

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-591-601

УДК 681.7.068; 621.373.8; 621.375.8

Применение эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне для увеличения эффективной ширины спектра интеррогатора

Владислав Николаевич Назаренко¹, Виктор Андреевич Иудин²,
Сергей Александрович Волковский³, Артем Сергеевич Алейник⁴

^{1,2,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ vladnaz411@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-2597-9413>

² iudin.viktor98@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5913-1000>

³ savolkovskii@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8462-5208>

⁴ artemal@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>

Аннотация

Введение. Исследовано влияние эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне на эффективную ширину спектрального диапазона волоконно-оптической системы опроса датчиков (интеррогатора), использующей волоконные брэгговские решетки и лазерный диод с распределенной обратной связью. Интеррогаторы на основе лазерных диодов обладают высокой скоростью (до 33 пм/нс) и большим диапазоном перестройки длины волны (до 10 нм). Однако при перестройке длины волны таких лазеров возникает нестабильность мгновенной мощности зондирующего импульса, которая может достигать 20 дБ. Такая нестабильность приводит к ошибкам при опросе датчиков на основе волоконных брэгговских решеток. Для уменьшения ошибок обычно анализируют только часть импульса интеррогатора, в течение которой мощность остается относительно стабильной (в пределах 1 дБ). Это приводит к уменьшению эффективной ширины спектрального диапазона интеррогатора (до 20 %). Для решения подобной проблемы впервые предложено использовать эффект перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне. **Метод.** При оценке возможности применения эффекта перекрестной модуляции усиления для увеличения эффективной ширины спектрального диапазона интеррогатора выполнен теоретический анализ взаимодействия в эрбиевом волокне двух оптических сигналов: зондирующего сигнала интеррогатора и дополнительного управляющего сигнала. Количественная оценка влияния этого эффекта на нестабильность мгновенной мощности и эффективную ширину спектрального диапазона интеррогатора выполнена в среде Optisystem. Исследовано влияние формы управляющего сигнала и величины смещения момента начала генерации управляющего сигнала на эффективную ширину спектрального диапазона интеррогатора. Предложенный подход позволяет не только оптимизировать временной профиль оптического импульса субмикросекундной длительности, но и увеличить его амплитуду за счет усиления в эрбиевом волокне. **Основные результаты.** Показано, что перекрестная модуляция усиления позволяет управлять мгновенной мощностью зондирующего сигнала с глубиной модуляции до 30 дБ, что достаточно для стабилизации мощности импульса лазерного диода с распределенной обратной связью. Численное моделирование подтвердило, что подбор формы и смещение момента начала генерации управляющего сигнала позволяет существенно уменьшить нестабильность мгновенной мощности зондирующего импульса. Показано, что при использовании для модуляции управляющего сигнала импульсов прямоугольной формы нестабильность мощности зондирующего сигнала уменьшается с 20 до 7 дБ. Длительность стабильной модуляции на уровне от максимальной мощности 1 дБ увеличивается с 62 до 267 нс. Это позволяет увеличить эффективную ширину спектрального диапазона интеррогатора в 4,3 раза. **Обсуждение.** Эффект перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне может быть использован для увеличения стабильности интеррогаторов на основе лазерных диодов без применения высокочастотных аттенуаторов. Повышается дальность их работы, снижаются требования к отражательной способности используемых волоконных брэгговских решеток.

Ключевые слова

эффект перекрестной модуляции усиления, эрбиевое волокно, насыщение усиления, волоконно-оптический интеррогатор, лазерный диод с распределенной обратной связью, волоконные брэгговские решетки

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006).

© Назаренко В.Н., Иудин В.А., Волковский С.А., Алейник А.С., 2025

Ссылка для цитирования: Назаренко В.Н., Иудин В.А., Волковский С.А., Алейник А.С. Применение эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне для увеличения эффективной ширины спектра интеррогатора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 591–601. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-591-601

Application of the cross-gain modulation in erbium-doped fiber to increase the effective spectral bandwidth of an interrogator

Vladislav N. Nazarenko^{1✉}, Viktor A. Iudin², Sergey A. Volkovskiy³, Artem S. Aleynik⁴

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ vladnaz411@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0006-2597-9413>

² iudin.viktor98@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5913-1000>

³ savolkovskii@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8462-5208>

⁴ artemal@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>

Abstract

This study investigates the impact of Cross-Gain Modulation (XGM) in erbium-doped fiber on the effective spectral bandwidth of a fiber-optic sensor interrogation system employing Fiber Bragg Gratings (FBGs) and a Distributed Feedback (DFB) laser diode. DFB-laser-based interrogators offer high scanning speeds (up to 33 pm/ns) and broad wavelength tuning ranges (up to 10 nm). However, wavelength tuning in such lasers often introduces significant fluctuations in the instantaneous power of the probing pulse — up to 20 dB, which can lead to measurement errors when interrogating FBG-based sensors. To mitigate this, only the portion of the pulse with relatively stable power (within 1 dB) is typically used for analysis. This approach, however, reduces the effective spectral bandwidth of the interrogator by up to 20 %. To solve this problem, we propose, for the first time, the use of XGM in erbium-doped fiber to enhance performance. To evaluate the potential of XGM for increasing the effective spectral bandwidth, we conducted a theoretical analysis of the interaction between two optical signals in erbium-doped fiber: the interrogator probe signal and an additional control signal. The influence of XGM on power stability and effective spectral bandwidth was assessed through numerical modeling using the OptiSystem software. We also examined how the shape of the control signal and the timing of its initiation affect the interrogator spectral bandwidth. This approach enables not only the optimization of the temporal profile of sub-microsecond optical pulses but also their amplitude enhancement through fiber amplification. The results show that XGM can effectively modulate the instantaneous power of the probe signal with a modulation depth of up to 30 dB — sufficient to stabilize the output of DFB laser pulses. Simulations confirm that appropriate shaping and timing of the control signal can significantly reduce power fluctuations. Specifically, using rectangular control pulses decreases the power variation from 20 dB to 7 dB. Furthermore, the duration of stable pulse modulation (within 1 dB of the peak power) increases from 62 ns to 267 ns, leading to a 4.3-fold expansion of the interrogator effective spectral bandwidth. The application of XGM in erbium-doped fiber offers a promising solution for improving the stability of DFB-laser-based interrogators without relying on high-frequency attenuators. This enhancement extends the operational range of the system and relaxes the reflectivity requirements for the FBGs used in the sensor network.

Keywords

modulated fiber optic amplifier, cross gain modulation, erbium fiber, gain saturation, fiber optic interrogator, distributed feedback laser diode

Acknowledgements

The research was carried out within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSER-2024-0006).

For citation: Nazarenko V.N., Iudin V.A., Volkovskiy S.A., Aleynik A.S. Application of the cross-gain modulation in erbium-doped fiber to increase the effective spectral bandwidth of an interrogator. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 591–601 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-591-601

Введение

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) широко применяются в качестве чувствительных элементов (ЧЭ) измерителей различных физических величин в волоконных системах опроса. Это обусловлено их способностью к мультиплексированию внутри одного оптического волокна, устойчивостью к электромагнитным помехам, высокой чувствительностью и компактными размерами [1]. Область применения ЧЭ на основе ВБР в различных технических сферах обширна и включает определение деформации крыльев самолетов [2], измерение температуры в медицинских приборах [3], измерение давления и температуры в нефтяных скважинах

[4], а также контроль деформации в биомеханике [5]. Для увеличения числа детектируемых ЧЭ используются методы мультиплексирования с разделением по времени [6], по длине волны [7], а также гибридные системы [8].

Принцип работы ЧЭ на основе ВБР заключается в том, что воздействие различных механических, тепловых или электромагнитных эффектов приводит к смещению по длине волны спектров отражения и пропускания. Измеряя оптические спектры датчика на основе ВБР, можно определить значения таких величин, как ток, напряжение, температура, деформация, линейное перемещение, ускорение и другие физические величины. Для измерения спектра ВБР и определения его

смещения обычно применяются комбинации широкополосного источника оптического излучения и анализатора спектра. Однако оптические анализаторы спектра представляют собой крупногабаритное оборудование с низкой скоростью сканирования длины волны, что значительно затрудняет их прикладное использование в системах опроса [9]. Кроме того, традиционные системы опроса ВБР являются дорогостоящими, поэтому для повышения их доступности и расширения области применения необходима разработка новых систем опроса датчиков на основе ВБР [10].

Существуют системы опроса датчиков ВБР, основанные на измерении уровня мгновенной мощности отраженного от ВБР зондирующего оптического сигнала (интеррогаторы). Интеррогаторы, в отличие от традиционных методов измерения, не требуют применения дорогостоящего спектрометрического оборудования. Интеррогаторы преимущественно основаны на использовании узкополосных лазерных диодов [11], согласованных ВБР [12, 13], краевых [14] и гауссовых фильтров [15, 16]. Однако существующие решения имеют ряд ограничений, включая крупные габариты и существенное увеличение сложности и стоимости системы при опросе нескольких датчиков ВБР [10].

Одним из способов увеличения числа одновременно опрашиваемых датчиков ВБР является их мультиплексирование по длине волны. Такой метод требует использования узкополосного источника с возможностью перестройки длины волны оптического излучения, например, лазерного диода с распределенной обратной связью (РОС) [17].

Лазерные диоды с РОС обладают рядом существенных преимуществ. Во-первых, ширина спектральной линии излучения таких лазеров составляет всего несколько пикометров. Во-вторых, РОС-лазеры обеспечивают перестройку длины волны со скоростью до 33 пм/нс в спектральном диапазоне 10 нм [17]. Кроме того, благодаря широкому распространению в области оптических телекоммуникаций и массовому производству, они имеют относительно низкую стоимость [18].

Перестройка длины волны РОС-диода осуществляется посредством пропускания тока, значительно превышающего рабочий ток диода. Сверхбольшие токи вызывают быстрый нагрев активной среды, что приводит к изменению периода структуры РОС и, следовательно, сдвигу основной длины волны излучения лазера [17]. Однако для достижения постоянной скорости перестройки длины волны необходимо подавать на диод импульс тока инъекции сложной формы, что влечет за собой нестабильность оптической мощности зондирующего импульса. В работе [17] приведена система опроса ВБР на основе РОС-лазера, в которой, для достижения перестройки центральной длины волны со скоростью, близкой к линейной, использовался пилообразный токовый импульс. При этом отклонение мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора составило 20 дБ [17].

Такая особенность системы опроса ограничивает возможность увеличения количества мультиплексируемых ЧЭ за счет уменьшения диапазона длин волн перестройки, при котором достигается необходимый

уровень мощности РОС-лазера. Величина мгновенной мощности зондирующего импульса может варьироваться в пределах двух порядков, вследствие чего части импульса с экстремально низким или высоким уровнем мощности могут выходить за пределы рабочего диапазона фотодетектора. Более того, сложная форма временного профиля мгновенной мощности зондирующего импульса может приводить к ошибкам определения длины волны. Например, в [19] показано, что измеренная длина волны ВБР в системе опроса датчиков с нарастающим уровнем мгновенной мощности источника излучения может отклоняться от реального значения на 0,044–0,116 нм.

Для достижения максимальной спектральной эффективности необходимо обеспечить высокий и стабильный уровень мгновенной мощности зондирующих импульсов. Известны экспериментальные результаты исследования по увеличению и стабилизации мгновенной мощности зондирующего сигнала интеррогатора на основе вертикально излучающего лазера с помощью эрбиевого волокна. Такой метод позволяет снизить отклонение уровня мгновенной мощности с 220 % до 18 %. Однако интеррогаторы на основе вертикально излучающего лазера характеризуются относительно низкой скоростью перестройки [19].

В настоящей работе впервые предлагается метод стабилизации уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора на основе РОС-лазера посредством эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне. Предложенный подход позволяет не только оптимизировать временной профиль оптического импульса субмикросекундной длительности, но и увеличить его амплитуду за счет усиления в эрбиевом волокне.

Эффект перекрестной модуляции в эрбиевом волокне

Эрбиевое оптическое волокно хорошо известно за счет востребованности в области оптических телекоммуникаций в качестве основного элемента для волоконно-оптических эрбиевых усилителей. Подобные усилители широко используются в оптических линиях связи благодаря таким характеристикам, как независимое от поляризации усиление, широкая спектральная полоса усиления и низкий уровень шума. Оптическое усиление в эрбиевом волокне осуществляется благодаря легирующему редкоземельному металлу — эрбию, имеющему соответствующие энергетические уровни в своей атомной структуре для усиления излучения в С-диапазоне частот оптических телекоммуникационных линий. Усиление возникает вследствие вынужденного излучения в активной среде с инверсией населенности, которая поддерживается при помощи оптической накачки. Эффективная накачка легированного эрбием волокна может быть обеспечена лазерным излучением на длинах волн 800, 980 и 1480 нм [17].

Коэффициент усиления волоконно-оптических эрбиевых усилителей снижается при превышении уровня входной оптической мощности определенного порога, называемого мощностью насыщения. Это связано со

снижением концентрации возбужденных носителей заряда в эрбиевом волокне в результате стимулированного излучения при высокой оптической мощности. Такой эффект называется насыщением усиления [20].

При взаимодействии двух и более оптических сигналов каждый из них играет роль в насыщении усиления, вследствие чего коэффициент усиления зависит от мгновенной мощности каждого сигнала. Этот эффект, называемый эффектом перекрестной модуляции коэффициента усиления в эрбиевом волокне, применяется для полностью оптического преобразования длины волны несущего сигнала в телекоммуникационных системах [21]. Метод амплитудной модуляции на основе этого эффекта является недорогим по сравнению с устройствами акустооптической и электрооптической модуляции, обеспечивая при этом более высокое быстродействие, чем механо-оптические модуляторы.

Для математического описания эффекта перекрестной модуляции применяется теория усиления множества сигналов, одновременно распространяющихся в эрбиевом волокне, представленная в работе [22]. Эта теория предлагает следующее аналитическое решение для потоков фотонов каждого из сигналов:

$$Q_k^{out} = Q_k^{in} \exp \left(\frac{(\alpha_k + g_k^*)}{\zeta} (Q^{in} - Q^{out}) - \alpha_k L \right), \quad (1)$$

$$Q^{out} = \sum_k Q_k^{in} \exp \left(\frac{(\alpha_k + g_k^*)}{\zeta} (Q^{in} - Q^{out}) - \alpha_k L \right), \quad (2)$$

где Q^{out} и Q^{in} — полные исходящий и входной потоки фотонов; Q_k^{out} и Q_k^{in} — исходящий и входной потоки фотонов k -го сигнала; α_k и g_k^* — коэффициенты поглощения и усиления k -го сигнала; L — длина волокна; ζ — коэффициент, характеризующий параметры эрбиевого волокна. Q^{out} выражено в формуле (2) в неявном виде и может быть найдено с помощью любого из множества численных методов нахождения корней уравнений, например метода Ньютона.

Данное аналитическое решение позволяет рассчитывать выходную мощность и коэффициенты усиления для k сигналов на основе измеряемых параметров: α_k , g_k^* , L ; входных мощностей сигналов P_k^{in} и коэффициента ζ , связанного с мощностью насыщения усиления P_k^{sat} и коэффициентами поглощения и усиления $\zeta = P_k^{sat}(\alpha_k + g_k^*)/h\nu_k$, h — постоянная Планка, ν_k — оптическая частота k -го сигнала.

Аналитическое решение получено при допущении, что вклад усиленного спонтанного излучения и потери мощности в волокне пренебрежимо малы, а коэффициент перекрытия модового пятна сигнала с областью легирования эрбия общий для всех сигналов и учтен в параметре ζ [22].

Теория справедлива для взаимодействия сигналов, энергия фотонов которых соответствует переходам между уровнями $^4I_{15/2}$ и $^4I_{13/2}$ легированного эрбием волокна, и не учитывает излучение накачки на длине волны 980 нм. Такое излучение можно учесть, предположив, что в стационарном состоянии населенность уровня $^4I_{11/2}$ стремится к нулю, и, следовательно, принять коэффициент усиления g_k^* равным нулю.

Физический смысл такого допущения подразумевает, что вероятность усиления сигнала накачки с длиной волны 980 нм всегда равна нулю, независимо от населенности уровня $^4I_{13/2}$. В таком случае множество N сигналов накачки на длине волны 980 нм можно включить в множество K всех сигналов.

На основе уравнений (1) и (2) были определены характеристики системы, состоящей из эрбиевого волокна длиной 5 м, сигнала накачки на длине волны 980 нм мощностью 500 мВт, несущего сигнала на длине волны 1550 нм и управляющего сигнала на длине волны 1560 нм. Несущий сигнал — полезный сигнал, содержащий какую-либо информацию, в рассматриваемом случае является зондирующим сигналом интеррогатора, а управляющий сигнал изменяет коэффициент усиления в эрбиевом волокне, приводя к модуляции мгновенной мощности несущего сигнала.

На рис. 1 представлены результаты расчета усиления и мощности усиленного несущего сигнала в зависимости от мощностей несущего и управляющего сигналов. По рис. 1, а видно, что усиление несущего сигнала зависит от суммы мощностей несущего и управляющего сигналов.

При мощностях несущего и управляющего сигналов, не превышающих уровень 30 дБм, усиление составляет около 35 дБ и не зависит от изменения уровня мощности, так как мощности сигналов недостаточно, чтобы существенно повлиять на инверсию населенности в волокне. Пока ни несущий, ни управляющий сигналы не превышают уровень мощности 20 дБм, и один из них составляет не менее –30 дБм, в волокне наблюдается эффект насыщения усиления, вследствие которого коэффициент усиления сильно зависит от мощности сигналов. При превышении несущим или управляющим сигналами уровня мощности в 20 дБм, волокно просветляется на длине волны 1550 нм и сигнал перестает усиливаться. На рис. 1, б представлена зависимость мощности усиленного несущего сигнала от мощности несущего и управляющего сигналов. Особый интерес представляет область, в которой уровень мощности несущего сигнала варьируется от –50 до 0 дБм, а управляющего от –20 до 20 дБм. В данном диапазоне проявляется эффект перекрестной модуляции усиления, вследствие которого усиление несущего сигнала существенно зависит от уровня мощности управляющего сигнала. Отметим, что в этой области кривые равной мощности (линии одного цвета, рис. 1, б) характеризуются наибольшей кривизной. Вследствие этого для широкого диапазона мощности несущего сигнала возможно подобрать такую мощность управляющего сигнала, при которой мощность усиленного несущего сигнала остается постоянной. Например, для входного сигнала в диапазоне от –30 до 0 дБм при соответствующем выборе мощности управляющего сигнала от –20 до 20 дБм выходная мощность несущего сигнала стабильно составляет 5 дБм (утолщенная кривая, рис. 1, б).

Согласно теоретическим расчетам, глубина модуляции может достигать значения 30 дБ. Такая величина представляется достаточной для компенсации нестабильности мгновенной мощности зондирующего сиг-

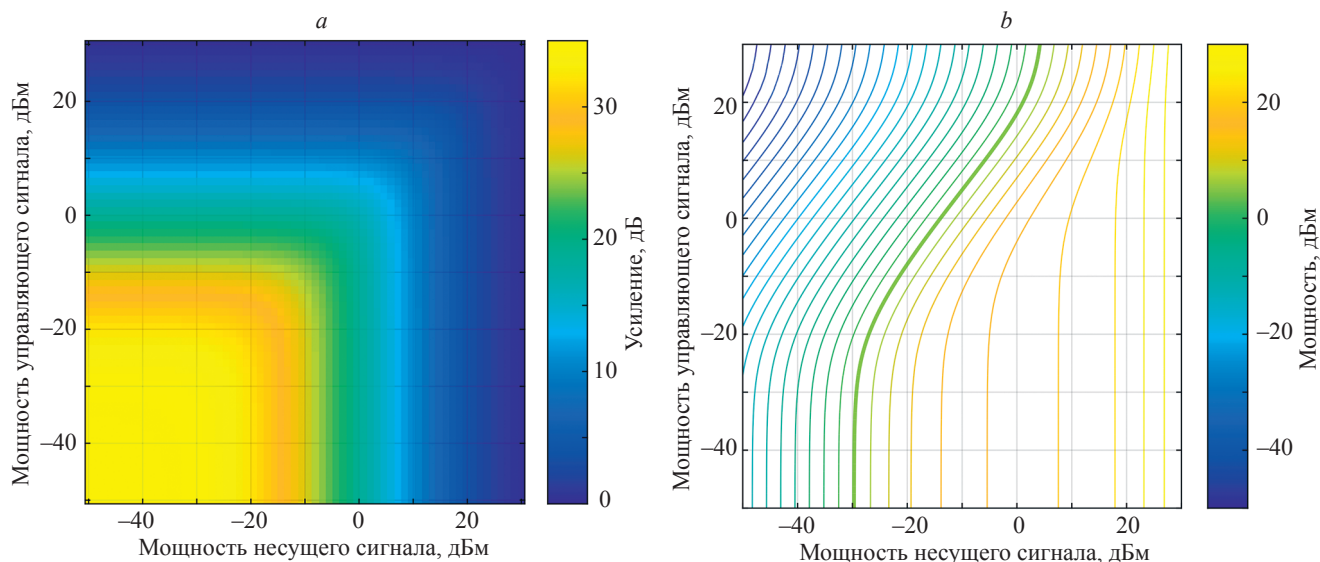


Рис. 1. Результаты расчета усиления (а) и мощности (б) усиленного несущего сигнала в зависимости от мощности несущего и управляющего сигналов

Fig. 1. Simulation results of the gain (a) and power (b) of the amplified carrier signal as functions of the carrier and control signal powers

нала интеррогатора на основе стандартного лазерного диода с РОС.

Необходимо учесть, что ряд допущений, принятых в работе [22] при выведении уравнений (1) и (2), и в настоящей работе, при учете излучения накачки на длине волны 980 нм в теорию, может существенно повлиять на соответствие математической модели действительности.

Моделирование метода стабилизации уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора на основе РОСлазера в Optisystem

На основе результатов теоретического анализа эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне предлагается метод стабилизации уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора на основе РОСлазера. Представленный метод заключается в следующем. Зондирующий импульс с длиной волны в пределах 1520–1560 нм вводится в отрезок эрбиевого волокна, в котором предварительно создана высокая инверсия населенности посредством накачки на длине волны 980 нм. Практически одновременно с противоположного конца этого же отрезка эрбиевого волокна через оптический циркулятор вводится дополнительный управляющий импульс с длиной волны того же спектрального диапазона 1520–1560 нм для модуляции коэффициента усиления.

Настройка системы для достижения оптимальной стабильности уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора достигается тщательным подбором нескольких ключевых параметров: временного профиля управляющего импульса, импульсной мощности как зондирующего, так и управляющего импульсов, мощности лазерного диода накачки (ЛДН), длины и коэффициента поглощения эрбиевого волокна, а также смещением момента начала зондирующего

импульса интеррогатора относительно момента начала управляющего импульса.

Необходимо учитывать существенное ограничение данного метода, связанное с конечным временем жизни уровня ${}^4I_{11/2}$, которое составляет приблизительно 10^{-6} с. Вследствие этого, время восстановления инверсии населенности за счет излучения накачки не может быть меньше указанного значения, что создает жесткое ограничение верхней частоты следования импульсов на уровне 100 кГц. Данное ограничение потенциально можно преодолеть, используя накачку на длине волны 1480 нм или применяя методы, позволяющие сократить время жизни уровня ${}^4I_{11/2}$. Отметим, что частота 100 кГц превышает стандартную частоту опроса интеррогаторов на основе РОСлазеров, что делает предложенный метод вполне применимым для большинства практических задач.

Для более детального изучения эффекта перекрестной модуляции усиления и метода стабилизации уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора на основе РОС-лазера далее представлен анализ на основе численных методов, позволяющих проводить время-разрешенное моделирование характеристик оптического волокна.

Численное моделирование проведено при помощи программной среды OptiSystem производства компании OptiWave Systems Inc (Канада). Эта среда позволяет проводить моделирование оптических систем с активными оптическими волокнами, учитывая время жизни активных носителей заряда в метастабильном состоянии, пространственное распределение инверсии населенности носителей по длине эрбиевого волокна и усиленное спонтанное излучение.

В рассматриваемой системе используется отрезок активного эрбиевого волокна (АЭВ) марки Fibercore I-12 длиной 7 м, с поглощением 7,4 дБ/м на длине волны зондирующего сигнала интеррогатора

1550 нм и поглощением 13 дБ/м на длине волны накачки 980 нм.

Схема системы для стабилизации уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора на основе предлагаемого метода продемонстрирована на рис. 2. Накачка АЭВ осуществляется при помощи ЛДН через мультиплексор селективный по длине волны (МСДВ). В АЭВ подаются зондирующий сигнал интеррогатора ЛД1 с длиной волны 1550 нм, через оптический изолятор ИЗО1, и управляющий сигнал ЛД2 с длиной волны 1560 нм через оптический циркулятор (ЦИР), что обеспечивает пространственное разделение оптических путей зондирующего и управляющего сигналов. Усиленный зондирующий сигнал интеррогатора с выхода циркулятора через изолятор ИЗО2 направляется на фотоприемник (ФП) для анализа временного профиля усиленного зондирующего сигнала.

В среде Optisystem построена оптическая модель, соответствующая оптической схеме, изображенной на рис. 2. Характеристики источников излучения приведены в табл. 1. ЛД1 излучает зондирующий сигнал интеррогатора пилообразного профиля длительностью 300 нс с постоянным нарастанием уровня мгновенной мощности. Уровень мгновенной мощности зондирующего сигнала изменяется от -40 дБм до -20 дБм. ЛД2 излучает управляющий сигнал различных профилей в форме гауссовой функции пилообразной и прямоугольной форм, длительностью 300 нс. Уровень мгновенной мощности и зондирующего сигнала изменяется от -40 дБм до 21 дБм. ЛДН генерирует постоянное излучение накачки мощностью 23 дБм.

Исследование характеристик моделируемой системы проводилось при различных формах временного профиля мощности управляющего оптического сигнала.

Прямоугольный временной профиль импульса выбран, исходя из простоты генерации при помощи стандартных драйверов лазерных диодов, что делает ее наиболее удобной для практической реализации. Кроме того, прямоугольный временной профиль управляющего сигнала обеспечивает резкие переходы между уровнями мощности, что позволяет наиболее эффективно управлять насыщением усиления в эрбиевом волокне.

Гауссов временной профиль управляющего импульса, исследованный в настоящей работе, приближен к

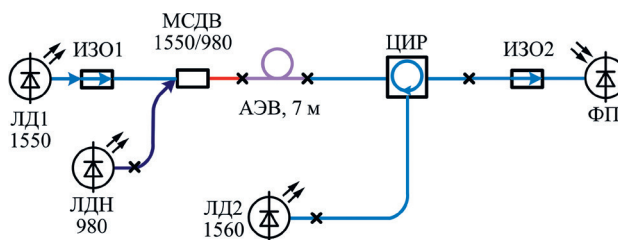


Рис. 2. Оптическая схема системы стабилизации уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора на основе лазера с распределенной обратной связью посредством эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне

Fig. 2. Optical scheme of the system for stabilizing the instantaneous power of the interrogator probe pulse based on a distributed feedback laser using the cross-gain modulation effect in erbium-doped fiber

форме импульсов, возникающих в реальных системах из-за инерционности активной среды и ограниченной полосы пропускания используемых компонентов. Вместе с тем такая форма управляющего импульса позволяет исследовать влияние плавных изменений мощности на эффективность эффекта перекрестной модуляции усиления.

Пилообразная форма импульса имитирует типичный временной профиль мощности зондирующего сигнала интеррогатора на основе лазерного диода с РОС. Использование пилообразной формы временного профиля управляющего импульса может благоприятно повлиять на простоту практической реализации, так как использование источника управляющего сигнала, аналогичного источнику зондирующего сигнала, может упростить как разработку электронной схемы, так и алгоритма управления драйверами лазерных диодов.

Для каждого управляющего сигнала различной формы варьировалось смещение момента начала генерации управляющего сигнала относительно момента начала генерации зондирующего сигнала. Для оценки характеристик усиленного зондирующего сигнала использовались следующие параметры: максимальное отклонение уровня мгновенной мощности сигнала от начального значения и длительность импульса, в течение которого отклонение мгновенной мощности сигнала от максимального значения не превышает 1 дБ.

Таблица 1. Характеристики лазерных диодов в исследуемой системе

Table 1. Characteristics of the laser diodes in the studied system

Оптический сигнал	Лазерный источник	Максимальная мгновенная мощность, дБм	Ширина спектральной линии по полувысоте, нм	Длина волны, нм	Режим работы	Длительность импульса, нс
Зондирующий сигнал интеррогатора	Лазерный диод с РОС (ЛД1)	-20	0,1	1550	Импульсный	300
Управляющий сигнал	Лазерный диод с РОС (ЛД2)	21	0,1	1560	Импульсный	300
Накачка	Лазерный диод с РОС (ЛДН)	23	0,1	980	Непрерывный	—

Временные профили мощности усиленного зондирующего и управляющего сигналов для различной формы управляющего сигнала представлены на рис. 3–5.

В табл. 2 приведено соответствие смещения момента начала генерации управляющего сигнала относительно момента начала генерации зондирующего

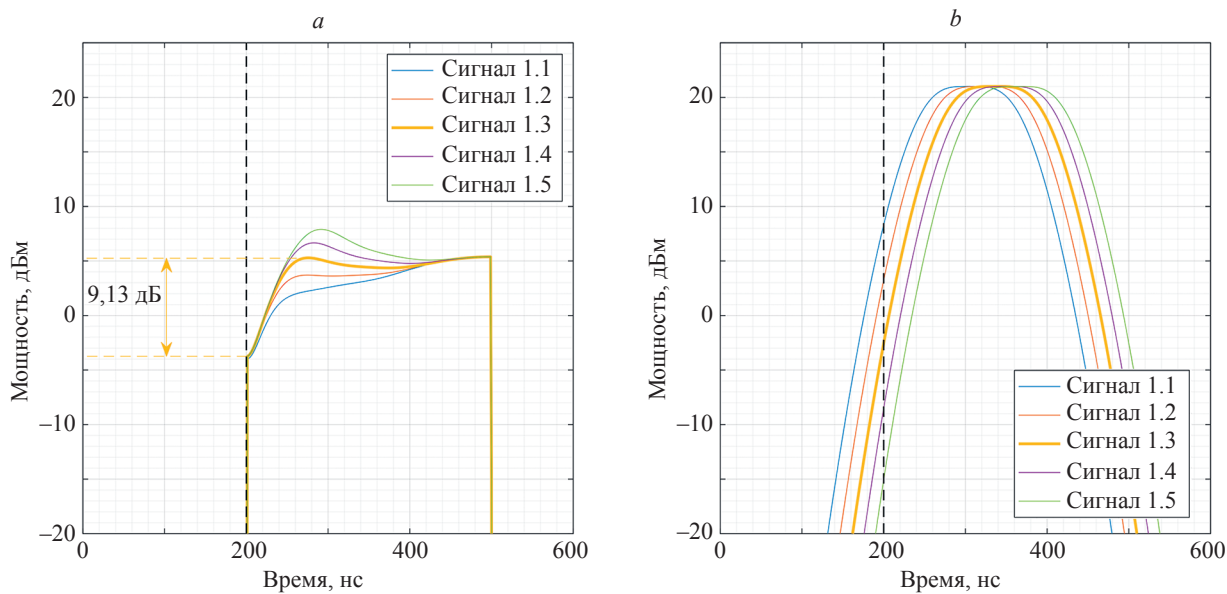


Рис. 3. Временной профиль мощности усиленного зондирующего (а) и управляющего (b) сигналов в форме гауссовой функции

Fig. 3. Power time profile of the amplified probe (a) and control (b) signal in the form of Gaussian distribution

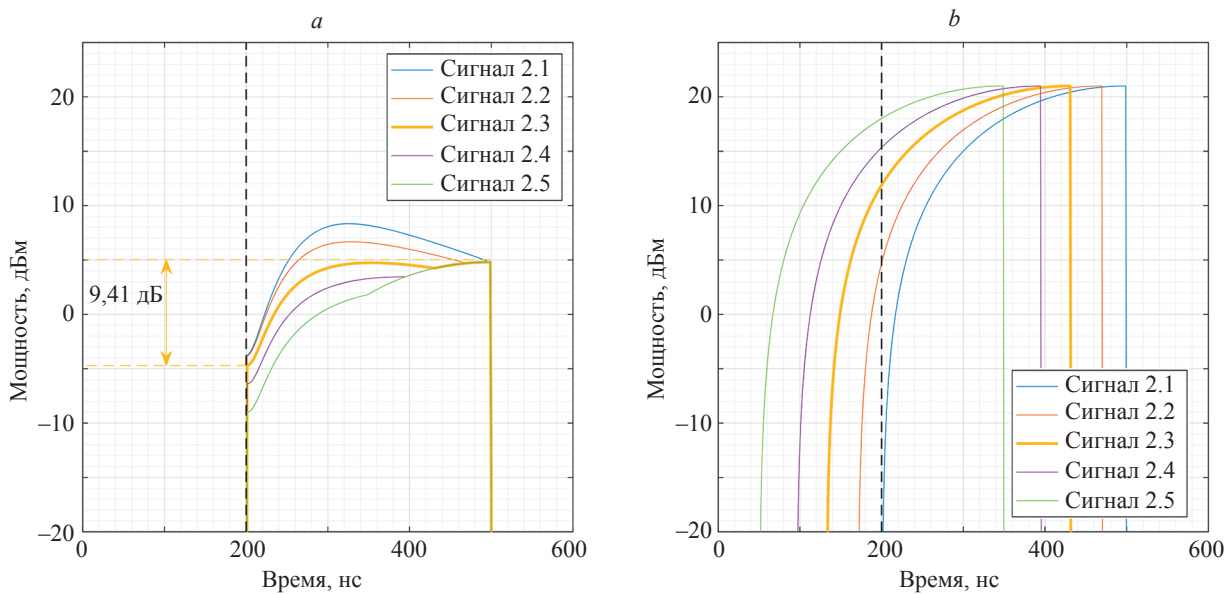


Рис. 4. Временной профиль мощности усиленного зондирующего (а) и управляющего (b) сигналов пилообразной формы

Fig. 4. Power time profile of the amplified probe signal (a) and sawtooth-shaped control signal (b)

Таблица 2. Смещение момента начала генерации управляющего сигнала для модели с профилем управляющего сигнала в форме гауссовой функции

Table 2. Time delays of control signal generation for the model with a control signal profile in the form of a Gaussian distribution

Характеристика	Номер сигнала				
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Смещение момента начала генерации управляющего сигнала относительно момента начала генерации зондирующего сигнала интеррогатора, нс	–70	–55	–40	–25	–10

сигнала для модели с профилем управляющего сигнала в форме гауссовой функции. Отрицательные значения смещения момента начала генерации в табл. 2 означают запаздывание момента начала генерации зондирующего сигнала относительно момента начала генерации управляющего сигнала.

Согласно рис. 3, наименьшее максимальное отклонение мгновенной мощности усиленного зондирующего сигнала от начального значения составляет 9,13 дБ и достигается при генерации управляющего сигнала на 40 нс ранее генерации сигнала интеррогатора. При запаздывании момента начала генерации зондирующего сигнала более чем на 40 нс уменьшается длительность усиленного зондирующего импульса, в течение которой мгновенная мощность сигнала отклоняется от максимального значения не более чем на 1 дБ.

В табл. 3 приведено соответствие смещения момента начала генерации управляющего сигнала отно-

сительно момента начала генерации зондирующего сигнала для модели с пилообразной формой управляющего сигнала.

Согласно рис. 4, наименьшее максимальное отклонение мгновенной мощности усиленного зондирующего сигнала от начального значения составляет 9,41 дБ и достигается при генерации управляющего сигнала на 65 нс ранее генерации зондирующего сигнала. Максимальная длительность усиленного зондирующего импульса, в течение которой мгновенная мощность сигнала отклоняется от максимального значения не более чем на 1 дБ, также достигается при соответствующем временном смещении момента начала генерации.

В табл. 4 приведено соответствие смещения момента начала генерации управляющего сигнала относительно момента начала генерации зондирующего сигнала для модели с прямоугольной формой управляющего сигнала.

Таблица 3. Смещение момента начала генерации управляющего сигнала для модели с пилообразной формой управляющего сигнала

Table 3. Time delays of control signal generation for the model with a sawtooth form of the control signal

Характеристика	Номер сигнала				
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Смещение момента начала генерации управляющего сигнала относительно момента начала генерации зондирующего сигнала интеррогатора, нс	0	-30	-65	-100	-135

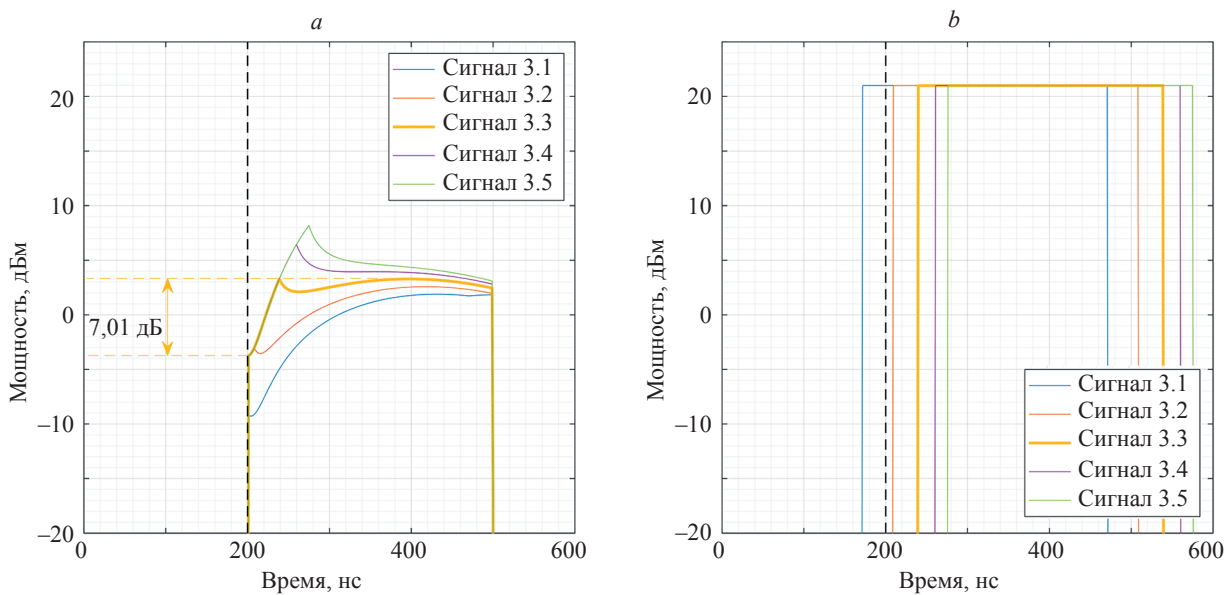


Рис. 5. Временной профиль мощности усиленного зондирующего (a) и управляющего (b) сигнала прямоугольной формы
Fig. 5. Power time profile of the amplified probe signal (a) and rectangular control signal (b)

Таблица 4. Смещение момента начала генерации управляющего сигнала для модели с прямоугольной формой управляющего сигнала

Table 4. Time delays of control signal generation for the model with a rectangular form of control signal

Характеристика	Номер сигнала				
	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
Смещение момента начала генерации управляющего сигнала относительно момента начала генерации зондирующего сигнала интеррогатора, нс	-25	+5	+35	+53	+70

Таблица 5. Характеристики усиленных зондирующих сигналов интеррогатора при различных формах временного профиля мощности управляющего сигнала

Table 5. Characteristics of amplified probe signals of the interrogator with different power time profiles of the control signal

Характеристика	Форма временного профиля мгновенной мощности управляющего сигнала			
	Функция Гаусса	Пилообразная	Прямоугольная	Без модуляции
Смещение момента начала генерации управляющего сигнала относительно генерации зондирующего сигнала интеррогатора, нс	–40	–65	+35	—
Наименьшее максимальное отклонение мощности усиленного зондирующего сигнала от начального значения, дБ	9,13	9,41	7,01	20,00
Длительность усиленного зондирующего сигнала при максимальном отклонении мгновенной мощности от максимального значения не более 1 дБ, нс	247	216	267	62
Эффективный спектральный диапазон, нм	2,47	2,16	2,67	0,62
Максимальная мгновенная мощность усиленного зондирующего сигнала, дБм	+5,42	+4,81	+3,56	–20,0

Согласно рис. 5, наименьшее максимальное отклонение мгновенной мощности усиленного зондирующего сигнала от начального значения составляет 7,01 дБ и достигается при генерации управляющего сигнала через 36 нс после генерации зондирующего сигнала. Максимальная длительность усиленного зондирующего импульса, в течение которой мгновенная мощность сигнала отклоняется от максимального значения не более чем на 1 дБ, также достигается при соответствующем временном смещении.

Предполагая, что для сканирования ВБР без ошибок требуется, чтобы мгновенная мощность зондирующего сигнала интеррогатора отклонялась от максимального значения не более чем на 1 дБ, и имея ввиду, что скорость перестройки длины волны лазерного диода с РОС равна 10 пм/нс, можно рассчитать эффективную ширину спектрального диапазона интеррогатора. Результаты моделирования для управляющих сигналов различной формы представлены в табл. 5.

Согласно табл. 5, оптимальными параметрами модели, при которых было получено наименьшее значение максимального отклонения уровня мгновенной мощности усиленного зондирующего сигнала и наибольшее значение длительности усиленного зондирующего сигнала при максимальном отклонении мощности не более 1 дБ, являются прямоугольная форма временного профиля мощности управляющего сигнала и смещение момента начала генерации управляющего сигнала относительно зондирующего на 36 нс. При этом, по отношению к случаю без модуляции, максимальный уровень мгновенной мощности зондирующего сигнала увеличился на 23,5 дБ, а эффективная ширина спектра увеличилась в 4,3 раза и составил 2,67 нм. Можно сравнить измеренный диапазон перестройки с характерным диапазоном, требуемым для опроса датчика на основе ВБР. Например, в работе [19] сообщалось, что диапазон перестройки длины волны источника излучения 2,5 нм достаточен для измерения с помощью ВБР температуры в диапазоне 190 °С.

Заключение

В работе исследовано влияние эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне на стабильность уровня мощности зондирующего сигнала интеррогатора и впервые предложено его применение для увеличения эффективного спектрального диапазона интеррогатора на основе РОС-лазера.

Теоретический анализ подтвердил, что эффект перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне может оказывать достаточное воздействие для увеличения стабильности мгновенной мощности зондирующего сигнала интеррогатора на основе РОС-лазера. Теоретическая глубина модуляции уровня мгновенной мощности зондирующего сигнала интеррогатора составила 30 дБ, что превышает необходимые 20 дБ.

С помощью численного моделирования в среде Optisystem проанализировано влияние формы временного профиля мгновенной мощности управляющего сигнала (распределение Гаусса, пилообразная и прямоугольная формы) и временных задержек между моментом генерации зондирующего сигнала интеррогатора и управляющего сигнала на эффективный спектральный диапазон интеррогатора с РОС-лазером. Определено, что для пилообразного сигнала длительностью 300 нс, характерного для интеррогатора на основе РОС-лазера, оптимальным оказалась прямоугольная форма временного профиля мгновенной мощности управляющего сигнала со смещением момента начала генерации на 36 нс относительно момента начала генерации зондирующего сигнала. Максимальное отклонение мгновенной мощности зондирующего сигнала интеррогатора от начального значения сократилось с 20 до 7 дБ, а длительность зондирующего импульса, на протяжении которой отклонение уровня мгновенной мощности от максимального значения оставалось в пределах 1 дБ, выросла с 62 до 267 нс. Таким образом, эффективный спектральный диапазон интеррогатора, по отношению к случаю без модуляции, увеличился в 4,3 раза и соста-

вил 2,6 нм по сравнению с 600 пм без усиления. Кроме того, максимальный уровень мгновенной мощности увеличился на 23,5 дБ.

Результаты теоретического исследования дают достаточные основания для разработки метода амплитудной модуляции мощности, основанного на эффекте перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне,

для расширения эффективного спектрального диапазона интеррогатора на основе лазерного диода с распределенной обратной связью. Полученные результаты позволяют подобрать необходимую компонентную базу для проведения экспериментального исследования и дальнейшего развития предложенного метода.

Литература

1. Soto V.D., López-Amo M. Truly remote fiber optic sensor networks // *Journal of Physics: Photonics*. 2019. V. 1. N 4. P. 042002. <https://doi.org/10.1088/2515-7647/ab3f0e>
2. Ma Z., Chen X. Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: Recent applications and technical analysis // *Sensors*. 2018. V. 19. N 1. P. 55. <https://doi.org/10.3390/s19010055>
3. Schena E., Tosi D., Saccomandi P., Lewis E., Kim T. Fiber optic sensors for temperature monitoring during thermal treatments: an overview // *Sensors*. 2016. V. 16. N 7. P. 1144. <https://doi.org/10.3390/s16071144>
4. Qiao X., Shao Z.H., Bao W.J., Rong Q.Z. Fiber bragg grating sensors for the oil industry // *Sensors*. 2017. V. 17. N 3. P. 429. <https://doi.org/10.3390/s17030429>
5. Al-Fakih E., Osman N.A.A., Adikan F.R.M. The use of fiber Bragg grating sensors in biomechanics and rehabilitation applications: The state-of-the-art and ongoing research topics // *Sensors*. 2012. V. 12. N 10. P. 12890–12926. <https://doi.org/10.3390/s121012890>
6. Xia L., Cheng R., Li W., Liu D.M. Identical FBG-based quasi-distributed sensing by monitoring the microwave responses // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2015. V. 27. N 3. P. 323–325. <https://doi.org/10.1109/lpt.2014.2370650>
7. Margulis W., Lindberg R., Laurell F., Hedin G. Intracavity interrogation of an array of fiber Bragg gratings // *Optics Express*. 2021. V. 29. N 1. P. 111–118. <https://doi.org/10.1364/OE.414094>
8. Luo Z., Wen H., Guo H., Yang M. A time-and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings // *Optics Express*. 2013. V. 21. N 19. P. 22799–22807. <https://doi.org/10.1364/OE.21.022799>
9. Chen J., Liu B., Zhang H. Review of fiber Bragg grating sensor technology // *Frontiers of Optoelectronics in China*. 2011. V. 4. N 2. P. 204–212. <https://doi.org/10.1007/s12200-011-0130-4>
10. Darwich D., Youssef A., Zaraket H. Low-cost multiple FBG interrogation technique for static applications // *Optics Letters*. 2020. V. 45. N 5. P. 1116–1119. <https://doi.org/10.1364/OL.386053>
11. Wilson A., James S.W., Tatam R.P. Time-division-multiplexed interrogation of fibre Bragg grating sensors using laser diodes // *Measurement Science and Technology*. 2001. V. 12. N 2. P. 181. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/2/309>
12. Cui J., Hu Y., Feng K., Li J., Tan J. FBG interrogation method with high resolution and response speed based on a reflective-matched FBG scheme // *Sensors*. 2015. V. 15. N 7. P. 16516–16535. <https://doi.org/10.3390/s150716516>
13. Yan H.T., Liu Q., Ming Y., Luo W., Chen Y., Lu Y.Q. Metallic grating on a D-shaped fiber for refractive index sensing // *IEEE Photonics Journal*. 2013. V. 5. N 5. P. 4800706. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2013.2284244>
14. Kouroussis G., Kinet D., Mendoza E., Dupuy J., Moeyaert V., Caucheteur C. Edge-filter technique and dominant frequency analysis for high-speed railway monitoring with fiber Bragg gratings // *Smart Materials and Structures*. 2016. V. 25. N 7. P. 075029. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/7/075029>
15. Cheng R., Xia L., Zhou J., Liu D. Wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors based on crossed optical Gaussian filters // *Optics Letters*. 2015. V. 40. N 8. P. 1760–1763. <https://doi.org/10.1364/OL.40.001760>
16. Fernandez M.P., Bulus-Rossini L.A., Cruz J.L., Andres M.V., Costanzo-Caso P.A. High-speed and high-resolution interrogation of FBG sensors using wavelength-to-time mapping and Gaussian filters // *Optics Express*. 2019. V. 27. N 25. P. 36815–36823. <https://doi.org/10.1364/OE.27.036815>
17. Njegovec M., Donlagic D. Interrogation of FBGs and FBGs arrays using standard telecom DFB diode // *Journal of Lightwave*

References

1. Soto V.D., López-Amo M. Truly remote fiber optic sensor networks. *Journal of Physics: Photonics*, 2019, vol. 1, no. 4, pp. 042002. <https://doi.org/10.1088/2515-7647/ab3f0e>
2. Ma Z., Chen X. Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: Recent applications and technical analysis. *Sensors*, 2018, vol. 19, no. 1, pp. 55. <https://doi.org/10.3390/s19010055>
3. Schena E., Tosi D., Saccomandi P., Lewis E., Kim T. Fiber optic sensors for temperature monitoring during thermal treatments: an overview. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 7, pp. 1144. <https://doi.org/10.3390/s16071144>
4. Qiao X., Shao Z.H., Bao W.J., Rong Q.Z. Fiber bragg grating sensors for the oil industry. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 429. <https://doi.org/10.3390/s17030429>
5. Al-Fakih E., Osman N.A.A., Adikan F.R.M. The use of fiber Bragg grating sensors in biomechanics and rehabilitation applications: The state-of-the-art and ongoing research topics. *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 10, pp. 12890–12926. <https://doi.org/10.3390/s121012890>
6. Xia L., Cheng R., Li W., Liu D.M. Identical FBG-based quasi-distributed sensing by monitoring the microwave responses. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, vol. 27, no. 3, pp. 323–325. <https://doi.org/10.1109/lpt.2014.2370650>
7. Margulis W., Lindberg R., Laurell F., Hedin G. Intracavity interrogation of an array of fiber Bragg gratings. *Optics Express*, 2021, vol. 29, no. 1, pp. 111–118. <https://doi.org/10.1364/OE.414094>
8. Luo Z., Wen H., Guo H., Yang M. A time-and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 19, pp. 22799–22807. <https://doi.org/10.1364/OE.21.022799>
9. Chen J., Liu B., Zhang H. Review of fiber Bragg grating sensor technology. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2011, vol. 4, no. 2, pp. 204–212. <https://doi.org/10.1007/s12200-011-0130-4>
10. Darwich D., Youssef A., Zaraket H. Low-cost multiple FBG interrogation technique for static applications. *Optics Letters*, 2020, vol. 45, no. 5, pp. 1116–1119. <https://doi.org/10.1364/OL.386053>
11. Wilson A., James S.W., Tatam R.P. Time-division-multiplexed interrogation of fibre Bragg grating sensors using laser diodes. *Measurement Science and Technology*, 2001, vol. 12, no. 2, pp. 181. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/2/309>
12. Cui J., Hu Y., Feng K., Li J., Tan J. FBG interrogation method with high resolution and response speed based on a reflective-matched FBG scheme. *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 7, pp. 16516–16535. <https://doi.org/10.3390/s150716516>
13. Yan H.T., Liu Q., Ming Y., Luo W., Chen Y., Lu Y.Q. Metallic grating on a D-shaped fiber for refractive index sensing. *IEEE Photonics Journal*, 2013, vol. 5, no. 5, pp. 4800706. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2013.2284244>
14. Kouroussis G., Kinet D., Mendoza E., Dupuy J., Moeyaert V., Caucheteur C. Edge-filter technique and dominant frequency analysis for high-speed railway monitoring with fiber Bragg gratings. *Smart Materials and Structures*, 2016, vol. 25, no. 7, pp. 075029. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/7/075029>
15. Cheng R., Xia L., Zhou J., Liu D. Wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors based on crossed optical Gaussian filters. *Optics Letters*, 2015, vol. 40, no. 8, pp. 1760–1763. <https://doi.org/10.1364/OL.40.001760>
16. Fernandez M.P., Bulus-Rossini L.A., Cruz J.L., Andres M.V., Costanzo-Caso P.A. High-speed and high-resolution interrogation of FBG sensors using wavelength-to-time mapping and Gaussian filters. *Optics Express*, 2019, vol. 27, no. 25, pp. 36815–36823. <https://doi.org/10.1364/OE.27.036815>
17. Njegovec M., Donlagic D. Interrogation of FBGs and FBGs arrays using standard telecom DFB diode. *Journal of Lightwave Technology*,

- Technology. 2016. V. 34. N 22. P. 5340–5348. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2616725>
18. Javernik A., Donlagic D. High-speed interrogation of low-finesse Fabry–Perot sensors using a telecom DFB laser diode // *Journal of Lightwave Technology*. 2017. V. 35. N 11. P. 2280–2290. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2642222>
 19. Mizunami T., Hirose S., Yoshinaga T., Yamamoto K. Power-stabilized tunable narrow-band source using a VCSEL and an EDFA for FBG sensor interrogation // *Measurement Science and Technology*. 2013. V. 24. N 9. P. 094017. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/9/094017>
 20. Tang Y., Siahmakoun A., Granieri S.C., Vlahovic B., Cheng C. Erbium doped fiber ring laser for optical wavelength conversion // *Optik*. 2011. V. 122. N 4. P. 340–344. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2010.01.007>
 21. Ahasan-ul-Karim M., Hossain M.I., Mehal M.T., Majumder S.P. All optical wavelength conversion based on cross gain modulation in Erbium Doped Fiber Amplifier // *Proc. of the Asia-Pacific Microwave Conference*. 2007. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/APMC.2007.4554657>
 22. Giles C.R., Desurvire E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers // *Journal of Lightwave Technology*. 1991. V. 9. N 2. P. 271–283. <https://doi.org/10.1109/50.65886>

Авторы

Назаренко Владислав Николаевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0006-2597-9413>, vladnaz411@gmail.com

Иудин Виктор Андреевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57221049038](https://orcid.org/0000-0002-5913-1000), <https://orcid.org/0000-0002-5913-1000>, iudin.viktor98@gmail.com

Волковский Сергей Александрович — кандидат технических наук, научный сотрудник, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57195476252](https://orcid.org/0000-0001-8462-5208), <https://orcid.org/0000-0001-8462-5208>, savolkovskii@itmo.ru

Алейник Артем Сергеевич — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, технический директор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 54793978900](https://orcid.org/0000-0002-7682-348X), <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>, artemal@itmo.ru

Authors

Vladislav N. Nazarenko — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0006-2597-9413>, vladnaz411@gmail.com

Viktor A. Iudin — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57221049038](https://orcid.org/0000-0002-5913-1000), <https://orcid.org/0000-0002-5913-1000>, iudin.viktor98@gmail.com

Sergey A. Volkovskiy — PhD, Scientific Researcher, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57195476252](https://orcid.org/0000-0001-8462-5208), <https://orcid.org/0000-0001-8462-5208>, savolkovskii@itmo.ru

Artem S. Aleynik — PhD, Associate Professor, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 54793978900](https://orcid.org/0000-0002-7682-348X), <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>, artemal@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 19.10.2024
Одобрена после рецензирования 15.05.2025
Принята к печати 20.07.2025

Received 19.10.2024
Approved after reviewing 15.05.2025
Accepted 20.07.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»