

Семинар ЛКЛПВЭ

Проект RAIPS: Задачи на 2025 г.
Группа байесовского анализа
трековых данных
Шаракин С., Сараев Р.

3.1. План работ на 2025 год

- 4) Создание ПО для анализа стерео-данных. ПО должно позволить обнаруживать соответствующие изображения локализованных в пространстве объектов в двух детекторах, а также создавать модельные события в виде отклика детектора(ов) на свечения с параметризованным пространственно-временным паттерном.

- 5) Разработка и программная реализация алгоритмов байесовской реконструкции 3D-трековых событий: стерео-метеоров, треков ШАЛ и релятивистских пылинок.

3.2. Ожидаемые в конце 2025 г. результаты

4) Создано и протестировано на реальных и модельных примерах ПО по анализу стерео-данных. Функционал ПО должен осуществлять **привязку к 3D-координатам**, формировать **синхронизированные анимированные изображения**, применять к данным **временные, пространственные и пространственно-временные фильтры**, а также создавать **модельные события** в виде отклика двух и более детекторов.

5) Реализованный алгоритмов байесовской реконструкции 3D-трековых событий должен быть протестирован на модельных примерах событий типа **стерео-метеор, треки ШАЛ** и **релятивистской пылинки** для разных конфигураций детекторов.

Байесовская парадигма

- Есть *данные* Data, чтобы **извлечь** из них полезную **информацию**, надо выбрать *модель* явления M (и процедуры измерения!).
- Сложные явления требуют **сложных моделей**.
- Сложные модели имеют большое число параметров Θ , многие из которых **обладают значительной степенью неопределенности**.
- Наиболее последовательный подход формулировки моделей с большой неопределенностью – **Баейсовское (вероятностное) моделирование**. Решение обратной задачи — BI.
- **Bayesian Inference** (BI): $p(\Theta | \text{Data}, M) \sim p(\text{Data} | \Theta, M) * p(\Theta, M)$

ВАЖНО:

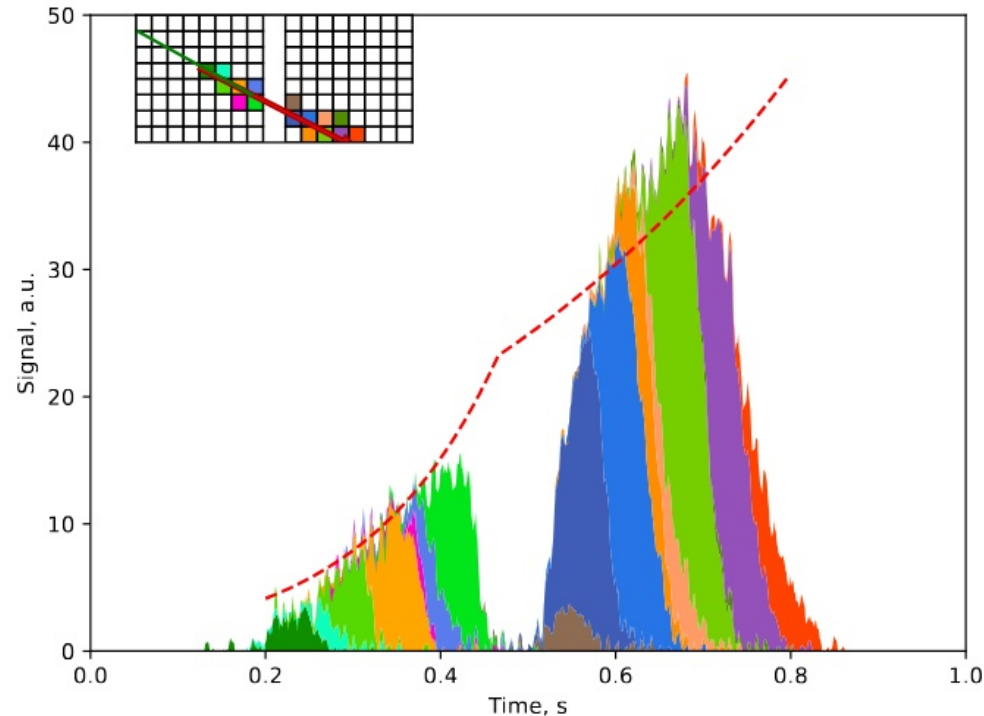
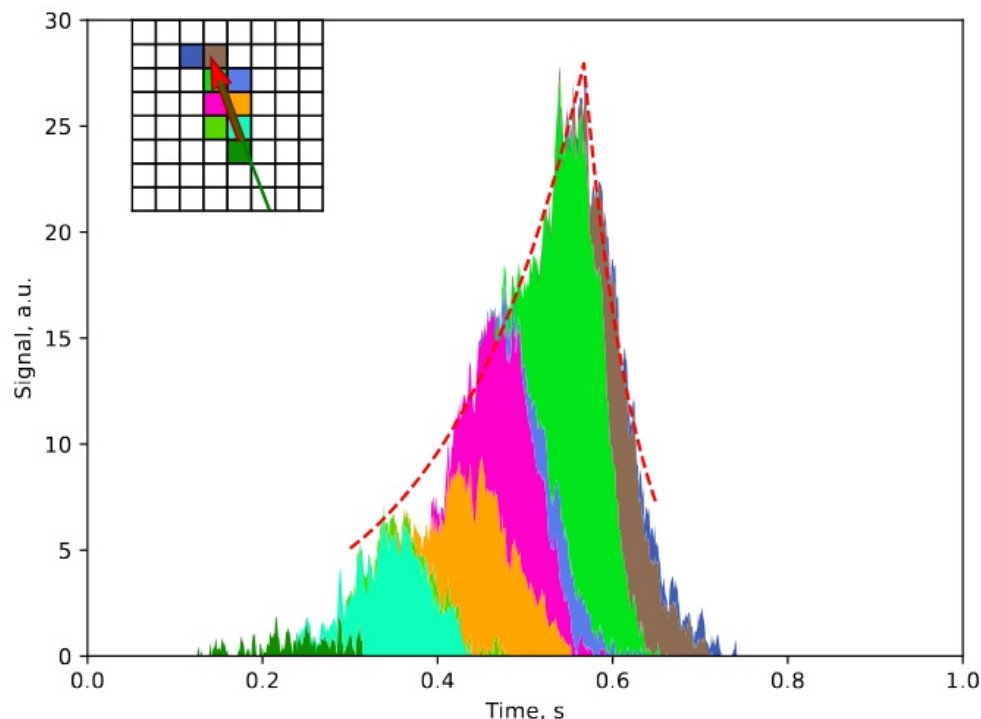
Модель $M(\Theta)$ включает в себя и процедуру измерения. Усложнение модели может вестись с акцентом на детализацию либо самого изучаемого явления, либо детализацию измерения.

Байесовская реконструкция: 2D vs. 3D-треки

- *Предпосылки:* Идеальная оптика (Линза, Обскура,...) преобразует прямолинейный 3D-траекторию в 2D-отрезок на ФП (“трек”).
- *Проблема:* излучение 3D-источника $I_s(t)$ трансформируется сложным образом при распространении в атмосфере.
- *ТЕ (упрощенная модель):* Если нас интересует *высокоточная реконструкция кинематики* 3D-трека, а информация о фотометрии (*динамика*) нам нужна лишь как вспомогательная, то можно параметризовать 2D-трек “грубым” профилем кривой свечения $I_{LC}(t)$.

Пространственно-временное супер-разрешение: цель профиля кривой свечения (даже грубого) — передать информацию из данных высокого временного разрешения в данные низкого пространственного разрешения. (Естественно, качество такого передатчика зависит от точности модели.)

Статья “Метеоры Туломы”



Публикация: ISSN 0010-9525, Cosmic Research, 2025, Vol. 63, No. 5, pp. 517–530. © Pleiades Publishing, Ltd., 2025. Bayesian Reconstruction of Meteors with the PAIP-V Multichannel Detector, S.Sharakin, R.Saraev

ВАЖНО: грубый профиль – не означает его отсутствие! Грубый профиль вводит в вероятностную модель корреляции между параметрами, и тем самым позволяет модели эффективнее извлекать информацию из данных. В том числе и кинематическую!

Усложнение 2D-моделей

- *Модель 0*: равномерный/равноускоренный 2D-трек,

$$\Theta(9 \text{ параметров}) = \{ \boxed{T_0, \mathbf{R}_0, \mathbf{U}_0, A_0}, \quad \boxed{l_{\text{peak}}, \tau_r, \tau_d} \}$$

2D-кинематика Динамика: грубый LC-профиль

- *Модель 1*: равноускоренный 3D-трек, спроецированный на ФП,

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_0 + \frac{\mathbf{U}_0 T(1 + \alpha T)}{1 + \nu T(1 + \alpha T)}, \quad \mathbf{U}_0 = \nu(s \tan \theta - \mathbf{R}_0), \quad \nu \equiv \frac{v \cos \theta}{r_0 \cos \gamma_0}, \quad \alpha \equiv \frac{a}{2v}$$

$$\mathbf{R}(T) \approx \mathbf{R}_0 + \mathbf{U}_0 T + \mathbf{A}_0 T^2 / 2 \quad \mathbf{A}_0 = 2(\alpha - \nu)\mathbf{U}_0 \quad \text{2D-ускорение } A_0 \text{ чувствительно лишь к комбинации 3D-параметров } \alpha \text{ и } \nu$$

$$\Theta_{\text{kin}}(6) = \{T_0, \mathbf{R}_0, \mathbf{U}_0, A_0\} \text{ vs. } \Theta_{\text{kin}}(7) = \{T_0, \mathbf{R}_0, \mathbf{U}_0, \nu, \alpha\} \text{ vs. } \Theta_{\text{kin}}^{3D}(8) = \{t_0, r_0, \gamma_0, \psi_0, \theta, \varphi, \nu, a\}$$

- *Модель 2*: релятивистские треки (ШАЛ, пылинки,...): 6 параметров ($v=c!$)

В случае ШАЛ кинематических параметров 2D-модели достаточно, чтобы восстановить ось ШАЛ. Но динамические (nuisance) параметры $\Theta_{\text{dyn}} \{ l_{\text{peak}}, \tau_r, \tau_d \}$ позволяют сделать это точнее!

N-TE, R-TE, U-TE

- T-transform: t (source time) \rightarrow T (detector time)

- R(elativistic)-TE

$$\omega r = \frac{v \sin \chi}{1 + \frac{v}{c} \cos \chi}$$

χ - угол между направлением на источник и его скоростью

- N-TE ($v \ll c$) и U-TE ($v=c$)

ω – угл. скорость смещения направления на источник (в детекторном времени!)

$$\omega r / v = \sin \chi$$

$$\omega r / c = \tan(\chi/2)$$

- Модель становится существенно *нелинейной*

$$R - R_0 = \frac{2CU_0 r_0 / c}{1 + \frac{2}{[1 + \rho_0^2 - \rho_0 u_0 \cos \delta_0]^2 - u_0^2} \frac{1}{\zeta} \frac{C + \zeta/2}{1 + \zeta/2}}$$

$$\zeta \equiv cT / r_0$$

нормированное время

$$C = \frac{1 + \cos \chi_0}{2} = \frac{(1 + \rho_0^2)^2}{(1 + \rho_0^2)^2 - u_0^2 \rho_0^2 \cos^2 \delta_0 + u_0^2}$$

Нелинейность не означает, что-то плохое, это лишь говорит о том, что лежащие в основе большинства оптимизационных (χ^2) алгоритмов допущения о гауссовости ошибок могут быть сильно нарушены!

ВАЖНО!

3D-tracks...

- **EAS** ($v=c$):

Generator: 0) Параметризация+Идеальная оптика, 2) ESAF Simu

Interpretation: 0) 2D-model (BI), 1) 3D-model with ideal detector (BI),
2) 3D-model with realistic detector (SBI)

- **Relativistic Dust Grain** (?)

- **Nuclearites** (ESAF)

- **Stereo-meteors**: 0) Bayesian Model Formulation, 1) Simple Generator,
2) Simple BI Implementation (2D-stereo), 3) 3D Stereo Model...

Кинематика общая, а динамика раздельная

2D-stereo: Track1 + Track2 \Leftrightarrow 3D Track, but 2 different Dynamics (or with $\sim 1/r^2$ effects)

3D-stereo: Data1 + Data2 \Leftrightarrow Kinematic+Dynamic (even with SBI)

И кинематика, и динамика общие

Стерео-метеоры: Модель

- Правдоподобие факторизовано по данным, но зависит от одних и тех же параметров Θ
- Фотометрия учитывает 3 главных эффекта (LC f, $1/r^2$ и рассеяние η)
- При наличии в прайор может быть передана дополнительная информация (вероятностная ли детерминистическая)

$$p(D | \Theta_{\text{kin}}, \Theta_{\text{dyn}})$$

$$\propto \prod_{k=1}^K p(D_{(1)} | \mathbf{R}_{(1)k}, I_{(1)k}) p(D_{(2)} | \mathbf{R}_{(2)k}, I_{(2)k})$$

$$\mathbf{R}_{(n)k} = \mathcal{O}_{(n)} \left[\vec{r}_0 + \vec{v} t_k - \vec{r}_{(n)d} \right]$$

$$I_{(n)k} = f(t_k | \Theta_{\text{dyn}}) \eta \left(\left| \vec{r}_0 + \vec{v} t_k - \vec{r}_{(n)d} \right| \right)$$

$$p(\vec{v}, \vec{r}_0)$$

$$= p(v | v_{\text{sh}}, \sigma_v) p(\vec{n}_v | \vec{n}_{\text{sh}}, \sigma_{\text{sh}}) p(H_0 | H_{\text{in}}, \sigma_H) p(\vec{n}_r)$$

Стерео-Метеоры: ПОИСК

- *Проблема 1.* Мало (совместных) ясных ночей (Clear Nights, Clear Sky, требуется отбор).
- *Проблема 2.* Сигнал в PAIP-L заметно слабее: $\sim 1/r^2$ (~ 2), PSF (дефокусировка), наводки 100 Гц, низкая эффективность оптики (?), повышенный фон неба (?) vs. Увеличение площади светосбора в 25 раз
- *Проблема 3.* Общее эффективное FoV не так уж велико (особенно с учетом разрывов метеора между MAPMT).
- *Проблема 4.* Сильная плавающая де-синхронизация (Season-3 ~ 10 s, Season-4 - ?).
- ***Проблема Главная:*** нехватка времени и рук! (Ищем помощников!)

Clear Sky – Season-3: <https://uhecr.sinp.msu.ru/clear-sky-database.html>

Журнал – Season-3: <https://disk.360.yandex.ru/edit/d/mf1tJJbVUdtuczBdoogz8yPegnqahzm72s0qolz-cKg6UElfRS1HWHRQZw>

Журнал – Season-4: <https://disk.360.yandex.ru/edit/d/mf1tJJbVUdtuczBdoogz8yPegnqahzm72s0qolz-cKg6UFV5Mm5uUjRDQQ>

Видеокамеры: <http://aurora.pgia.ru:8071/?p=2>

PADAMO-STEREO + STEREO-METEORS

- Слово предоставляется Роману Сараеву!