

**РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
РЕЗОНАТОРА ФАБРИ — ПЕРО В ЛАЗЕРНОМ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОМ МЕЖСПУТНИКОВОМ
ДАЛЬНОМЕРЕ ИЗ СОСТАВА КОСМИЧЕСКОЙ
ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВОЙ АНТЕННЫ «SOIGA»**

**С.С. Донченко, Р.А. Давлатов, Е.А. Лавров,
Д.А. Соколов, И.О. Скакун**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
donchenko_ss@vniiftri.ru, davlatov_r_a@mail.ru,
lavrov@vniiftri.ru, sokolov@vniiftri.ru, skakun@vniiftri.ru*

Аннотация. В статье рассмотрены оптические системы детекторов гравитационных волн с резонаторами Фабри — Перо. Описаны принципы работы резонаторов Фабри — Перо в детекторе гравитационных волн. Проведён анализ возможности построения межспутникового и бортового резонаторов Фабри — Перо для проекта гравитационно-волнового детектора на орбитах ГЛОНАСС. Оценена возможность применения резонатора Фабри — Перо для стабилизации частоты лазера методом Паунда — Древера — Хола.

Ключевые слова: гравитационно-волновая антенна, интерферометр, резонатор Фабри — Перо.

**RESULTS OF ANALYSIS OF THE POSSIBLE
APPLICATION OF THE FABRY — PEROT RESONATOR
IN A LASER INTERFEROMETRIC INTER-SATELLITE
RANGER FROM THE “SOIGA” SPACE
GRAVITATIONAL WAVE ANTENNA**

**S.S. Donchenko, R.A. Davlatov, E.A. Lavrov,
D.A. Sokolov, I.O. Skakun**

*FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia,
donchenko_ss@vniiftri.ru, davlatov_r_a@mail.ru,
lavrov@vniiftri.ru, sokolov@vniiftri.ru, skakun@vniiftri.ru*

Abstract. The article discusses the optical systems of gravitational wave detectors, which use Fabry — Perot resonators. The principles of operation of Fabry — Perot resonators in a gravitational wave detector are described. The analysis of the possibility of constructing intersatellite and onboard Fabry — Perot resonators for the project of a gravitational-wave detector in GLONASS orbits is carried out. The possibility of using a Fabry — Perot cavity for laser frequency stabilization by the Pound — Drever — Hole method is estimated.

Keywords: gravitational wave antenna, interferometer, Fabry — Perot resonator.

Поиск сигналов гравитационных волн в настоящее время ведётся с помощью особых детекторов, основанных на интерферометрическом методе измерения сжатия и растяжения пространства, вызываемого проходящей гравитационной волной.

На данный момент функционируют и регистрируют гравитационные волны 3 обсерватории: LIGO Hanford, LIGO Livingston, Virgo. Расположение обсерваторий показано на рис. 1а.

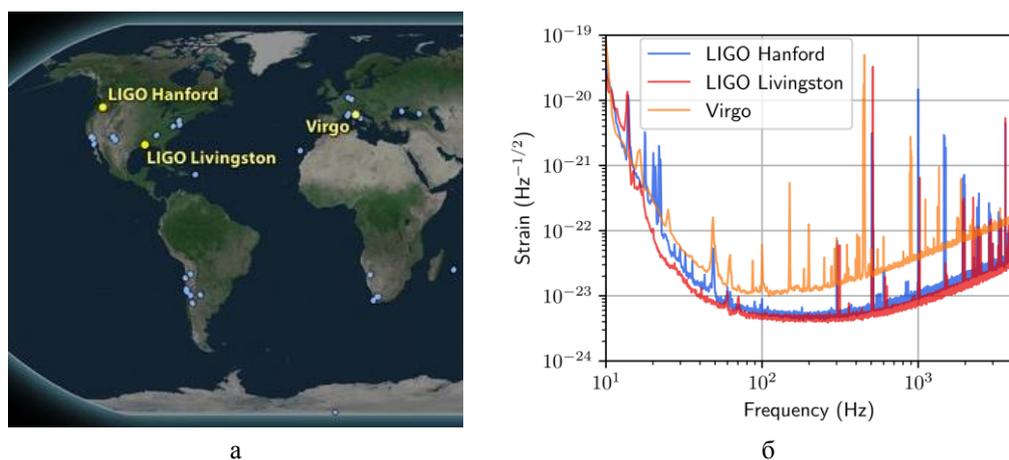


Рис. 1. Территориальное расположение (а) и чувствительность (б) детекторов

Возможность детектирования гравитационных волн во многом определяется выдающейся чувствительностью обсерваторий, так Virgo позволяет измерить относительное перемещение чувствительных элементов — зеркал — равное 10^{-23} , а LIGO Hanford и LIGO Livingston — на уровне единиц 10^{-24} (рис. 1б). Эти характеристики были достигнуты в усовершенствованных детекторах гравитационных волн второго поколения (далее по тексту — Advanced LIGO, или aLIGO).

Основной вклад в достижение требуемой чувствительности вносят следующие составные части aLIGO:

- система пре-стабилизации лазера;
- вводная оптика;
- устройство виброразвязки;
- система детектирования и контроля интерферометров;
- датчики волновых фронтов;
- система рециркуляции;
- резонаторы Фабри — Перо;
- вакуумная система и др.

Далее рассмотрим подробнее систему рециркуляции и резонатор Фабри — Перо в детекторе гравитационных волн aLIGO.

Узел рециркуляции и резонатор Фабри — Перо в детекторе aLIGO

Для достижения интересующей с научной точки зрения чувствительности в aLIGO модифицирована базовая схема интерферометра Майкельсона, упрощённый вариант показан на рис. 2. Эффективная длина интерферометра увеличивается за счёт использования резонаторов Фабри — Перо в плечах, оптическая мощность в приборе увеличивается за счёт использования резонатора с рециркуляцией мощности, а выходная мощность увеличивается с помощью резонатора с рециркуляцией сигнала.

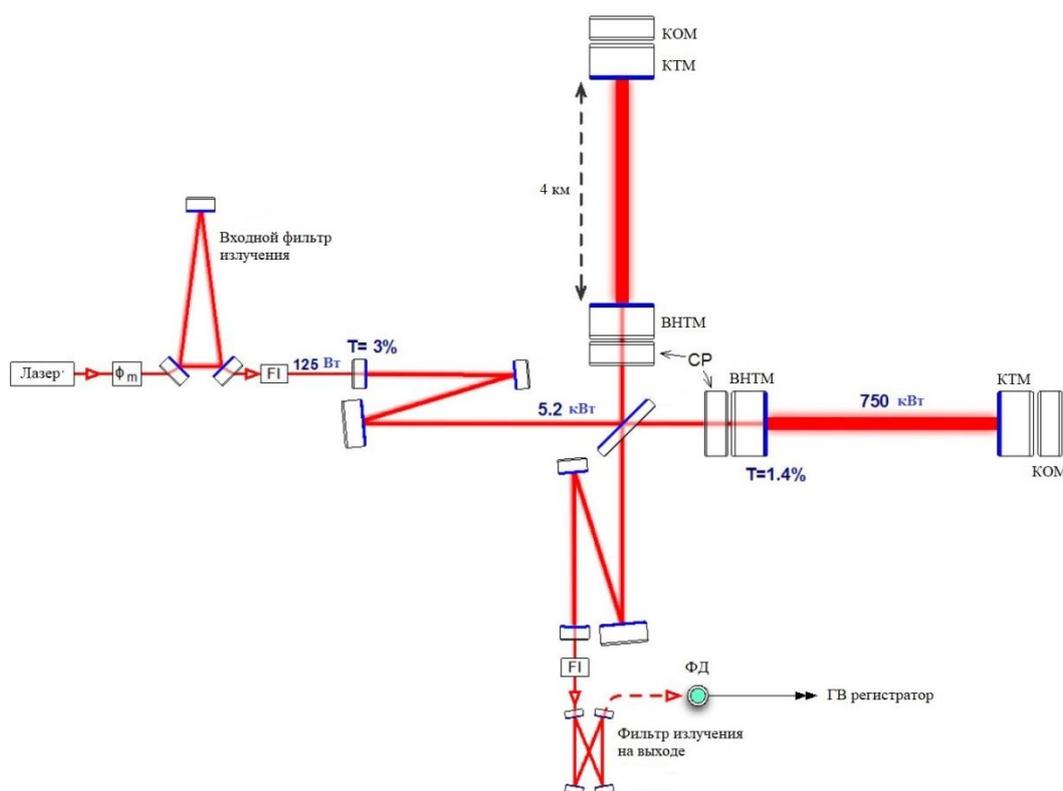


Рис. 2. Оптическая схема aLIGO с резонатором Фабри — Перо и рециркуляцией энергии

Плечи aLIGO имеют длину 4 км, и увеличение их физических размеров на несколько порядков потребует сопоставимых вложений в оборудование (создание прибора третьего поколения с плечами 40 км было предметом обсуждения в сообществе специалистов по интерферометрии). Более компактное решение — увеличить эффективную длину плеча с помощью методов оптического складывания. Линия оптической задержки, использованная Майкельсоном и Морли в их эксперименте с эфиром 1881 года, является [2]

одним из таких методов. За счёт использования множества зеркал, расположенных отдельно друг от друга, путь, пройденный светом, может быть во много раз больше физической длины плеча интерферометра. Линии задержки с большими изогнутыми зеркалами с входными отверстиями, использовались в ранних интерферометрах [3], но вышли из употребления из-за проблем с засветкой рассеянным светом. Разработка систем управления с оптической обратной связью Паундом, Древером и Холлом [4] сделала оптические резонаторы жизнеспособными для интерферометрии километрового масштаба. Преимущество резонаторов Фабри — Перо перед линиями задержки состоит в том, что более длинные эффективные резонаторы могут быть получены с помощью оптики меньшего размера.

Advanced LIGO построен как датчик, имеющий нулевой результат интерференции в состоянии покоя системы. Длина плеч была выбрана так, что оптическое излучение было в противофазе.

Следовательно, почти вся входная мощность отражается в сторону лазера. Размещение зеркала с рециркуляцией мощности между лазером и светоделителем для формирования резонансной полости между входными тестовыми массами увеличивает эффективную мощность в интерферометре. Для aLIGO резонатор с рециркуляцией мощности увеличивает эффективную мощность интерферометра в 50 раз [6].

Резонатор с рециркуляцией сигнала использует резонансное усиление боковой полосы. Как рециркуляция сигнала, так и выделение резонансной боковой полосы требуют частично отражающего зеркала на выходе.

Когда гравитационная волна взаимодействует со светом в интерферометре, она наводит частотные боковые полосы. В этом случае зеркало рециркуляции сигнала образует связанный резонатор с входными зеркалами, снижая эффективную отражательную способность входной тестовой массы для гравитационно-индуцированных боковых полос и сокращая время их хранения [7]. При рециркуляции сигнала зеркало размещается так, чтобы резонатор рециркуляции сигнала был резонансным для $v_{laser} \pm v_{signal}$. Это увеличивает сигнал на добротность резонатора Q за счёт снижения чувствительности в большей полосе пропускания [2].

Принцип работы резонатора Фабри — Перо в детекторе гравитационных волн

Чтобы понять, как резонатор Фабри — Перо увеличивает длину плеча, упростим модель до двух частично пропускающих плоских зеркал с плоскими электромагнитными волнами, резонирующими между ними, как показано на рис. 3. Свет поступает в резонатор через частично пропускающее входное зеркало, многократно переотражается в полости резонатора и выходит через пропускающее входное зеркало. В реальном резонаторе Фабри — Перо

входящий свет будет представлять собой гауссовы пучки, а не плоские волны, и зеркала будут соответственно изогнуты [9]. Для согласованности со схемой LIGO обозначим входное зеркало как внутреннюю тестовую массу, а концевое зеркало — как чувствительную массу. Для упрощения вывода предположим, что толщиной зеркал можно пренебречь, а коэффициент отражения чувствительной массы равен $r_{ETM} = 1$. Оптика LIGO имеет ненулевое пропускание.

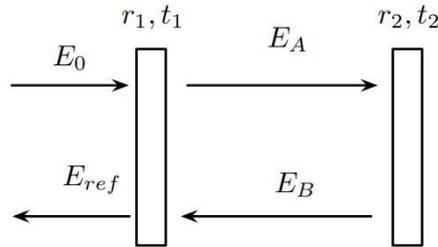


Рис 3. Упрощённая схема резонатора Фабри — Перо

Поля внутри полости можно представить в виде системы уравнений:

$$E_A = t_{\text{внтм}} E_0 - r_{\text{внтм}} E_B, \quad (1)$$

$$E_B = -e^{-2ikL} E_A, \quad (2)$$

$$E_{\text{ref}} = r_{\text{внтм}} E_0 + t_{\text{внтм}} E_B, \quad (3)$$

которые можно свести к [9]:

$$E_a = \frac{t_{\text{внтм}}}{1 - r_{\text{внтм}} e^{-2ikL}} E_0. \quad (4)$$

Пренебрегая потерями, эффективный коэффициент $r_{\text{эф}}$ отражения от полости — это соотношение между входным и выходным полями [9]:

$$r_{\text{эф}} = \frac{E_{\text{ref}}}{E_0} = r_{\text{внтм}} - \frac{t_{\text{внтм}}}{1 - r_{\text{внтм}} e^{-2ikL}} = \frac{r_{\text{внтм}} - e^{-2ikL}}{1 - r_{\text{внтм}} e^{-2ikL}}. \quad (5)$$

При резонансе:

$$e^{-2ikL_{\text{рез}}} = 1, \quad (6)$$

тогда эффективный коэффициент отражения:

$$r_{\text{эф}} = \frac{r_{\text{внтм}} - 1}{1 - r_{\text{внтм}}} = -1, \quad (7)$$

что соответствует фазовому сдвигу при отражении. Резонатор Фабри — Перо чувствителен к небольшим изменениям вблизи резонанса, которые можно аппроксимировать как [9]:

$$r_{\text{эф}}(L_{\text{рез}}) = -1 + (-2ikL) \frac{t_{\text{внтм}}^2}{(1 - r_{\text{внтм}})^2}. \quad (8)$$

Для простой линии задержки, $t_{\text{внтр}} = 1$ и $r_{\text{внтр}} = 0$, изменение фазового сдвига отражённого света составляет $-2ik\Delta L$. Резонатор Фабри — Перо усиливает это изменение на коэффициент усиления резонатора, что можно записать как:

$$G = \left(\frac{t_{\text{внтм}}}{1 - r_{\text{внтм}}} \right)^2. \quad (9)$$

Коэффициент усиления резонатора можно интерпретировать как увеличение длины резонатора плеча на коэффициент усиления резонатора. Входные тестовые массы Advanced LIGO имеют коэффициент пропускания $t_{\text{ПМ}}^2 = 1,4\%$ с соответствующим усилением резонатора ~ 280 [5].

Резонатор Фабри — Перо в проекте в DECIGO

Лазерный датчик в DECIGO перемещения построен на основе интерферометра Майкельсона, он представляет собой бортовой датчик измерения перемещения пробной массы с чувствительностью порядка 10^{-13} м/√Гц. Стабильное излучение лазера на длине волны 1,5 мкм с распределённой обратной связью поступает в интерферометр Майкельсона, состоящий из неподвижного опорного углового отражателя и отражателя на пробной массе. Для определения всех степеней свободы пробной массы, включая поступательное движение и вращение, три пары блоков лазерных датчиков обращены к трём ортогональным граням. Система управления работает как высокочувствительный акселерометр, который предполагается использовать в основном для мониторинга силы тяжести Земли.

Модуль интерферометра содержит резонатор Фабри — Перо для регистрации гравитационных волн (рис. 4). Длина плеча составляет 30 см. Интерферометр образован двумя зеркалами, прикреплёнными к пробной массе, которые действуют как свободная пробная масса. Чтобы действовать как свободная пробная масса, каждая пробная масса будет управляться без сноса с помощью космического аппарата.



Рис. 4. Концептуальный проект части миссии DECIGO pathfinder (DPF)

Применения резонатора Фабри — Перо в проекте «SOIGA»

В работе [15] описаны принципы построения оптической интерферометрической системы «SOIGA-2». Одна из ключевых проблем — большое расстояние между космическими аппаратами (КА). В предлагаемом проекте «SOIGA-2» расстояние между космическими аппаратами составляет от 36 тыс. до 144 тыс. км.

Использование схемы с пассивными отражателями затруднительно на дистанции более 20 000 км, дифракционные потери отражённого излучения можно рассчитать по формуле: $d^8/(\lambda^4 L^4)$, где L — расстояние между спутниковыми аппаратами; d — апертура приёмопередающей оптической системы; λ — длина волны излучения. Если апертура оптической передающей и приёмной систем составляет 200 мм, длина волны — 535 нм, то параметры потери для пассивных отражателей составят 11 порядков.

Для решения этой проблемы в проекте «SOIGA-2» предлагается использовать транспондерный принцип, когда на каждом аппарате размещаются приёмник и ретранслятор лазерного излучения. Излучение распространяется во встречных направлениях между спутниками. Оно принимается и излучается через телескопические системы.

Один из спутников считается ведущим, второй — ведомым, у ведомого бортовой источник лазерного излучения подстраивается по фазе относительно фазы принимаемого сигнала от ведущего по сигналу биений с фотодетектора, на который поступают сигналы ведомого и ведущего лазерных источников.

Оптические компоненты для транспондерной схемы межспутникового интерферометра на каждом из аппаратов размещаются жёстко на бортовой оптической скамье (рис. 5).

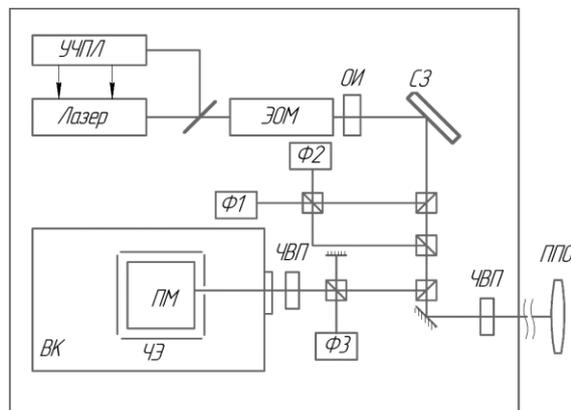


Рис. 5. Структурная схема оптической скамьи межспутникового интерферометра:

УЧПЛ — устройство частотной привязки лазера; ЭОМ — электрооптический модулятор света; ОИ — оптический изолятор; СЗ — сканирующее зеркало;

Ф — фотоприёмник; ЧВП — четвертьволновая пластинка;

ПМ — пробная масса; ППО — приёмно-передающая оптическая система;

ЧЭ — чувствительные электроды; ВК — вакуумная камера

Схема работает следующим образом. Лазер формирует оптический сигнал, который подаётся на светоделительную пластинку. Основная часть оптического сигнала подаётся на ЭОМ, который осуществляет фазовую подстройку. После ЭОМ оптическое излучение попадает на СЗ, которое управляет угловой ориентацией пучков. Далее оптическое излучение с помощью ППО (телескопа) передаётся на удалённый КА.

В качестве ППО предлагается использовать телескоп, работающий по схеме Шмидта — Кассегрена с диаметром 300 мм, изготовленным для минимизации тепловых шумов из ULE-стекла.

До телескопа установлены ответвители, которые часть мощности оптического излучения подают на фотоприёмники Ф1, Ф2. Приёмопередающая система также перенаправляет излучение, полученное с удалённого КА, на фотоприёмники Ф1 и Ф2. Таким образом, сигнал, подаваемый с этих фотодетекторов на фазометр, пропорционален изменению расстояния между космическими аппаратами.

На оптической скамье также располагается вакуумная камера с ПМ и ЧЭ, который выполняет роль системы электростатического удержания. В вакуумной камере имеется оптически прозрачное окно, через которое подаётся излучение от локального лазера на пробную массу. Отражённый сигнал от пробной массы и опорный сигнал поступают на приёмник Ф3, сигнал с которого пропорционален изменению положения пробной массы внутри КА.

Для упрощения процесса измерения вариаций расстояния между пробными массами предлагается разбить процесс измерений на 3 отдельных измерения: 2 измерения пробных масс относительно оптических скамей L_1 , L_2 и измерения расстояния межспутникового расстояния L_3 .

Рассмотрим возможность применения межспутникового интерферометра Фабри — Перо (ФП) вместо транспондерной схемы для измерения расстояния. Для этого вместо ППО на рис. 6 предлагается использовать конфокальные зеркала (рис. 6).

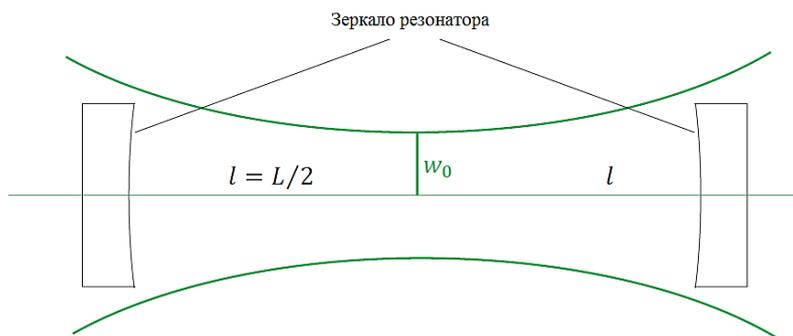


Рис. 6. Конфигурация межспутникового резонатора ФП

Входное и концевое зеркала идентичны, то есть резонатор ФП симметричен относительно точки перетяжки его луча. Зелёная горизонтальная линия представляет собой оптическую ось лазерного излучения. Кроме того, зелёная кривая показывает распространение света.

Внутри резонатора ФП размер пучка лазерного излучения, поступающего от входного зеркала, уменьшается по направлению к перетяжке пучка и увеличивается на пути от перетяжки к концевому зеркалу. На входном и концевом зеркалах часть мощности света теряется, если радиус зеркала меньше размера пучка; возникают небольшие дифракционные потери. Таким образом, эффективная отражательная способность зеркала с такими потерями r_{eff} меньше фактической отражательной способности самого зеркала r :

$$r_{eff} = r \times D^2, \quad (10)$$

где D — упомянутый в предыдущем пункте эффект дифракционных потерь. В уравнении (1) r умножается на квадрат D , потому что мы рассматриваем два эффекта: потери утечки и потери моды высшего порядка [2]. Потери на утечку накладываются, когда часть мощности лазера теряется из-за конечного радиуса зеркала, а потери моды более высокого порядка учитываются потому, что резонатор ФП настроен на резонансное состояние для основной моды лазерного излучения. Она уменьшается с увеличением дифракции. Используя параметры R , l (или L), z_R и l , мы можем переписать уравнение (1) как:

$$r_{eff} = r(1 - \exp[-\frac{2\pi z_R}{\lambda(l^2 + z_R^2)} R^2]). \quad (11)$$

Таким образом, D^2 представляется как:

$$D^2 = 1 - \exp[-\frac{2\pi z_R}{\lambda(l^2 + z_R^2)} R^2]. \quad (12)$$

Согласно уравнению (3), D^2 находится в диапазоне от 0 до 1 (невыключительно).

Чтобы определить соответствующие параметры, максимизирующие соотношение сигнал/шум двух кластеров в уравнении (11), сначала оптимизируем D^2 . Размер луча в зеркалах велик из-за расходимости, если перетяжка луча мала, и пятно луча, естественно, велико, если перетяжка луча велика. Таким образом, соответствующая перетяжка луча может максимизировать D^2 для заданных значений R и L . Перетяжка пучка w_0 связана с длиной Рэлея z_R :

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}. \quad (13)$$

Уравнение (13) показывает, что z_R линейно возрастает с квадратом диаметра перетяжки w_0 , то есть D^2 можно максимизировать при соответствующем z_R . Учитывая конфокальную геометрию резонатора в DECIGO, мы можем определить z_R , максимизирующий D^2 , следующим образом:

$$z_R = l = \frac{L}{2}. \quad (14)$$

Таким образом, мы получаем максимальное значение D_{opt}^2 как минимальное влияние дифракционных потерь:

$$D_{opt}^2 = 1 - \exp\left[-\frac{2\pi}{L\lambda} R^2\right]. \quad (15)$$

Считая, что гауссовы лазерные лучи в резонаторе дифракционно ограниченные, то их расходимость:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi\omega_0}. \quad (16)$$

Диаметр d зеркала резонатора Фабри — Перо, который обеспечивает полное перекрытие фронта оптического излучения в таком случае будет определяться как:

$$d = L \cdot \tan\left(\frac{\lambda}{\pi\omega_0}\right) + \omega_0, \quad (17)$$

где L — расстояние между КА. На рис. 7 показана зависимость диаметра зеркала резонатора от диаметра перетяжки.

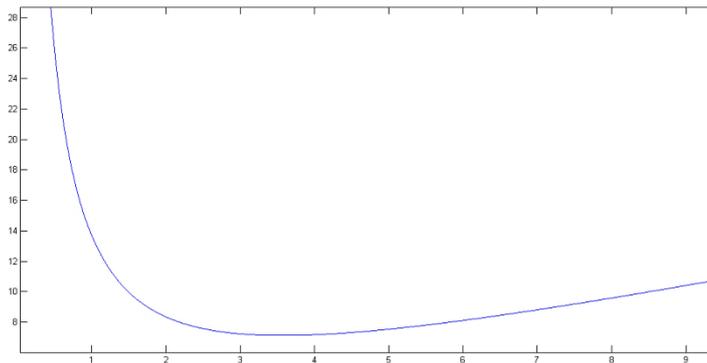


Рис. 7. Зависимость диаметра зеркала резонатора от диаметра перетяжки

Как следует из моделирования геометрических параметров Фабри — Перо, минимальный диаметр зеркал для межспутникового расстояния 40 000 км и длины волны 1 мкм, при котором будет гарантироваться устойчивый режим работы резонатора, составляет примерно 7 м. Такие габариты одного лишь зеркала, учитывая, что их должно быть минимум 2, делают КА чрезмерно громоздким и усложняют вывод на орбиту. Таким образом, показано, что для орбит ГЛОНАСС и рассмотренных в работах [15] конфигураций КА применение резонаторов Фабри — Перо для межспутниковых измерений не представляется возможным ввиду больших габаритов таких устройств.

Далее рассмотрим возможность применения резонатора Фабри — Перо для измерения смещения пробной массы относительно оптической скамьи. Схема работает аналогично представленной на рис. 8. Перед пробными зеркалами устанавливаются дополнительные пропускающие зеркала с коэффициентом пропускания порядка 1,4 %. Пробная масса является непрозрачным зеркалом резонатора. Определим основные параметры резонатора Фабри — Перо:

- добротность резонатора Фабри — Перо F определяется из соотношения:

$$F = \frac{\pi\sqrt{r_1 r_2}}{1 - r_1 r_2}, \quad (18)$$

где r_1, r_2 — коэффициенты отражения зеркал;

- время взаимодействия света τ_b с резонатором определяется как:

$$\tau_b = \frac{\sqrt{r_1 r_2} L}{1 - r_1 r_2 c}, \quad (19)$$

где L — длина резонатора; c — скорость света;

- резонансная частота f_p определяется следующим образом:

$$f_p = \frac{1}{4\pi\tau_b}; \quad (20)$$

- спектральное разрешение резонатора $f_{\text{рез}}$ определяется:

$$f_{\text{рез}} = \frac{c}{2L}; \quad (21)$$

- усиление резонатора G_p определяется:

$$G_p = \left(\frac{t_1}{1 - r_1 r_2} \right)^2. \quad (22)$$

Результаты расчёта основных параметров бортового резонатора Фабри — Перо в таблице.

Таблица

Параметры резонатора	Значение
Добротность резонатора	1011
Время взаимодействия света	1,074 мкс
Резонансная частота	74 кГц
Спектральное разрешение резонатора	149896229 Гц
Усиление резонатора	1,2

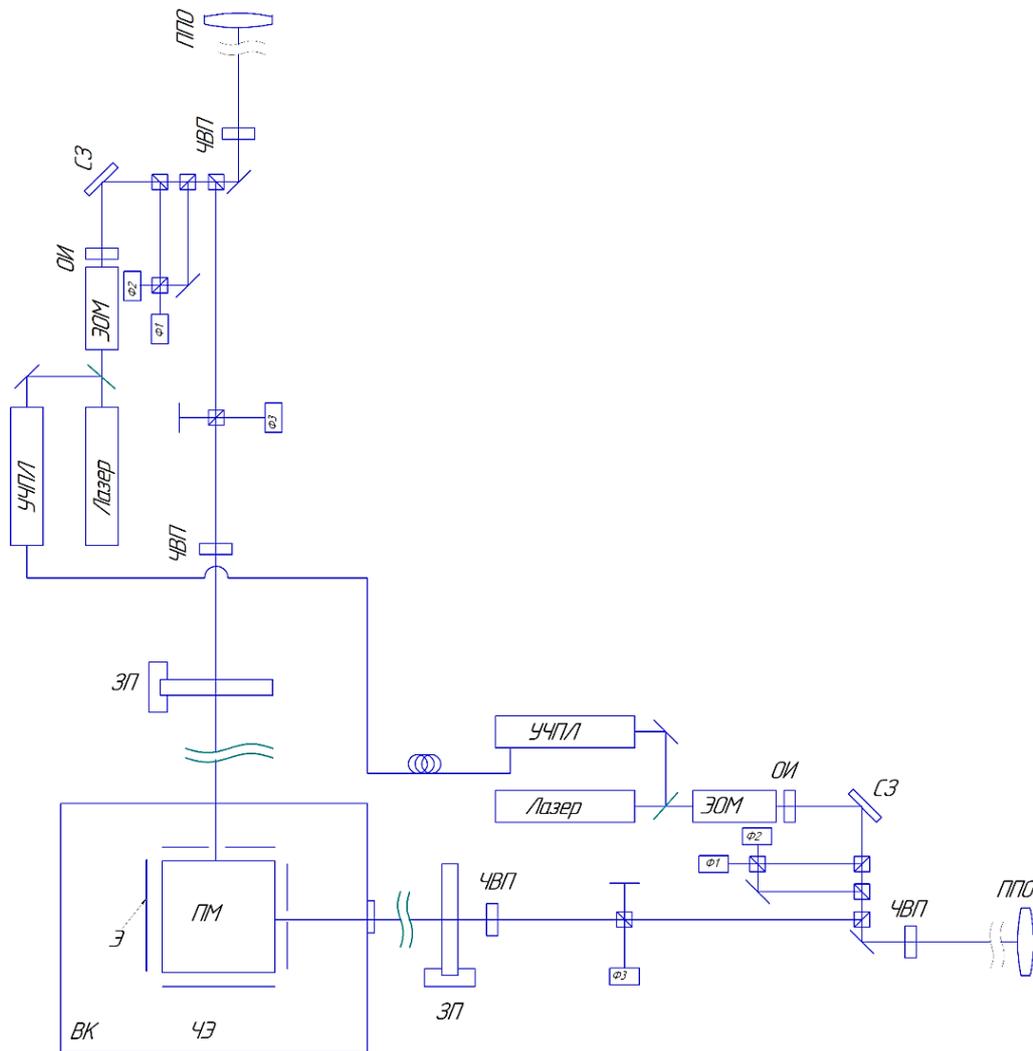


Рис. 8. Структурная схема оптической скамьи межспутникового интерферометра совместно с резонаторами Фабри — Перо: ЗП — зеркало пропускающее; Э — электрод системы электростатической системы удержания

Применения резонатора Фабри — Перо для стабилизации частоты лазера

Для стабилизации частоты лазера предлагается использовать схему, показанную на рис. 9.

Излучение лазера проходит через оптический изолятор в электрооптический модулятор (ЕОМ), который создаёт боковые полосы модуляции на частоте ω_m . Боковые полосы $\Omega \pm \omega_m$ переотражаются в резонаторе Фабри — Перо. Биение между боковыми полосами и отражённой частью, несущей ω_m ,

измеряется на фотодетекторе и демодулируется путём смешивания с частотой модуляции ω_m . Этот сигнал проходит через фильтр нижних частот и далее используется в качестве сигнала ошибки для сервопривода, который подстраивает частоту лазера так, чтобы она соответствовала резонансной частоте резонатора Фабри — Перо [9].

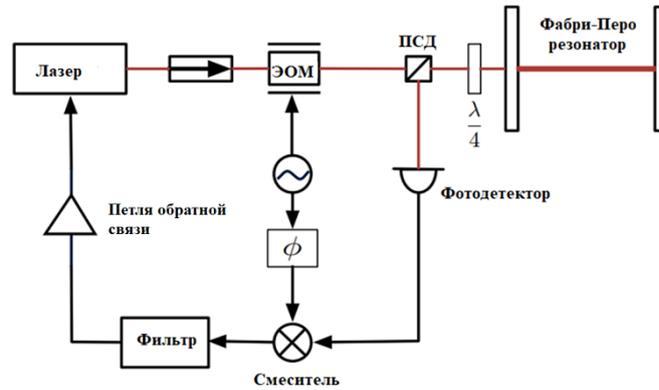


Рис. 9. Схема стабилизации частоты лазера методом Паунда — Древера — Холла

Метод частотной стабилизации Паунда — Древера — Холла был разработан в 1983 году как оптический аналог стабилизатора Паунда, используемого для стабилизации микроволнового резонатора. Первоначальной целью синхронизации Паунда — Древера — Холла была стабилизация частоты перестраиваемого лазера с использованием резонатора Фабри — Перо в качестве стандарта частоты. Данный метод также используется для привязки резонаторов aLIGO к основному лазеру.

Принцип стабилизации частоты методом Паунда — Древера — Холла показан на рис. 9. Оптическое излучение с частотой ω проходит через электрооптический модулятор, который осуществляет фазовую модуляцию на частоте боковой полосы Ω_m . Это создаёт боковые полосы модуляции света с гармониками $\pm\Omega_m$, так что электрическое поле описывается как суперпозиция несущей и боковой полосы с неявным суммированием по гармоникам n :

$$E = E_0 i^n J_n(\beta) e^{i(\omega \pm n\Omega_m)t}. \quad (23)$$

Эти боковые полосы обычно не являются резонансными в оптическом резонаторе и отражаются почти полностью, в то время как основная резонирует в резонаторе, и частичное обратное отражение, определяемое эффективным коэффициентом отражения резонатора $F(\omega)$, измеряется на фотодетекторе. Суперпозиция электрических полей из-за отражения несущей и боковой полосы определяется выражением [10]:

$$E_{\text{оп}} = E_0 \left[F(\omega) J_0(\beta) e^{i\omega t} + F(\omega + \Omega_m) J_1(\beta) e^{i(\omega + \Omega_m)t} - F(\omega - \Omega_m) J_1(\beta) e^{i(\omega - \Omega_m)t} \right]. \quad (24)$$

Отражённое поле измеряется на фотоприёмнике как мощность $P_{\text{оп}} = |E_{\text{оп}}|^2$:

$$P_{\text{оп}} = P_{\text{нес}} |F(\omega)|^2 + P_{\text{бок}} \{ |F(\omega + \Omega_m)|^2 + |F(\omega - \Omega_m)|^2 \} + \\ + 2\sqrt{P_{\text{нес}} P_{\text{бок}}} \{ \Re[F(\omega)F^*(\omega + \Omega_m) - F^*(\omega)F(\omega - \Omega_m)] \cos \Omega_m t + \\ + \Im[F(\omega)F^*(\omega + \Omega_m) - F^*(\omega)F(\omega - \Omega_m)] \sin \Omega_m t \} + 2\Omega_m, \quad (25)$$

где $P_{\text{нес}}$ — мощность в несущей, не учитывающая интерференционные эффекты; $P_{\text{бок}}$ — мощность в каждой боковой полосе первого порядка.

Члены Ω_m возникают из-за интерференции между несущей и боковыми полосами, а члены $2\Omega_m$ возникают из-за интерференции боковых полос друг с другом.

Величина биений между несущей и боковой полосой детектируется путём смешивания сигнала с синусоидальной волной на частоте модуляции $\sin \Omega_m t$. Результирующий сигнал ошибки передаётся сервоприводу для регулировки частоты лазера в соответствии с резонансной частотой.

Выводы

В статье рассмотрены оптические системы детекторов гравитационных волн aLIGO, VIRGO, DECIGO, которые используют в своём составе резонаторы Фабри — Перо. Применение резонаторов позволяет увеличить эффективную длину плеч в интерферометре Майкельсона, с помощью которого и производится регистрация гравитационных волн. Увеличение длины плеч приводит, в свою очередь, к увеличению чувствительности таких детекторов.

Описаны принципы работы резонаторы Фабри — Перо в детекторах гравитационных волн. В космических детекторах гравитационных волн также возможно использование интерферометров Фабри — Перо. Использование межспутниковых резонаторов Фабри — Перо вместо транспондерной гетеродинной интерферометрической системы позволяет добиться лучшего соотношения сигнал/шум и чувствительности. Однако расчёты показали, что для орбит ГЛОНАСС и межспутниковых расстояний порядка 40 тыс. км диаметр зеркал для конфокального резонатора приближается к 10 м, что на данный момент затрудняет построение таких больших КА и вывод их на орбиту. Поэтому целесообразно использовать подобный подход для межспутниковых расстояний не более 1 тыс. км.

Предложена схема построения бортового интерферометра с бортовым резонатором Фабри — Перо для увеличения точности измерения положения чувствительных пробных масс относительно КА, что позволит улучшить чувствительность бортового интерферометра не хуже, чем на 2 порядка.

Также рассмотрена возможность применения резонатора Фабри — Перо для стабилизации частоты лазера методом Паунда — Древера — Хола, что, в свою очередь, позволит уменьшить нестабильность лазерного излучения до $10^{-13} \dots 10^{-14}$ степени на интервале наблюдений.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11022\20.

Список литературы

1. Advanced LIGO Systems Group. Advanced LIGO system description // Technical Report T010075-v3. — LIGO Laboratory. — 2001.
2. Saulson P.R. Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors // World Scientific Publishing. — 1994.
3. Weiss R. Electromagnetically coupled broadband gravitational wave antenna // Quarterly Progress Report. MIT Research Lab of Electronics. — 1972.
4. Drever R. et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator // Applied Physics B: Lasers and Optics. — 1983. — P. 97–105.
5. Aasi J. et al. Advanced LIGO // Classical Quantum Grav. — 2015. — 32.
6. Arain M., Mueller G. Design of the Advanced LIGO recycling cavities // Opt. Express. — 2008. — 16.
7. Mizuno J. et al. Resonant sideband extraction: a new configuration for interferometric gravitational wave detectors // Phys. Lett. A. — 1993. — 175. — P. 273–276.
8. Watts A. et al. Detecting gravitational wave emission from the known accreting neutron stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2008. — 389. — P. 839–868.
9. Sanders J.R. Advanced Gravitational Wave Detectors and Detection: Arm Length Stabilization and Directed Searches for Isolated Neutron Stars: diss. of Doctor of Philosophy (Physics). — The University of Michigan, 2016.
10. Black E.D. An introduction to Pound — Drever — Hall frequency stabilization // Am J Phys. — 2000. — 69.
11. Sato S. et al. DECIGO: The Japanese space gravitational wave antenna // Journal of Physics: Conference Series. — 2009. — P. 154.
12. Ando M. et al. DECIGO pathfinder // Journal of Physics: Conference series. — 2008. — 120.
13. Sato S., Torii Y., Wakabayashi Y., Ejiri Y., Suzuki R., Ueda A., Kawamura S., Araya A., Ando M., Obuchi Y. and Okada N. Test-mass module for DECIGO Pathfinder // Journal of Physics: Conference Series. — 2010. — 228.
14. Wakabayashi Y., Obuchi Y., Okada N., Torii Y., Ejiri Y., Suzuki R., Ueda A., Kawamura S., Araya A., Ando M., Sato S. and Sugamoto A. Structural design and analysis of test mass module for DECIGO Pathfinder // Journal of Physics: Conference Series. — 2010. — 228.
15. Донченко С.С., Фатеев В.Ф., Давлатов Р.А., Харламов П.Г., Карауш Е.А., Гостев Ю.В., Соколов Д.А., Лавров Е.А. Особенности высокоточной космической лазерной гравитационно-волновой антенны на основе спутников, движущихся по орбитам ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. — 2020. — № 3 (23). — С. 53–96.

Статья поступила в редакцию: 30.03.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 06.04.2022 г.

Статья принята в работу: 13.04.2022 г.