

Определение нижней границы облачности по стереоизображениям

Устимов И.А.

Кафедра математического моделирования и информатики

Июнь 2026

План доклада

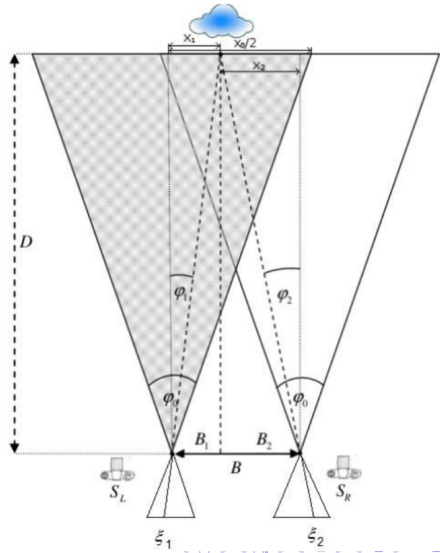
- 1 Геометрическая модель
- 2 Калибровка по солнцу
- 3 Поиск соответствий
- 4 Кластеризация
- 5 Проблемы покадрового подхода
- 6 Пространственная фильтрация
- 7 Временной фильтр Калмана
- 8 Анализ временных сдвигов
- 9 Смещение высотомера
- 10 Заключение

Стереопара: геометрия и формула высоты

Две камеры с параллельными осями в зенит, база B , угол обзора ϕ_0 , облако на высоте D . В пиксельных координатах ξ :

$$D = \frac{B\xi_0}{2 \operatorname{tg}(\phi_0/2)|\Delta\xi|}, \quad \Delta\xi = \xi_1 - \xi_2$$

Fisheye ($\phi_0 = 180^\circ$, $B = 45$ м): $D = \frac{\xi_0 \cdot B}{\pi \cdot |\Delta\xi|}$, 1 пикс ≈ 30 м



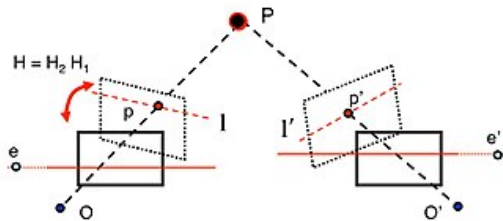
Аффинная калибровка по солнцу

Проблема

Формула требует **строго параллельных** оптических осей. В реальности — всегда есть взаимный поворот и сдвиг камер.

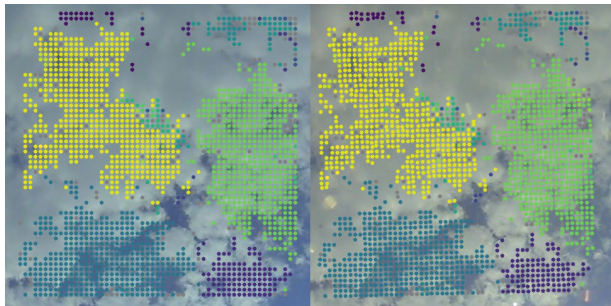
Решение: аффинное преобразование H , приводящее снимки к совмещённым осям. Калибровка — по солнцу (бесконечно удалённый объект; при совмещённых осях его координаты на обоих снимках совпадают).

Порядок обработки: изображение №1 аффинно преобразуется $\rightarrow$ №1'; затем ищутся соответствия между №1' и №2.



LoFTR (Local Feature TRansformer):

- **Detector-free** — не требует выделения ключевых точек
- ViT-архитектура: патчи $\rightarrow$ эмбединги $\rightarrow$ attention по всему изображению
- Плотные предсказания на малом расстоянии
- Предобучена на больших наборах данных



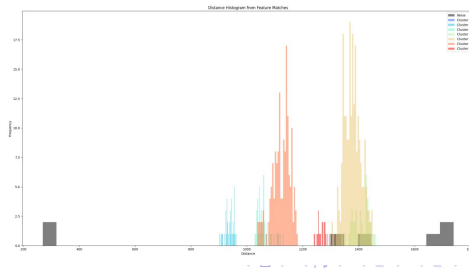
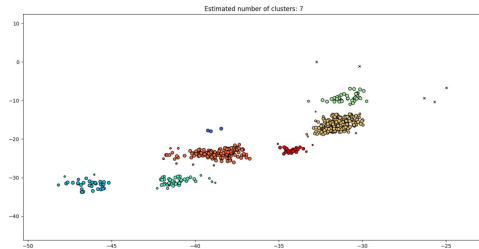
Зелёные линии — найденные LOFTR соответствия. Смещение $\Delta \vec{r} = (x'_1 - x_2, y'_1 - y_2)$; для формулы высоты нужна только x-компонента $\Delta \xi$.

HDBSCAN: группировка по смещениям

Проблема: LoFTR даёт сотни соответствий + ложные мэтчи. Нужно выделить основные облачные слои.

HDBSCAN — иерархическая плотностная кластеризация в пространстве векторов смещений:

- Не требует числа кластеров априори
- Автоматически определяет шум
- Каждый кластер $\leftrightarrow$ свой слой облачности



Что не так с независимым анализом кадров?

Ограничения

- Каждый кадр обрабатывается **независимо** — нет памяти
- **Скачки высоты**: до 500 м за 10 с (~ 50 м/с — нереалистично)
- **Низкая автокорреляция**: $r_{\text{auto}} \approx 0.11$ (5 ч) — ряд физически несогласован
- Пространственная неконсистентность: точки с одинаковым смещением могут быть из разных участков неба $\rightarrow$ «паразитные» кластеры

Необходимы:

- 1 Пространственная фильтрация кластеров
- 2 Временной фильтр

Пространственная фильтрация кластеров

HDBSCAN кластеризует по смещению, но **не проверяет** физическую связность точек в плоскости изображения.

Три стадии проверки:

- 1 **DBSCAN-субкластеризация** ($\varepsilon = 30$ px) — отсев пространственно разрозненных групп
- 2 **Проверка плотности** (ConvexHull, $\rho_{\min} = 0.002$ pts/px²) — отсев «пылевых» кластеров
- 3 **Согласованность смещений** ($K = 5$ соседей) — «близкие в изображении $\Rightarrow$ близкие по смещению»

Результат: отсеивается 15–25% кластеров, повышается чистота входа временного фильтра.

Постановка задачи временной фильтрации

Дана последовательность зашумлённых оценок высоты $\{z_t\}_{t=1}^T$ по каждому кадру. Соседние оценки содержат выбросы (скачки до 500 м за 10 с). Требуется получить сглаженную траекторию, согласованную с физикой. Модель эволюции — равномерное движение:

$$h_{t+1} = h_t + \dot{h}_t \Delta t, \quad \dot{h}_{t+1} = \dot{h}_t$$

Задача: восстановить скрытое состояние $x_t = [h_t, \dot{h}_t]^\top$ при неизвестной дисперсии шума и выбросах.

Фильтр Калмана: модель и результаты

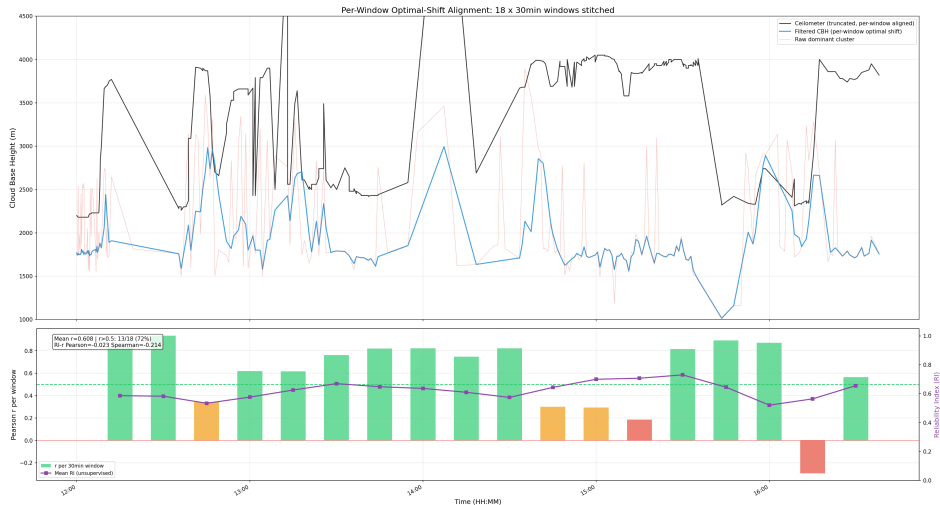
Модель процесса:

$$x = [h, \dot{h}]^T, \quad F = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Отличительная особенность: адаптивная настройка шума измерений R по величине невязки $|z - \hat{x}^-|$ — при малой невязке фильтр доверяет измерению, при большой (выброс) — предсказанию.

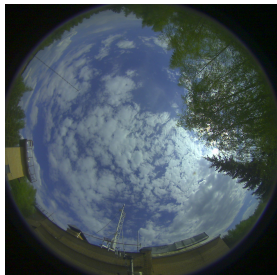
Метрика	Исходные	После фильтра	Улучшение
Средний перепад $ \Delta h $ (10 с)	515 м	120 м	в 4.3 раза
Автокорреляция (5 ч)	0.11	0.90	в 8.0 раз
Средняя r (30-мин окна)	0.55	0.61	+11%
Доля окон с $r > 0.5$	61% (11/18)	72% (13/18)	—
Максимальная r в окне	0.88	0.94	—

Сшитый временной ряд: 30-минутные окна



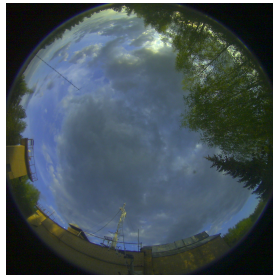
Примеры кадров

12:00, $r = 0.74$



Однородная облачность;
однозначное смещение.

16:30, $r = 0.66$



Многослойная
облачность; несколько слоёв с разной скоростью.

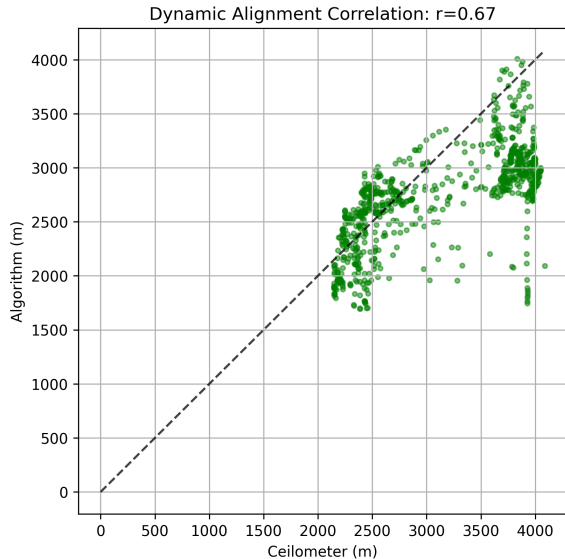
Динамический временной сдвиг

Проблема: ветер сносит облака между моментами измерений алгоритма и высотомера — возникает переменный временной лаг, разрушающий корреляцию.

Метод: разбиение временного ряда на скользящие окна, в каждом окне подбирается оптимальный глобальный сдвиг Δt , максимизирующий r Пирсона:

$$\Delta t^* = \arg \max_{\Delta t} |\text{corr}(H_{\text{ceilo}}(t), H_{\text{algo}}(t + \Delta t))|$$

Физический смысл Δt — прокси угла сноса ветра: $\Delta t = \frac{D}{V} \cos \theta$.

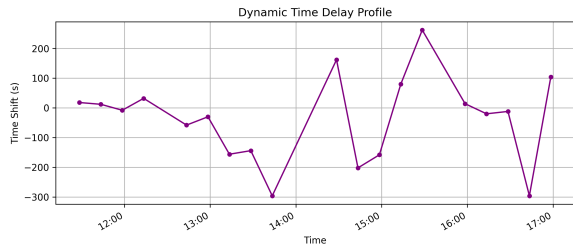


Профиль динамического сдвига

Скользящее окно 5 минут, поиск ± 300 с. Сдвиг Δt меняется от -240 до $+170$ с в течение дня — отражает смену направления и силы ветра.

Результат: после динамической компенсации сдвига:

- Средняя r (30-мин окна): 0,61
- 72% окон с $r > 0,5$
- $\max r = 0,94$



ДОЛ-2 — лазерный облакомер (датчик высоты облаков):

- Источник: полупроводниковый импульсный лазер
- Принцип: измерение обратно рассеянного зондирующего импульса
- Диапазон: 10–3000 м
- Погрешность: ± 10 м (до 100 м), $\pm(5 + 0,05H)$ м (100–3000 м)
- Частота: 1 измерение / 15 с

Систематическое завышение:

- Отражённый сигнал достигает порога детекции лишь на некоторой глубине внутри облака
- Измеряется **оптическая**, а не геометрическая граница
- Стереосистема измеряет **геометрическую** границу — по рассеянному солнечному свету

⇒ **Стереометод и высотомер измеряют принципиально разные величины. Этим объясняется систематическое вертикальное смещение между рядами.**

- 1 **Стереометод с fisheye-камерами** даёт оценку геометрической НГО, принципиально отличную от оптической оценки высотомера
- 2 **Корреляция с высотомером** — в 72% (13 из 18) 30-минутных окон $r > 0.5$; в остальных окнах — многослойная облачность и смена направления ветра
- 3 **Фильтр Калмана** снижает перепады высоты в 4.3 раза, повышает автокорреляцию с 0.11 до 0.90 — ряд становится физически согласованным
- 4 **Пространственная фильтрация** отсеивает 15–25% нефизичных кластеров до подачи в трекер
- 5 **Ограничения:** калибровка нестабильна во времени (температурные деформации); при сплошной облачности без текстурных особенностей метод не работает

Вопросы?