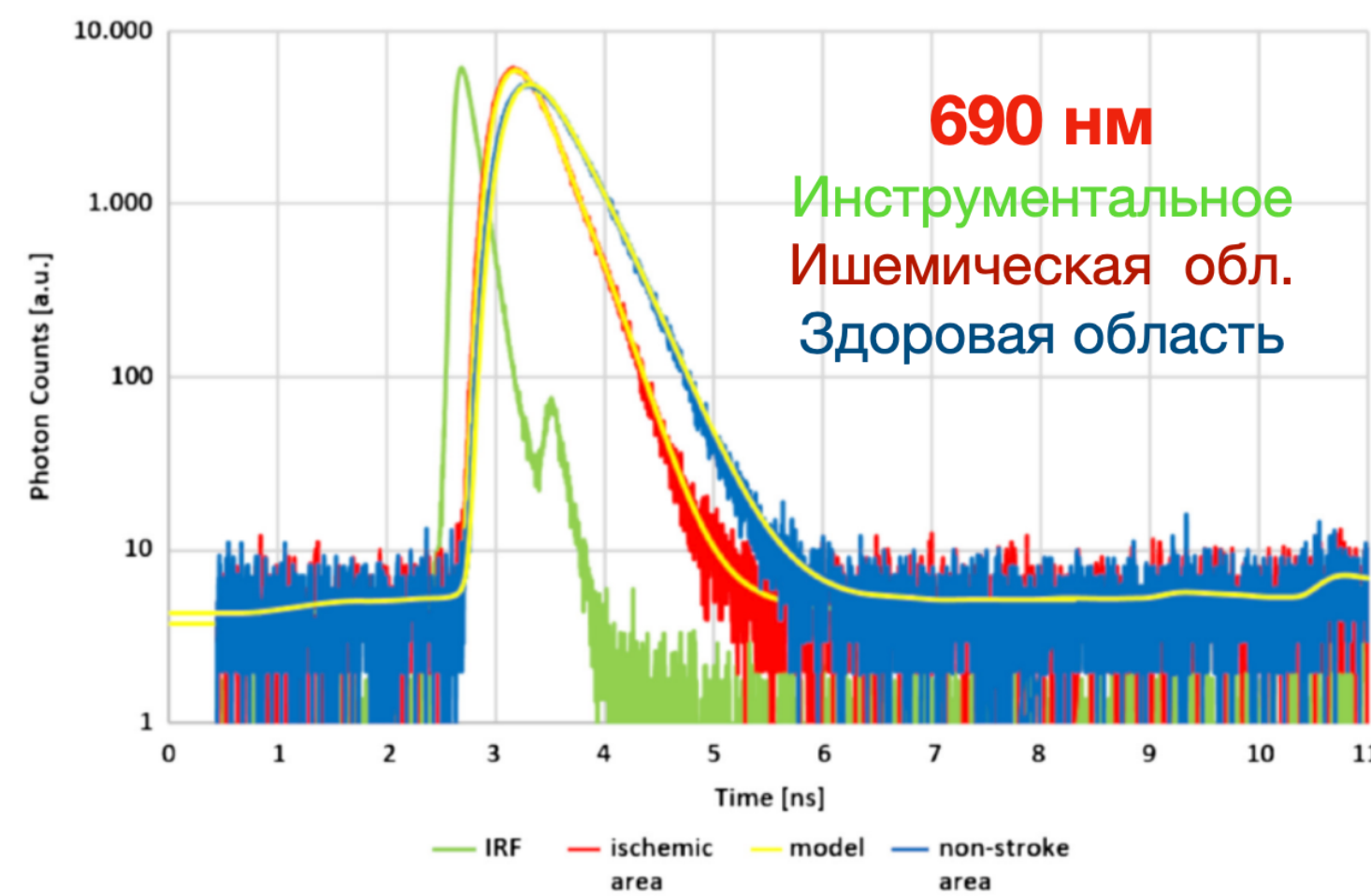
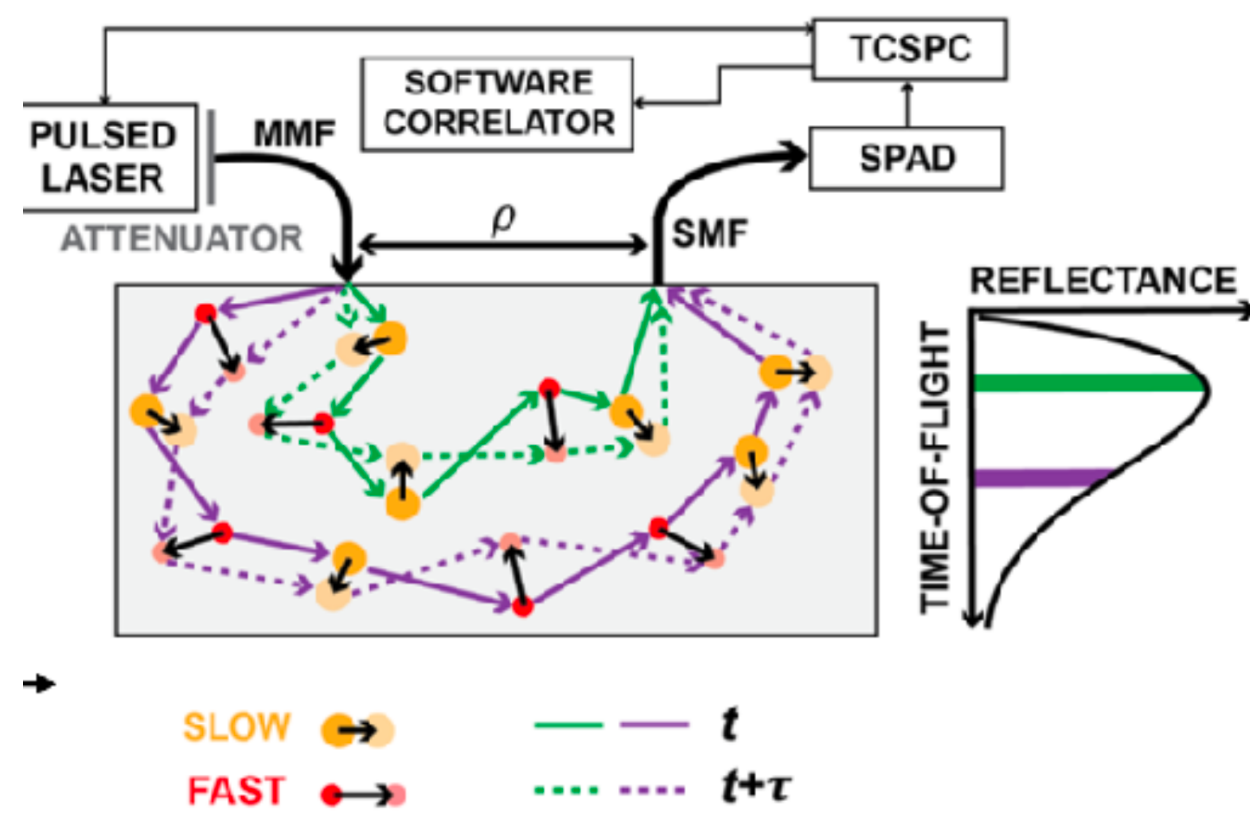
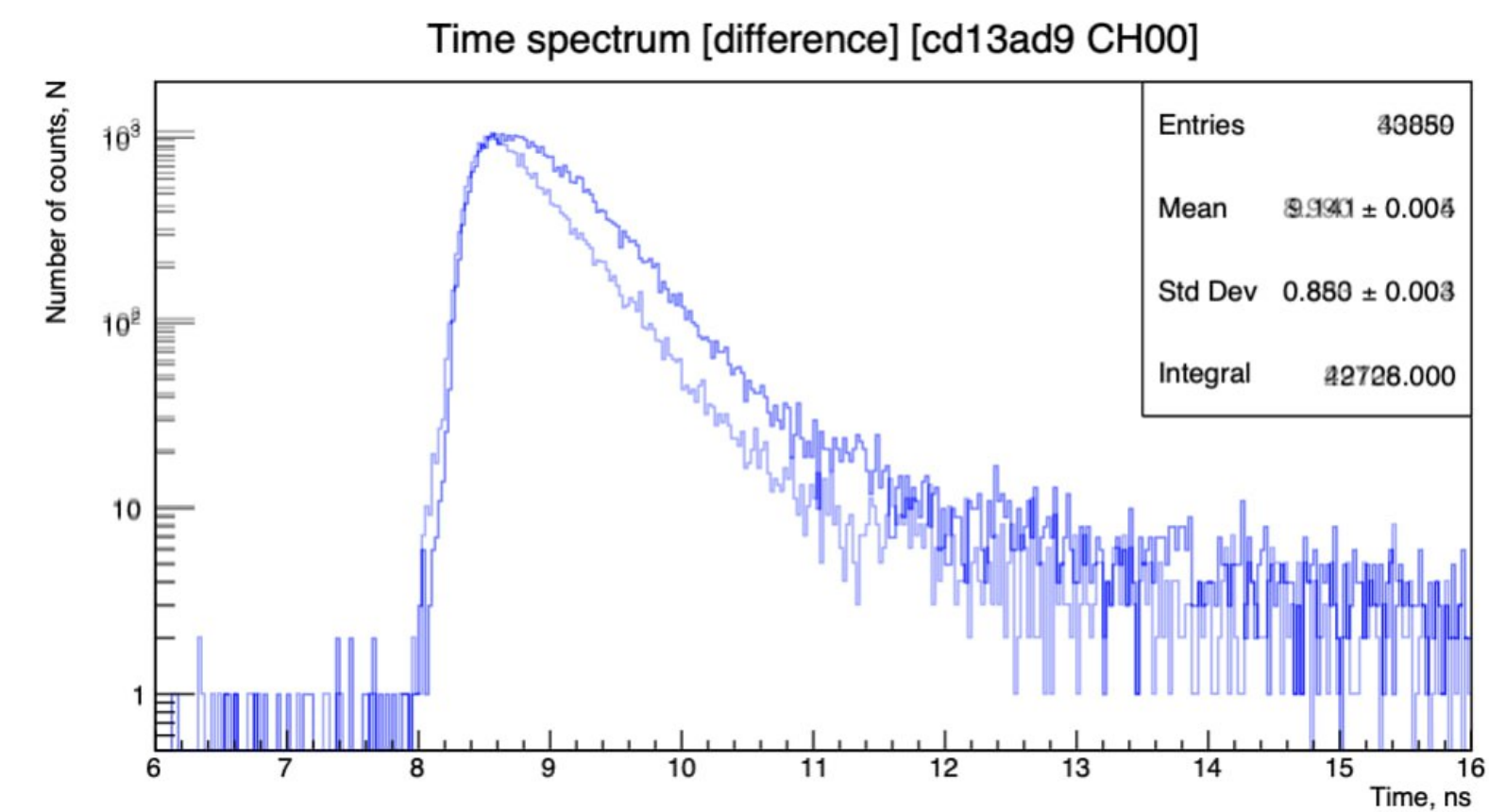
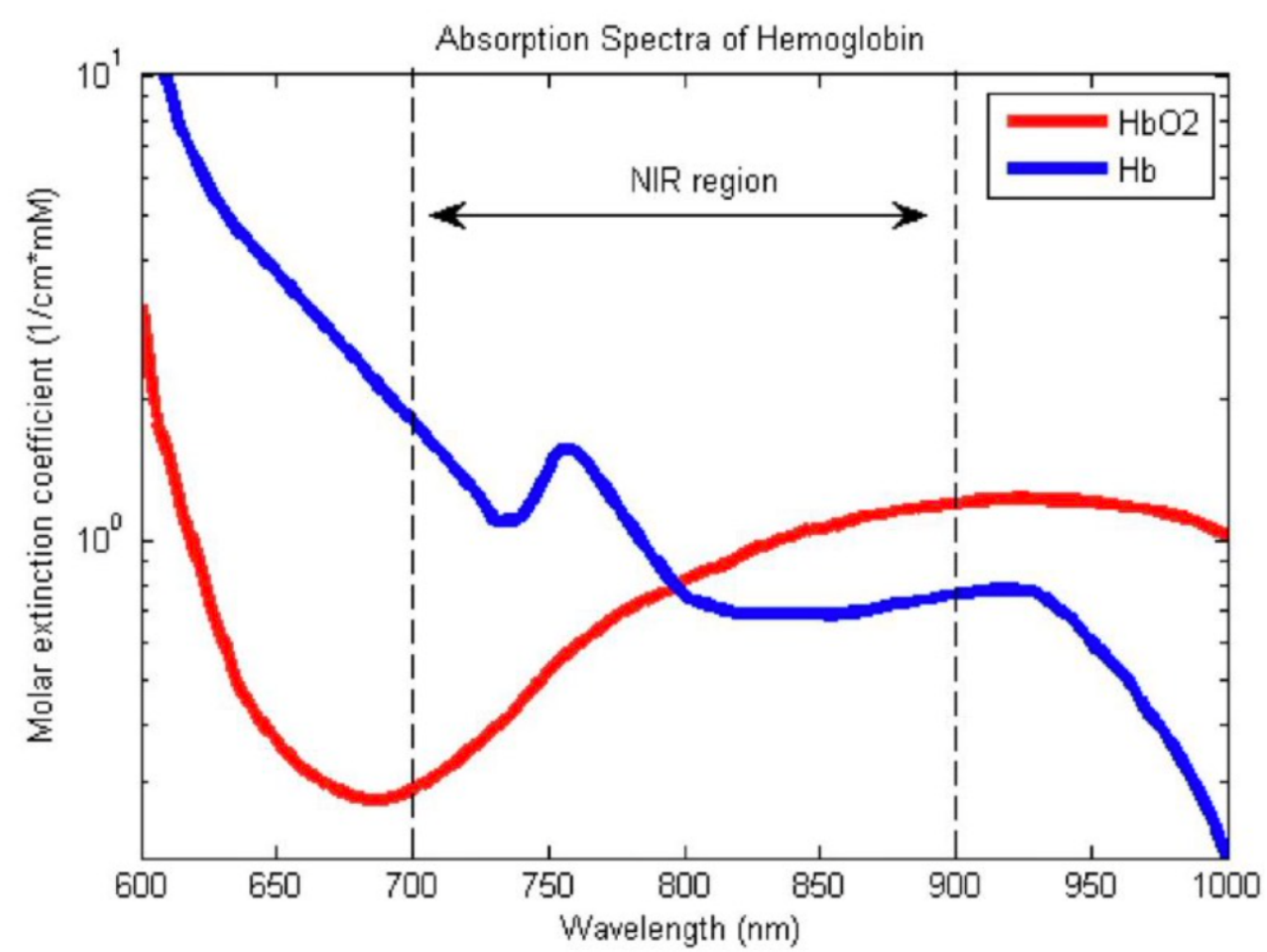


Исследование и коррекция нелинейностей TDC для повышения точности измерений в медицинской системе TD-DO

Кафедра физики элементарных частиц

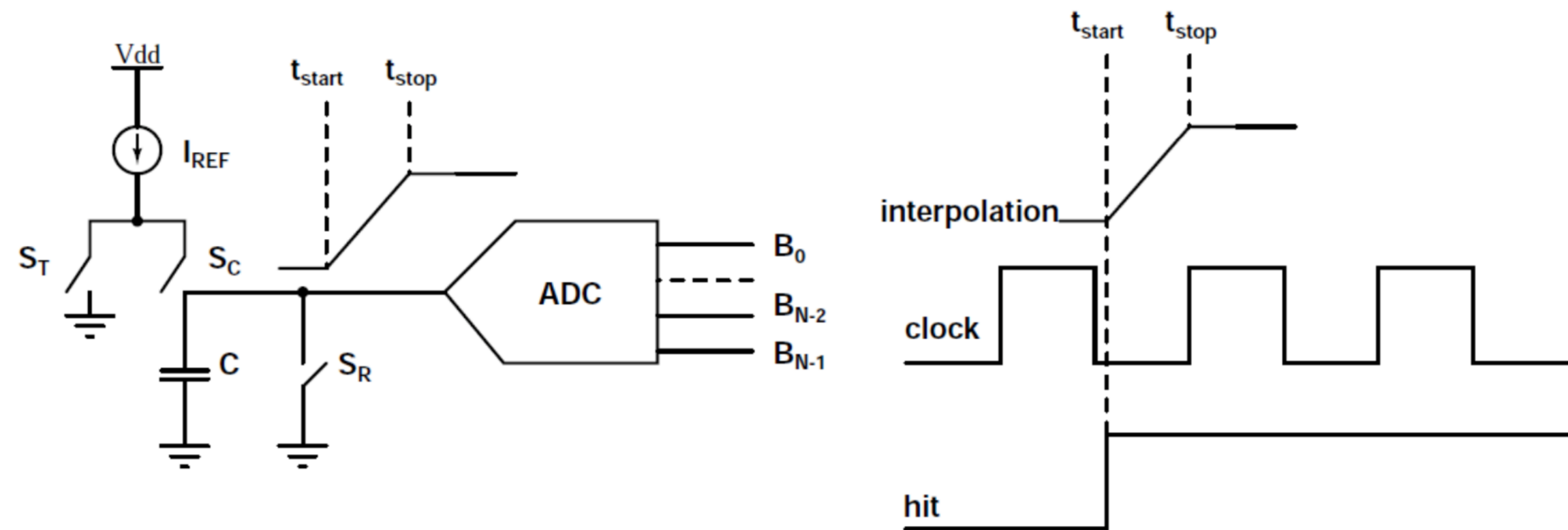
Устименко Д. К.

Обзор медицинского проекта и роль TDC



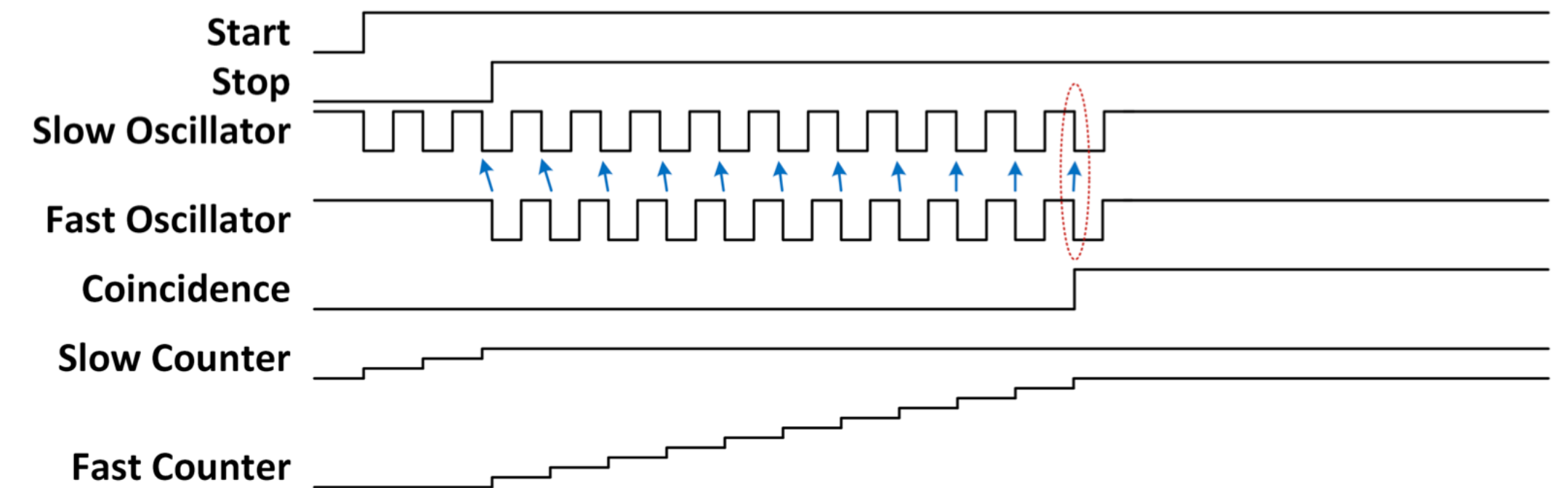
Принципы работы TDC

TDC Уилкинсона



- Высокая линейность
- Медленная скорость оцифровки

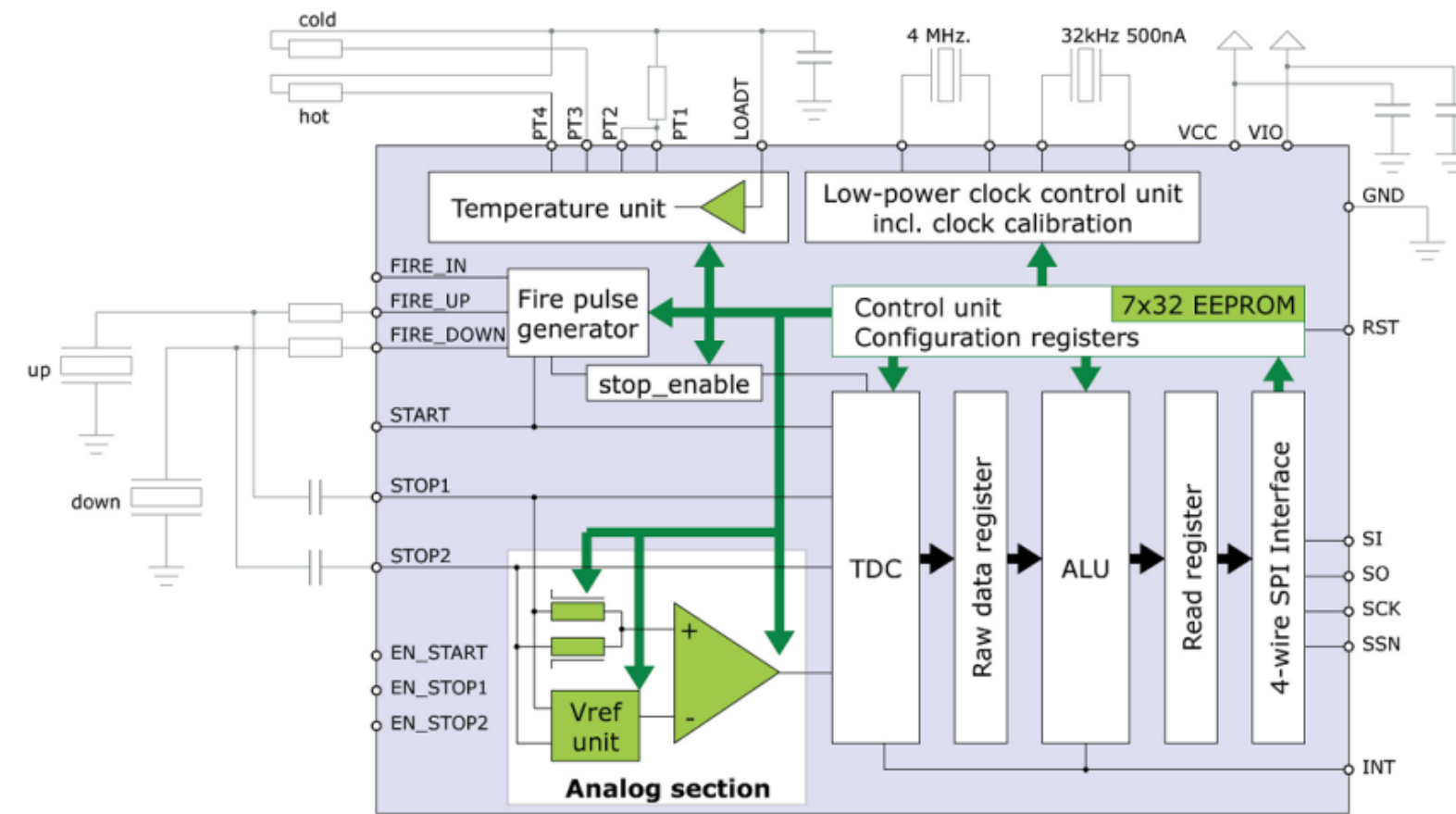
Нониусный TDC (верньерный)



- Сверхвысокое временное разрешение
- Сложность реализации и чувствительность к разбросу задержек

Сравнение TDC GP22 и HP TDC (CERN)

Блок-схема TDC-GP22



- Интерполяционный цифровой метод
- Основан на линиях задержек и внутреннем генераторе для интерполяции временных интервалов
- Ориентирован на компактные и недорогие приложения

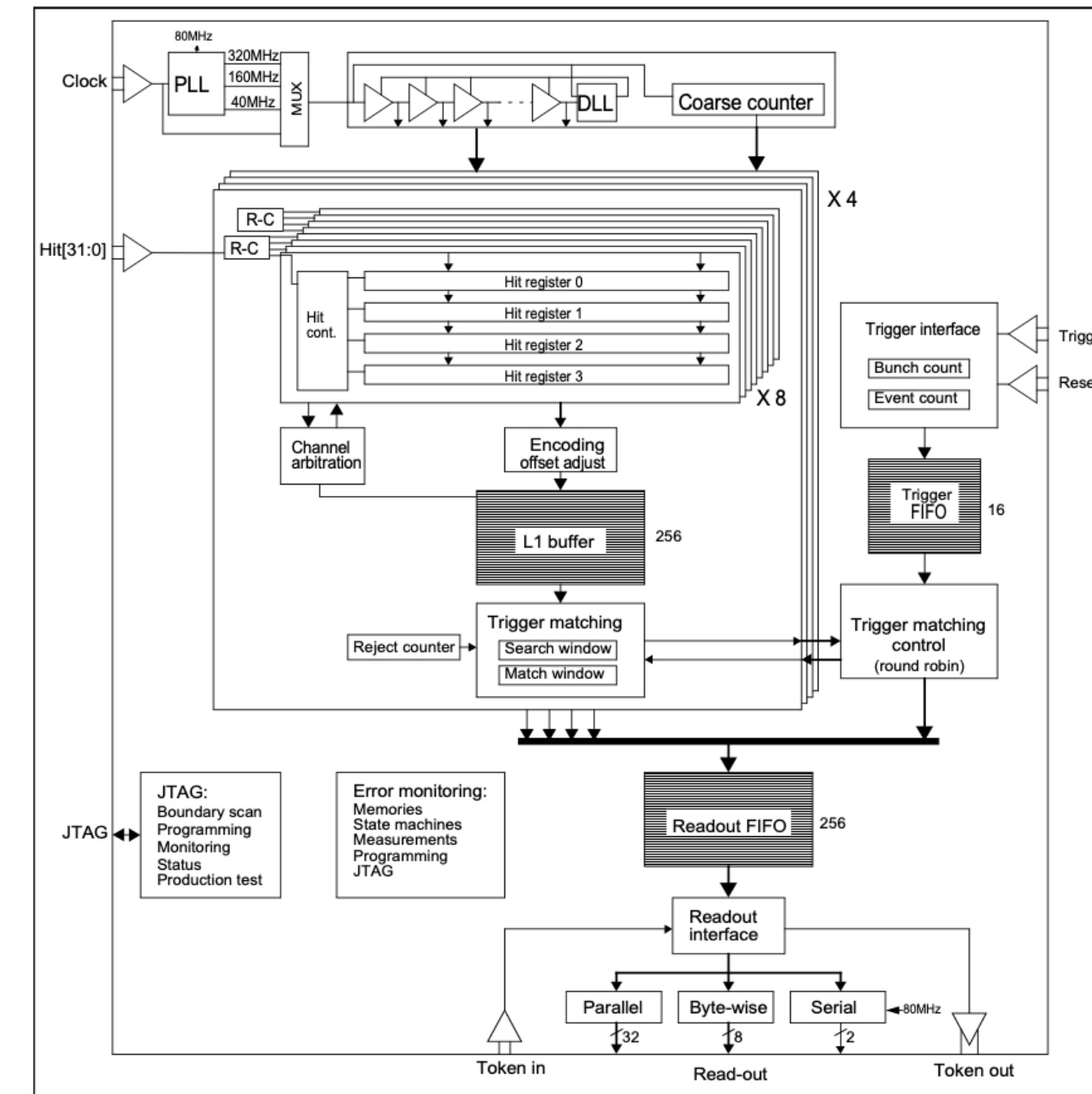


Fig. 1 Architecture of HPTDC.

- Цифровой метод с использованием многоступенчатой интерполяции (фазовый метод)
- Высокоточная многофазная система задержек
- Ориентирован на научные эксперименты с высокой точностью измерений

Проблема дифференциальной нелинейности

Дифференциальная нелинейность — это отклонение ширины конкретного временного бина TDC от его номинального значения.

$$DNL_i = \frac{W_i - W_{avg}}{W_{avg}}$$

W_i — ширина i -го временного интервала (бина),

W_{avg} — средняя ширина всех бинов.

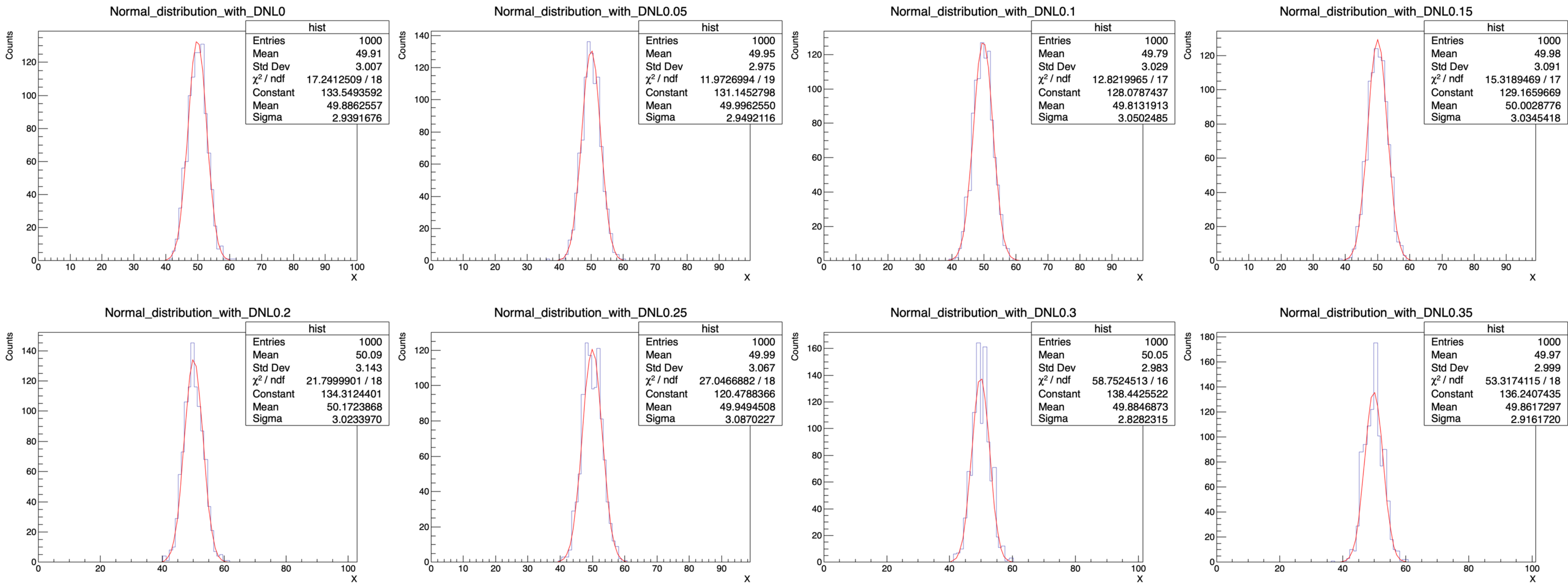
Причины появления:

- Неравенство задержек в линии (non-uniform delay line).
- Неидеальность DLL/PLL-интерполяции.
- Температурные и технологические флуктуации.

Последствия:

- $DNL > 1$ может привести к *пропаданию бинов* (missing bins).
- DNL ухудшает точность измерения и временное разрешение.

Симуляция влияния DNL на нормальное распределение



Проблема интегральной нелинейности

Интегральная нелинейность — это максимальное отклонение кумулятивной временной шкалы TDC от идеальной линейной зависимости.

$$INL_i = \frac{t_i - T_i^{ideal}}{W_{avg}}$$

t_i — фактическое накопленное время до i -го бина

$t_i^{ideal} = i \times W_{avg}$ — ожидаемое значение при идеальной шкале

W_{avg} — средняя ширина временного Бина

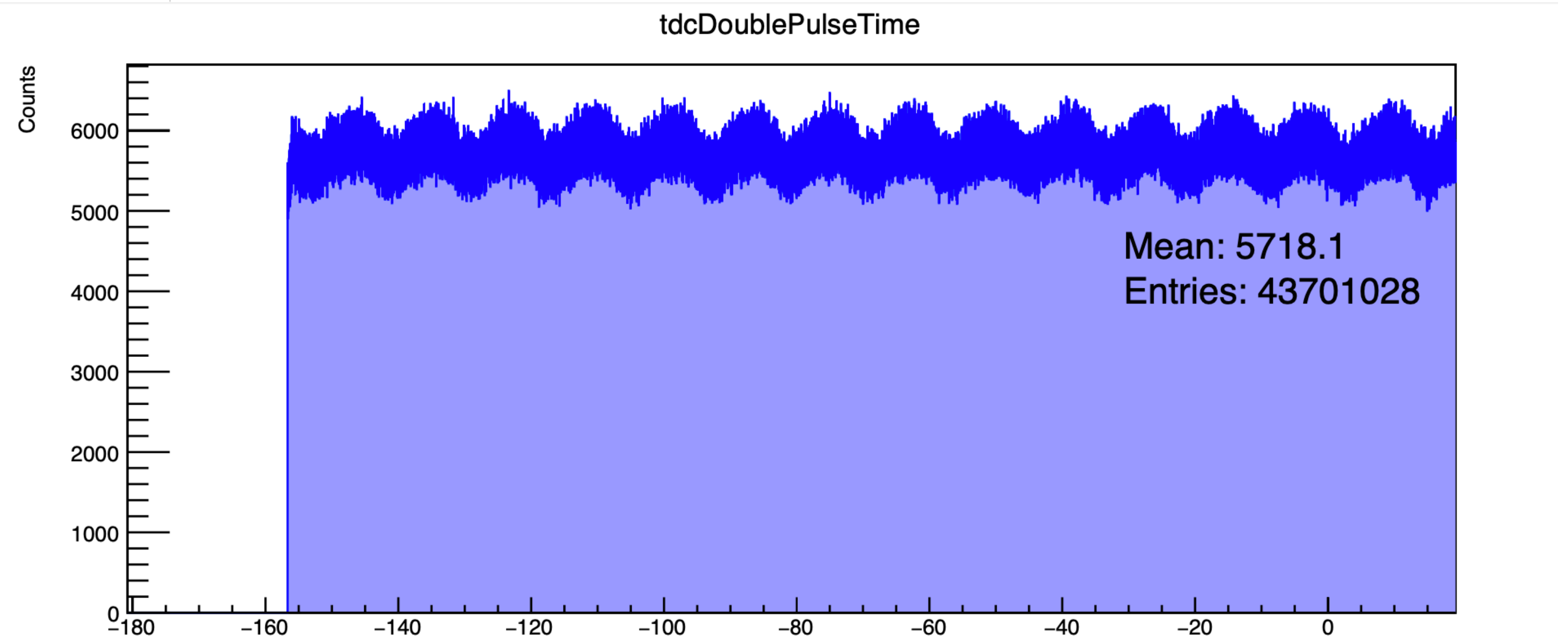
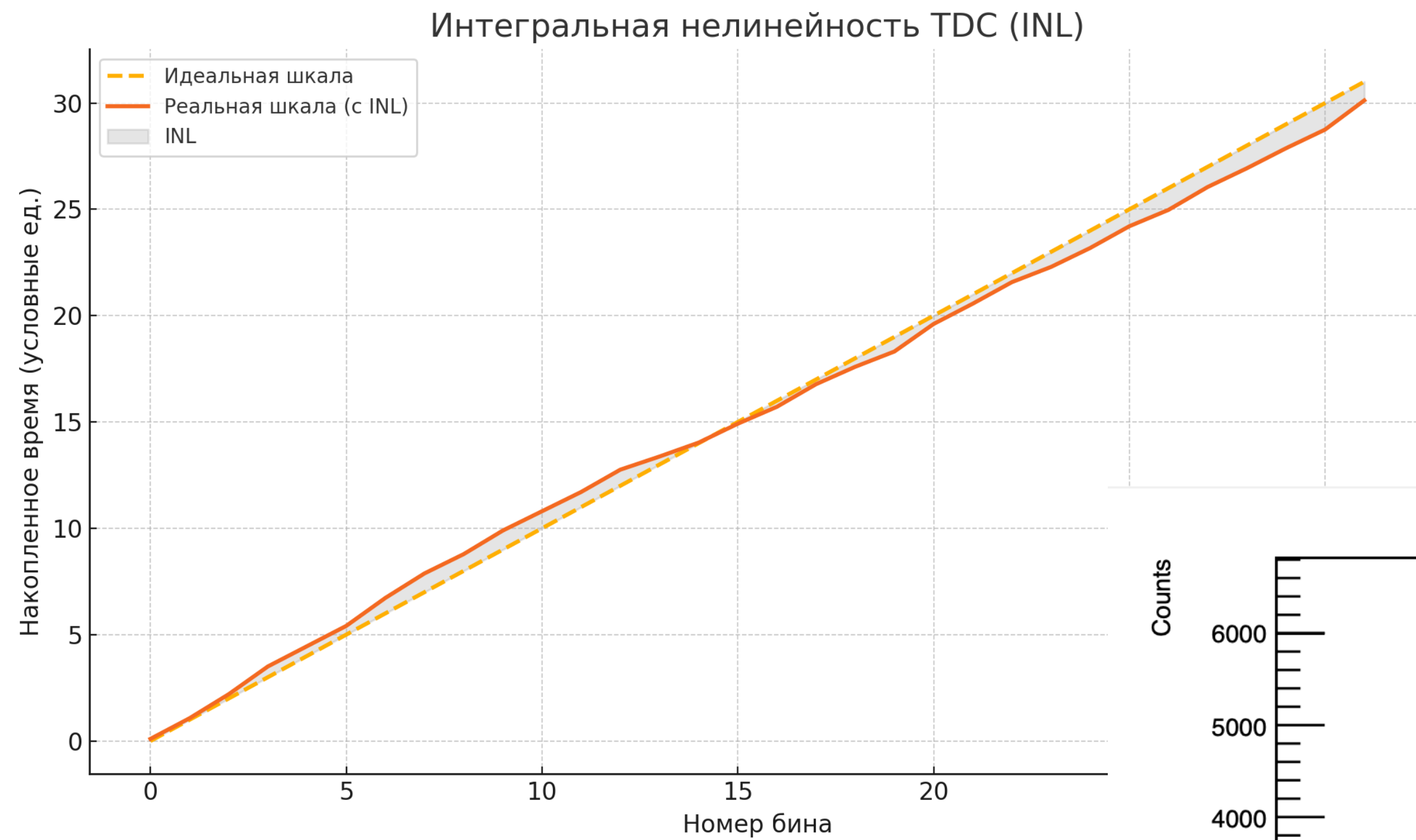
Физическая интерпретация:

- INL отражает *накопленную* ошибку позиционирования временных бинов.
- Это мера **неравномерности всей шкалы времени**, на которую проецируются измерения.

Причины:

- Систематические ошибки в цепочке задержек.
- Несовершенство DLL/PLL-интерполяции.
- Термодрейфы, флуктуации питания, неточности калибровки.

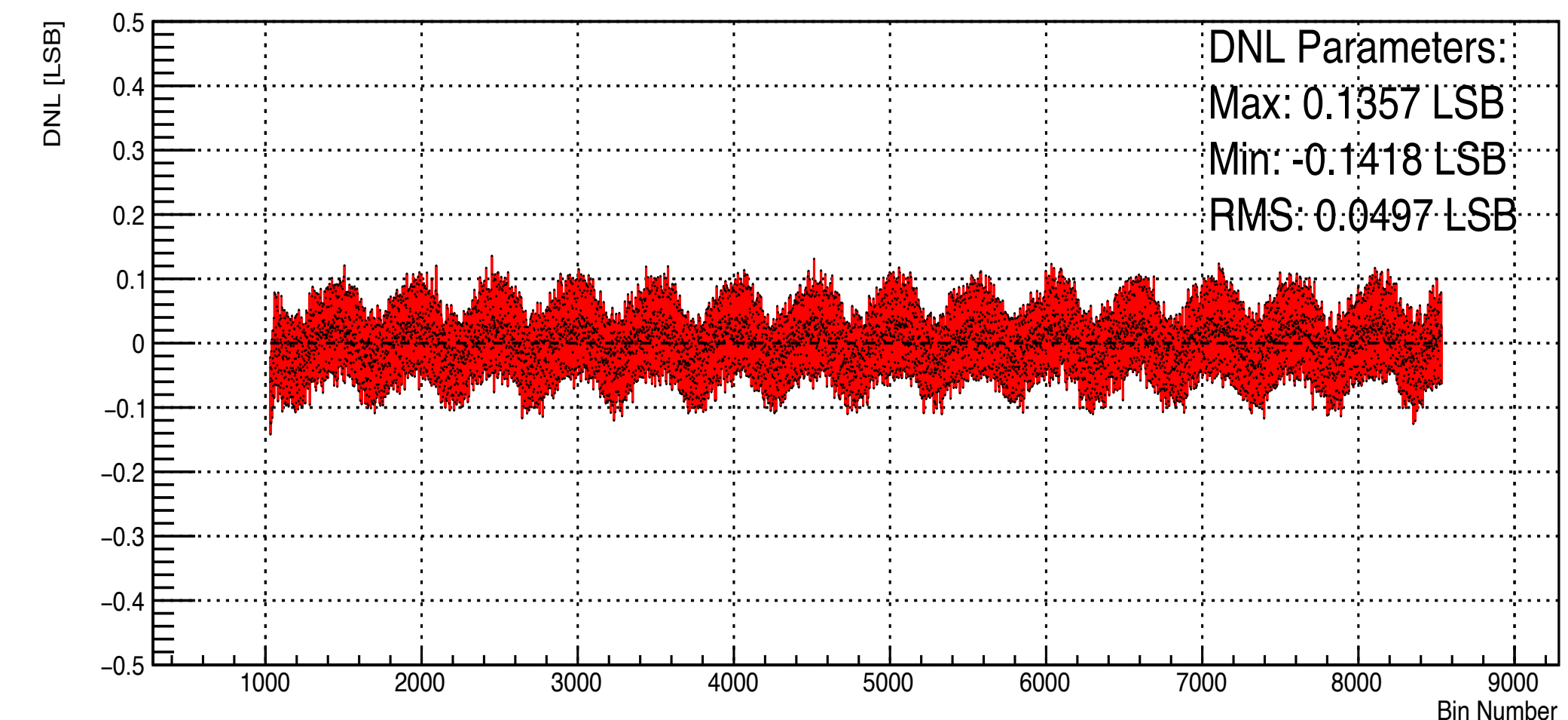
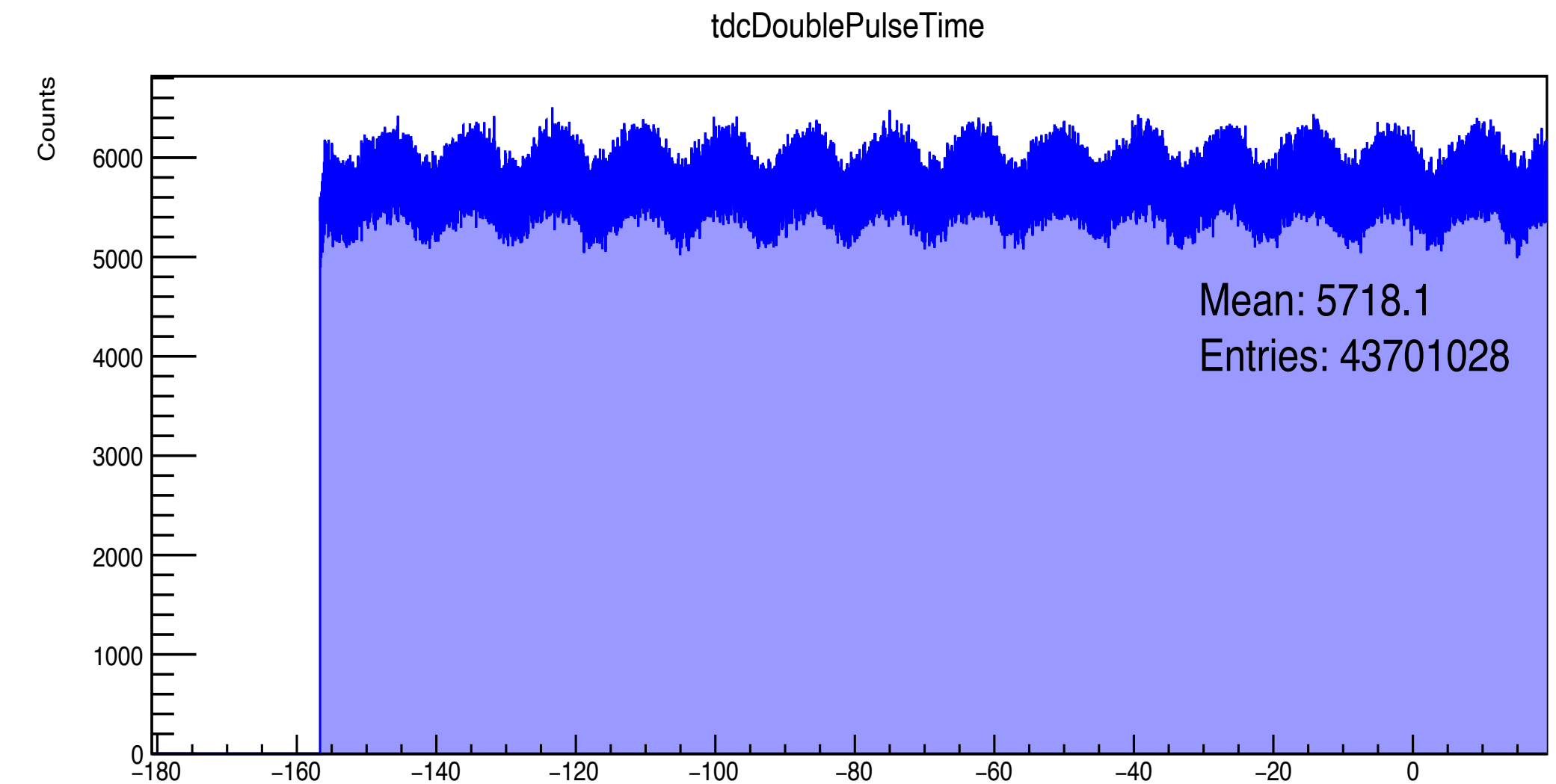
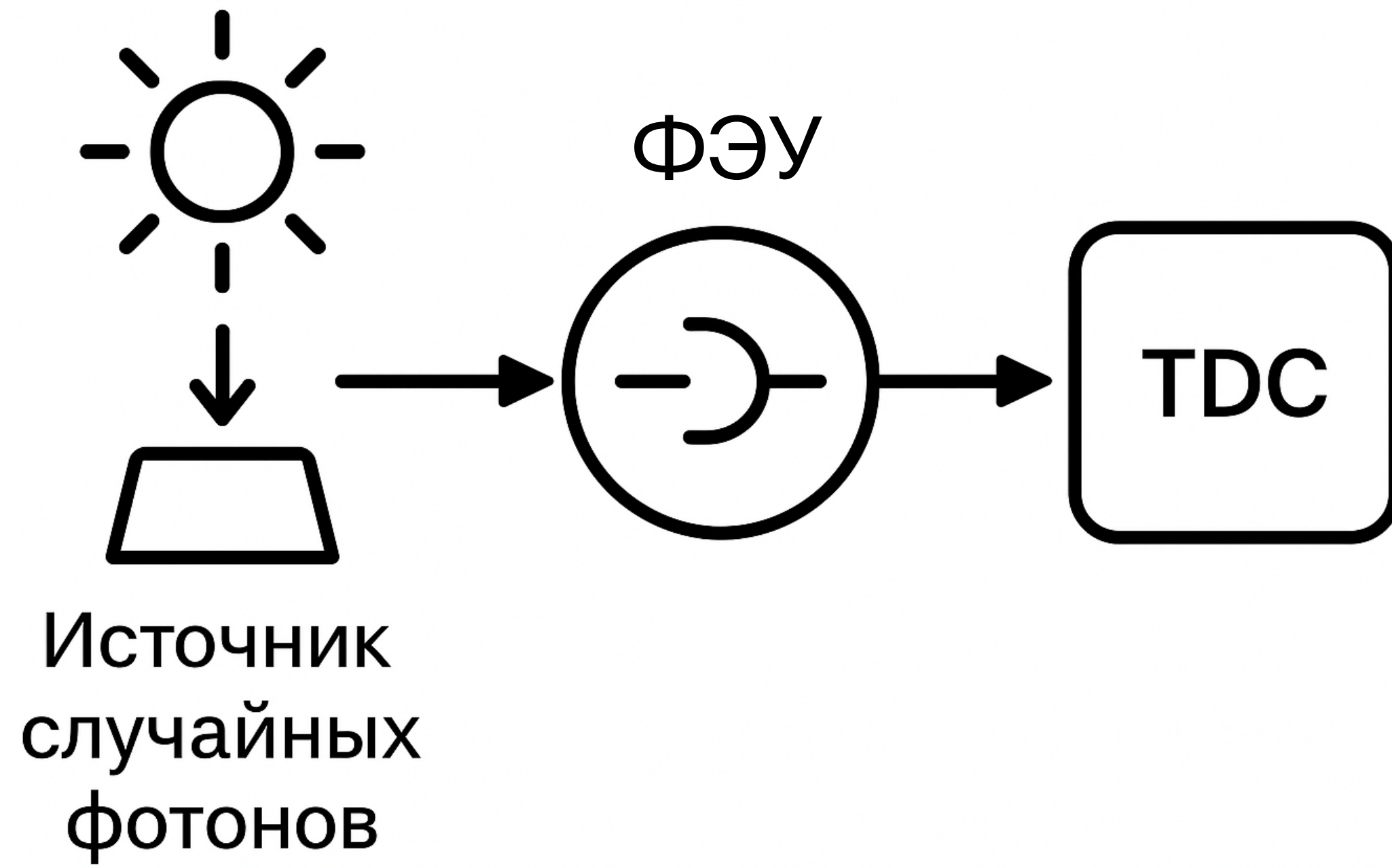
Визуализация INL



Калибровка TDC по DNL

Статистическая коррекция

- Гистограммный метод: многократное измерение равномерно распределённых интервалов.
- Расчёт центра бина и нормализация ширины.
- Подходит для цифровых верньерных и DLL-основанных TDC.



Программы для калибровки

Вычисление DNL

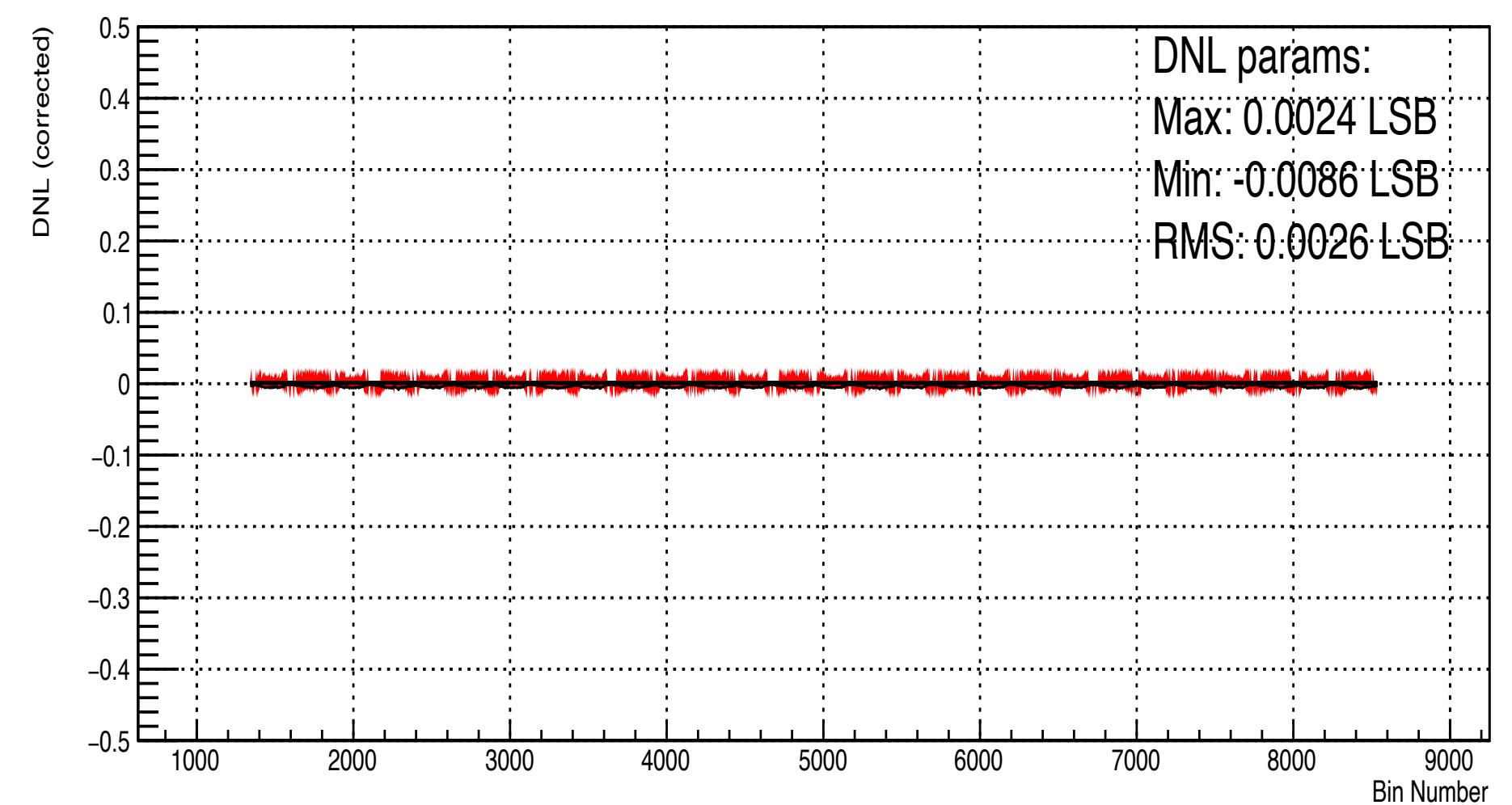
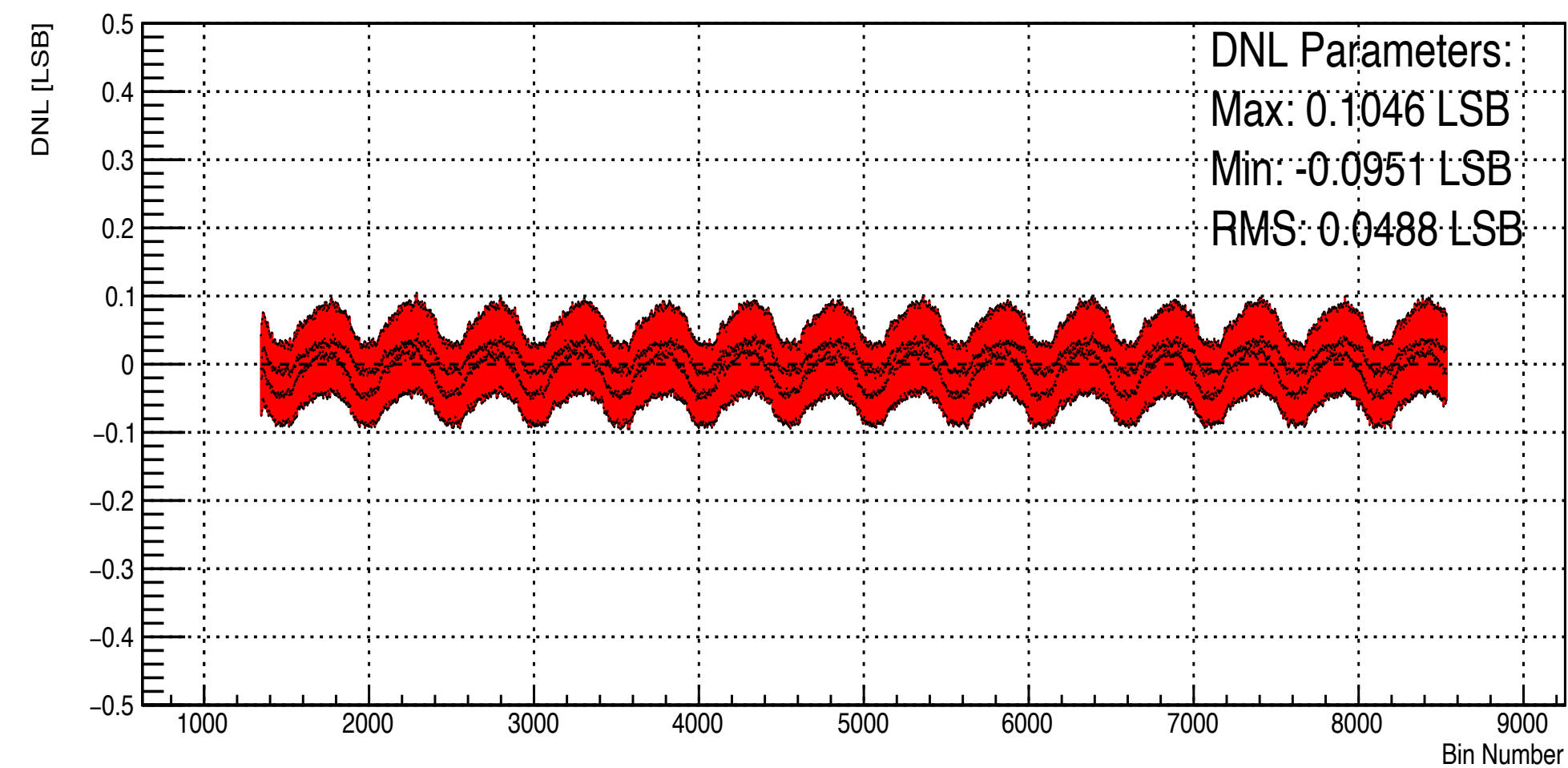
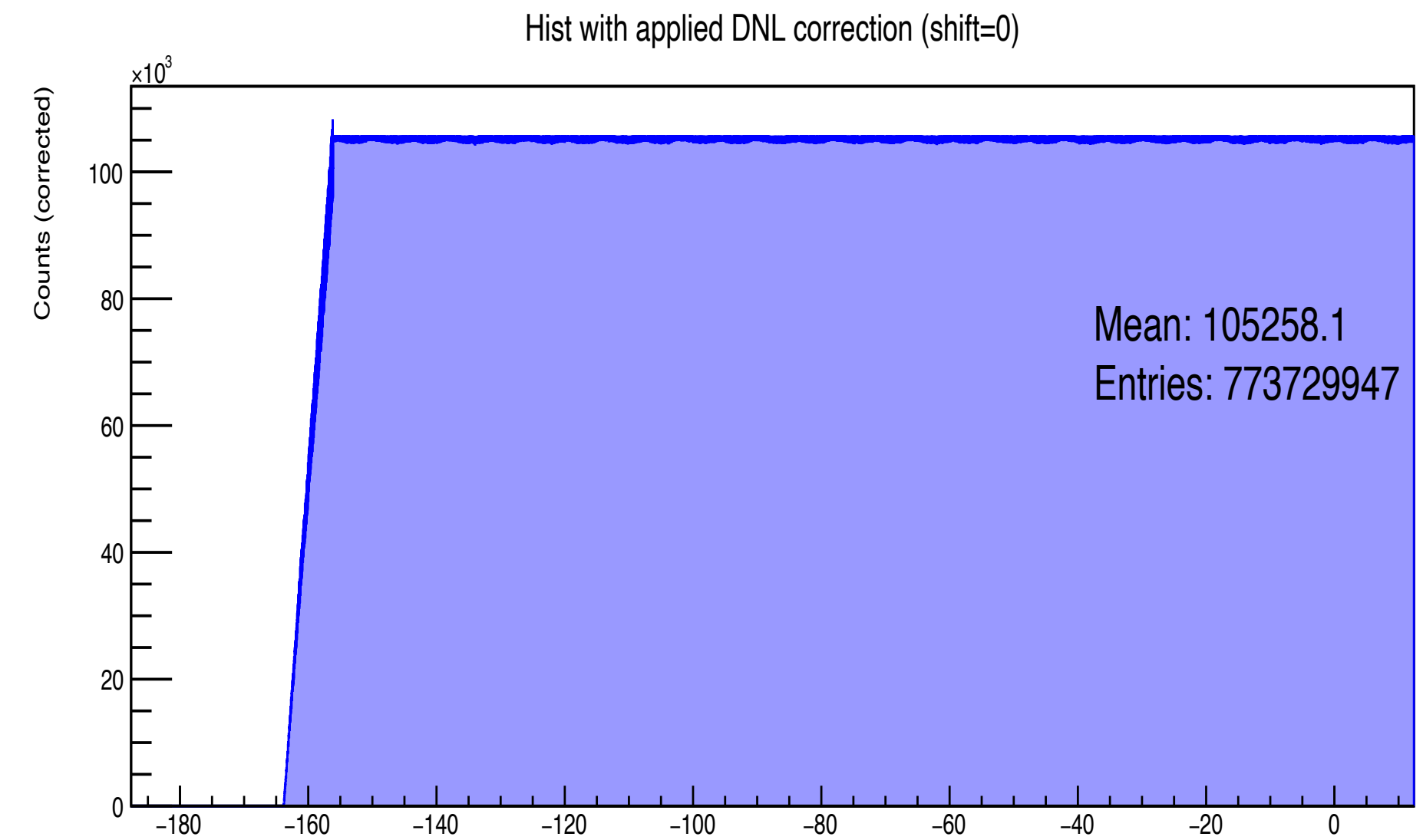
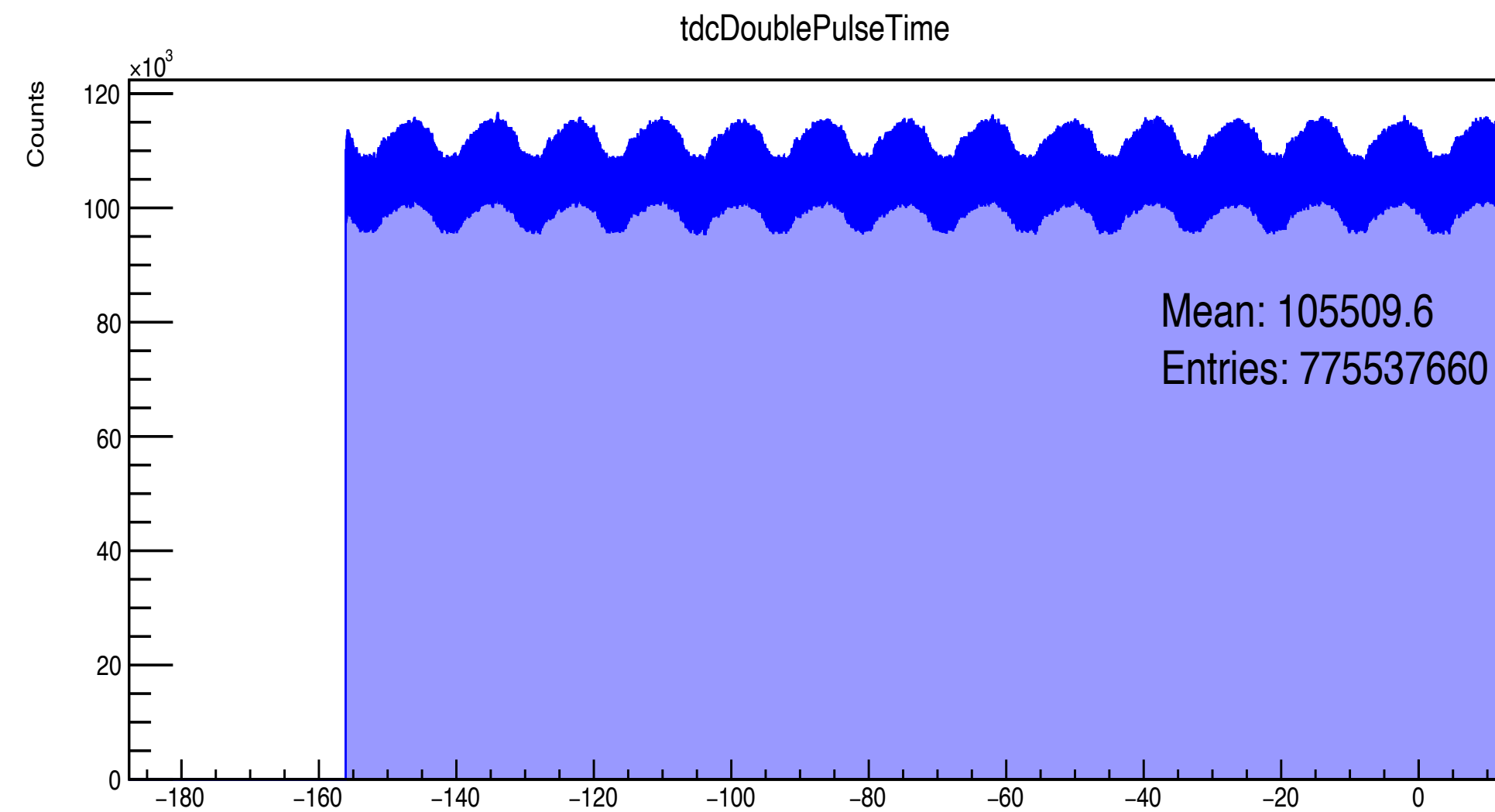
```
Users > danaustimenko > Desktop > d_nonlin > nonlin_calc > dnl_calc.py
1 #python3 -i dnl_calc.py --file hist_tdcDoublePulseTimeWithoutINL800k.json --cut 110000 --
2 import ROOT
3 import json
4 import numpy as np
5 import argparse
6
7 # Парсинг аргументов командной строки
8 parser = argparse.ArgumentParser(
9     description="Построение гистограммы из JSON-файла и сохранение параметров скорректир
10 )
11 parser.add_argument("--file", type=str, required=True, help="Путь к JSON-файлу с данными"
12 parser.add_argument("--cut", type=float, default=110000.0,
13     help="Пороговое значение для начала анализа данных (по умолчанию: 110
14 parser.add_argument("--save_params", type=str, default="corrected_hist_params.json",
15     help="Файл для сохранения параметров скорректированной гистограммы")
16 # Добавляем аргумент для сохранения параметров DNL по каждому бину
17 parser.add_argument("--save_dnl", type=str, default="dnl_params.json",
18     help="Файл для сохранения DNL параметров для каждого бина")
19 args = parser.parse_args()
20
21 # Загрузка данных из указанного JSON-файла
22 try:
23     with open(args.file, "r") as file:
24         data = json.load(file)
25 except FileNotFoundError:
26     print(f"Ошибка: Файл '{args.file}' не найден.")
27     exit(1)
28
29 # Извлечение данных из JSON
30 bins = data["bins"]
31 min_val = data["min"]
32 max_val = data["max"]
33 n_bins = data["n_bins"]
34 hist_id = data["hist_id"]
```

Применение калибровки DNL

```
Users > danaustimenko > Desktop > d_nonlin > nonlin_calc > builder.py
1 import ROOT
2 import json
3 import numpy as np
4 import argparse
5
6 # Парсинг аргументов командной строки
7 parser = argparse.ArgumentParser(
8     description="Применение DNL коррекции: домножение каждого бина на соответствующее знач
9 )
10 parser.add_argument("--file", type=str, required=True,
11     help="Путь к JSON-файлу с исходными данными гистограммы")
12 parser.add_argument("--dnl", type=str, required=True,
13     help="Путь к JSON-файлу с параметрами DNL для каждого бина")
14 parser.add_argument("--cut", type=float, default=110000.0,
15     help="Пороговое значение для фильтрации данных (по умолчанию: 110000)
16 parser.add_argument("--search_by", type=str, choices=["max", "rms"], default="max",
17     help="Метрика для выбора оптимального сдвига: 'max' - минимизация макс
18 args = parser.parse_args()
19
20 # =====
21 # Загрузка данных
22 # =====
23 try:
24     with open(args.file, "r") as f:
25         data = json.load(f)
26 except FileNotFoundError:
27     print(f"Ошибка: Файл '{args.file}' не найден.")
28     exit(1)
29
30 bins = data["bins"]
31 min_val = data["min"]
32 max_val = data["max"]
33 n_bins = data["n_bins"]
34 hist_id = data["hist_id"]
```

Применение калибровки

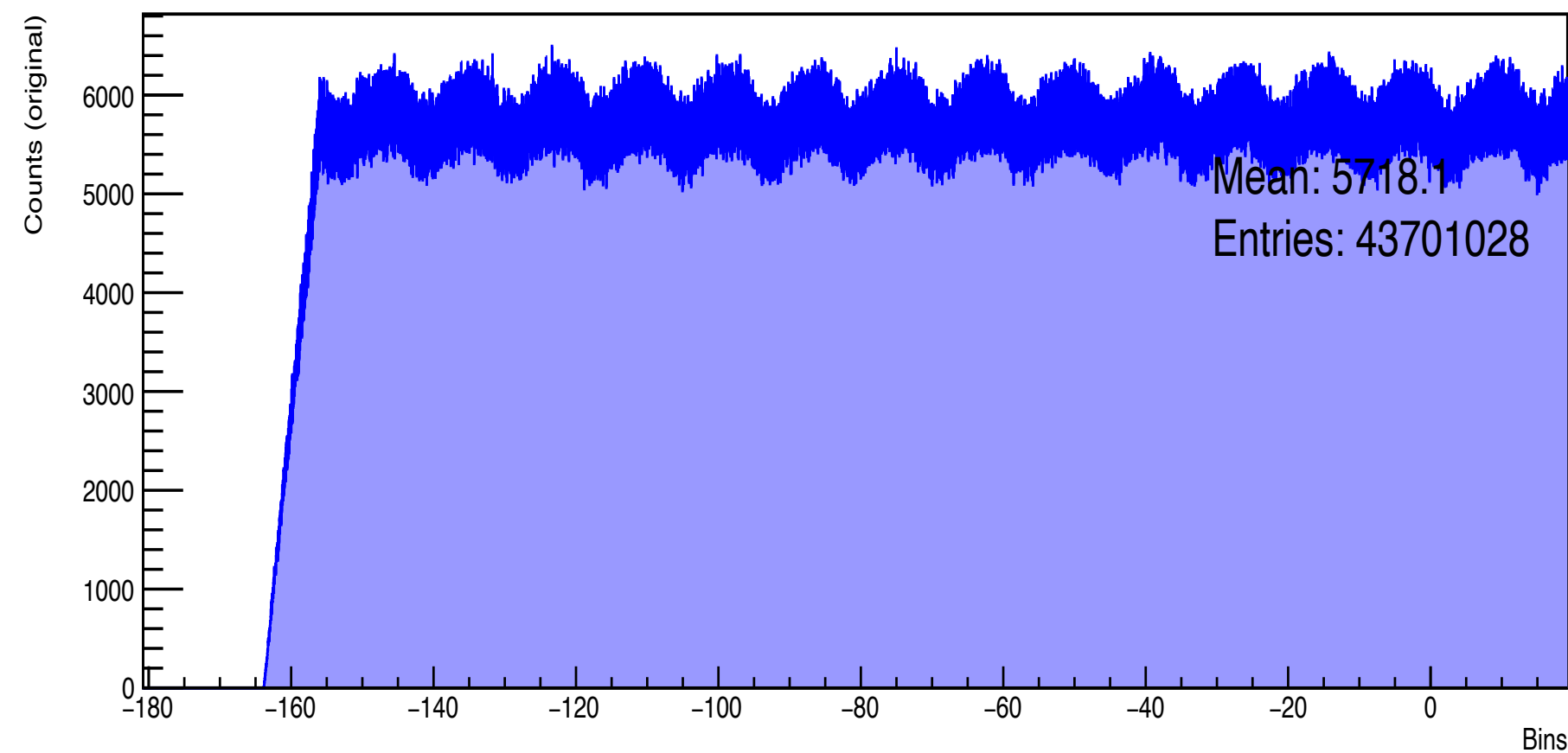
Статистика $\approx 800k$ на бин



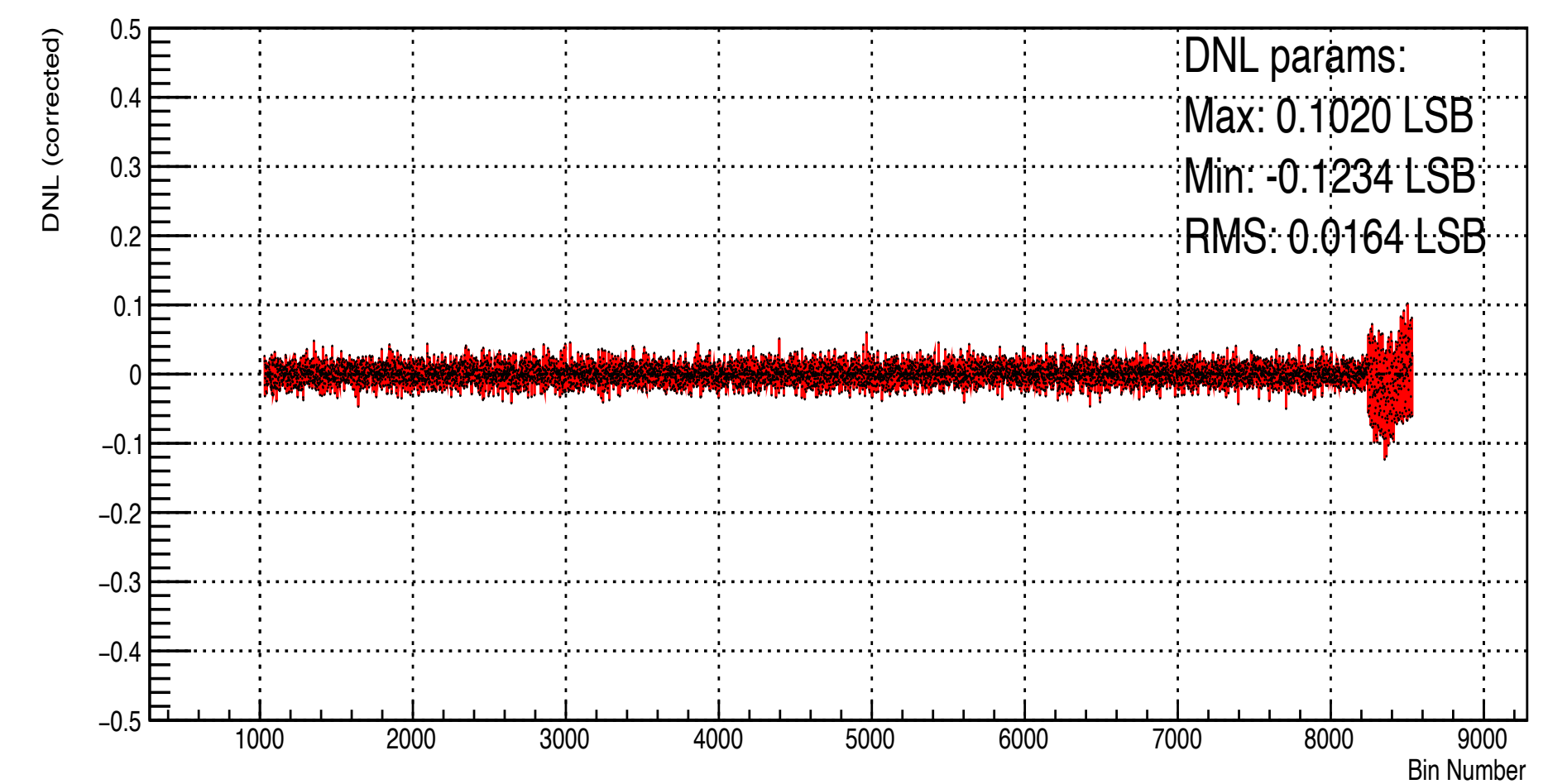
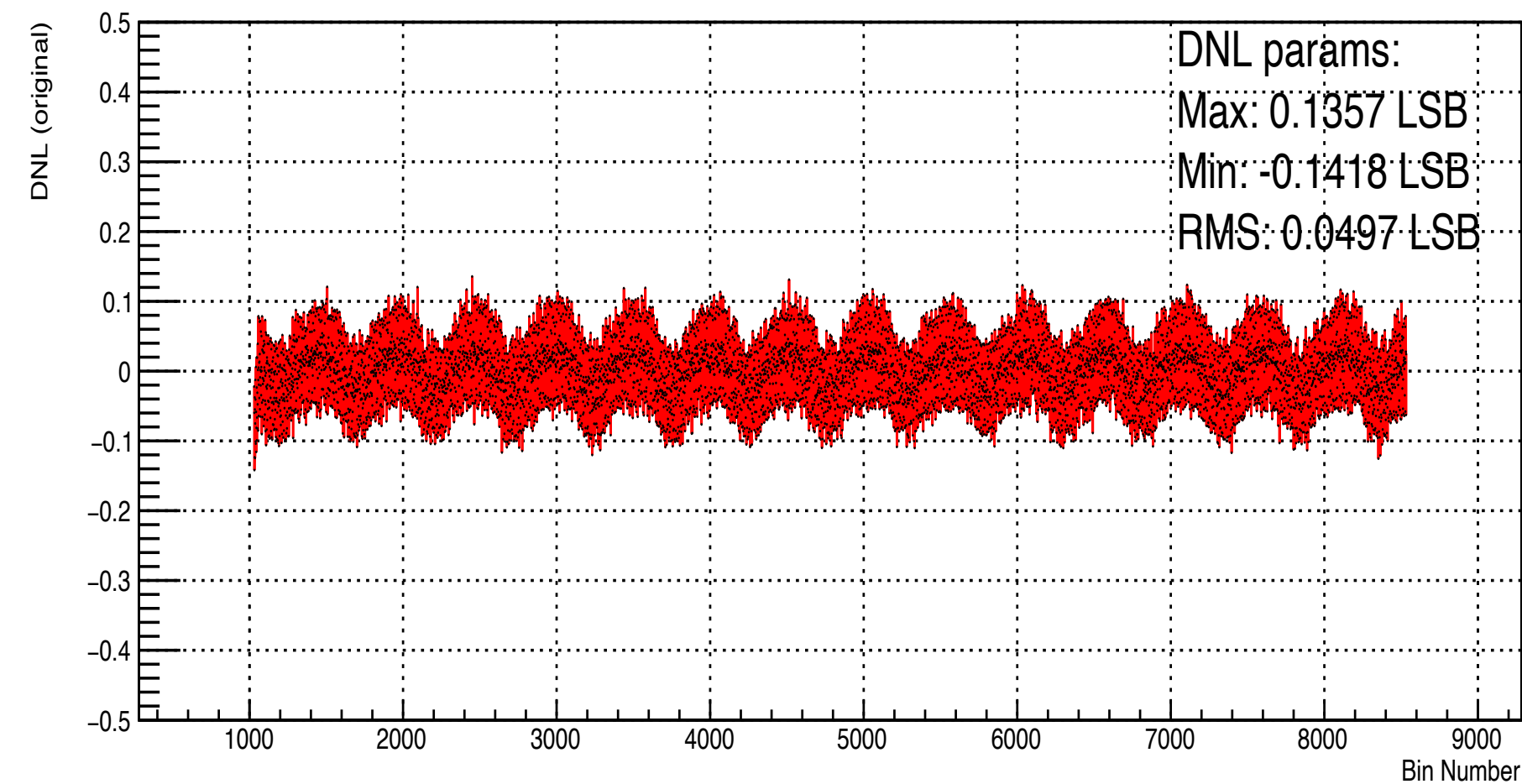
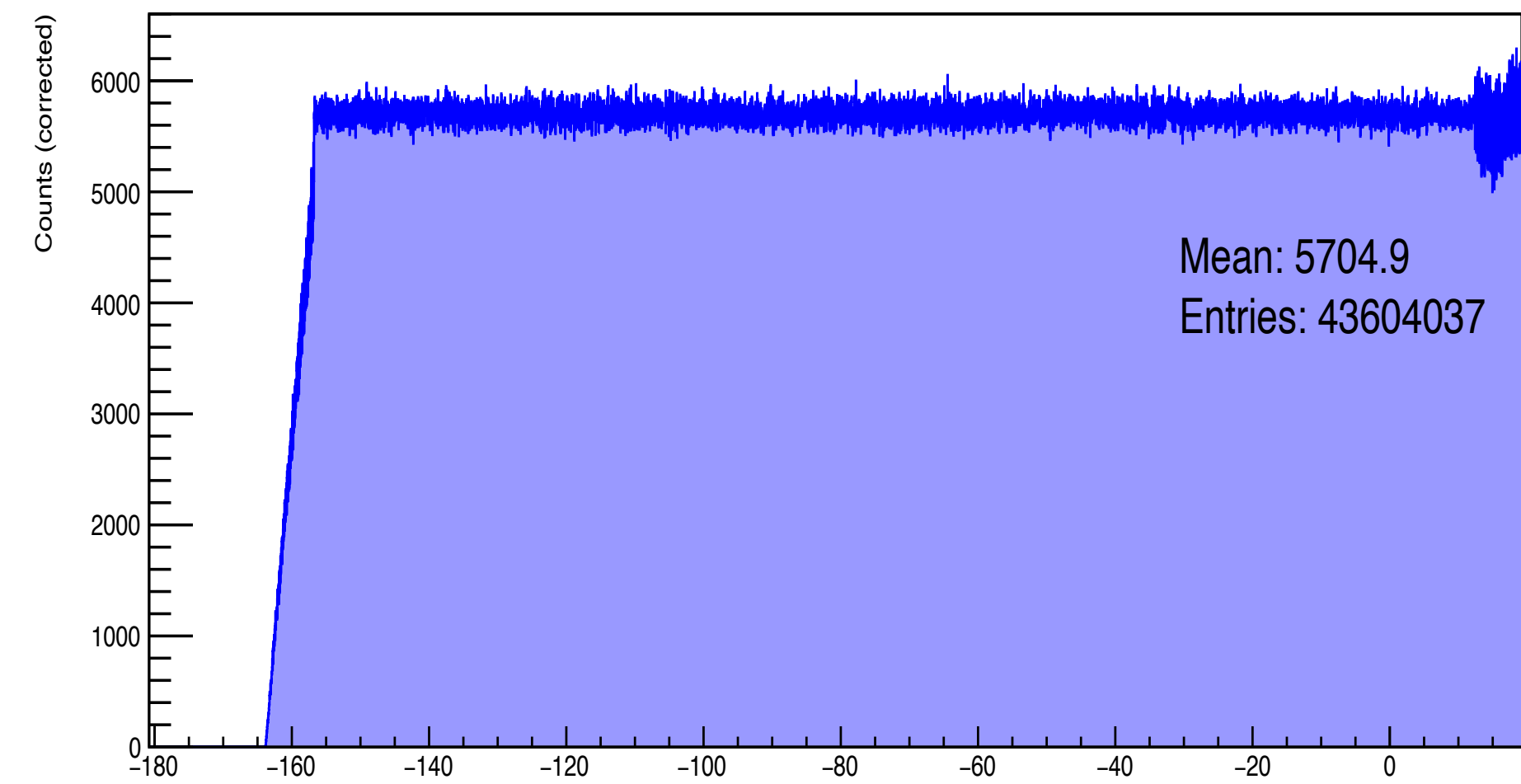
Применение калибровки

Применение калибровки на статистику $\approx 5k$

Original Signal



Hist with DNL correction (shift=291)



Итоги

- TDC — критически важен для точности TD-DO: измеряет время пролёта фотонов с пикосекундной точностью.
- Без калибровки TDC вносят ошибки: DNL → искажения гистограмм, missing bins; INL → накопленные смещения времени.
- Даже прецезионные TDC (HP TDC) требуют обязательной коррекции.
- Шум ФЭУ — доступный и эффективный источник для статистической калибровки.
- Применение калибровки даёт:
 - увеличение точности,
 - снижение ошибок времени,
 - повышение надёжности анализа сигналов.