

Возможность корректировки аберраций на ультразвуковом изображении при съёмке через акустически контрастный слой

Васюков А.В., Беклемышева К.А., Станкевич А.С., Петров И.Б. (МФТИ)

Математические модели и численные методы в биологии и медицине
Москва, ИВМ РАН, 16-17 октября 2025

Аберрации

Ультразвуковое изображение в гетерогенной среде может существенно искажаться

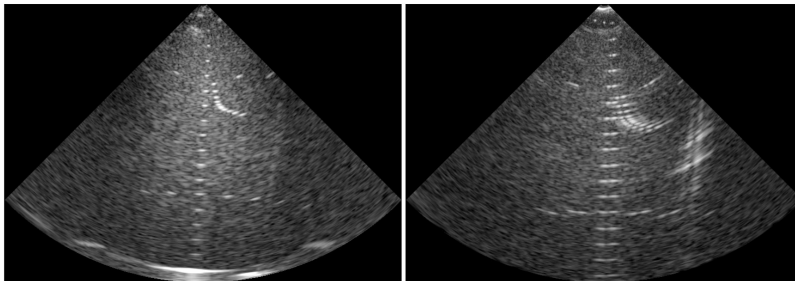


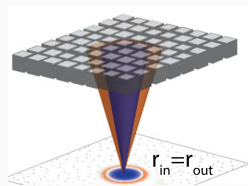
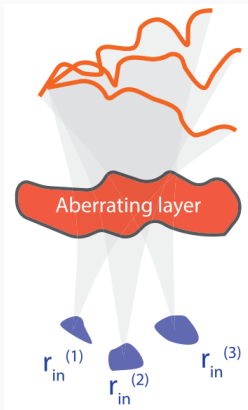
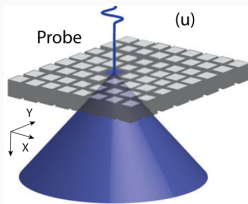
Рис. 1: Медицинский фантом при сканировании без аббератора (слева) и через аббератор (справа)

(Экспериментальные данные - группа Кульберга Н.С., НПЦ Медицинской Радиологии)

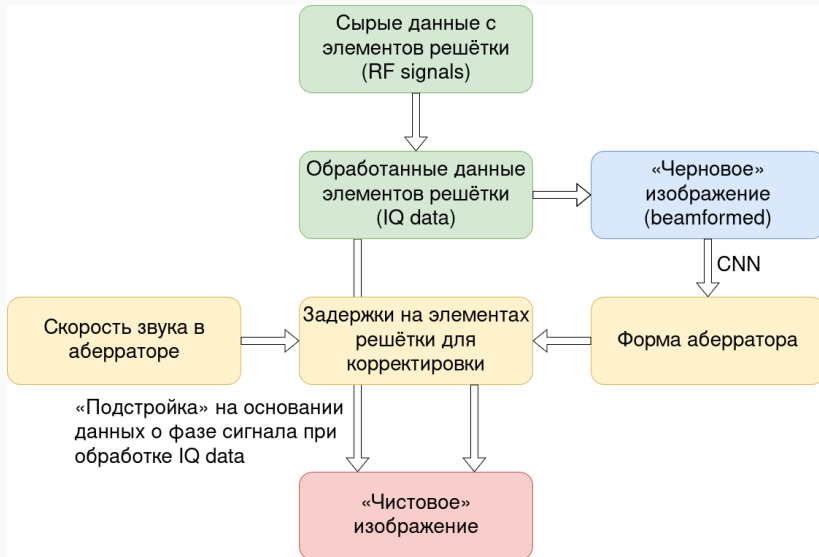
Корректировка аббераций

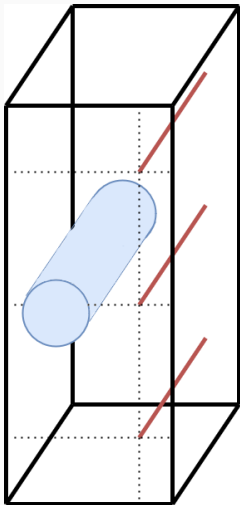
Общий подход

- Цифровая фокусировка pre-beamformed данных.
- УЗИ-аналог конфокальной фокусировки в микроскопии.
- Учёт разности хода, вносимой аббератором.



Конкретная вариация общего подхода





- Объекты фантома: группа тонких нитей и крупный эхогенный цилиндр
- На поверхности фантома лежит аберратор
- Сканирование через аберратор матричным датчиком (32x32 элемента)
- Натурные данные: Bureau, F., Robin, J., Le Ber, A. et al. Three-dimensional ultrasound matrix imaging
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-42338-8>

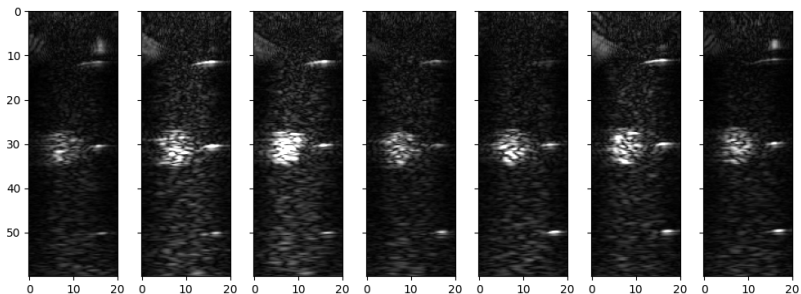


Рис. 2: Срезы «поперёк» цилиндра и нитей

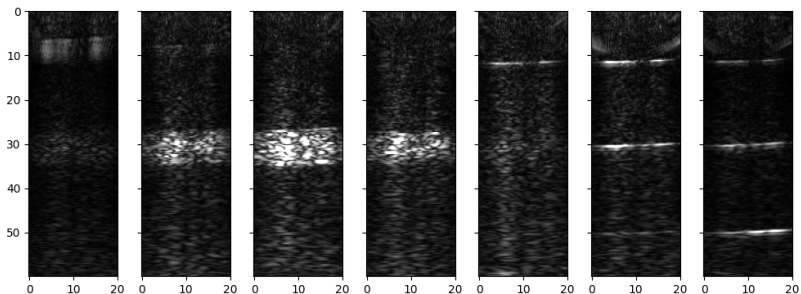


Рис. 3: Срезы «вдоль» цилиндра и нитей

Возможность корректировки аббераций на ультразвуковом изображении при съёмке через акустически контрастный слой имеется.

- Показана применимость к натурным данным, используя только данные ультразвука.
- Зависит от доступности RF data или IQ data (необходима информация о фазе сигнала).
- Реализация в оборудовании сильно зависит от целевой задачи и ограничений оборудования.

Спасибо за внимание!

Причина аберраций

Пример: фронты волн в гетерогенной среде.

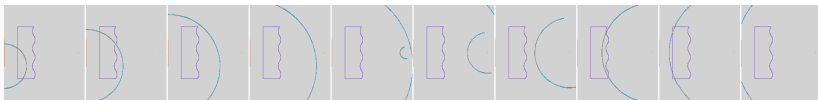


Рис. 4: Фронты волн, взаимодействие с точечным отражателем. Средний ряд - скорости звука в призме и среде равны. Верхний ряд - скорость звука в призме выше. Нижний ряд - скорость звука в призме ниже.

Причина аберраций

Пример: фронты волн в гетерогенной среде.

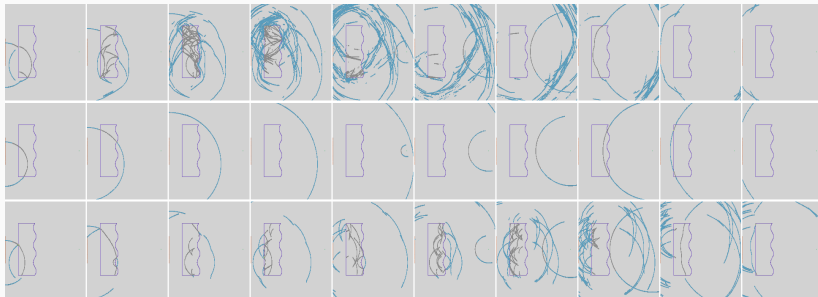


Рис. 4: Фронты волн, взаимодействие с точечным отражателем. Средний ряд - скорости звука в призме и среде равны. Верхний ряд - скорость звука в призме выше. Нижний ряд - скорость звука в призме ниже.

Прямая задача

Математическая модель

Полная система динамических уравнений вязкоупругости для анизотропной среды.

$$\begin{aligned}\frac{\partial v_x}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} &= c_{11} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{12} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{13} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{14} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + c_{15} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + c_{16} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) - \frac{\sigma_{xx}}{\tau_0} \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial t} &= c_{12} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{22} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{23} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{24} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + c_{25} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + c_{26} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) - \frac{\sigma_{yy}}{\tau_0} \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} &= c_{13} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{23} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{33} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{34} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + c_{35} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + c_{36} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) - \frac{\sigma_{zz}}{\tau_0} \\ \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial t} &= c_{14} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{24} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{34} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{44} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + c_{45} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + c_{46} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) - \frac{\sigma_{yz}}{\tau_0} \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} &= c_{15} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{25} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{35} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{45} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + c_{55} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + c_{56} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) - \frac{\sigma_{xz}}{\tau_0} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial t} &= c_{16} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{26} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{36} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{46} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + c_{56} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + c_{66} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) - \frac{\sigma_{xy}}{\tau_0}\end{aligned}$$

- сеточно-характеристический (для полной системы уравнений);
- разрывный метод Галёркина (для сложной геометрии в упругом приближении);
- трассировка лучей с реконструкцией фронтов (WCM) (для высокого разрешения по фазе).

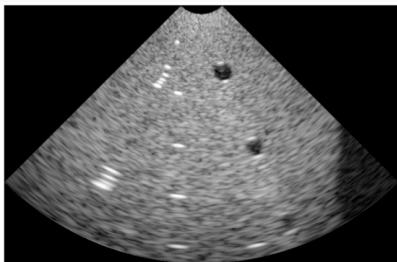


Рис. 5: Эксперимент

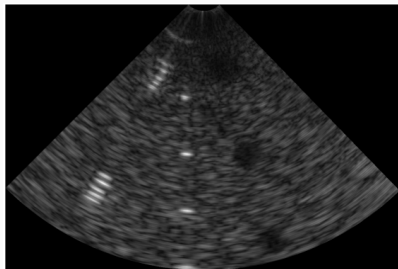


Рис. 6: Расчёт

Валидация для аббераций (2018 год)

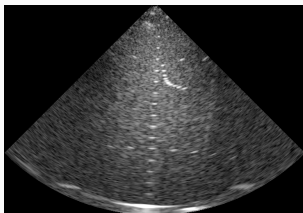


Рис. 7: Структура фантома

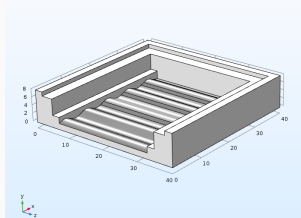


Рис. 8: Аббератор

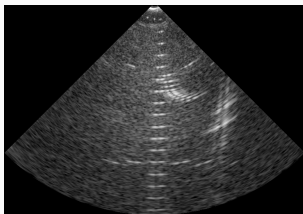


Рис. 9: Эксперимент

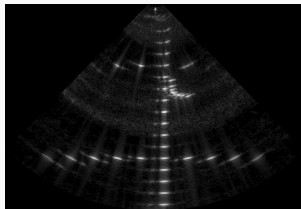


Рис. 10: Расчёт

(В расчёте аббератор и яркие отражатели, без серого фона.)

Прямая задача для сложной геометрии

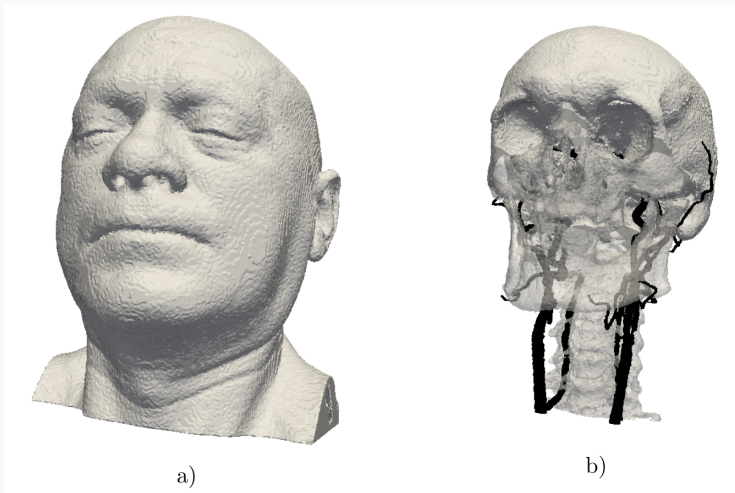


Рис. 11: 3D-модель головы: общий вид, череп, сосуды

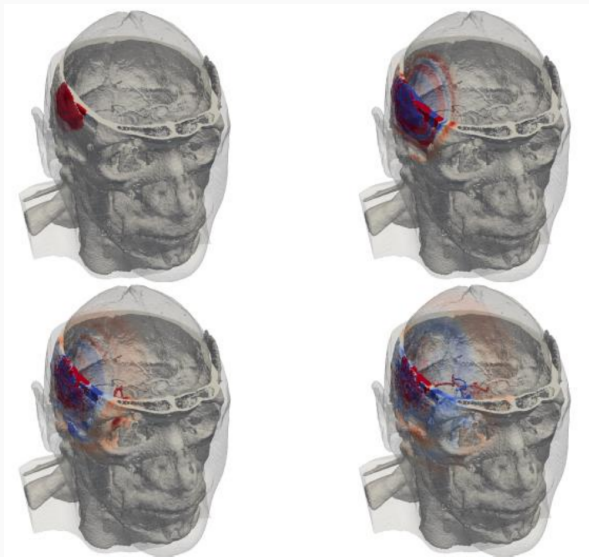


Рис. 12: Импульс в 3D-модели головы с сегментацией тканей

Определение формы абerrатора

Общий подход

Определение формы аббератора в 3D.

- Задача сегментации сформированного В-скана или uncompounded pre-beamformed данных.
- Свёрточная сеть архитектуры UNet.
- Обучение на расчётных данных.

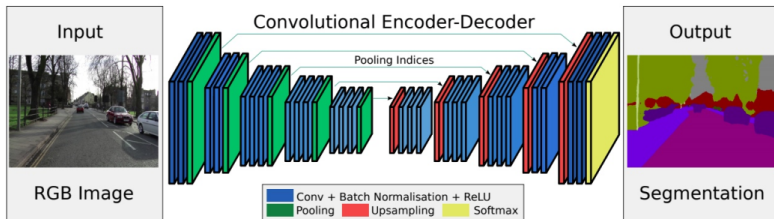


Рис. 13: Классический пайплайн

Общий подход

Определение формы аббератора в 3D.

- Задача сегментации сформированного В-скана или uncompounded pre-beamformed данных.
- Свёрточная сеть архитектуры UNet.
- Обучение на расчётных данных.

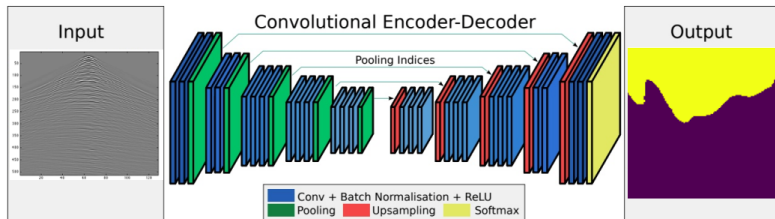


Рис. 14: Наш пайплайн

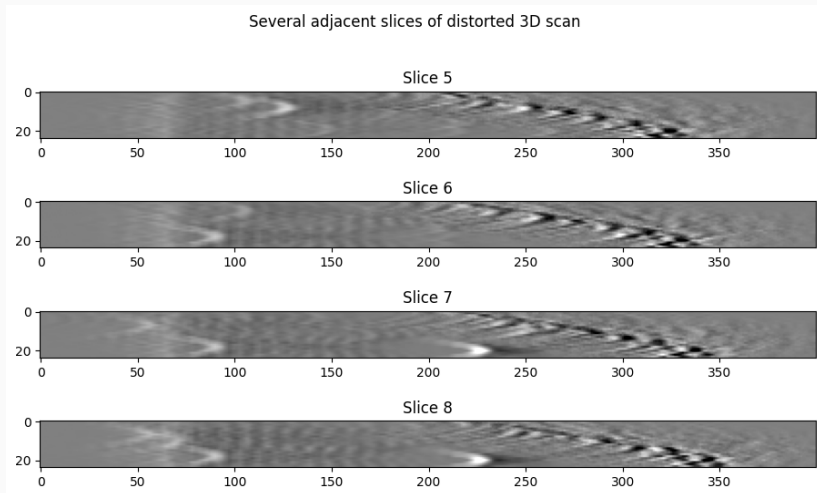


Рис. 15: Входной В-скан

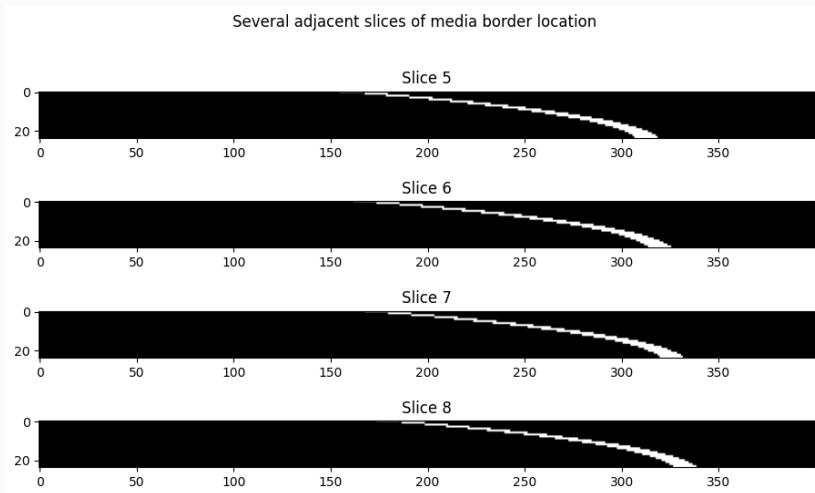


Рис. 16: Реальное положение границы

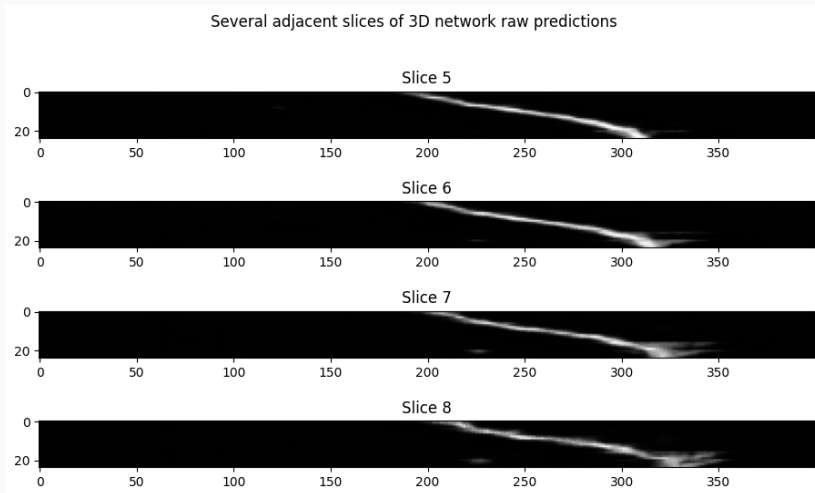


Рис. 17: Предсказание 3D сети

Скорость работы 3D-сети:

- Оборудование: GeForce RTX 3060
- Полное время на 3D-кадр: 0.1 с
- Потребление памяти: 3 Гб vRAM

Свёрточные сети позволяют получить в реальном времени достаточно качественное приближение формы аберратора в 3D.

- Полная 3D постановка.
- Матричный датчик 24x24 или 32x32 элемента.
- Частота сигнала 2-3 МГц, частота дискретизации 6-45 МГц.
- Скорость звука в призме 3.0-2.0 км/с, в геле - 1.5 км/с.
- Малые яркие отражатели - от 100 до 2500 шт.
- Крупные поры - от 5 до 50 шт.

Таблица 1: Гиперпараметры.

Параметр	Значение
Активация	ReLU
Нормализация	Batch
Размер ядра свёртки	3
Шаг ядра свёртки	1
Вид свёртки	same (middle)
Количество блоков сети	4
Размер тензора на входе	16x16x512
Размер тензора на выходе	16x16x512
Каналов на входе	1
Каналов на выходе	1

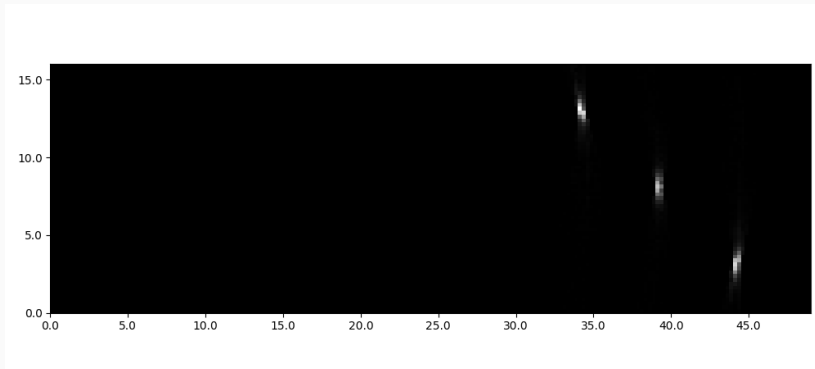


Рис. 18: Без абберратора

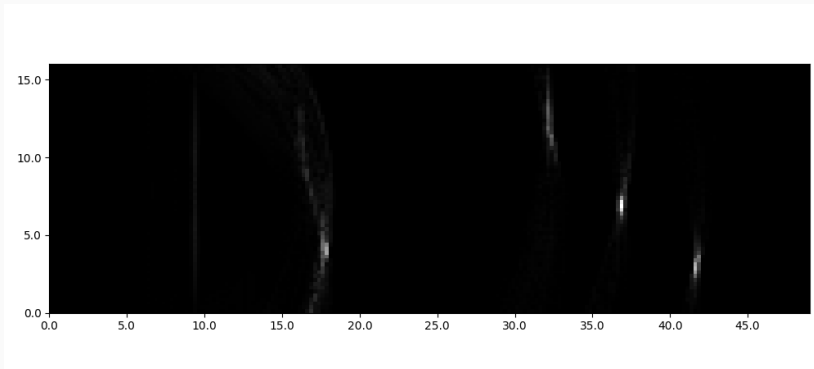


Рис. 19: С аббератором

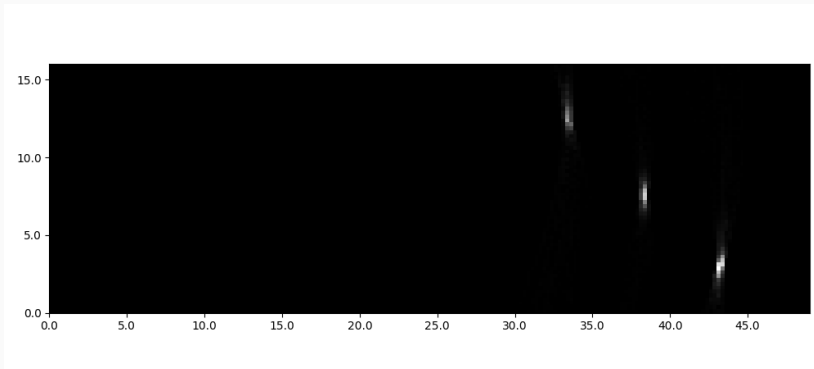


Рис. 20: С аббератором и коррекцией