

07;12

Пентагональный двухконтурный кольцевой интерферометр

© А.Р. Агачев, А.Б. Балакин, Г.Н. Буйнов, С.Л. Бучинская, Р.А. Даишев, Г.В. Кисунько, В.А. Комиссарук, С.В. Маврин, З.Г. Мурзаханов, Р.А. Рафииков, А.Ф. Скочиллов, В.А. Чередилин, Ю.П. Чугунов

Казанский государственный университет,
420008 Казань, Россия

(Поступило в Редакцию 5 мая 1997 г.)

Представлены результаты работы по сборке и юстировке оригинального пентагонального двухконтурного интерферометра, являющегося пассивным вариантом компактного лазерного гравитационно-волнового детектора. Показано, что разработанная система корреляционной автокомпенсации помех позволяет снизить фазовый шум в результирующем сигнальном канале детектора на два порядка.

Введение

С сентября 1995 г. в Казанской объединенной экспериментальной лаборатории гравитационно-оптических исследований (Научный центр гравитационно-волновых исследований "Дулкын", научно-производственное объединение прикладной оптики) проводятся работы, основной целью которых является создание комплекса прецизионной аппаратуры для измерения крайне малых сигналов, таких как сигнал воздействия гравитационно-волнового поля на частотно-фазовые характеристики оптического излучения [1,2]. Сущность идеи состоит в том, что в приборе созданы два оптических канала, только в одном из которых накапливается информация о полезном сигнале, тогда как помехи в обоих каналах коррелированы.

В настоящей работе представлены результаты работы по сборке и юстировке пентагонального двухконтурного кольцевого интерферометра, являющегося пассивным вариантом компактного лазерного гравитационно-волнового детектора [1], а также опробование разработанной системы корреляционной автокомпенсации помех.

Эксперименты проводились в специализированной кабине, размещенной в заглубленной лаборатории на глубине 12 м от нулевой отметки, что вызвано соображениями минимизации влияния вибрационного фона и упрощения задачи температурной стабилизации. Экспериментальная кабина размещается в заглубленной лаборатории дифракционных решеток (ЗЛДР), которая представляет собой специализированное сооружение. Стены и пол лаборатории размещены в цельнометаллической емкости, которая покоится на песчаной подушке и со стороны стен гидроизолирована. Лаборатория имеет техническое подполье глубиной 2 м от пола, которое служит для установки фундаментов оборудования, а также некоторого вспомогательного оборудования для электроснабжения основного оборудования и электрокоммуникаций. Стены ЗЛДР выложены мраморной плиткой с целью повышения пылезащитности. Экспериментальная кабина состоит из двух вмещающих друг друга помещений. Во внутренней кабине все высоко-

чувствительное оборудование, в том числе и разрабатываемый пентагональный интерферометр, установлено на специальном фундаменте, который в свою очередь виброизолирован от основания помещения. Фундамент представляет собой железобетонный блок высом 100 т и виброизолируется с помощью спиральных вагонных пружин. Дополнительно оборудование виброизолируется с помощью различных специальных виброизоляторов. Для создания необходимых температурных условий предусмотрена трехступенчатая система термостабилизации. Первая ступень обеспечивается кондиционером, который обогревает воздушный поток, поступающий в качестве приточной вентиляции в ЗЛДР, и поддерживает стабильность температуры в пределах 0.5°C (0.25°C от заданного номинального значения). Вторая и третья ступени обеспечиваются специально разработанной автономной системой стабилизации температуры. Вторая ступень обеспечивает температурную стабилизацию во внешнем помещении кабины в пределах десятых долей градуса от номинального значения, третья — соответственно во внутреннем помещении кабины в пределах сотых долей градуса.

Оптическая схема пентагонального кольцевого интерферометра

Оптическая схема пассивного варианта пентагонального кольцевого интерферометра представлена на рис. 1: 1 — оптический квантовый генератор (ОКГ); 2, 12 — светоделительные кубики; 3, 11, 13 — призмы полного внутреннего отражения (ПВО); 4, 8, 10 — зеркала интерферометра; 5, 9 — голограммные дифракционные решетки (несущая пространственная частота решеток 1767.8 lines/mm); 6, 7 — поляризационные призмы в сигнальной ветви интерферометра; 14 — поляризационная призма, пространственно разделяющая интерференционные картины; PD_{11} , PD_{12} , PD_{21} и PD_{22} — фотодетекторы. Оптические элементы 4, 5, 8, 9 и 10 расположены в вершинах правильного пятиугольника.

В качестве источника света был использован стабилизированный по частоте ОКГ типа ЛГН-302 с длиной волны $0.6328 \mu\text{m}$, у которого плоскость поляризации

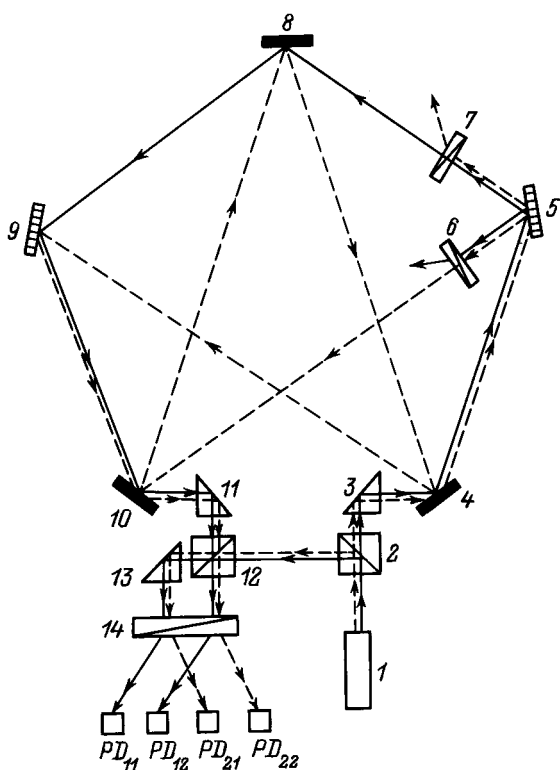


Рис. 1. Оптическая схема пентагонального интерферометра.

света составляет угол 45° с плоскостью рисунка, что эквивалентно наличию двух пучков со взаимно ортогональными азимутами поляризации (TE и TM), равной интенсивности. На рис. 1 сплошная линия соответствует пучку TE -поляризации, штриховая — TM -поляризации.

Интерферометр работает следующим образом. Светоделительный кубик 2 делит исходный лазерный луч на два: отраженный, играющий роль опорного, и прошедший, который посредством призмы ПВО 3 вводится в пентагональный интерферометр. Прошедший луч в свою очередь делится на два вследствие действия голограммных дифракционных решеток 5, 9. Первый луч проходит по внешнему контуру фигуры, образованной ходом лучей; он отражается от обеих решеток в нулевом порядке дифракции и благодаря поляризационной призме 7, содержит только TE -составляющую лазерного излучения. Второй луч дифрагирует в первый порядок на решетке 5, причем после прохождения поляризационной призмы 6 содержит только TM -составляющую лазерного излучения; затем отражается последовательно от зеркал 10, 8 и 4, падает на решетку 9, на которой также дифрагирует в первый порядок, после чего сходит воедино с первым лучом. Призма ПВО 11 выводит оба луча с TE - и TM -поляризациями из пентагонального интерферометра и направляет их на светоделительный кубик 12, где они интерферируют с опорными лучами TE - и TM -поляризации, отраженных от светоделительного кубика 2. Две из полученных таким образом

четырёх интерференционных картин (по две на каждой из выходных граней светоделительного кубика 12) поступают непосредственно на поляризационную призму 14, а две другие направляются на нее призмой ПВО 13. Поляризационная призма 14 осуществляет полное пространственное разделение интерференционных картин, которые регистрируются соответственно фотодетекторами $PD_{11}, PD_{12}, PD_{21}, PD_{22}$.

Как видно из оптической схемы рис. 1, излучение ОКГ 1 (за исключением неизбежных потерь на поляризационных призмах 6 и 7 излучений TE - и TM -поляризации, попадающих не в "свой" контур) полностью используется для получения информации об изменениях фазы оптического излучения во внешнем и внутреннем контурах пентагонального интерферометра.

Фотодетекторы PD_{11} и PD_{12} служат для регистрации связанных между собой интерференционных картин, обусловленных интерференцией излучений TE -поляризации, а фотодетекторы PD_{21} и PD_{22} для регистрации связанных интерференционных картин от волн TM -поляризации. Пентагональный двухконтурный интерферометр настраивается таким образом, чтобы во всех четырех картинах наблюдались полосы бесконечной ширины. Реально вследствие расходимости лазерного излучения и существенной разницы оптических длин в опорной и сигнальной ветвях интерферометра наблюдаются полосы в виде колец, характерные для интерференции двух сферических фронтов с близкими радиусами кривизны.

Меняя оптическую длину пути света, проходящего через элементы 6, 7 (посредством малого, порядка нескольких угловых минут, наклона их относительно оптической оси), можно независимо устанавливать начальные фазы в интерференционных картинах.

Обработка интерференционных картин

В соответствии с оптической схемой рис. 1 на две взаимно ортогональные грани светоделительного кубика 12 падают четыре волны: на одну грань падают две сигнальные волны TE - и TM -поляризации (от внешнего и внутреннего контуров соответственно) с комплексными амплитудами $A_1 \exp(i\Phi_{1A})$ и $B_1 \exp(i\Phi_{1B})$, а на другую — две опорные волны TE - и TM -поляризации с амплитудами $A_0 \exp(i\Phi_{0A})$ и $B_0 \exp(i\Phi_{0B})$. В результате интерференции на светоделительном слое внутри кубика пучков с одинаковыми поляризациями получаются четыре интерференционные картины (по две на каждой из выходных граней кубика), распределение интенсивностей в которых описывается следующими выражениями

$$\begin{aligned}
 I_{11,12} &= |R_{TE}|^2 A_{0,1}^2 + |T_{TE}|^2 A_{1,0}^2 \\
 &\quad + 2|R_{TE}||T_{TE}|A_0A_1 \cos(\Delta\Phi_{TE} \pm \Gamma_{TE}), \\
 I_{21,22} &= |R_{TM}|^2 B_{0,1}^2 + |T_{TM}|^2 B_{1,0}^2 \\
 &\quad + 2|R_{TM}||T_{TM}|B_0B_1 \cos(\Delta\Phi_{TM} \pm \Gamma_{TM}). \quad (1)
 \end{aligned}$$

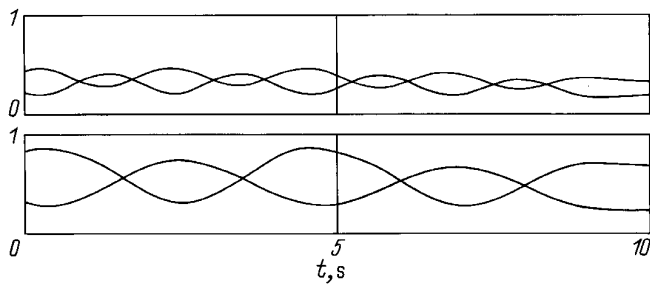


Рис. 2. Сигналы с фотодетекторов (в а.е.)

Здесь $R_{TE} = |R_{TE}| \exp(i\Gamma_{AR})$ и $R_{TM} = |R_{TM}| \exp(i\Gamma_{BR})$ — коэффициенты отражения, $T_{TE} = |T_{TE}| \exp(i\Gamma_{AT})$ и $T_{TM} = |T_{TM}| \exp(i\Gamma_{BT})$ — коэффициенты пропускания светоделительного слоя внутри кубика соответственно; $\Gamma_{TE} = \Gamma_{AT} - \Gamma_{AR}$, $\Gamma_{TM} = \Gamma_{BT} - \Gamma_{BR}$, $\Delta\Phi_{TE} = \Phi_{1A} - \Phi_{0A}$, $\Delta\Phi_{TM} = \Phi_{1B} - \Phi_{0B}$.

Если в светоделительном слое нет поглощения и рассеяния света (однородный диэлектрический слой или многослойное интерференционное покрытие), то $\Gamma_{TE, TM} = \pi/2$. В этом случае максимумы $I_{11,21}$ и минимумы $I_{12,22}$ достигаются при одном и том же значении разности фаз $\Delta\Phi_{TE, TM}$. При наличии поглощения в слое $\Gamma_{TE, TM} = \pi/2 + \Gamma_{A, B}$, так что максимумы $I_{11,21}$ и минимумы $I_{12,22}$ сдвинуты по фазе на $2\Gamma_{A, B}$.

После пространственного разделения всех четырех интерференционных картин (рис. 1) изменения интенсивностей I_{k1} и I_{k2} ($k = 1, 2$), обусловленных вариациями разности фаз $\Delta\Phi_{TE, TM}(t) = \Delta\Phi_{TE, TM}^0 + \delta_{1,2}(t)$, регистрируются фотодетекторами PD_{k1} и PD_{k2} . Напряжения $U_{k1}(t) = \beta_{k1}I_{k1}$ и $U_{k2}(t) = \beta_{k2}I_{k2}$ с выходов фотодетекторов ($\beta_{k1,2}$ — коэффициенты преобразования в фотодиодах) поступают на схему вычитания, где формируются разностные напряжения $U_1(t) = U_{11}(t) - U_{12}(t)$ и $U_2(t) = U_{21}(t) - U_{22}(t)$.

Средством изменения начальной разности фаз $\Delta\Phi_{TE, TM}^0$ от нуля до 2π определяются амплитуды колебаний $U_{k1}(t)$ и $U_{k2}(t)$

$$\Delta U_{11,12} = U_{11,12}^{\max} - U_{11,12}^{\min} = 4|R_{TE}| |T_{TE}| A_0 A_1 \beta_{11,12},$$

$$\Delta U_{21,22} = U_{21,22}^{\max} - U_{21,22}^{\min} = 4|R_{TM}| |T_{TM}| B_0 B_1 \beta_{21,22}, \quad (2)$$

которые используются в дальнейшем для определения нормировочных коэффициентов $\Delta U_k = (\Delta U_{k1} + U_{k2})/2$.

При малых вариациях фазы $|\delta_{1,2}(t)| \ll 1$ получим следующие выражения для разностных напряжений:

$$U_1(t) = U_1^0 + 2|R_{TE}| |T_{TE}| A_0 A_1 [\beta_{11} \cos(\Delta\Phi_{TE}^0 - \Gamma_A) + \beta_{12} \cos(\Delta\Phi_{TE}^0 + \Gamma_A)] \delta_1(t),$$

$$U_2(t) = U_2^0 + 2|R_{TM}| |T_{TM}| B_0 B_1 [\beta_{21} \cos(\Delta\Phi_{TM}^0 - \Gamma_B) + \beta_{22} \cos(\Delta\Phi_{TM}^0 + \Gamma_B)] \delta_2(t), \quad (3)$$

где

$$U_1^0 = \beta_{11}I_{11}^0 - \beta_{12}I_{12}^0 + 2|R_{TE}| |T_{TE}| A_0 A_1 \times [\beta_{11} \sin(\Delta\Phi_{TE}^0 - \Gamma_A) + \beta_{12} \sin(\Delta\Phi_{TE}^0 + \Gamma_A)],$$

$$U_2^0 = \beta_{21}I_{21}^0 - \beta_{22}I_{22}^0 + 2|R_{TM}| |T_{TM}| B_0 B_1 \times [\beta_{21} \sin(\Delta\Phi_{TM}^0 - \Gamma_B) + \beta_{22} \sin(\Delta\Phi_{TM}^0 + \Gamma_B)],$$

$$I_{11,12}^0 = |R_{TE}|^2 A_{0,1}^2 + |T_{TE}|^2 A_{1,0}^2,$$

$$I_{21,22}^0 = |R_{TM}|^2 B_{0,1}^2 + |T_{TM}|^2 B_{1,0}^2.$$

Устанавливая начальные разности фаз $\Delta\Phi_{TE, TM}^0$ из условия равенства нулю величин $U_{1,2}^0$, получим следующие нормированные значения разностных напряжений:

$$u_1(t) = \frac{U_1(t)}{\Delta U_1} = u_{10} \delta_1(t),$$

$$u_2(t) = \frac{U_2(t)}{\Delta U_2} = u_{20} \delta_2(t), \quad (4)$$

где безразмерные величины $u_{10,20} \sim 1$ определяются следующим образом:

$$u_{10,20} = \frac{\beta_{11,21} \cos(\Delta\Phi_{TE, TM}^0 - \Gamma_{A, B}) + \beta_{12,22} \cos(\Delta\Phi_{TE, TM}^0 + \Gamma_{A, B})}{\beta_{11,21} + \beta_{12,22}}.$$

Значения $u_{1,2}(t)$ поступают в систему корреляционной автокомпенсации помех (СКАП), выполненную в аналого-цифровом варианте с использованием ЭВМ. На выходе СКАП формируется результирующий сигнал $U_{\Sigma}(t)$

$$U_{\Sigma}(t) = u_1(t) - u_2(t) \frac{\overline{u_1(t)u_2(t)}}{u_2^2(t)}, \quad (5)$$

где черта означает усреднение по времени. При полной корреляции величин $u_1(t)$ и $u_2(t)$, т.е. при $u_2(t) = \text{const} \cdot u_1(t)$, результирующий сигнал $U_{\Sigma}(t) = 0$.

Было проведено математическое моделирование СКАП, которое показало возможность выделения из скоррелированных шумов слабого полезного сигнала, содержащегося в $u_1(t)$, при соотношении сигнал/шум порядка 10^{-6} .

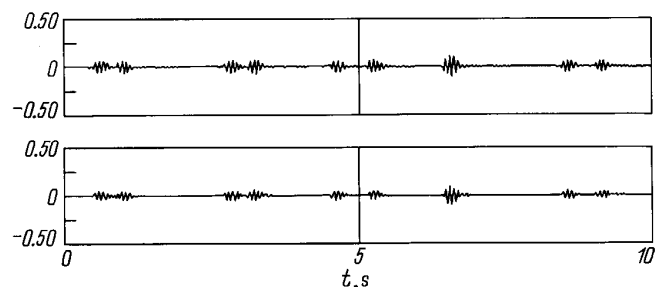


Рис. 3. Изменения величин $u_1(t)$ и $u_2(t)$ при механическом воздействии на интерферометр.

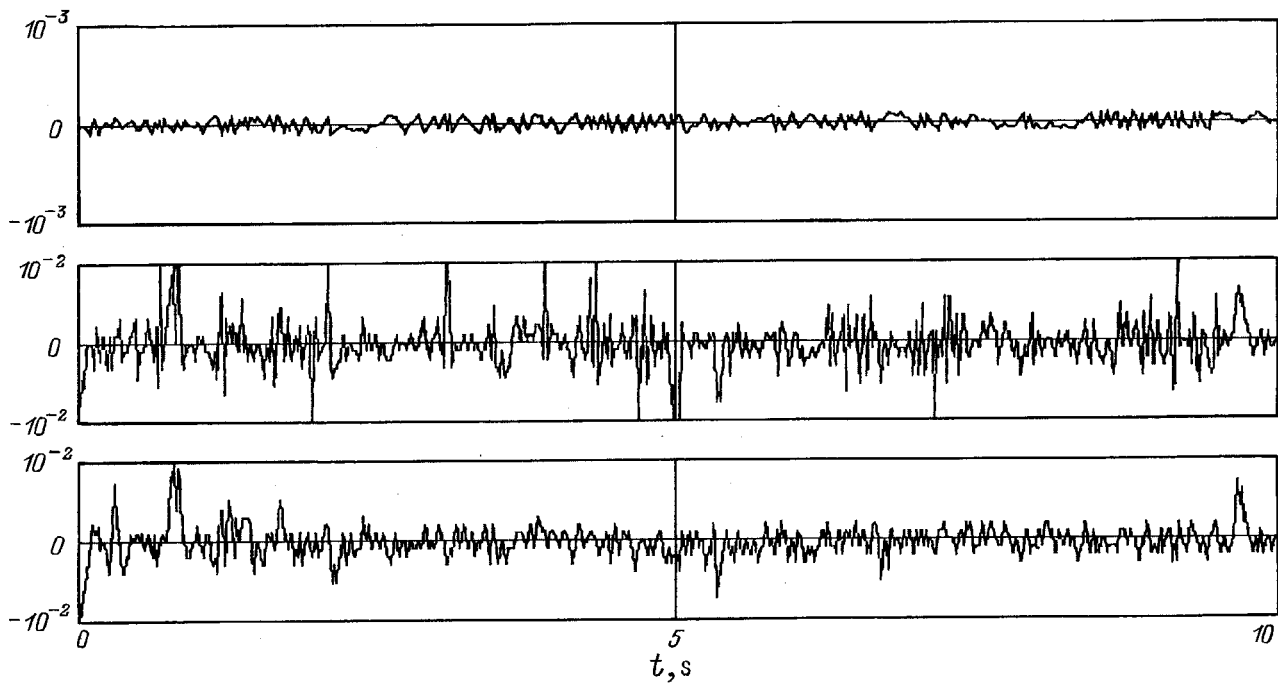


Рис. 4. Экспериментальные результаты работы СКАП.

Экспериментальные результаты

Пентагональный интерферометр по схеме рис. 1 был собран и отъюстирован на полированной круглой стеклянной плите толщиной 10 см и диаметром 65 см, причем сторона пятиугольника равнялась 30 см. Для устранения флуктуаций фазы при распространении лазерных пучков по внешнему и внутреннему контурам пентагонального интерферометра, вызванных влиянием воздушных потоков и локальным изменением температур в рабочей зоне, оптическая система интерферометра была закрыта защитным колпаком, который представляет собой сварную конструкцию цилиндрической формы из сплава Д-16. В плоскости фотоприемников были получены 4 отдельные интерференционные картины с желаемой настройкой либо на бесконечно широкие полосы, либо на полосы конечной ширины.

Система регистрации содержит два идентичных канала (опорный и измерительный). Каждый канал состоит из выносного блока, который включает 2 фотодиода и 2 расположенных рядом преобразователя фототока в напряжение, находящихся непосредственно на интерферометре, блока дифференциального усилителя с источником питания, расположенного рядом с ЭВМ. Выносной блок и блок дифференциального усилителя связаны кабелем, по которому подается напряжение питания в выносной блок и возвращаются информационные сигналы в дифференциальный усилитель.

Фототок, наведенный в фотодиоде, подается на вход преобразователя ток–напряжение. Преобразователь имеет высокое входное сопротивление, необходимое для

работы с фотодиодом, и низкое выходное сопротивление, позволяющее снизить влияние длинного кабеля на передаваемый в дифференциальный усилитель сигнал. При условии, что пара преобразователей одного канала настроена так, что постоянные составляющие полезного сигнала на их выходах равны, дифференциальный усилитель будет подавлять и постоянную составляющую сигнала, и синфазные помехи, наведенные в кабеле. Разностный же сигнал от двух плеч интерферометра усиливается так, чтобы размах выходного напряжения дифференциального усилителя соответствовал диапазону входных напряжений аналого-цифрового преобразователя при максимальной помехе, действующей на интерферометр. В качестве приемников оптического излучения были выбраны фотодиоды PD-256, причем 4 фотоприемника отобраны из партии в 30 штук по минимуму собственных шумов и минимальным разбросом токовой монохроматической чувствительности на длине волны оптического излучения 0.6328 мкм.

Преобразователь ток–напряжение собран на сверхпрецизионном операционном усилителе с импульсной стабилизацией типа 140УД24, предназначенном для построения особостабильных усилителей постоянного тока и работы с высокоомными источниками сигнала. Изготовленный преобразователь ток–напряжение при работе совместно с выбранным фотодиодом имеет уровень собственных шумов не более $45 \mu\text{V}$ что соответствует динамическому диапазону выносного блока более 100 дБ.

Дифференциальный усилитель собран по схеме инструментального усилителя на 3 операционных усилителях, в качестве которых выбран прецизионный уси-

литель со сверхнизким значением входного напряжения шума типа 140УД25. Изготовленный дифференциальный усилитель имеет уровень собственных шумов не более $30 \mu\text{V}$, что соответствует динамическому диапазону не менее 112 dB. Подавление синфазной составляющей сигнала составило 94 dB в полосе частот от 0 до 100 Hz.

Азимуты поляризации света в двух интерференционных картинах, регистрируемых соответственно фотодетекторами PD_{11} и PD_{12} , ортогональны азимутам поляризации света в интерференционных картинах, регистрируемых фотодетекторами PD_{21} и PD_{22} .

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости интенсивностей света в интерференционных картинах от времени при изменении начальных разностей фаз. На верхнем графике показаны сигналы с фотодетекторов PD_{11} и PD_{12} , на нижнем — с фотодетекторов PD_{21} и PD_{22} .

При любых механических воздействиях на зеркала интерферометра происходит синхронное изменение фазы во внутреннем и внешнем контурах. Были исследованы различные типы механического, акустического и температурного воздействия на пентагональный интерферометр. Во всех случаях наблюдалось синхронное изменение величин $u_1(t)$ и $u_2(t)$, что иллюстрирует рис. 3, на котором в верхней части показано изменение $u_1(t)$, а в нижней — $u_2(t)$ от времени при механическом (ударном) воздействии на основание интерферометра.

Разработанная СКАП была опробована в реальном эксперименте, когда пентагональный интерферометр был накрыт защитным колпаком. Фазовый модулятор, расположенный между светоделительными кубиками 2 и 12 в опорном пучке, автоматически поддерживал значения $u_2(t)$ вблизи нуля, вызывая скоррелированные изменения фазы в обоих каналах.

На рис. 4 представлены экспериментальные результаты работы СКАП. На второй и третьей дорожках показаны изменения фаз по внутреннем и внешнем контурах пентагонального интерферометра ($u_1(t)$ и $u_2(t)$), а на первой дорожке — результат корреляционной обработки ($U_{\Sigma}(t)$). Как видно из рисунка, фазовый шум в обоих каналах, имеющий амплитуду от $0.5 \cdot 10^{-2}$ до 10^{-2} rad, в результате корреляционной обработки снижается до 10^{-4} rad, т. е. почти на два порядка. Оставшийся нескоррелированный шум обусловлен в основном флуктуациями плотности воздуха под защитным колпаком в тех частях внешнего и внутреннего контуров интерферометра, которые не являются общими для распространения света. При помещении пентагонального интерферометра в вакуумную камеру этот шум может быть устранен.

Заключение

В рамках проекта ”Дулкын” по детектированию периодического гравитационного излучения в Объединенной экспериментальной лаборатории был собран и отъюстирован оригинальный интерферометр, являющийся

пассивным вариантом компактного гравитационно-волнового детектора, который обеспечил разработку метрики юстировки пентагонального оптического двухконтурного резонатора с отражательными дифракционными элементами, а также проверку коррелированности помеховых искажений фаз, обусловленных колебаниями зеркал интерферометра. Разработанная система корреляционной автокомпенсации помех (СКАП) позволила на два порядка уменьшить фазовый шум (до значений 10^{-4} rad) в результирующем сигнальном канале детектора. В настоящее время коллектив ОЭЛГОИ работает над созданием активного варианта компактного пентагонального гравитационно-волнового детектора.

Список литературы

- [1] Балакин А.Б., Кисунько Г.В., Мурзаханов З.Г., Скопчиков А.Ф. // Докл. РАН. 1996. Т. 346. № 1. С. 39–42.
- [2] Агачев А.Р. и др. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 22. С. 27–31..