

Компьютерная модель волоконно-оптического датчика для измерения поперечного давления на основе двухчастотного оптоэлектронного генератора

Б.И. Магдеев, Н.А. Формакидов, Е.П. Денисенко

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н.Туполева – КАИ*

Аннотация: В статье демонстрируется компьютерная модель волоконно-оптического датчика, реализованный на основе двухчастотного оптоэлектронного генератора (ОЭГ) для измерения поперечного давления. В петле оптоэлектронного генератора используется волоконная брэгговская решетка (ВБР) с фазовым сдвигом, к которой прикладывается поперечное давление для наведения двулучепреломления и создания двух ортогонально поляризованных окон прозрачности, что приводит к генерации двух оптических частот. Разностная частота биений между двумя оптическими частотами лежит в СВЧ диапазоне и зависит от величины давления, приложенного к ВБР. Модельно получено, что чувствительность и минимальное обнаруживаемое давление составляют ~ 10 ГГц/(Н/мм) и $\sim 2,5 \times 10^{-4}$ (Н/мм) соответственно. Высокая частота и стабильность генерируемой СВЧ составляющей оптоэлектронного генератора обеспечивают чрезвычайно надежное и высокоточное измерение. Частотный опрос позволяет системе работать на высокой скорости. Кроме того, измерения нечувствительны к изменениям температуры окружающей среды и длины волны оптической несущей.

Ключевые слова: поперечное давление, волоконно-оптический датчик, волоконная брэгговская решётка с фазовым сдвигом, двулучепреломление, оптоэлектронный генератор, двухчастотный оптический сигнал с разностной частотой СВЧ диапазона

Введение

В последние десятилетия широко исследуются датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), которые имеют широкий спектр применений, таких как структурный мониторинг инженерных сооружений [1, 2], медицинская помощь [3], мониторинг безопасности трубопроводов [4]. Уникальные функции датчика на основе ВБР включают сверхвысокую чувствительность, компактность и возможность мультиплексирования. Невосприимчивость к электромагнитным помехам делает датчик на основе ВБР особенно подходящим для применений в сложных промышленных производствах. Среди различных физических величин датчик на основе ВБР может измерять не только продольную деформацию, но и поперечное

давление, жизненно важный параметр в структурном мониторинге инженерных сооружений.

Принцип измерения заключается в создании в ВБР индуцированного двулучепреломления. Однако обычно ширина полосы равномерной ВБР намного шире, чем сдвиг частоты, индуцированной двулучепреломлением, что серьёзно ограничивает чувствительность обнаружения и разрешение датчиков [5]. По этой причине в качестве датчика [6, 7] использовалась ВБР с фазовым π -сдвигом [8], имеющая окно прозрачности шириной около ~ 10 МГц. Когда давление прикладывается к ВБР с фазовым π -сдвигом, она становится двулучепреломляющей, а узкое окно прозрачности будет разделено на две части, причем расстояние между ними будет иметь прямую связь с приложенным давлением. Кроме данной проблемы следует учесть, что интеррогаторы, основанные на опросе длины волны ВБР с использованием анализатора оптического спектра, довольно медленны, а их разрешение ограничено [9]. Благодаря высокой скорости и высокому разрешению методов измерения частоты с помощью анализаторов электрического спектра, предложено перевести измерения из оптической области в радиочастотную. Для этого ВБР с фазовым π -сдвигом вставлена в цепь обратной связи оптоэлектронного генератора, генерирующего разностную частоту СВЧ-диапазона из двух оптических частот, соответствующих окнам прозрачности ВБР.

1. Конфигурация и модель оптоэлектронного генератора-датчика

На рис. 1 показана конфигурация предлагаемого датчика поперечного давления на основе двухчастотного оптоэлектронного СВЧ-генератора [10], включающего ВБР с фазовым π -сдвигом. Оптическая несущая лазера посылается на поляризационный модулятор через контроллер поляризации. Поляризационный модулятор представляет собой специальный фазовый

модулятор, который поддерживает фазовую модуляцию вдоль ортогональных главных осей с противоположными индексами модуляции.

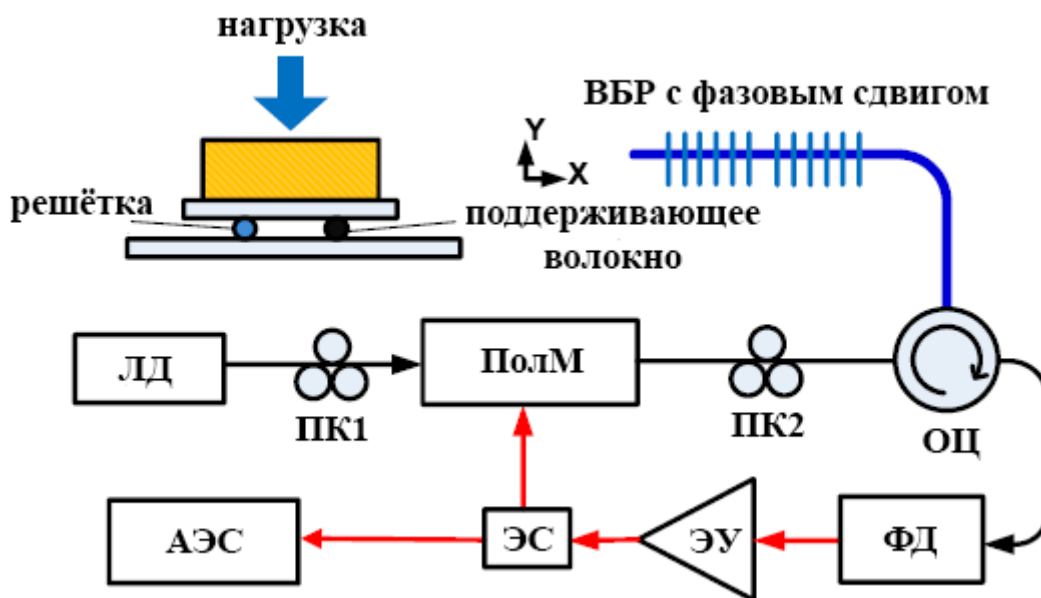


Рис. 1. – Конфигурация предлагаемого датчика поперечного давления: ПолМ – поляризационный модулятор; ПК – поляризационный контроллер; ФД – фотодетектор; ЭУ – электрический усилитель; АЭС – анализатор электронного спектра; ОЦ – оптический циркулятор; ЭС – электрический сплиттер

Для простоты предположим, что падающий свет ЛД поляризован под углом 45° к главным осям поляризационного модулятора ПолМ, и, таким образом, поляризационный модулятор работает как фазовый модулятор по двум осям. На первом этапе управляющее напряжение к модулятору не прикладывается и поступает через циркулятор ОЦ на ВБР с фазовым π -сдвигом, сигнал отраженный от конца волокна через окна прозрачности через ОЦ поступает на фотодетектор ФД. Генерируется разностная частота, которая усиливается в ЭУ и поступает через электронный сплиттер ЭС на управляющий вход ПолМ. Затем фазомодулированный сигнал отправляется в ВБР с фазовым π -сдвигом через оптический циркулятор. Обнаруженный электрический сигнал вновь отправляется в поляризационный модулятор

после усиления с помощью электрического усилителя для закрытия цикла генерации оптоэлектронного СВЧ генератора.

На рис. 2 показана собранная в OptiSystem модель оптоэлектронного генератора-датчика. Лазер ЛД и ПолМ в модели заменены на два лазера и фазовый модулятор, каждый из которых моделирует канал при различных поперечных давлениях. ОЦ заменен элементом решетки с двумя ФД. Различные поперечные нагрузки вводились в модель ВБР, созданной в программе OptiGrating, методом пошаговых расчетов.

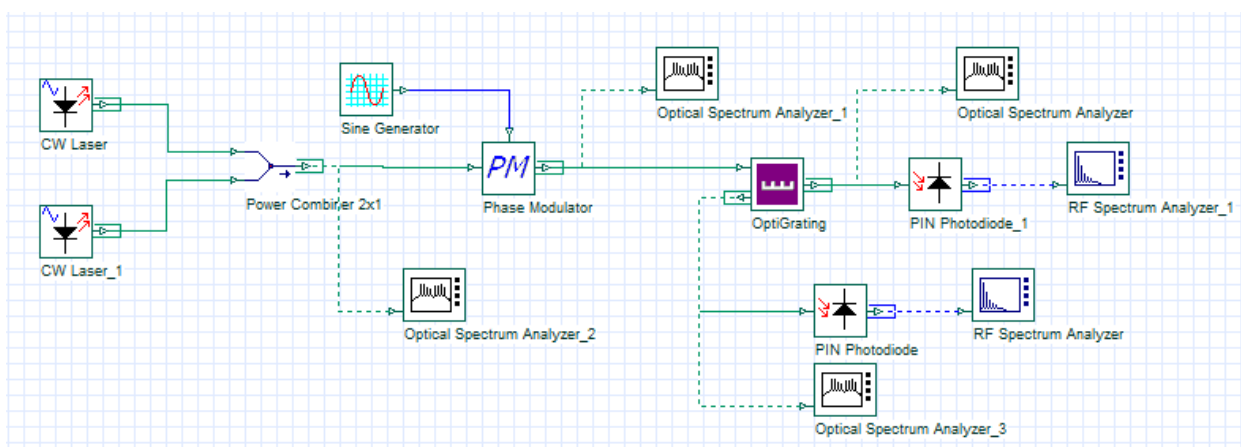


Рис. 2. – Собранная модель датчика

2. Результаты моделирования

Далее на рис. 3 – рис. 6 представлены графики с выхода оптического анализатора спектра без применения поперечного давления и с применением ряда следующих поперечных давлений 0.00025μ , 0.0005μ , 0.005μ соответственно, где $\mu=1$ Н/мм.

Заключение

Мы рассмотрели и экспериментально продемонстрировали компьютерную модель волоконно-оптического датчика поперечного давления на основе оптоэлектронного генератора, включающего ВБР с фазовым π -сдвигом, характеризующаяся высоким разрешением.

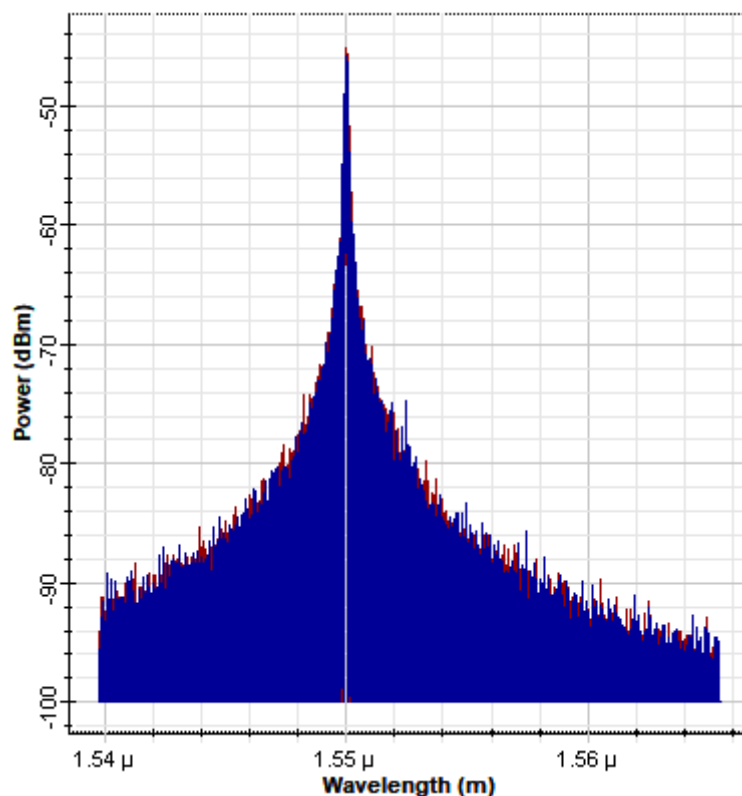


Рис. 3. – Выходной спектр без приложения поперечного давления

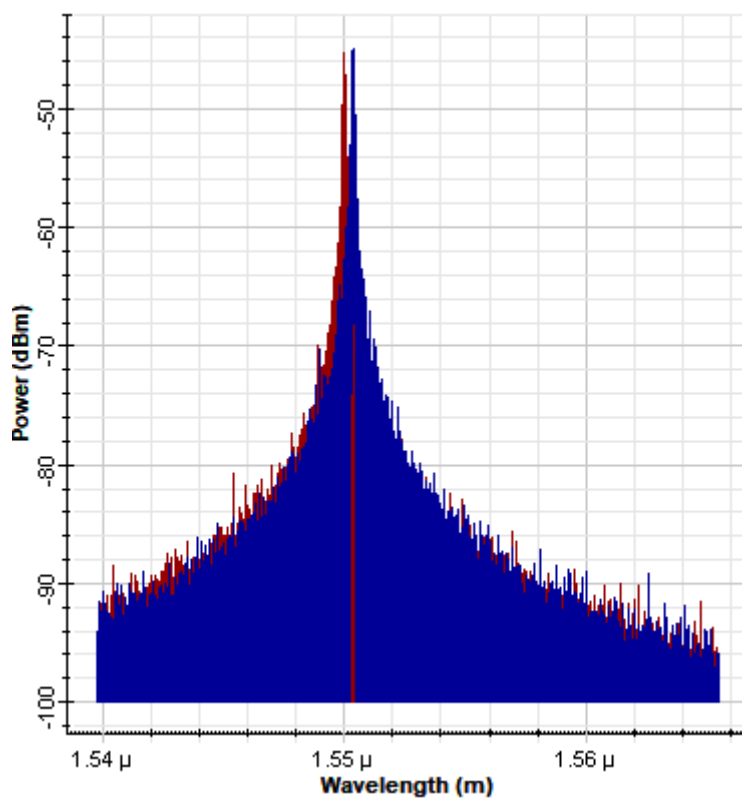


Рис. 4. – Выходной спектр с приложением поперечного давления 0.00025μ

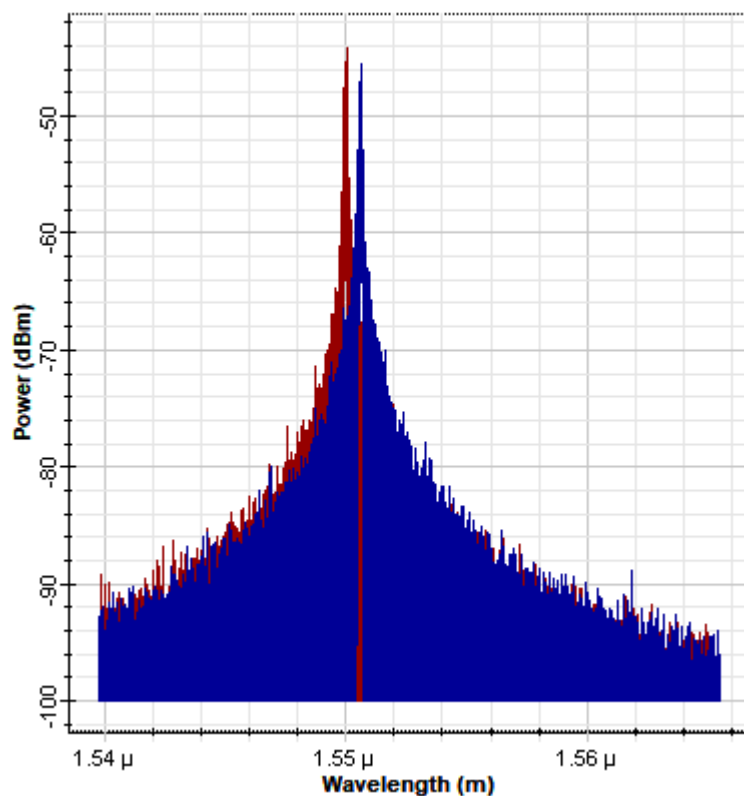


Рис. 5. – Выходной спектр с приложением поперечного давления 0.0005μ

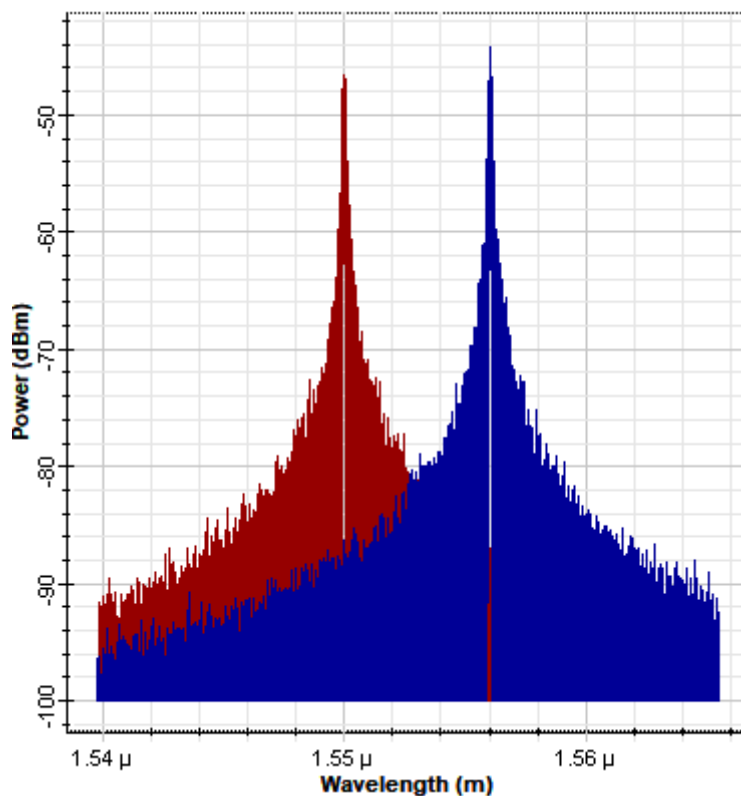


Рис. 6. – Выходной спектр с приложением поперечного давления 0.005μ

Основной концепцией работы было использование ОЭГ, включающего ВБР с фазовым π -сдвигом, к которому было приложено поперечное давление. Из последних четырёх графиков видно, что чем больше прикладываемое поперечное давление, тем больше частотное расстояние между двумя оптическими частотами, определяемыми оными прозрачности решетки. Минимальное давление было зарегистрировано при $0,00025\mu$. Чувствительность модели датчика составила ~ 10 ГГц/(Н/мм).

Литература

1. Jones M. Structural-health monitoring: a sensitive issue // Nat. Photonics. 2008. Vol. 2. pp. 153-154.
2. Guo H., Xiao G., Mrad N., and Yao J. P. Fiber optic sensors for structural health monitoring of air platforms // Sensors. 2011. Vol. 11. pp. 3687-3705.
3. Pinet E. Medical applications: saving lives // Nat. Photonics. 2008. Vol. 2. pp. 150-154.
4. Nakstad H. and Kringlebotn J.T. Oil and gas applications: probing oil fields // Nat. Photonics. 2008. Vol. 2. pp. 147-149.
5. Морозов О.Г. и др. Щетка как интеллектуальный узел электродвигателя // Инженерный вестник Дона, 2016, № 1. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n1y2016/3525.
6. LeBlanc M., Vohra S.T., Tsai T.E., and Friebele E.J. Transverse load sensing by use of π -phase-shifted fiber Bragg gratings // Opt. Lett. 1999. Vol. 24. pp. 1091-1093.
7. Fu H., Shu X., Mou C.B., Zhang L., He S., and Bennion I. Transversal loading sensor based on tunable beat frequency of a dual-wavelength fiber laser // IEEE Photon. Technol. Lett. 2009. Vol. 21. pp. 987-989.
8. Мисбахов Рус.Ш. и др. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент

мультиплексирования сенсорных сетей // Инженерный вестник Дона, 2017, № 3. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343.

9. Белкин М.Е., Сигов А.С. Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 8. с. 901–914.

10. Белкин М.Е. Разработка модели оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона // «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения ИНТЕРМАТИК-2008». 2008. с. 289–297.

References

1. Jones M. Nat. Photonics. 2008. Vol. 2, pp. 153-154.
2. Guo H., Xiao G., Mrad N., and Yao J.P. Sensors. 2011. Vol. 11, pp. 3687-3705.
3. Pinet E. Nat. Photonics. 2008. Vol. 2, pp. 150-154.
4. Nakstad H. and Kringlebotn J.T. Nat. Photonics. 2008. Vol. 2, pp. 147-149.
5. Morozov O.G., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2016/3525.
6. LeBlanc M., Vohra S.T., Tsai T.E., and Friebele E.J. Opt. Lett. 1999. Vol. 24, pp. 1091-1093.
7. Fu H., Shu X., Mou C.B., Zhang L., He S., and Bennion I. IEEE Photon. Technol. Lett. 2009. Vol. 21, pp. 987-989.
8. Misbahov Rus.Sh., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343.
9. Belkin M.E., Sigov A.S. Radiotekhnika i ehlektronika. 2009. Vol. 54. № 8, pp. 901–914.
10. Belkin M.E. Fundamental'nye problemy radioehlektronnogo priborostroeniya INTERMATIK-2008. Materialy mezhdunarodnoj NTK (Fundamental problems of radioelectronic means). 2008, pp. 289-297.