

НЕЙРОННЫЕ ОПЕРАТОРЫ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Григорьев Д. М.¹

**Научный руководитель – Лытаев М.С.¹, канд. техн. наук, старший научный сотрудник
СПб ФИЦ РАН**

¹Университет ИТМО
erzherzog_dx@mail.ru

Введение

Ультразвуковая компьютерная томография (USCT) позволяет получать количественные карты акустических параметров тканей, в частности скорости звука, и рассматривается как безопасная альтернатива методам, использующим ионизирующее излучение. Однако точная реконструкция параметров требует решения нелинейной обратной задачи распространения волн. Классические методы, такие как полноволновая инверсия (FWI), основаны на многократном численном решении прямой задачи и вычислении градиентов, что приводит к высокой вычислительной стоимости и чувствительности к шуму и неполноте измерений. Современные подходы глубокого обучения ускоряют реконструкцию, но часто демонстрируют ограниченную переносимость из-за упрощенных постановок и недостаточно реалистичных наборов данных. Появление открытых бенчмарков OpenBreastUS и OpenWaves, построенных на анатомически правдоподобных фантомах USCT, создаёт возможность систематически оценить применимость нейронных операторов для задач волновой томографии [1, 2].

Основная часть

В работе исследуются нейронные операторы — модели, обучающие отображения между функциональными пространствами и сохраняющие качество при изменении разрешения сетки. Рассматриваются архитектуры Fourier Neural Operator и DeepONet [3, 4], адаптированные к кольцевой геометрии USCT. Входными данными выступают комплексные отклики на приёмниках для набора источников, расположенных по окружности; комплексные значения представляются двумя каналами (действительная и мнимая части) и нормируются для стабилизации обучения. Целевой переменной является карта скорости звука на прямоугольной сетке.

Предлагаются два режима использования нейронных операторов. В режиме суррогатной модели прямой задачи оператор быстро предсказывает измерения по заданной карте скорости звука, что позволяет частично заменить дорогой численный решатель в итерационных алгоритмах. В режиме прямой инверсии оператор аппроксимирует отображение «измерения датчиков → карта скорости звука», формируя начальное приближение для последующего уточнения классическим методом. В обоих режимах проводится оценка качества и устойчивости при снижении числа источников/приёмников, добавлении шума и переносе между различными подмножествами фантомов и частот.

Экспериментальный протокол включает: обучение и валидацию на OpenBreastUS, проверку переносимости на OpenWaves, а также сравнение по метрикам

среднеквадратичной ошибки и структурного сходства. Дополнительно оценивается выигрыш по времени реконструкции и требуемым вычислительным ресурсам относительно численного моделирования, что важно для применения USCT в задачах оперативного скрининга.

Выводы

Ожидается, что нейронные операторы обеспечат ускорение реконструкции карт скорости звука при сохранении диагностически значимого качества и устойчивости к неполным измерениям. Практическим результатом станет воспроизводимый пайплайн подготовки данных, обучения и тестирования операторных моделей для USCT, а также рекомендации по наиболее эффективной схеме применения (суррогат прямой задачи, прямая инверсия или гибридная комбинация с итерационной инверсией). Предлагаемые подходы могут быть использованы для построения прототипов быстрой реконструкции и дальнейшего расширения на мультимодальные и трёхмерные постановки.

Литература

1. Zeng Z. et al. OpenBreastUS: Benchmarking Neural Operators for Wave Imaging Using Breast Ultrasound Computed Tomography. arXiv:2507.15035, 2025.
2. Zeng Z. et al. OpenWaves: A Large-Scale Anatomically Realistic USCT Dataset for Benchmarking Wave Simulation and Imaging Using Neural Operators. OpenReview, 2025.
3. Li Z., Kovachki N. et al. Fourier Neural Operator for Parametric Partial Differential Equations. arXiv:2010.08895, 2020.
4. Lu L., Jin P., Pang G., Zhang Z., Karniadakis G. E. DeepONet: Learning nonlinear operators via DeepONet based on the universal approximation theorem of operators // Nature Machine Intelligence. 2021.