

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ КВАЗИ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОТКЛИКА МАЛОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

А.В. Бурдин^{1*}, О.Г. Морозов², А.А. Василец^{2*},
А.М. Кафарова¹, А.Ю. Минаева¹, Н.Л. Севрук¹

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара, 443010, Российская Федерация

*Адрес для переписки: bourdine@yandex.ru

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
Казань, 420111, Российская Федерация

*Адрес для переписки: a.vasilets@mail.ru

Информация о статье

УДК 621.373.826

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Бурдин А.В., Морозов О.Г., Василец А.А., Кафарова А.М., Минаева А.Ю., Севрук Н.Л. Экспериментальная апробация квази-интерферометрической схемы регистрации внешних механических воздействий на основе анализа отклика маломодового оптического сигнала // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 2. С. 37–50.

Аннотация: В работе представлены результаты экспериментальной апробации квази-интерферометрической схемы регистрации внешних механических воздействий на распределенный сенсор, представляющий собой строительные длины кварцевых градиентных многомодовых оптических волокон 50/125 с центральным габаритным дефектом профиля показателя преломления, возбуждаемых когерентным источником оптического излучения. Приведены результаты измерения импульсных откликов соответствующих модификаций схемы, дополненной, в зависимости от конфигурации, прецизионными макроструктурными дефектами и/или волоконной решеткой Брэгга, для различной степени приложенной внешней механической нагрузки.

Ключевые слова: маломодовый режим, маломодовые эффекты, многомодовые оптические волокна, градиентный профиль показателя преломления, дифференциальная модовая задержка, распределенный сенсор, волоконная решетка Брэгга, макроструктурный дефект.

EXPERIMENTAL APPROBATION OF QUASI-INTERFEROMETRIC SCHEME FOR OUTER MECHANICAL STRESS DETECTION BASED ON FEW-MODE OPTICAL SIGNAL RESPONSE ANALYSIS

A. Bourdine¹, O. Morozov², A. Vasilets²,
A. Kafarova¹, A. Minaeva¹, N. Sevruc¹

¹Povolzhskiy State University of Telecommunication & Informatics, Samara, 443010, Russian Federation

²Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, Kazan, 420111, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Bourdine A., Morozov O., Vasilets A., Kafarova A., Minaeva A., Sevruk N. Experimental Approbation of Quasi-Interferometric Scheme for Outer Mechanical Stress Detection Based on Few-Mode Optical Signal Response Analysis // Proceedings of Educational Institutes of Communication. 2017. Vol. 3. Iss. 1. PP. 37–50.

Abstract: *This work is concerned with experimental approbation of quasi-interferometric scheme for detection of outer mechanical stress via distributed fiber optic sensor. The sensor is excited by laser source silica graded-index multimode optical fiber with great defect of refractive index profile in the center core region. We present some results of pulse response measurements performed under various stress order and various scheme configurations differing by adding fiber Bragg gratings and macrostructure defects like tapers or up-tapers.*

Keywords: *few-mode regime, few-mode effects, multimode optical fibers, graded index refractive index profile, differential mode delay, distributed fiber optic sensor, fiber Bragg grating, macrostructure defect, taper, up-taper.*

В настоящее время для ряда практических приложений возникает задача регистрации локальных и распределенных механических воздействий на поверхность контролируемого объекта – например, давления, нагрузки, деформации и пр. Известен целый ряд коммерческих волоконно-оптических датчиков [1–5], успешно решающих данную проблему с применением таких методов, как оптическая рефлектометрия, интерферометрия, поляриметрия и др.

В ранее опубликованных работах [6–8] были продемонстрированы потенциальные возможности разработанного альтернативного способа регистрации внешних воздействий. Последний, в отличие от классических подходов, реализуемых как в коммерческих системах волоконно-оптических датчиков сенсорных сетей, так и подавляющем большинстве проприетарных решений [1–5], базируется на маломодовых эффектах, возникающих в процессе передачи оптического сигнала, генерируемого когерентным источником излучения, по многомодовым оптическим волокнам (ММ ОВ).

В целом, возбуждение достаточно коротких отрезков ОВ – от нескольких сантиметров и даже менее до метровых и более длин – с увеличенным, по сравнению с традиционными одномодовыми (SM) ОВ, диаметром сердцевины, с помощью лазера, в том числе через SM согласующий световод, достаточно широко используется, например, при реализации разнообразных интерферометрических схем [1, 9–11]. Целый ряд публикаций посвящен приложению волоконных решеток Брэгга (ВРБ), записанных на отрезках ММ ОВ, и проявляющихся в них эффектах для различных схем волоконно-оптических датчиков – вибраций, температуры, деформаций и пр., например, [12–14] и др. Здесь необходимо отметить, что подавляющее большинство схем, представленных в указанных работах, ориентированы исключительно на анализ спектрального отклика той или иной волоконно-оптической структуры с включением отрезка ММ ОВ, при возбуждении когерентным источником (лазером непрерывного

или, напротив, модулированного излучения), что соответствует непосредственно маломодовому режиму передачи, когда оптический сигнал переносится ограниченным модовым составом [15]. В отдельную группу целесообразно выделить публикации, ориентированные на регистрацию и обработку зондирующего сигнала и/или его отклика при прохождении протяженных длин ММ ОВ методами оптической рефлектометрии во временной области (фактически, на сегодняшний день для этих приложений ММ ОВ вытеснены SM ОВ [3, 16]) и анализа спекл-структур [3, 17–19].

В отличие от известных решений, ранее разработанный альтернативный подход регистрации внешних воздействий [6–8] базируется на анализе изменения отклика маломодового оптического сигнала малой длительности при прохождении распределенного сенсора – кварцевого градиентного многомодового ОВ кат. OM2 с сильным проявлением дифференциальной модовой задержки (ДМЗ), возбуждаемого когерентным источником оптического излучения. Вход и выход схемы подключаются непосредственно к выходу передающего и входу приемного оптических модулей анализатора ДМЗ R2D2 [20–22]. В процессе мониторинга выполняется сравнение «опорной» и «текущей» формы импульса, детектируемой на выходе тестируемого ММ ОВ. Благодаря приложенному внешнему локальному или распределенному механическому воздействию на ММ ОВ сенсора появляются новые микро- и макроизгибы, что неизбежно меняет процессы взаимодействия и смешения модовых компонентов сигнала. В свою очередь, это существенно влияет на изменение искаженной за счет ДМЗ формы импульсного отклика, в том числе, на изменение соотношения нормированных амплитуд главного максимума и периферийных пиков.

Полученные результаты экспериментальных и теоретических исследований создали предпосылки для модификации исходной простой конфигурации схемы регистрации внешних механических воздействий к ее модификации – так называемой квази-интерферометрической схеме измерения импульсного отклика маломодового оптического сигнала. Данную схему, внешний вид базовой конфигурации которой представлен на рис. 1, было предложено реализовать на основе каскадного соединения многомодовых Y-разветвителей 50:50 «6» и «10» с предварительно выровненными плечами «8'» и «8''». Вход и выход квази-интерферометрической схемы подключаются непосредственно к выходу передающего «1» (SM ЛД, $\lambda = 1310$ нм, пигтелирован стандартным SM ОВ рек. ITU-T G.652 FC/UPC «2») и входу приемного «15» (ММ пигтейл кат. OM2+ FC/UPC «14») оптических модулей анализатора ДМЗ R2D2 через проходные волоконно-оптические розетки FC/UPC «3» и «13». Входной порт разветвителя «6» и выходной порт разветвителя «10» оконцованы ММ пигтейлами кат. OM2+ (ММ ОВ 50/125) FC/UPC, подваренными с помощью сварочного аппарата Ericsson FSU-975 по штатной программе сварки ММ ОВ № 04 «ММ–ММ» [23] строго центрировано без каких-либо радиальных рассогласований – сварки «5» и «11».

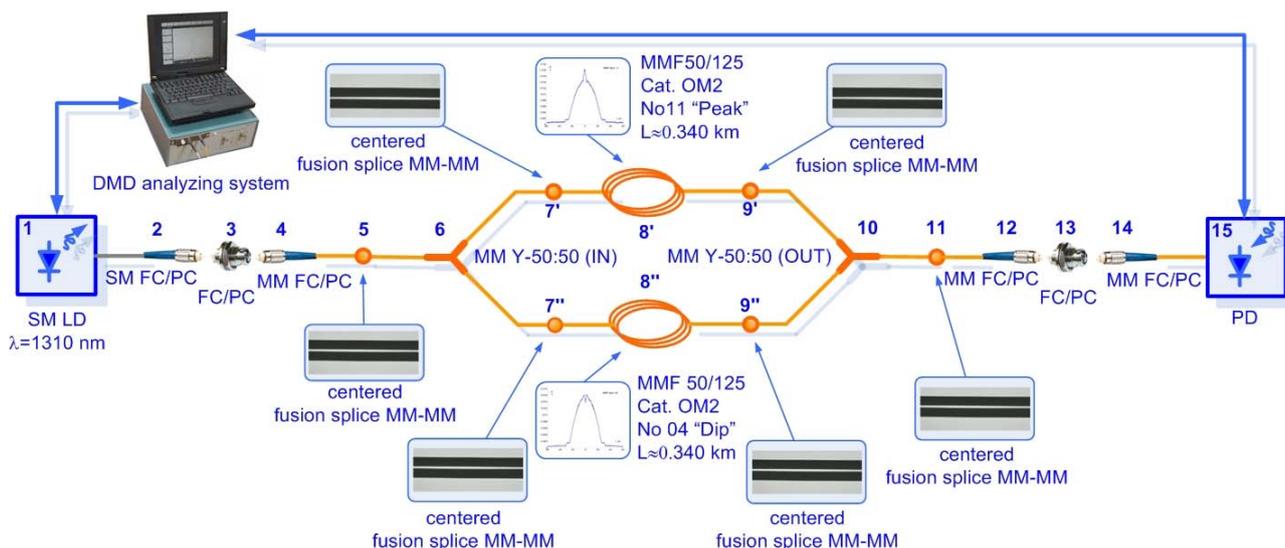


Рисунок 1. Базовая конфигурация квази-интерферометрической схемы измерения импульсного отклика маломодового оптического сигнала

На этом этапе было предложено рассматривать плечо «8'» интерферометра как «опорное», а «8''» – как «сенсорное». В качестве первого использовалась бухта ММ ОВ 50/125 кат. OM2 отечественного производства длиной порядка 340 м с характерным технологическим дефектом градиентного профиля преломления в виде габаритного пика в центре сердцевины (образец ММ ОВ № 04 [24, 25]) (рис. 2а), сильным проявлением ДМЗ и стабильным характером и степенью проявления данного эффекта [6–8], вне зависимости от приложенных локальных или распределенных механических нагрузок.

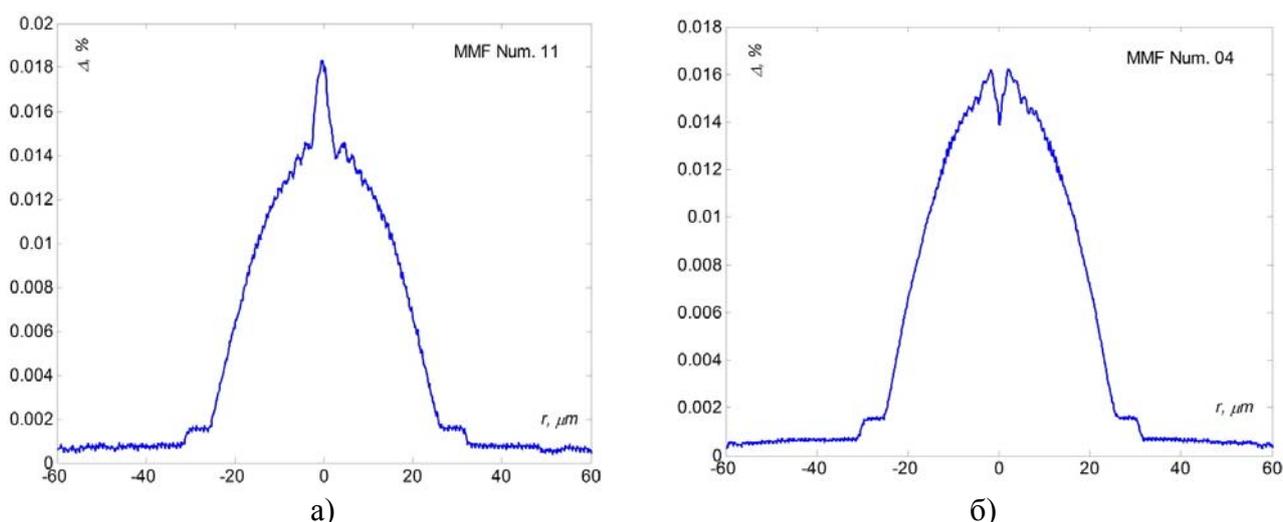


Рисунок 2. Профили показателя преломления многомодовых ОВ, используемых в базовой конфигурации квази-интерферометрической схеме (см. рис. 1): а) ОВ №11 – «опорное» плечо «8'»; б) ОВ №04 – «сенсорное» плечо «8''»

Напротив, «сенсорное» плечо «8''» схемы представляло собой бухту ММ ОВ 50/125 кат. OM2 идентичной протяженности, но уже центральным дефек-

том профиля в виде габаритного провала (образец ММ ОВ №11 [24, 25]) (рис. 2б), также с сильным проявлением, и повышенной, согласно результатам ранее проведенных экспериментальных исследований [6–8], чувствительностью к внешним воздействиям, с точки зрения нестабильности искаженной формы импульсного отклика при передаче оптического сигнала в маломодовом режиме. В общем случае, предварительно описанные длины ММ ОВ выравнивались с помощью оптического рефлектометра обратного рассеяния во временной области (OTDR), далее – с применением анализатора ДМЗ R2D2, таким образом, чтобы результирующий импульсные отклик, снимаемый на выходе схемы, располагался в пределах масштабной шкалы 0...10 нс.

Предполагалось, что наличие двух независимых «опорного» и «сенсорного» плеч позволит не только осуществить регистрацию механического воздействия, но и оценить степень его проявления. Для проверки данной гипотезы была проведена серия тестов, включающая в себя измерения импульсного отклика маломодового сигнала, генерируемого одномодовым ЛД передающего модуля анализатора ДМЗ на длине волны 1310 нм (квазигауссова форма, исходная длительность 340 пс) до и после приложенного с разными усилиями воздействий («слабое» 200 Н и «сильное» 500 Н, а также намотка 10 витков ОВ на оправку диаметром 8 мм) как на «сенсорное», так и «опорное» плечи схемы. На рис. 3а представлена диаграмма динамики формы импульсных откликов в зависимости от характера механического воздействия, на рис. 3б – результаты сопоставления форм импульсных откликов без и в условиях «сильного» воздействия на плечи измерительной схемы.

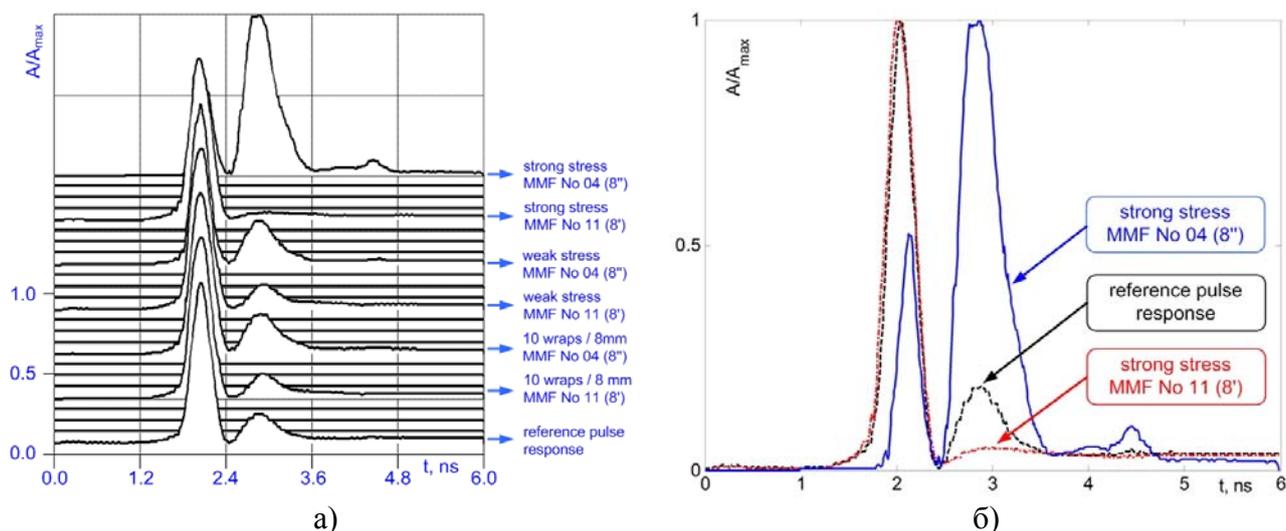


Рисунок 3. Результаты измерения: а) диаграмма динамики формы импульсных откликов в зависимости от степени и характера приложенного механического воздействия; б) сопоставление форм импульсных откликов без и в условиях «сильного» воздействия на плечи измерительной схемы

В отличие от [6–8], сравнительный анализ опорной формы импульсного отклика и формы импульсного отклика при внешнем механическом воздействии на ОВ включал в себя оценку смещения периферийных пиков относи-

тельно главного опорного для одного и того же отклика максимума уже не только по нормированной амплитуде, но и по задержке. Анализ полученных результатов подтвердил сделанное выше предположение. Так, переход к предложенной квази-интерферометрической конфигурации измерительной схемы регистрации внешних воздействий на основе маломодовых эффектов добавил в пространство параметров еще одно новое измерение: в отличие от базовой схемы на одном ММ ОВ, помимо отклонения нормированной амплитуды периферийного пика относительно главного максимума, наблюдается также его смещение и во времени, в зависимости от степени приложенного воздействия.

На втором этапе были проведены следующие 2 модификации базовой конфигурации квази-интерферометрической схемы, результаты которых представлены на рис. 4. Так, для повышения чувствительности схемы к внешним механическим воздействиям, оказывающих в большей степени влияние на моды средних и высших порядков, радиальное распределение поля которых, в отличие от низших направляемых мод, сосредоточено в периферийной части сердцевины и/или ближе к границе раздела сердцевина/оболочка, ввод сигнала с выхода ЛД передающего модуля R2D2 «1» стал выполняться через согласующий пигтейл FC/UPC «4» со стандартным SM ОВ рек. ITU-T G.652, подваренным к входному порту ММ Y-разветвителя «6» с сильным прецизионным радиальным смещением 7,5 мкм с помощью сварочного аппарата Ericsson FSU-975 по программе № 8 «Аттенюатор» [23], позволяющей непосредственно устанавливать искомое значение параметра «offset adjustment» («коррекция смещения»). Кроме того, сенсорное плечо «8''» было дополнено волоконной решеткой Брэгга (ВРБ) «17''», записанной на коротком, порядка 40 см отрезке ММ ОВ кат. OM2+/OM3 с длиной волны Брэгга $\lambda = 1550$ нм [26–28]. При этом в данном случае ВРБ рассматривалось уже не в виде волоконно-оптического рефрактора заданной оптической несущей, а в качестве прецизионного локального микродефекта с периодической микроструктурой, обеспечивающего управление модовым составом маломодового оптического сигнала.

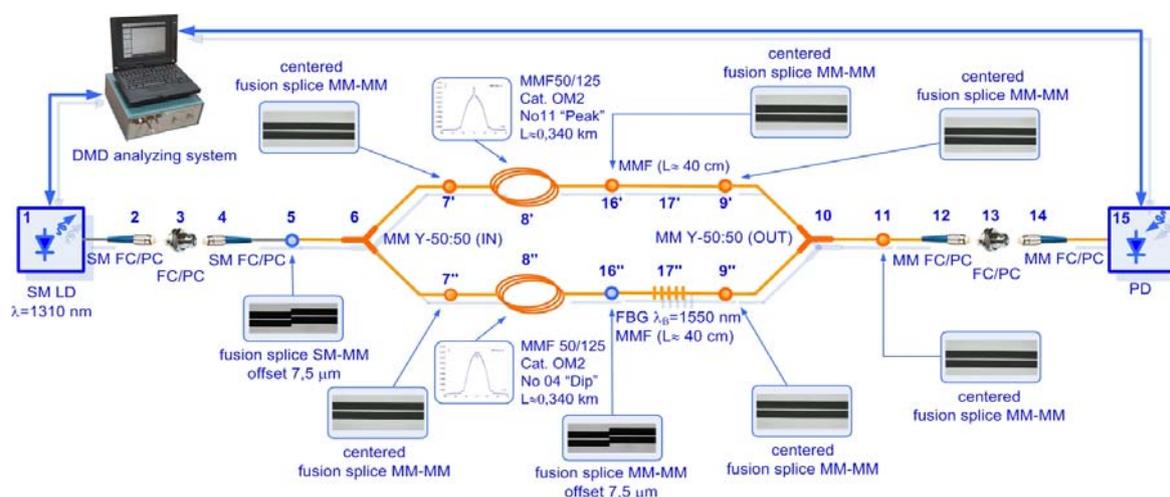


Рисунок 4. Квази-интерферометрическая схема измерения импульсного отклика маломодового оптического сигнала со смещенным вводом и ВРБ в «сенсорном» плече

Вход ВРБ, записанной на ОВ «17'», подваривался к выходу «сенсорного» плеча «8'» с указанным сильным прецизионным радиальным смещением 7,5 мкм (сварка «16'»), выход – напротив, по стандартной программе сварки ММ ОВ № 4 «ММ–ММ» строго центрированно без каких-либо рассогласований («9'»). Для балансировки плеч квази-интерферометра между выходом второго «опорного» плеча «8'» и соответствующим портом Y-разветвителя был центрированно также по стандартной программе № 4 «ММ–ММ» вварен отрезок ММ ОВ кат. ОМ2+/ОМ3 «17'» аналогичной длины 40 см (сварки «16'» и «9'»). На рис. 5 представлены формы импульсных откликов для поочередного «сильного» и «слабого» воздействий на «сенсорное» и «опорное» плечи схемы. Результаты оценки смещения периферийных пиков относительно главного опорного максимума по задержке и нормированной амплитуде для базовой конфигурации схемы и схемы с включением ВРБ в сенсорное плечо сведены в таблице.

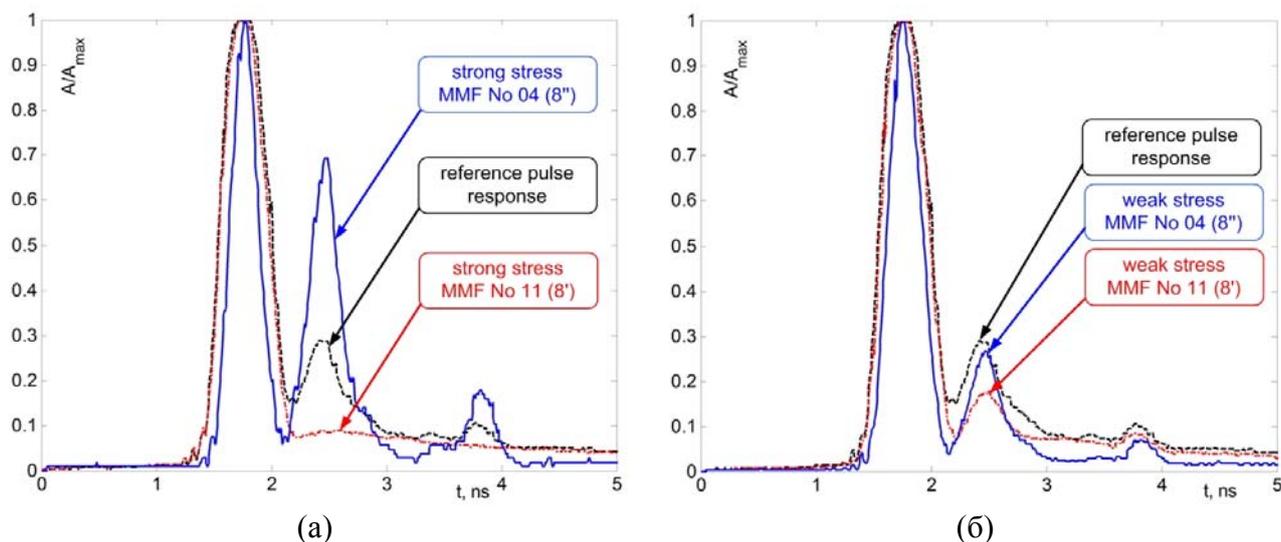


Рисунок 5. Сопоставление форм импульсных откликов в условиях воздействия на «сенсорное» и «опорное» плечи схемы: а) «сильное» 500 Н; б) «слабое» 200 Н

Таблица. Результаты оценки смещения периферийных пиков

Механическое воздействие	Базовая конфигурация		ВРБ + смещенный ввод	
	ΔA_{norm}	Δt_{delay} , пс	ΔA_{norm}	Δt_{delay} , пс
«сенсор.» (04): «сильное» 500 Н	0,34	124,00	0,40	75,70
«сенсор.» (04): «слабое» 200 Н	0,09	2,72	0,02	72,45
«сенсор.» (04): витки на оправке	0,06	7,40	0,04	89,05
«опорн.» (11): «сильное» 500 Н	0,13	128,00	0,20	179,70
«опорн.» (11): «слабое» 200 Н	0,03	18,00	0,11	120,50
«опорн.» (11): витки на оправке	0,03	17,50	0,11	120,34

Анализ полученных данных показал следующее. Оба рассмотренных варианта реализации схемы обеспечили регистрацию «сильного» внешнего механического воздействия. Благодаря наложению импульсных откликов с выходов «плеч» схемы, данный эффект регистрировался не только для «сенсорного» ММ ОВ, но и для «опорного» ММ ОВ с центральным дефектом профиля показателя преломления в виде провала, которое в простом базовом одноволоконном исполнении с подключением к R2D2, согласно проведенным в [6–8] серии экспериментальных тестов, отличалось, напротив, повышенной устойчивостью к внешним воздействиям, с точки зрения изменения искаженной за счет ДМЗ формы импульсного отклика относительно исходной. Здесь следует отдельно отметить существенное смещение периферийного пика относительно главного максимума по времени на от 75 до 180 пс относительно начального значения. Более того, включение ВРБ в «сенсорное» плечо обеспечило также детектирование уже «слабого» воздействия, причем также и в «сенсорном», и в «опорном» плечах схемы: здесь смещение периферийного пика относительно главного максимума по времени составило 72 пс для ММ ОВ № 04 и 120 для ММ ОВ № 11, соответственно.

Вышесказанное позволило сделать предварительное предположение о потенциальных возможностях использования предложенных конфигураций квазиинтерферометрической схемы, в том числе, дополненной смещенным вводом сигнала с выхода лазера и включением ВРБ, записанной на ММ ОВ, для регистрации внешних локальных и распределенных механических воздействий в альтернативных распределенных сенсорных системах на базе маломодовых эффектов. Поэтому на следующем этапе модификации схемы было предложено уже в обоих плечах квазиинтерферометра использовать ММ ОВ кат. ОМ2 с центральным провалом профиля, которые, как было показано в упоминавшихся работах [6–8], отличаются сильным проявлением ДМЗ при одновременной повышенной чувствительности к механическим нагрузкам, с точки зрения изменения формы импульсного отклика. Здесь, в отличие от предыдущей версии, каждое плечо интерферометра состояло из двух компонентов – катушки ММ ОВ кат. ОМ2 протяженностью порядка 500 м с сильным проявлением ДМЗ (А-04-01 «8-1'» и А-04-02 «8-1''») и бухты этого же ММ ОВ длиной около 100 м, выполняющей функции распределенного сенсора (А-04-03 «8-2'» и «8-2''») (см. рис. 6). Профили показателя преломления перечисленных промышленных образцов строительных длин ММ ОВ представлены на рис. 7.

Так же, как и в предыдущем случае, вход разветвителя «6» оконцован одномодовым SM пигтейлом FC/UPC «4» с помощью сварочного аппарата Ericsson FSU-975 по программе № 8 «Аттенюатор» с сильным осевым смещением 7,5 мкм (сварка «5»), в то время как выход разветвителя «10» подварен к ММ пигтейлу «12» строго соосно (сварка «11»). Как было показано выше, предложенный квазиинтерферометр обеспечивает регистрацию сильных внешних механических воздействий. Поэтому для этой модификации схемы была проведена серия тестов, ориентированных, напротив, на экспериментальные исследова-

дования возможности регистрации слабых механических воздействий 2...20 Н на основе анализа изменения формы импульсного отклика.

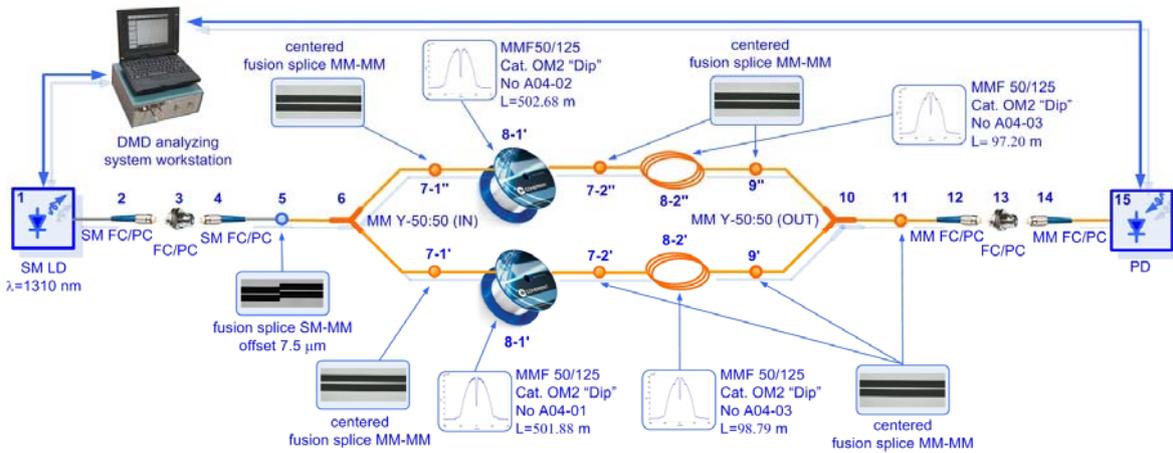


Рисунок 6. Модификация квази-интерферометрической схемы с двухкомпонентными плечами

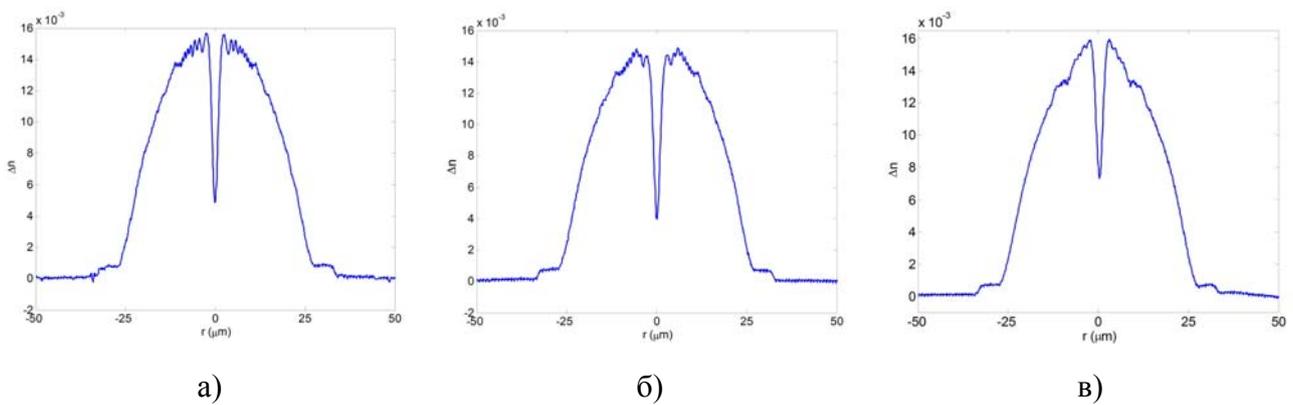


Рисунок 7. Профили показателя преломления MMF ОБ двухкомпонентных плеч квази-интерферометрической схемы (см. рис. 6):
 а) А-04-01 «8-1''»; б) А-04-02 «8-1''»; в) А-04-03 «8-2''»/«8-2''»

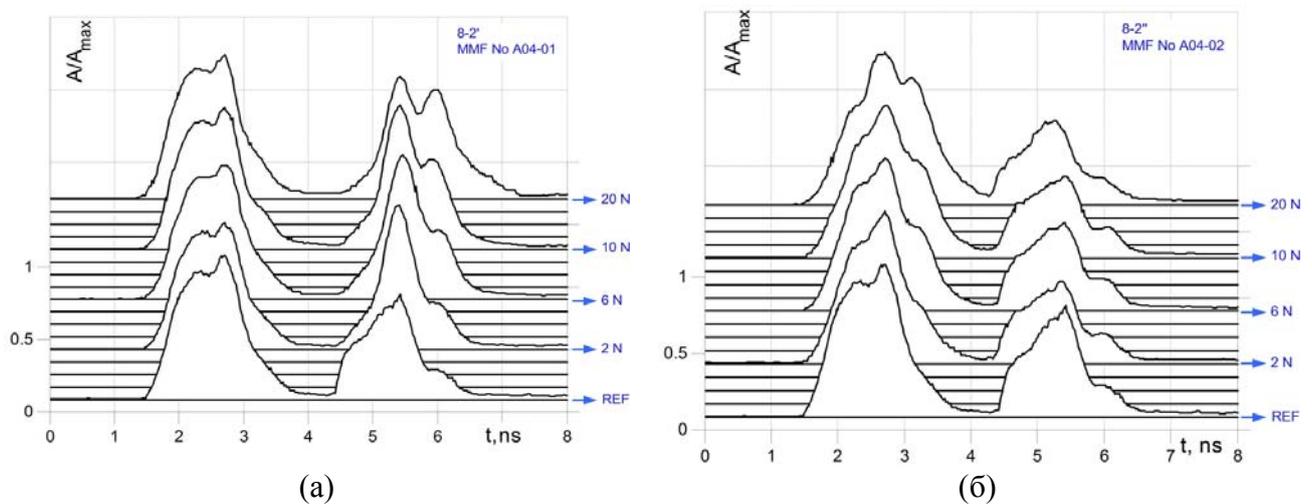


Рисунок 8. Диаграмма динамики формы импульсных откликов в зависимости от степени и характера приложенного механического воздействия: а) сенсор «8-2''»; б) сенсор «8-2''»

Результаты сопоставления измерения последних при воздействии 2, 6, 10 и 20 Н на сенсоры «8-2'» и «8-2''» каждого из плеч схемы в виде диаграмм динамики представлены на рис. 8а и 8б, а их наложение для приложенных усилий 2 Н и 20 Н – на рис. 9а и 9б, соответственно.

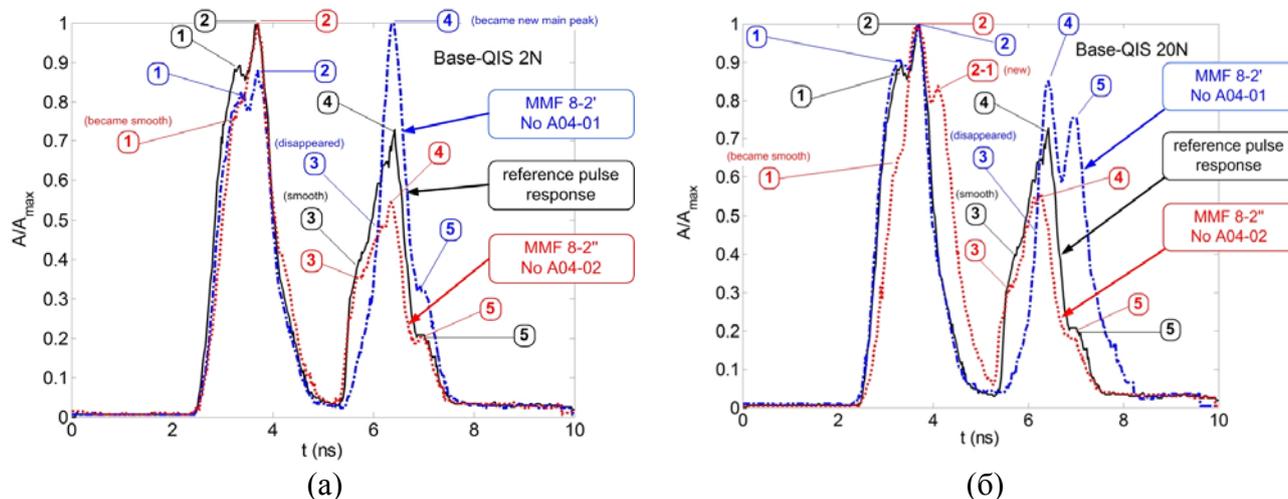


Рисунок 9. Сопоставление форм импульсных откликов в условиях воздействия:
а) 2Н и б) 20 Н на сенсоры плеч схемы

Анализ полученных результатов показывает, что базовая конфигурация представленной модификации схемы обеспечивает возможность регистрации приложенного воздействия при одновременной идентификации плеча квази-интерферометра, на которое это воздействие было оказано. Здесь искаженный, благодаря сильному проявлению ДМЗ, импульсный отклик содержит фиксированный главный (опорный) максимум № 2 (рис. 9) и периферийный пик № 4 (рис. 9), положение которого меняется по задержке и нормированной амплитуде относительно опорного. Так, при воздействии 20 Н на сенсор «8-2'» наблюдается увеличение амплитуды локального максимума № 5, таким образом, что отклонение данного параметра относительно главного максимума № 2 изменилось с 0,79 до 0,25, в то время как значение задержки составило 3,27 нс вместо 3,24, соответствующей опорному отклику. В свою очередь, при воздействии 20 Н на плечо «8-2''» разность нормированных амплитуд максимумов № 2 и № 4 увеличилась с 0,27 до 0,44, в то время как задержка уменьшилась на 150 пс – от 5,42 нс до 5,27 нс.

На следующем этапе, схема дополнялась включением на выходе сенсора «8-2''» отдельных ВРБ, записанных на отрезках ММ ОВ кат. ОМ2+/ОМ3 с длиной волны Брэгга как 1550 нм, так и 1310 нм, а также аналогичных ВРБ, но уже записанных непосредственно поверх предварительно сформированных в ММ ОВ макроструктурных дефектов типа «перетяжка» и «бочка» (рис. 10а и 10б) [29, 30]. Рассмотренные семь конфигураций предложенной модификации квази-интерферометрической схемы, с точки зрения исследования потенциальных возможностей регистрации слабых внешних механических воздействий, представлены на рис. 11.

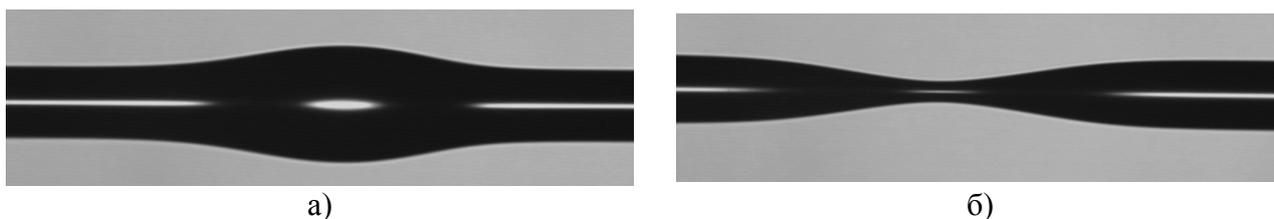


Рисунок 10. Прецизионные макроструктурные дефекты, сформированные в ММ ОВ:
а) «бочка»; б) «перетяжка»

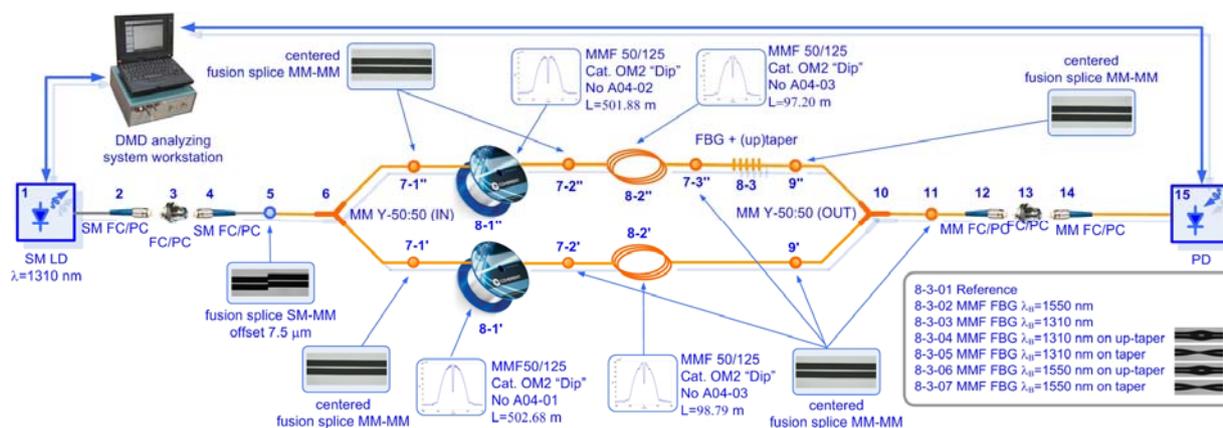


Рисунок 11. Модификация квази-интерферометрической схемы с двухкомпонентными плечами, дополненная ВРБ и макроструктурными дефектами

Результаты измерений в виде построенных на одном полигоне диаграмм динамики импульсного отклика маломодового оптического сигнала, регистрируемого на выходе схемы, в зависимости от приложенного механического воздействия 2...20 Н для перечисленных конфигураций схемы с включением на выходе сенсора «8-2''» макроструктурного дефекта и/или ВРБ, приведены на рис. 12а...12е. Общие результаты изменения положения компонентов импульсных откликов по нормированной амплитуде и задержке, в зависимости от конфигурации схемы и приложенного механического воздействия, представлены в виде сводных диаграмм на рис. 13а и 13б.

Сопоставление полученных данных показало следующее. Наименьший сдвиг по задержке для всей группы рассмотренных схем и проведенной серии тестов составил при воздействии 2 Н $\Delta t_3 = 18,40$ пс и соответствует схеме 8-3-04 (ВРБ $\lambda = 1310$ нм + «бочка»). Максимальное значение этого же параметра при воздействии 20 Н достигало значения $\Delta t_3 = 536,50$ пс для схемы 8-3-06 (ВРБ $\lambda = 1550$ нм + «бочка»). Более того, для ряда схем были зарегистрированы стабильные отклонения по задержке между итерациями последовательно увеличиваемого приложенного воздействия, которые достигали до 15...20 пс. С точки зрения нормированной амплитуды, наибольшую чувствительность к слабым воздействиям продемонстрировали 8-3-01 (базовая) и схемы 8-3-02 (ВРБ $\lambda = 1550$ нм), 8-3-04 (ВРБ $\lambda = 1310$ нм + «бочка») и 8-3-05 (ВРБ $\lambda = 1310$ нм + «перетяжка»): здесь значения отклонения указанного параметра достигали от 0,1 до 0,25, в то время как для остальных конфигураций схем – менее 0,05.

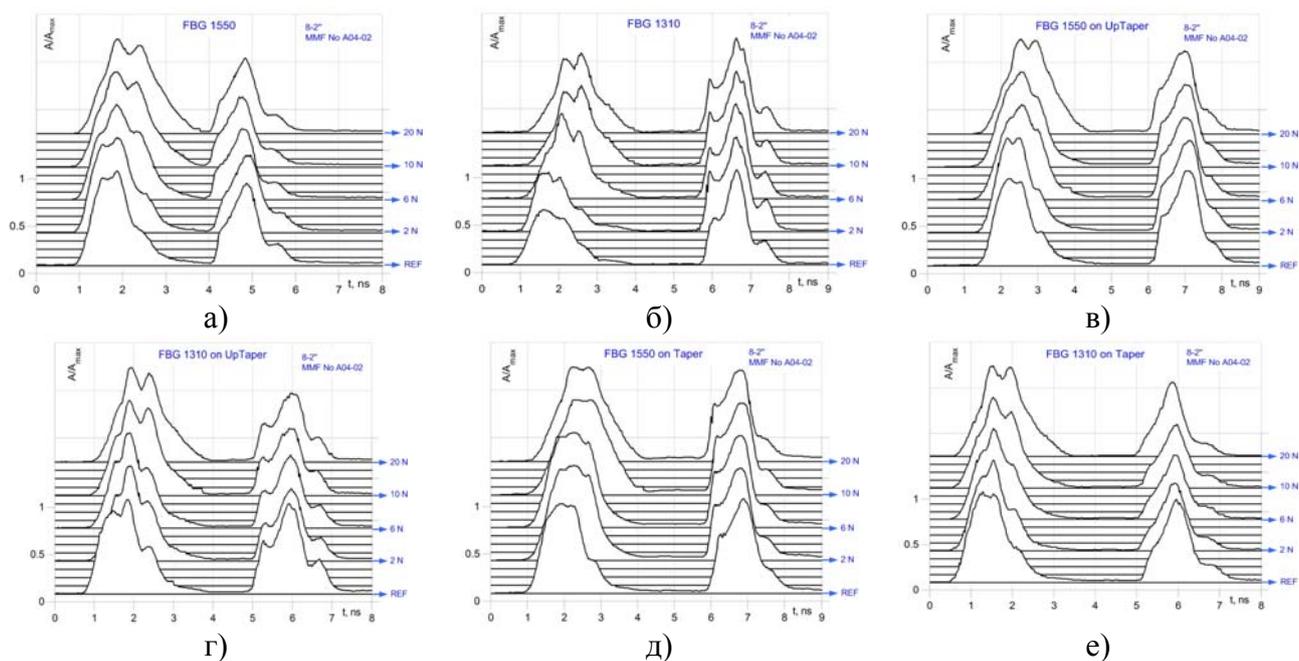


Рисунок 12. Сводные диаграммы динамики изменения формы импульсных откликов в зависимости от степени и характера приложенного механического воздействия на сенсор «8-2"» схемы, дополненный: а) ВРБ $\lambda = 1550$; б) ВРБ $\lambda = 1310$; в) ВРБ $\lambda = 1550$, записанной поверх «бочки»; г) ВРБ $\lambda = 1310$, записанной поверх «бочки»; д) ВРБ $\lambda = 1550$, записанной поверх «перетяжки»; е) ВРБ $\lambda = 1310$, записанной поверх «перетяжки»

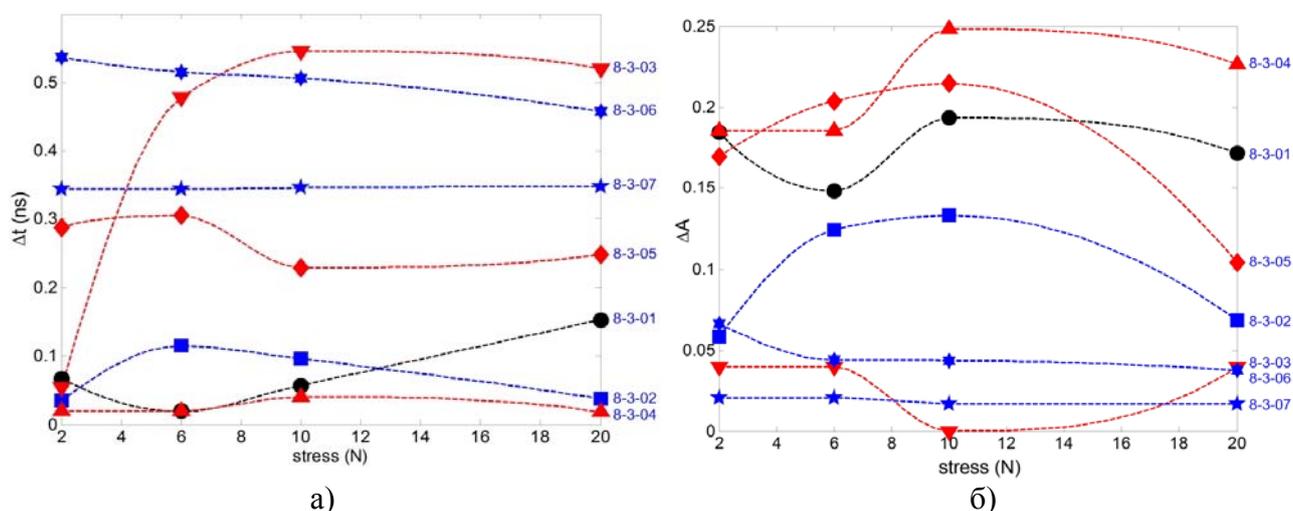


Рис. 13. Сводные диаграммы динамики изменения отклонения положения периферийного пика относительно главного максимума, в зависимости от приложенного механического воздействия: а) по задержке; б) по нормированной амплитуде

Анализ полученных результатов демонстрирует потенциальные возможности использования предложенной квази-интерферометрической схемы не только для регистрации в целом, но и для оценивания степени внешних локальных и распределенных механических воздействий при одновременном обеспечении возможности идентификации плеча схемы, к которому было приложено усилие, а включение дополнительных волоконно-оптических струк-

тур – ВРБ и прецизионных макродефектов – управлять чувствительностью предложенной альтернативной измерительной схемы, функционирующей на базе маломодовых эффектов.

Работа подготовлена при финансовой поддержке гранта Президента РФ в рамках научного проекта МД-9418.2016.8, а также грантов РФФИ в рамках научных проектов № 16-37-50087 мол_нр и № 16-37-50089 мол_нр.

Список используемых источников

1. Grattan L.S., Meggitt B.T. Optical Fiber Sensor Technology. Fundamentals. New York, NY, USA: Springer Science. 2000. 325 p.
2. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит. 2001. 272 с.
3. Куликов А., Игнатъев А. Обзор волоконно-оптических систем охраны периметра // Алгоритмы Безопасности. 2010. № 4. С. 56–61.
4. Krohn D., MacDougall T., Mendez Al. Fiber Optic Sensors. Bellingham: SPIE Press. 2014. 332 p.
5. Rajan G. Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications (Devices, Circuits, and Systems). Boca Raton, FL, USA: CRC Press / Taylor & Francis. 2015. 575 p.
6. Бурдин А.В., Федоров А.А., Тынкован В.О., Баранов К.В., Чивильгин А.Л. Распределенный сенсор на многомодовых оптических волокнах, работающих в маломодовом режиме // Фотон-Экспресс. 2013. № 6 (110). С. 256–257.
7. Бурдин А.В., Дмитриев Е.В., Прапорщиков Д.Е., Севрук Н.Л. Применение кварцевых многомодовых волоконных световодов с габаритным центральным дефектом профиля показателя преломления в распределенных сенсорах волоконно-оптических датчиков на базе маломодовых эффектов // Прикладная Фотоника. 2016. Т. 3. № 3. С. 252–279.
8. Бурдин А.В., Василец А.А., Бурдин В.А., Морозов О.Г. Распределенный сенсор на многомодовых оптических волокнах, дополненных волоконной решеткой Брэгга, функционирующих в маломодовом режиме передачи сигнала // Фотон-Экспресс. 2016. № 6 (134). С. 12–13.
9. Liu Yu, Wei Li. Low-cost High-Sensitivity Strain and Temperature Sensing Using Graded-Index Multimode Fibers // Applied Optics. 2007. Vol. 46 (13). PP. 2516–2519.
10. Xue H., Meng H., Wang W., Xiong R., Yao Q., Huang B. Single-Mode-Multimode Fiber Structure Based Sensor for Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature // IEEE Sensors Journal. 2013. Vol. 13(11). PP. 4220–4223.
11. Li A., Wang Yi., Hu Q., Shieh W. Few-Mode Fiber Based Optical Sensors // Optics Express. 2015. Vol. 23 (2). PP. 1139–1150.
12. Li D., Gong Yu., Wu Yu. Tilted Fiber Bragg Grating in Graded-Index Multimode Fiber and its Sensing Characteristics // Photonic Sensors. 2013. Vol. 3 (2). PP. 112–117.
13. Fang Sh., Li B., Song D., Zhang J., Sun W., Yuan L. A Smart Graded-Index Multimode Fiber Based Sensor Unit for Multi-Parameter Sensing Applications // Optics and Photonics Journal. 2013. Iss. 3. PP. 265–267.
14. Schmid M.J., Muller M.S. Measuring Bragg Gratings in Multimode Optical Fibers // Optics Express. 2015. Vol. 23. Iss. 6. PP. 8087–8094.
15. Bottacchi S. Multi-Gigabit Transmission Over Multimode Optical Fibre. Theory and Design Methods for 10GbE Systems. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd. 2006. 654 p.
16. Liokumovich L.B., Ushakov N.A., Kotov O.I., Bisyarin M.A., Hartog A.H. Fundamentals of Optical Fiber Sensing Schemes Based on Coherent Optical Time Domain Reflectometry:

Signal Model under Static Fiber Conditions // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2015. Vol. 33 (17). PP. 3660–3671.

17. Горбачев О. Интерференционные исследования спекл-структур в оптическом кабеле // Фотоника. 2012. № 6 (36). С. 20–24.

18. Lujo I., Klokoc P., Komljenovic T., Bosiljevac M., Sipus Z. Fiber-Optic Vibration Sensor Based on Multimode Fiber // Radioengineering. 2008. Vol. 17(2). PP. 93–97.

19. Rodriguez-Cobo L., Lomer M., Galindez C., Lopez-Higuera J.M. Speckle Characterization in Multimode Fibers for Sensing Applications // Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8413. PP. 84131R-1–84131R-6.

20. Бурдин А.В. Дифференциальная модовая задержка кварцевых многомодовых оптических волокон разных поколений // Фотон-Экспресс. 2008. № 5–6 (69–70). С. 20–22.

21. Бурдин А.В. О диагностике дифференциальной модовой задержки многомодовых оптических волокон // Инфокоммуникационные технологии. 2008. № 4. С. 33–38.

22. Bourdine A.V., Prokopyev V.I., Dmitriev E.V., Yablochkin K.A. Results of Conventional Field-Test Equipment Application for Identification of Multimode Optical Fibers With High DMD // Proceedings of SPIE. 2009. Vol. 7374. PP. 73740J-01–73740J-07.

23. Ericsson FSU-975. Руководство пользователя: пер. с англ. Ericsson. 2001. 76 с.

24. Бурдин А.В., Яблочкин К.А. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи // Инфокоммуникационные технологии. 2010. № 2. С. 22–27.

25. Bourdine A.V., Praporshchikov D.E., Yablochkin K.A. Investigation of Defects of Refractive Index Profile of Silica Graded-Index Multimode Fibers // Proceedings of SPIE. 2011. Vol. 7992. PP. 799206-1–799206-8.

26. Бурдин А.В., Василец А.А., Бурдин В.А., Морозов О.Г., Кузнецов А.А., Нуреев И.И., Фасхутдинов Л.И., Кафарова А.М., Минаева А.Ю., Севрук Н.Л. Результаты экспериментальных исследований маломодовых режимов волоконных Брэгговских решёток на многомодовых световодах // Инфокоммуникационные технологии. 2016. № 1. С. 19–33.

27. Бурдин А.В., Василец А.А., Бурдин В.А., Морозов О.Г., Кузнецов А.А., Нуреев И.И., Фасхутдинов Л.И., Кафарова А.М., Минаева А.Ю., Севрук Н.Л. Результаты записи волоконных Брэгговских решеток на кварцевых градиентных многомодовых оптических волокнах разных поколений // Инфокоммуникационные технологии. 2016. № 2. С. 129–137.

28. Bourdine A.V., Vasilets A.A., Burdin V.A., Morozov O.G., Nureev I.I., Kuznetsov A.A., Faskhutdinov L.M., Kafarova A.M., Minaeva A.Yu., Sevruk N.L. Fiber Bragg Grating Writing Technique for Multimode Optical Fibers Providing Stimulation of Few-Mode Effects in Measurement Systems // Proceedings of SPIE. 2016. Vol. 9807. PP. 98070J-1–98070J-7.

29. Бурдин А.В., Василец А.А., Севрук Н.Л. Результаты экспериментальной апробации технологии нанесения прецизионных макроструктурных дефектов на кварцевые оптические волокна // Первый научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» «3Т-2016», XIV Международная научная конференция «Оптические технологии в телекоммуникациях» (ОТТ-2016): материалы конференции. Самара. 2016. С. 112–113.

30. Evtushenko A.S., Faskhutdinov L.M., Kafarova A.M., Kazakov V.S., Kuznetsov A.A., Minaeva A.Yu., Sevruk N.L., Nureev I.I., Vasilets A.A., Andreev V.A., Morozov O.G., Burdin V.A., Bourdine A.V. Technique for Writing of Fiber Bragg Gratings Over or Near Preliminary Formed Macro-Structure Defects in Silica Optical Fibers // Proceedings of SPIE. 2017. Vol. 10342. PP. 103420X-1–103420X-11.