

Технологии фотоники и машинного обучения для сенсорных систем

*Алексей Александрович Редюк
зав. лаб. НГУ, Новосибирск*

**Научная сессия Объединённого ученого совета
по физическим наукам СО РАН, 17 мая 2023 г.**

План доклада

- Создание молодёжной лаборатории
- Тематика исследований
- Примеры решаемых задач

Создание молодёжной лаборатории

28.06.2021 - 10.07.2021

Сбор заявок на создание в рамках реализации нацпроекта «Наука и университеты» новых молодёжных лабораторий под руководством молодых исследователей в организациях-участниках НОЦ мирового уровня

15.07.2021 - 01.10.2021

Рассмотрение и экспертиза заявок Российской академией наук

Итог: рекомендовано создание 6 лабораторий (ИХБФМ, ИХТТМ, НГУ, ИЦИГ, ФИЦ ФТМ)

Лаборатория технологий фотоники и машинного обучения для сенсорных систем

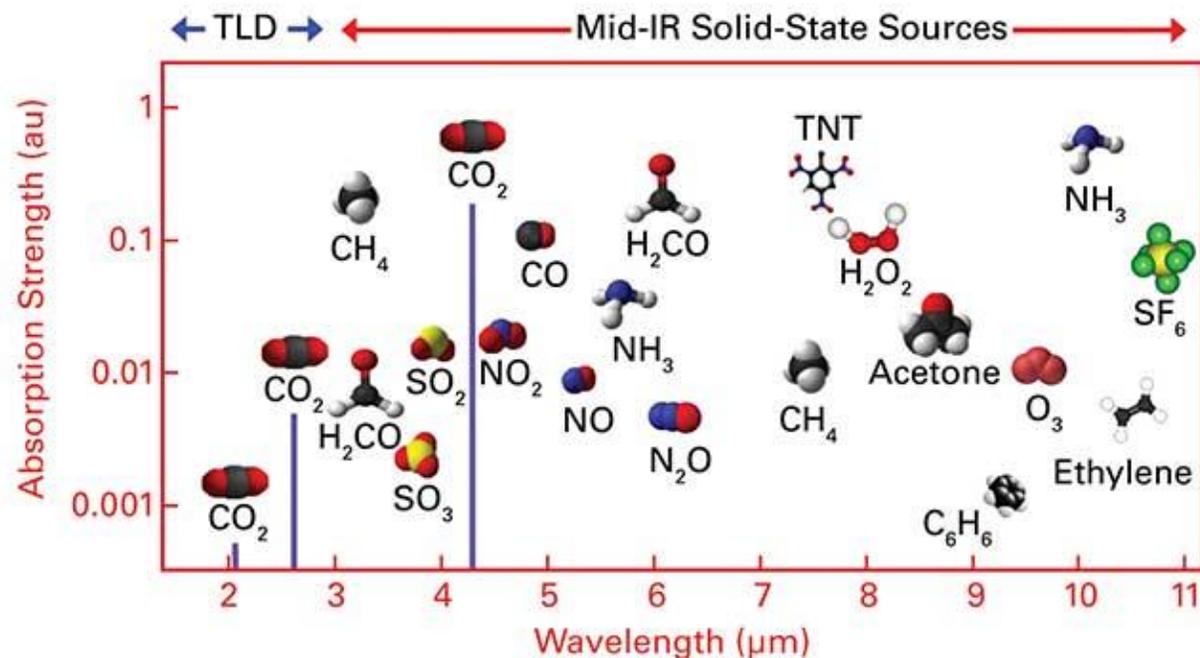
Тематика исследований

Применение сенсорных систем

- Сопровождение технологических процессов в различных областях промышленности
- Контроль климатических процессов и задачи, связанные с глобальным потеплением
- Мониторинг атмосферного воздуха в городах и на предприятиях
- Контроль параметров пищевой и сельскохозяйственной продукции
- Развитие направлений «Умный дом», «Умный автомобиль»
- ...



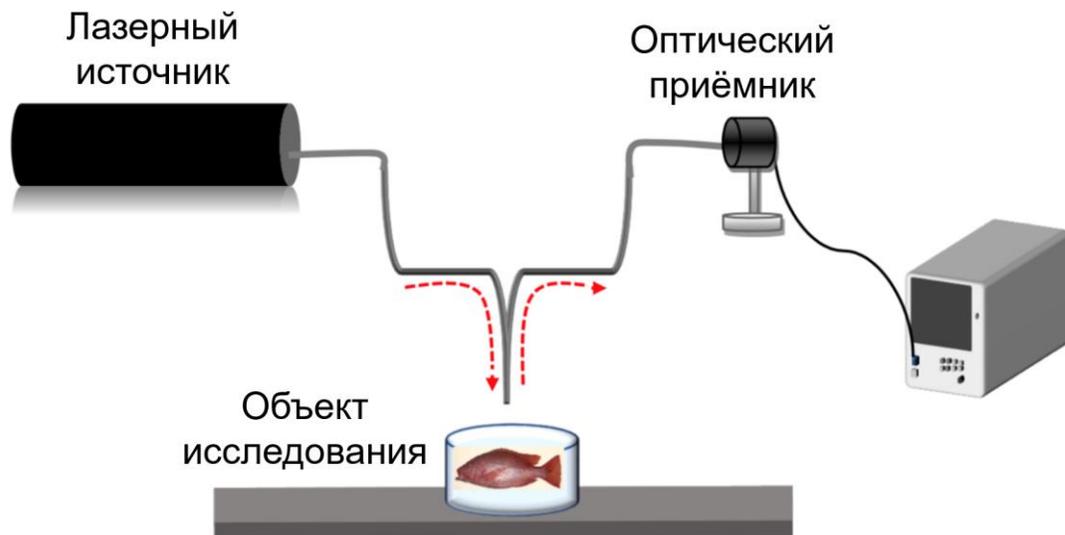
Тематика исследований



J. Pozo, 2016, <https://www.photonics.com>

- Многие индустриальные газы и соединения имеют уникальные спектральные характеристики в ближнем и среднем ИК-диапазоне (спектры поглощения, пропускания, отражения)
- Имея источник света необходимой длины волны и библиотеки спектров высокого разрешения можно детектировать, классифицировать и оценивать концентрации веществ
- Современные сенсорные системы способны производить огромные объёмы данных, к которым обеспечен лёгкий доступ для сбора, обработки, анализа и принятия решений

Тематика исследований

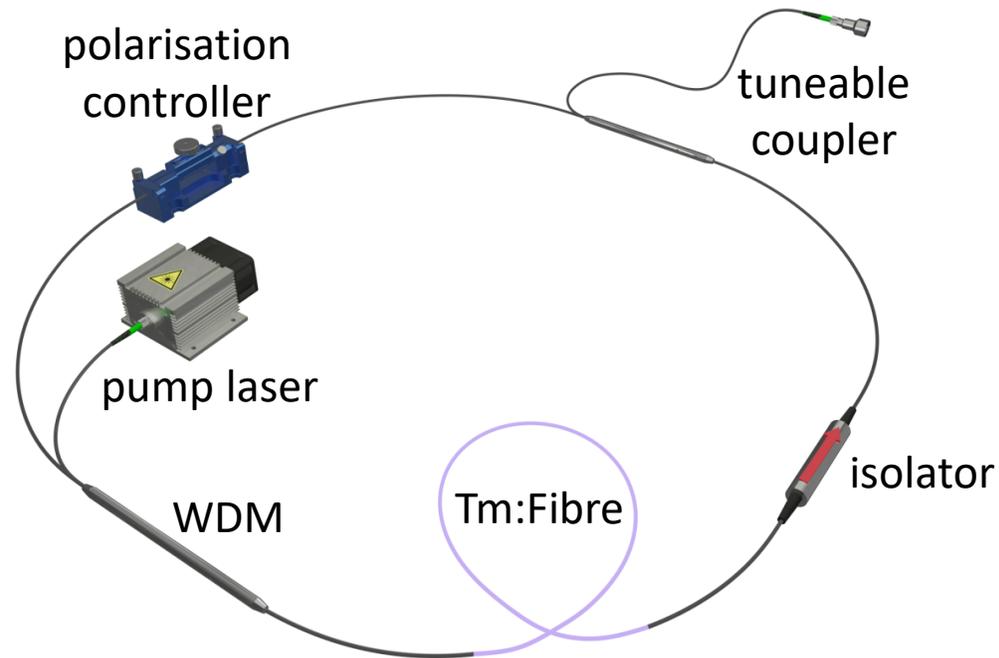


Основные направления научных исследований

- Экспериментальные и теоретические исследования источников излучения ближнего и среднего ИК-диапазона
- Исследования новых и адаптация существующих технологий фотоники для конкретных практических применений
- Разработка новых и применение существующих алгоритмов обработки сигналов на основе методов машинного обучения для эффективного анализа извлекаемых данных и поддержки принятия решений

Тулиевый волоконный лазер

Создание лазерного источника в полностью волоконном исполнении с максимальным диапазоном перестройки длины волны в ближнем инфракрасном диапазоне



Тулиевый световод:

- 01 усиление сигнала
- 02 эффективный насыщающийся поглотитель
- 03 управление длиной волны излучения



Исследование новой компактной схемы тулиевого волоконного лазера с возможностью спектральной перестройки в широком диапазоне от 1870 до 1960 нм.

Тулиевый волоконный лазер

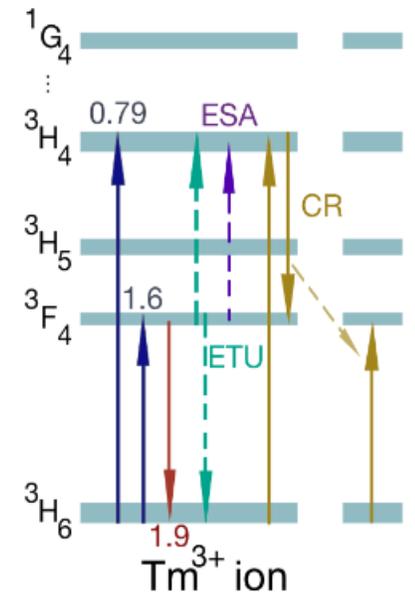
Реализована численная модель лазерной системы на основе нелинейного уравнения Шрёдингера и трёхуровневой модели усиливающей среды

$$\frac{\partial A_s(z,t)}{\partial z} = -i\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_s(z,t)}{\partial t^2} + i\gamma |A_s(z,t)|^2 A_s(z,t) + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g_s(\omega, z)}{2} \tilde{A}_s(z, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega,$$

$$\frac{\partial P_p(z)}{\partial z} = g_p(z) P_p(z),$$

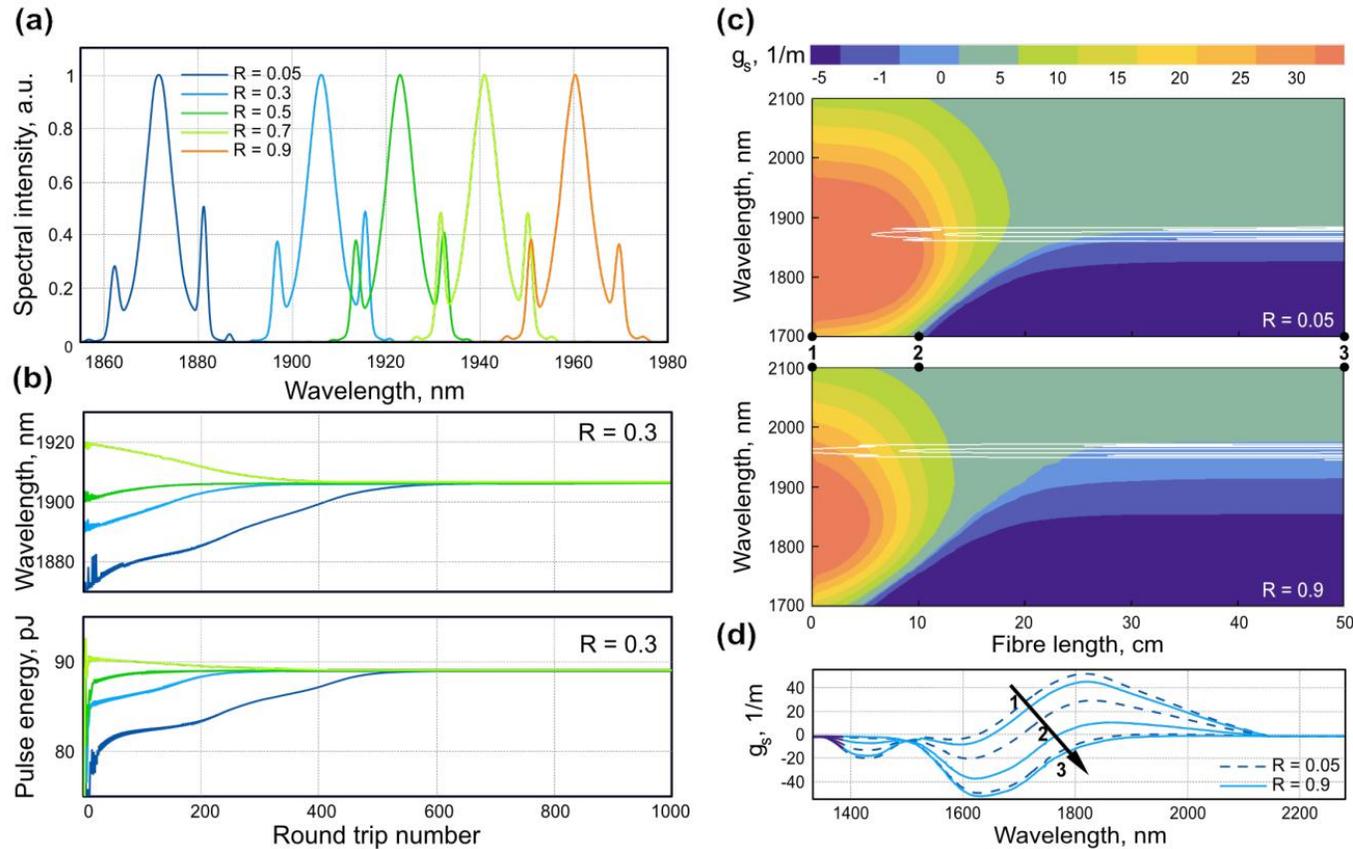
$$g_s(\lambda_i, z) = (\sigma_{21}^s(\lambda_i) - \sigma_{23}^s(\lambda_i)) \rho_s(\lambda_i) N_2(z) - \sigma_{12}^s(\lambda_i) \rho_s(\lambda_i) N_1(z) + \sigma_{32}^s(\lambda_i) \rho_s(\lambda_i) N_3(z), \quad i = 1, \dots, N_\omega$$

$$g_p(z) = \sigma_{21}^p \rho_p N_2(z) - \sigma_{12}^p \rho_p N_1(z)$$



N*

Тулиевый волоконный лазер



Результаты моделирования:

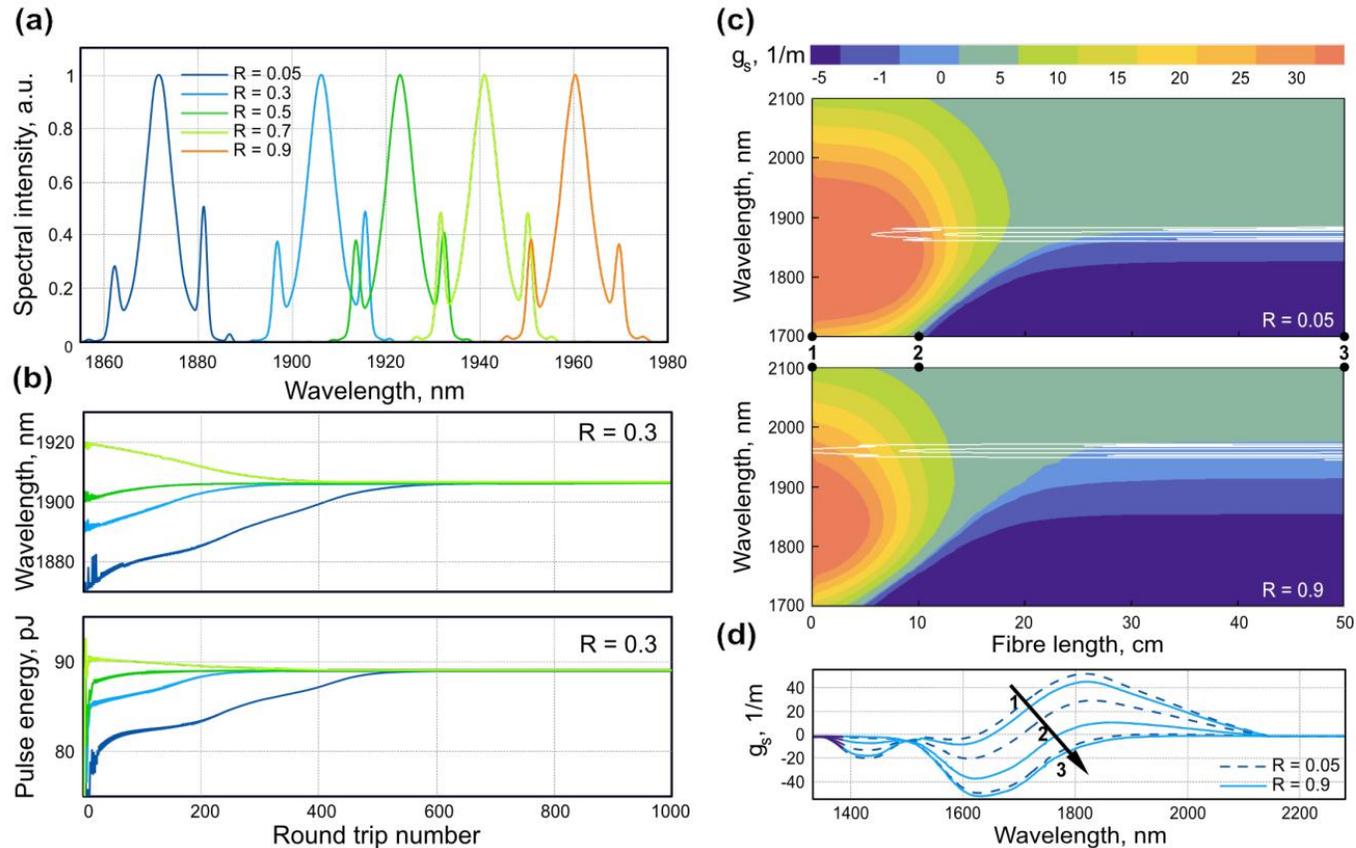
Получена перестройка длины волны выходного импульса в диапазоне 90 нм при изменении коэффициента обратной связи в резонаторе.

Показано, что самосинхронизация мод излучения в тулиевом волоконном лазере способна приводить к стабильной генерации фемтосекундных импульсов с высокой энергией.

Объяснены механизмы самосинхронизации мод излучения в тулиевом волоконном лазере.

Обоснована определяющая роль уровня возбуждения усиления в управлении длиной волны генерации.

Тулиевый волоконный лазер



communications physics

ARTICLE

<https://doi.org/10.1038/s42005-022-00989-x>

OPEN



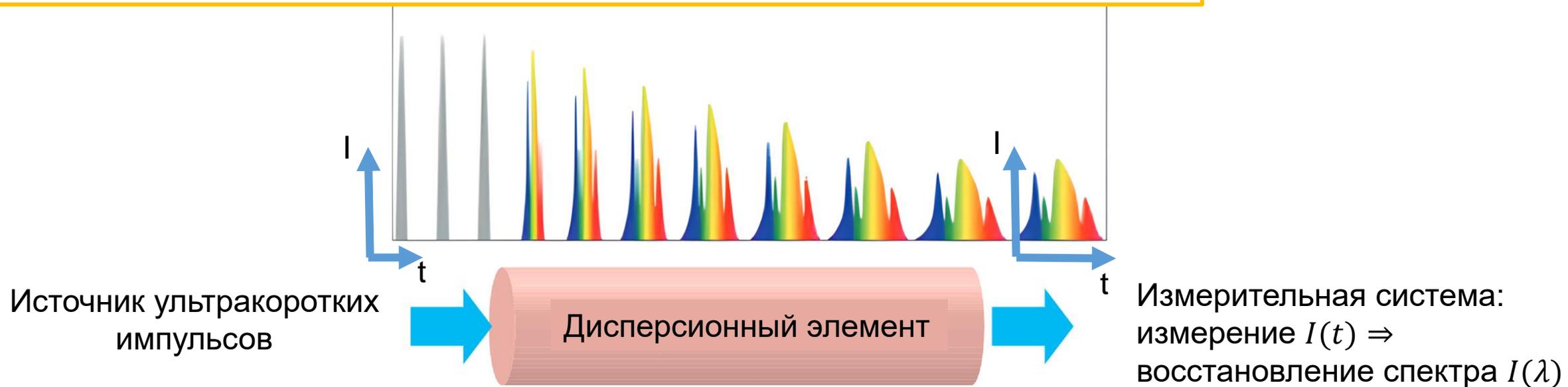
Gain-controlled broadband tuneability in self-mode-locked Thulium-doped fibre laser

Dennis C. Kirsch¹, Anastasia Bednyakova², Petr Varak³, Pavel Honzatko³, Benoit Cadier⁴, Thierry Robin⁴, Andrei Fotiadis^{5,6}, Pavel Peterka³ & Maria Chernysheva¹

Ensuring self-driven mode-locking and broadband wavelength tuneability in all-fibre-integrated femtosecond laser sources enables a new level of their versatility and extends areas of their applications. Principle limitations for this are traditionally available ultrafast modulators and tuneability techniques. Here, we exploit Thulium-doped fibre to perform three roles in the cavity: laser gain, saturable absorber, and tuneability element via controlling its excitation level. We confirmed that Tm-doped fibre saturable absorption is defined by a reinforced quenching of Tm^{3+} pairs. As a result, we present both numerically and experimentally a highly stable sub-picosecond pulse generation with a -90 nm tuneability range spanning from 1873 to 1962 nm via adjusting the cavity feedback. The maximum laser efficiency corresponds to 25% cavity feedback, enabling the highest output energy of 1 nJ in 600-fs solitons at 1877 nm. Overall, the presented laser system establishes a compact and straightforward approach for ultrafast generation, which can be translated to other fibre laser operation wavelengths.

Дисперсионное преобразование Фурье

Измерение концентрации аммиака (NH_3) с помощью дисперсионного преобразования Фурье

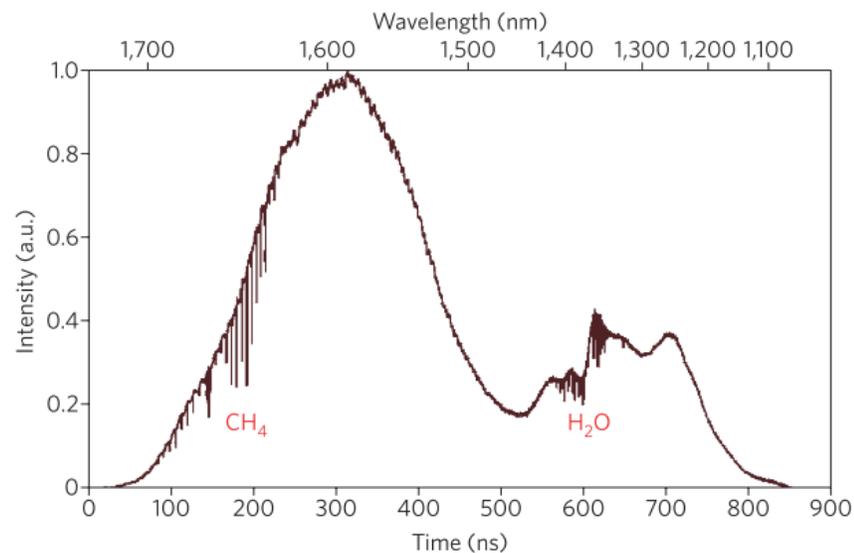


- Не требуется анализатора оптического спектра
- Измерение спектра каждого из импульсов в отдельности
- Высокая частота опроса (~ 10 МГц)
- Разрешение определяется дисперсией и скоростью работы АЦП

Дисперсионное преобразование Фурье

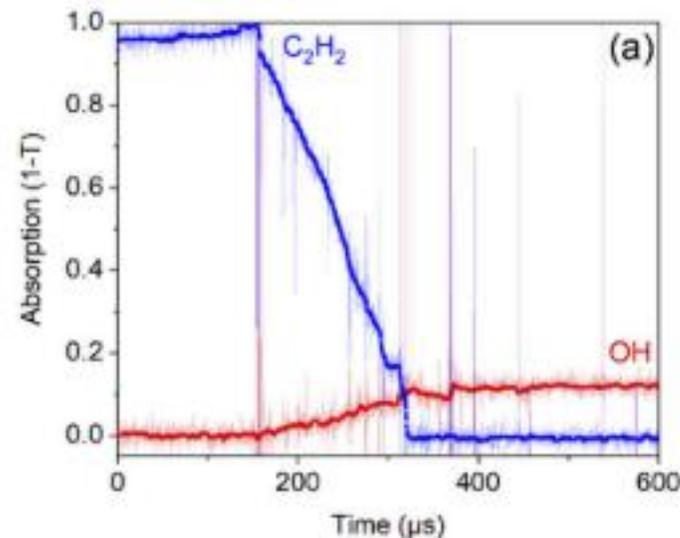
Спектроскопия поглощения с помощью дисперсионного преобразования Фурье

Спектроскопия смеси метана и водяных паров
(*J. Hult, R.S. Watt, C.F. Kaminski, Opt. Express 15, 11385, 2007*)



Измерение в широком спектральном диапазоне \Rightarrow
возможен анализ концентраций нескольких газов
одновременно

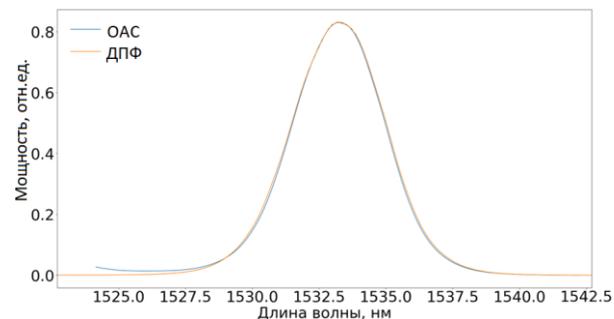
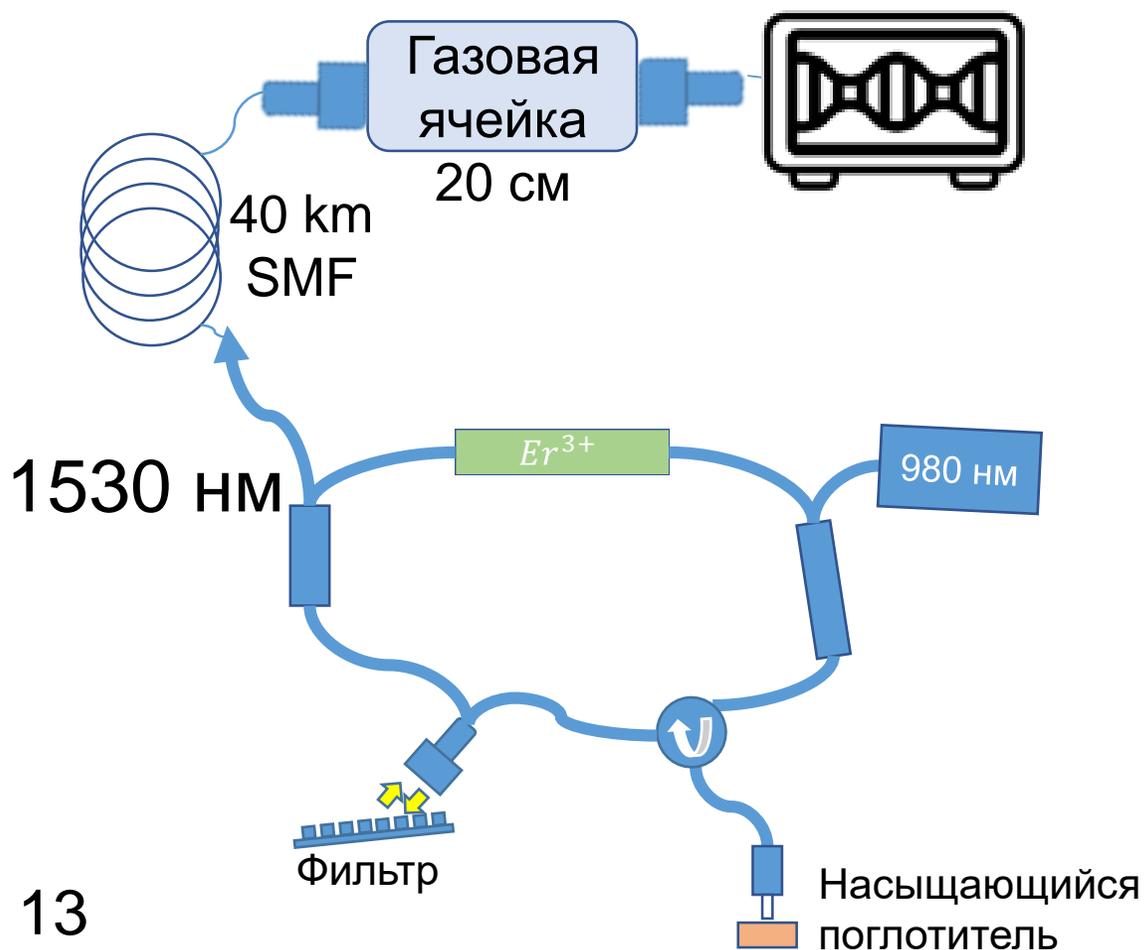
Визуализация процесса горения ацетилена
(*J.G. Mance et al., Opt. Express 28, 29004, 2020*)



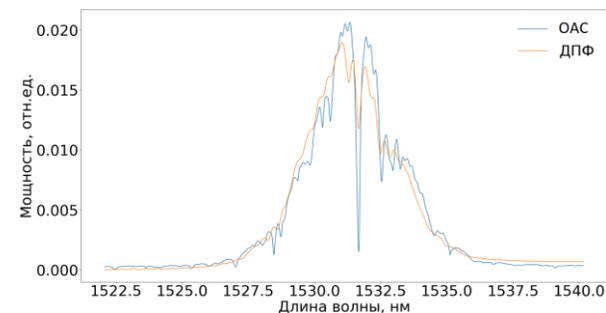
Измерение концентраций
в быстротекающих процессах

Дисперсионное преобразование Фурье

Тестирование схемы на основе ДПФ



Спектр до ячейки



Спектр после ячейки

с $n_{NH_3} \sim 10\%$

Результаты:

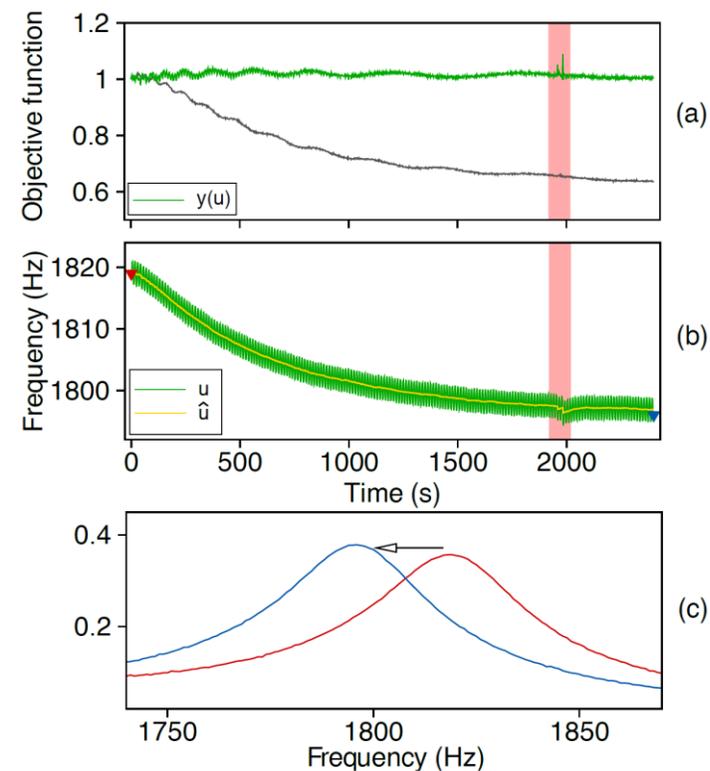
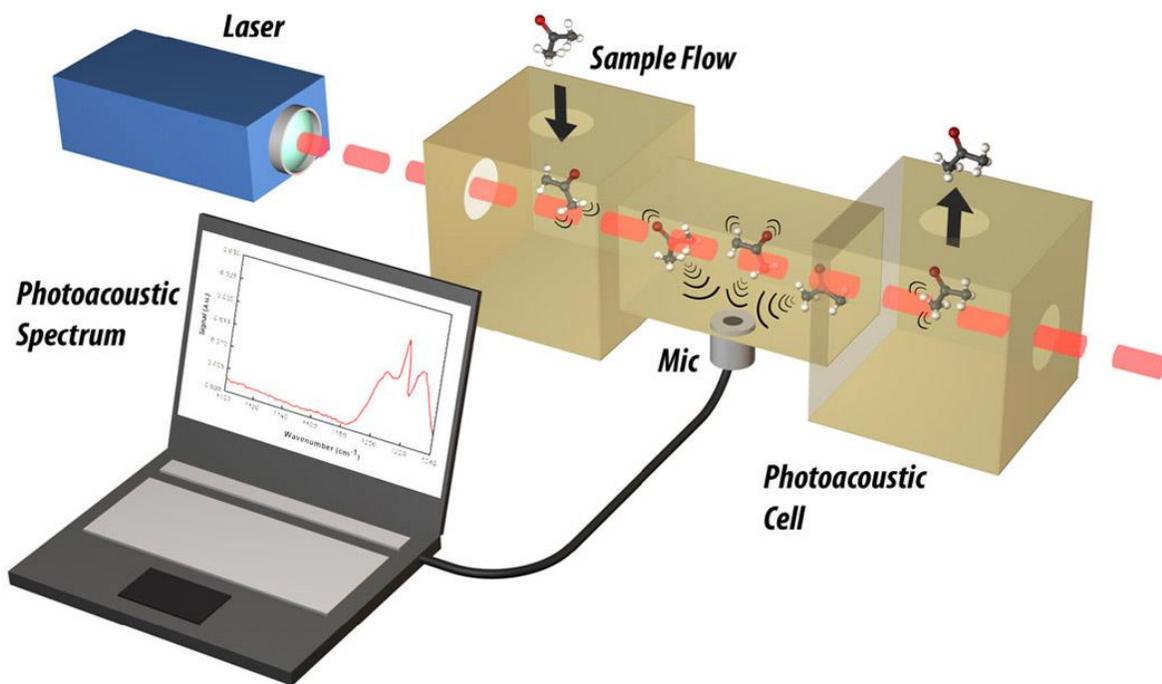
Создан импульсный лазер, спектр которого позволяет проводить измерение поглощения на линиях аммиака (1530 нм).

Продемонстрирована принципиальная возможность измерения концентраций аммиака.

N*

Оптоакустический газовый сенсор

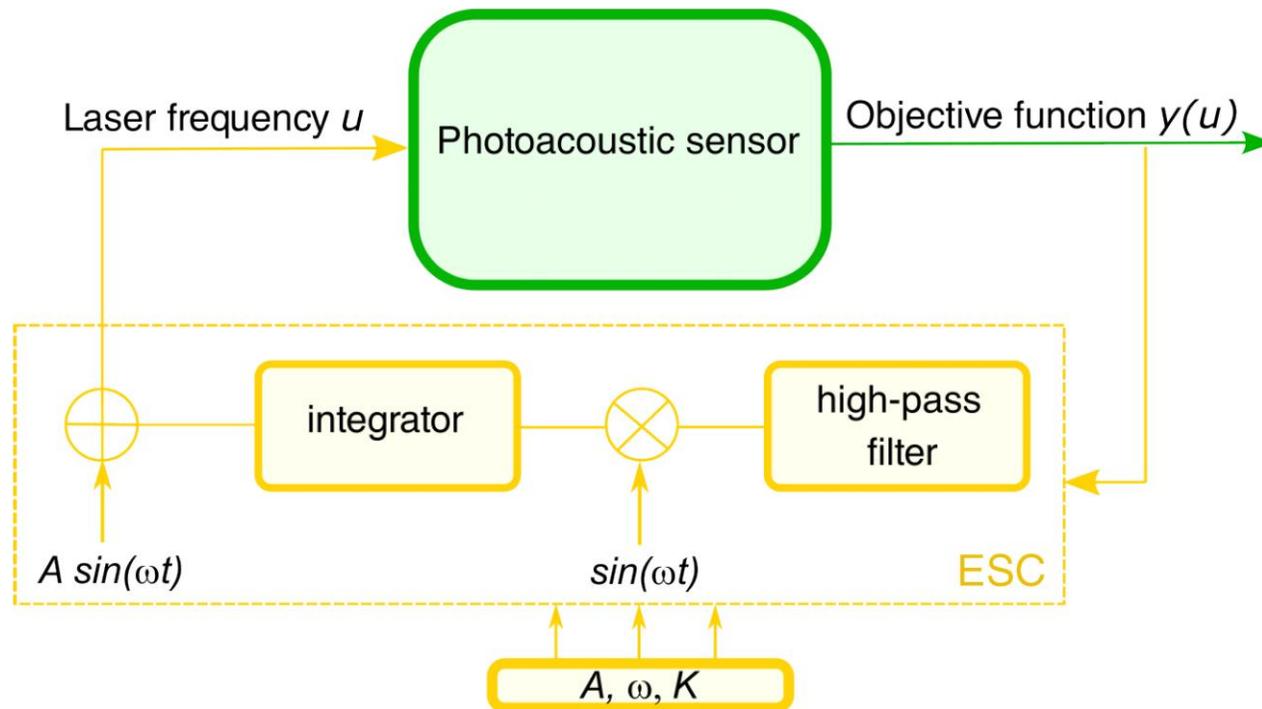
Повышение долговременной стабильности оптоакустического газового сенсора метана (CH_4) с помощью алгоритма управления поиском экстремума



N*

Оптоакустический газовый сенсор

Алгоритм управления поиском экстремума



u – частота следования лазерных импульсов

$y(u)$ – целевая функция

K – параметр интегрирования

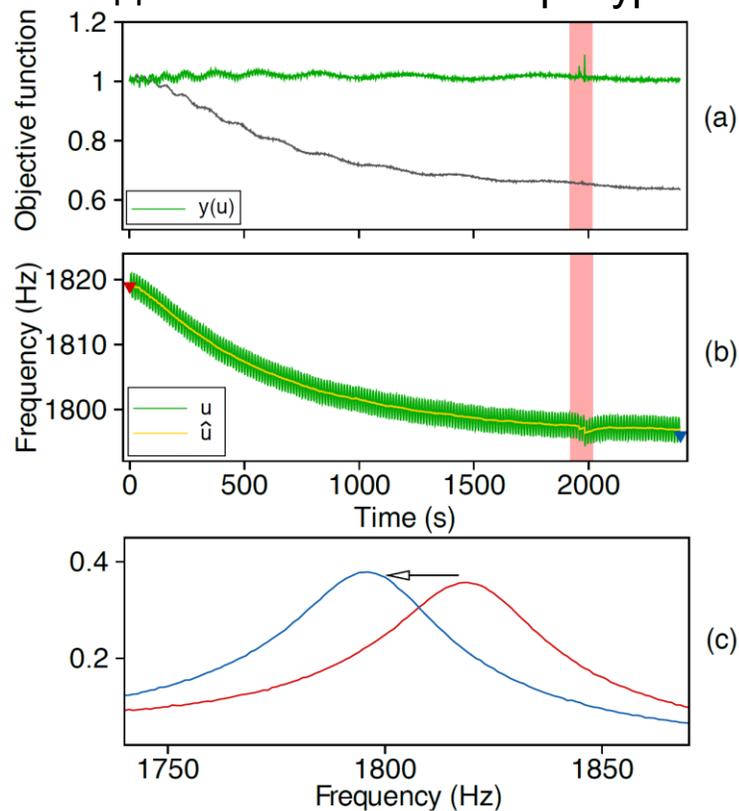
A – амплитуда синусоидального возмущения

ω – частота синусоидального возмущения

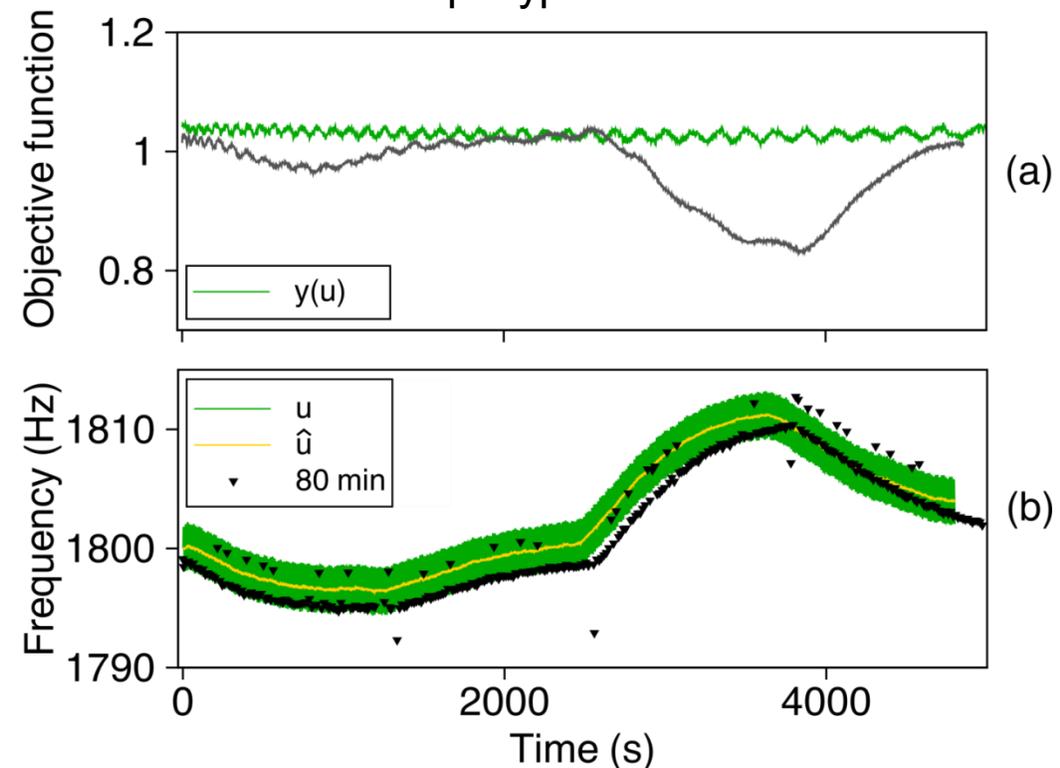
Оптоакустический газовый сенсор

Экспериментальное тестирование алгоритма

Остывание ячейки с 37°C до комнатной температуры



Синусоидальное изменение температуры ячейки



Оптоакустический газовый сенсор

Результаты:

Для достижения долговременной стабильности газового сенсора реализовано решение на основе алгоритма управления поиском экстремума, которое позволяет автоматически подстраивать частоту модуляции лазера для компенсации изменения резонансной частоты газовой ячейки.

Алгоритм эффективно поддерживает стабильность сигнала с оптоакустического сенсора в течение длительных периодов времени и в условиях быстро изменяющейся температуры.

Предлагаемый подход может применяться для долгосрочного мониторинга концентраций различных биомаркеров, промышленных газов и основных парниковых газов, поиска газовых месторождений.



Article

Enhancing long-term stability of photoacoustic gas sensor using an extremum-seeking control algorithm

Anastasia Bednyakova^{1,†,*}, Evgenii Erushin^{1,2,3,‡}, Ilya Miroshnichenko^{2,3}, Nadezhda Kostyukova^{1,2,3}, Andrey Boyko^{1,2}, Alexey Redyuk¹

¹ Novosibirsk State University, Pirogova str. 2, Novosibirsk 630090, Russia

² Institute of Laser Physics SB RAS, Lavrentyev av. 15b, Novosibirsk 630090, Russia

³ Novosibirsk State Technical University, K. Marksa av. 20, Novosibirsk 630073, Russia

* Correspondence: anastasia.bednyakova@gmail.com

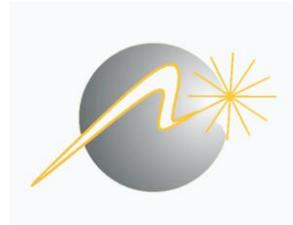
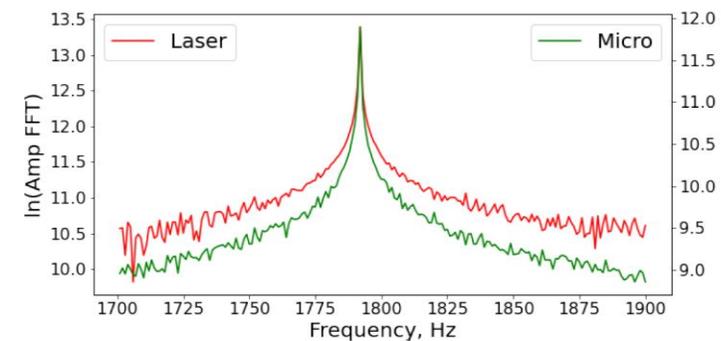
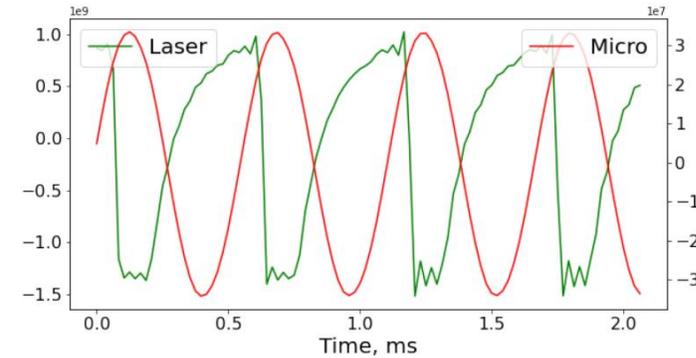
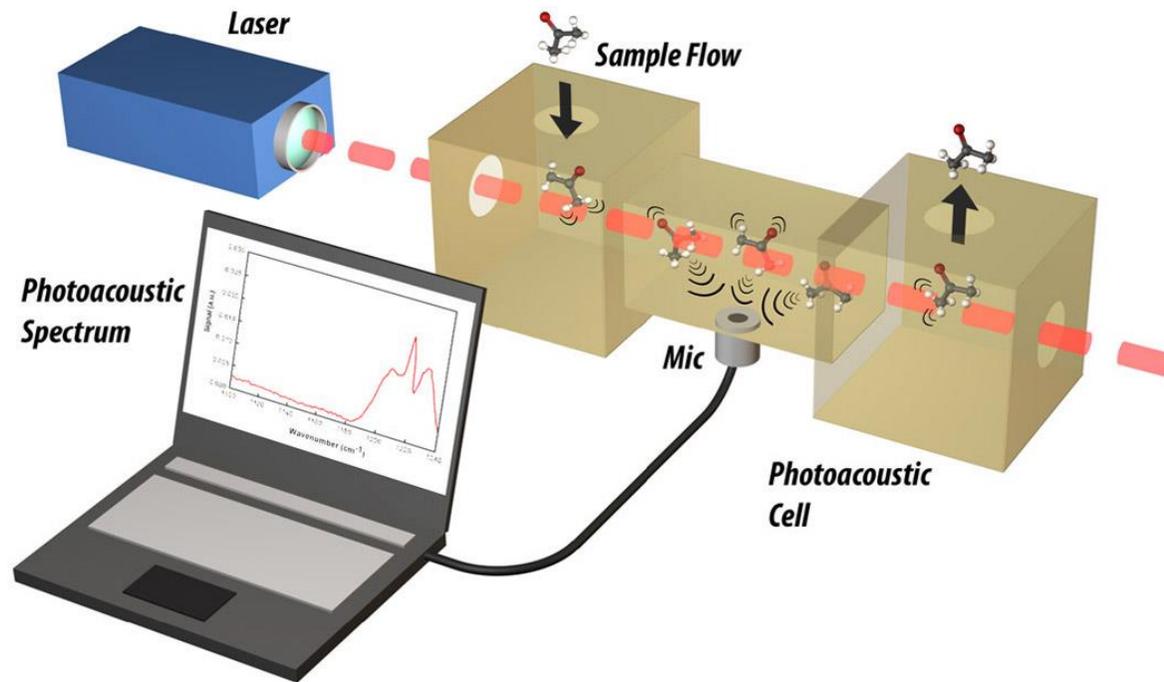
‡ These authors contributed equally to this work.

Abstract: Smart sensor systems have gained increasing importance in various fields, including healthcare, environmental monitoring, industrial automation, and security. Photoacoustic gas sensors are an emerging type of optical sensor used in various applications due to its enhanced performance characteristics. However, the accuracy and reliability of gas concentration measurements from photoacoustic gas sensors may be impacted by several known limitations, including drift of the gas cell resonant frequency over extended periods of time. Researchers have proposed various solutions, including optimization methods and signal processing algorithms, to address this and others issues. In this paper, we propose a novel solution using an extremum-seeking control algorithm to manage the laser modulation frequency of photoacoustic gas sensors. By tracking the changing resonant frequency of the gas cell, long-term stability can be achieved, making it suitable for environmental monitoring, petroleum exploration, and industrial process control. Our approach has the potential to improve the accuracy and reliability of long-term measurements obtained from photoacoustic gas sensors, providing a stable and reliable method for gas concentration estimation.



Оптоакустический газовый сенсор

Методы интерпретации данных оптоакустического газового сенсора метана (CH_4) с помощью алгоритмов вейвлет-анализа и машинного обучения

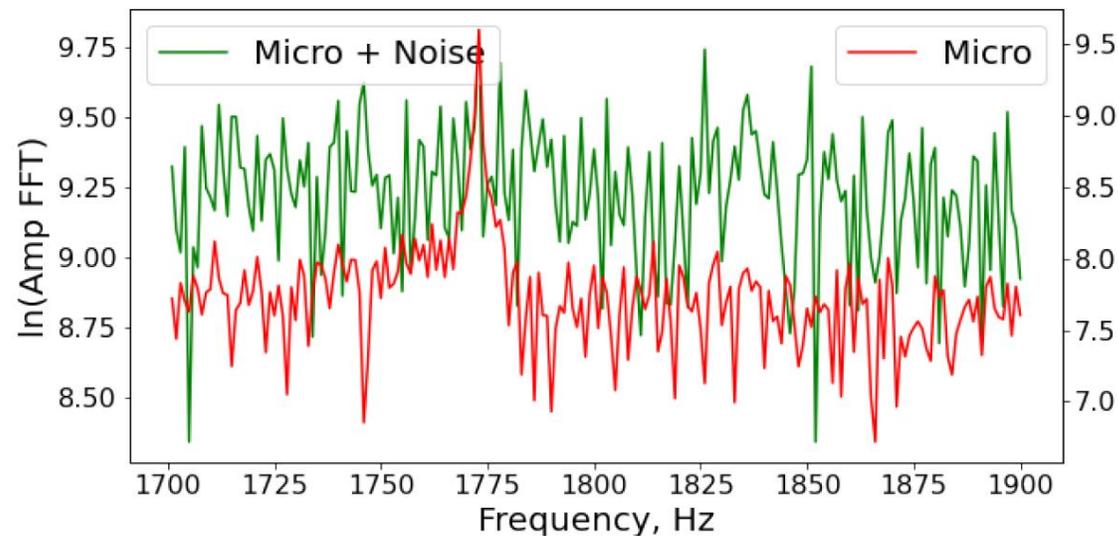


N*

Оптоакустический газовый сенсор

Актуальность альтернативных методов интерпретации

- Уменьшение стоимости прибора (микрофоны, приемник излучения)
- Улучшение качества прогноза на низких концентрациях
- Уменьшение минимального детектируемого значения концентрации



Оптоакустический газовый сенсор

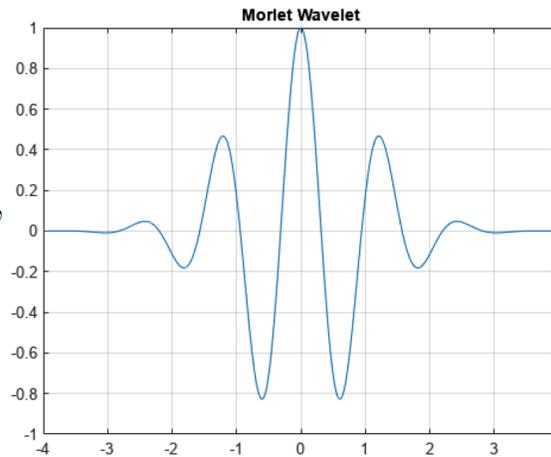
Вейвлет преобразование

- Вейвлет преобразование - свёртка вейвлет функции $\psi(t)$ с сигналом $f(t)$:

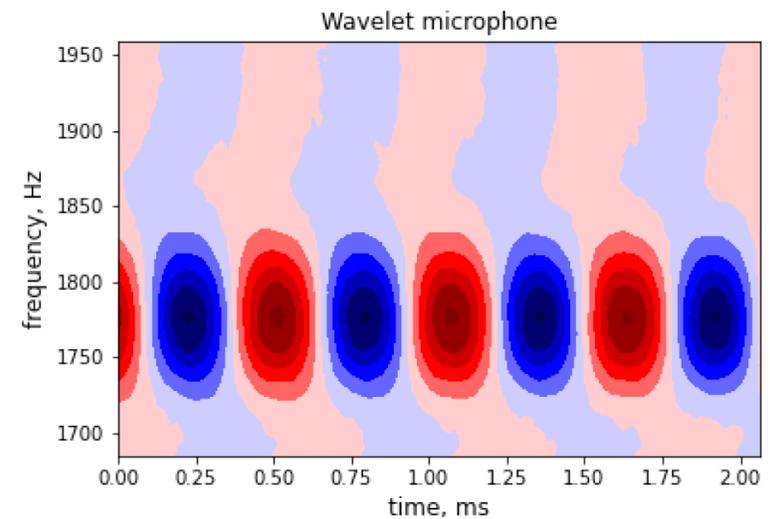
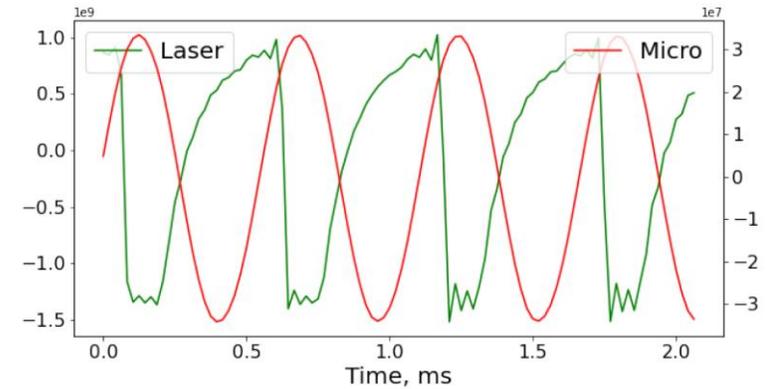
$$[W_\psi f](a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt,$$

где a - масштабный коэффициент, b - параметр сдвига.

- Переход из временного представления в частотно временное.
- Комплексный вейвлет Морле (cmor):

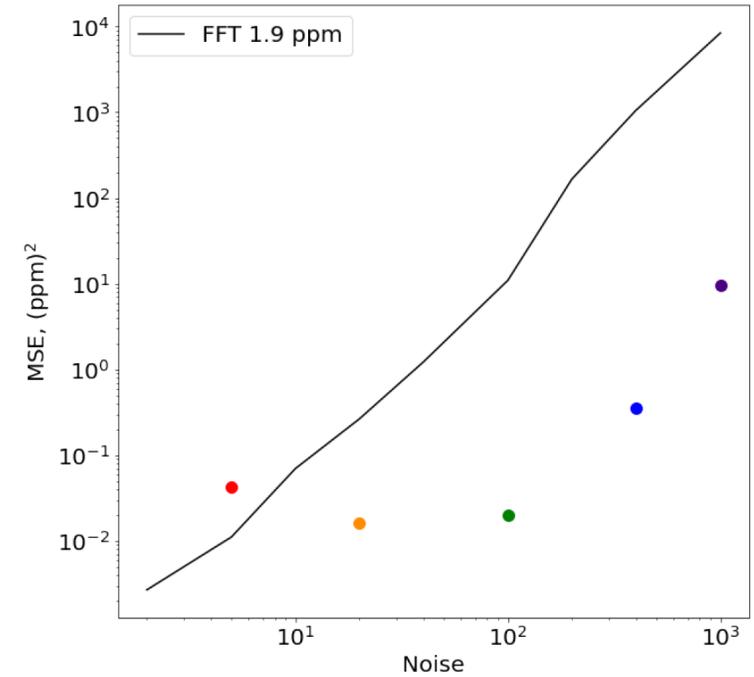
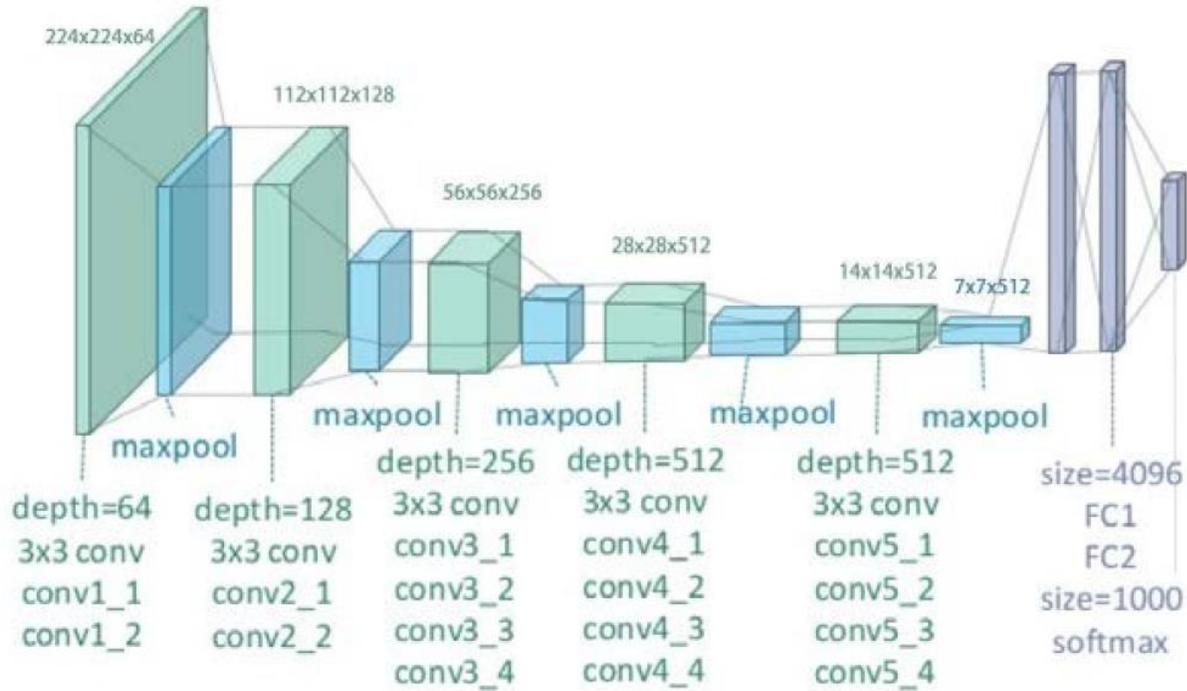
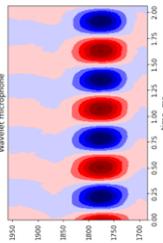


Реальная часть вейвлета Морле



Оптоакустический газовый сенсор

Свёрточные нейронные сети



Концентрация 1.9 ppm



Спасибо за внимание!

Алексей Александрович Редюк
a.redyuk@nsu.ru

