

УДК 681.78

Квази-распределённая оптико-электронная измерительная система для контроля деформаций с повышенной частотой опроса

*Степанов К.В., студент
кафедры «Радиоэлектроника и лазерная техника»
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Жирнов А.А., студент
кафедры «Радиоэлектроника и лазерная техника»
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Пнёв А.Б., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
baryshnikov@bmstu.ru*

Введение

В авиации сейчас весьма актуальна проблема контроля расслоения композиционных материалов возникающих из-за ударных воздействий. Одним из методов решения данной проблемы является создание композитных конструкций со встроенной системой непрерывного мониторинга на основе волоконно-оптических датчиков (ВОД), первичным преобразователем которых являются брэгговские решетки. Данный тип датчиков обладает такими преимуществами как высокая помехоустойчивость, малые габариты, сопоставимые с толщиной слоя композиционного материала, возможность размещать в одном волокне несколько десятков сенсоров, способных регистрировать деформацию, температуру, ускорение, вибрацию с высокой точностью.

Волоконная брэгговская решетка (ВБР) представляет собой структуру с периодической модуляцией показателя преломления сердцевины световода, которая отражает излучение в окрестности резонансной длины волны, пропорциональной ее периоду и пропускает излучение в других спектральных диапазонах. Влияние деформации приводит к тому, что изменяются период ВБР, и пропорциональная ему длина волны отраженного излучения.

Типичный коэффициент чувствительности по деформации ВБР составляет 12 нм/% [1], что в совокупности с современными возможностями современных спектральных приборов, способных измерять длину волны с погрешностью менее 10 пм

[1] дает возможность получать погрешность измерения деформации 0,0008%.

В настоящее время реализовано множество типов оптико-электронных измерительных приборов для регистрации сигналов, формируемых ВБР, среди которых можно отметить системы на основе перестраиваемого интерферометра Фабри-Перо [2], полихроматора [3], дискретно перестраиваемого лазера.

Перечисленные типы сенсорных систем к сожалению существенно ограничены по частоте опроса, величина которой, не превышает 5 кГц [3].

В системах на основе полихроматора и перестраиваемого эталона Фабри-Перо быстродействие ограничено низкой спектральной плотностью, используемых источников излучения, а в приборах с дискретно перестраиваемым лазером скоростью перестройки длины волны.

Одновременно с этим, в авиации весьма востребованы сенсорные системы, способные регистрировать акустические колебания с частотами до 50 кГц. Также не менее важным требованием является возможность существенного сокращения стоимости удельной стоимости измерительной системы на один датчик при увеличении количества измерительных точек.

Поэтому авторы поставили своей целью разработать систему которая в полной мере будет удовлетворять вышеуказанным требованиям.

Проектирование измерительной системы

Для повышения скорости опроса датчиков было предложено использовать перестраиваемый SWEPT лазер, позволяющий осуществить перестройку длины волны в интервале более 100 нм за $2 \cdot 10^{-5}$ с.

Недостатком SWEPT лазера является нелинейность перестройки длины волны. Она может составлять порядка 15 нм (против 2 пм у конкурентов)[4]. В разработанной системе нелинейность будет устраняться на этапе обработки информации. Данная возможность появляется за счёт использования специального узла калибратора.

Структурная схема измерительной системы представлена на рисунке 1. Принцип действия заключается в следующем. Источник (SWEPT лазер) непрерывно перестраивается и излучает в диапазоне 1250 – 1360 нм. Это излучение попадает на разветвитель, где разделяется на несколько частей. Одна идёт к набору ВБР. От них отразится назад та часть излучения, которая находится в узкой окрестности центральной длины волны отражения. При прохождении назад, в оптическом циркуляторе эта часть будет перенаправлена на ФПУ, далее, в виде электрического сигнала, на АЦП, после чего поступит на обработку в ЭВМ. Таким образом, на основании излучения, полученного от

каждой опрашиваемой решётки, будет составлен массив распределения интенсивностей в зависимости от времени.

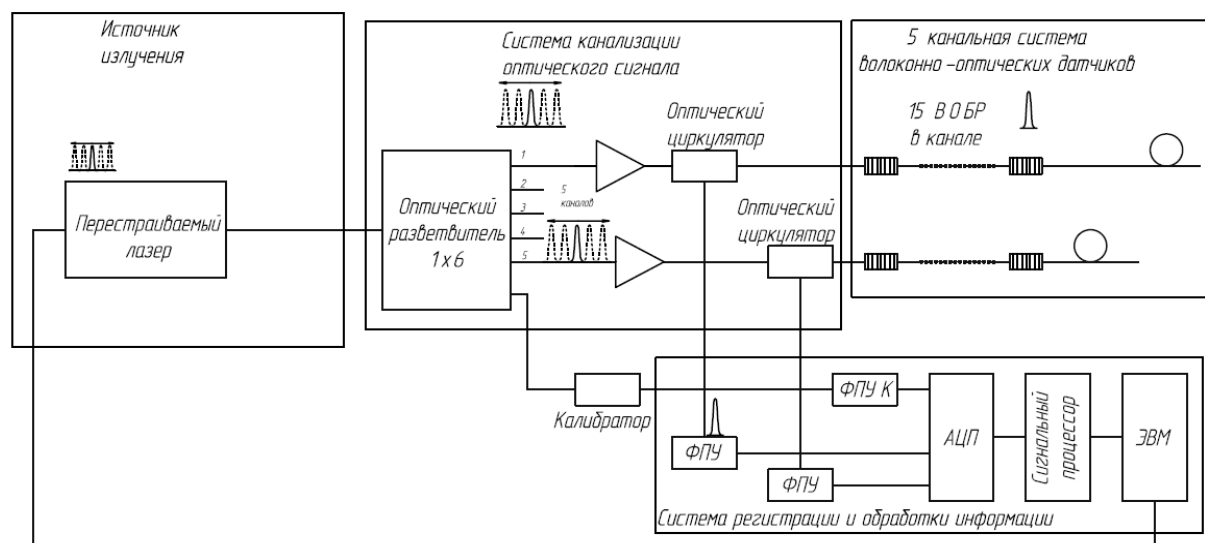


Рис. 1. Структурная схема квази-распределённой оптико-электронной системы для контроля деформаций на основе брэгговских датчиков с повышенной частотой опроса

ФПУ – фотоприёмное устройство, ВОБР – волоконно-оптическая брэгговская решётка

При линейной перестройке источника по длинам волн полученные от решёток массивы могли бы сразу дать информацию о положении пика отражения. Но нелинейность этой характеристики вносит слишком большие искажения, поэтому необходимо использование калибратора.

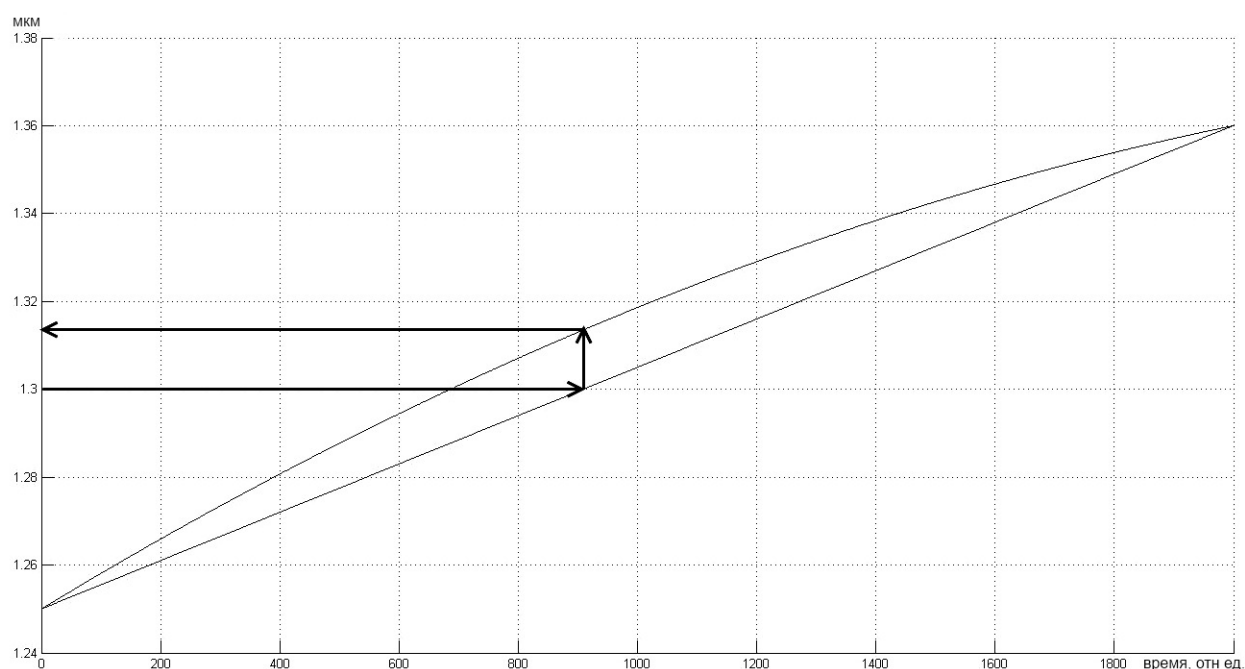


Рис. 2. График, показывающий влияние нелинейности перестройки лазера на определение длины волны

Калибратор состоит из эталона Фабри-Перо (ЭФП) и эталонной ВОБР, которая термостабилизирована, следовательно мы можем точно сказать, на какой длине волны находится её пик отражения. От ЭФП мы получим набор пиков интенсивности с шагом около 1,2 нм, координаты которых мы можем вычислить или измерить заранее. Таким образом, на выходе из калибратора мы получим распределение интенсивности, аналогичное показанному на рисунке 3.

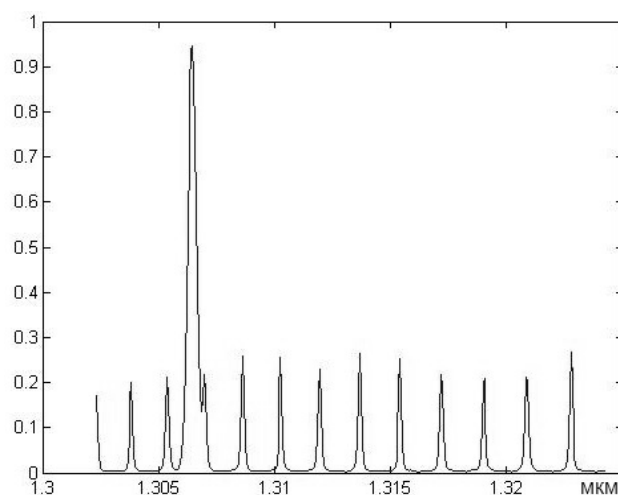


Рис. 3. График нелинейного распределения интенсивности на выходе калибратора

Так как эталонная ВОБР стабилизирована, то мы получаем опорную точку в данном массиве нелинейных значений, а значит, можем восстановить истинное значение длины волны в конкретный момент времени. На основании этих данных можно вычислить координаты пиков ЭФП. Таким образом, мы получаем своеобразную систему координат, которая, пусть и с некоторой погрешностью из-за последующей интерполяции, позволит определить длины волн пиков отражения измеряемых ВОБР и компенсировать наличие нелинейности перестройки источника излучения.

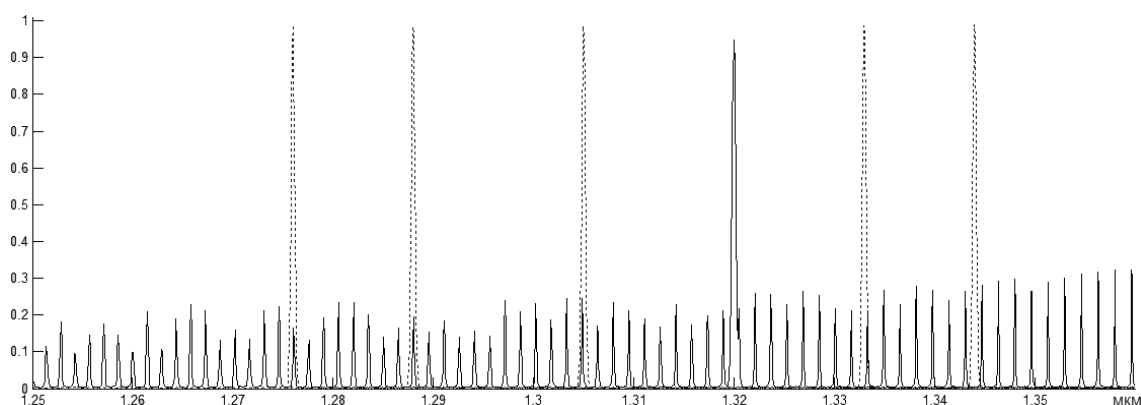


Рис. 4. График суммарного распределения интенсивности на выходе системы
сплошные линии – сигнал с калибратора, пунктирные линии – сигнал с измеряемых ВБР

Моделирование

Для изучения системы на стадии проектирования авторами была выполнена её компьютерно-математическая модель. Благодаря ей появилась возможность выявить влияние различных факторов на точность измерений, производимых системой. Рассмотрим результаты моделирования и проанализируем результаты.

Поскольку обработка полученных данных будет производиться на ЭВМ, то результаты измерений будут получаться в виде дискретных, а не непрерывных величин, что уже само по себе внесёт погрешность измерения. Алгоритмы вычисления пиков отражения ВОБР и пропуска ЭФП по набору отдельных точек графика не могут дать абсолютно точной величины. Для выбранного нами приёмника дискретность считывания сигнала составила 2000 измерений на интервале 110 нм.

На погрешность также будет влиять отношение сигнал/шум, поскольку все отклонения полученного распределения интенсивности от формы идеальной гауссоиды (в виде которой удобно определять центры всех пиков отражения и пропуска) уменьшают точность определения её центра. Чем меньше эти флуктуации, тем более достоверные значения длин волн мы получим.

Нелинейность перестройки лазера, очевидно, влияет на погрешность измерений, так как именно из-за неё окончательное положение пиков нужно находить с помощью интерполяции. Для лазеров с очень маленьким значением нелинейности можно было бы вообще отказаться от узла калибратора, но тогда они обладают на порядки меньшей скоростью перестройки и не подходят для нашей системы динамических измерений деформации.

Результаты

Сначала была рассмотрена модель системы с характеристиками, полученными по результатам расчётов (отношение сигнал/шум принято равным 300). Были промоделированы измерения длин волн пиков отражения брэгговских решёток. Результаты показали, что среднее значение погрешности составляет 21 пм.

Влияние отношения сигнал/шум. В данной системе эта величина может повлиять на результаты измерения интенсивностей, принимаемых от решёток, поскольку калибратор находится непосредственно в системе и уменьшения уровня сигнала из-за большой длины волокна в его узле происходить не должно. Моделирование различного уровня сигналов, получаемых от решёток, показывает, что уменьшение отношения сигнал/шум в три раза увеличило погрешность до 23 пм, в десять раз – до 29 пм, в 30 раз – до 42 пм.

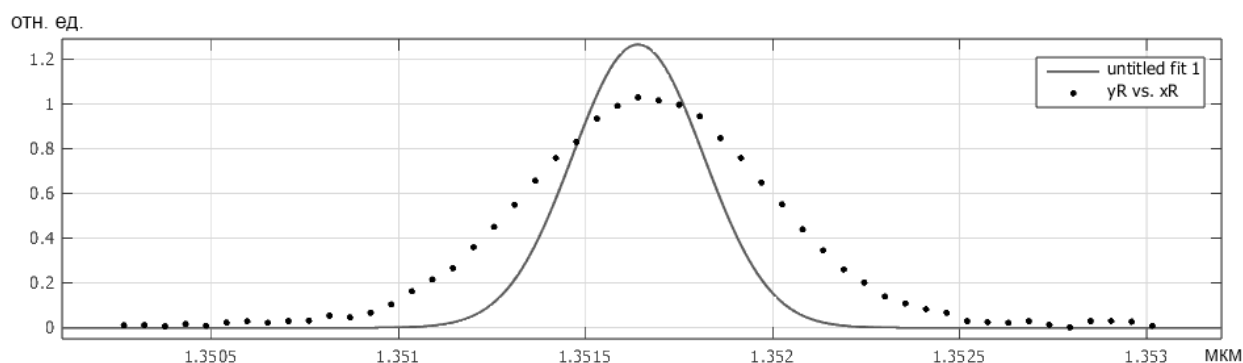


Рис. 5. График интенсивностей, получаемых при отношении сигнал/шум равном 30 (точки – полученные значения, сплошная линия – результат аппроксимации)

Влияние дискретности. Увеличивая дискретность, мы получаем большее количество точек для определения центральной длины волны отражения пиков. Результаты моделирования показывают, что увеличение дискретности в 2,5 раза уменьшает среднюю погрешность до 14 пм, увеличение дискретности в 5 раз – до 8 пм. Таким образом, более быстродействующие приёмники смогут повысить точность системы в несколько раз, когда стоимость менее критична, чем точность.

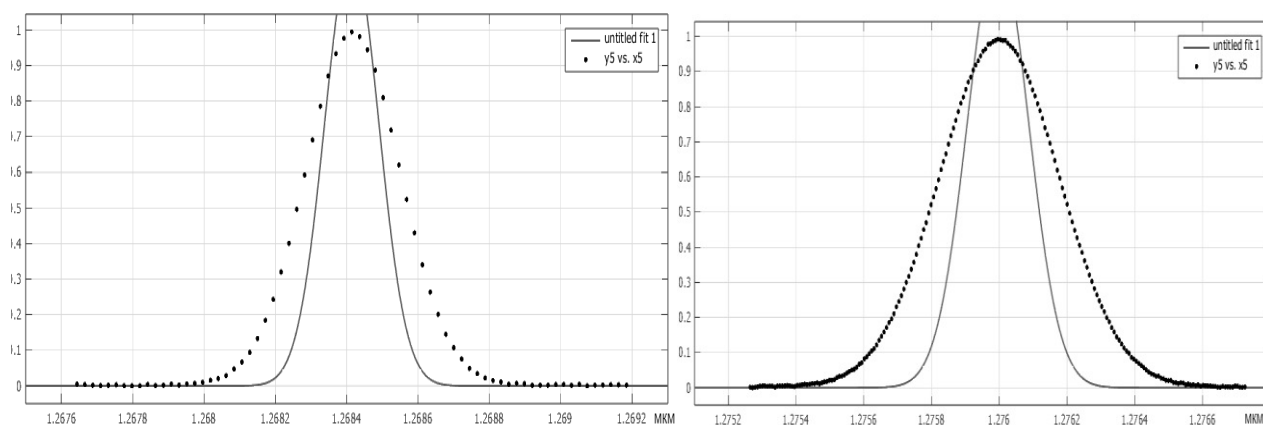


Рис. 6. График аппроксимации распределения интенсивностей при дискретности 50 (слева) и 200 (справа) точек/нм

Влияние нелинейности. Особенностью применяемого источника излучения является нелинейность перестройки его рабочей длины волны, форму которой нельзя предсказать заранее. Были промоделированы различные формы нелинейности (параболическая (рис. 2), синусоидальная, ломаная). Максимальная амплитуда отклонений не превышала 1 %, заявленного производителем лазера. На величину средней погрешности данные изменения практически не влияли, она оставалась в пределах 20-22 пм. При моделировании линейной перестройки лазера погрешности измерений составляли

13-14 пм, что говорит о несовершенстве алгоритма поиска координат пиков и требует его дальнейшего совершенствования.

Заключение

1. Волоконные оптико-электронные измерительные системы для контроля деформаций с повышенной частотой опроса могут быть востребованы во множестве отраслей науки и техники. Но пока что не являются предметом массового производства из-за отсутствия подходящей элементной базы.
2. SWEPT-лазер является подходящим источником излучения для реализации такой системы. Нелинейность перестройки может компенсироваться программно благодаря дополнительной обработке спектра излучения в узле калибратора.
3. Составленная математическая модель системы показывает, что при дальнейшем усовершенствовании алгоритма поиска координат пиков обеспечивается точность, необходимая для требуемого измерения величины деформации.
4. Моделирование параметра отношения сигнал/шум допускает его уменьшение. Следовательно, ухудшение пропускания волокна под влиянием внешних факторов не является критичным для работы системы.
5. Использование более дорогостоящих приемников излучения (с частотой 500 МГц) позволяет улучшать точность системы при необходимости.

Список литературы

1. Пнёв А.Б. Оптико-электронные измерительные системы на основе квази-распределённых волоконно-оптических брэгговских датчиков: Дис. канд.техн.наук. Москва, 2008.175 с.
2. Оптоволоконная мультисенсорная система, датчик температуры/деформации для оптоволоконной мультисенсорной системы, способ записи датчика (варианты) (патент № 2319988). Бабин Сергей Алексеевич (RU). Заявл.31.10.05; опубл.20.03.08.
3. Быстродействующая измерительная система на основе волоконно-оптических брэгговских датчиков для исследования деформации и температуры. W. Еске, А.А. Черторийский, В.Л. Веснин. Приборы и техника эксперимента, 2007, №4, С. 144-150