фабри-Перо вместо зеркала рециркуляции сигнальной волны для повышения чувствительности оптического измерителя скорости.

## 1.4 Практическая ценность работы

Предложенная процедура дискретного вариационного измерения позволяет обнаруживать слабую классическую силу, действующую на квантовый пробный объект, форма и время прихода которой не известна, с точностью, превышающей СКП.

Предложенная улучшенная по сравнению с дискретным вариационным измерением процедура вариационно-стробоскопического измерения позволяет детектировать действие слабых сил на пробный объект с еще большей точностью и при меньших затратах энергии.

Полученное выражение для предельной чувствительности лазерной гравитационно-волновой антенны на базе оптического измерителя скорости с учетом поглощения в оптических элементах и рассчитанные значения параметров схемы, при которых достигается наибольшая чувствительность могут быть использованы при проектировании гравитационно-волновых антенн нового поколения, использующих принцип квантового невозмущающего измерения (КНИ) для детектирования гравитационных волн.

Результаты анализа чувствительности возможных реализаций схемы оптического измерителя скорости, в одной из которых используются резонаторы Фабри-Перо в плечах, а в другой — дополнительное зеркало рециркуляции сигнальной волны могут быть использованы для выбора оптимальной конструкции лазерной гравитационно-волновой антенны на базе оптического измерителя скорости.

## 1.5 Апробация работы

Результаты работы докладывались на научных семинарах кафедры физики колебаний Физического факультета МГУ, на международной научной конфе-

ренции студентов аспирантов и молодых ученых "Ломоносов"(Москва, 2003, и 2004 гг.).

## 1.6 Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 работ, список которых приведен в конце настоящего автореферата.

## 1.7 Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, двух частей, выводов, списка литературы и восьми приложений. Диссертация содержит 117 страниц текста и 40 рисунков. Список литературы содержит 78 наименований.

## 2 Краткое содержание диссертации

Во ВВЕДЕНИИ рассмотрены общие вопросы, связанные с детектированием гравитационных волн и фундаментальными ограничениями чувствительности. Представлены краткий очерк о природе гравитационного излучения. Рассмотрены основные идеи, лежащие в основе интерферометрического детектора гравитационных волн. Рассмотрены причины, приводящие к появлению Стандартного квантового предела чувствительности, и приведен простой расчет величины СКП для смещения свободной массы, а также для силы, вызывающей это смещение. Обосновываются актуальность темы и формулируются цели диссертационной работы.

ЧАСТЬ 1 "Вариационно-стробоскопическое измерение".

Рассмотрение начинается с обзора идей и методов, лежащих в основе предложенных процедур измерения.

Первым рассматривается принцип вариационного измерения. Основная идея данного метода заключается в следующем. Хорошо известно, что в оптическом датчике после отражения от подвижного зеркала свет, первоначально находившийся в когерентном состоянии, из-за нелинейной зависимости ponderomotorной силы светового давления от амплитуды световой волны становится сжатым. Схематично данная ситуация может быть изображена на фазовой плоскости как превращение круга, описывающего когерентное состояние электромагнитного поля (радиус круга равен корню из дисперсии любой из квадратурных компонент поля,  $X_1$  или  $X_2$ ), в результате эволюции в эллипс, главные оси которого располагаются под некоторым углом  $\phi$  к основным осям (см. Рис. 1). Угол поворота главных осей эллипса постоянно меняется. Если вместо измерения фиксированной квадратурной компоненты

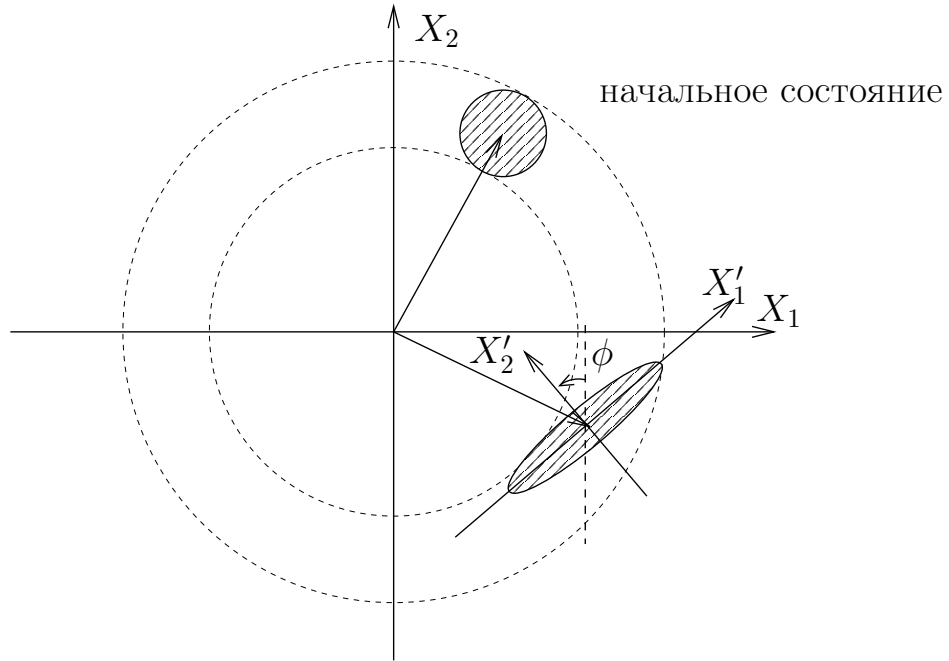


Рис. 1: Идея вариационного измерения

поля ( $X_1$  или  $X_2$ ) во время действия внешней силы измерять новую величину  $X'_2 = X_2 \cos \phi(t) - X_1 \sin \phi(t)$ , то можно значительно повысить точность измерений и преодолеть СКП. Для реализации данного метода необходимо знать зависимость угла  $\phi(t)$  от времени. Фактически, данный угол представляет собой зависящую от времени фазу опорного генератора в стандартной гомодинной схеме детектирования. Главным недостатком данного метода является необходимость точно знать временную зависимость для силы и время, когда она начинает действовать. Очевидно, эти условия невозможно удовлетворить в условиях гравитационно-волновой антенны.

Еще одним перспективным методом преодоления СКП, рассматриваемым в работе, является стробоскопическое измерение. Этот метод основан на свойстве гармонического осциллятора, которое заключается в том, что его оператор координаты коммутирует сам с собой в моменты времени  $t_0$  и  $t = t_0 + \frac{n\pi}{\omega_m}$ :

$$[\hat{x}(t), \hat{x}(t_0)] = \frac{i\hbar}{m\omega_m} \sin \omega_m(t - t_0), \quad (1)$$

где  $m$  — масса осциллятора, а  $\omega_m$  — его собственная частота. Благодаря этому свойству погрешность измерения координаты в указанные моменты времени не зависит от возмущения импульса, сообщенного пробному телу прибором во время предыдущего измерения, то есть шум обратного флуктуационного воздействия не влияет на итоговую погрешность измерения. Это можно также проиллюстрировать диаграммой эволюции состояния поля на фазовой



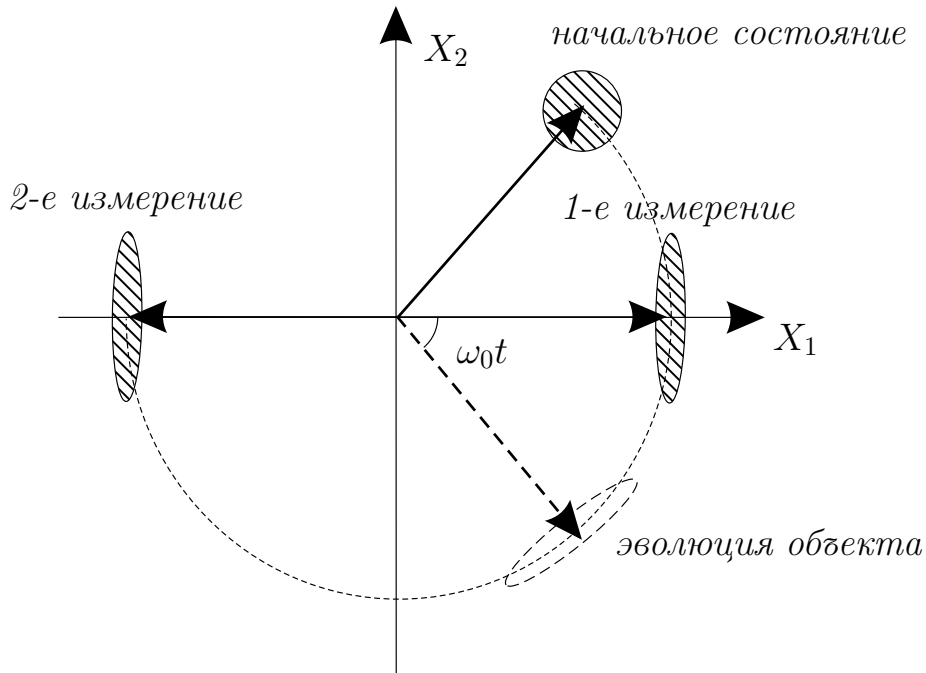


Рис. 2: Идея стробоскопического измерения

плоскости (Рис. 2).

Однако, все приведенные выше рассуждения верны только в том случае, если измерения, проводимые в указанные моменты времени, мгновенны. Если же это условие не выполняется, то есть измерения имеют некоторую длительность  $\vartheta$ , отличную от нуля, тогда формула для погрешности регистрации силы принимает вид:

$$(\Delta F)_{min}^2 = \frac{\hbar m \omega_m^2 \vartheta}{\tau^2}, \quad (2)$$

где  $\tau$  — длительность импульса силы. Из приведенной формулы видно, что с ростом длительности измерения  $\vartheta$  ухудшается чувствительность измерения. Известно, что чувствительность измерения координаты тем выше, чем большую энергию измеритель передает пробному телу за время измерения. Таким образом, повышая чувствительность посредством уменьшения времени взаимодействия пробного тела с прибором, мы будем вынуждены увеличивать обратное флуктуационное воздействие прибора на пробное тело, а следовательно и энергию накачки в параметрическом датчике. В пределе мгновенного измерения мощность накачки должна быть бесконечной, что, конечно, не может быть реализовано на практике. Следует также отметить, что стробоскопическое измерение может быть реализовано только в том случае, если в качестве пробного тела детектора смещений выступает гармонический осциллятор. Это также можно отнести к недостаткам данной процедуры.

В данной диссертационной работе предлагаются методы, позволяющие

преодолеть указанные недостатки — методы дискретного вариационного и вариационно-стробоскопического измерения.

Первым рассматривается метод дискретного вариационного измерения. Допустим, что нам известна верхняя частота  $\Omega_{max}$  спектра исследуемого гравитационно-волнового сигнала (сегодня можно с достаточной долей уверенности утверждать, что она не превышает несколько тысяч  $\text{с}^{-1}$ ). Тогда мы можем разбить все время измерения на малые интервалы длительностью  $\tau \leq \pi/\Omega_{max}$  (согласно теореме Котельникова). На каждом таком интервале можно заменить реальную силу на ее среднее по этому интервалу значение. Тогда задача о детектировании силы неизвестной формы с неизвестным временем прихода преобразуется в задачу о детектировании последовательности прямоугольных импульсов с длительностью каждого равной  $\tau$ . Для такого сигнала уже легко вычислить точную зависимость  $\phi(t)$  и добиться при помощи вариационного измерения чувствительности, превышающей СКП.

В разделе диссертации, посвященном описанному методу, решается задача о нахождении оптимальных функции  $\phi(t)$  и фильтрующей функции, минимизирующих значение погрешности при регистрации силы, действующей на датчик. Оптимизационная задача решается для двух различных моделей динамического поведения подвижного зеркала датчика: свободной массы и гармонического осциллятора. Показано, что чувствительность предложенной процедуры по сравнению с СКП, выражаемая через отношение спектральной плотности шума измерителя при использовании предложенной процедуры к спектральной плотности шума, соответствующей СКП, равна:

$$(\xi_{\text{err}}^{\text{f.m.}})^2 = \frac{S_{\text{err}}^{\text{f.m.}}}{S_{\text{SQL}}} = \frac{360}{(\Omega\tau)^4} \cdot \frac{\mathcal{E}_{\text{SQL}}}{\mathcal{E}} \approx 3.7 \frac{\mathcal{E}_{\text{SQL}}}{\mathcal{E}},$$

для свободной массы, и

$$(\xi_{\text{err}}^{\text{osc}})^2 = \frac{S_{\text{err}}^{\text{osc}}}{S_{\text{SQL}}} \approx \frac{252}{(\Omega\tau)^4} \cdot \frac{\mathcal{E}_{\text{SQL}}}{\mathcal{E}} \approx 2.6 \frac{\mathcal{E}_{\text{SQL}}}{\mathcal{E}},$$

для гармонического осциллятора. Здесь

$$\mathcal{E}_{\text{SQL}} = \frac{mL^2\Omega^3}{\omega_o},$$

это энергия, которую необходимо затратить для достижения чувствительности на уровне СКП при традиционном координатном измерении,  $\Omega$  — частота наблюдения,  $\omega_o$  — оптическая частота накачки, а  $\mathcal{E}$  — оптическая энергия, циркулирующая в резонаторе датчика.

Вторым методом, рассматриваемым в данной части диссертации, является метод вариационно-стробоскопического измерения. Он является дальней-

шим развитием описанного ранее метода дискретного вариационного измерения и использует принцип стробоскопического измерения. То есть, предлагается заменить постоянную, не зависящую от времени накачку на такую накачку, при которой мощность излучения лазера зависит от времени оптимальным образом. Фактически, предлагается помимо модуляции фазы опорного генератора  $\phi(t)$  модулировать и мощность излучения лазера  $W(t)$ . В работе рассматривается оптимизационная задача, в результате решения которой получаются оптимальные функция фазы опорного генератора  $\phi(t)$ , фильтрующая функция и мощность оптической накачки  $W(t)$ . Оказывается, что для достижения максимальной чувствительности мощность накачки должна представлять собой последовательность как можно более коротких световых импульсов с периодом следования  $\tau/2$ . Оптимум достигается при нулевой продолжительности импульсов, то есть при  $\delta$ -образной накачке. Это, фактически, означает, что датчик смещений должен работать в стробирующем режиме.

Показано, что чувствительность предложенной процедуры по сравнению с СКП, выражаемая через отношение спектральной плотности шума измерителя при использовании предложенной процедуры к спектральной плотности шума, соответствующей СКП, равна:

$$(\xi_{\text{err}}^{\text{f.m.}})^2 = \frac{S_{\text{err}}^{\text{f.m.}}}{S_{\text{SQL}}} = \frac{128}{(\Omega\tau)^4} \frac{\mathcal{E}_{\text{SQL}}}{\bar{\mathcal{E}}} \approx 1.31 \frac{\mathcal{E}_{\text{SQL}}}{\bar{\mathcal{E}}},$$

для свободной массы, и

$$(\xi_{\text{err}}^{\text{strob}})^2 = \frac{S_{\text{err}}^{\text{strob}}}{S_{\text{SQL}}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\omega_m}{\Omega} \right)^4 \frac{\mathcal{E}_{\text{SQL}}}{\bar{\mathcal{E}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{SQL}}}{2\bar{\mathcal{E}}}.$$

для гармонического осциллятора. Здесь  $\bar{\mathcal{E}}$  — средняя за время  $\tau$  оптическая энергия, циркулирующая в резонаторе датчика.

В описываемой части диссертации также проведен детальный анализ зависимости погрешности измерения рассматриваемой процедуры от длительности отдельного импульса накачки. Получены выражения, описывающие зависимость погрешности процедуры вариационно-стробоскопического измерения от длительности импульсов накачки. Показано, что при увеличении длительности импульсов погрешность измерения растет незначительно.

## ЧАСТЬ 2 "Квантовый измеритель скорости".

Рассмотрение начинается с краткого обзора, посвященного квантовым невозмущающим измерениям (КНИ) и квантово-невозмущаемым наблюдаемым. Известно, что в каждой физической системе есть такие наблюдаемые, эволюция которых не зависит от некоммутирующих с ними наблюдаемыми. Примерами такого рода наблюдаемых могут служить энергия или квадра-

турные амплитуды гармонического осциллятора. Измерение этих наблюдаемых не приводит к их случайному возмущению. Обладающие таким свойством наблюдаемые называют *невозмущаемыми*, а процедуру их измерения — квантовым невозмущающим измерением. Точность измерения невозмущаемой наблюдаемой, очевидно, не ограничена СКП. Поэтому особую роль в работах по совершенствованию конструкции детекторов гравитационного излучения играют проекты, основанные на регистрации гравитационных волн посредством измерения невозмущаемых наблюдаемых пробных тел антенны. Одна из возможных схем такого рода детектора основана на квантовом невозмущающем измерении скорости.

Если пробное тело представляет собой свободную массу, то невозмущаемой наблюдаемой в этом случае будет являться импульс, как интеграл движения системы. Скорость же тела, хотя и не является по-настоящему *невозмущаемой*, но ее свойства близки к свойствам импульса, а возмущение, вносимое измерителем во время измерения, может быть легко исключено из выходного сигнала посредством правильной взаимной корреляции шумов измерителя и обратного флуктуационного влияния. Скорость тела измерить гораздо легче, чем его импульс, поэтому в качестве одного из перспективных методов преодоления СКП в гравитационно-волновых экспериментах является измерение скорости.

Далее в работе рассматривается схема оптического измерителя скорости на базе интерферометра Майкельсона с резонаторами Фабри-Перо в плечах, что соответствует стандартной топологии гравитационно-волновой антенны проекта LIGO. Отличием рассматриваемой схемы от традиционного измерителя координаты является наличие дополнительных оптических элементов — поляризационного делителя пучка и двух четвертьволновых ( $\lambda/4$ ) пластинок. Введение этих дополнительных элементов приводит к тому, что каждый из световых пучков, выходящих из обыкновенного делителя пучка на входе схемы, попадает последовательно в оба Фабри-Перо резонатора схемы, проходя ее либо по, либо против часовой стрелки. У выходного светового пучка сдвиг фазы по отношению ко входному оказывается пропорционален величине:

$$\delta\varphi_{signal} = \frac{2\omega_0}{c}(\Delta x_{NE}(t + \tau) - \Delta x_{NE}(t)) \simeq \frac{2\omega_0}{c}\bar{v}_-\tau,$$

пропорциональной средней скорости  $\bar{v}_-$  относительного движения зеркал интерферометра. Здесь  $\Delta x_{NE}(t) = x_N(t) - x_E(t)$  — разность координат подвижных зеркал двух Фабри-Перо резонатора схемы ("северного" и "восточного"). Здесь  $\tau$  — время распространения света от одного зеркала до другого, а  $\omega_0$  — частота излучения лазера. Фактически, работа оптического измерителя скорости основана на известном эффекте Саньяка с нулевой площадью, охватываемой контуром, по которому распространяется свет.

В рассматриваемой части проводится подробный анализ квантовых шумов, ограничивающих чувствительность схемы. Особое внимание уделяется учету влияния неидеальности зеркал интерферометра, поглощению в них, на чувствительность измерителя скорости. Получено выражение для спектральной плотности полного квантового шума, включающего и шумы, вызванные наличием потерь в оптических элементах измерителя. Показано, что наличие оптических потерь ограничивает чувствительность измерителя на низких частотах. Также показано, что чувствительность измерителя скорости может быть выше Стандартного квантового предела в достаточно широкой полосе частот ( $\Delta\Omega \sim 10^3 \text{ с}^{-1}$ ).

Полученное выражение для спектральной плотности полного квантового шума содержит несколько свободных параметров, изменяя которые, можно получать различную чувствительность на разных частотах. В данной части диссертации решена оптимизационная задача и найдены величины параметров, при которых чувствительность детектора оказывается максимальной, примерно в 5 раз превышающей СКП. Однако, достижение такой высокой чувствительности оказывается возможным лишь в очень узкой полосе частот (несколько десятков герц) и при чрезвычайно высоких значениях оптической мощности, циркулирующей в плечах интерферометра.

Также рассмотрена возможность работы измерителя скорости в широкополосном режиме. Показано, что возможно преодоление СКП примерно в 2, 5 ÷ 3 раза в широкой полосе частот при использовании частотно-зависимого вариационного измерения. Получено выражение для оптимальной частотной зависимости фазы опорного генератора  $\phi(\Omega)$ .

Поставлена и решена задача об определении возможности повышения чувствительности детектора путем добавления в схему зеркала рециркуляции сигнальной волны, как это делается в некоторых существующих гравитационно-волновых детекторах (например, в GEO 600). Найдено выражение для спектральной плотности полного квантового шума с учетом потерь в оптических элементах для измерителя скорости с дополнительным зеркалом рециркуляции сигнальной волны. Показано, что в отличие от детектора смещений, в измерителе скорости введение зеркала рециркуляции сигнальной волны не приводит к желаемому повышению чувствительности, и более целесообразным является использование резонаторов Фабри-Перо в плечах измерителя, так как для достижения той же чувствительности, измеритель скорости с зеркалом рециркуляции сигнальной волны требует нереально высоких значений мощности оптической накачки.

В Выводах сформулированы основные результаты работы, выносимые на защиту и приводимые ниже.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан новый метод регистрации классической силы неизвестной формы и с неизвестным временем прихода на квантовый пробный объект, например, пробную массу гравитационной антенны - дискретное вариационное измерение. Этот метод использует принцип квантового вариационного измерения, однако позволяет обойти основной недостаток последнего — необходимость знания формы и времени прихода сигнала. Получены выражения для предельной чувствительности оптического детектора смещений, использующего дискретное вариационное измерение.
2. Предложена комбинированная процедура вариационно-стробоскопического измерения, позволяющая повысить чувствительность по сравнению с методом дискретного вариационного измерения за счет одновременной модуляции мощности накачки и фазы опорного генератора. Получены выражения для предельной чувствительности оптического детектора смещений, основанного на предложенном методе вариационно-стробоскопического измерения.
3. Получено выражение для предельной чувствительности лазерной гравитационной антенны, основанной на квантовом измерителе скорости, с учетом поглощения в оптических элементах антенны. Показано, что уровень квантовых шумов в рассмотренной схеме позволяет измерять смещение пробных тел гравитационной антенны с точностью, в несколько раз превышающей Стандартный Квантовый Предел при относительно умеренной мощности, циркулирующей в плечах интерферометра ( $1 \div 3$  МВт).
4. Показано, что схема квантового измерителя скорости не может быть использована в лазерных гравитационных антеннах с топологией чистого интерферометра Майкельсона без дополнительных резонаторов Фабри-Перо в плечах (как например, в проекте GEO 600), так как требует в этой топологии нереально высоких значений мощности оптической накачки.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. S.L. Danilishin, F. Ya. Khalili, S.P. Vyatchanin, *Physics Letters A*, Vol. **278**, 123 (2000);
2. S.L. Danilishin, F. Ya. Khalili, *Physics Letters A*, Vol. **300**, 547 (2002);
3. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2003", 2003, (Сборник тезисов, с. 135, Москва);

4. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2004", 2004, (Сборник тезисов, с. 228, Москва)
5. Ш. Л. Данилишин, Оптика и спектроскопия, Том **96**, №5, с. 797 (2004);
6. S.L. Danilishin, Physical Review D, **69**, 102003, (2004).

## Список литературы

- [1] В. Б. Брагинский, ЖЭТФ **53**, 1435 (1967).
- [2] Ю. И. Воронцов, Ф. Я. Халили, Вестник Московского университета, серия 3: физика и астрономия **17**, 205 (1976).