

УДК 681.787+628.517+681.7.068

Компенсация воздействия шумов окружающей среды на работу волоконно-оптического интерферометра

© 2020 г. **А. А. Власов**, ИНЖЕНЕР-ИССЛЕДОВАТЕЛЬ, АСПИРАНТ;
М. Ю. Плотников, КАНД. ТЕХН. НАУК; **А. В. Волков**, КАНД. ТЕХН. НАУК;
В. С. Лавров, КАНД. ТЕХН. НАУК; **И. А. Шарков**, КАНД. ТЕХН. НАУК;
А.С. Алейник, КАНД. ТЕХН. НАУК

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: salusnetklim@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.05.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-09-44-53

Представлены результаты экспериментальной проверки эффективности способа компенсации воздействия шумов окружающей среды на работу волоконно-оптического компенсационного интерферометра в составе буксируемой гидроакустической косы. Принцип действия компенсации заключается в регистрации отдельного фазового сигнала, наведенного шумовым воздействием на плечи интерферометра, и вычитании его из выходного фазового сигнала интерферометра, для этого в конструкцию измерительной системы вводится дополнительный опорный датчик, изолированный от внешних воздействий. Эффективность шумоподавления при применении предложенного способа компенсации составляет $-14,73$ дБ. Данный результат может существенно снизить уровень шумов измерительных систем на основе волоконно-оптических фазовых датчиков и интерферометров при работе в реальных условиях.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики, волоконно-оптические интерферометры, компенсационный интерферометр, шум окружающей среды, шумоподавление, защита от шума.

Коды OCIS: 120.3180, 120.7280, 280.4788, 060.2370, 170.1065, 230.1040

В настоящее время волоконно-оптические фазовые измерительные системы являются наиболее совершенными с точки зрения точностных, массогабаритных и эксплуатационных параметров. Отсутствие механических и токопроводящих частей, высокая защищенность от электромагнитных помех и возможность мультиплексирования большого количества датчиков на одном или нескольких оптических волокнах (ОВ) [1–3] для построения распределенных и квазираспределенных измерительных массивов привели к широкому развитию таких систем [4–5]. Спрос на эти системы стремительно увеличивается в нефтега-

зовой и горнодобывающей промышленности, в военно-промышленном комплексе и других областях науки и техники [4–8]. Волоконно-оптические фазовые датчики являются основой систем для высокоточных измерений температуры, давления (в т.ч. акустического и гидроакустического), угловых скоростей, а также многих других физических полей и величин [4–12].

Волоконно-оптическая буксируемая коса предназначена для проведения гидроакустических исследований и может применяться в ходе морской геофизической разведки полезных ископаемых [13], в инженерно-гео-

логической сейсмической разведке, подводно-технических работах [14–15], а также в пассивном или активном контроле надводной и подводной активности (судоходство и мониторинг гаваней [16–17], а также исследования морской биосферы [18]). Основной задачей такой измерительной системы является прием звуковых волн в водной среде (гидроакустических сигналов) в диапазоне частот до 500 Гц.

Конструктивно данная измерительная система состоит из бортовой и забортной частей (рис. 1). Бортовая часть представляет собой блок приема и обработки сигналов (БПОС, позиция (поз.) 1, рис. 1), включающий в себя источник излучения (ИИ) оптического диапазона, фотоприемное устройство (ФПУ), блок фазовой демодуляции сигналов, источник электропитания, систему охлаждения и другое оборудование. К забортной части относится буксируемое тело, представляющее собой совокупность кабеля-буксира (поз. 2, рис. 1) и чувствительной секции (поз. 3, рис. 1), выполненного в виде единого неразрывного кабельного акустооптического преобразователя [19]. Для снижения влияния помеховых воздействий, возникающих при буксировке косы, могут применяться эластичные секции и другое вспомогательное оборудование [20–21].

Чувствительная секция представляет собой массив волоконно-оптических гидрофонов (ВОГ), построенных по оптической схеме разбалансированного интерферометра Майкельсона с длиной рассогласования $L = 26$ м на одномодовом ОВ SMF-28 стандарта ITU-T G.652.D. Состав и строение акустооптического кабельного преобразователя представлены

на рис. 2 [19]. Для компенсации нежелательных поляризационных преобразований в чувствительной части кабеля в качестве отражающих элементов применены зеркала Фарадея. Центральный силовой элемент (поз. 1, рис. 2), выполненный из арамидных нитей *Dupont Kevlar K49*, обеспечивает устойчивость к продольным растягивающим нагрузкам, возникающим в процессе буксировки. Фигурный кабельный сердечник (поз. 2, рис. 2) размещает в своих пазах (поз. 3 и 5, рис. 2) подводящие ОВ (поз. 4, рис. 2) и компоненты волоконно-оптической схемы, такие как разветвители и фарадеевские зеркала. Чувствительное ОВ (поз. 7, рис. 2) намотано на слой материала *BASF Elastollan soft 35 A* (поз. 6, рис. 2), имеющего значения модуля упругости около 12 МПа и коэффициента Пуассона около 0,25, и покрыто дополнительным слоем того же материала (поз. 8, рис. 2). Такой подход позволяет увеличить гидроакустическую чувствительность ОВ [19, 22]. Снаружи нанесена внешняя защитная оболочка (поз. 9, рис. 2), обладающая устойчивостью к морской воде, ультрафиолетовому излучению, механическим воздействиям и истиранию.

Для снижения требований к длине когерентности ИИ оптическая схема волоконно-оптической гидроакустической косы построена по принципу дифференциальной интерферометрии с согласованными траекториями с временным разделением сигналов [5]. Для этого в состав БПОС был включен компенсационный интерферометр (КИ) на основе разбалансированного интерферометра Майкельсона, длина рассогласования L которого равна длине рассогласования интерферометров

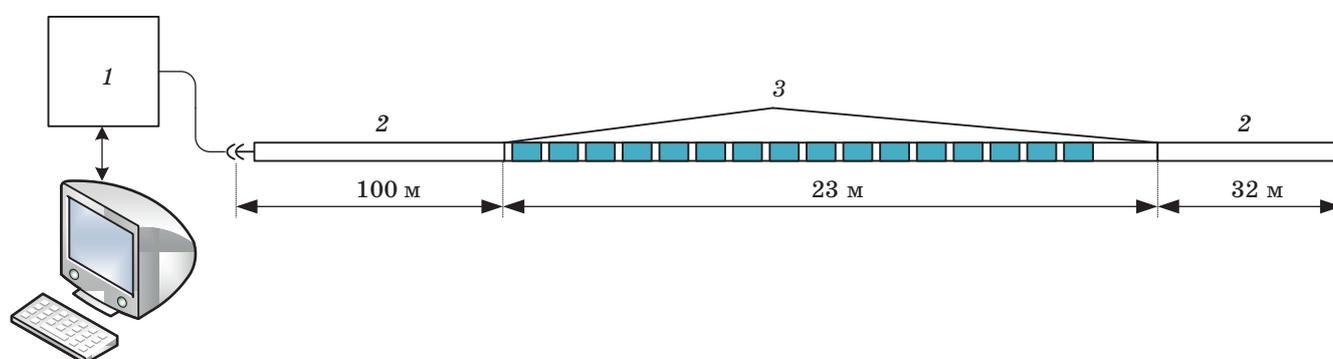


Рис. 1. Состав оборудования волоконно-оптической гидроакустической буксируемой косы. 1 — блок приема и обработки сигналов, 2 — кабель-буксир, 3 — чувствительная секция (массив волоконно-оптических гидрофонов). Позиция 1 относится к бортовой части, 2–3 — к забортной.

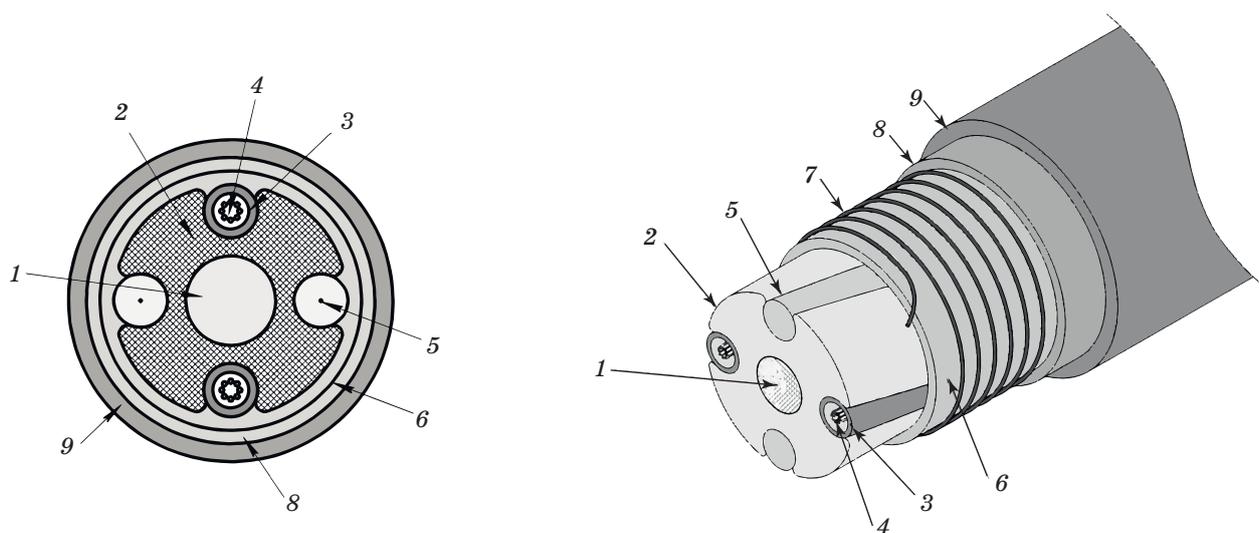


Рис. 2. Структура ВОГ в составе акустооптического кабельного преобразователя. 1 — силовой элемент из арамидных нитей, 2 — кабельный фигурный сердечник, 3 — канавка для укладки оптических волокон, 4 — оптические волокна, 5 — канавка для укладки волоконно-оптических компонентов, 6 — подслон для намотки чувствительного волокна гидрофона, 7 — чувствительное плечо волоконно-оптического гидрофона на основе разбалансированного интерферометра Майкельсона, 8 — внешний слой, покрывающий чувствительное плечо волоконно-оптического гидрофона, 9 — внешнее защитное покрытие акустооптического кабельного преобразователя.

в составе ВОГ. В этом устройстве происходит временное сведение опорного и измерительного оптических импульсов, после этого по амплитуде интерференционной картины на ФПУ происходит вычисление разности фаз, обусловленной изменением длины оптического пути внутри чувствительного плеча ВОГ под воздействием измеряемой величины (гидроакустического давления) за счет удлинения ОВ и изменения показателя его преломления под давлением [18, 22]. Это позволило применить в качестве ИИ поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором телекоммуникационного класса с максимальной скоростью прямой токовой модуляции до 10 ГГц и возможностью регулировки центральной длины излучения подстройкой температуры активной области с помощью встроенного термоэлектрического контроллера [23]. Данный тип ИИ обладает достаточно низкой стоимостью, что позволяет снизить стоимость системы в целом. Оптическая схема измерительной системы представлена на рис. 3. По данному принципу осуществляется опрос от 1 до 96 гидрофонов, образующих соответствующее число каналов гидроакустической косы.

Для фазовой демодуляции сигналов от массива ВОГ применена гомодинная схема, для этого в коротком плече КИ был размещен интегрально-оптический электрооптический фазовый модулятор на основе X-среза кристалла ниобата лития (LiNbO_3) [24–25], для подавления нежелательных механических резонансов в работе которого была использована его жесткая механическая фиксация к массивной кварцевой подложке [7]. Модулятор осуществляет вспомогательную фазовую модуляцию интерференционного сигнала с частотой 100 кГц и глубиной модуляции $C = 2,63$ рад. Ввиду анизотропных свойств кристалла LiNbO_3 эффективность электрооптической модуляции зависит от состояния плоскости поляризации модулируемого оптического излучения, в связи с этим оптическая схема КИ выполнена на двулучепреломляющем ОВ ESC-4 с эллиптической напрягающей оболочкой, стыковка медленной оси которого осуществлена сонаправлено с осью Z кристалла [26]. Стоит также отметить, что применение КИ позволяет обеспечить одинаковую глубину вспомогательной фазовой модуляции в интерференционных сигналах с массива ВОГ.

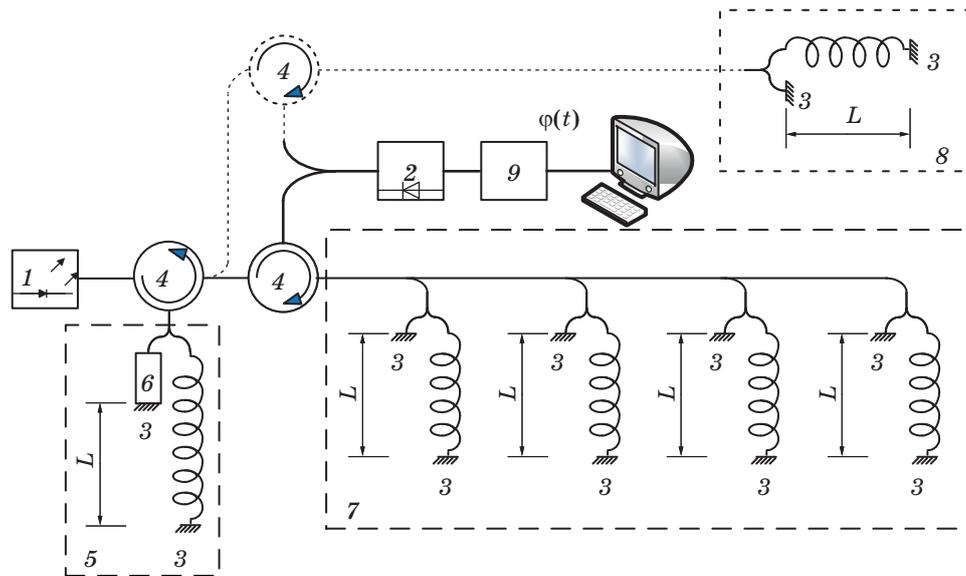


Рис. 3. Оптическая схема волоконно-оптической гидроакустической буксируемой косы. 1 — источник излучения, 2 — фотоприемное устройство, 3 — фарадеевское зеркало, 4 — волоконно-оптический циркулятор, 5 — компенсационный интерферометр, 6 — интегрально-оптический электрооптический фазовый модулятор, 7 — массив волоконно-оптических гидрофонов, 8 — выносной опорный датчик, 9 — блок демодуляции фазовых сигналов, L — длина рассогласования плеч разбалансированных интерферометров Майкельсона (26 м). Пунктиром обозначено усовершенствование исходной оптической схемы.

Схема демодуляции интерференционных сигналов представляет собой синхронный детектор, в котором с помощью первой и второй гармоник сигнала вспомогательной фазовой модуляции (ω и 2ω соответственно) из интерференционного сигнала выделяют соответственно его первую и вторую гармоники, представляющие собой пару квадратурных сигналов (рис. 4.). Далее из их отношения с помощью блока вычисления значений функции арктангенса вычисляется измеряемый фазовый сигнал [24, 27]. Ввиду высоких требований к быстродействию блока высокоскоростной гомодинной демодуляции фазовых сигналов данный алгоритм реализован на программируемой логической интегральной схеме.

Принцип работы измерительной системы поясняется временными диаграммами, представленными на рис. 5 сплошными линиями.

Согласно результатам проведенных стендовых и натурных испытаний [19], разработанная волоконно-оптическая коса обладает следующими характеристиками: чувствительность более 1 рад/Па (в полосе частот от 63 до 495 Гц), минимально обнаружимое давле-

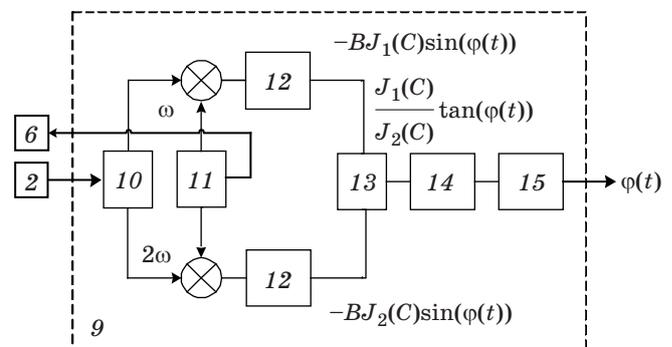


Рис. 4. Схема гомодинной демодуляции фазовых сигналов. 10 — аналогово-цифровой преобразователь, 11 — опорный генератор, 12 — фильтр нижних частот, 13 — блок делителя, 14 — блок вычисления функции арктангенса, 15 — фильтр верхних частот. Нумерация продолжает нумерацию рис. 3.

ние не менее 39 мкПа/Гц^{0,5}, динамический диапазон — более 120 дБ (на частоте 495 Гц).

При работе измерительной системы в реальных условиях на ОВ в составе КИ воздействуют вибрационные и акустические шумовые воздействия окружающей среды [28–29], в результате этого результирующий

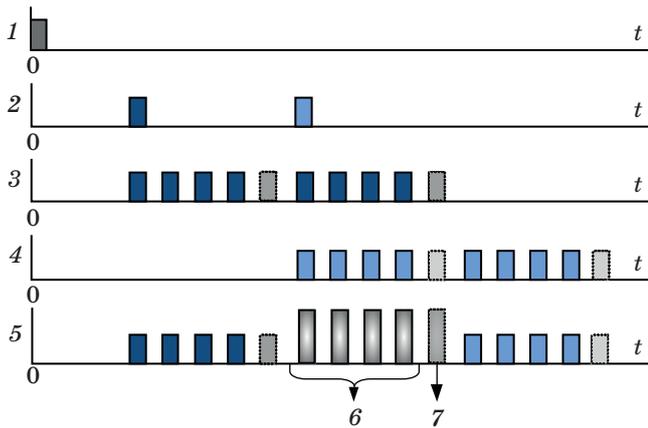


Рис. 5. Временные диаграммы работы измерительной системы (пунктиром обозначены импульсы от предлагаемого выносного опорного датчика). 1 — временная диаграмма работы источника излучения, 2 — временная диаграмма импульсов, отраженных от зеркал компенсационного интерферометра, 3 — импульсы от зеркал волоконно-оптического гидрофона, порожденные импульсом от короткого плеча компенсационного интерферометра, 4 — импульсы от зеркал волоконно-оптических гидрофонов, порожденные импульсом от длинного плеча компенсационного интерферометра, 5 — импульсы на фотоприемном устройстве, 6 — интерференционные импульсы от массива волоконно-оптических гидрофонов, 7 — интерференционный импульс от выносного изолированного опорного датчика.

интерференционный импульс несет в себе информацию не только об измеряемом воздействии на соответствующий ВОГ, но и о воздействии данных шумов на КИ, ввиду этого происходит значительное повышение уровня шумов измерительной системы

$$I_{S_n} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(C \cos(\omega t) + \Delta\varphi_{\text{noise}} + \Delta\varphi_{\text{sig}}), \quad (1)$$

где I_{S_n} — интенсивность интерференционного импульса от n -го датчика массива ($\text{Вт}/\text{м}^2$), $\Delta\varphi_{\text{sig}}$ — разность фаз, наводимая воздействием измеряемой величины на ВОГ (радиан), $\Delta\varphi_{\text{noise}}$ — разность фаз, наводимая шумовыми воздействиями окружающей среды на КИ (радиан), C — глубина вспомогательной фазовой модуляции (радиан), $\cos(\omega t)$ — сигнал вспомогательной фазовой модуляции.

Особенно острой данная проблема является в случае, когда измеряемый и помеховый

сигналы являются сигналами одной природы (как в рассматриваемом случае — акустические сигналы) в близких диапазонах частот. Согласно работе [30], более 90% спектральной плотности мощности различных акустических помеховых воздействий техногенного и антропогенного характера находятся в полосе частот от 1 до 5000 Гц, что перекрывает частотный диапазон полезного сигнала волоконно-оптической гидроакустической косы. В этом случае помеховый и полезный сигналы являются фундаментально неразделимыми методами обработки сигналов [31].

Актуальность этой проблемы может быть проиллюстрирована следующим опытом: на рис. 6 представлены временная и частотная диаграммы работы волоконно-оптической гидроакустической косы в условиях отсутствия сигналов измеряемой величины при отсутствии защиты КИ от помеховых воздействий. Видно, что работа вентилятора XINRUILIAN RDM8025S системы охлаждения БПОС вызывает увеличение уровня шума в выходном сигнале интерферометра от +2,9 до +25,5 дБ в полосе частот работы измерительной системы до 500 Гц; кроме того, присутствует ряд максимумов от +3,8 до +16,6 дБ в диапазоне частот от 500 до 2000 Гц (данные значения приведены относительно уровня собственных фазовых шумов измерительной системы).

Широко распространенными способами снижения нежелательной акустической чувствительности волоконно-оптических компонентов и приборов на их основе являются применение защитных покрытий ОВ [32–36] и изолирующих конструкций, включая акустически подготовленные корпуса устройств [29, 36–39]. Кроме того, известен способ компенсации внешних помеховых воздействий, суть которого заключается в применении в составе измерительного массива одного дополнительного изолированного от воздействия измеряемой величины волоконно-оптического опорного датчика, включенного последовательно с чувствительными гидрофонами [40–42]. При этом конструкция дополнительного датчика идентична измерительным датчикам. Идея данного способа состоит в следующем: сигнал с опорного датчика, в отличие от сигнала измерительных датчиков, не содержит в себе информации об измеряемой величине, вариации амплитуды интерференционной

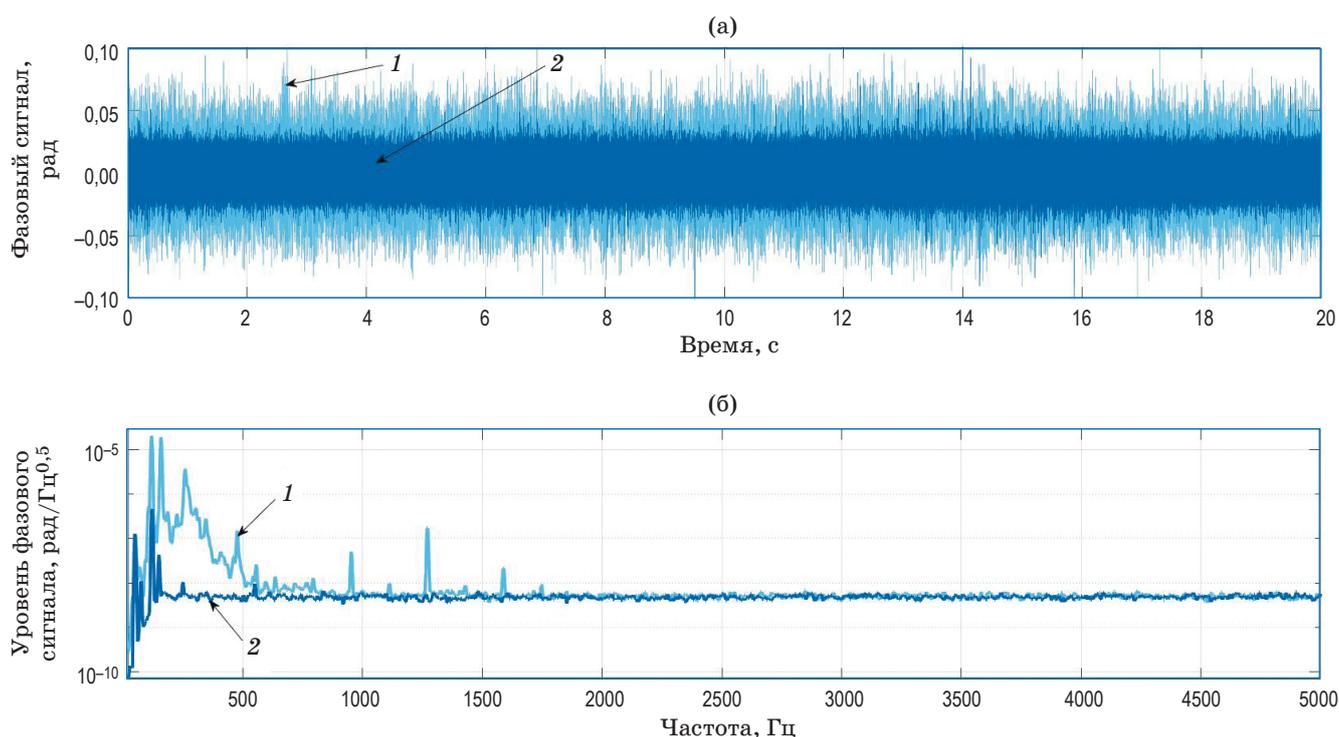


Рис. 6. Иллюстрация влияния акустических воздействий окружающей среды (во временной области — (а), в частотной области — (б)) на работу волоконно-оптического компенсационного интерферометра при работе вентилятора системы охлаждения БПОС (1) и при отключении вентилятора (2).

картины иллюстрируют только воздействие шума окружающей среды на КИ –

$$I_{IS} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(C \cos(\omega t) + \Delta\varphi_{\text{noise}}), \quad (2)$$

где I_{IS} — интенсивность интерференционного импульса от изолированного датчика ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Таким образом, вычитая демодулированный фазовый сигнал от опорного датчика из демодулированных фазовых сигналов от измерительных датчиков, влияние шумовых воздействий окружающей среды на КИ на точность интерференционных измерений может быть устранено:

$$\varphi_{\text{comp}} = \varphi_{S_n} - \varphi_{IS} = (\Delta\varphi_{\text{noise}} + \Delta\varphi_{\text{sig}}) - (\Delta\varphi_{\text{noise}}), \quad (3)$$

где φ_{comp} — скомпенсированный фазовый сигнал (радиан), φ_{S_n} — демодулированный фазовый сигнал от n -го датчика массива (радиан), φ_{IS} — демодулированный фазовый сигнал от опорного датчика (радиан).

Такой способ компенсации помеховых (шумовых) воздействий имеет следующие недостатки: сложность достижения нечувствительности опорного датчика к внешним воздействиям, так как его расположение в составе измерительного массива накладывает ограничение на возможность применения многих защитных конструкций и покрытий, а также необходимость внесения значительных изменений в конструкцию измерительных массивов. Указанные недостатки существенно ограничивают область применения рассматриваемого способа.

Для устранения перечисленных недостатков было предложено усовершенствование оптической схемы волоконно-оптической косы, обозначенное на рис. 3 пунктирной линией. В данной схеме изолированный (опорный) датчик (поз. 8, рис. 3) выведен из состава измерительного массива, что полностью снимает ограничения на применяемые способы его изоляции от внешних воздействий измеряемой величины. Кроме того, ввиду отсутствия модулятора и других активных компонентов в составе опорного датчика в данной схеме

к нему может быть применен принцип защиты расстоянием — вынос опорного датчика с защитными конструкциями за пределы зоны действия источников помеховых сигналов, интенсивность акустических волн которых снижается обратно квадрату расстояния [43].

Для исследования возможности применения разработанной оптической схемы компенсации внешних воздействий на практике была проведена экспериментальная оценка ее эффективности. Суть эксперимента состояла в следующем: к волоконно-оптической измерительной системе, состоящей из БПОС и массива из четырех ВОГ, был подключен выносной опорный датчик (в соответствии со схемой на рис. 3). Выносной опорный датчик разнесен в пространстве и с КИ, и с массивом волоконно-оптических датчиков. Кроме того, опорный датчик изолирован от акустического и вибрационного воздействий окружающей среды защитным покрытием на основе кабеля с тросовым бронированием световедущих жил [35–36]. Применение акустической изоляции опорного датчика приводит к тому, что он становится нечувствителен к внешним

воздействиям; этот факт применяется для формирования интерференционного сигнала, содержащего исключительно информацию о внешних воздействиях на КИ в соответствии с выражением (2), т.е. появляется возможность опросить КИ в качестве датчика виброакустического воздействия окружающей среды в месте его установки. На ВОГ и КИ оказывались одновременные разнотипные импульсные воздействия, амплитуда выходного фазового сигнала интерферометра в результате которых составила около 1 рад. Длина подводящих волокон к данным датчикам выбрана таким образом, чтобы обеспечивать их устойчивое временное мультиплексирование без наложения сигналов на ФПУ. Временные диаграммы работы измерительной системы с опорным датчиком обозначены на рис. 5 пунктиром.

Результаты экспериментальной проверки представлены на рис. 7. На рисунке приведены временные диаграммы работы измерительной системы: демодулированные фазовые сигналы с первого ВОГ и выносного опорного датчика, а также разностный сигнал, вы-

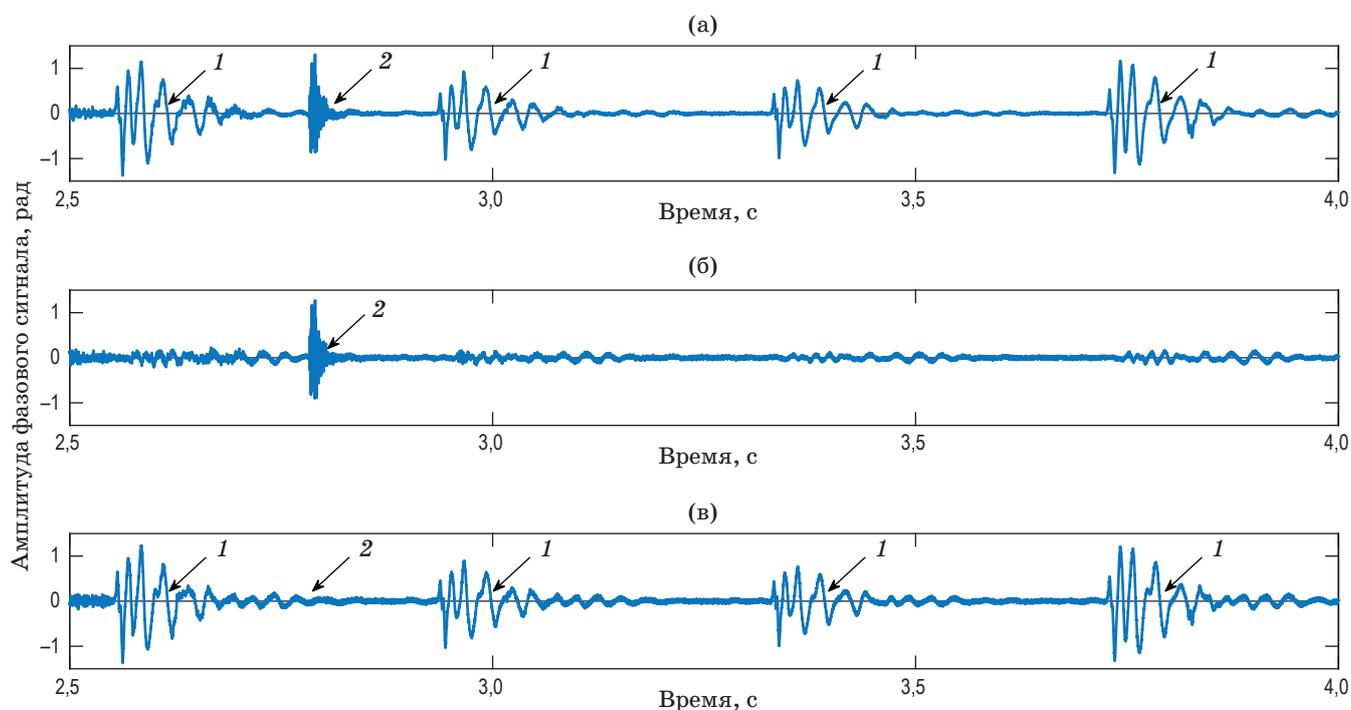


Рис. 7. Результаты исследования работы предлагаемого способа компенсации внешних воздействий на работу волоконно-оптического интерферометра (сигнал ВОГ — (а), сигнал опорного изолированного волоконно-оптического датчика — (б), разностный сигнал — (в)). Внешнее импульсное акустическое воздействие на волоконно-оптический гидрофон (1) и на компенсационный интерферометр (2).

численный в соответствии с выражением (3). На данных диаграммах отображены фазовые сигналы работы системы во временной области при воздействии сигнала измеряемой величины (поз. 1, рис. 7) и при внешнем помеховом воздействии на КИ (поз. 2, рис. 7).

Нежелательное помеховое воздействие является случайным сигналом, и эффективность его подавления можно оценить как отношение остаточной средней мощности помехового сигнала после подавления $P_{\text{noisecorr}}$ к средней мощности помехового сигнала до подавления P_{noise} в соответствии со следующим выражением [31, 43]:

$$S_{\text{max}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{noisecorr}}}{P_{\text{noise}}} \right). \quad (4)$$

Учитывая, что средняя мощность случайного сигнала SIG определяется его дисперсией σ^2 , выражение (4) можно записать следующим образом [31]:

$$S_{\text{max}} = 10 \lg \left(\frac{\sigma^2(\text{SIG}_{\text{noisecorr}})}{\sigma^2(\text{SIG}_{\text{noise}})} \right). \quad (5)$$

Исходный сигнал и нежелательное помеховое воздействие можно считать независимыми случайными процессами, поэтому дисперсия суммы таких сигналов равна сумме их дисперсий. Значит, выражение (5) можно преобразовать к виду [31]

$$S_{\text{max}} = 10 \lg \left(\frac{\sigma^2(\varphi_{S_n} - \varphi_{IS}) - \sigma^2(\varphi_{S_{\text{ref}}})}{\sigma^2(\varphi_{S_n}) - \sigma^2(\varphi_{S_{\text{ref}}})} \right), \quad (6)$$

где φ_{S_n} — демодулированный фазовый сигнал от n -го датчика массива с помеховыми воздействиями (радиан), $\varphi_{S_{\text{ref}}}$ — демодулированный фазовый сигнал от n -го датчика массива при отсутствии внешних помеховых воздействий (радиан), $(\varphi_{S_n} - \varphi_{IS})$ — фазовый разностный сигнал между сигналом с n -го датчика массива с помеховыми воздействиями и сигналом от опорного датчика (радиан). Таким образом, в соответствии с выражением (6) в числителе определяется дисперсия фазового сигнала помехового воздействия, а в знаменателе — дисперсия остаточного фазового сигнала помехового воздействия.

В ходе эксперимента были получены следующие значения дисперсии σ^2 демодулированных фазовых сигналов: для φ_{S_n} — $0,0184 \text{ рад}^2$, для $\varphi_{S_{\text{ref}}}$ — порядка $0,0003 \text{ рад}^2$, для разностного сигнала $(\varphi_{S_n} - \varphi_{IS})$ — около $0,0009 \text{ рад}^2$.

Таким образом, эффективность компенсации помехового воздействия S_{max} составила $-14,73 \text{ дБ}$ относительно исходного уровня фазового сигнала внешнего воздействия.

Наличие сигнала от опорного датчика в моменты подачи импульсного воздействия на измерительный датчик обусловлено конечной степенью акустической изоляции первого [35–36]. Эффективность компенсации разработанной оптической схемы может быть повышена за счет повышения степени изоляции опорного датчика от внешних воздействий, а также за счет дальнейшего снижения общего уровня фазового шума путем выбора источника оптического излучения с низким уровнем собственных фазовых шумов, устранения воздействий температурных воздействий на интерферометр и другие чувствительные компоненты, а также минимизации рассогласования длин плеч КИ и гидрофонов [4–5].

В данной работе была продемонстрирована возможность снижения влияния акустических шумов окружающей среды на работу волоконно-оптического интерферометра Майкельсона за счет применения изолированного от внешних воздействий выносного опорного датчика. При опросе данного датчика демодулированный фазовый сигнал от него содержит информацию исключительно о внешних воздействиях на волоконно-оптический КИ; таким образом, вычитание данного сигнала из демодулированных фазовых сигналов от ВОГ измерительного массива позволяет снизить влияние акустических шумов окружающей среды на работу интерферометра и потенциально повысить точностные характеристики проводимых интерферометрических измерений. Результаты работы могут быть адаптированы к применению для повышения точностных параметров измерительных систем на основе волоконно-оптических интерферометров Майкельсона, Маха–Цендера и Саньяка.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-11-2019-026 от 27.11.2019.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kersey A.D., Dandridge A., Davis A.R., et al. 64-element time-division multiplexed interferometric sensor array with EDFA telemetry // Optical Fiber Commun. Conf. 1996. OSA.
2. Cranch G.A., Kirkendall C.K., Daley K., et al. Large-scale remotely pumped and interrogated fiber-optic interferometric sensor array // IEEE Photonics Technol. Lett. 2003. V. 15. № 11. P. 1579–1581.
3. Liao Y., Austin E., Nash P.J., et al. Highly scalable amplified hybrid TDM/DWDM array architecture for interferometric fiber-optic sensor systems // J. Lightwave Technol. 2013. V. 31. № 6. P. 882–888.
4. Cusano A., Cutolo A., Albert J. Fiber Bragg grating sensors: Recent advancements, industrial applications and market exploitation. Sharjah: Bentham Science Publishers, 2011. 322 p.
5. Udd E., Spillman Jr.W.B. Fiber optic sensors: An introduction for engineers and scientists. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. 575 p.
6. Cole J.H., Kirkendall C., Dandridge A., et al. Twenty-five years of interferometric fiber optic acoustic sensors at the Naval Research Laboratory // J. Washington Academy of Sci. 2004. P. 40–57
7. Kirkendall C.K., Dandridge A. Overview of high performance fibre-optic sensing // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 37. № 18. P. R197.
8. Pallayil V. Ceramic and fibre optic hydrophone as sensors for lightweight arrays — A comparative study // OCEANS 2017-Anchorage. 2017. P. 1–13.
9. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. London: Artech house, 2014. 489 p.
10. Smolovik M.A., Pogorelaya D.A., Vlasov A.A., et al. The study of mechanical resonances of the phase electro-optic modulator based on LiNbO₃ for noise reduction of fiber-optic gyroscope // J. Phys.: Conf. Ser. V. 1124. № 6. P. 061002.
11. Vostrikov E., Kikilich N., Zalesskaya Y., et al. Stabilisation of central wavelength of erbium-doped fibre source as part of high-accuracy FOG // IET Optoelectronics. 2020.
12. Aleinik A.S., Deineka I.G., Smolovik M.A., et al. Compensation of excess RIN in fiber-optic gyro // Gyroscopy and Navigation. 2016. V. 7. № 3. P. 214–222.
13. Богоявленский В.И. Перспективы и проблемы освоения месторождений нефти и газа шельфа Арктики // Бурение и нефть. 2012. № 11. С. 4–9.
14. Лавров Н.П., Рослов Ю.В., Лобковский Л.И. и др. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4. С. 4–13.
15. Лысак С.В. Стратегия повышения конкурентоспособности российских предприятий морской сейсморазведки на мировом рынке // Автореф. канд. дис. СПб: Горный университет, 2014. 28 с.
16. Souto F. Fibre optic towed array: The high tech compact solution for naval warfare // Proc. Acoustics. 2013. V. 2013. P. 17–20.
17. Maas S.J., Buchan I. Fiber optic 4C seabed cable for permanent reservoir monitoring // 2007 Symp. Underwater Technol. and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technol. 2007. P. 411–414.
18. Beverini N., Firpi S., Guerrini P., et al. Fiber laser hydrophone for underwater acoustic surveillance and marine mammals monitoring // LAT 2010: Internat. Conf. Lasers, Applications, and Technol. 2011. V. 7994. P. 79941D.
19. Plotnikov M.Y., Lavrov V.S., Dmitraschenko P.Y., et al. Thin cable fiber-optic hydrophone array for passive acoustic surveillance applications // IEEE Sensors J. 2019. V. 19. № 9. P. 3376–3382.
20. Vlasov A.A., Aleynik A.S., Plotnikov M.Yu., et al. Methods of mechanical noise impact suppression during streamer towing process using fiber Bragg gratings // Scientific and Technical J. Inform. Technologies, Mechanics and Optics. 2019. V. 19. № 4. P. 574–585.
21. Vlasov A.A., Plotnikov M.Yu., Lavrov V.S., et al. The influence of a method of bracing a fiber-optical seismic streamer during towing on the parameters of its output signal // Instruments and Experimental Techniques. 2020. V. 63. № 4. P. 581–586.
22. McMahon G.W., Cielo P.G. Fiber optic hydrophone sensitivity for different sensor configurations // Appl. Opt. 1979. V. 18. № 22. P. 3720–3722.
23. Vlasov A.A., Aleynik A.S., Shuklin P.A., et al. Ultrasound detection by applying fiber Bragg gratings // Scientific and Technical J. Inform. Technologies, Mechanics and Optics. 2019. V. 19 № 5. P. 809–817.
24. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhreggin M.V., et al. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors // IEEE Sensors J. 2017. V. 17. № 13. P. 4143–4150.
25. Varlamov A.V., Plotnikov M.Y., Aleinik A.S., et al. Acoustic vibrations in integrated electro-optic modulators on substrates of lithium niobite // Technical Phys. Lett. 2017. V. 43. № 11. P. 994–997.

26. *Varlamov A.V., Kulikov A.V., Strigalev V.E., et al.* Determination of optical losses at fibers joining with different modefield diameter // *Scientific and Technical J. Inform. Technol., Mechanics and Optics*. 2013. V. 13. № 2. P. 23–26.
27. *Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., et al.* Dynamic range analysis of the phase generated carrier demodulation technique // *Advances in Optical Technol.* 2014. V. 2014.
28. *Hocker G.B.* Fiber-optic sensing of pressure and temperature // *Appl. Opt.* 1979. V. 18. № 9. P. 1445–1448.
29. *Vlasov A.A., Varlamov A.V., Ashirov A.N., et al.* Research on the influence of the degree of acoustic sealing of acoustically conditioned sound protective cases of fiber-optic interferometers on their characteristics // *Instruments and Experimental Techniques*. 2020. V. 63. № 4. P. 506–510.
30. *Vlasov A.A., Plotnikov M.Yu., Ashirov A.N., et al.* An experimental setup for acoustic research of the components of fiber-optic measuring systems // *Instruments and Experimental Techniques*. 2020. V. 63. № 4. P. 498–505.
31. *Smith S.* Digital signal processing: A practical guide for engineers and scientists. Elsevier, 2013. 672 p.
32. *Lagakos N., Bus I.J., Col J.H., et al.* Acoustic desensitization of single-mode fibers utilizing nickel coating. // *Opt. Lett.* 1982. V. 7. № 9. P. 460–462.
33. *Yang Y.C., Lee H.L., Chou H.M.* Elasto-optics in double-coated optical fibers induced by axial strain and hydrostatic pressure // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. № 10. P. 1989–1994.
34. *Lagakos N., Hickman T.R., Col J.H., et al.* Optical fibers with reduced pressure sensitivity // *Opt. Lett.* 1981. V. 6. № 9. P. 443–445.
35. *Vlasov A.A., Aleinik A.S., Ashirov A.N., et al.* Fiber optic cables with high acoustic insulation // *Technical Phys. Lett.* 2019. V. 45. № 8. P. 769–772.
36. *Vlasov A.A., Plotnikov M.Y., Aleinik A.S., et al.* Methods for acoustic desensitization of fiber optic interferometer // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1326. № 1. P. 012010.
37. *Vlasov A.A., Plotnikov M.Y., Ashirov A.N., et al.* The method for protection of sensitive fiber optic components from environmental noise and vibration impacts // *2019 IEEE Internat. Conf. Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech)*. 2019. P. 305–307.
38. *Poulsen C.V., Hansen L.V., Sigmund O., et al.* Articles comprising an optical fibre with a fibre Bragg grating and methods of their production // Патент США 7809029. 2010.
39. *Vlasov A.A., Plotnikov M.Yu., Volkovsky S.A., et al.* Development of the passive vibroacoustic isolation system for the path matched differential interferometry based fiber-optic sensors // *Optical Fiber Technol.* 2020. V. 57. P. 102241.
40. *Cielo P.G.* Fiber optic hydrophone: Improved strain configuration and environmental noise protection // *Appl. Opt.* 1979. V. 18. № 17. P. 2933–2937.
41. *Waagaard O.H., Rønnekleiv E., Forbord S., et al.* Suppression of cable induced noise in an interferometric sensor system // *20th Internat. Conf. Optical Fibre Sensors*. 2009. V. 7503. P. 75034Q.
42. *Baney D.M., Van Wiggeren G.D., Motamedi A.* Vibration noise mitigation in an interferometric system // Патент США 6825934. 2004.
43. *Иванов Н.И., Пашурин А.Е.* Защита от шума и вибрации. СПб: Печатный цех, 2019. 284 с.