

УДК 681.2.082

## ИНТЕРРОГАЦИЯ ЧАСТОТНЫМ МЕТОДОМ НА ФОТОННОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЕ

В. В. Иванов<sup>1</sup>, Г. С. Воронков<sup>2</sup>, Е. П. Грахова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ivanov.vv@ugatu.su, <sup>2</sup>voronkov.gs@ugatu.su, <sup>3</sup>grakhova.ep@ugatu.su

<sup>1-3</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Поступила в редакцию 26.04.2023

**Аннотация.** Кремниевая радиофотоника является перспективной темой исследований в последние годы из-за потенциальной возможности интеграции с широко распространенными электронными устройствами на основе кремния. В статье предложена схема интеррогации, основанная на преобразовании изменения спектра оптического излучения в изменение спектра сверхвысокочастотного сигнала, реализованная на фотонной интегральной схеме. Проведено моделирование предложенной схемы в программном комплексе Ansys Lumerical для случая использования датчика на фазосдвигающей Брэгговской решетке. Результаты моделирования показали возможность использования предложенной схемы для интеррогации с разрешением 5 пм.

**Ключевые слова:** фотонная интегральная схема, интеррогация, волоконная брэгговская решетка, радиофотоника, измерительная система, кремниевая фотоника.

### ВВЕДЕНИЕ

Реализация функционала оптических компонентов на фотонных интегральных схемах (ФИС) порождает на данный момент большой исследовательский интерес, так как в сравнении со стандартной дискретной сборкой ФИС предлагает такие преимущества, как миниатюризация устройств, повышение энергоэффективности, надежности, скорости, стабильность характеристик, увеличение пропускной способности и др. В сенсорных системах вышеперечисленные достоинства имеют большое значение, вследствие чего интегральная фотоника применяется при реализации устройств первичного преобразования (датчиков), интеррогаторов – оптических регистрирующих устройств (со значительным улучшением в массогабаритных показателях, надёжности, энергопотреблении, термической и вибрационной стабильности) и систем, осуществляющих обработку данных.

В настоящее время оптические датчики широко применяются в областях, требующих высокоточных систем измерения. За последние несколько десятилетий были предложены и продемонстрированы многочисленные разновидности типов оптических датчиков и методов интеррогации [1]. Эта область исследований успешно используется для практических приложений, таких как мониторинг состояния строительных конструкций, биомедицинское зондирование, а также контроль качества и процессов. Схемы интеррогации применяются для оценки смещения длины волны, отраженной от оптического датчика из-за изменения условий окружающей среды, таких как температура, деформация или вибрация.

---

*Исследование выполнено в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки России для УУНИТ (код научной темы #FEUE-2021-0013, соглашение № 075-03-2023-119) в молодежной научно-исследовательской лаборатории Евразийского НОЦ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».*

В работе [2] был представлен интеррогатор на ФИС, реализующий метод оценки уровня интенсивности отраженного сигнала. Данный пример показывает перспективы интегральных фотонных схем в области интеррогации. Однако интегральных фотонных схем интеррогации, реализующих частотный метод, представлено не было. Использование схемы интеррогации в частотной области позволит увеличить разрешение измерений и скорость опроса датчиков.

Целью данной работы является разработка интеррогатора, использующего частотный метод, реализованного на фотонной интегральной схеме.

Применение микроволнового фотонного фильтра или оптоэлектронного резонанса может преобразовать сдвиг длины волны оптических датчиков в частотный сдвиг электрического сигнала в области электрических частот, который может быть опрошен анализатором спектра со сверхвысоким разрешением.

### РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ИНТЕРРОГАЦИИ

В работе [3] показана базовая схема интеррогатора, реализующего преобразование длины волны в частотную область с использованием фазовой модуляции. На основе указанной схемы была разработана схема на ФИС, представленная на рис 1. Оптический тракт состоит из источника оптического излучения, фазового модулятора (ФМ), ответвителя, волоконной брэгговской решетки (ВБР) и фотодетектора (ФД).

Световая волна с центральной частотой  $f$  от источника оптического излучения (ИОИ) направляется на фазовый модулятор. ФМ управляется источником широкополосного сигнала (ИШС). Модулированная световая волна попадает на PS-ВБР (Phase-Shifted Fiber Bragg Grating – ВБР с фазовым сдвигом), через ответвитель отраженный сигнал направляется на ФД, оптический сигнал преобразуется в электрический сигнал, и происходит оценка смещения длины волны оптического излучения за счет анализа спектра сверхвысокочастотного (СВЧ) электрического сигнала на выходе детектора.

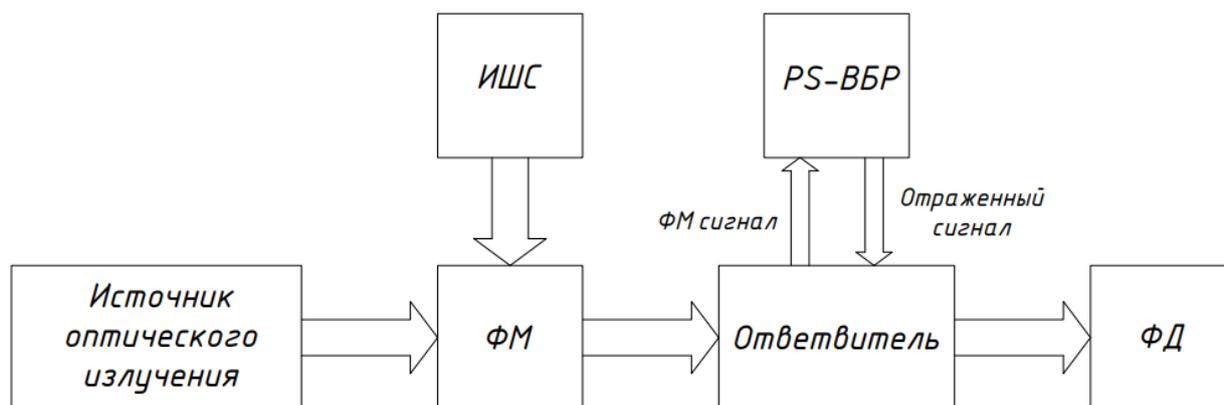


Рис. 1. Структурная схема интеррогации

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Имитационное моделирование схемы, представленной на рис. 1, проведено в среде Ansys Lumerical со следующими параметрами: длина волны оптического излучения 1500 нм, ширина полосы 10 МГц, мощность излучения 6 дБм. В качестве датчика была выбрана PS-ВБР с фазовым сдвигом 180. Схема имитационной модели интеррогатора представлена на рис. 2.

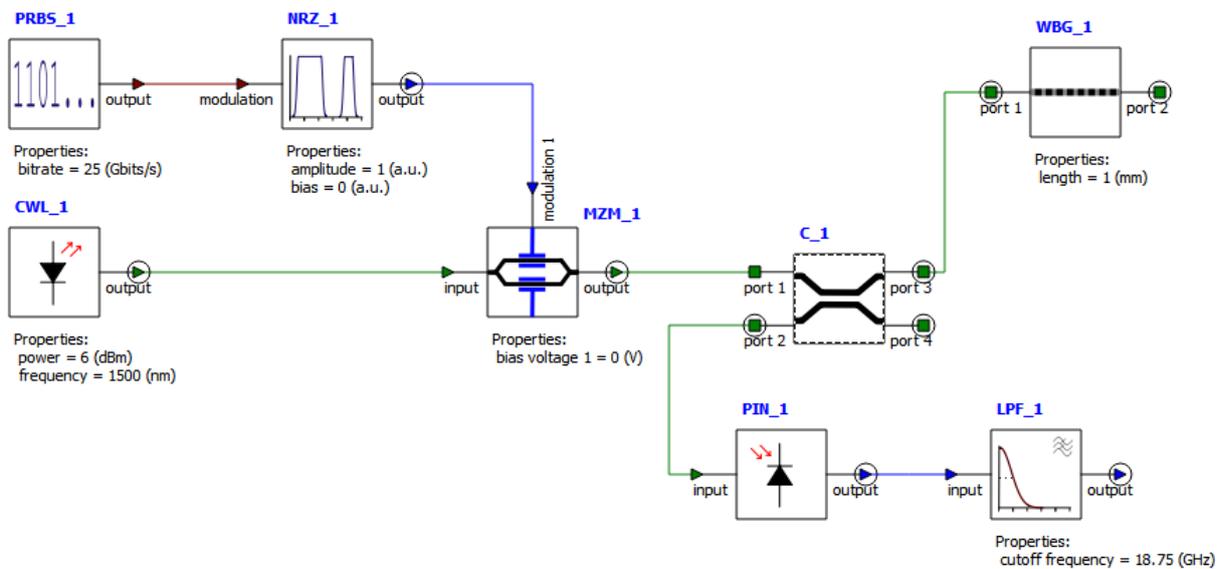


Рис. 2. Схема имитационной модели интеррогатора

ИОИ генерирует оптический сигнал, который, согласно схеме, преобразуется в фазомодулированный сигнал, управляемый широкополосным сигналом. Спектр фазомодулированного сигнала представлен на рис. 3.

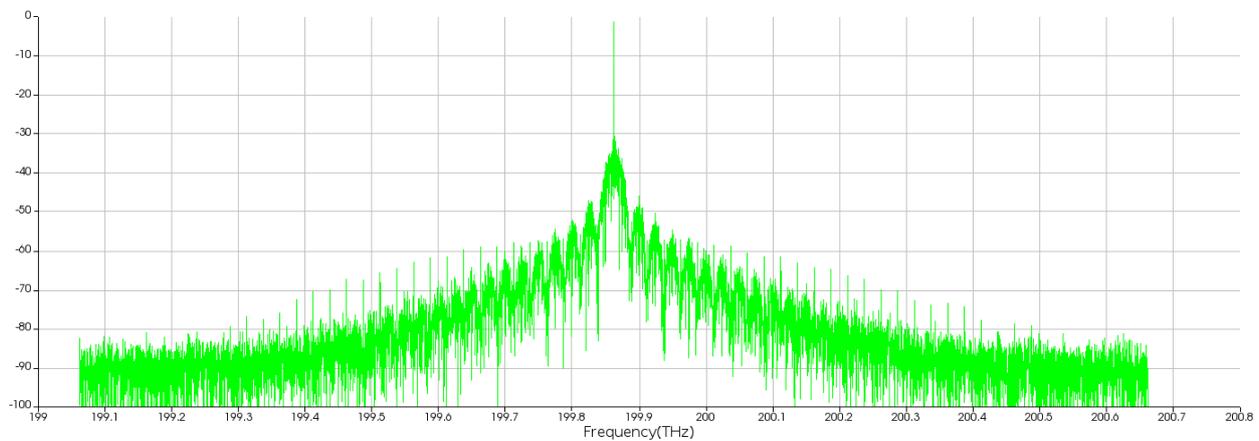


Рис. 3. Спектр фазомодулированного сигнала

Далее фазомодулированный сигнал через ответвитель попадает на PS-ВБР, где происходит отражение оптического сигнала. Спектр отраженного сигнала смещается в зависимости от изменения периода PS-ВБР [4], которое, в свою очередь, определяется внешним воздействием на датчик (например, температуры). Спектр и временная форма отраженного сигнала представлены на рис. 4 – 5.

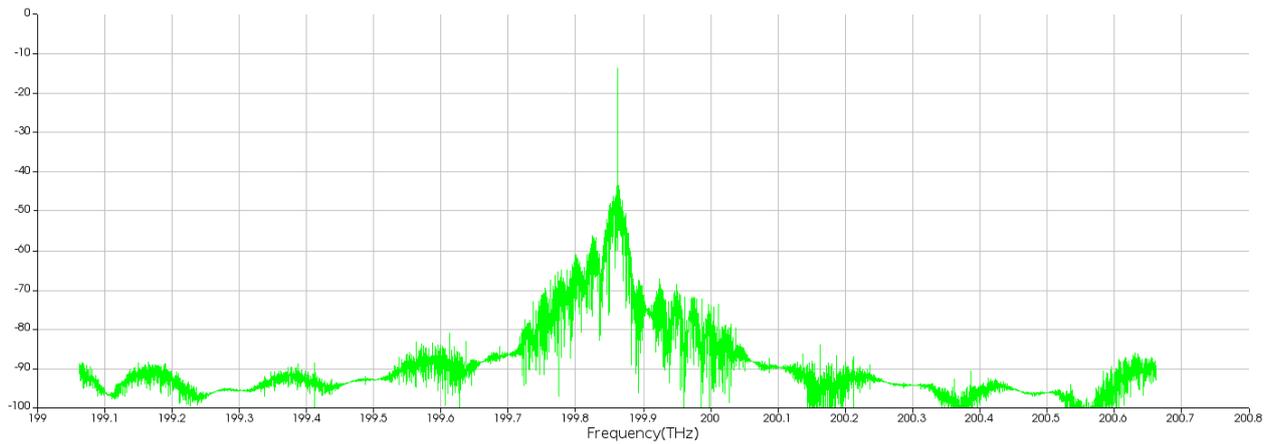


Рис. 4. Спектр отражённого сигнала

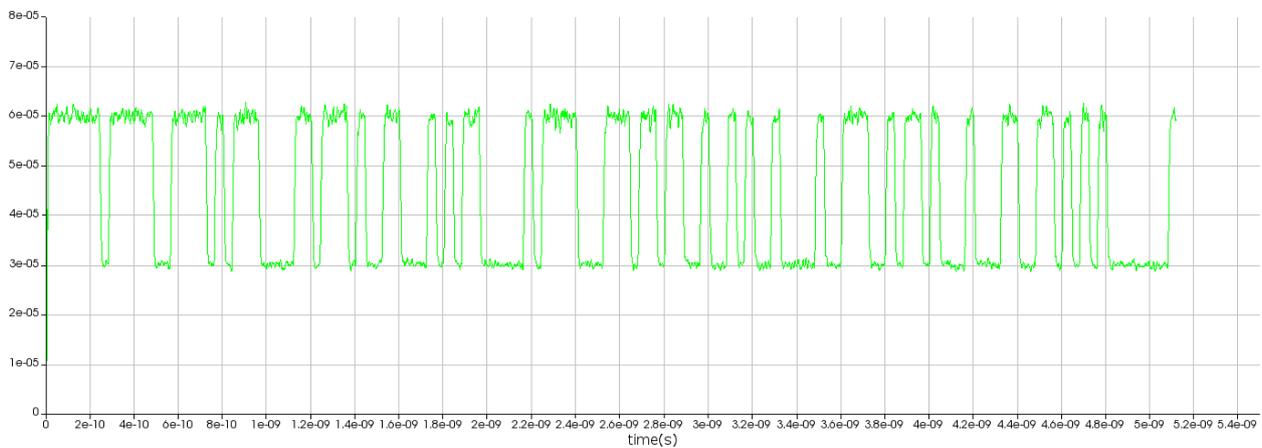


Рис. 5. Временная форма отражённого сигнала

Отраженный сигнал направляется на ФД, где преобразуется в радиочастотный сигнал (РЧ). Частота РЧ сигнала меняется пропорционально смещению спектра отраженного сигнала [5]. Спектр и временная форма РЧ сигнала представлены на рис. 6 – 7.

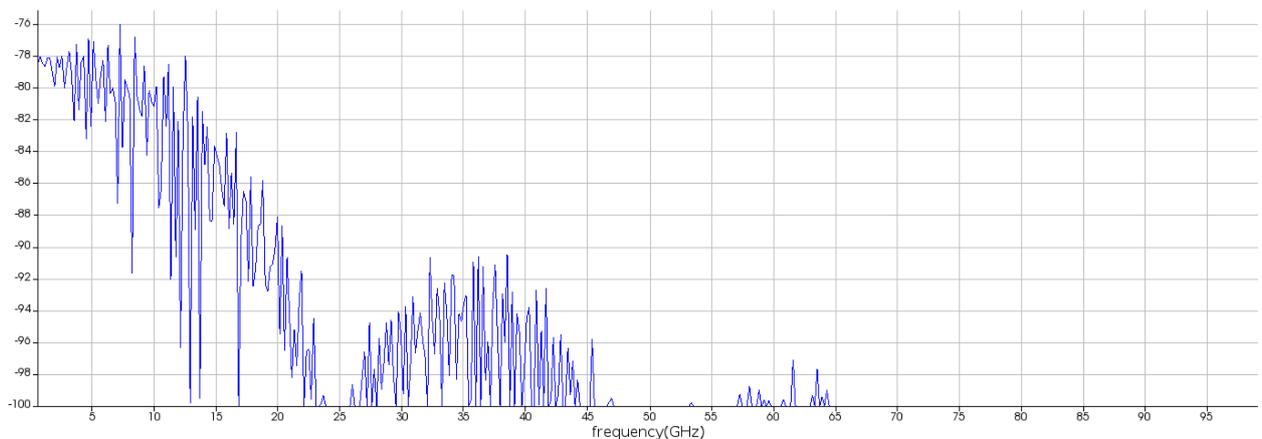


Рис. 6. Спектр РЧ сигнала

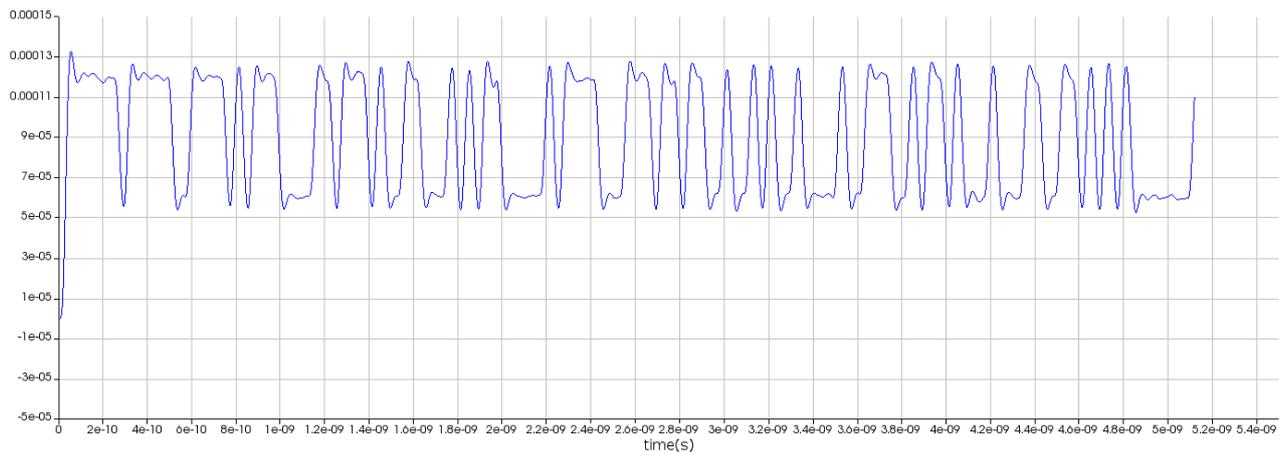


Рис. 7. Временная форма РЧ сигнала

Значение частоты РЧ сигнала отражает изменение периода волоконной брэгговской решетки. На рис. 8 представлен график зависимости частоты РЧ сигнала от периода PS-ВБР.

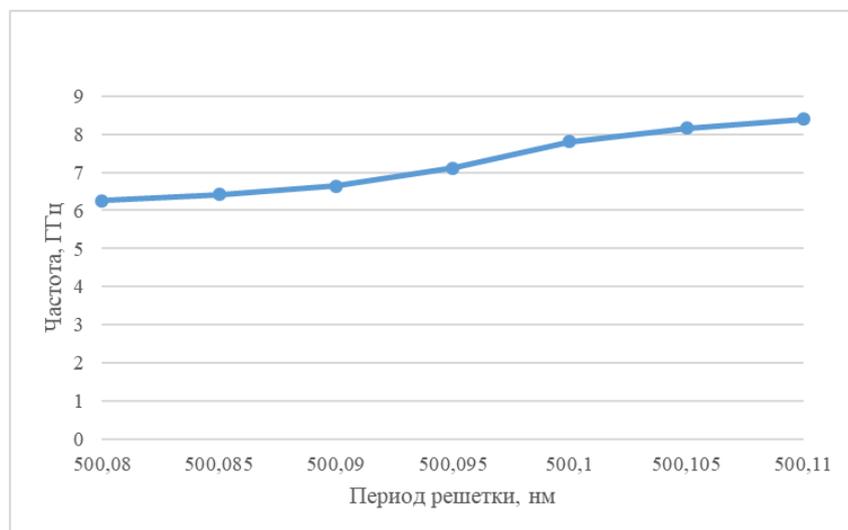


Рис. 8. Зависимость частоты РЧ сигнала от периода PS-ВБР

Проанализировав рис. 8, можно сделать вывод, что предложенная схема реализует интеррогацию в частотной области. Полученное разрешение составило 5 пм.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложена структура фотонной интегральной схемы, реализующей частотный метод интеррогации для датчика, выполненного на фазосдвигающей брэгговской решетке. Проведено моделирование предложенной схемы в программном комплексе Ansys Lumerical. Результаты моделирования показали возможность использования предложенной схемы для интеррогации с разрешением 5 пм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ed. Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S. Fiber Optic Sensors / CRC Press, 2008.
2. Li H. et al. Silicon Waveguide Integrated with Germanium Photodetector for a Photonic-Integrated FBG Interrogator // Nanomaterials. 2020. Vol. 10. № 9. P. 1683.
3. Yao J. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms // Opt. Commun. 2011. Vol. 284. № 15. P. 3723-3736.
4. Agrawal G. P., Radic S. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing // IEEE Photon. Technol. Lett. Aug. 1994. Vol. 6. No. 8. Pp. 995-997.

5. Xu, O., Zhang, J., & Yao, J. High speed and high-resolution interrogation of a fiber Bragg grating sensor based on microwave photonic filtering and chirped microwave pulse compression// Optics Letters. 2016. 41(21). 4859.

#### ОБ АВТОРАХ

**ИВАНОВ Владислав Викторович**, аспирант 3-го курса. каф. ТС

**ВОРОНКОВ Григорий Сергеевич**, доцент каф. ТС

**ГРАХОВА Елизавета Павловна**, доцент каф. ТС

#### METADATA

**Title:** Photonic integrated circuit based interrogator in frequency domain

**Authors:** V. V. Ivanov<sup>1</sup>, G. S. Voronkov<sup>2</sup>, E. P. Grakhova<sup>3</sup>

**Affiliation:**

<sup>1, 2, 3</sup> Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>ivanov.vv@ugatu.su, <sup>2</sup>voronkov.gs@net.ugatu.su, <sup>3</sup>grakhova.ep@ugatu.su

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 3 (29), pp. 109-114, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The article presents a developing a photonic integrated circuit with interrogation in frequency domains. The simulation of the proposed scheme in the software package Ansys Lumerical was carried out. The experimental results show this system provides a resolution of 5 pm. The proposed scheme meets the requirements of industrial use.

**Key words:** photonic integrated circuit; interrogation; fiber Bragg grating; radiophotonics; sensing system; silicon photonics

**About authors:**

**IVANOV, Vladislav Viktorovich**, Post-Graduate Student 3 year, Ufa University of Science and Technology.

**VORONKOV, Grigory Sergeevich**, Associate Professor, Ufa University of Science and Technology.

**GRAKHOVA, Elizaveta Pavlovna**, Associate Professor, Ufa University of Science and Technology.