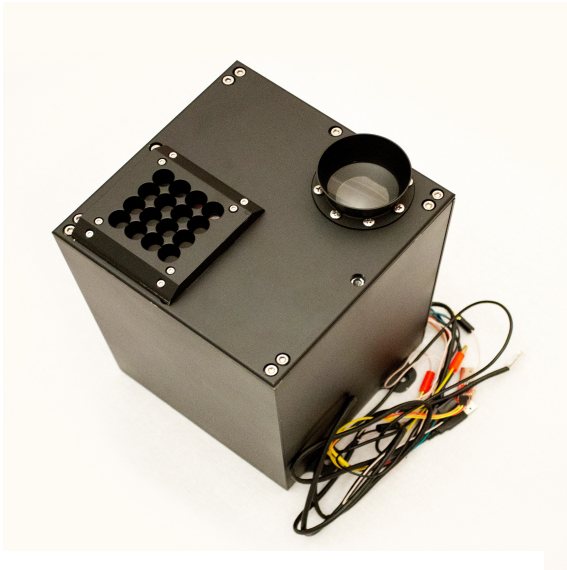


Реконструкция ориентации многоканального изображающего детектора с помощью нейросетевой оценки отношения

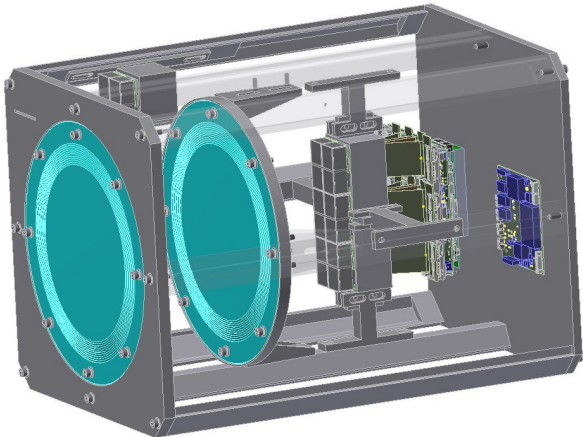
Р. Сараев, С. Шаракин

Фотометры лаборатории КЛ ПВЭ



PAIP-V:

- ФП: 16×16 pixels
- Поле зрения: $\sim 15.7 \times 15.7^\circ$
- Временное разрешение: 1 мс



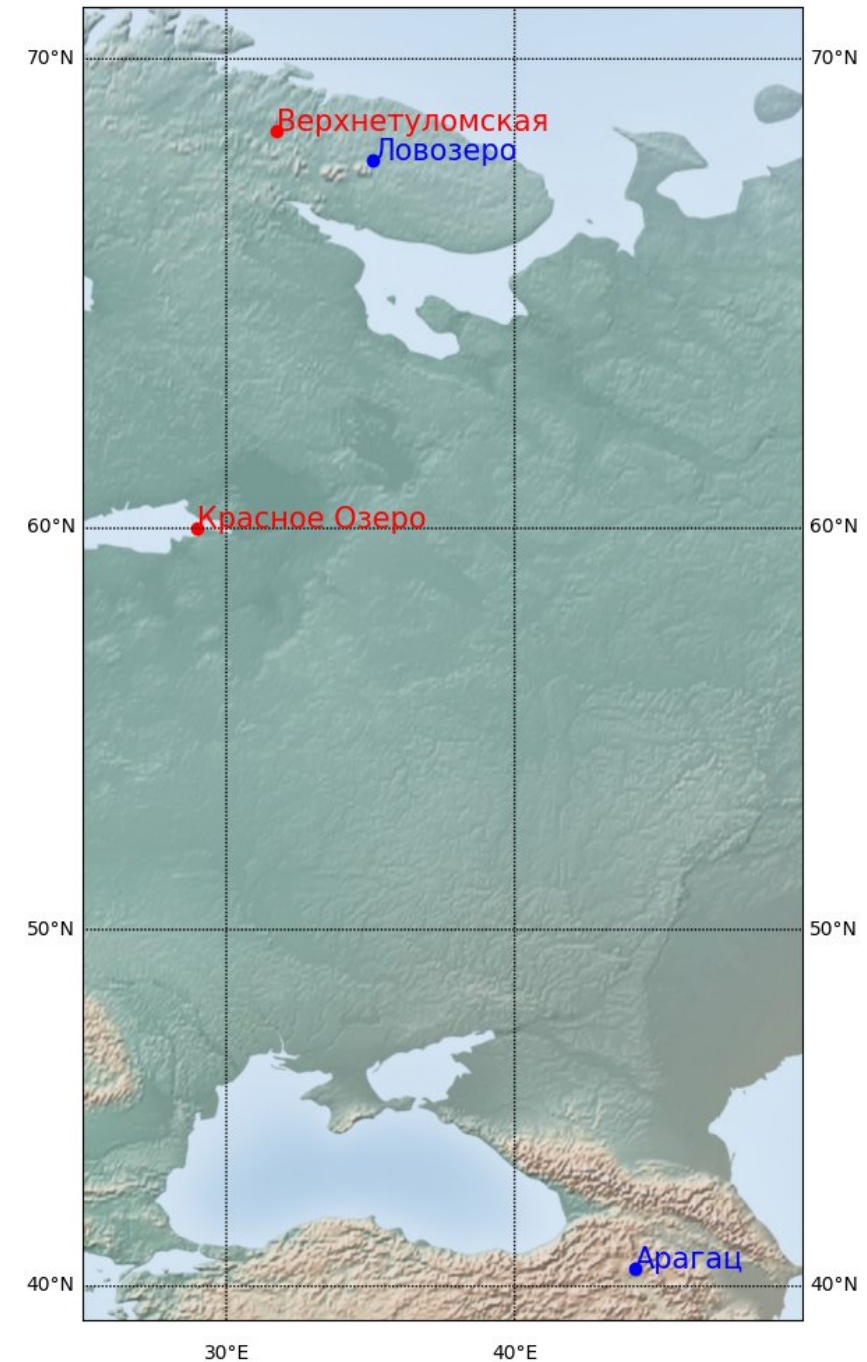
PAIP-L:

- ФП: 16×48 pixels
- Поле зрения: $\sim 45 \times 13^\circ$
- Временное разрешение: 4 мс

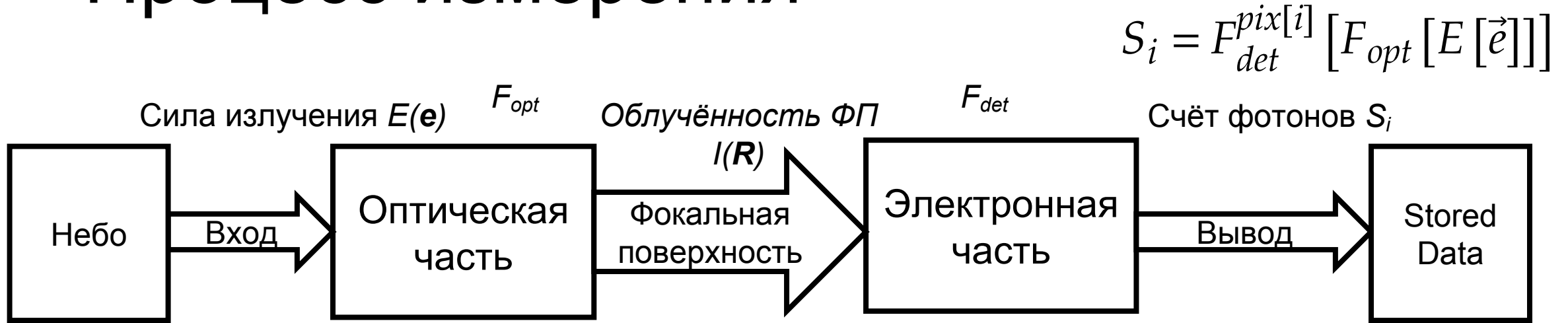
Работа фотометров

- Задача: изучение быстропеременных явлений (полярных сияний, молний).
- Режим работы: приборы установлены неподвижно, направлены в небо.
- Необходимы методы для определения параметров аппаратной функции

Карта обсерваторий



Процесс измерения



Параметры:

- Ориентация (Θ_{or})
- Параметры дисторсии (Θ_{dist})
- Параметры функции рассеяния точки (Θ_{psf})
- Transmittance parameters (Θ_{tran})
- Параметры электроники (Θ_{el})

Параметры аппаратной функции

Определяемые *in situ*

- Ориентация (Θ_{or}): склонение δ , часовой угол h , собственный поворот Ω
- Параметры дисторсии (Θ_{dist}): фокусное расстояние F , квадратичная поправка α
- Параметры функции рассеяния точки (Θ_{psf}): множитель масштаба σ_{psf}
- Параметры прозрачности оптики (Θ_{tran}): спектральные и геометрические, ε_{opt} , ε_{λ}

Определяемые *ex situ*

- Параметры электроники (Θ_{el}): чувствительности отдельных пикселей ε_i , мёртвые времена t_i , границы пикселей на ФП

Как? По звёздам.

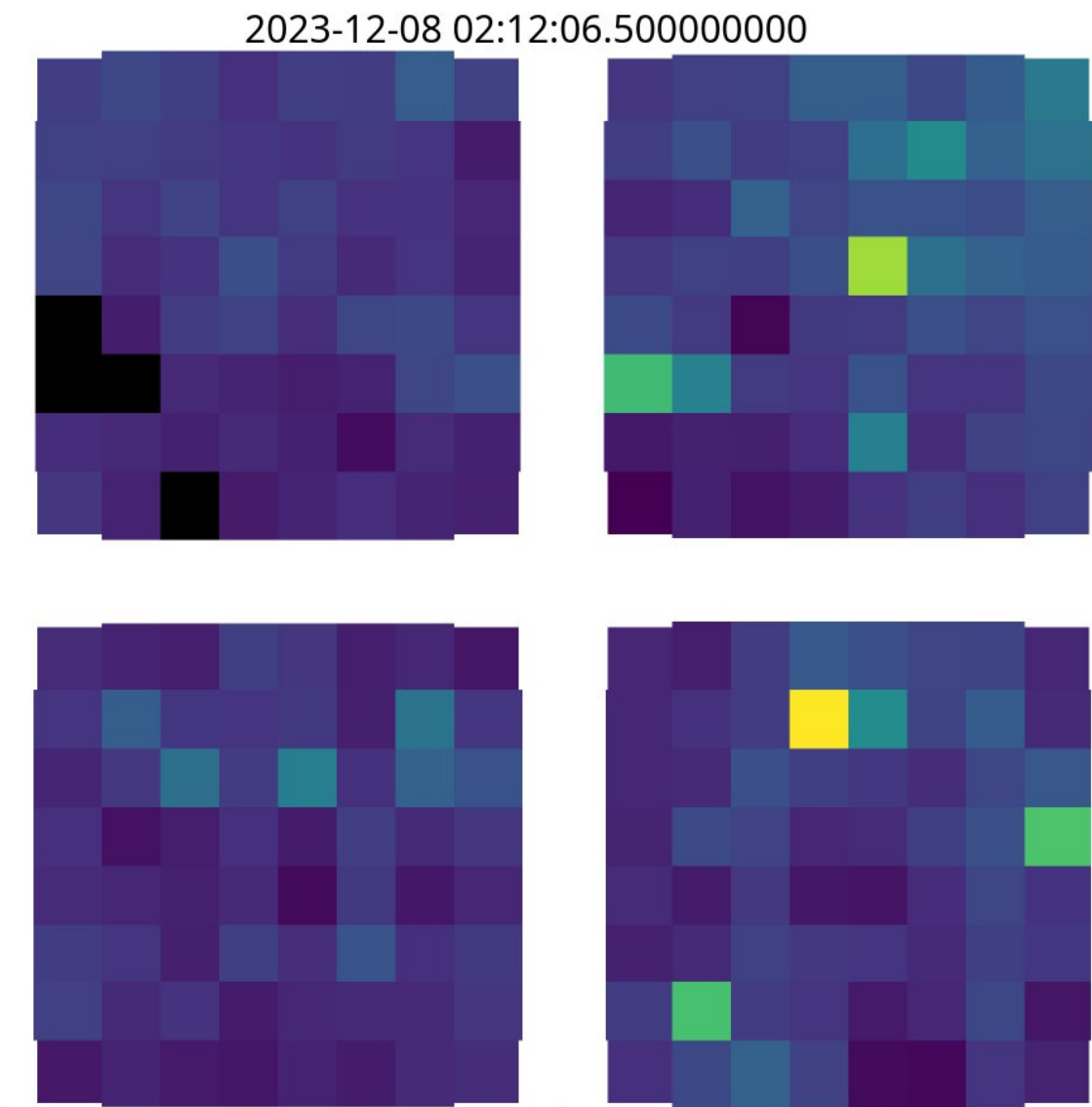
Что видит фотометр

- Зазоры между группами пикселей
- Поле зрения: $\sim 15.7 \times 15.7^\circ$ (при 16×16 пикселях)
- Слабое пространственное разрешение.
- Неоднородная чувствительность

Однако:

- Данные – динамические изображения (видео)
- Известна *примерная* ориентация – *априорная* информация
 - Географические координаты обсерватории
 - Как был направлен прибор при его установке

Сложность модели измерения и наличие априорной информации диктует использование *Байесовского Вывода*



Изображение кадра со звёздами в PAIP-V
(предобработанное)

Байесовский вывод

$$P(\Theta|D) \sim \int P(D|\Theta, \eta) P(\Theta, \eta) d\eta$$

- $P(\Theta|D)$ – Апостериорное распределение
- $P(D|\Theta, \eta)$ – Функция правдоподобия
- $P(\Theta, \eta)$ – Априорное распределение
- Θ – Интересующие параметры (углы ориентации, параметры детектора)
- η – Дополнительные параметры (необходимы для формулирования модели)

Простой подход

- Параметры: Ориентация(Θ_{or}), Дисторсия (Θ_{dist}), неточности яркости звёзд (η_j)
- Likelihood:

$$\bar{S}_i = \sum_{j=1}^n \varepsilon_i \int_{pix_i} E(\eta_j) \Phi(\mathbf{R} - \mathbf{R}_c(\vec{e}_j(\Theta_{or})\vec{e}_x, \vec{e}_j(\Theta_{or})\vec{e}_y | \Theta_{dist})) d^2 \mathbf{R}$$
$$S_i \sim N(\mu = \bar{S}_i, \sigma)$$

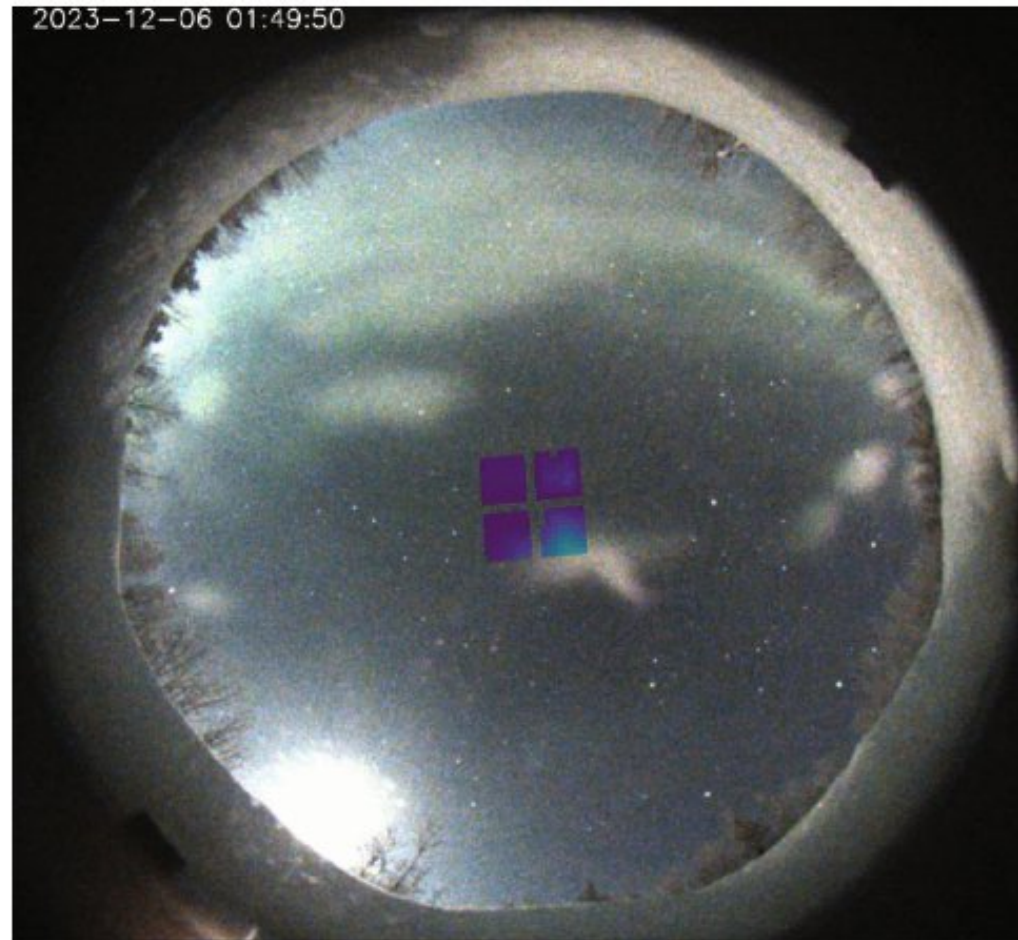
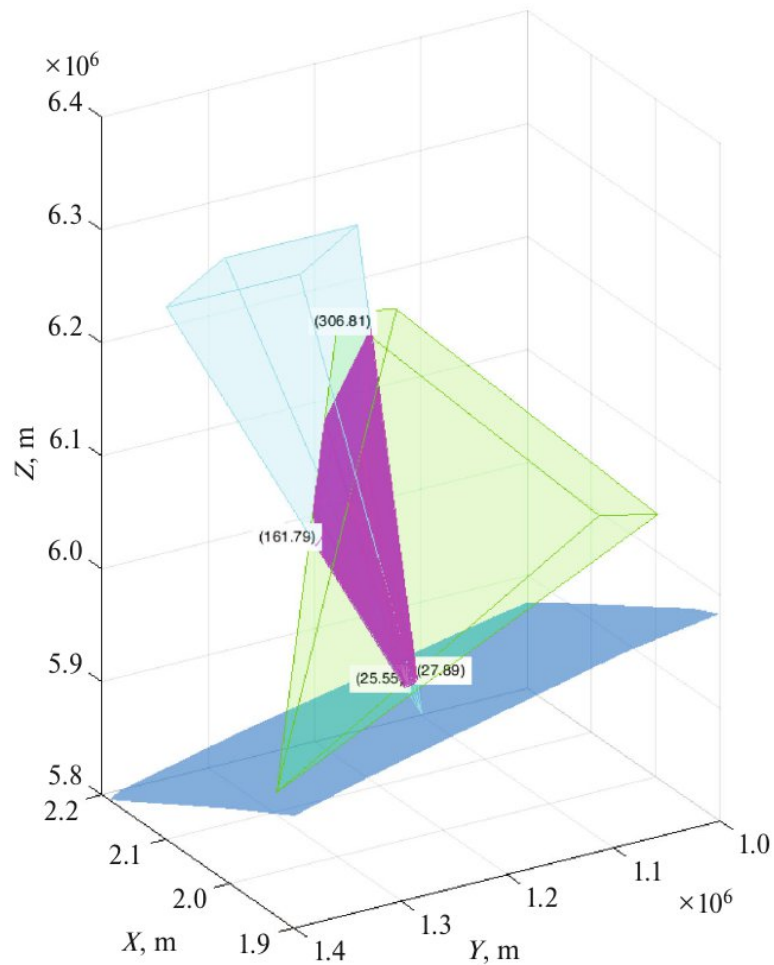
Количество параметров:

$\Theta_{or} + \Theta_{dist}$: ~ 7 параметров

η : можно взять пару звёзд

Первые реконструкции

*Sigaeva et. al. Pulsating Aurora Altitude Estimation from the PAIPS Experiment
Measurements on December 6, 2023*



Другой подход: Вывод на основе симуляции (Simulation Based Inference, SBI)

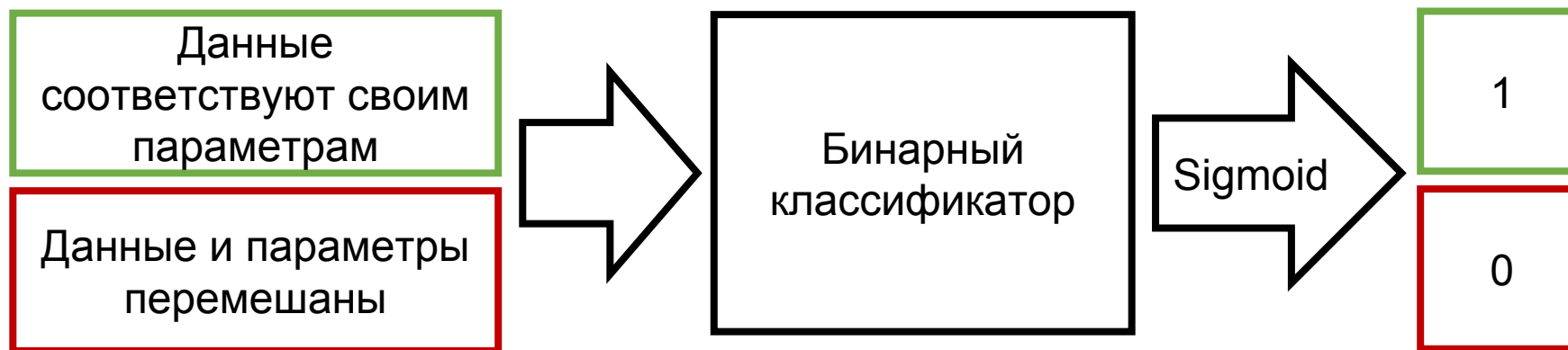
- Можно ли отказаться от распознавания звёзд?
 - Да, но уже потребуются сотни, а то и тысячи звёзд.
- Решение: замена функции правдоподобия на стохастический симулятор.
- Один из подходов: Приблизительный Байесовский Вывод
 - *SBI в задачах анализа динамических изображений многоканального детектора (Р. Сараев, С. Шаракин; DLCP2025)*
- *Нейросетевые методы: Neural Posterior Estimation (NPE), Neural Likelihood Estimation (NLE), Neural Ratio Estimation (NRE)*

Нейросетевая Оценка Отношения (Neural Ratio Estimation, NRE)

- Генерируем набор параметров Θ_i , η_i и запускаем на них симулятор, чтобы создать наборы данных D_i .
- Далее собираем два класса $(\Theta_i; D_i)$ и $(\Theta_i; D_j, j \neq i)$. Далее обучаем на них классификатор

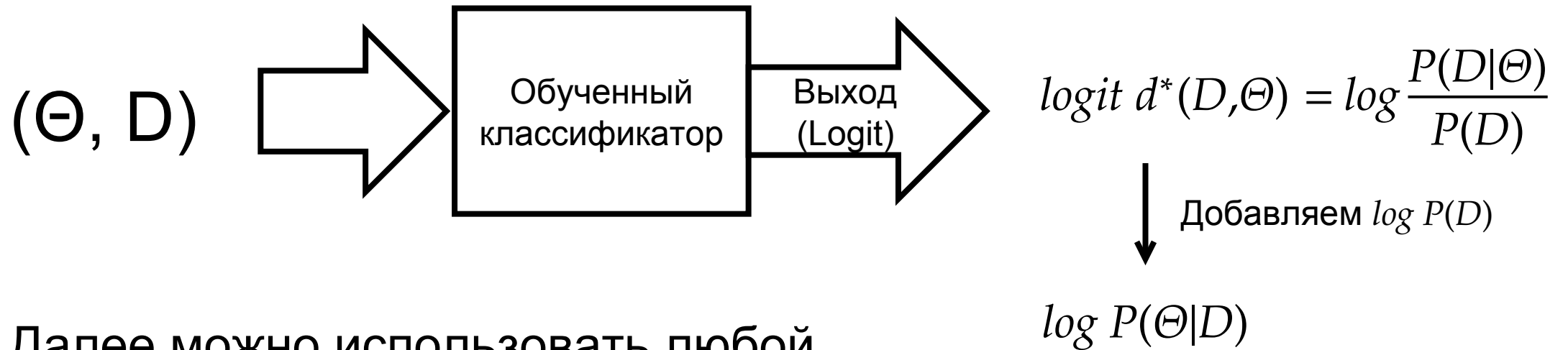
$$D, \Theta \sim P(D, \Theta)$$

$$d^*(D, \Theta) = \frac{P(D, \Theta)}{P(D, \Theta) + P(D)P(\Theta)}$$



$$D, \Theta \sim P(D)P(\Theta)$$

NRE: ВЫВОД



Далее можно использовать любой сэмплер (Metropolis, НМС...)

$$\text{logit } d^*(D, \Theta) = \log \frac{d^*(D, \Theta)}{1 - d^*(D, \Theta)} = \log \frac{P(D, \Theta)}{P(D)P(\Theta)} = \log \frac{P(D|\Theta)}{P(D)}$$

Прокси-параметры

- Обучение нейросети на целом каталоге звёзд (HIP) малоосуществимо
- Решение: разбить задачу на 2 подзадачи. Первая – расчёт положений центров изображений (аналитическая задача), вторая – сравнить их с сигналом (нейросеть)
- У нейросети ограниченное число параметров. Следовательно требуется ввести промежуточные (*прокси*) параметры.

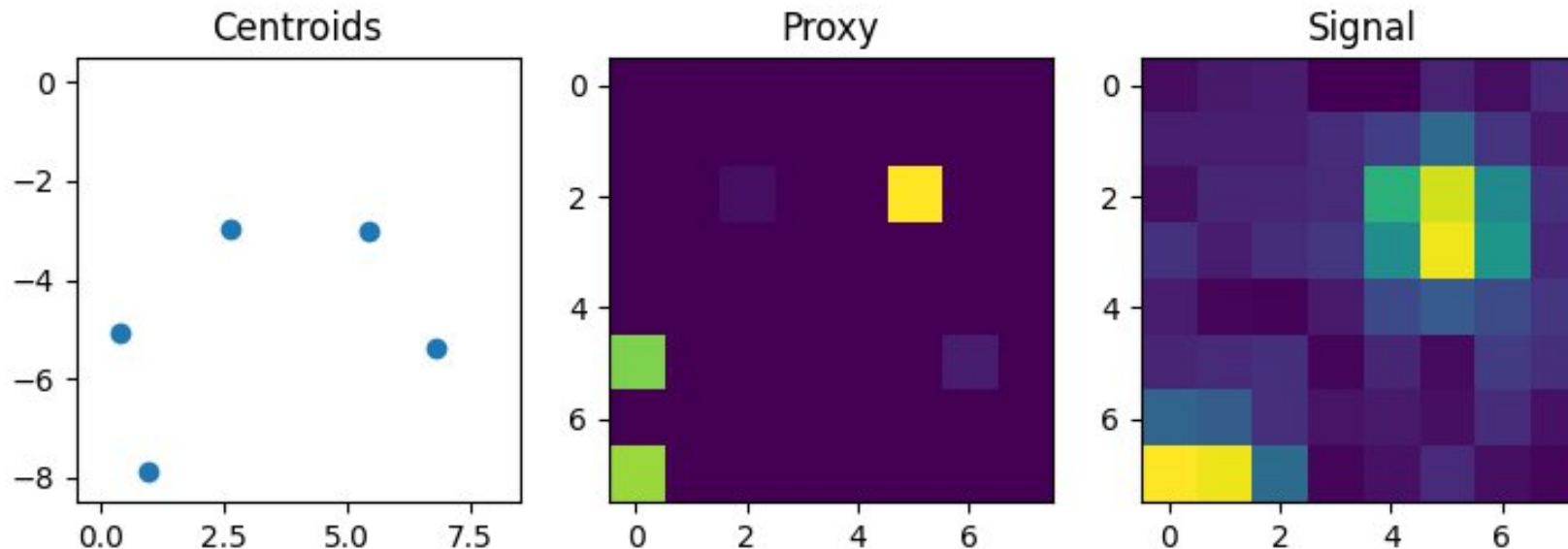
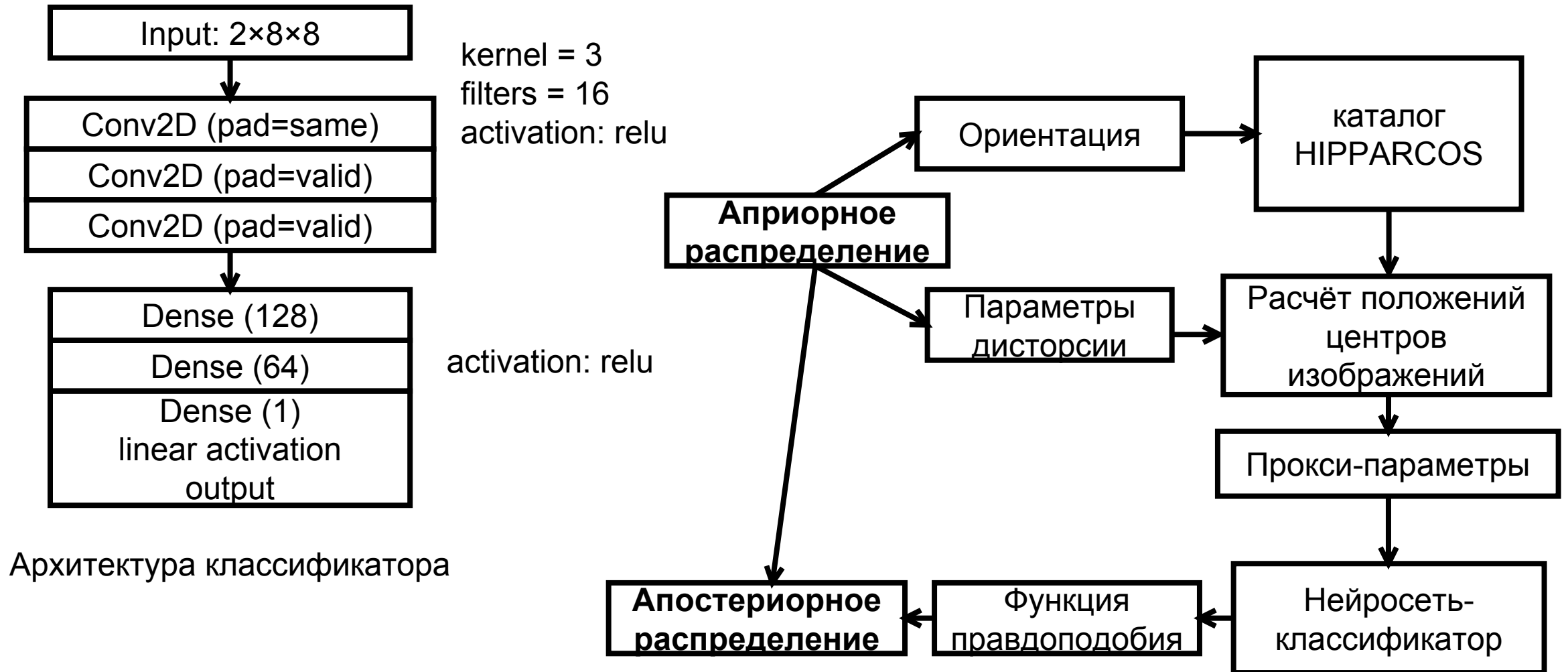
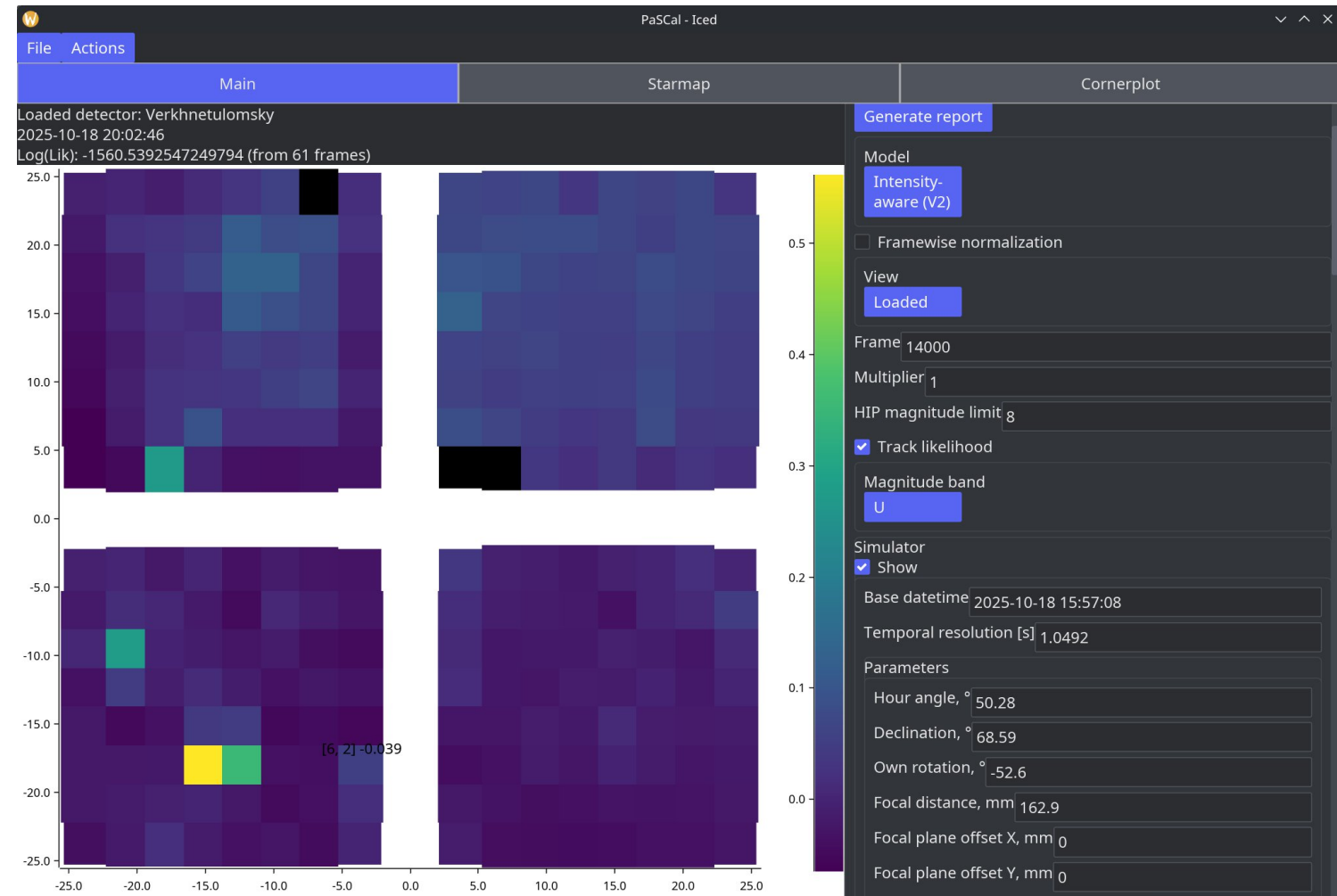


Схема реконструкции



Программное обеспечение PaSCal

- Написано на rust, на кодовой базе PADAMO
- Для предобработки используется PADAMO



Модельный пример

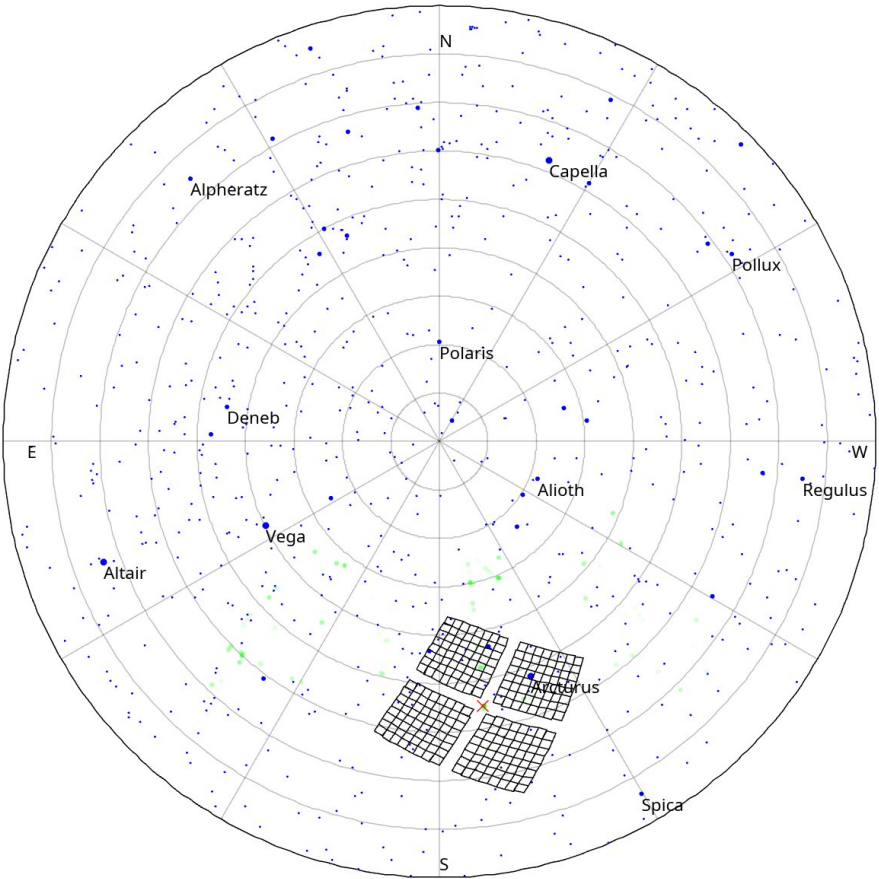
- $F = 100 \text{ мм}$
- Дисторсия отсутствует
- 50 сгенерированных кадров.

Априорное распределение:

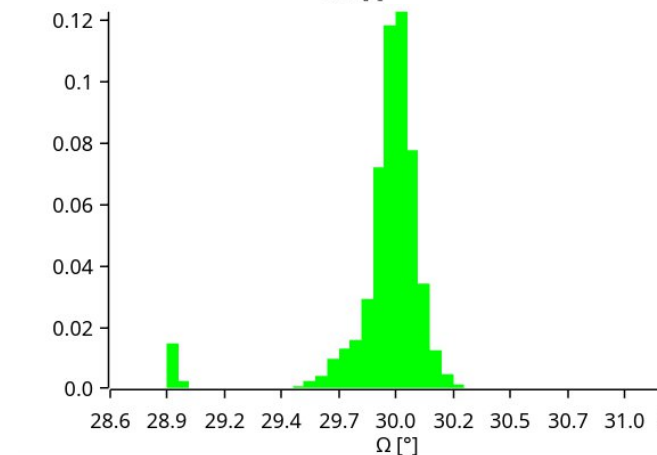
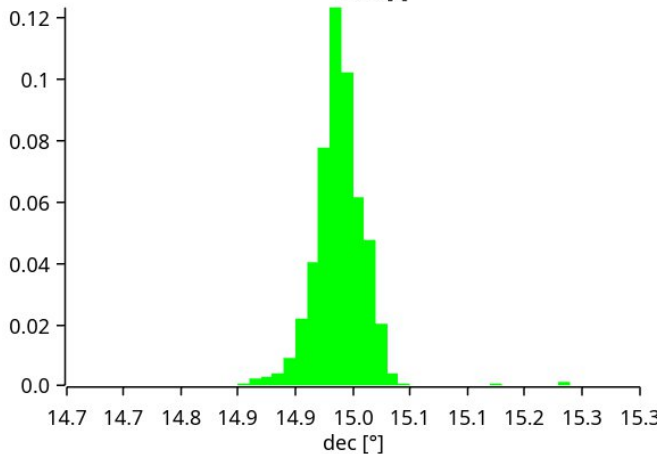
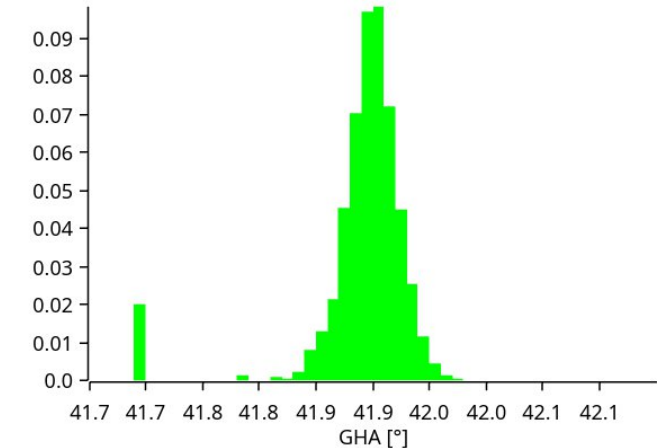
- $h \sim \text{Uniform}[0.0^\circ, 90.0^\circ]$
- $\delta \sim \text{Uniform}[0.0^\circ, 45.0^\circ]$
- $\Omega \sim \text{Uniform}[0.0^\circ, 90.0^\circ]$

Параметр	Истина	Оценка
$h, ^\circ$	42	41.92 ± 0.05
$\delta, ^\circ$	15	15.00 ± 0.07
$\Omega, ^\circ$	30	30.0 ± 0.3

(Медиана $\pm$ MAD)



(70° N, 50° E)



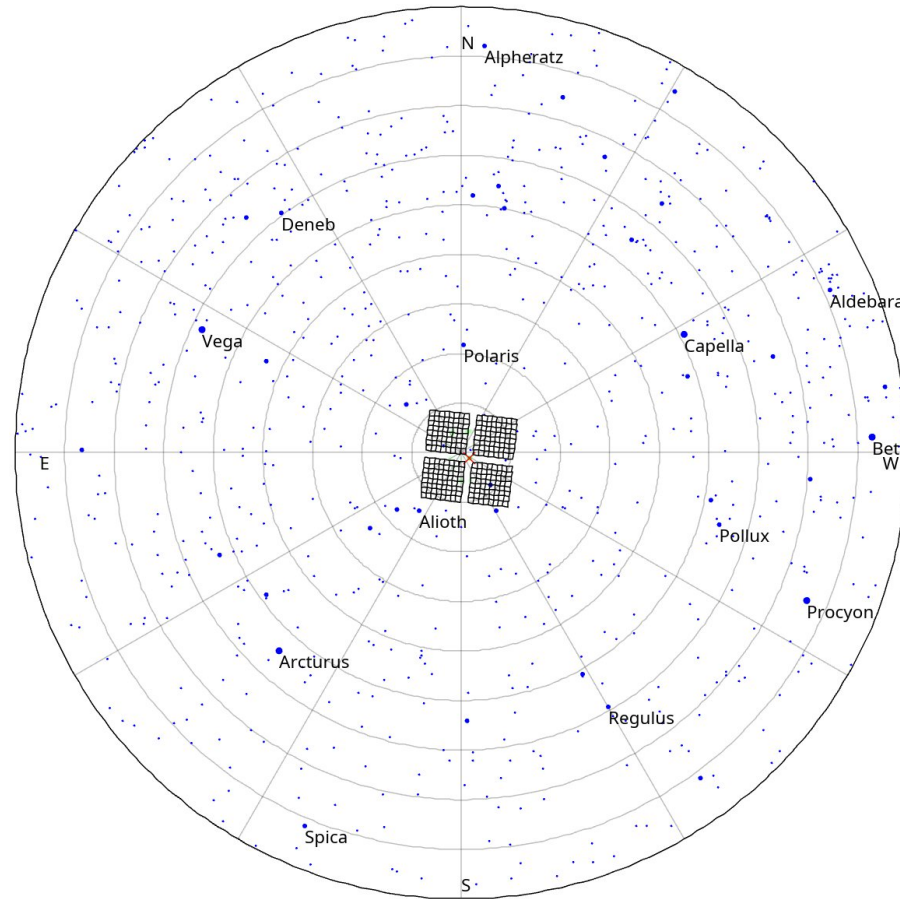
Пример реальной реконструкции: RAIP-V 2023-2024

81 кадр реальных данных.

Априорное распределение:

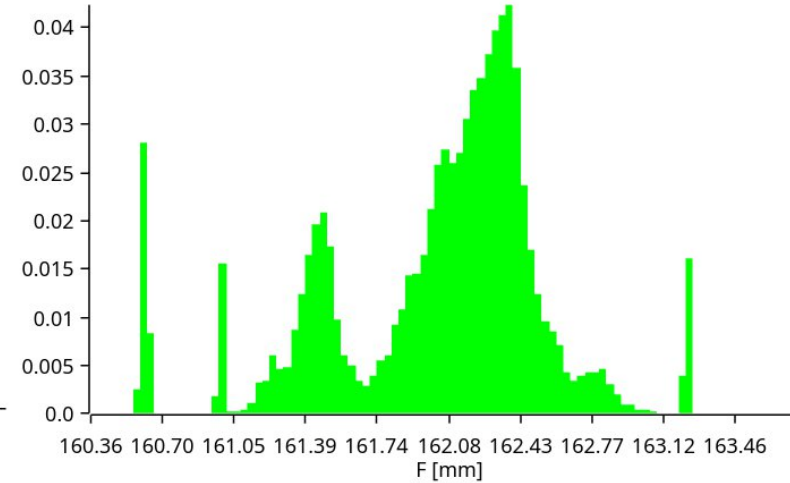
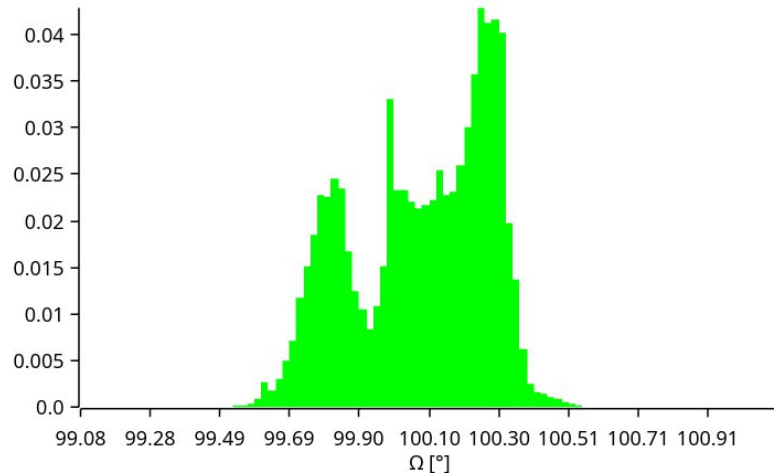
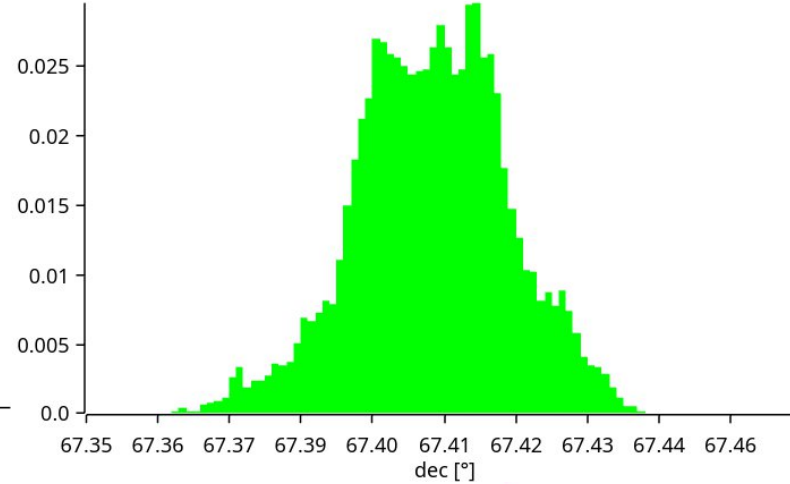
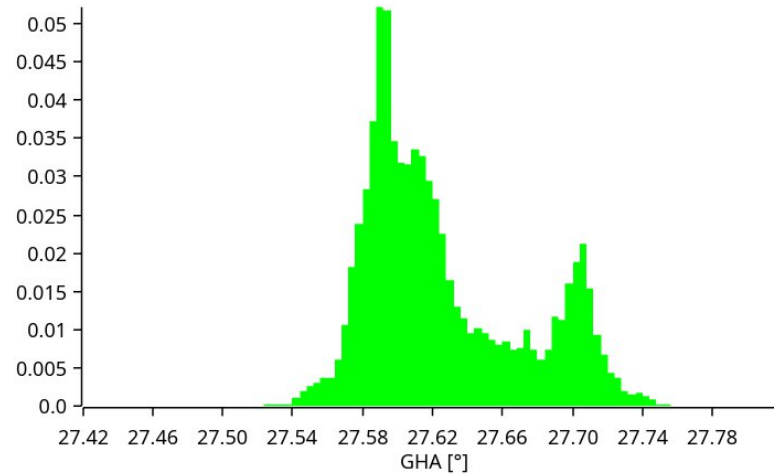
- $h \sim \text{Uniform}[20.0^\circ, 40.0^\circ]$
- $\delta \sim \text{Uniform}[60.0^\circ, 75.0^\circ]$
- $\Omega \sim \text{Uniform}[45.0^\circ, 135.0^\circ]$
- $F[\text{mm}] \sim \text{Uniform}[150, 170]$

Параметр	Оценка
$h, ^\circ$	27.62 ± 0.04
$\delta, ^\circ$	67.409 ± 0.012
$\Omega, ^\circ$	100.1 ± 0.2
F, mm	162.1 ± 0.3



(68.59° N, 31.76° E)

Пример реальной реконструкции: RAIP-V 2023-2024



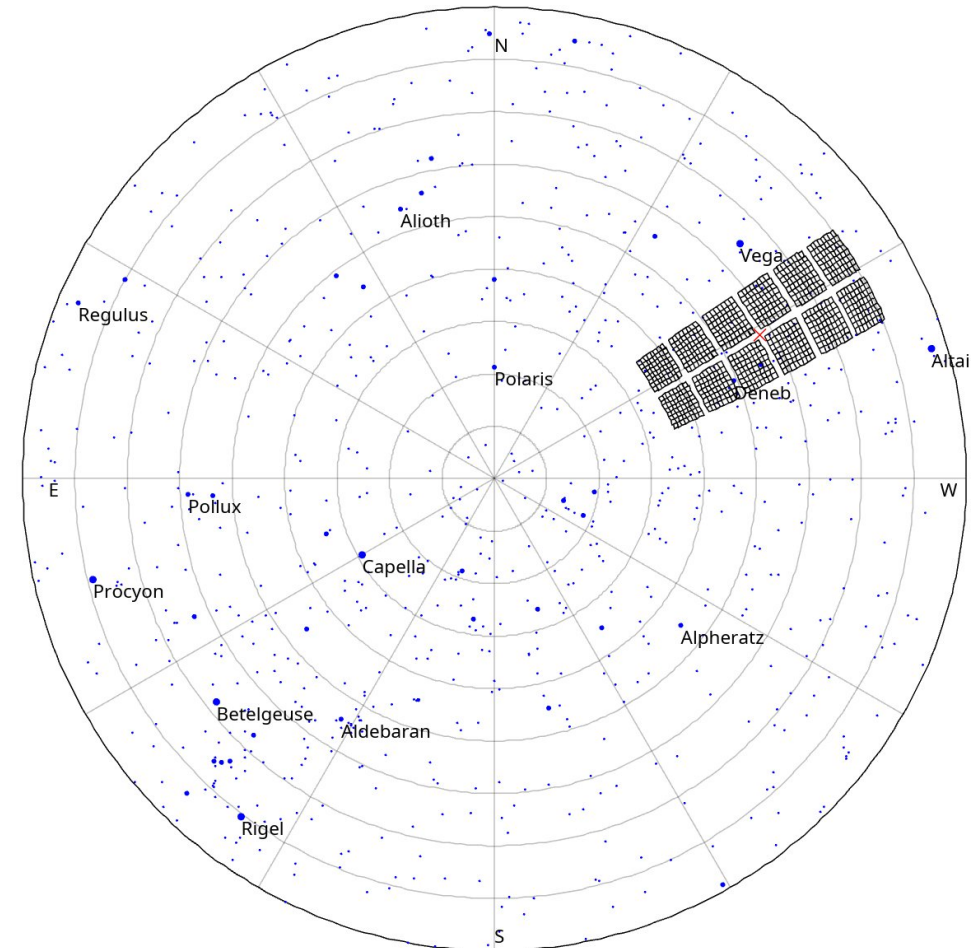
Пример реальной реконструкции: RAIP-L 2023-2024

240 кадров реальных данных.

Априорное распределение:

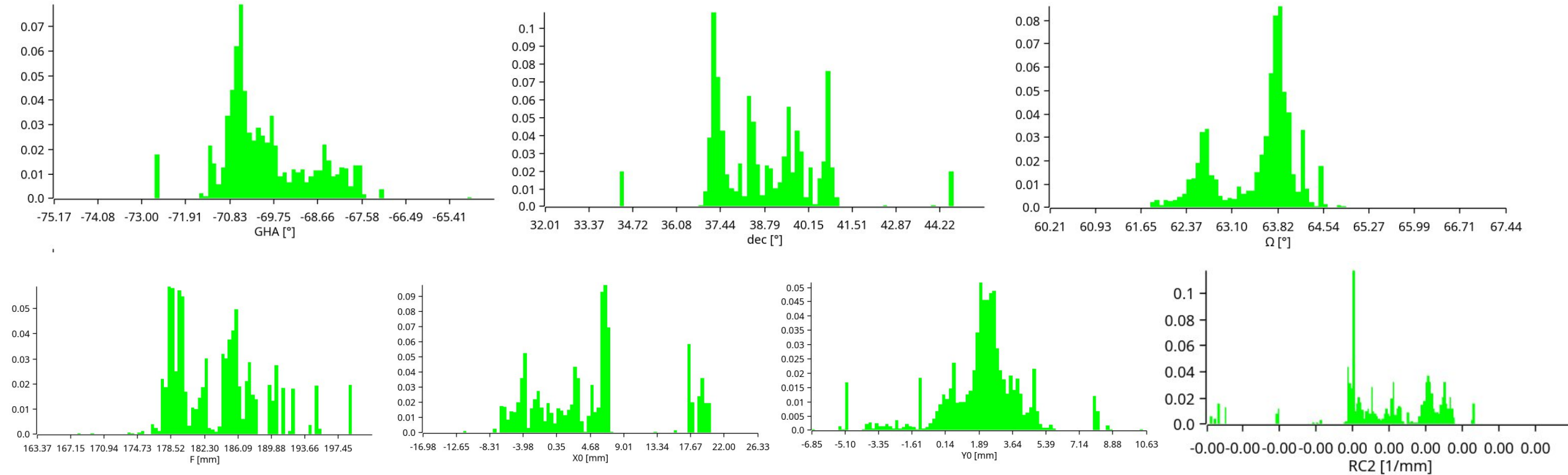
- $h \sim \text{Uniform}[-75^\circ, -55^\circ]$
- $\delta \sim \text{Uniform}[33^\circ, 47^\circ]$
- $\Omega \sim \text{Uniform}[45^\circ, 75^\circ]$
- $F[\text{mm}] \sim \text{Uniform}[150, 230]$
- $\Delta X[\text{mm}] \sim \text{Uniform}[-20, 20]$
- $\Delta Y[\text{mm}] \sim \text{Uniform}[-20, 20]$
- $\alpha[1/\text{mm}] \sim \text{Uniform}[-0.002, 0.002]$

Параметр	Оценка
$h, ^\circ$	-69.7 ± 1.1
$\delta, ^\circ$	38.8 ± 1.4
$\Omega, ^\circ$	63.8 ± 0.7
F, mm	182 ± 3
$\Delta X[\text{mm}]$	4 ± 4
$\Delta Y[\text{mm}]$	1.9 ± 1.7
$\alpha[1/\text{mm}]$	0.0008 ± 0.0005



(67.98° N, 35.08° E)

Пример реальной реконструкции: RAIP-L 2023-2024



Выводы

- Предложенный метод позволяет восстановить ориентацию прибора с достаточно высокой точностью
- Модель ещё достаточно грубая для оценки параметров дисторсии
 - Требуются альтернативные наборы прокси-параметров

Спасибо за внимание!