

Шестиканальный адаптивный волоконно-оптический интерферометр

Р.В.Ромашко, М.Н.Безрук, А.А.Камшилин, Ю.Н.Кульчин

Предложена и исследована схема для мультиплексирования ортогональных динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивном кристалле, практически исключающая появление перекрестных помех между голографическими каналами при фазовой демодуляции. Реализован шестиканальный волоконно-оптический адаптивный интерферометр. Экспериментально определен порог детектирования малых флуктуаций фазы в каждом канале интерферометра, который составил 2.1×10^{-8} рад·Вт^{1/2}·Гц^{-1/2}. Оценен предел для мультиплексирования каналов в интерферометре. Показано, что формирование 70 каналов в условиях полного перекрытия их световых полей в объеме кристалла приводит к повышению относительного порога детектирования в рабочем канале лишь на 10%. Найдены условия, при которых максимальный перекрестный шум между каналами не превышает собственных шумов в каналах (-47 дБ).

Ключевые слова: фоторефрактивный кристалл, динамическая голограмма, адаптивный интерферометр, мультиплексирование.

1. Введение

Известно, что интерферометрические измерительные системы обладают высокой чувствительностью, что позволяет регистрировать с их помощью сверхмалые физические величины, например вибрации с амплитудой в доли ангстрема [1]. В то же время вследствие высокой чувствительности интерферометрические системы в значительной степени подвержены влиянию внешних факторов, таких как флуктуации температуры и атмосферного давления, случайные механические воздействия и др., что затрудняет их применение во внелабораторных условиях.

Одно из решений данной проблемы заключается в использовании динамических голограмм (ДГ), формируемых в фоторефрактивном кристалле (ФРК), благодаря которым интерферометрическая система становится адаптивной, т. е. способной подстраиваться под неконтролируемые изменения внешних факторов и сохранять работоспособность в реальных условиях [2, 3]. Данный подход, называемый адаптивной интерферометрией, был предложен в работе [2], получил дальнейшее развитие и успешно применяется в настоящее время [3–9].

Рассматривая круг практических приложений, можно выделить целый класс задач, решение которых требует проведения одновременных измерений нескольких физических величин. К таким задачам, в частности, следует

отнести одновременный контроль параметров большого количества объектов, мониторинг протяженных объектов, а также параметров физических полей и др. [10–12]. Решение подобных задач обуславливает необходимость использования большого числа сенсоров, которые бы объединялись в многоканальные измерительные системы. Такой подход делает актуальной разработку многоканальных адаптивных интерферометров.

Поскольку ключевым элементом адаптивного интерферометра является ДГ, естественным представляется подход, заключающийся в мультиплексировании набора ДГ, формируемых в одном ФРК. Ранее уже предпринимались попытки создания многоканальных адаптивных интерферометров на основе такого подхода, в том числе в работах [13–15]. В первой из них независимость каналов реализовывалась за счет взаимной некогерентности световых пучков, формирующих мультиплексируемые в ФРК голограммы. В работе [14] разделение каналов осуществлялось за счет создания условий, при которых перекрестные и основные голограммы имели в кристалле различную пространственную ориентацию, а внешнее электрическое поле, приложенное определенным образом к кристаллу, обеспечивало селективное усиление только основных голограмм. В работе [15] был предложен метод спектрального мультиплексирования ДГ, в рамках которого голограммы формировались в ФРК световыми пучками с различными, но близкими длинами волн, а демultipлексирование сигналов в разных каналах осуществлялось с помощью узкополосных спектральных фильтров. Общий недостаток перечисленных методов заключается в необходимости приложения к ФРК сильного внешнего электрического поля, что влечет за собой ряд технических трудностей (эффект экранирования, перегрев кристалла и пр.) [16, 17]. Кроме того, в методах на основе спектрального мультиплексирования количество реализуемых каналов ограничено спектральной чувствительностью ФРК и шириной спектра источника излучения.

Предварительные экспериментальные результаты показали, что при использовании ортогональной геометрии

Р.В.Ромашко, Ю.Н.Кульчин. Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690950 Владивосток, ул. Суханова, 8; Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: romashko@iacp.dvo.ru, director@iacp.dvo.ru

М.Н.Безрук. Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: bezmisha@list.ru

А.А.Камшилин. University of Eastern Finland, Yliopistoranta 1, P.O. Box 1627, FI-70211 Kuopio, Finland; e-mail: kamshiline@uku.fi

Поступила в редакцию 19 сентября 2011 г., после доработки – 29 февраля 2012 г.

мультиплексирование ДГ в одном ФРК осуществимо без указанных выше трудностей [18].

В настоящей работе выполнен теоретический анализ мультиплексирования ДГ в ортогональной геометрии. Показано, что такая геометрия векторного взаимодействия волн в ФРК позволяет практически исключить появление перекрестных помех. На основе предложенной геометрии реализована шестиканальная волоконно-оптическая адаптивная интерферометрическая измерительная система и исследованы особенности ее работы.

2. Ортогональная геометрия мультиплексирования ДГ

В настоящей работе для формирования ДГ в ФРК выбрана ортогональная геометрия, в рамках которой сигнальный и опорный пучки распространяются в ФРК с кубической симметрией во взаимно перпендикулярных направлениях [19]. Использование такой геометрии позволяет наиболее эффективно реализовать линейный режим фазовой демодуляции для деполаризованного излучения [20], характерного, в частности, для многомодовых волоконных световодов, которые могут применяться в качестве сенсоров.

В основу работы многоканальной интерферометрической системы положено мультиплексирование набора ортогональных ДГ, в рамках которого N сигнальных световых пучков взаимодействуют в ФРК с общим опорным пучком. Случай $N = 2$ иллюстрирует рис.1. Две сигнальные волны S_1 и S_2 распространяются в ФРК под малыми углами θ_1 и θ_2 к основной кристаллографической оси [001], полностью перекрываясь в кристалле, при этом одна общая опорная волна R распространяется перпендикулярно сигнальным в направлении оси [100].

Пара волн S_1 – R формирует основную голографическую решетку с вектором K_1 (1-й канал демодуляции), а пара волн S_2 – R – вторую основную голографическую решетку с вектором K_2 (2-й канал демодуляции). В свою очередь интерференция сигнальных волн S_1 и S_2 может инициировать запись перекрестной голографической решетки с вектором K_{12} . Взаимодействие волн на такой решетке, если она будет сформирована, приведет к взаимовлиянию сигналов соответствующих каналов и появлению перекрестных шумов между ними.

Из рис.1 видно, что векторы основных голограмм K_1 и K_2 направлены практически вдоль оси [001], в то время как вектор перекрестной голограммы K_{12} перпендикулярен ей. Указанное отличие определяет характер взаимо-

действия волн в кристалле и, как будет показано ниже, позволяет обеспечить мультиплексную запись набора голограмм, свободных от перекрестных помех.

Взаимодействие пары волн в негиротропном ФРК с кубической симметрией описывается уравнением для связанных волн [19]

$$\frac{\partial}{\partial l_1} A_1 = -m \kappa_d \hat{H}_2 A_2, \quad \frac{\partial}{\partial l_2} A_2 = -m^* \kappa_d \hat{H}_1 A_1, \quad (1)$$

где A_1 и A_2 – векторные амплитуды взаимодействующих световых волн; m – контраст интерференционной картины, формируемой парой волн; $\kappa_d = \pi l_0^3 r_{41} k_B TK / (\lambda e)$ – параметр связи волн на диффузионной голографической решетке, определяемый показателем преломления ФРК n_0 , электрооптическим коэффициентом r_{41} , длиной волны излучения λ , постоянной Больцмана k_B , температурой T и модулем вектора голографической решетки K ; l_1 и l_2 – координаты вдоль направления распространения волн A_1 и A_2 в ФРК, которые в общем случае могут быть различными; \hat{H} – матрица связи волн, компоненты которой зависят от направлений единичных векторов $\langle p |$ и $\langle s |$ ортогонального базиса, задающего плоскость колебаний электрического поля световой волны в главных кристаллографических осях [20, 21]:

$$H_{ps} = \langle p | \hat{K} | s \rangle; \quad (2)$$

где \hat{K} – тензор изменения диэлектрической проницаемости ФРК под действием электрического поля пространственного заряда, компоненты которого зависят от направления вектора голографической решетки (K_1, K_2 или K_{12} , см. рис.1) [19].

Используя выражение (2), можно показать [20], что для любой пары волн, взаимодействующей в геометрии, представленной на рис.1, матрица связи будет иметь вид

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} 0 & h \\ h & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $h = \cos \beta$; β – угол между вектором голографической решетки и основной кристаллографической осью [001]. Отметим, что равенство нулю элементов главной диагонали матрицы связи свидетельствует об анизотропном характере дифракции на ДГ в рассматриваемой геометрии, который, как показано в работе [22], позволяет реализовать линейный режим фазовой демодуляции сигнальной волны на ДГ.

В случае, когда вектор перекрестной голограммы K_{12} перпендикулярен оси [001] (угол $\beta = 90^\circ$), матрица связи \hat{H} будет нулевой. Это означает отсутствие взаимодействия между двумя сигнальными волнами, а следовательно, и перекрестного влияния каналов друг на друга. Если же угол $\beta \neq 90^\circ$, то элементы матрицы связи \hat{H} уже не равны тождественно нулю. В этом случае между двумя сигнальными волнами возникнет взаимодействие. Его эффективность, как видно из выражений (1) и (3), будет определяться произведением волнового числа K и элемента h матрицы связи – $\chi = Kh$ (параметр χ при этом может быть принят в качестве количественной меры эффективности взаимодействия).

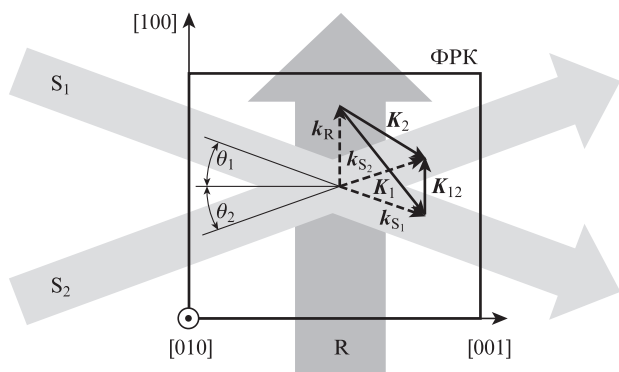


Рис.1. Геометрия мультиплексирования ДГ в ФРК.

Следует отметить, что как K , так и h определяются направлениями распространения взаимодействующих волн. Исходя из геометрических соображений (рис.1) можно показать, что для пары волн сигнальная – опорная, считая, что опорная волна направлена строго перпендикулярно оси [001], параметр $\chi_1 = K_1 h_1$ будет определяться углом θ_1 :

$$\chi_1 = k \cos \theta_1, \quad (4)$$

где $k = 2\pi n_0 / \lambda$. В свою очередь для пары волн сигнальная – сигнальная параметр

$$\chi_{12} = k (\cos \theta_1 - \cos \theta_2). \quad (5)$$

Из (5) видно, что если углы θ_1 и θ_2 , под которыми распространяются сигнальные волны в ФРК, одинаковы или равны нулю, то взаимодействия между ними не будет ($\chi_{12} = 0$). Если $\theta_1 \neq \theta_2$, появятся перекрестные помехи, которые будут тем больше, чем больше различие между θ_1 и θ_2 . Учитывая, что χ_1 определяет величину сигнала, а χ_{12} – перекрестные помехи, уровень последних в 1-м канале можно оценить с помощью отношения

$$X = \chi_{12} / \chi_1 = 1 - (\cos \theta_2 / \cos \theta_1). \quad (6)$$

Из (6) видно, что перекрестные помехи растут по мере того, как увеличивается различие между углами, под которыми распространяются сигнальные волны. Рассмотрим случай, когда волна S_1 распространяется в кристалле вдоль кристаллографической оси [001] ($\theta_1 = 0$), а волна S_2 – под максимально возможным углом $\theta_2 = \theta_{\max}$, который определяется углом полного внутреннего отражения: $\theta_{\max} = \arctan(n_0^{-1})$ (при этом угол падения на входную грань кристалла составляет 90°). Для кристалла CdTe ($n_0 = 2.85$) угол $\theta_{\max} = 20.5^\circ$. В таких условиях величина перекрестных помех X составит 6.7%. Очевидно, что на практике такая ситуация не реализуется в силу того, что сигнальные пучки направляются в ФРК под углами, гораздо меньшими 90° .

Используя выражения (5) и (6), можно показать, что при задании максимальных перекрестных помех на уровне -46 дБ (что соответствует собственным шумам в каналах) сигнальные волны могут распространяться внутри ФРК под углами до 6° к оси [001]. Соответственно углы ввода излучения в кристалл могут составлять до 16.5° по отношению к входной грани.

Следует отметить, что приведенный выше теоретический анализ был выполнен для пучков, которые полностью перекрывались в ФРК. Если же на практике световые пучки будут перекрываться лишь частично, это приведет к дополнительному снижению перекрестных помех.

Таким образом, предложенная геометрия имеет большой потенциал с точки зрения создания адаптивных многоканальных интерферометрических систем в силу возможности исключения или обеспечения предельно малого уровня перекрестного шума между мультиплексируемыми каналами, формируемыми сигнальными световыми пучками (в том числе полностью перекрывающимися между собой), которые распространяются в ФРК в довольно широком диапазоне углов.

В то же время следует отметить, что неизбежное в рассматриваемой геометрии мультиплексирования перекрытие световых полей сигнальных пучков в ФРК будет приводить к уменьшению контраста m интерференционных

полей, формирующих голограммы, и, как следствие, к уменьшению сигналов в каналах (в соответствии с системой уравнений (1)). В рамках задачи построения многоканального интерферометра ухудшение контраста становится причиной соответствующего ослабления чувствительности в каналах системы. В свою очередь степень ослабления чувствительности, как будет показано ниже, определяет предел для мультиплексирования каналов, формируемых в одном ФРК.

3. Схема эксперимента

На основе предложенной в работе геометрии мультиплексирования ортогональных ДГ реализован шестиканальный адаптивный волоконно-оптический интерферометр (АВОИ) и выполнено экспериментальное исследование его работы. Схема АВОИ представлена на рис.2,а.

Непрерывное излучение Nd:YAG-лазера делится поляризационным светоделителем на два световых пучка. Один из пучков – опорный – направляется в кристалл CdTe вдоль его кристаллографической оси [100]. Другой пучок дополнительно делится волоконно-оптическим разветвителем 1×6 на шесть световых сигнальных пучков одинаковой мощности, которые направляются по шести многомодовым волоконным световодам (МВС). Каждый МВС играет роль чувствительного элемента в соответ-

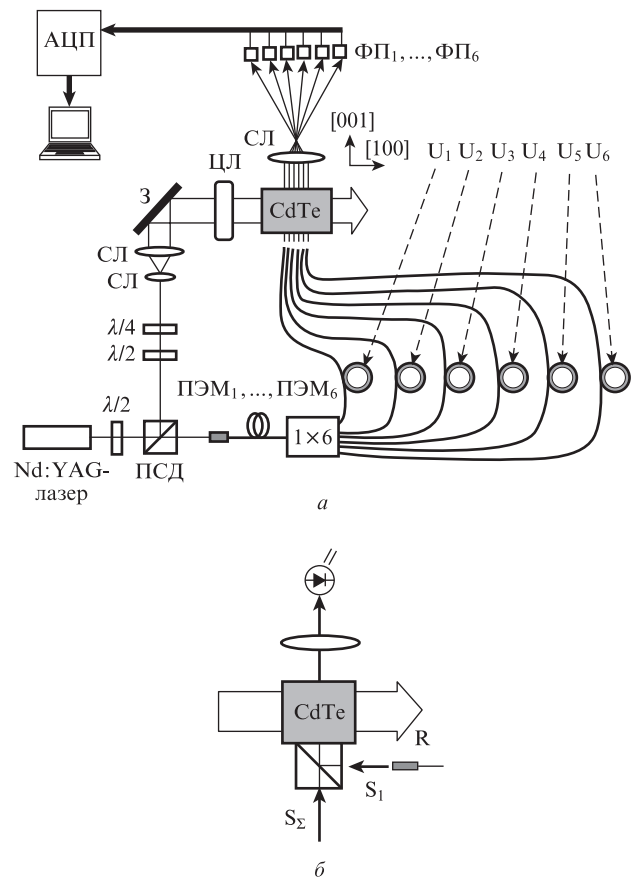


Рис.2. Экспериментальная схема АВОИ (а) и ее модификация для исследования предела мультиплексирования голограмм (б): $\lambda/2$ и $\lambda/4$ – полуволновая и четвертьволновая фазовые пластинки; ПСД – поляризационный светоделитель; СЛ и ЦЛ – сферическая и цилиндрическая линзы; З – зеркало; ПЭМ₁, ..., ПЭМ₆ – пьезоэлектрические модуляторы; ФП₁, ..., ФП₆ – фотоприемники; АЦП – многоканальный аналого-цифровой преобразователь.

ствующем канале измерительной системы. Воздействие измеряемой величины на i -й элемент имитируется с помощью пьезоэлектрического модулятора ПЭМ_{*i*}, на который подается переменное синусоидальное напряжение U_i , приводящее к модуляции фазы i -й сигнальной волны. Сигнальные пучки, вышедшие из МВС, направляются в ФРК вдоль основной кристаллографической оси [001] под прямым углом к опорной волне.

Следует отметить, что эффективное взаимодействие волн в кристалле достигается лишь при определенном состоянии их поляризации, что в большинстве случаев обуславливает необходимость использования поляризационных фильтров [21]. В то же время ДГ, формируемая в ортогональной геометрии, обладает поляризационной селективностью [20], что позволяет устранить поляризаторы из оптического тракта объектных пучков. Как следствие, схема интерферометра существенно упрощается: выходные торцы волоконных световодов могут быть теперь размещены вплотную к входной грани ФРК, благодаря чему нет необходимости в использовании фокусирующих линз. Таким образом, ортогональная геометрия формирования ДГ позволяет реализовать в максимальной сте-

пени потенциал мультиплексирования каналов, число которых теперь будет ограничиваться лишь размерами кристалла и плотностью упаковки волоконных световодов.

Заметим, что угол расходимости световых пучков на выходе из МВС ($NA = 0.22$) составляет 13° . Световоды были расположены по нормали к входной грани кристалла с отклонением до 3° . С учетом преломления излучения в кристалле световые пучки распространялись внутри него в пределах угла $\pm 6^\circ$ к оси [001], для которого в соответствии с выражением (6) уровень перекрестных помех ожидается не выше -46 дБ.

4. Исследование перекрестных шумов

Для исследования перекрестных шумов между каналами АВОИ фазы излучений в них одновременно модулировались с разными частотами (20.5, 16, 12.5, 9, 5.5 и 2 кГц) и одинаковой амплитудой (0.7 рад). Осциллограммы токов фотоприемников, представляющие собой сигналы демодуляции в каждом канале, а также их фурье-спектры, представлены на рис.3, из которого видно, что в спектре излучения каждого канала помимо интенсивной компо-

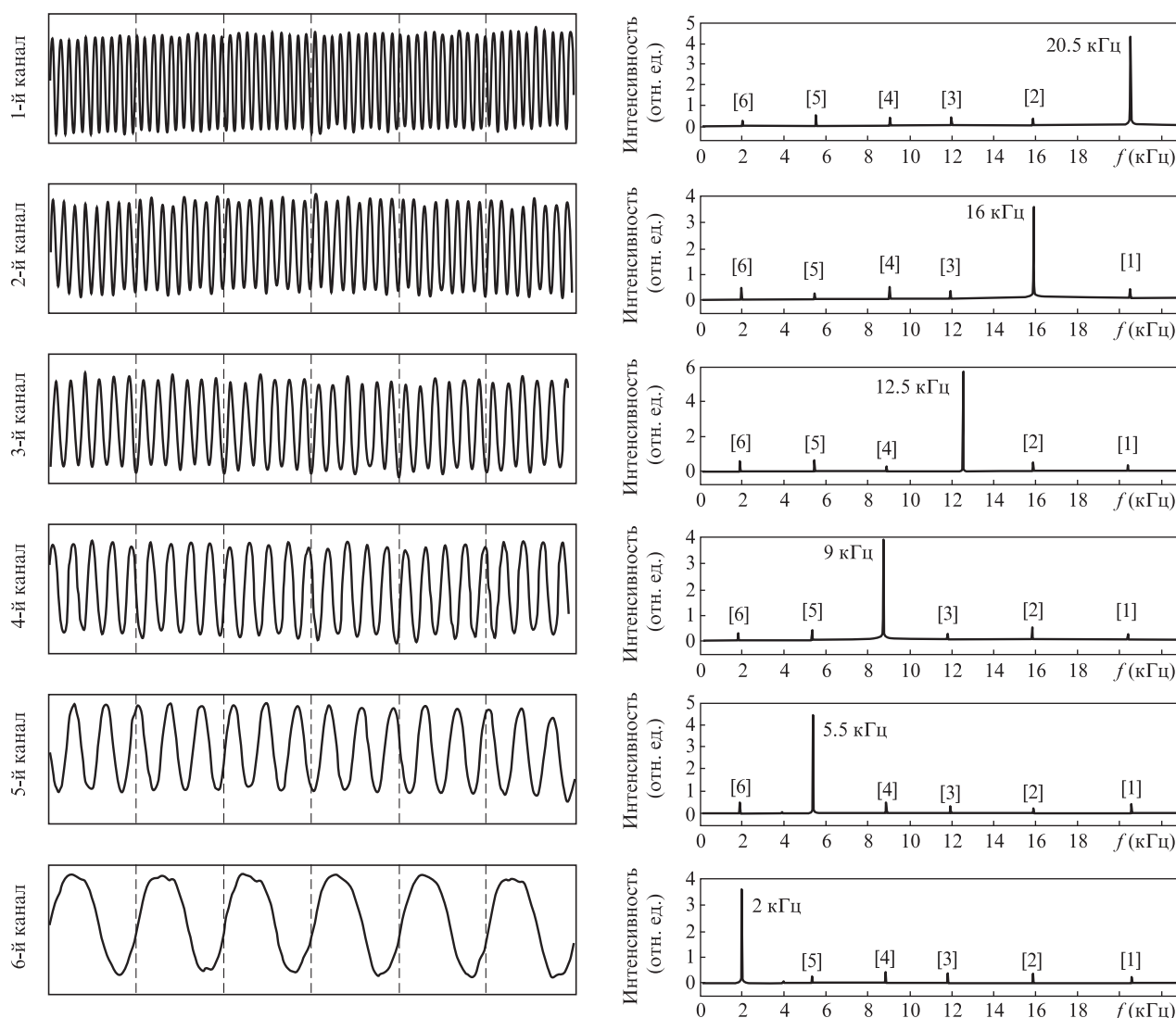


Рис.3. Осциллограммы сигналов демодуляции в каналах шестиканального АВОИ (слева) и их фурье-спектры (справа). Цифры в квадратных скобках – номера других каналов, на частотах которых возникают помехи.

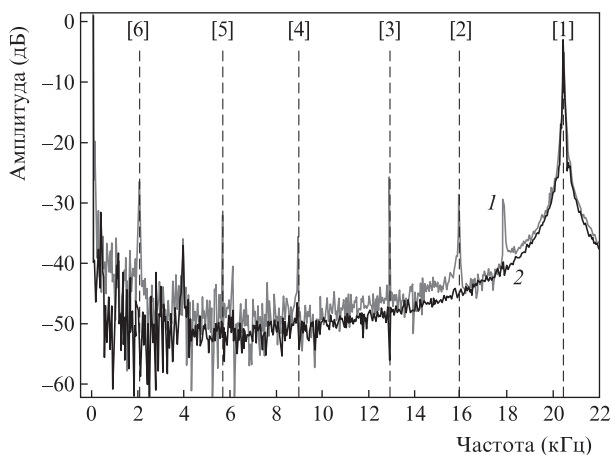


Рис.4. Фурье-спектры сигнала демодуляции в первом канале до (1) и после (2) нанесения иммерсионного масла на торцы волоконных световодов. Цифры в квадратных скобках – номера каналов.

ненты на его рабочей частоте, присутствуют более слабые перекрестные компоненты на частотах других каналов. Более детально фурье-спектр сигнала в 1-м канале показан на рис.4. Видно, что уровень перекрестных помех в среднем равен -29 дБ, в то время как их максимальный уровень составляет -25 дБ (на частоте 3-го канала).

Из рис.3 и 4 видно, что перекрестные помехи оказались больше рассчитанных ранее помех, связанных с взаимодействием сигнальных пучков внутри ФРК. Следовательно, вклад в перекрестный шум вносят другие источники, происхождение которых необходимо выяснить. Появление дополнительных перекрестных помех между каналами может быть связано с рассеянием оптического излучения на неоднородностях в ФРК таким образом, что излучение какого-либо канала попадает в фотоприемники соседних каналов. Другая возможная причина может заключаться в модуляции интенсивности общего опорного светового пучка, используемого для мультиплексирования ДГ в одном ФРК. Кроме того, появление перекрестных помех может быть вызвано отражением излучения от торцов МВС обратно в волоконно-оптический разветвитель, где оно повторно перераспределяется по каналам.

Для оценки вклада указанных источников в общий перекрестный шум были последовательно выполнены измерения сигналов демодуляции в каждом канале при блокировке излучения остальных каналов, в которых сохранялась модуляция фазы (излучение блокировалось перед кристаллом). Было установлено, что уровень перекрестных шумов во всех каналах при этом не изменился. Таким образом, рассеяние оптического излучения на неоднородностях в ФРК, а также модуляция интенсивности общего опорного светового пучка не вносят существенного вклада в общий перекрестный шум.

Для оценки вклада отраженного от торцов МВС оптического излучения торцы были обработаны иммерсионным маслом ($n = 1.516$), в результате чего перекрестные шумы снизились на порядок – их максимальная величина не превысила -47 дБ от основного сигнала демодуляции в канале. В среднем же величина перекрестных шумов составила около -50 дБ, что соответствует рассчитанной теоретически. Эффективность использованного подхода иллюстрирует рис.4, из которого видно, что в спектре сигнала перекрестные помехи стали ниже уровня собственных шумов канала.

5. Чувствительность многоканального АВОИ и предел для мультиплексирования

В работе определена чувствительность многоканального АВОИ. В качестве критерия чувствительности выбран относительный порог детектирования (ОПД), определяемый отношением минимальных значений модуляции фазы, которые могут зарегистрировать адаптивный и классический гомодинный интерферометры соответственно: $\delta = \varphi_a / \varphi_c$ (где $\varphi_c = 1.5 \times 10^{-9}$ рад·Вт^{1/2}·Гц^{-1/2}). Используя результаты, представленные на рис.3, в соответствии с работой [23] для каждого канала был рассчитан ОПД, среднее значение которого составило 14 ± 1 , что соответствует абсолютному порогу детектирования $\varphi_a = 2.1 \times 10^{-8}$ рад·Вт^{1/2}·Гц^{-1/2}. Интерферометр с такой чувствительностью может при использовании излучения мощностью 1 мВт на длине волны 1064 нм детектировать в широкой полосе частот (до 10 МГц) вибрации с амплитудой свыше 1.7 \AA [1].

Создание дополнительных каналов сопряжено с введением в ФРК дополнительных световых пучков, которые в общем случае могут пересекаться с рабочим пучком. Очевидно, что степень влияния дополнительных каналов будет определяться степенью перекрытия световых полей. При этом влияние будет максимальным, если дополнительные пучки полностью перекрываются с рабочим пучком. Такая, наихудшая с точки зрения взаимного влияния, ситуация реализуется в случае, когда все дополнительные пучки распространяются в пределах общей числовой апертуры, что эквивалентно введению в кристалл одного пучка. Этот подход был использован для проведения экспериментальной оценки влияния количества мультиплексированных каналов на чувствительность в рабочем канале. С этой целью экспериментальная установка была модифицирована в соответствии с рис.2,б. В ФРК параллельно рабочему пучку вводился дополнительный гауссов пучок, интенсивность которого была равна суммарной интенсивности всех дополнительных каналов. При этом рабочий канал формировался излучением из МВС мощностью 1 мВт. Рабочий и дополнительный световые пучки имели одинаковый диаметр (1 мм) и полностью перекрывались в кристалле. Мощность дополнительного сигнального пучка варьировалась с помощью блока нейтральных светофильтров в диапазоне 0 – 150 мВт, что эквивалентно формированию до 150 дополнительных каналов. Измерения проводились при трех значениях мощности опорного пучка: 2.4 , 20 и 320 мВт. На рис.5 представлена экспериментально полученная зависимость ОПД в рабочем канале от суммарной эквивалентной мощности дополнительных каналов.

Прежде всего отметим, что наименьший ОПД, соответствующий наибольшей чувствительности интерферометра, достигается при наибольшем соотношении мощностей опорного и сигнального пучков ($320:1$). При этом в случае работы только одного канала ОПД составляет 14 , что соответствует приведенным выше данным. С увеличением мощности дополнительного пучка чувствительность в рабочем канале падает, а ОПД соответственно растет. Однако увеличение ОПД не является значительным. Так, в случае введения в кристалл излучения, эквивалентного излучению 70 дополнительных каналов, ОПД увеличивается всего на 10% . Следует отметить, что в данном случае реализуется наименее предпочтительная ситуация, когда излучения дополнительных каналов пол-

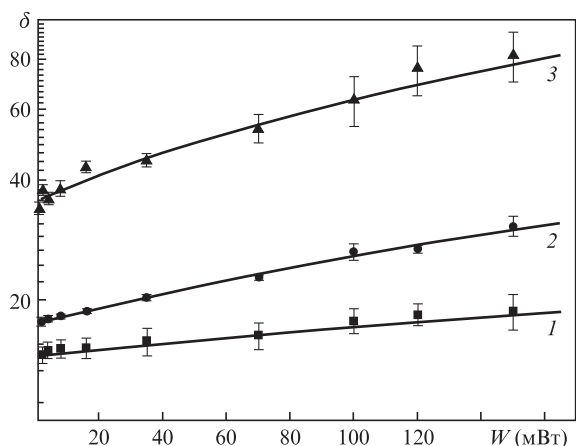


Рис.5. Зависимости ОПД в отдельном канале от суммарной эквивалентной мощности дополнительных каналов W при соотношении интенсивностей опорного и сигнального пучков 320:1 (1), 20:1 (2) и 2.4:1 (3). Сплошные кривые – результаты расчета, точки – экспериментальные данные.

ностью перекрываются как друг с другом, так и с рабочим пучком.

На рис.5 приведены также результаты расчета ОПД, выполненные на основе численного решения уравнения (1) с учетом ухудшения контраста интерференционной картины в канале с ростом числа каналов. Видно, что результаты расчета достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Это подтверждает тот факт, что основная причина снижения чувствительности в каналах АВОИ связана с ухудшением контраста интерференционного поля, формирующего голограмму.

6. Заключение

Таким образом, в настоящей работе предложена и исследована новая геометрия мультиплексирования ДГ, практически исключающая появление перекрестных помех. На ее основе реализована шестиканальная волоконно-оптическая адаптивная интерферометрическая система. Экспериментально установлена основная причина появления в интерферометре перекрестных шумов, которая связана с отражением излучения от торцов волоконных световодов. При обработке торцов световодов иммерсионным маслом перекрестные помехи уменьшились и составили не более -47 дБ отя основного сигнала в канале, что не превышает собственных шумов в каналах. Определен порог детектирования в каждом канале интерферометрической

системы, который составил 2.1×10^{-8} рад·Вт^{1/2}·Гц^{-1/2}. Выполнена экспериментальная оценка предела для мультиплексирования каналов в кристалле. Установлено, что с увеличением числа каналов порог детектирования увеличивается, однако это увеличение оказывается незначительным. Показано, что формирование 70 каналов в условиях полного перекрытия их световых полей приводит лишь к 10%-ному уменьшению ОПД в рабочем канале.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-98522-р_восток_a) и Минобрнауки РФ (ГК 11.519.11.3002).

1. Wagner J.W., Spicer J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **4**, 1316 (1987).
2. Hall T.J., Fiddy M.A., Ner M.S. *Opt. Lett.*, **5** (11), 485 (1980).
3. Stepanov S.I. *Adaptive Interferometry: A New Area of Applications of Photorefractive Crystals* (New York–London: Acad. Press, Inc., 1991).
4. Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Yu.N. *J. Appl. Phys.*, **105**, 031101 (2009).
5. Dewhurst R.J., Shan Q. *Meas. Sci. Technol.*, **10**, R139 (1999).
6. Solyman L., Webb D. J., Grunnet-Jepsen A. *Physics and Applications of Photorefractive Materials* (Oxford University Press, 1996).
7. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. *Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике* (С.-Пб.: Наука, 1992).
8. Peng L., Yu P., Nolte D.D., Melloch M.R. *Opt. Lett.*, **28**, 396 (2003).
9. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Камшилин А.А., Ромашко Р.В. *Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей* (М.: Физматлит, 2009).
10. Udd E. *Fiber Optic Smart Structures* (New Jersey: Wiley, 1995).
11. Huston D. *Structural Sensing, Health Monitoring and Performance Evaluation* (Boca Raton: Taylor & Francis, 2009).
12. Кульчин Ю.Н. *Распределенные волоконно-оптические измерительные системы* (М.: Физматлит, 2001).
13. Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В., Пискунов Е.Н., Камшилин А.А. *Письма в ЖТФ*, **26** (12), 23 (2000).
14. Fomitchov P., Murray T.W., Krishnaswamy S. *Appl. Opt.*, **41** (7), 1262 (2002).
15. Qiao Y., Zhou Y., Krishnaswamy S. *Appl. Opt.*, **45** (21), 5132 (2006).
16. Astratov V.N., Furman A.S., Plinskii A.V., Repin S.M. *Phys. Status Solidi B*, **163** (1), 135 (1991).
17. Delaye P., Blouin A., Drolet D., De Montmorillon L.-A., Roosen G., Monchalin J.-P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **14**, 1723 (1997).
18. Ромашко Р.В., Безрук М.Н. *Сборник трудов Научной сессии МИФИ-2011* (М., 2011, с. 34–35).
19. Sturman B.I., Podivilov E.V., Ringhofer K.H., Shamonina E., Kamenov V.P., Nippolainen E., Prokofiev V.V., Kamshilin A.A. *Phys. Rev. E*, **60**, 3332 (1999).
20. Romashko R.V., Di Girolamo S., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **27** (2), 311 (2010).
21. Kamshilin A.A., Raita E., Khomenko A.V. *J. Opt. Soc. Am. B*, **13**, 11 (1996).
22. Kamshilin A.A., Grachev A.I. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 2923 (2002).
23. Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Yu.N., Launay J.-C. *Opt. Express*, **15** (2), 545 (2007).