

## **Разработка многоканальных квазираспределенных информационно-измерительных систем на основе наноразмерных волоконно-оптических датчиков механических напряжений.**

**77-30569/355592**

**# 04, апрель 2012**

**Лазарев В. А., Шелестов Д. А.**

УДК 53.087.92, 681.2.082.

НОЦ "Фотоника и ИК-техника" МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[sintetaza@mail.ru](mailto:sintetaza@mail.ru)

Перспективным методом контроля состояния, повышения качества, надежности и продления ресурса инфраструктурных объектов является создание и внедрение в такие объекты квазираспределенных датчиков механических напряжений на основе волоконно-оптических брэгговских решеток (далее – ВОБР). Установка таких датчиков и измерительных систем для их опроса позволяет своевременно обнаруживать опасные напряжения в конструктивных элементах объектов и принимать соответствующие меры оперативного реагирования.

Разработка измерительных систем для опроса брэгговских датчиков – комплексная научно-техническая задача, решение которой сопряжено с выполнением целого ряда мероприятий:

- получение количественных характеристик процессов взаимодействия волоконно-оптических структур с внешними средами, подвергающимися воздействию измеряемых физических величин [1, 2];
- разработка оптико-электронной системы для регистрации сигнала с квазираспределенной системы измерения деформации [3, 6, 7];
- разработка алгоритма обработки сигнала, поступающего с датчиков деформаций [4];
- изготовление и испытание опытных образцов датчиков деформации на основе наноразмерных волоконно-оптических структур, а также оптико-электронной измерительной системы обработки сигнала [6];

– изготовление и стендовые испытания макетного образца информационно-измерительной системы, проведение комплексных мероприятий по приборному оснащению испытательных стендов и установок для решения задач разработки многоканальных квазираспределенных информационно-измерительных систем на основе наноразмерных волоконно-оптических структур [6].

Однако разработанные и эксплуатируемые измерительные системы обладают существенным недостатком, связанным с невысоким быстродействием [7], что не позволяет использовать системы в актуальных задачах контроля быстропротекающих процессов. Поэтому в настоящее время при участии авторов разрабатываются быстродействующие измерительные системы, см., например, [5]. В этой связи встает вопрос подтверждения характеристик разрабатываемых систем. Для этих целей при участии авторов разработан ряд стендов для проведения экспериментальных исследований измерительных систем.

В настоящей статье рассмотрен результат разработки стендов для исследования характеристик макетного образца измерительной системы, приведены результаты экспериментальных исследований метрологических характеристик измерительной системы с использованием разработанных стендов.

## **1 Разработка стендов для исследования характеристик информационных сигналов, формируемых ВОБР**

На практике в информационно-измерительной системе используются волоконные решетки [1], оптические параметры которых необходимо исследовать, так как производитель брэгговских решёток указывает в спецификации только резонансную длину волны, ширину спектра по уровню 0,5, и предельные условия эксплуатации – максимальную деформацию, температурный диапазон.

Для решения указанной задачи, был разработан ряд измерительных стендов для оценки основных параметров информационного сигнала, формируемого волоконно-оптическим брэгговским преобразователем (далее – ВОБР).

### **1.1 Стенд для исследования спектральных характеристик сигналов, формируемых волоконно-оптическими брэгговскими датчиками**

Данный стенд предназначен для исследования спектральной отражательной способности ВОБР со спектральной разрешающей способностью 1 пм, в диапазоне 1500...1570 нм [2]. Структурная схема стенда приведена на рис. 1.

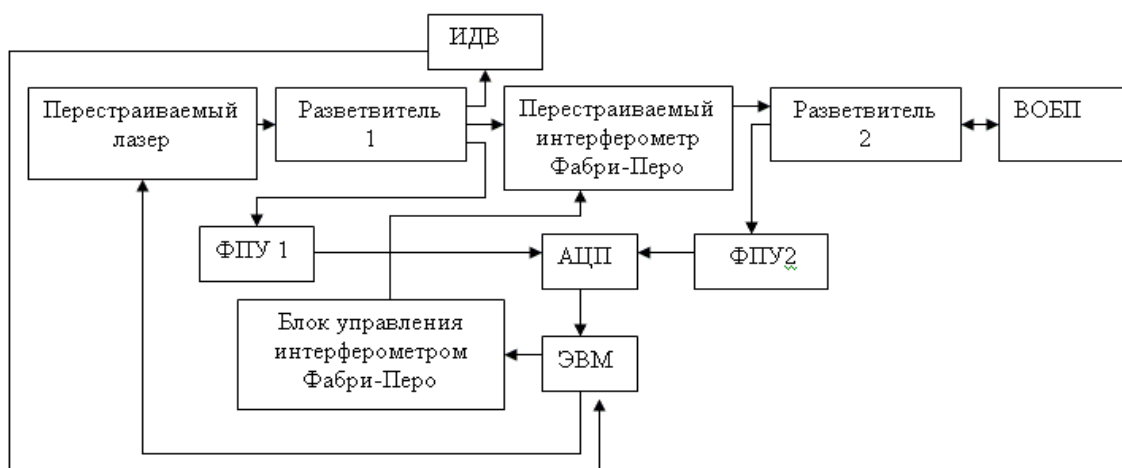


Рисунок 1 – Структурная схема стенда для измерения спектральных характеристик ВОБР:

ИДВ – измеритель длины волны, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь,  
 ФПУ – фотоприёмное устройство

В данном стенде перестраиваемый лазер в зависимости от управляющего сигнала с ЭВМ, осуществляет генерацию дискретных значений длин волн. Излучение от лазера поступает на разветвитель 1, где излучение делится на три части: одна часть поступает на измеритель длины волны (далее – ИДВ), который осуществляет измерение длины волны с абсолютной погрешностью менее 1,5 нм, другая часть поступает на фотоприемное устройство (далее – ФПУ) 1, которое осуществляет измерение мощности лазера (ФПУ 1 необходимо для измерения мощности перестраиваемого лазера); третья часть поступает на сканирующий интерферометр Фабри-Перо, осуществляющего фильтрацию спектральных шумов спонтанной эмиссии лазерного излучения. Далее излучение после отражения от исследуемого ВОБР, поступает через разветвитель 2 на ФПУ 2, которое осуществляет измерение мощности отраженного излучения. Сигналы от ФПУ 1 и ФПУ 2 оцифровываются и передаются на ЭВМ при помощи двухканального АЦП, а сигнал с ИДВ передается на ЭВМ в цифровом виде. На ЭВМ записываются три массива чисел одинаковой размерности: один с результатами измерений длин волн, генерируемых перестраиваемым лазером  $\lambda_i$ ; другой с результатами измерений относительной мощности  $P1_i$  лазера, третий – с результатами измерений отражённой мощности  $P2_i$ , регистрируемой ФПУ2. Искомый спектр отражения определяется при помощи выражения [4]

$$P_{\lambda}(\lambda_i) = \frac{P2_i}{k \cdot P1_i^2}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, равный отношению  $P2/P1$  для случая 100 % отражения.

Используемый в составе стенда измеритель длины волны (ИДВ) входит в состав аттестованного государственного специального эталона для волоконно-оптических систем передачи информации (в части единицы длины волны) ГЭТ-170 2006. Данный ИДВ осуществляет измерение длины волны путем сравнения периодов интерферограмм эталонного (He-Ne-лазера со стабилизацией частоты) и измеряемого лазеров.

На стенде измерены спектральные отражательные способности брэгговских решеток, производства компании ЗАО «НТО «ИРЭ-Полус» (г. Фрязино) с центральной резонансной длиной волны 1532 нм, 1543 нм, 1551 нм. Спектры отражения указанных решёток представлены на рис. 2-4.

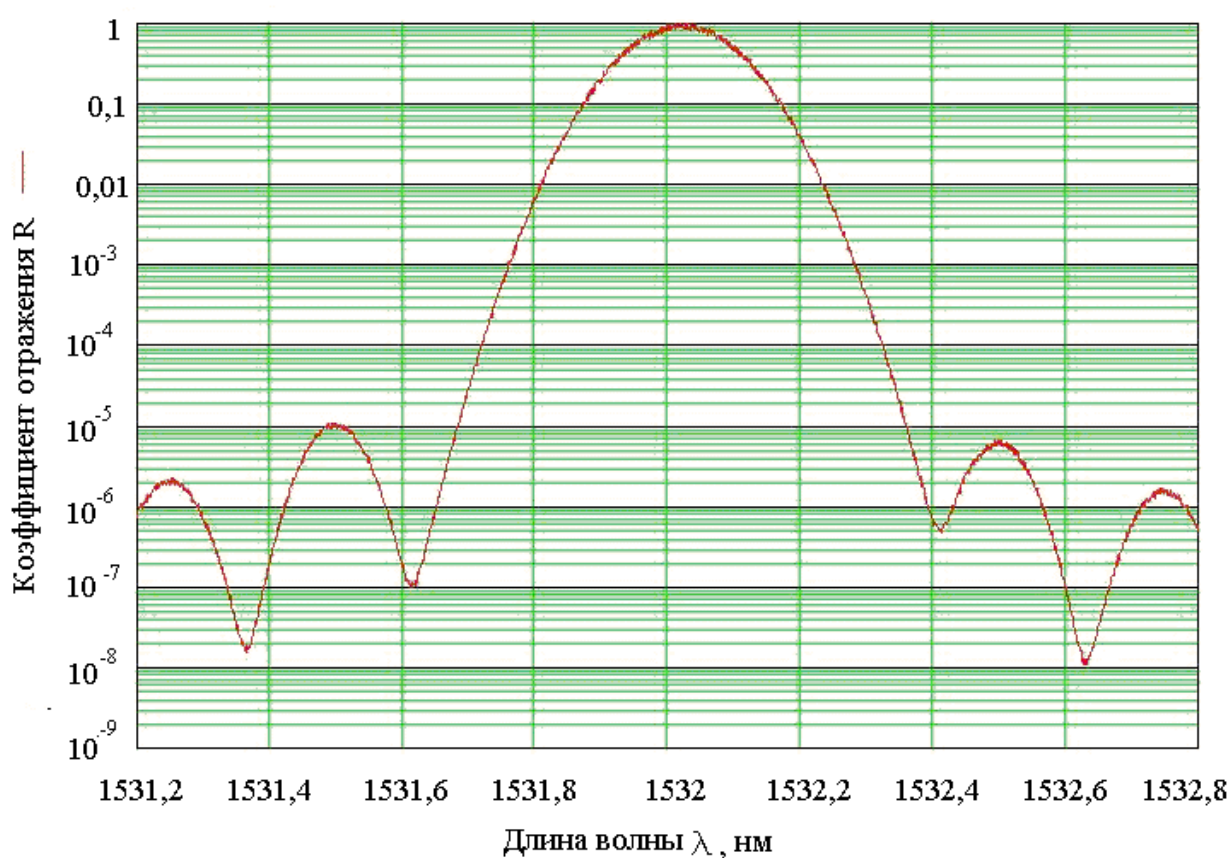


Рисунок 2 – Измеренный спектр отражения брэгговской решётки с резонансной длиной волны  $\lambda_0=1532,023$  нм

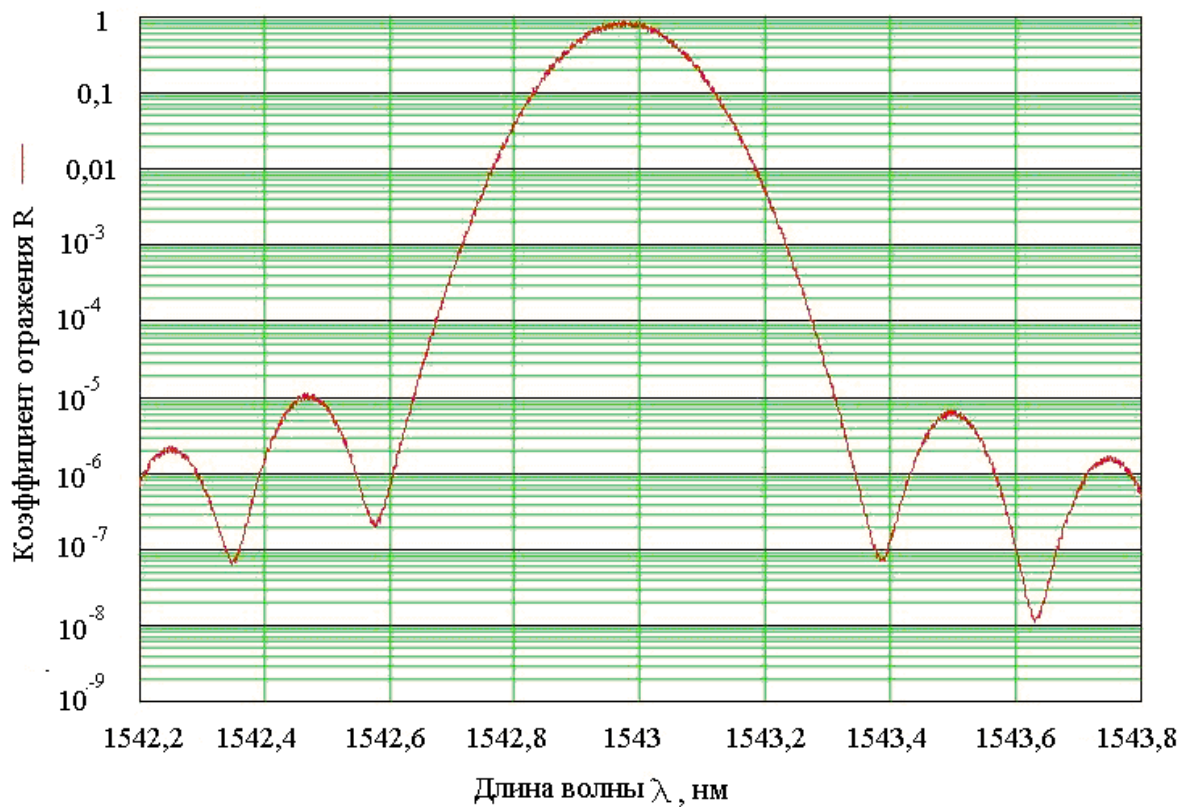


Рисунок 3 – Измеренный спектр отражения брэгговской решетки с резонансной длиной волны  $\lambda_0=1542,975$  нм

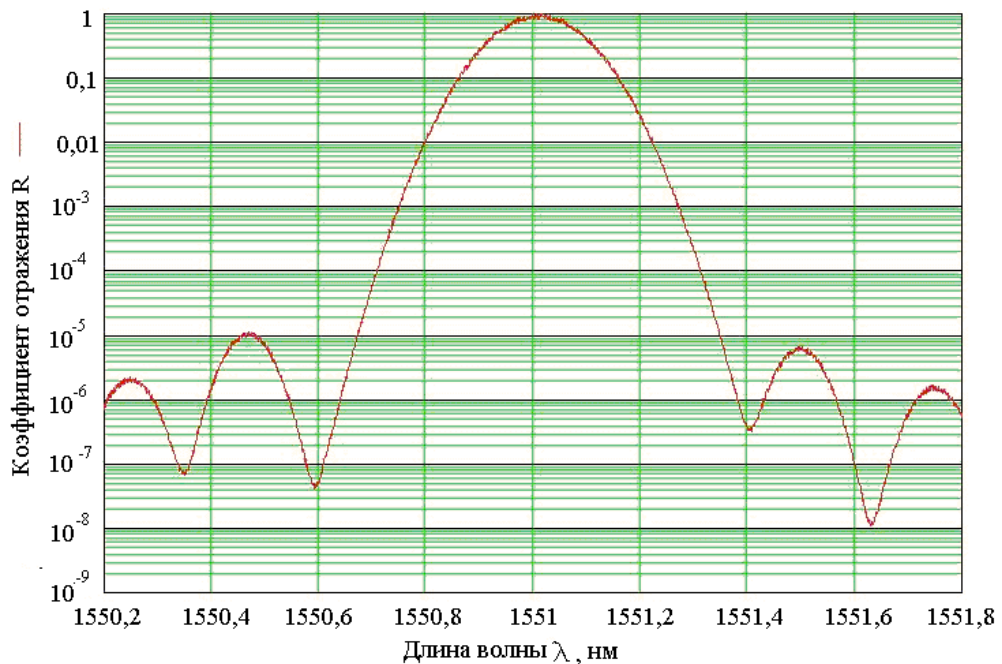


Рисунок 4 – Измеренный спектр отражения брэгговской решетки с резонансной длиной волны  $\lambda_0=1551,012$  нм

Необходимо отметить, что одной из основных характеристик брэгговских решёток является наведенный показатель преломления, то есть функция распределения показателя преломления материала оптического волокна от его диаметра. Из анализа измеренных

спектральных зависимостей следует, что данные решетки выполнены с неравномерным распределением наведённого показателя преломления, так как боковые спектральные лепестки фактически отсутствуют (подавление более 50 дБ). Следовательно, данные решётки максимально подходят для применения в квазираспределённых измерительных системах на основе ВОБР, вследствие того что при измерении длины волны отражённого излучения составляющая погрешности, вызванная лепестками, будет фактически отсутствовать.

## 1.2 Стенд для исследования групповой задержки

При распространении оптического сигнала по волоконному световоду, в том числе содержащему брэгговскую решетку, возникает дисперсия света, которая приводит к различию скоростей распространения спектральных компонентов. Указанное различие в условиях распространения спектральных компонент характеризуется групповой задержкой – разницей времени прохождения спектральных компонент с наименьшей и наибольшей длиной волны в распространяющемся оптическом сигнале. Для исследования групповой задержки разработан стенд [4], структурная схема которого приведена на рис. 5.

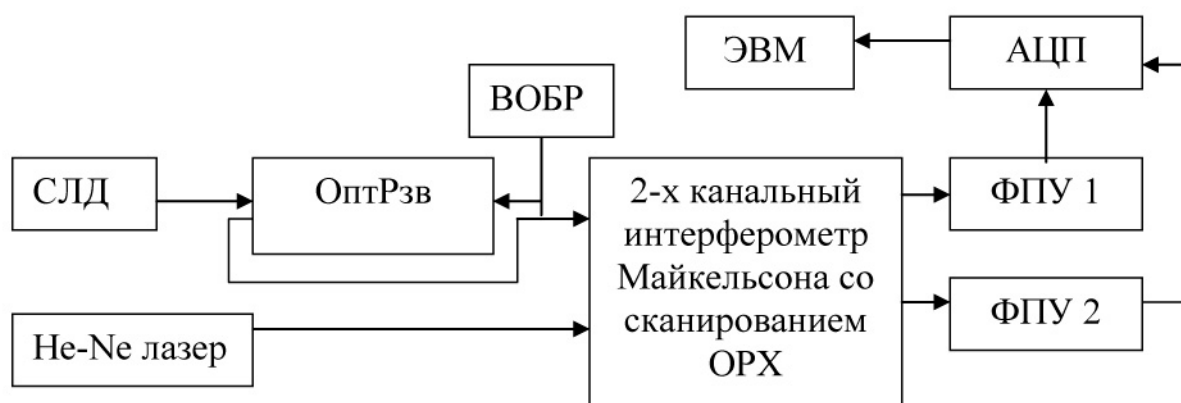


Рисунок 5 – Структурная схема стенда для измерения групповой задержки сигнала, формируемого ВОБР

(СЛД – суперлюминесцентный диод, ОРХ – оптическая разность хода)

В данной аппаратуре излучение от суперлюминесцентного диода – источника излучения с широким спектром поступает на разветвитель, а затем на ВОБР, отразившись от которого излучение попадает на разветвитель, где делится на две части, одна из которых попадает в двухканальный интерферометр Майкельсона со сканированием оптической разности хода (далее – ОРХ) [5] (излучение, отражённое от ВОБР, попадает в первый канал интерферометра). ОРХ – это разность длин плеч интерферометра Майкельсона с учетом показателей преломления материалов сред, входящих в состав плеч

интерферометра. В этот же интерферометр (во второй канал) попадает излучение от He-Ne лазера. В одном плече интерферометра помещена неподвижная трипель-призма, а в другом – отражатель перемещается в диапазоне 0...45 мм (эквивалентно изменению ОРХ 0...300 пс). He-Ne лазер в данной схеме служит для измерения абсолютного положения отражателя (по интерферограмме рассчитывается смещение отражателя).

На выходе из интерферометра, излучение отраженное от ВОБР и He-Ne лазера регистрируется ФПУ1 и ФПУ2 соответственно, электрические сигналы от которых поступают на двухканальный АЦП, и после оцифровки передаются на ЭВМ.

Регистрируемые интерферограммы представляют собой два одномерных массива  $P1_i$  и  $P2_i$ , элементами которых являются значения регистрируемой мощности в моменты дискретизации (оцифровки сигнала) на ФПУ1 и ФПУ2 соответственно. При этом каждому элементу массива соответствует своя ОРХ (для одинаковых индексов, например для  $P1_1$  и  $P2_1$  ОРХ будет одинаковой).

На первом этапе анализа результатов измерений по интерферограмме, полученной для He-Ne лазера, определяют значения ОРХ –  $\Delta_i$  в моменты дискретизации. Для полученной зависимости  $P1(\Delta_i)$  осуществляется Фурье преобразование [6]:

$$P1(\lambda_i)=F (P1(\Delta_i)). \quad (2)$$

Из полученного комплексного сигнала вычисляется групповая задержка при помощи выражения (1) ( $P1(\lambda_i)$  является аналогом  $r(\lambda)$ ). На рис. 6-8 приведены измеренные зависимости групповой задержки для трёх датчиков.

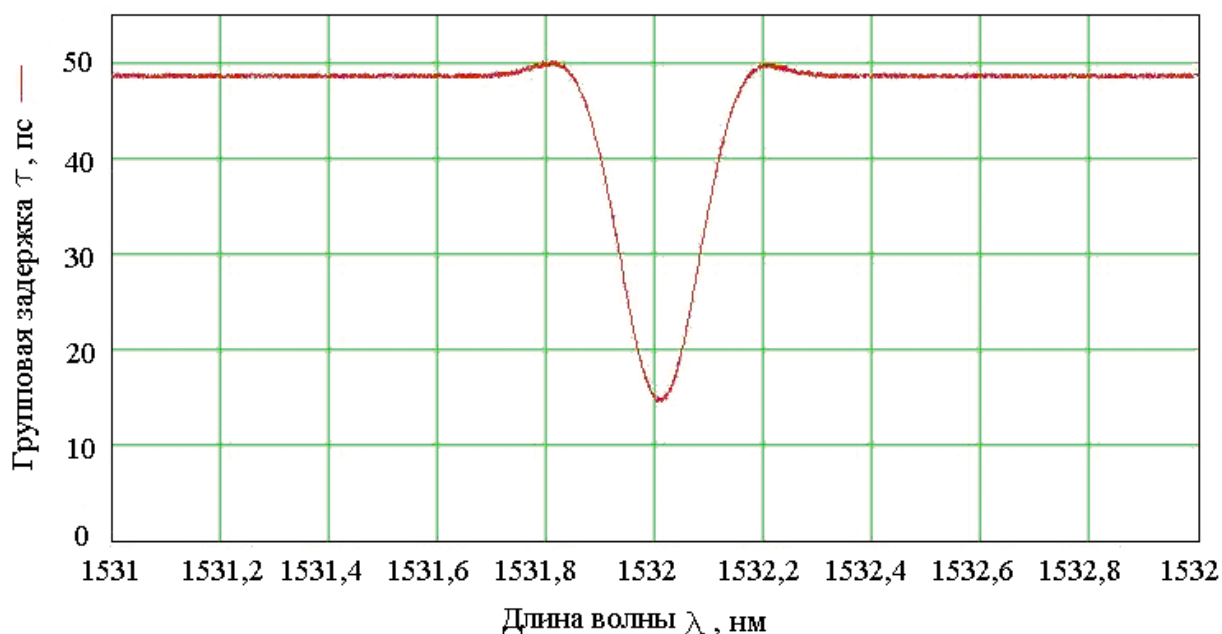


Рисунок 6 – Измеренная групповая задержка для датчика с резонансной длиной волны  $\lambda_6=1532,023$  нм

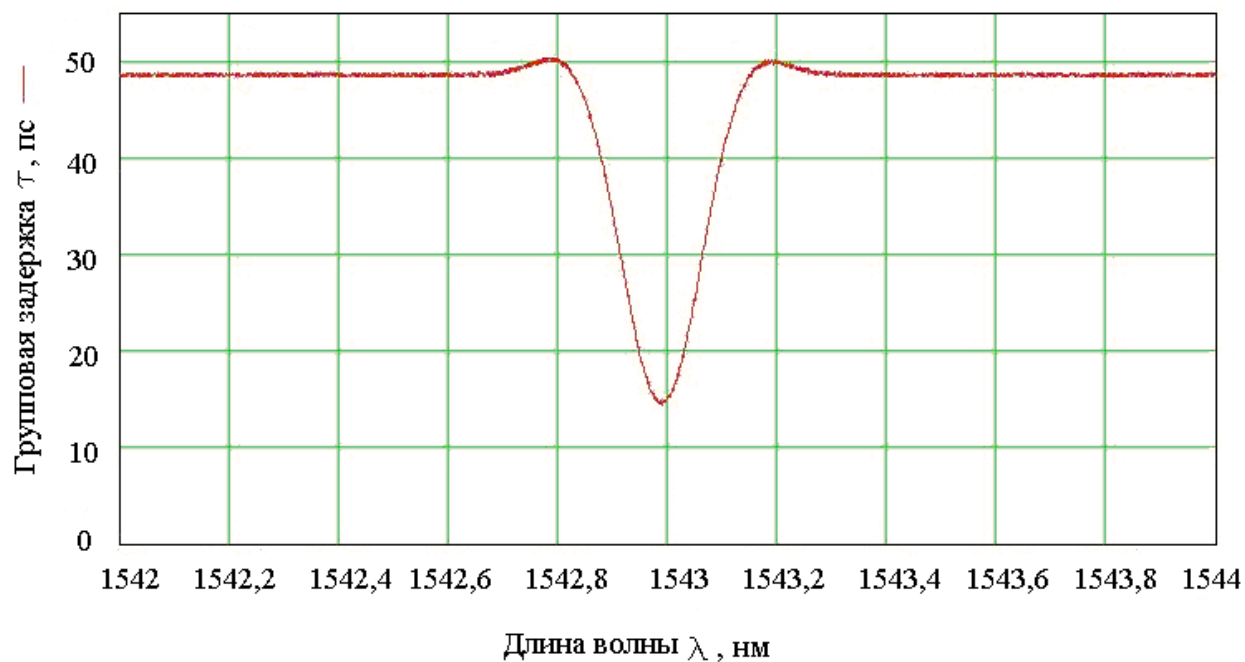


Рисунок 7 – Измеренная групповая задержка для датчика с резонансной длиной волны  $\lambda_0=1542,975$  нм

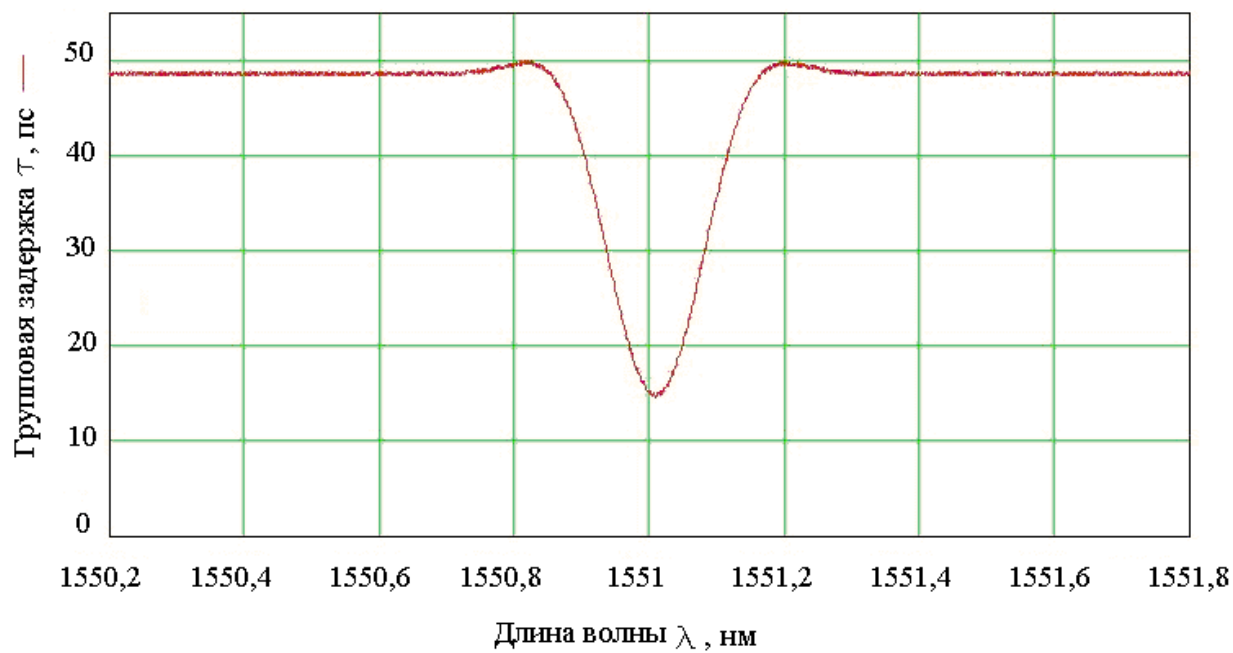


Рисунок 8 – Измеренная групповая задержка для датчика с резонансной длиной волны  $\lambda_0=1551,012$  нм



## 2. Анализ конструктивных параметров, оказывающих влияние на метрологические характеристики макетного образца измерительной системы

Проведём исследование влияния на метрологические характеристики системы каждого из параметров [8].

1. Влияние дискретности регистрации сигнала приведено на рис. 9
- 2.

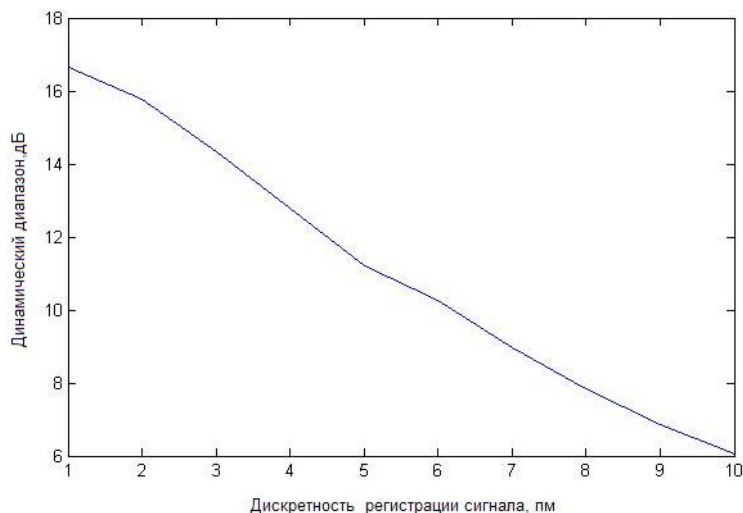


Рисунок 9 – Влияние дискретности сигнала на динамический диапазон, при котором погрешность измерения резонансной длины волны не превышает 10 пм.

Как видно из рис. 9 дискретность оказывает существенное влияние на динамический диапазон. На рис. 10 продемонстрировано отношение сигналов с ФПУ 2 к ФПУ 1 (именно на основе этого сигнала, разработанный алгоритм корректирует предполагаемые значения длин волн) для случаев дискретности перестройки, равной 1 пм и 10 пм (все остальные параметры одинаковые). Как видно из рис. 10, б при высокой дискретности неглубокие пики поглощения цианида водорода фактически сливаются с уровнем шумов. В то время как, при дискретности регистрации 1 пм, все пики достаточно чётко видны. Поэтому при большом шаге дискретизации приходится значительно увеличивать энергетические характеристики сигнала, что приводит к необходимости увеличения минимально допустимого коэффициента отражения брэгговской решетки.

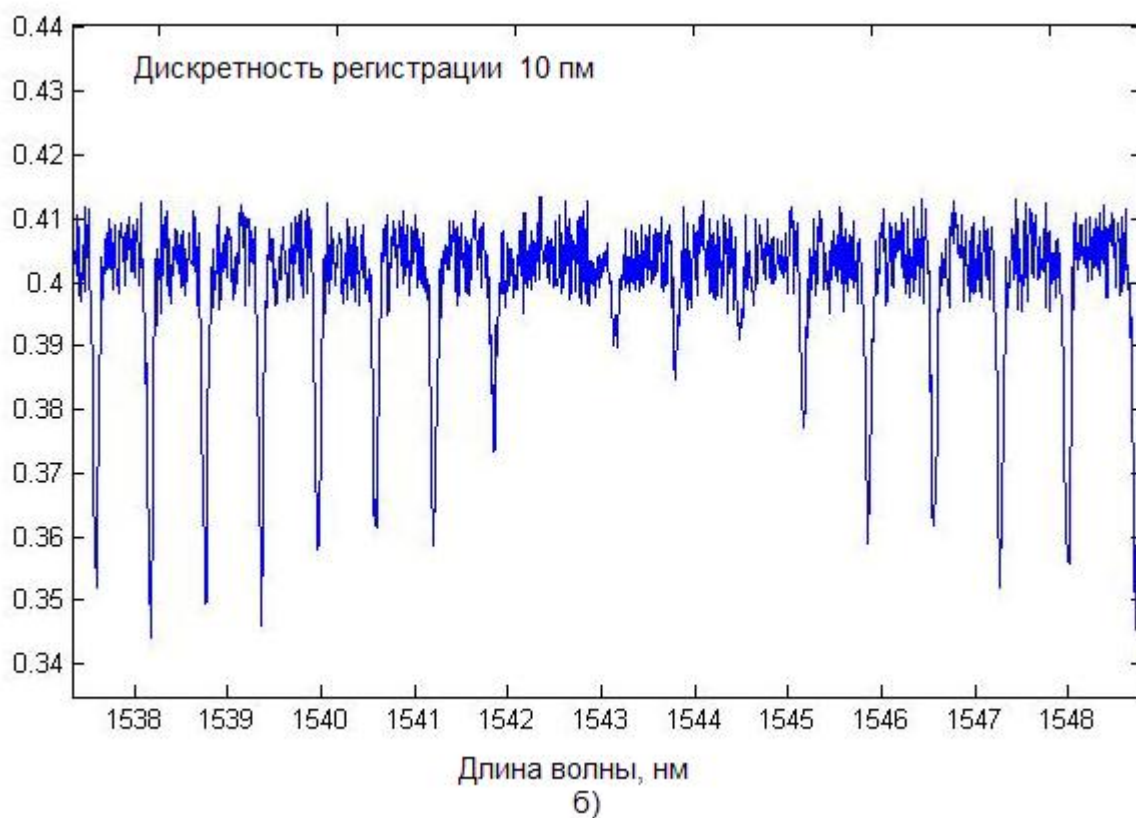
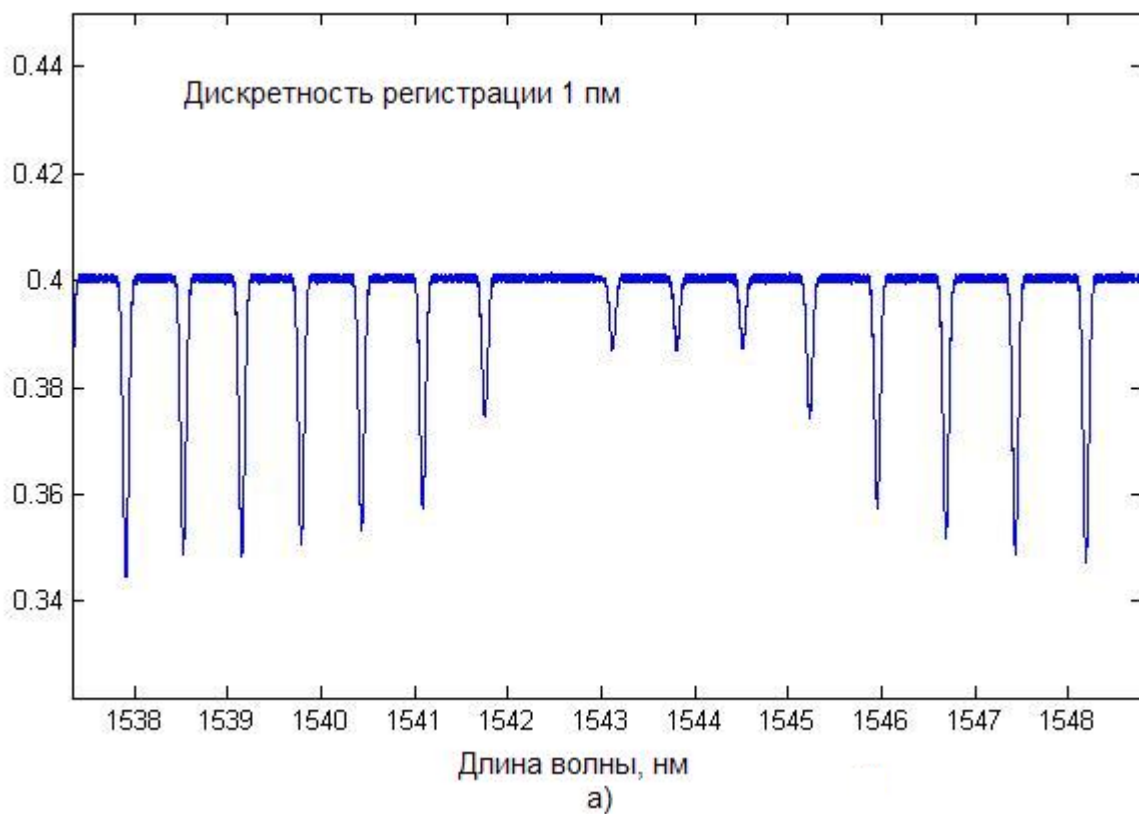


Рисунок 10 – Отношение сигналов с ФПУ 2 к ФПУ 1:  
а) для дискретизации 1 пм; б) для дискретизации 10 пм.

Влияние разрешающей способности интерферометра Фабри-Перо на динамический диапазон приведено на рис. 11.

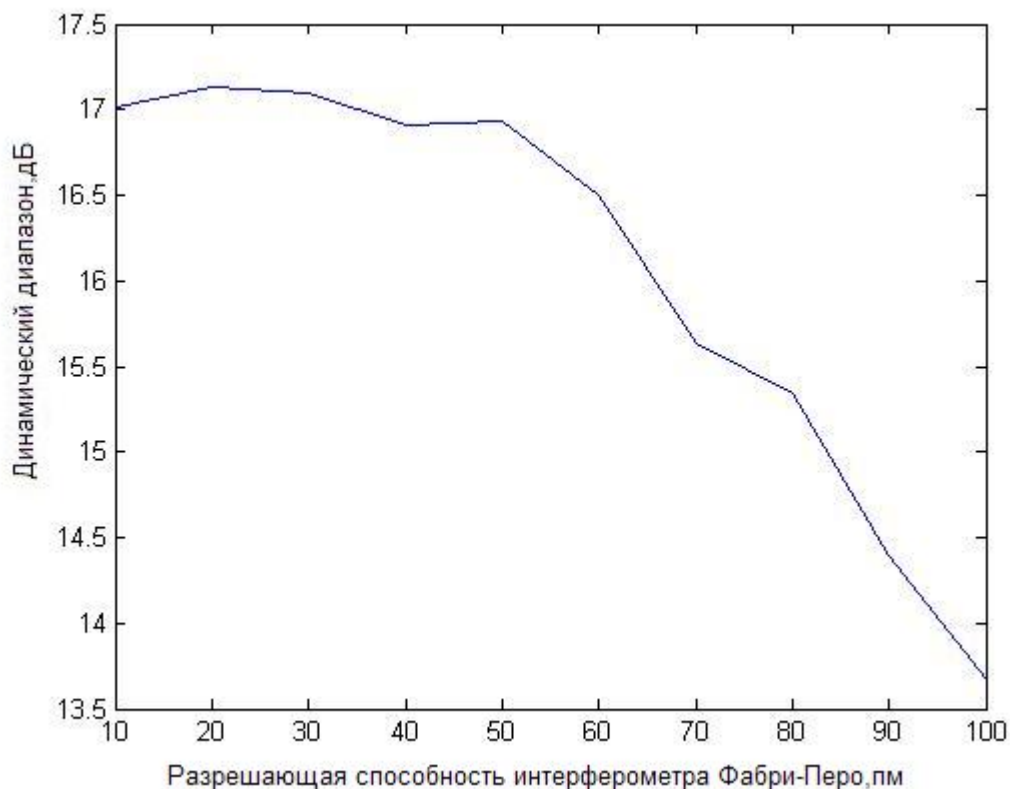


Рисунок 11 – Влияние разрешающей способности интерферометра Фабри-Перо на динамический диапазон, при котором погрешность измерения резонансной длины волны не превышает 10 пм

Как видно из рис. 11 разрешающая способность интерферометра Фабри-Перо влияет на энергетические характеристики сигнала не так сильно, как дискретность перестройки. Проведенный анализ взаимовлияния характеристик позволяет осуществить выбор интерферометра, пользуясь типовыми значениями фактора резкости выпускаемых в настоящее время интерферометров: 16000, 8000, 4000, 2000 (эквивалентно разрешению 12,5 пм, 25 пм, 50 пм, 100 пм) и вследствие этого существенно снизить его стоимость (стоимость устройства из стандартного ряда значительно ниже). В то же время такой подход позволяет несущественно ухудшить энергетические характеристики системы.

Важным компонентом измерительной системы является отражатель, основной характеристикой которого является коэффициент отражения. Этот коэффициент влияет на уровень несущей составляющей сигнала (рис. 12), которая модулируется пиками поглощения калибратора (пики вниз), и сигналами от датчиков (пики вверх). И если бы у источника отсутствовала спектральная модуляция (вызванная остаточными модами

резонатора), то коэффициент отражения было бы выгодно выбрать максимально большим. В то же время наличие спектральной модуляции при высоких коэффициентах отражения приводит к тому, что сигнал от брэгговских датчиков становится фактически неразличимым на фоне несущей составляющей сигнала (см. рис. 12).

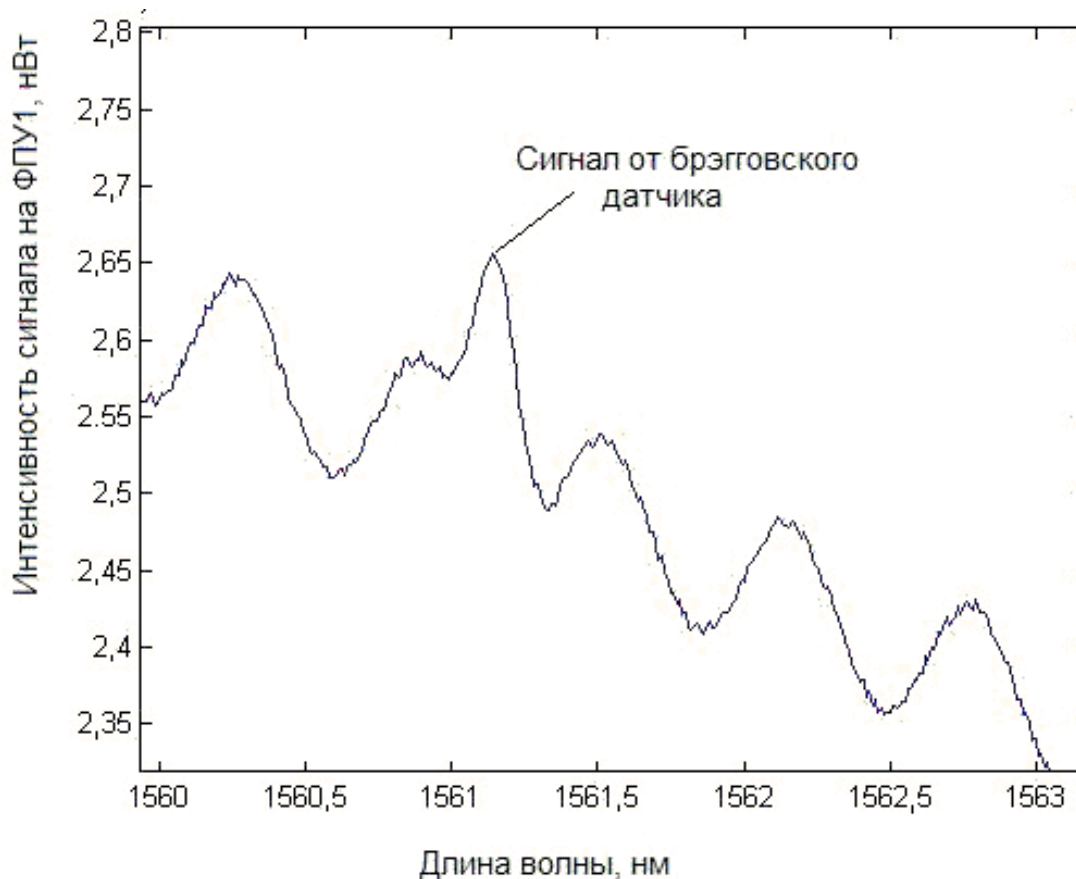


Рисунок 12 – Сигнал, формируемый ФПУ 1, при коэффициенте отражения  $R_{от}=0,2$  и  $R_{бр}=0,018$

Малые значения коэффициента отражения приводят к тому, что пики поглощения калибратора становятся фактически не видимыми из-за шумов.

Зависимость динамического диапазона системы (для обеспечения погрешности измерения длины волны 10 пм) от коэффициента отражения была также исследована при помощи численного моделирования и приведена на рис. 13.

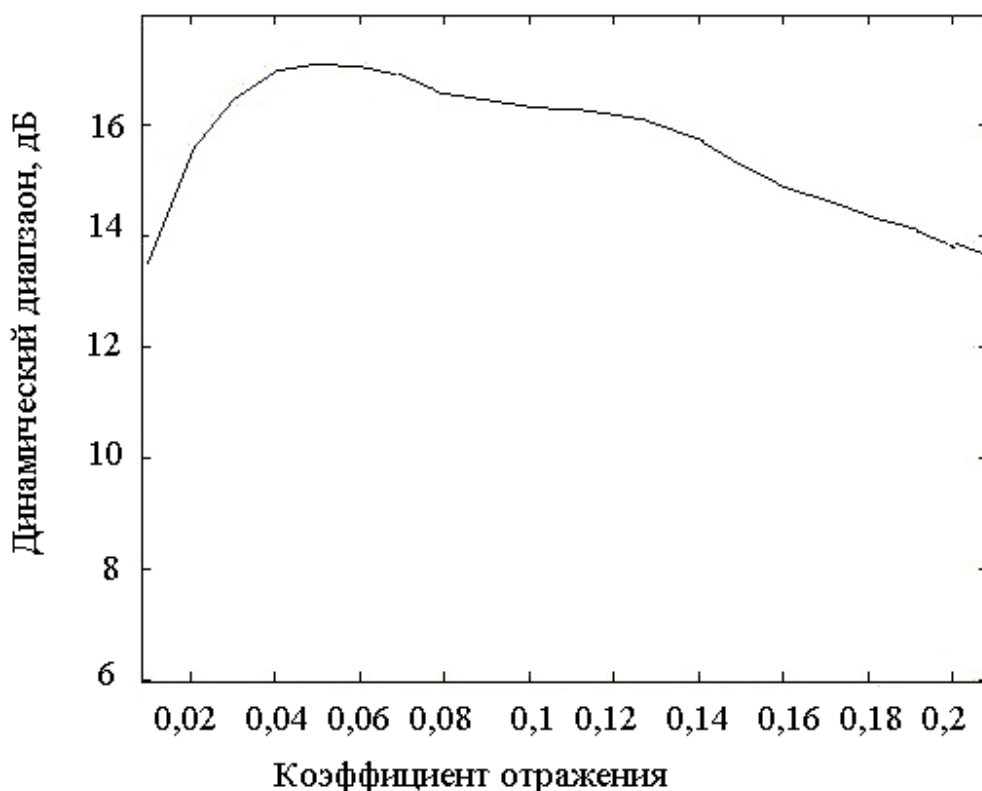


Рисунок 13 – Влияние коэффициента отражения на динамический диапазон, при котором погрешность измерения резонансной длины волны не превышает 10 пм

Как видно из рис. 13, динамический диапазон системы не меняется существенно при изменении коэффициента отражения от 0,02 до 0,014, что даёт возможность реализовать отражатель при помощи полировки торца волокна под углом  $90^\circ$  (френелевское отражение в этом случае составит 3-4 %).

Исследование влияние уровня шумов проводится с целью выявления предельно возможной частоты опроса системы, так как шумы растут пропорционально корню квадратному из частоты сигнала. В рассматриваемой измерительной системе, где для одного цикла измерения необходимо осуществить регистрацию сигнала в 35000 точках (отношение ширины рабочего спектрального диапазона к дискретности) минимальный уровень шума 20 пВт соответствует частоте опроса 1 Гц (частота информационного сигнала 35 кГц, удельные шумы ФПУ  $0,11 \text{ пВт/Гц}^{1/2}$  – соответствуют паспортным характеристикам типового ФПУ FEMTOLAB). Соответственно, если рассматривать измерительную систему, уровень шумов в которой больше в 10 раз, то частота опроса такой системы будет в 100 раз больше.

На рис. 14 представлены результаты моделирования системы для различных уровней шумов.

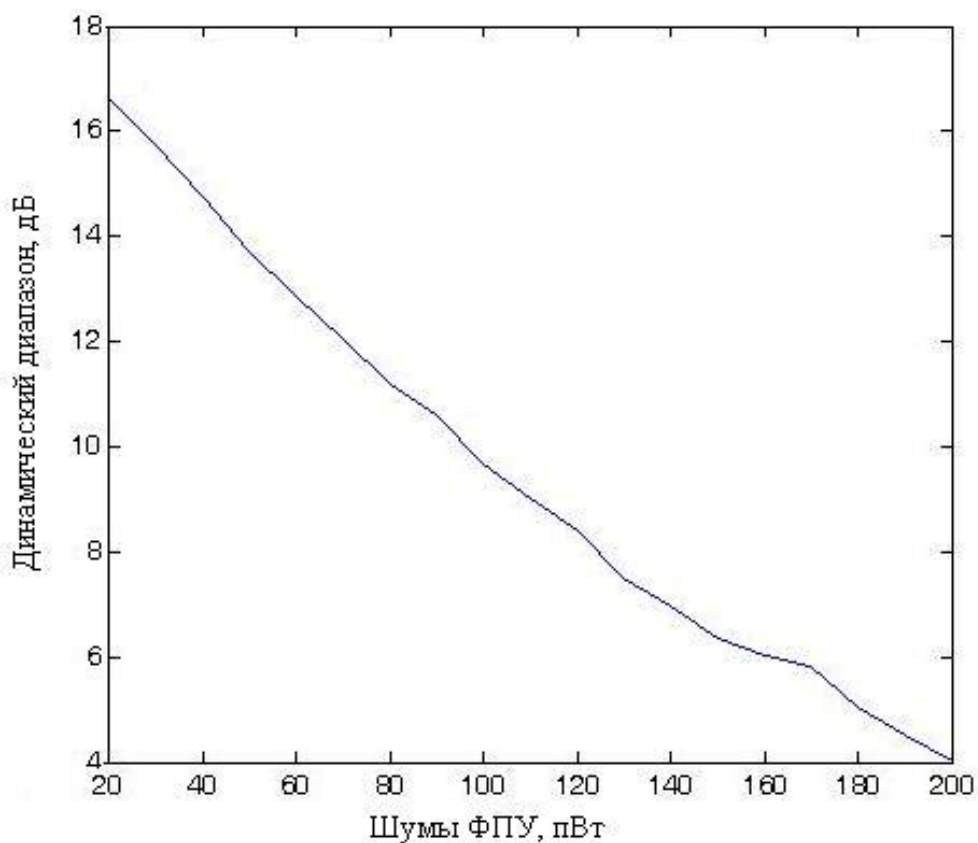


Рисунок 14 – Влияние уровня шума на динамический диапазон, при котором погрешность измерения резонансной длины волны не превышает 10 пм

Как видно из результатов моделирования, зависимость динамического диапазона от уровня шумов не подчиняется линейному закону. Также из результатов моделирования видно, что в диапазоне 20...90 пВт характеристика системы фактически линейна и изменяется незначительно, что позволяет потенциально реализовать систему с частотой опроса датчиков 20-25 Гц с приемлемым динамическим диапазоном (10 дБ). Предельная частота измерений по результатам моделирования оказалась в 3 раза меньше указанного значения несмотря на то, что использовался более мощный источник излучения. Такое отличие результатов можно объяснить тем, что в качестве калибратора использовалась кювета с цианидом водорода, имеющая значительно менее контрастные пики поглощения, по сравнению с интерферометром Фабри-Перо, а также тем, что при моделировании учитывалось большее количество факторов.

Из полученных результатов моделирования, можно сделать выводы, что наиболее существенно на динамический диапазон влияют дискретность регистрации сигнала, шумы ФПУ, и коэффициент отражения отражателя. Причем для коэффициента отражения характерно оптимальное значение, при котором достигается максимум динамического диапазона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения НИР в МГТУ им. Н. Э. Баумана разработан макетный образец измерительной системы для опроса брэгговских датчиков. Для исследования изготовленного макета созданы специальные измерительные стенды, позволяющие проанализировать спектральные характеристики сигналов, формируемых волоконно-оптическими брэгговскими датчиками, а также исследовать групповую задержку. Данные исследования необходимы для дальнейшего анализа составляющих погрешности макетного образца измерительной системы.

Проведён анализ составляющих погрешности макетного образца. Оценено влияние многих факторов, среди которых рассмотрено влияние коэффициента отражения отражателя, шумов фотоприёмного устройства, дискретности перестройки сканирующего интерферометра Фабри-Перо по шкале длин волн, разрешающей способности сканирующего интерферометра Фабри-перо. В данном анализе учтены параметры источника излучения: интенсивность излучения, ширина спектра по уровню 0,5, глубина и период спектральной модуляции. Подобрано оптимальное соотношение параметров, при котором достигнут максимальный динамический диапазон измерительной системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного контракта от 06 октября 2011 г. № 07.514.12.4017.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Glisic, B. Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring [text] / Branco Glisic, Daniele Inaudi // London: John Wiley & Sons Ltd. – 2007.
2. Карасик, В. Е. Измерительное устройство контроля деформации и температуры на основе наноразмерных волоконно-оптических датчиков [текст] / В.Е. Карасик, В.А. Лазарев, Н.А. Неверова, // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 58. – С. 51–58.
3. Григорьев В.В. Многоканальная квазираспределенная информационно-измерительная система на основе наноразмерных волоконно-оптических структур датчиков механических напряжений [текст] / В.В. Григорьев, В.А. Лазарев, А.К. Митюрёв, Н.А. Неверова, А.Б. Пнев, С.В. Тихомиров // Заводская лаборатория. – 2008. – том 74 (Специальный выпуск). – С. 70–74.
4. Григорьев В.В. Измерение деформации и температуры датчиками на основе брэгговских решёток [текст] / В.В. Григорьев, В.А. Лазарев, А.К. Митюрёв, А.Б. Пнев, С.В. Тихомиров, Н.П. Хатырев // Датчики и системы. – 2009. – № 1(116). – С. 15–19.
5. Григорьев В.В. Квазираспределенная измерительная система на основе брэгговских датчиков механических напряжений с повышенной частотой опроса [текст] / В.В. Григорьев, В.А. Лазарев, А.К. Митюрёв, Н.А. Неверова, А.Б. Пнев, С.В. Тихомиров // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 11. – С. 58–62.

6. Пнев А.Б. Оптико-электронные измерительные системы на основе квазираспределенных волоконно-оптических брэгговских датчиков [Текст] : дис. канд. техн. наук : 05.11.07 : защищена 25.06.08 : утв. 10.10.08 / Пнев Алексей Борисович. – М., 2008. – 176 с. – Библиогр.: с. 172–176.
7. Устройство для измерения деформаций на основе квазираспределенных волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках [Текст] : пат. 2377497 Рос. Федерация : МПК G01B 11/16 / авторы и заявители Барышников Н.В. [и др.] ; патентообладатель ФГУП «ВНИИОФИ».
8. Othonos, A. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing [text] / Andreas Othonos, Kyriacos Kalli // London: Artech House. – 1999.



## **Development of multichannel quasi-distributed information-measuring systems on the basis of nanoscale fiber-optic strain sensors.**

**77-30569/355592**

**# 04, April 2012**

**Lazarev V.A., Shelestov D.A.**

Bauman Moscow State Technical University  
[sintetaza@mail.ru](mailto:sintetaza@mail.ru)

The authors consider a question of metrological assurance of a measuring system model on the basis of fiber-optical Bragg gratings. The article describes of stand construction schemes for research of spectral characteristics of signals formed with fiber-optical Bragg sensors and also for research of a group delay. The authors analyzed design parameters influencing metrological characteristics of the model. The results of the experimental researches of metrological characteristics with use of the developed stands are presented.

---

**Publications with keywords:** [multichannel measuring system](#), [FBG sensor](#), [Bragg grating](#), [system of calibration](#), [cavity with acetylene](#)

**Publications with words:** [multichannel measuring system](#), [FBG sensor](#), [Bragg grating](#), [system of calibration](#), [cavity with acetylene](#)

---

### References

1. Glisic B., Inaudi D. *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. London, John Wiley & Sons Ltd. 2007.
2. Karasik V. E., Lazarev V.A., Neverova N.F. Izmeritel'noe ustroystvo kontrolya deformatsii i temperatury na osnove nanorazmernykh volokonno-opticheskikh datchikov [Measuring device of control of deformation and temperature on the basis of nano-scale fiber-optical sensors]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik SPbGU ITMO* [Scientific and Technical Bulletin of University ITMO], 2008, no. 58, pp. 51–58.
3. Grigor'ev V.V., Lazarev V.A., Mitiurev A.K., Neverova N.A., Pnev A.B., Tikhomirov S.V. Mnogokanal'naiia kvaziraspredelelnaia informatsionno-izmeritel'naiia sistema na osnove nanorazmernykh volokonno-opticheskikh struktur datchikov mekhanicheskikh napriazhenii [Multi-channel quasi-distributed information-measuring system on the basis of nano-scale fiber-optical structures of sensors of mechanical stress]. *Zavodskaiia laboratoriiia*, 2008, vol. 74, Spec. iss., pp. 70–74.

4. Grigor'ev V.V., Lazarev V.A., Mitiurev A.K., Pnev A.B., Tikhomirov S.V., Khatyrev N.P. Izmerenie deformatsii i temperatury datchikami na osnove breggovskikh reshetok [Measurement of deformation and temperature sensors on the basis of fiber Bragg gratings]. *Datchiki i sistemy*, 2009, no. 1, pp. 15–19.
5. Grigor'ev V.V., Lazarev V.A., Mitiurev A.K., Neverova N.A., Pnev A.B., Tikhomirov S.V. Kvaziraspredelennaia izmeritel'naia sistema na osnove breggovskikh datchikov mekhanicheskikh napriazhenii s povyshennoi chastotoi oprosa [Quasi-distributed measuring system based on fiber Bragg sensors of mechanical stress to the increased frequency of polling]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2008, no. 11, pp. 58–62.
6. Pnev A.B. *Optiko-elektronnye izmeritel'nye sistemy na osnove kvaziraspredelennykh volokonno-opticheskikh breggovskikh datchikov. Kand. diss.* [Optico-electronic measuring systems on the basis of quasi-distributed fiber-optic Bragg sensors. Cand. diss.]. Moscow, 2008. 176 p.
7. Baryshnikov N.V., Karasik V. E., Lazarev V.A., Mitiurev A.K., Pnev A.B., Tikhomirov S.V. Patent RF no. 2377497, 2008.
8. Othonos A., Kalli K. *Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. London, Artech House. 1999.