

Проверка работоспособности и отладка алгоритмов работы с многоканальным сцинтилляционным детектором для профилемера горячего проката

Калашников Даниил, студент группы М24-112

Научный руководитель:

Хромов Александр Владимирович, доцент каф. №7 ИЯФиТ

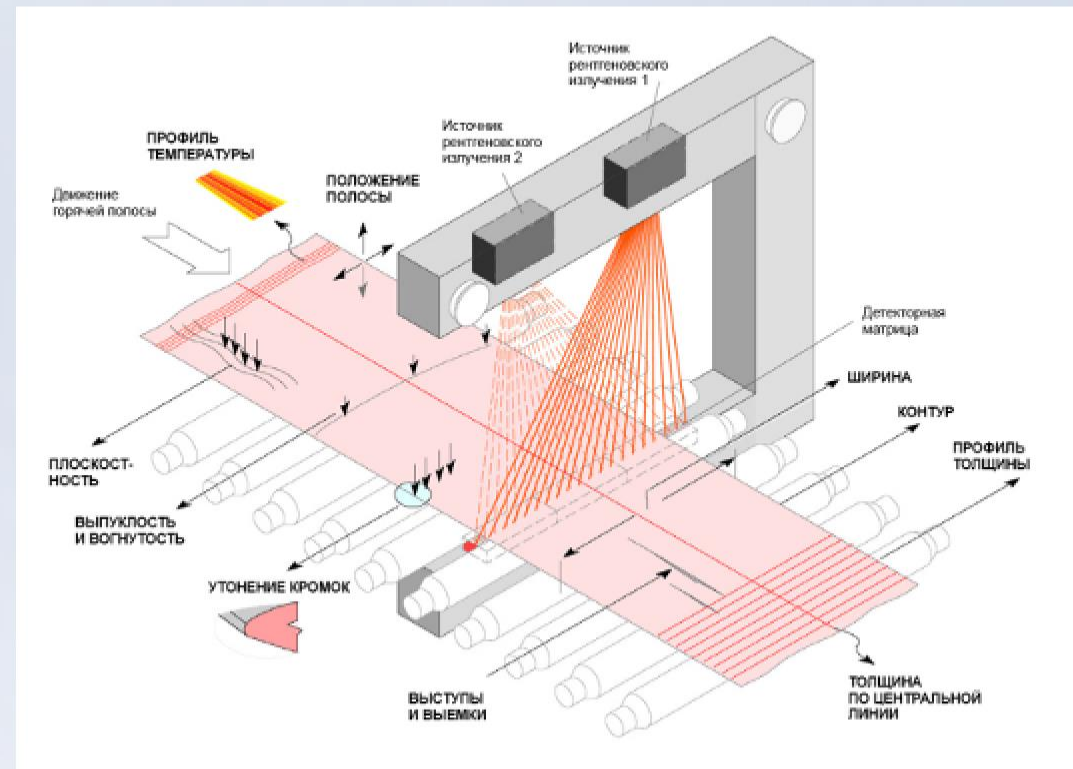
26.01.2026

Введение в предмет работы | Профилемер

Профилемер состоит из двух основных частей:

1. Два источника рентгеновского излучения, находящиеся на верхней раме
2. Линейка детекторов, находящаяся под прокатным станом

По ослаблению излучения определяется профиль толщины и другие параметры полосы проката



Введение в предмет работы | Линейка детекторов



«Линейка» — многоканальный сцинтилляционный детектор

448 каналов; оцифровка при помощи 16-канальных АЦП (16 и 20 бит)

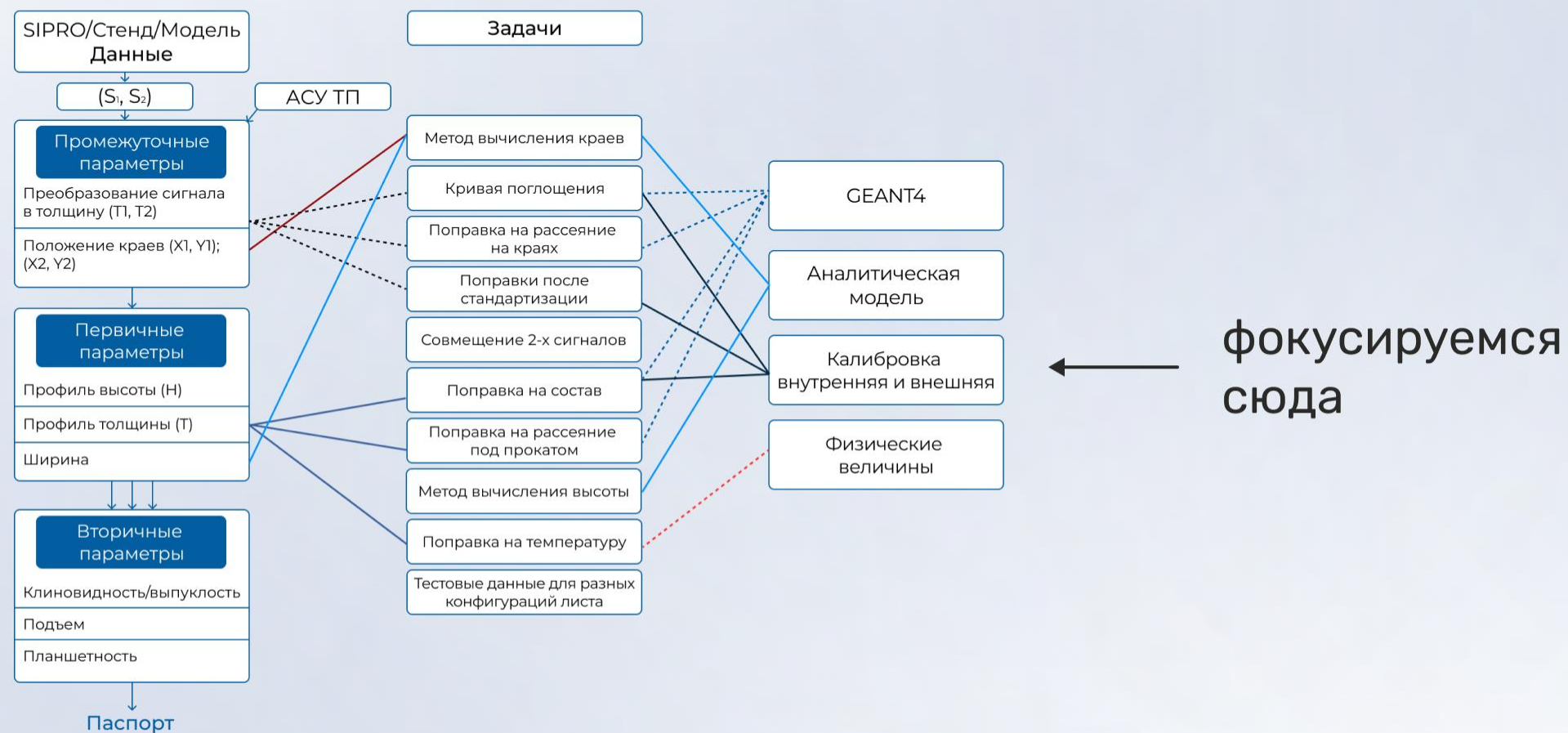
Сцинтиллятор: CdWO_4 (параллелепипеды высотой 5 мм, поперечное сечение 6 x ... мм)

Фотоприемники: фотодиоды; токовый выходной сигнал

Цель линейки — получить распределение сигнала поперек стана (полосы)

Введение в предмет работы | Алгоритм

«Алгоритм» – механизм получения из данных с линейки конечных величин для паспорта проката



Поставленные на семестр задачи

1. Проверка общей стабильности линейки путем анализа темновых шумов фотодиодов
2. Проверка стабильности рентгеновских излучателей, а также линейки в состоянии полной засветки
3. Проверка возможности процесса калибровки проездом и сравнение со статичной калибровкой

Анализ темновых шумов фотодиодов

Времена экспозиции: (5, 10, 20, 50, 200, 1000) мс

Усиления: 8 различных значений

Разрядности АЦП: 16 и 20 бит

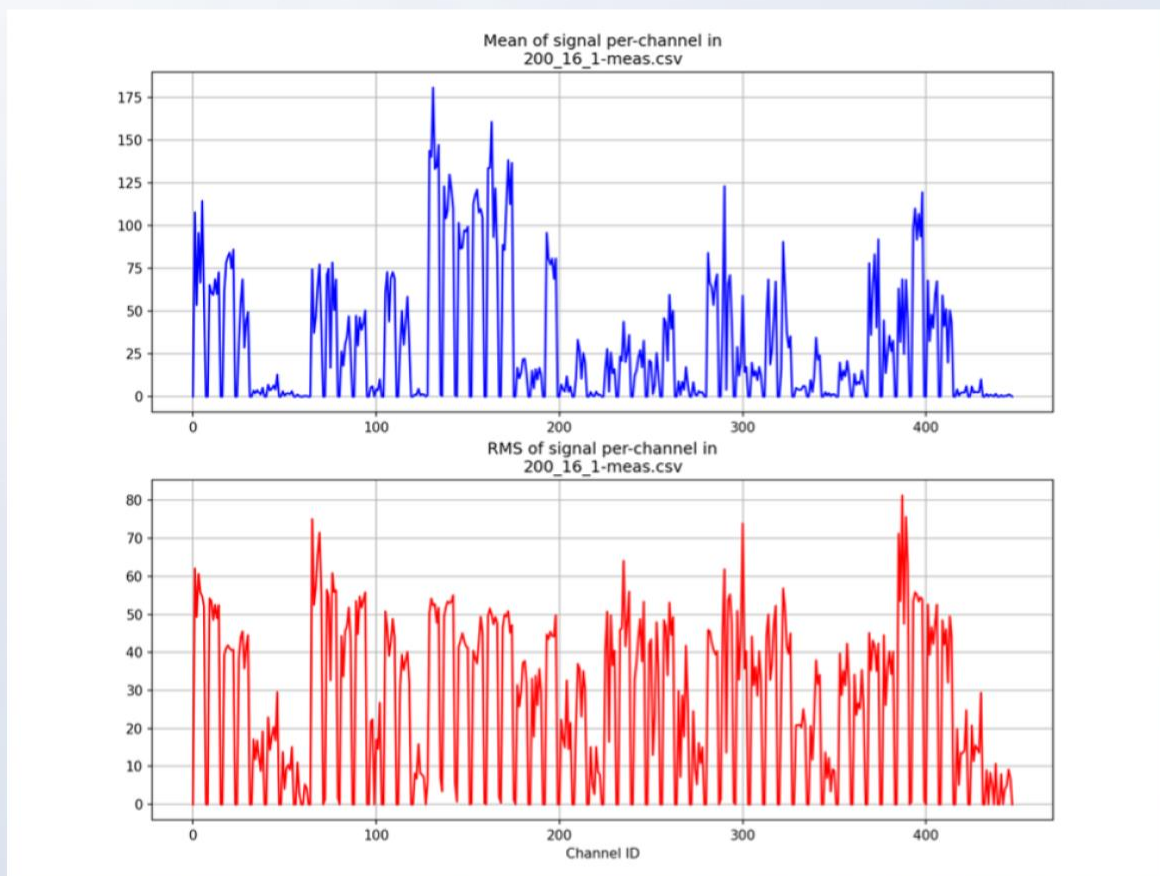
Температуры: (6, 10, 15, 20) °C

= 384 эксперимента

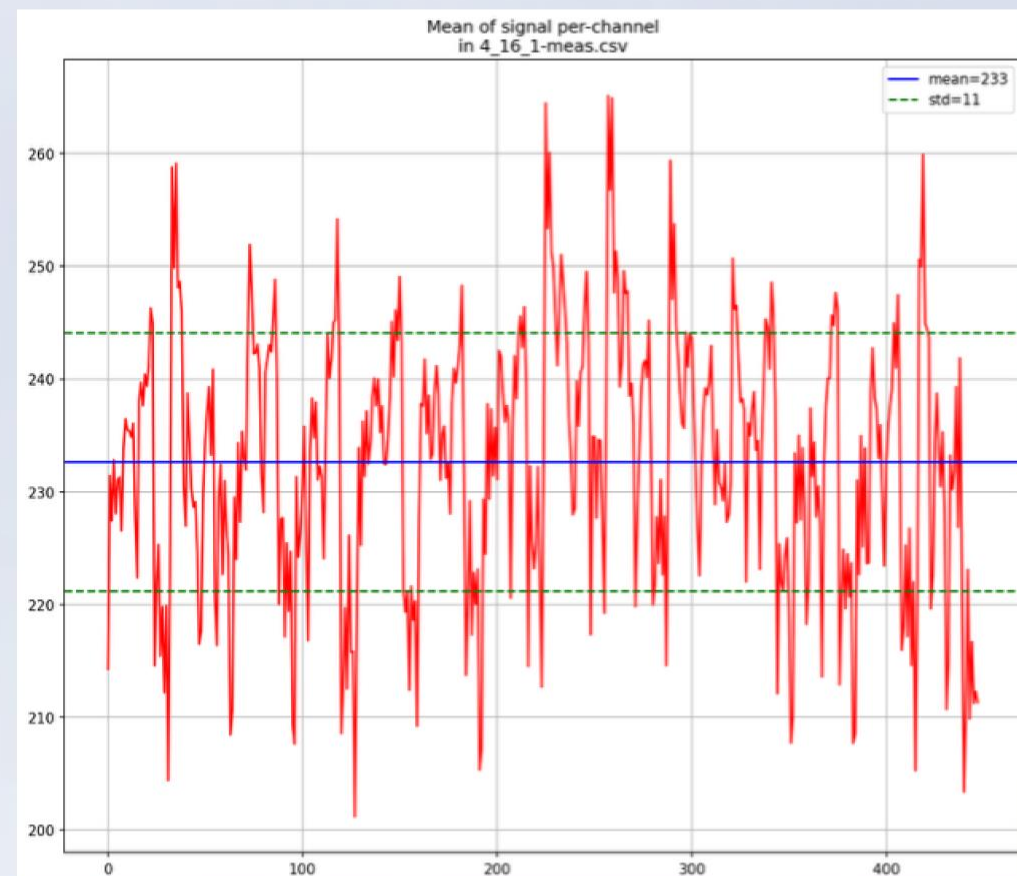
Процесс анализа данных проводился следующими методами:

- Визуальный анализ профиля среднего и RMS
- Автокорреляционный анализ сигналов (как по каналам, так и по времени)
- Анализ Фурье-спектров сигналов
- Анализ зависимости поведения сигналов от различных параметров эксперимента (установленная чувствительность линейки, время экспозиции, температура)

Анализ темновых шумов фотодиодов

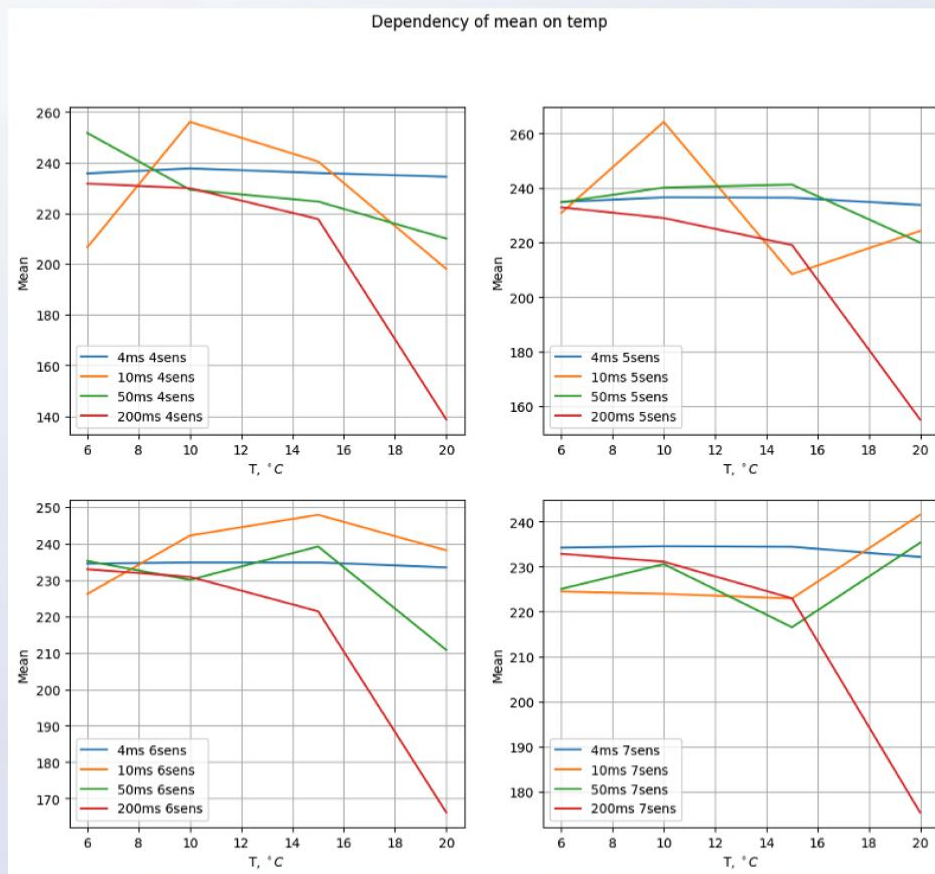


Пример эксперимента с
“плохими” параметрами

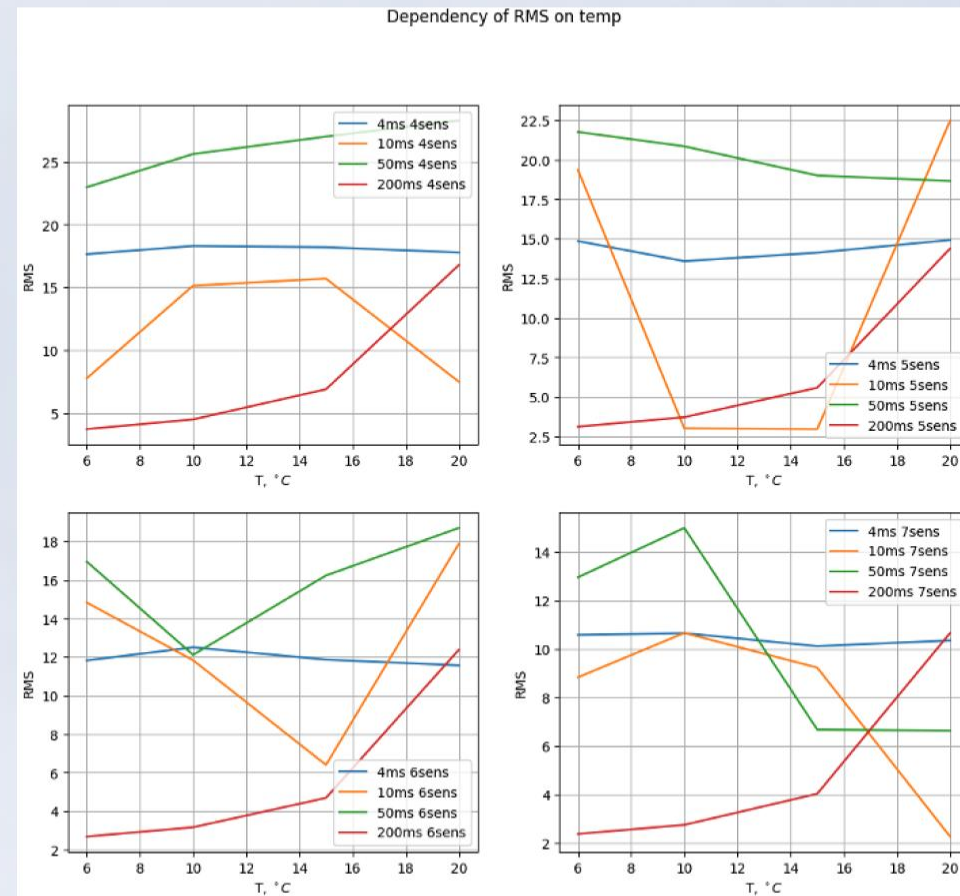


Пример эксперимента с
“хорошими” параметрами

Анализ темновых шумов фотодиодов



Зависимость среднего
темнового тока от температуры



Зависимость RMS темнового
тока от температуры

Анализ темновых шумов фотодиодов

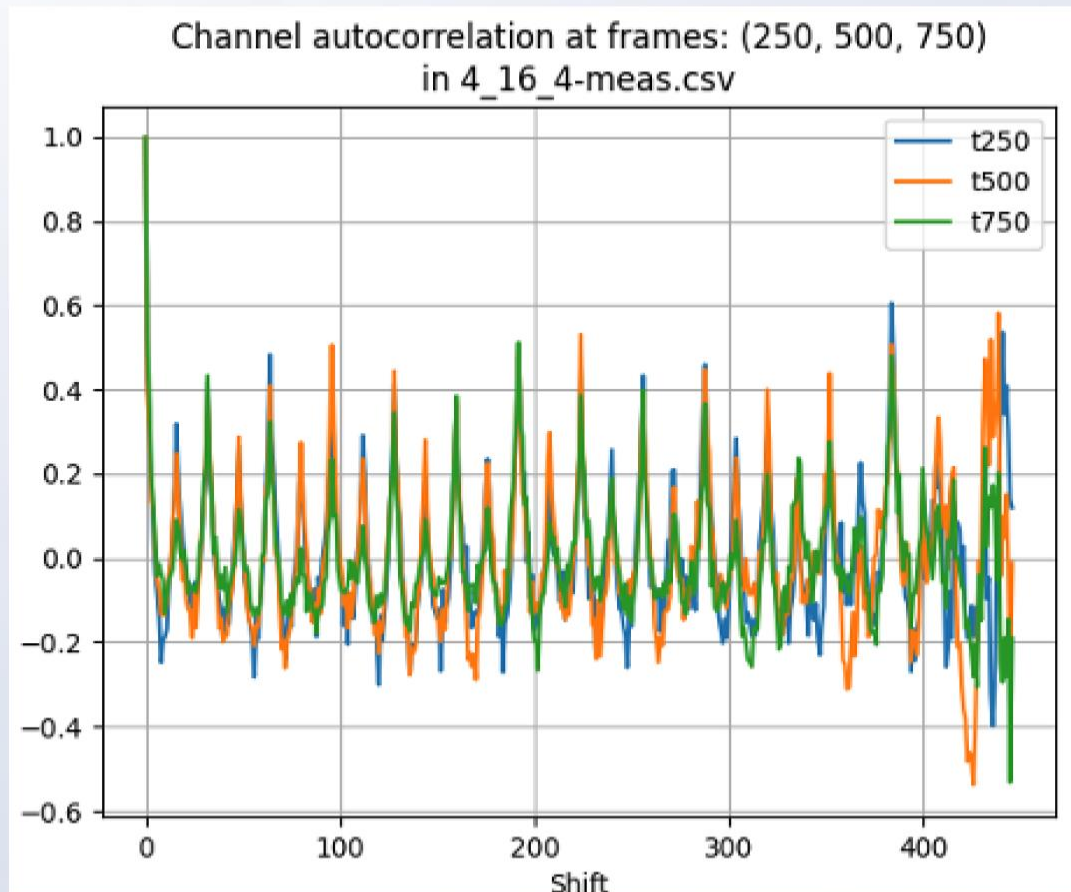
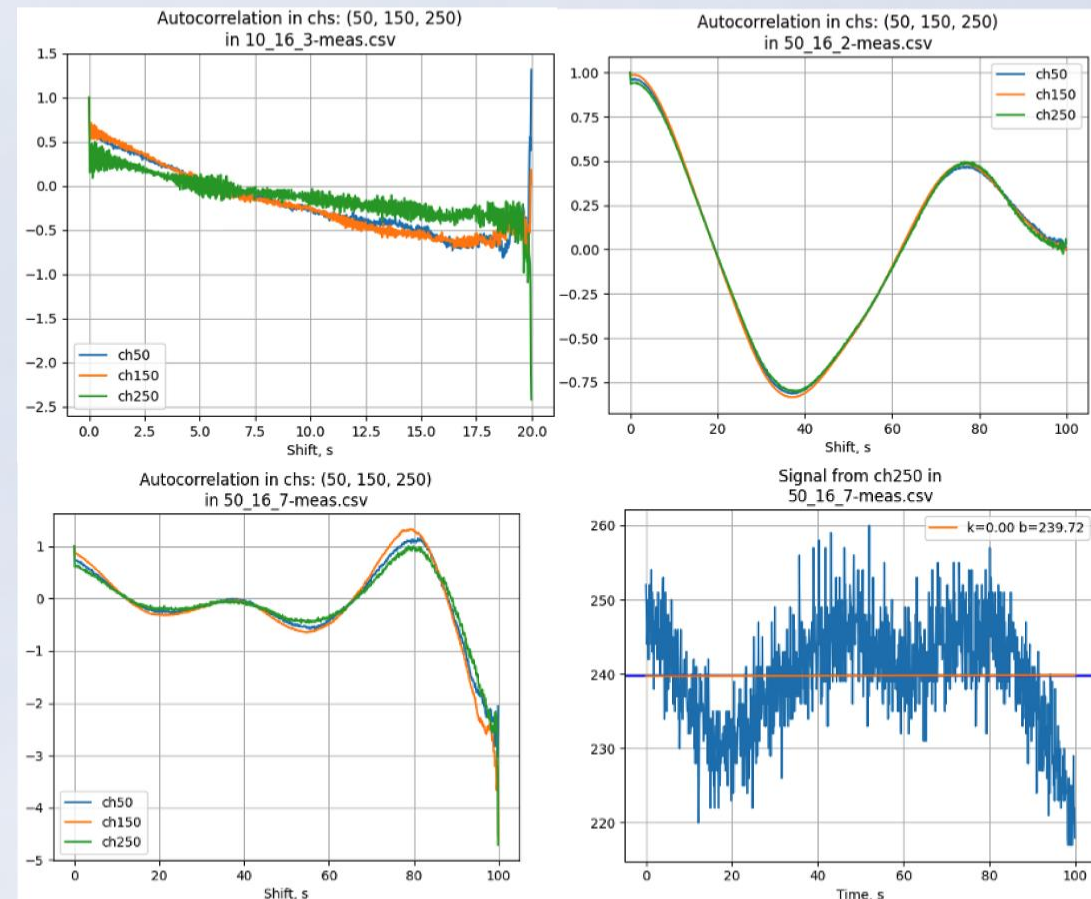
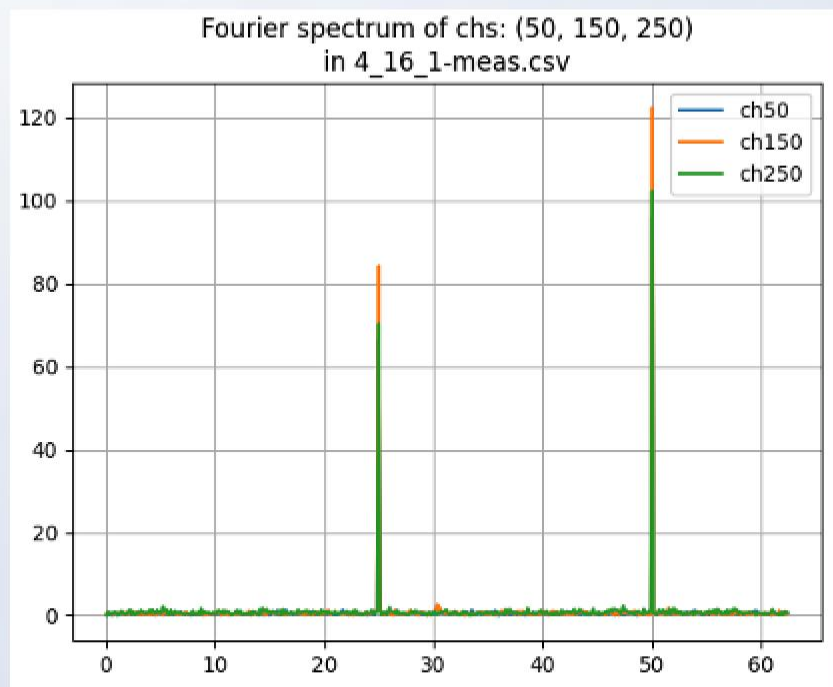


График автокорреляционной функции по номеру канала

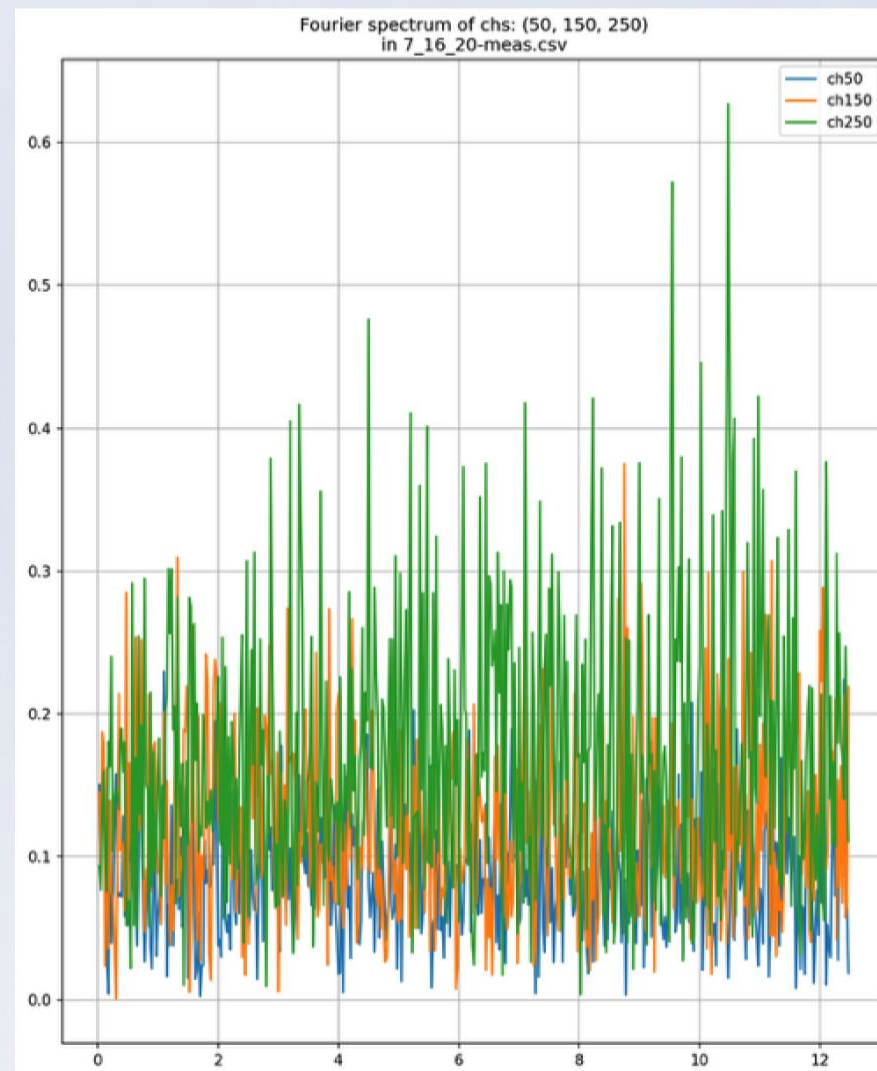


Графики автокорреляционных функций по моменту времени

Анализ темновых шумов фотодиодов

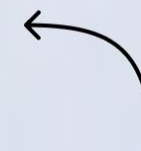
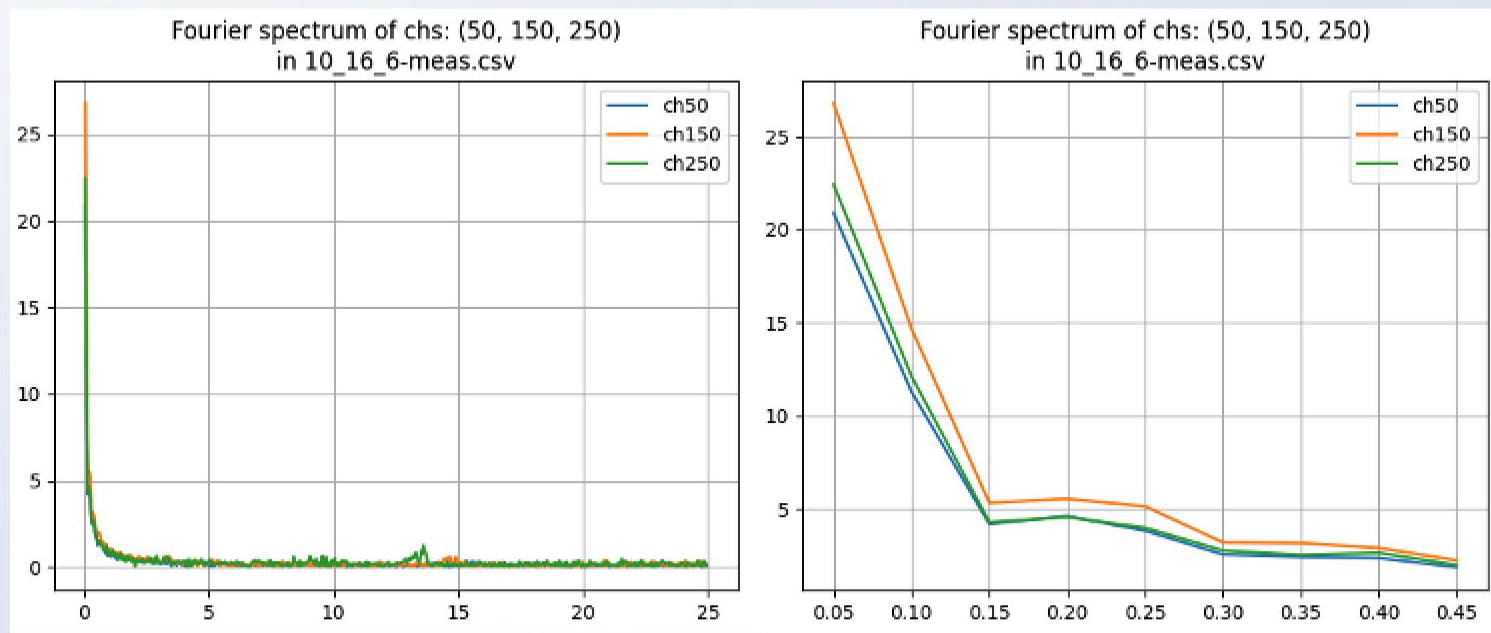


Спектры Фурье по времени
для различных комбинаций
параметров



←
идеальная
ситуация —
чистый шум

Анализ темновых шумов фотодиодов



колебания
сверхмалых частот
(меньше, чем
разрешение FFT)

потенциально
линейный тренд

Спектры Фурье по времени
для различных комбинаций параметров

Анализ темновых шумов фотодиодов

Выводы из анализа темновых шумов:

- Было обнаружено, что использование в режиме высокой чувствительности и одновременно при высокой температуре приводит к сильной нестабильности фотодетекторов (предположительно, начинает “плыть” нулевая линия сигналов)
- Обнаружены колебания 25 и 50 Гц, предположительно связанные с колебаниями в сети
- Были обнаружены колебания свойств по номеру канала – периоды соответствуют группам каналов в АЦП
- Подобран наиболее стабильный режим работы (диапазон чувствительностей и времен экспозиции)

Анализ сигналов полной засветки

Анализ сигналов с линейки при включенном рентгеновском излучателе включал в себя следующие этапы:

- Анализ сигналов и характерных трендов (аналогично темновым шумам)
- Анализ зависимости сигнала от параметров излучателя (тока и напряжения)



Анализ сигналов полной засветки

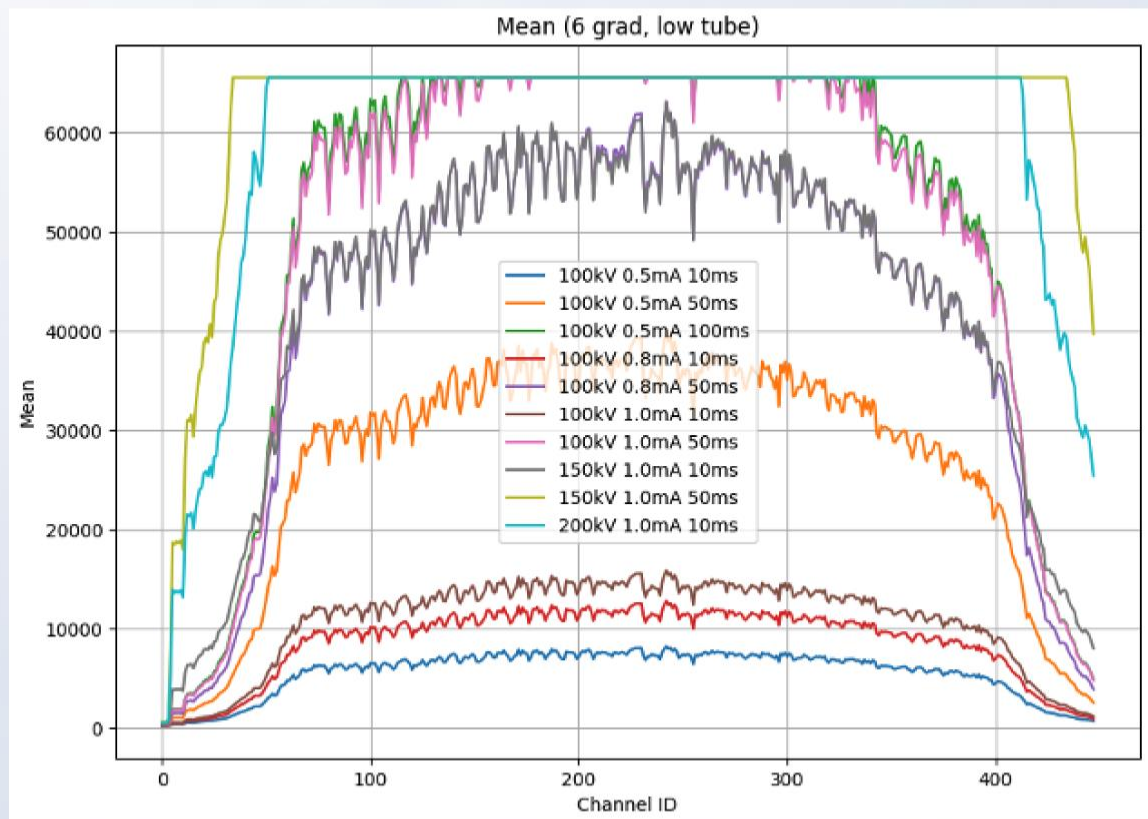


График профиля среднего
(от номера канала) без образцов

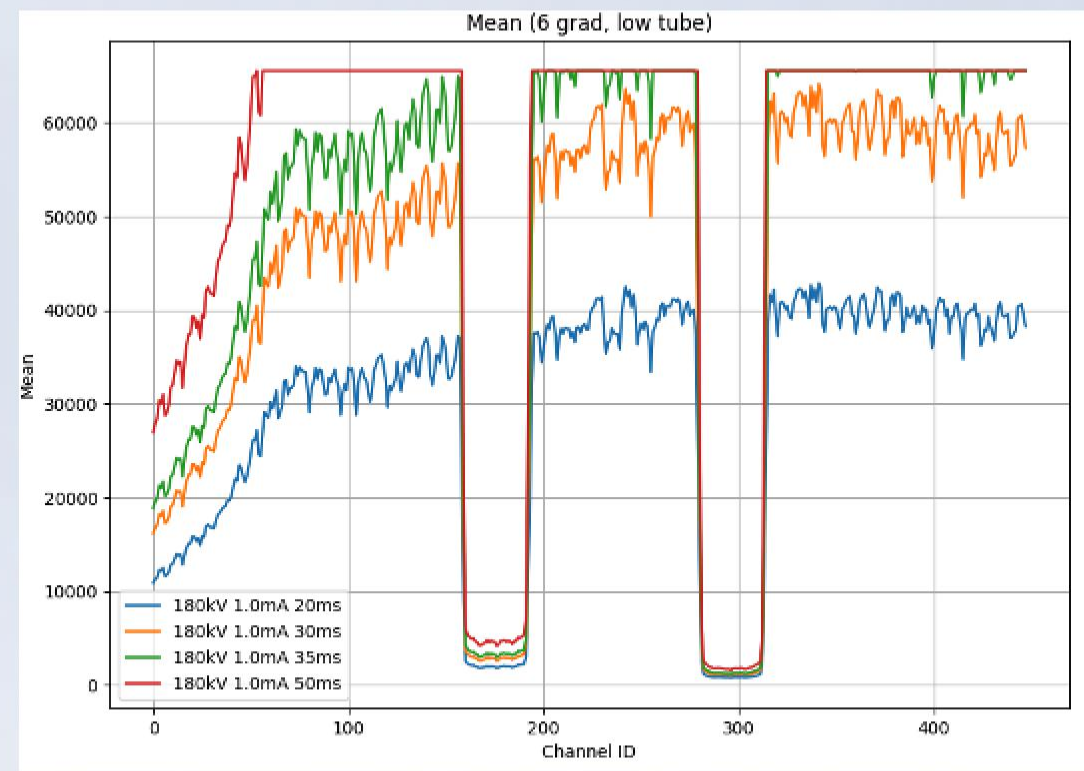
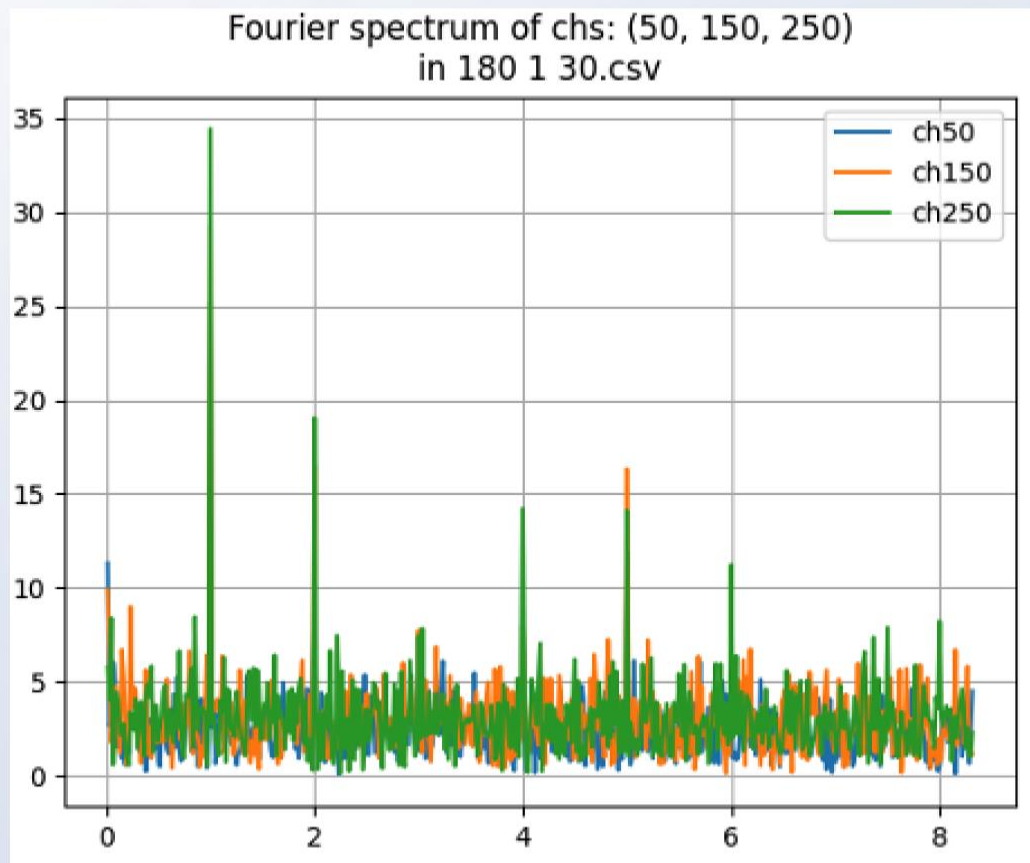


График профиля среднего
(от номера канала) с образцами

Анализ сигналов полной засветки



Фурье-спектр по времени
для различных каналов

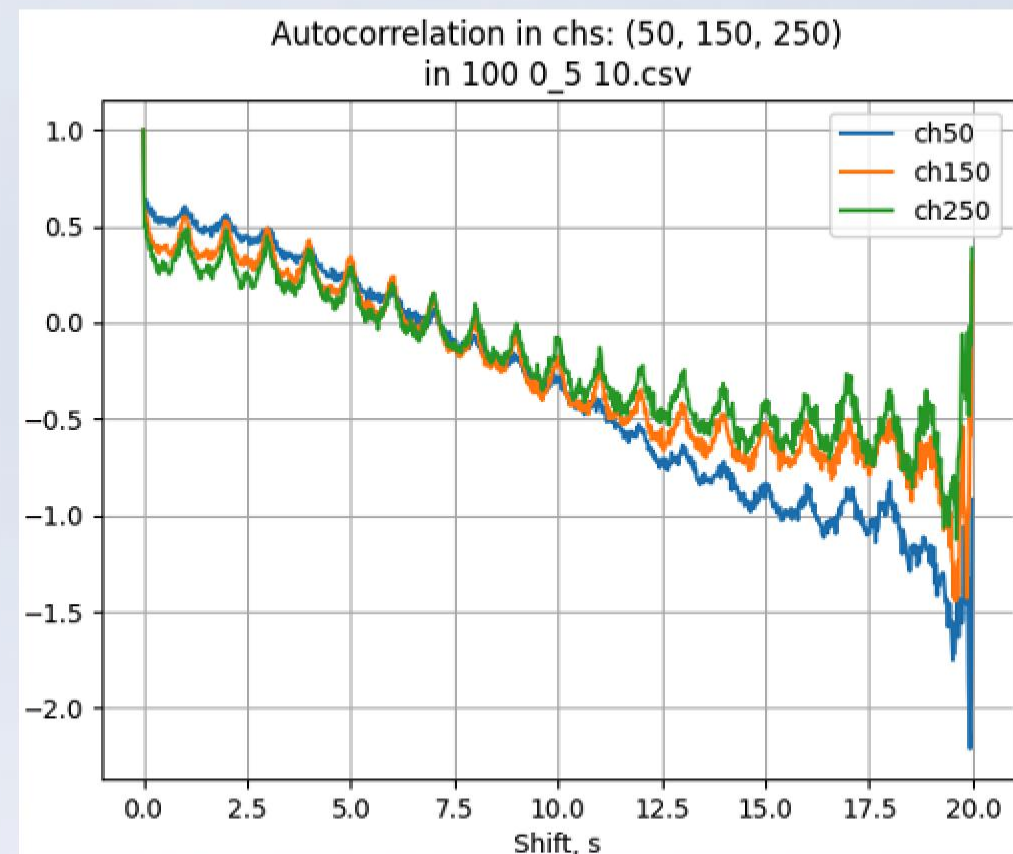


График автокорреляционной
функции для различных каналов

Анализ сигналов полной засветки

Выводы из анализа сигналов полной засветки:

- Рентгеновский излучатель СБК имеет собственные колебательные моды в целочисленных частотах 1-7 Гц. Амплитуда этих колебаний соизмерима со стандартным отклонением в каналах. В связи с этим было принято решение заменить его на излучатель СОМЕТ.
- Определен оптимальный режим работы излучателя и линейки (чтобы максимальные значения сигналов находились в верхнем диапазоне АЦП линейки, но не превышали максимум)
- Показано, что принципиально на текущем стенде возможно восстановить толщину вещества между излучателем и линейкой

Анализ процесса внешней калибровки «проездом»

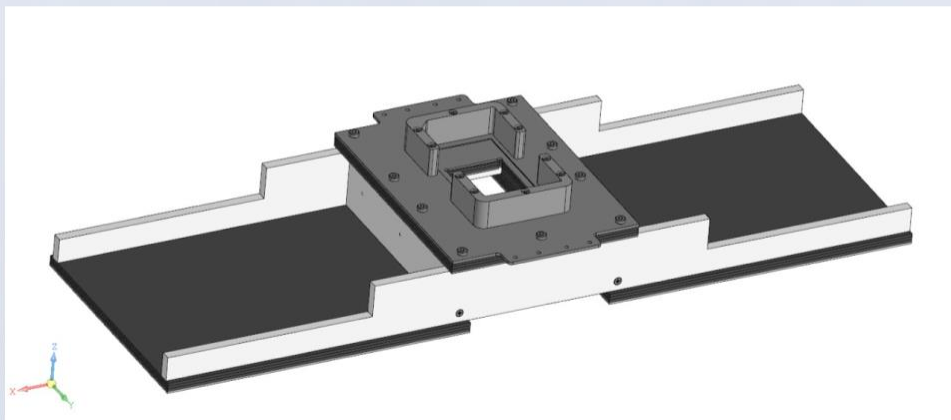
Для работы алгоритма восстановления толщины проката требуется три типа измеренных сигналов: *ZERO*, *INF* и *REF*

INF — минимальный сигнал (то есть темновой ток)

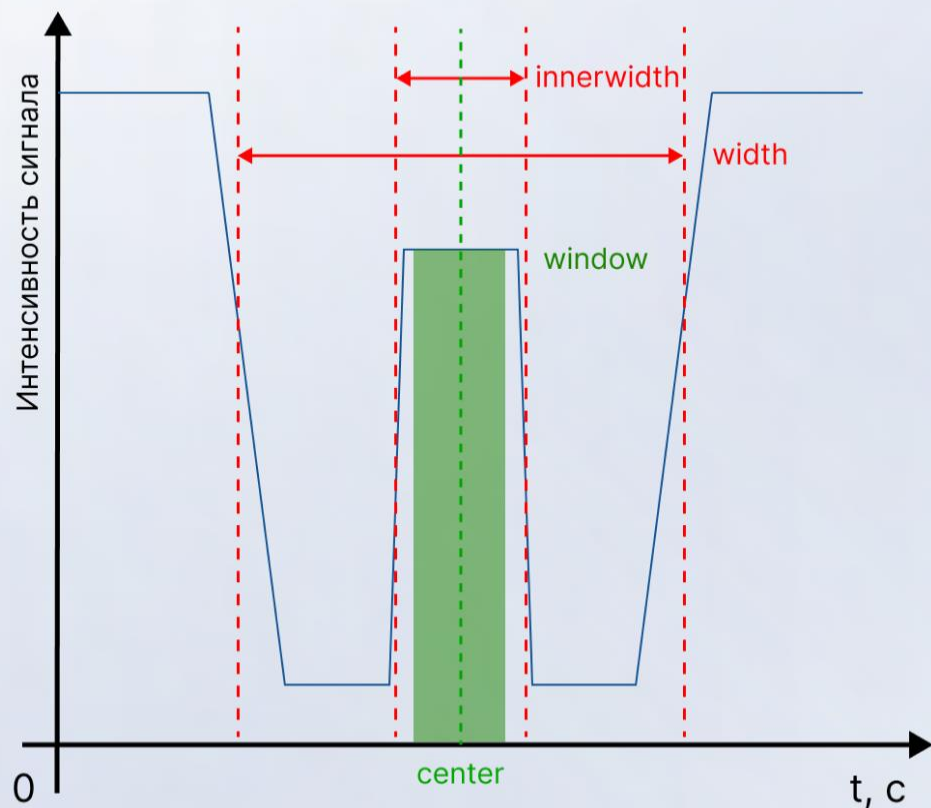
ZERO — максимальный сигнал (то есть полной засветки)

REF — референсный сигнал при определенной толщине вещества

Внешняя калибровка необходима для получения набора *REF* сигналов



Анализ процесса внешней калибровки «проездом»



Модельный отклик детектора
при проезде

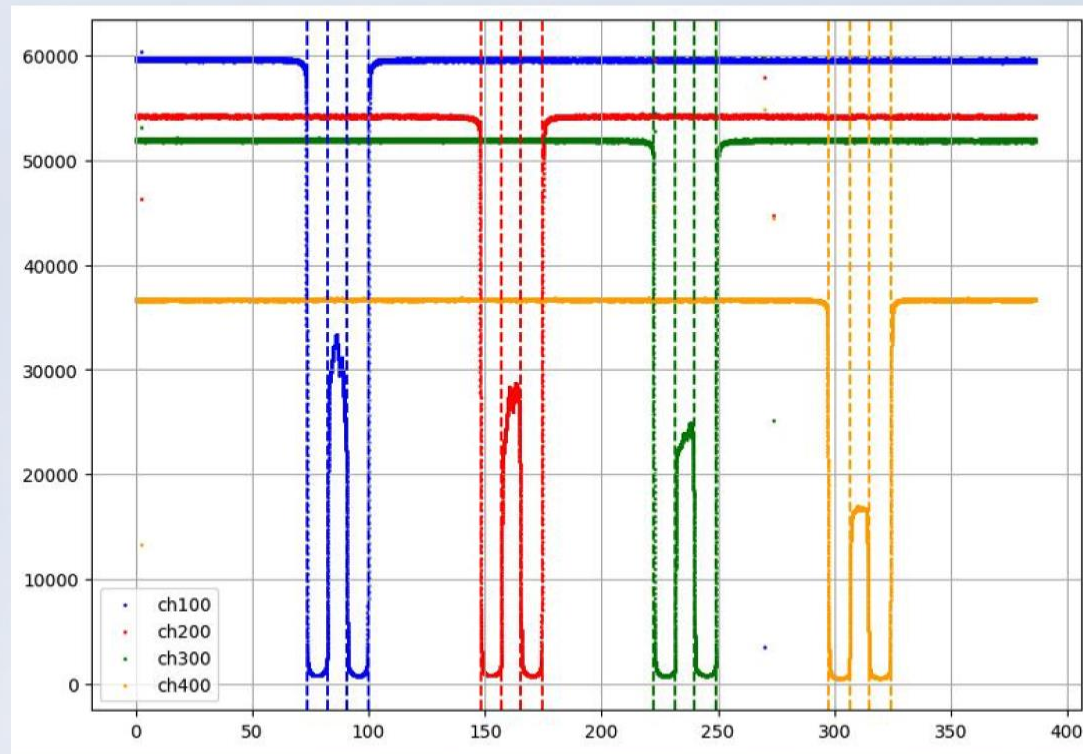


График временных разверток
сигналов при проезде

Анализ процесса внешней калибровки «проездом»

Шаг 1. Выделение окна



Шаг 2. Подсчет медианы в окне



Шаг 3. Подсчет отклонений от медианы



Шаг 4. Подсчет MAD



Шаг 5. Построение доверительного интервала

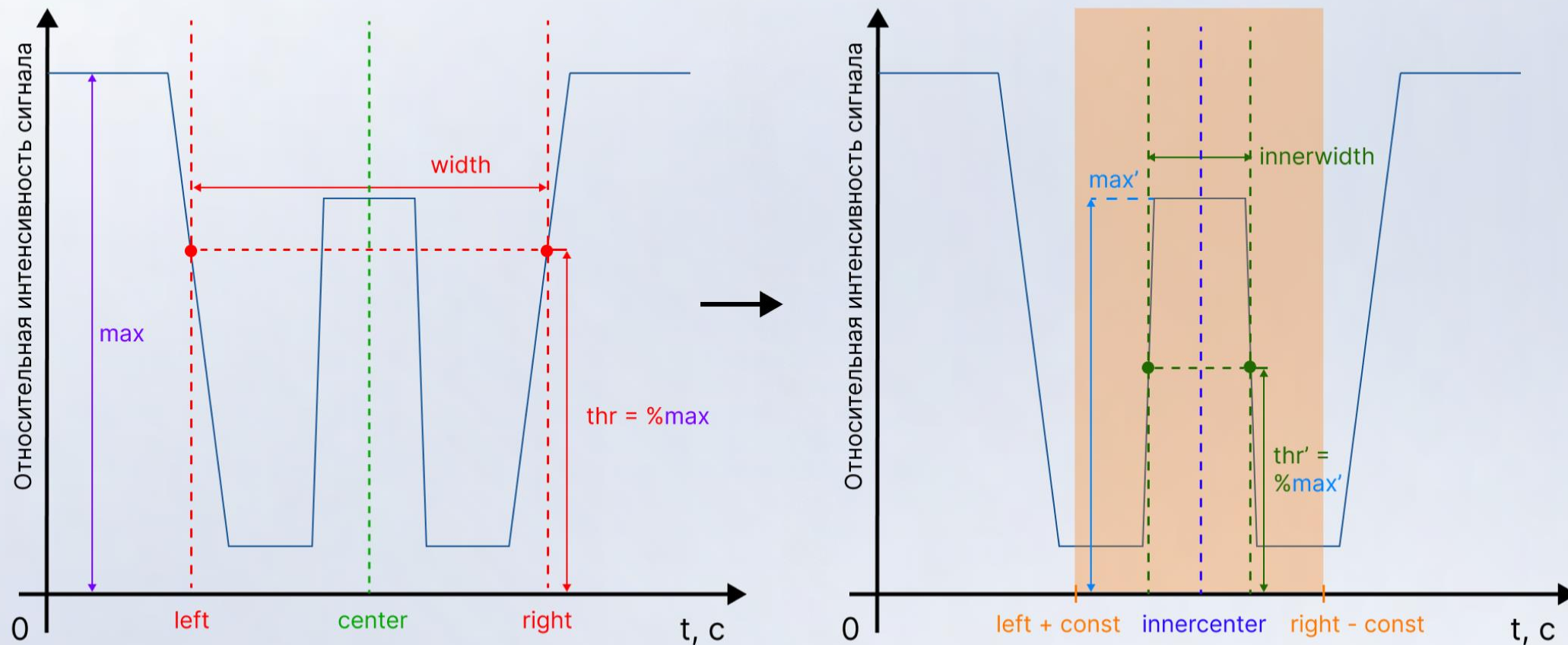


Шаг 6. Устранение выбросов



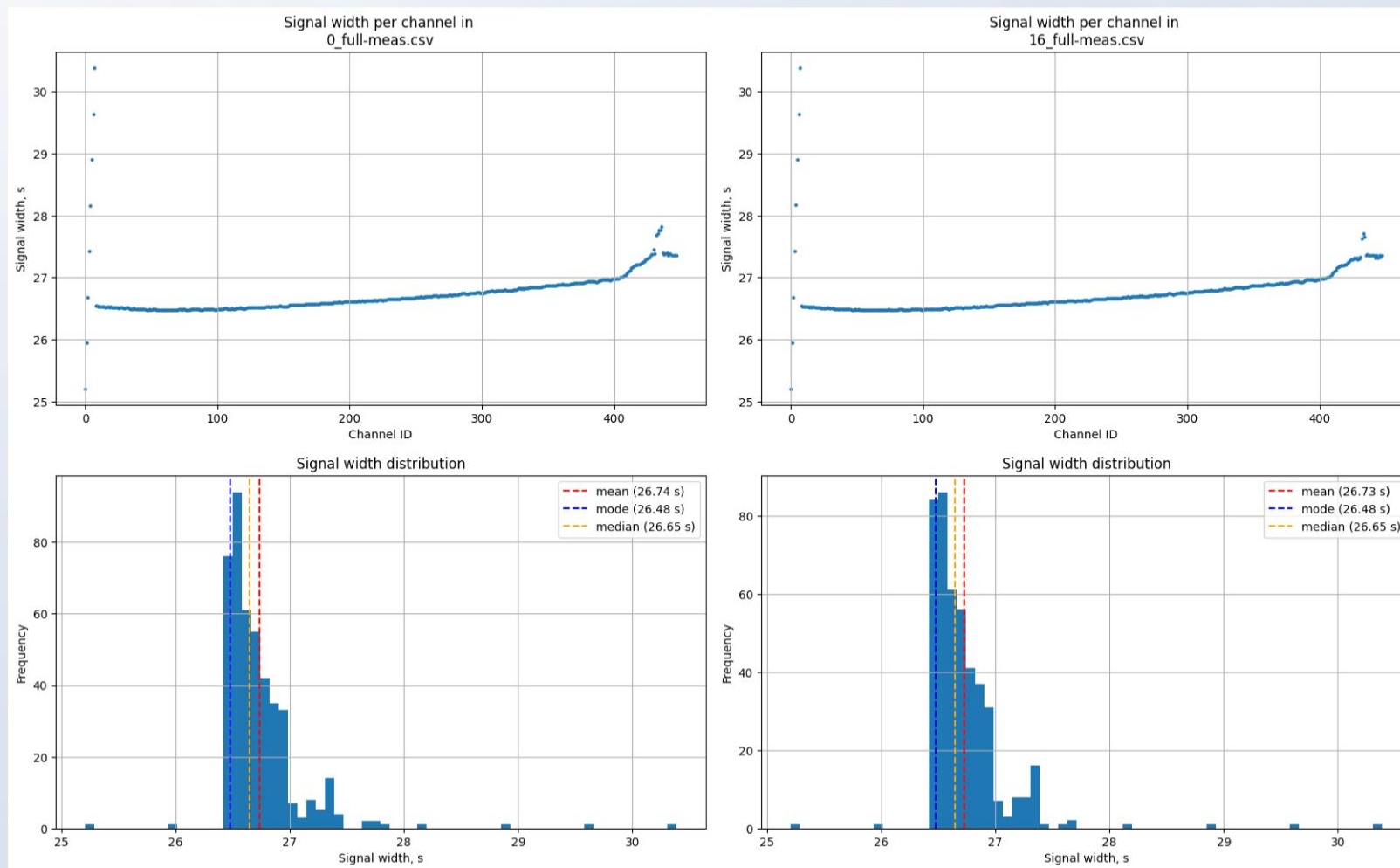
Алгоритм очистки данных от выбросов

Анализ процесса внешней калибровки «проездом»



Алгоритм поиска краев и центра
на сигнале

Анализ процесса внешней калибровки «проездом»



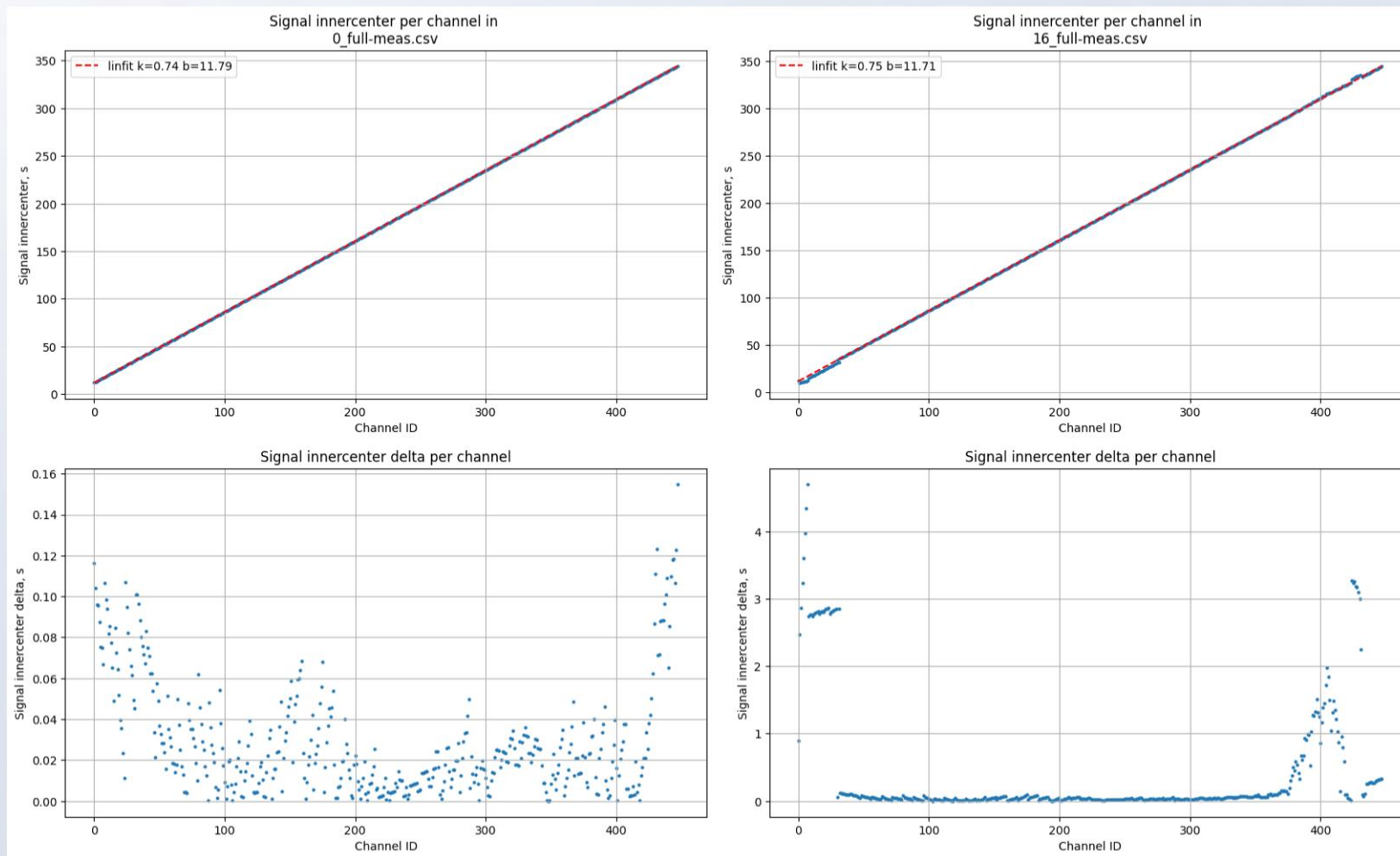
Графики зависимости
ширины окна сигнала
от номера канала

=

Время нахождения
тележки над каналом

$$t \approx (26.65 \pm 0.04)c$$

Анализ процесса внешней калибровки «проездом»



Графики зависимости
центра окна сигнала
от номера канала

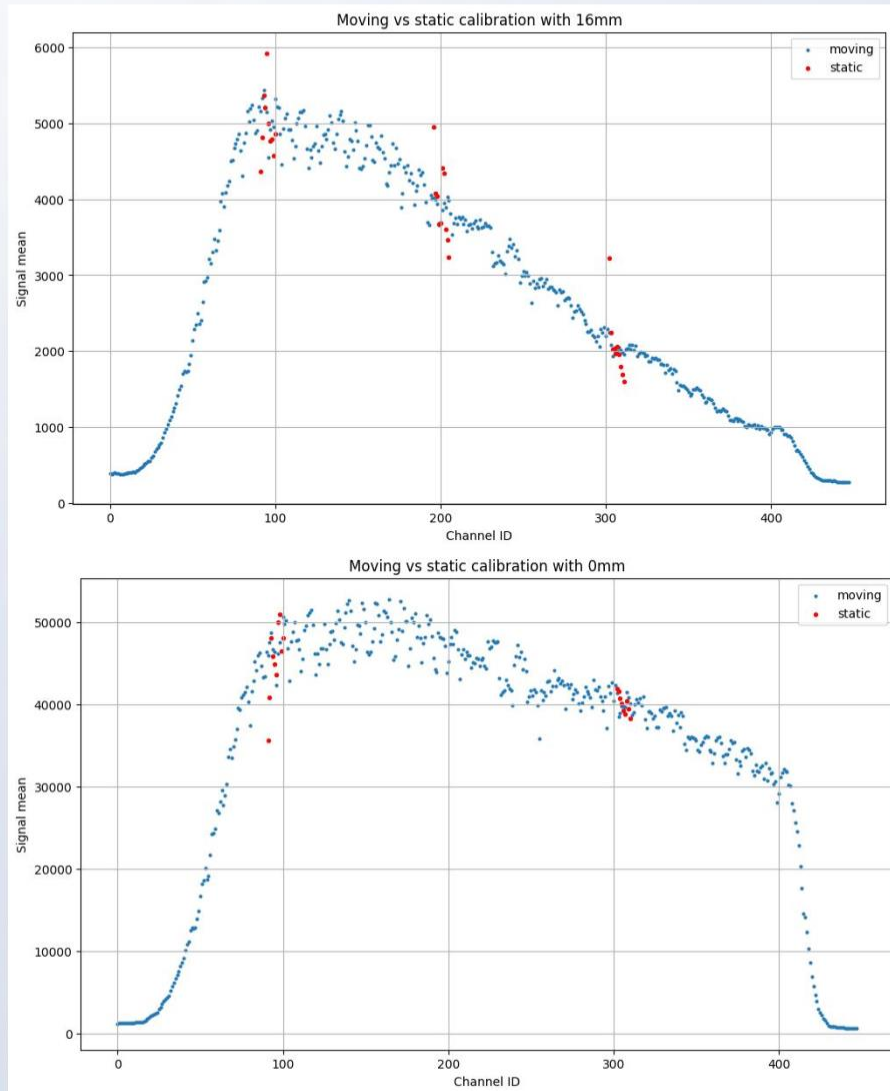
=

Момент времени
нахождения центра окна
тележки над каналом

$$t = kN + b$$

$$k \approx 0.745c \quad b \approx 11.927c$$

Анализ процесса внешней калибровки «проездом»



Сравнение результатов интегрирования (подсчета среднего = EXT) в найденных окнах для двух способов калибровки:

1. Проездом (синим)
2. Статичные измерения (красным)

Анализ процесса внешней калибровки «проездом»

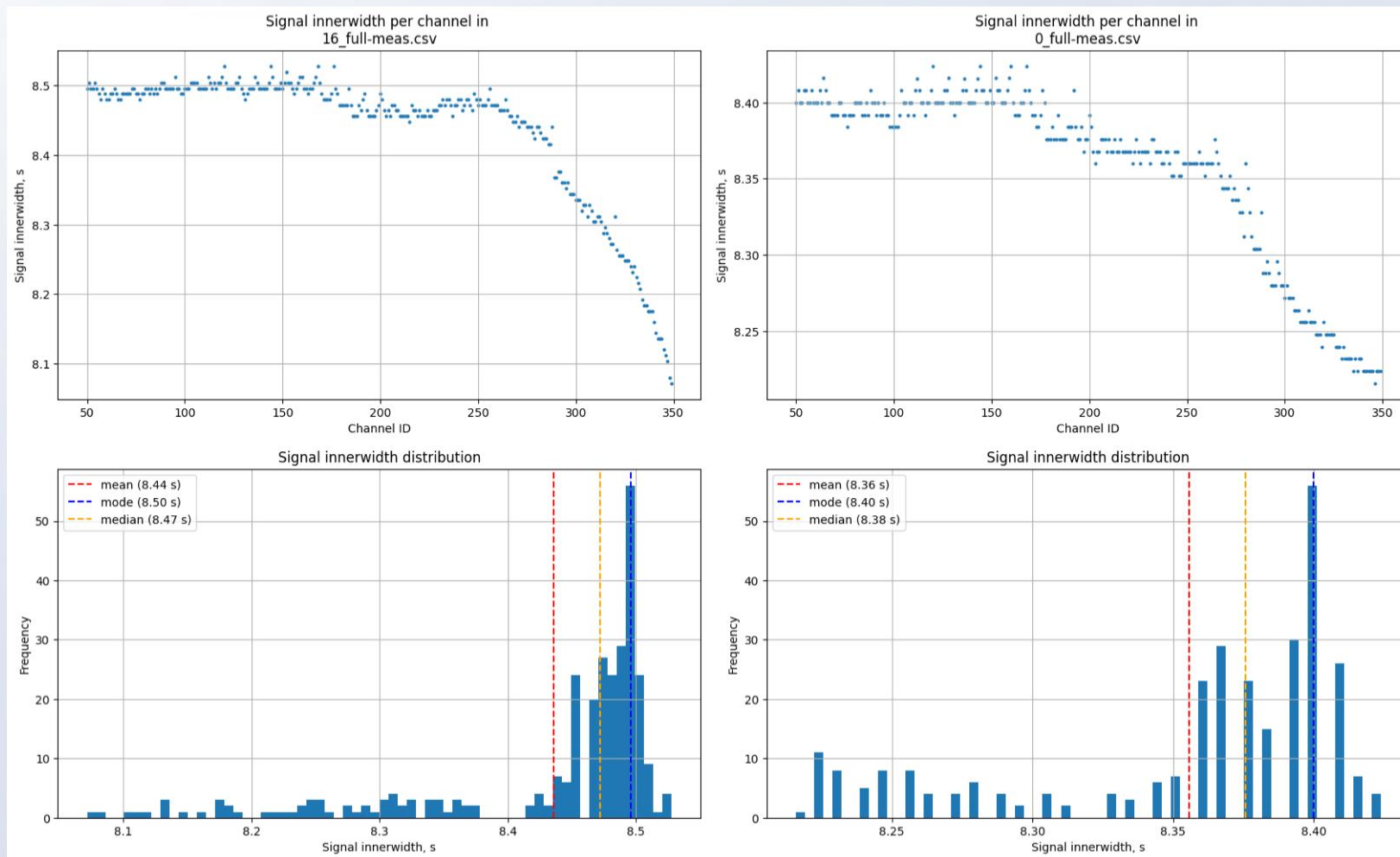
Выводы из анализа калибровки «проездом»:

- Калибровка «проездом» возможна. При этом ее надежность сильно зависит от толщины эталона в тележке: чем больше толщина, тем хуже становится точность определения окна интегрирования, а форма сигнала все больше искривляется
- Профили сигналов сходятся со «статичными» измерениями. Результаты интегрирования в среднем тоже
- Оба метода определения центра на первый взгляд дают похожие результаты. По внешнему окну это получается более надежно (влияние ослабления излучения на дальних краях гораздо меньше), а по внутреннему окну – более точно (захватывается меньше лишних точек)

Выводы по итогам работы

1. Линейка является в целом работоспособной, однако на разных режимах иногда обнаруживаются значительные выбросы в данных. Для работы основного алгоритма они не так существенны, но для корректного проведения калибровки исправление этой ошибки критично
2. Для повышения точности работы прибора рекомендуется вычитать ряд колебательных мод: 25 Гц, 50 Гц
3. Разработанные алгоритмы калибровки проездом работоспособны. Дальнейшие проверки требуют завершения этапа работ над стендом и финализации размещения источников излучения

Анализ процесса внешней калибровки «проездом»



Графики зависимости
ширины внутреннего
окна сигнала
от номера канала

=

Время нахождения окна
тележки над каналом

$$t_{window} \approx (8.43 \pm 0.05)c$$

Анализ процесса внешней калибровки «проездом»

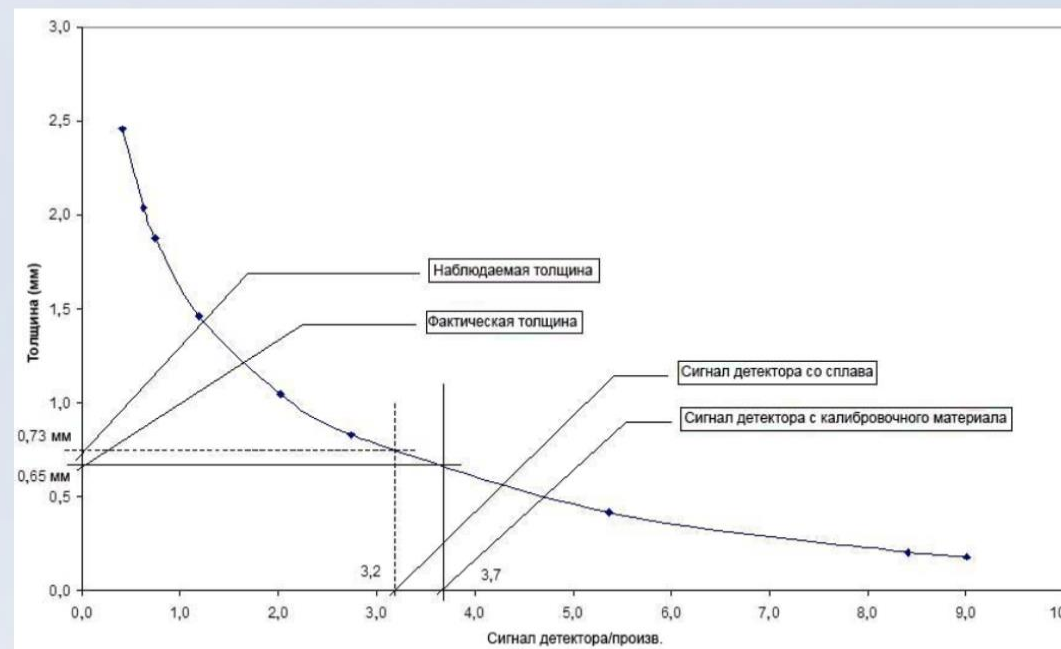
Внешняя калибровка требуется для получения референсного сигнала EXT



построения кривой поглощения для получения толщины материала по экспериментально получаемому значению трансмиссии

$$\tau = \frac{S_{ext} - S_{inf}}{S_{zero} - S_{inf}}$$

$$\ln \tau \propto a \cdot L^b$$



Пример калибровочной кривой
из документации профилемера
ThermoFisher Scientific