

СХЕМА ПОНИЖЕНИЯ ЧАСТОТЫ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛЯТОРА

Степанов И.В., Иванов В.В., Воронков Г.С., Султанов А.Х.
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, РФ
E-mail: stepanov.iv@ugatu.su

На сегодняшний день оптические датчики и системы их опроса привлекают значительное внимание исследователей. При этом частотный метод опроса датчиков уже показал свои преимущества в различных областях. Однако, для реализации такого метода посредством схемы оптоэлектронного осциллятора требуется ее улучшение с помощью простых и экономически эффективных методов измерения частоты. В представленной статье продемонстрирована схема опроса по частоте на основе интегрального оптоэлектронного осциллятора, дополненного схемой понижения частоты, для определения показателя преломления жидкости. В качестве датчика используется брэгговская решетка с фазовым сдвигом, являющаяся режекторным фильтром в петле обратной связи оптоэлектронного осциллятора. Влияние внешних факторов (в данном случае изменение показателя преломления жидкости) приводит к сдвигу центрального пика решетки, что приводит к изменению частоты сигнала на выходе оптоэлектронного осциллятора. В свою очередь, схема понижения частоты уменьшает значение измеряемой частоты сигнала, позволяя снизить сложность и стоимость сенсорной системы. В рамках статьи было выполнено имитационное моделирование схемы оптоэлектронного осциллятора для опроса датчиков при изменении показателя преломления жидкости от 1,39 до 1,391. При этом частота сигнала на выходе оптоэлектронного осциллятора изменялась от 3,01 до 12,89 ГГц. Частота опроса датчика составила 12,5 МГц. Также были рассмотрены возможности реализации схемы понижения частоты с помощью коммерчески доступных устройств. В результате, предложенная схема опроса датчиков может быть применена для анализа различных жидкостей, в том числе для обнаружения и оценки патологий крови и других биологических жидкостей.

Ключевые слова: оптоэлектронный осциллятор, сенсорная система, оптический датчик, преобразование частоты, волноводная брэгговская решетка, брэгговская решетка с фазовым сдвигом

Введение

Основным источником данных в измерительных системах являются датчики. Постоянно разрабатываются как новые виды и типы датчиков, так и подходы к их опросу, поскольку они могут улучшить параметры измерительных систем или открыть новую область их применения. Одной из многообещающих технологий является опрос в частотной области посредством схем оптоэлектронного осциллятора (ОЭО) [1]. Системы опроса на основе ОЭО обладают высокой чувствительностью и скоростью опроса [2]. Данные особенности критически важны для областей применения, где измеряемая характеристика изменяется в малых диапазонах или с высокой (порядка единиц мегагерц) частотой [3].

ОЭО преобразует сдвиг центральной длины волны оптического датчика, возникающий вследствие внешнего воздействия (деформации, поперечной нагрузки, температуры, а также изменения показателя преломления окружающей среды), в изменение частоты сверхвысокочастотного (СВЧ) колебания на

выходе схемы [4]. Соответственно, частота сигнала на выходе ОЭО будет зависеть от воздействия, приложенного к датчику. Однако частоты выходных колебаний ОЭО составляют единицы или десятки гигагерц и измерение таких частот является сложной задачей. Для ее решения в схемах опроса на основе ОЭО применяются дополнительные компоненты, такие как анализаторы, реализующие быстрое преобразование Фурье [5], спектроанализаторы или высокоскоростные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) [6]. Однако такие устройства подходят только для лабораторных условий, где не предъявляются дополнительные требования к энергопотреблению, габаритам, задержкам, возможностям автоматизации и цене конечного изделия. Соответственно, для удовлетворения этих требований необходимы новые математические и технологические подходы для улучшения обработки сигналов от сенсорных систем на основе ОЭО.

На данный момент существуют транзисторы с рабочими частотами, подходящими для работы со схемами ОЭО [7], что позволяет использовать



для получения значения частоты ОЗО фототранзисторы или транзисторные делители частоты. Также для этой цели был предложен математический подход, основанный на аппроксимации рациональными функциями [8]. Более того, был предложен метод преобразования частотного опроса датчиков в опрос по интенсивности [9].

Перспективными устройствами для новых областей применения являются датчики и сенсорные системы на основе фотонных интегральных схем (ФИС) [10]. Ранее авторами данной статьи описывались преимущества применения интегрального ОЗО для сенсорных систем [11].

В данной статье предложена схема частотного опроса датчиков на основе интегрального ОЗО, выходная частота СВЧ-колебания которого зависит от резонансной длины волны оптического устройства, используемого для определения показателя преломления анализируемой жидкости. Предложенная система может быть использована для определения концентрации вещества в жидкости [12] или же для анализа биологических жидкостей [13]. Для измерения частоты СВЧ-колебаний схема ОЗО дополнена блоком преобразования частоты, что обеспечивает возможность снижения значения регистрируемых частот, тем самым позволяя снизить стоимость конечного оборудования и повысить степень интеграции сенсорной системы в целом. Соответственно, данная работа направлена на разработку системы опроса датчиков на основе интегрального ОЗО со схемой преобразования частоты.

На основе вышеизложенного, задача работы может быть сформулирована следующим образом: разработка частотного метода опроса датчиков, применимого для коммерческих высокоскоростных систем, и снижение требований к конечному оборудованию систем опроса.

Сенсорная система на основе оптоэлектронного осциллятора с преобразователем частоты

В качестве оптического датчика использована волноводная решетка Брэгга с фазовым сдвигом (ФС-ВБР) [14]. Данный тип датчика часто применяется, например, в медицине и биологии [15]. Как указано выше, для опроса датчика была применена схема ОЗО.

Принцип работы ОЗО основан на биении оптических поднесущих и подробно описан в работе [16]. На рисунке 1 представлена схема интегрального ОЗО с ФС-ВБР в качестве режекторного фильтра.

Для запуска процесса генерации СВЧ-колеба-

ний в ОЗО узкополосное излучение с внешнего источника лазерного излучения поступает на ФИС, где проходит через фазовый модулятор, где оптическое излучение модулируется шумовым сигналом с усилителя. После этого фазомодулированный оптический сигнал поступает на режекторный фильтр, где часть спектра сигнала подавляется. Вследствие подавления противофазной части спектра оптического сигнала на режекторном фильтре возникает биение двух оптических несущих на фотодетекторе с частотой, определяемой разностью частот источника лазерного излучения и режекторного фильтра.

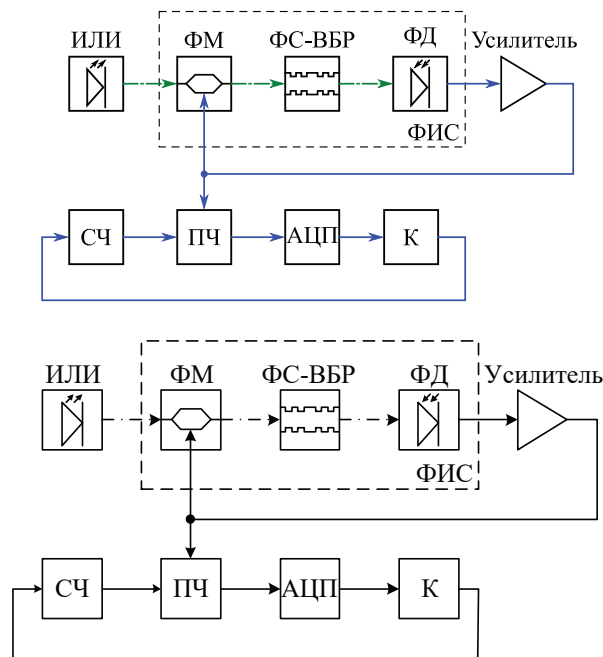


Рисунок 1. Схема оптоэлектронного осциллятора с волноводной брегговской решеткой с фазовым сдвигом: ИЛИ – источник лазерного излучения, ФМ – фазовый модулятор, ФД – фотодетектор, ФИС – фотонная интегральная схема, СЧ – синтезатор частоты, ПЧ – преобразователь частоты, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, К – контроллер. Штрихпунктирными линиями показаны оптические сигналы, сплошными – электрические

Для снижения сложности измерения частоты СВЧ-колебаний на выходе ОЗО была построена схема понижения частоты (рисунок 1). Данная схема состоит из преобразователя частоты (ПЧ), синтезатора частоты (СЧ), АЦП и контроллера (К). Она работает следующим образом. СВЧ-колебание с выхода ОЗО поступает на вход ПЧ и преобразуется в колебание промежуточной частоты (ПрЧ):

$$f_{\text{ПрЧ}} = |f_{\text{СЧ}} - f_{\text{ОЗО}}|. \quad (1)$$

Требуемое значение ПрЧ сохранено в памяти контроллера. С выхода ПЧ, колебание ПрЧ

поступает на АЦП, где происходит измерение его частоты, после этого измеренное значение сравнивается с требуемым в контроллере. В случае отклонения значения частоты колебания ПрЧ контроллер генерирует управляющий сигнал для изменения частоты на выходе СЧ. Соответственно, при отсутствии изменения частоты ОЭО ПрЧ не изменяется. В случае изменения частоты ОЭО происходит изменение ПрЧ, контроллер подает сигнал на изменение частоты СЧ, после чего происходит возвращение значения ПрЧ к исходному. Поскольку значения $f_{\text{ПрЧ}}$ и $f_{\text{СЧ}}$ в выражении (1) известны, становится возможным вычисление значения $f_{\text{ОЭО}}$. Альтернативным методом вычисления частоты колебания на выходе ОЭО может послужить применение фиксированной частоты СЧ. В свою очередь, по известной частоте колебания на выходе ОЭО можно определить резонансную (пиковую) частоту оптического датчика:

$$f_{\text{ФС-ВБР}} = f_{\text{лазера}} - f_{\text{ОЭО}}.$$

В предложенной схеме стабильность частоты синтезатора в значительной мере влияет на погрешность измерения, что снижает влияние фазового шума ОЭО на результат измерения. Так, для синтезатора частоты LMX2820 FFA (TI, США) нестабильность частоты в устоявшемся режиме составляет 30 кГц [17]. При этом для данного случая время перестройки частоты СЧ составляет около 20 нс, что ограничивает время опроса датчика. Возможным решением этих проблем является повышение промежуточной частоты, однако это требует более производительного АЦП, что увеличивает стоимость и сложность системы. Также возможным решением является применение микроконтроллеров и одноплатных компьютеров в качестве АЦП.

Результаты моделирования системы

На основе рисунка 1 была разработана численная модель интегрального ОЭО в программном обеспечении Lumerical INTERCONNECT. Изменение показателя преломления жидкости, окружающей ФС-ВБР, приводит к сдвигу ее резонансной частоты. Зависимость данной частоты от показателя преломления жидкости была получена с помощью численного моделирования в программном обеспечении Lumerical MODE. На рисунке 2 показана зависимость частоты колебания на выходе ОЭО от показателя преломления анализируемой жидкости. В рамках моделирования было рассмотрено изменение показателя преломления жидкости от 1,39 до 1,391, что соответствует показателю преломления крови при наличии раковых заболеваний [15].

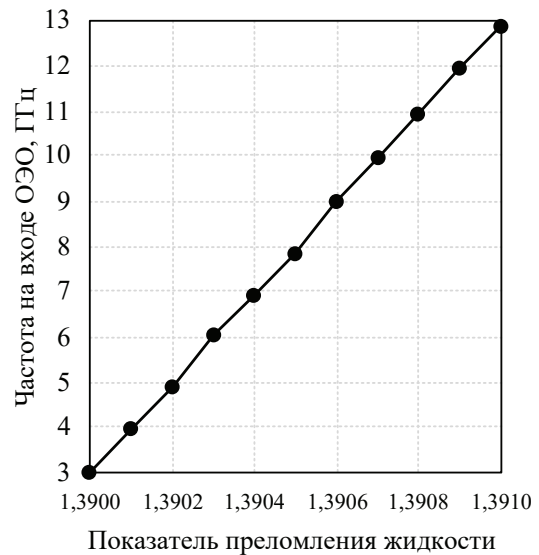


Рисунок 2. Зависимость частоты колебания на выходе ОЭО от показателя преломления жидкости

Из рисунка 2 видно, что частота выходного колебания ОЭО превышает 12 ГГц, что подтверждает необходимость применения схемы понижения частоты. При этом изменение показателя преломления жидкости на 0,0001 приводит к изменению частоты колебания на выходе ОЭО на 0,98 ГГц, соответственно, чувствительность системы в целом может быть определена как:

$$S = \frac{\Delta f_{\text{ОЭО}}}{\Delta n} = 9800 \text{ ГГц/RIU}, \quad (2)$$

где RIU – единицы показателя преломления (англ. refractive index units).

Исходя из полученного значения чувствительности системы, можно сделать вывод о том, что для анализа показателя преломления крови с различными раковыми патологиями (от 1,39 до 1,391) [15] необходимо применение частотного диапазона, превышающего 100 ГГц. Однако частота среза фазовых модуляторов и фотодетекторов ограничивается 90 ГГц [18]. Выражение (2) показывает, что уменьшение частотного диапазона возможно с помощью снижения чувствительности схемы. Это можно реализовать за счет производства датчика на другой платформе интегральной фотоники с меньшим контрастом показателей преломления, чем у платформы кремний-на-изоляторе (КНИ), например: фосфид индия, нитрид кремния, TriPlex и другие [19]. Стоит отметить, что в этом случае потребуется гибридная интеграция датчика в систему опроса [20], которая увеличит сложность изготовления сенсорной системы.

Для оценки влияния схемы понижения частоты на качество обработки АЦП были использованы критерии отношения сигнала к сумме шума и искажений (SINAD, Signal-to-Noise and Distortion

Ratio) и уровня излучения на гармониках [21]. На рисунке 3 показана зависимость SINAD от частоты на входе АЦП. На рисунке 4 представлена зависимость уровня излучения на гармониках от частоты на входе АЦП.

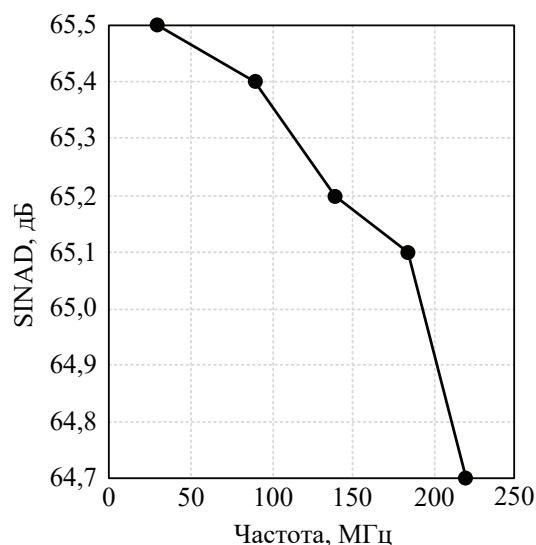


Рисунок 3. Зависимость отношения сигнала к сумме шума и искажений от частоты на входе АЦП

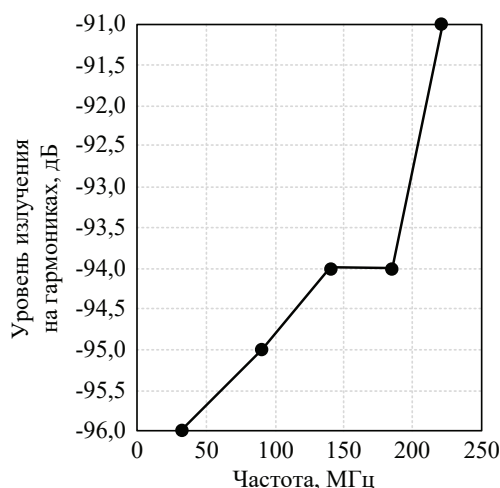


Рисунок 4. Зависимость уровня излучения на гармониках от частоты на входе АЦП

Предпочтительной платформой для производства схемы ОЗО является КНИ ввиду ее совместимости с технологией КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) с возможностью интеграции оптической и электронной частей сенсорной системы. Также возможным вариантом является платформа фосфид индия, поскольку с ее помощью возможно размещение на одной фотонной интегральной схеме всех оптических компонентов ОЗО.

Результаты численного моделирования показывают, что компоненты схемы понижения частоты должны поддерживать частоты до 13 ГГц.

Стоит отметить, что вносимая временная задержка и частота дискретизации компонентов должны соответствовать частоте метода опроса (10 МГц). Например, в качестве блока ПЧ могут быть использованы микросхемы преобразователей частоты CHR3662-QDG (UMS, Европа) и CMD177 (Qorvo, США), СВЧ-смесителей от 3 до 50 ГГц (АО «НПФ «Микран», Россия), а для синтеза частоты – микросхемы АЦП LMX2820 (TI, США), K5101HB04FI (Миландр, Россия) или ADC3564 (Analog Devices, США). Также могут быть использованы и другие микросхемы с подходящими характеристиками.

Заключение

В статье была продемонстрирована сенсорная система с опросом датчиков по частоте на основе ОЗО со схемой понижения частоты. Последняя позволяет снизить требования к процессу обработки сигнала с соответствующим упрощением устройства сенсорной системы. В свою очередь, применение частотного метода опроса датчиков позволяет улучшить характеристики сенсорной системы, такие как чувствительность и предел детектирования. Результаты моделирования в программном обеспечении Ansys Lumerical показали, что частота СВЧ-колебаний на выходе ОЗО меняется от 3,01 до 12,89 ГГц при варьировании показателя преломления анализируемой жидкости от 1,39 до 1,391. Чувствительность системы составила 9800 ГГц/RIU.

Стоит отметить, что предложенная система опроса может быть использована не только для измерения параметров жидкости, но и для получения данных о состоянии окружающей среды. Например, изменение температуры может приводить к значительным отклонениям показателя преломления брэгговских решеток с соответствующим изменением длины волны пика отражения.

Также был приведен краткий анализ электронной компонентной базы, которая может быть использована для реализации сенсорной системы на основе представленной в статье схемы. Было показано, что предложенная схема может снизить быстродействие за счет времени перестройки синтезатора частоты и времени вычисления значения промежуточной частоты. Однако, полученная скорость опроса остается достаточной для задач [3], критичных к данному параметру. В результате, предложенная схема может стать основой для нового класса сенсорных систем.

Исследование выполнено в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки России для УУНиТ (соглашение № 075-03-2024-123/1 от 15.02.2024 г.) в молодежной научно-исследова-

тельской лаборатории Евразийского НОЦ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

Литература

1. Yao X.S., Maleki L. Optoelectronic oscillator for photonic systems // IEEE Journal Quantum Electronics. 1996. Vol. 32, no 7. P. 1141–1149. DOI: 10.1109/3.517013
2. Optoelectronic oscillators (OEOs) to sensing, measurement, and detection / X. Zou [et al.] // IEEE Journal Quantum Electronics. 2016. Vol. 52, no. 1. P. 0601116–1–0601116-16. DOI: 10.1109/JQE.2015.2504088
3. Yao J. Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber bragg grating sensors // Fiber and Integrated Optics. 2015. Vol. 34, no. 4. P. 204–216.
4. Yao J. Optoelectronic oscillators for high speed and high resolution optical sensing // Journal of Lightwave Technology. 2017. Vol. 35, no. 16. P. 3489–3497. DOI: 10.1109/JLT.2016.2586181
5. Salzenstein P. Optoelectronic oscillators phase noise and stability measurements // Optoelectronics – Advanced Materials and Devices. InTech, 2013. DOI: 10.5772/50851
6. Implementation of a highly-sensitive and wide-range frequency measurement using a Si₃N₄ MDR-based optoelectronic oscillator / P. Liu [et al.] // IEEE Photonics Journal. 2019. Vol. 11, no. 6. P. 1–8. DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2955928
7. Belous A., Saladukha V., Shvedau S. Space Microelectronics Vol 1: Modern Spacecraft Classification, Failure, and Electrical Component Requirements. London: Artech House, 2017. 440 p.
8. Frequency shifts estimation for sensors based on optoelectronic oscillators / F.N. Murrieta-Rico [et al.] // IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21, no. 10. P. 11283–11290. DOI: 10.1109/jsen.2020.3013732
9. Design and modeling of a fully integrated microring-based photonic sensing system for liquid refractometry / G. Voronkov [et al.] // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 23. P. 9553. DOI: 10.3390/s22239553
10. Silicon photonic biosensors using label-free detection / E. Luan [et al.] // Sensors. 2018. Vol. 18, no. 10. P. 3519. DOI: 10.3390/s18103519
11. Enhancing the performance of the photonic integrated sensing system by applying frequency interrogation / G.S. Voronkov [et al.] // Nanomaterials. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 193. DOI: 10.3390/nano13010193
12. Hybrid nanophotonic–microfluidic sensor for highly sensitive liquid and gas analyses / A. Kuzin [et al.] // Optics Letters. 2022. Vol. 47, no. 9. P. 2358–2361. DOI: 10.1364/OL.457309
13. Hong Y., Ge H., Hong J. Compact biosensors based on thin film silicon nitride microring resonators // Journal of Physics Conference Series. 2021. Vol. 2012, no. 1. P. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/2012/1/012037
14. A silicon photonic biosensor using phase-shifted Bragg gratings in slot waveguide / X. Wang [et al.] // Journal of Biophotonics. 2013. Vol. 6, no. 10. P. 821–828. DOI: 10.1002/jbio.201300012
15. Determination of refractive index for single living cell using integrated biochip / X.J. Liang [et al.] // The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS'05. Seoul, Korea, 2005. Vol. 2. P. 1712–1715. DOI: 10.1109/SENSOR.2005.1497421
16. Performance analysis of the RoF uplink channel / E.P. Grakhova [et al.] // Optical Technologies for Telecommunications 2020: SPIE. 2021. Vol. 11793. P. 1179308. DOI: 10.1117/12.2593053
17. Banerjee D., Mieso J. Dramatically Improve Your Lock Time with VCO Instant Calibration. Application Report. SNAA342. USA: Texas Instruments, 2020. 12 p.
18. Liu J., Cristoloveanu S., Wan J. A review on the recent progress of silicon-on-insulator-based photodetectors // Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science. 2021. Vol. 218, no. 14. P. 2000751. DOI: 10.1002/pssa.202100755
19. Hybrid integrated photonic platforms: feature issue introduction / T. Gu [et al.] // Optical Materials Express. 2021. Vol. 11, no. 12. P. 4095. DOI: 10.1364/OME.449414
20. A review of capabilities and scope for hybrid integration offered by silicon-nitride-based photonic integrated circuits / F. Gardes [et al.] // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 11. P. 4227. DOI: 10.3390/s22114227
21. Kester W. Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD + N, and SFDR so you don't get lost in the noise floor. 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/242519692_Understand_SINAD_ENOB_SNR_THD_THD_N_and_SFDR_so_You_Don't_Get_Lost_in_the_Noise_Floor (дата обращения: 10.01.2025).

Дата получения 05.02.2025

Дата принятия 05.03.2025

Степанов Иван Васильевич, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» Уфимского университета науки и технологий (УУНиТ). 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 927 335-56-19. E-mail: stepanov.iv@ugatu.su

Иванов Владислав Викторович, младший научный сотрудник НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 919 611-88-23. E-mail: ivanov.vv@ugatu.su

Воронков Григорий Сергеевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры телекоммуникационных систем (ТС), старший научный сотрудник НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 927 942-00-02. E-mail: voronkov.gs@ugatu.su

Султанов Альберт Ханович, д.т.н., профессор, профессор кафедры ТС УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 903 310-00-70. E-mail: sultanov.ah@ugatu.su

UDC 621.37

DOI: 10.18469/ikt.2025.23.1.02

A FREQUENCY DOWNCONVERSION SCHEME FOR SENSING SYSTEMS BASED ON AN INTEGRATED OPTOELECTRONIC OSCILLATOR

Stepanov I.V., Ivanov V.V., Voronkov G.S., Sultanov A.Kh.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

E-mail: stepanov.iv@ugatu.su

Nowadays, optical sensors and their interrogation systems attract high attention from different research groups around the world. At the same time, a frequency interrogation method has already demonstrated its advantages in various applications. However, such method implementations based on an optoelectronic oscillator scheme needs simple and cost-effective frequency measurement methods. In this article we demonstrate an optoelectronic oscillator-based sensing scheme with a frequency downconversion scheme. As the optical sensor we utilized a phase-shifted waveguide Bragg grating for the liquid refractive index measurement. This grating is the notch filter in the optoelectronic oscillator feedback loop. The influence of external factors (in this case liquid refractive index change) leads to the grating resonant peak shift, which results in the optoelectronic oscillator output frequency shift. In turn, the frequency downconversion scheme reduces the output optoelectronic oscillator frequency value that allows to reduce sensing system's complexity as well as the cost. For the optoelectronic oscillator numerical simulation, we used Ansys Lumerical software. In the simulation we change liquid refractive index from 1.39 to 1.391. In this case the optoelectronic oscillator output frequency changes in range from 3.01 to 12.89 GHz. The sensor interrogation frequency is 12.5 MHz. Also, we considered the frequency downconversion scheme implementation possibilities with commercially available devices. In conclusion it was found out, that our sensing system can be applied for the analysis of various liquids, including the detection and assessment of pathologies in blood and other biological fluids.

Keywords: *optoelectronic oscillator, sensing system, optical sensor, frequency conversion, waveguide Bragg grating, phase-shifted Bragg grating*

Stepanov Ivan Vasilyevich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Junior Researcher of the Research Laboratory «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices». Tel. +7 927 335-56-19. E-mail: stepanov.iv@ugatu.su

Ivanov Vladislav Victorovich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Junior Researcher of the Research Laboratory «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices». Tel. +7 919 611-88-23. E-mail: ivanov.vv@ugatu.su

Voronkov Grigory Sergeevich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Associated Professor of Telecommunication Systems Department, Senior Researcher of the Research Laboratory «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices», PhD in Technical Science, Associate Professor. Tel. +7 927 942-00-02. E-mail: voronkov.gs@ugatu.su

Sultanov Albert Khanovich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Professor of Telecommunication Systems Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 903 310-00-70. E-mail: sultanov.ah@ugatu.su

References

1. Yao X.S., Maleki L. Optoelectronic oscillator for photonic systems. *IEEE Journal Quantum Electronics*, 1996, vol. 32, no. 7, pp. 1141–1149. DOI: 10.1109/3.517013
2. Zou X. et al. Optoelectronic oscillators (OEOs) to sensing, measurement, and detection. *IEEE Journal Quantum Electronics*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.1109/JQE.2015.2504088
3. Yao J. Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber bragg grating sensors. *Fiber and Integrated Optics*, 2015, vol. 34, no. 4, pp. 204–216. DOI: 10.1080/01468030.2015.1061622
4. Yao J. Optoelectronic oscillators for high speed and high resolution optical sensing. *Journal Lightwave Technology*, 2017, vol. 35, no. 16, pp. 3489–3497. DOI: 10.1109/JLT.2016.2586181
5. Salzenstein P. *Optoelectronic Oscillators Phase Noise and Stability Measurements*. Optoelectronics – Advanced Materials and Devices. InTech, 2013. DOI: 10.5772/50851
6. Liu P. et al. Implementation of a highly-sensitive and wide-range frequency measurement using a Si₃N₄ MDR-based optoelectronic oscillator. *IEEE Photonics Journal*, 2019, vol. 11, no. 6, pp. 1–8. DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2955928
7. Belous A., Saladukha V., Shvedau S. *Space Microelectronics Vol 1: Modern Spacecraft Classification, Failure, and Electrical Component Requirements*. London: Artech House, 2017. 440 p.
8. Murrieta-Rico F.N. et al. Frequency shifts estimation for sensors based on optoelectronic oscillators. *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no. 10, pp. 11283–11290. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3013732
9. Voronkov G. et al. Design and modeling of a fully integrated microring-based photonic sensing system for liquid refractometry. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 23, pp. 9553. DOI: 10.3390/s22239553
10. Luan E. et al. Silicon photonic biosensors using label-free detection. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 10, pp. 3519. DOI: 10.3390/s18103519
11. Voronkov G.S. et al. Enhancing the Performance of the Photonic Integrated Sensing System by Applying Frequency Interrogation. *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 193. DOI: 10.3390/nano13010193
12. Kuzin A. et al. Hybrid nanophotonic–microfluidic sensor for highly sensitive liquid and gas analyses. *Optics Letters*, 2022, vol. 47, no. 9, pp. 2358–2361. DOI: 10.1364/OL.457309
13. Hong Y., Ge H., Hong J. Compact biosensors based on thin film silicon nitride microring resonators. *Journal of Physics Conference Series*, 2021, vol. 2012, no. 1, pp. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/2012/1/012037
14. Wang X. et al. A silicon photonic biosensor using phase-shifted Bragg gratings in slot waveguide. *Journal of Biophotonics*, 2013, vol. 6, no. 10, pp. 821–828. DOI: 10.1002/jbio.201300012
15. Liang X.J. et al. Determination of refractive index for single living cell using integrated biochip. *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS '05*. Seoul, Korea, 2005, vol. 2, pp. 1712–1715. DOI: 10.1109/SENSOR.2005.1497421.
16. Grakhova E.P. et al. Performance analysis of the RoF uplink channel. *Optical Technologies for Telecommunications 2020: SPIE*, 2021, vol. 11793, pp. 1179308. DOI: 10.1117/12.2593053
17. Banerjee D., Mieso J. *Application Report: Dramatically Improve Your Lock Time with VCO Instant Calibration. Application Report*. USA: Texas Instruments, 2020, no. SNAA342, 12 p.
18. Liu J., Cristoloveanu S., Wan J. A Review on the Recent Progress of Silicon-on-Insulator-Based

- Photodetectors. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 2021, vol. 218, no. 14, pp. 2000751. DOI: 10.1002/pssa.202000751.
19. Gu T. et al. Hybrid integrated photonic platforms: Feature issue introduction. *Optical Material Express*, 2021, vol. 11, no. 12, pp. 4095. DOI: 10.1364/OME.449414
20. Gardes F. et al. A review of capabilities and scope for hybrid integration offered by silicon-nitride-based photonic integrated circuits. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 11, pp. 4227. DOI: 10.3390/s22114227
21. Kester W. Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD + N, and SFDR so you don't get lost in the noise floor. 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/242519692_Understand_SINAD_ENOB_SNR_THD_THD_N_and_SFDR_so_You_Don't_Get_Lost_in_the_Noise_Floor (accessed: 10.01.2025).

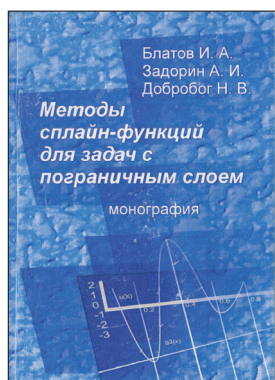
Received 05.02.2025

Accepted 05.03.2025

Реклама

Блатов, И.А.

Методы сплайн-функций для задач с пограничным слоем: монография / И.А. Блатов, Н.В. Добробог, А.И.Задорин. – Самара: ПГУТИ, 2019. – 257 с.



ISBN: 978-5-90429-92-0

УДК: 519.6

В монографии излагаются разделы теории сплайнов, необходимые для численных решений задач с пограничным слоем, адаптационные алгоритмы численного решения сингулярно-возмущенных краевых задач, в которых расчетная сетка подстраивается под пограничный слой, приводится обоснование сходимости адаптационных процессов.

Монография предназначена для студентов, магистров и аспирантов, изучающих сплайны и их приложения, а также для инженеров научных работников и специалистов, занимающихся разработкой программного обеспечения численного решения краевых задач.