

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ НАВЕДЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ЧЕРЕНКОВСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ TAIGA

*Д.П. Журов*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Атмосферные черенковские телескопы TAIGA-IACT являются частью гибридного экспериментального комплекса TAIGA, расположенного в 50 км от озера Байкал в Тункинской долине, республика Бурятия. Для обеспечения работы телескопов требуется с высокой точностью определять направление телескопа и положение источников на камере. Система позиционирования телескопа состоит из шаговых двигателей, датчиков положения осей и CCD камеры, установленной на тарелке телескопа. Положение телескопа определяется с помощью датчиков положения осей и применения модели наведения, а также с помощью астрометрии звездного участка снимка CCD камеры. Положение источников на камере телескопа рассчитывается с помощью модели камеры и оцененному направлению телескопа. Угол поворота фокальной плоскости телескопа рассчитывается исходя из параметров модели наведения телескопа. В данной работе представлены разработанные модели и методы, используемые для наведения телескопов TAIGA-IACT.

*Ключевые слова:* модель наведения телескопов; IACT; эксперимент TAIGA.

### Введение

Обсерватория TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) [1,2] предназначена для гамма астрономии высоких энергий и физики космических лучей с применением гибридного подхода к регистрации ШАЛ [2]. Этот подход сочетает регистрацию ШАЛ различными системами детектирования: массивом широкоугольных детекторов TAIGA-HiSCORE [3] и атмосферными черенковскими телескопами TAIGA-IACT [4]. С 2020 года на площадке TAIGA установлены и работают два телескопа IACT. Третий телескоп будет введен в эксплуатацию в 2021 году [1]. TAIGA-IACT имеет альт-азимутальную монтировку и камеру в фокусе сегментированного рефлектора диаметром 4,3 м, выполненного в дизайне Дэвиса – Коттона. Фокусное расстояние – 4,75 м. Камера, состоящая из ФЭУ и конусов Уинтсона. Поле зрения телескопа –  $9,6^\circ$ , размер пикселя  $0,36^\circ$  [1].

Система приводов телескопа состоит из гибридных шаговых двигателей, датчиков положения и контроллера управления. Необходимо обеспечить точность привязки проекции точечного источника на камеру телескопа к небесным координатам не хуже 2 угловых минут. Устройство камеры телескопа не позволяет проводить астрометрию по звездам напрямую, поэтому для проведения измерений на тарелке возле зеркал установлена CCD камера, которая фиксирует на одном изображении область неба с полем зрения телескопа и саму камеру телескопа, на которой располагаются позиционные светодиоды, установленные по периметру. Они предназначены для измерения положения камеры телескопа на изображениях CCD камеры [5]. Для проведения калибровочных измерений со звездами внутри камеры телескопа за защитным

оргстеклом установлен специальный белый экран, который оснащен двигателем, что позволят сворачивать и разворачивать его дистанционно.

В данной работе представлены модели и методы, используемые для наведения атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT.

## 1. Математическая модель камеры телескопа

Математическая модель камеры телескопа может быть записана как [6]:

$$z_c(x_c, y_c, 1)^T = K [ R T ] (x, y, z, 1)^T, \quad (1)$$

где скаляры  $x_c, y_c$  – положение проекции объекта на фокальной плоскости,  $z_c$  – масштабный коэффициент,  $K$  – матрица внутренней калибровки камеры,  $K \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ,  $R$  – ориентация камеры в пространстве,  $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ,  $T$  – положение камеры в пространстве,  $T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ ,  $[ R T ] \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$ ,  $x, y, z$  – положение объекта в пространстве. При наблюдении удаленных источников телескопом, переходя к сферической системе координат, модель может быть переписана как:

$$z_c \cdot (x_c, y_c, 1)^T = K \cdot R_c \cdot R_t \cdot (\cos(\phi_s) \cos(\theta_s), \sin(\phi_s) \cos(\theta_s), \sin(\theta_s))^T, \quad (2)$$

где углы  $\phi_s$  и  $\theta_s$  – положение источника по азимуту и высоте,  $R_t$  и  $R_c$  ориентация телескопа и поворот системы координат на фокальной плоскости вокруг оптической оси соответственно:

$$R_t = \begin{bmatrix} \sin(\theta_t) \cos(\phi_t) & \sin(\phi_t) \sin(\theta_t) & -\cos(\theta_t) \\ -\sin(\phi_t) & \cos(\phi_t) & 0 \\ \cos(\phi_t) \cos(\theta_t) & \sin(\phi_t) \cos(\theta_t) & \sin(\theta_t) \end{bmatrix}, \quad R_c = \begin{bmatrix} -\sin(\alpha_c) & \cos(\alpha_c) & 0 \\ \cos(\alpha_c) & \sin(\alpha_c) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где углы  $\phi_t$  и  $\theta_t$  – направление телескопа по азимуту и высоте,  $\alpha_c$  – угол поворота системы координат камеры вокруг оптической оси. Ось  $x$  в пространстве направлена на север, ось  $y$  – на восток, угол  $\phi$  отсчитывается по часовой стрелке, т.е. от севера на восток. Угол  $\alpha_c$  зависит от положения телескопа из-за возможных неточностей конструкции телескопа и может быть рассчитан, используя модель наведения (см. раздел 2.1).

Предполагая, что оптическая ось проходит через центр координат фокальной плоскости и угол между вектором нормали фокальной плоскости и оптической осью пренебрежимо мал, матрицу внутренней калибровки камеры  $K$  можно записать как:

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $f$  – фокусное расстояние телескопа. Для точного расчета используется эффективное  $f^*$  полученное экспериментально, что также согласуется с имитационным моделированием [7].

## 2. Модель наведения

Направление телескопа в горизонтальной системе координат может быть оценено, используя датчики положения осей и добавления коррекций модели наведения.

Коррекции необходимы для прогнозирования отклонений, вызванных разными причинами, наиболее значимыми из которых: смещения нуля датчиков ( $\phi_{offset}$  и  $\theta_{offset}$ ), небольшие наклоны телескопа ( $\tau_{north}$  и  $\tau_{east}$ ), отклонения от перпендикулярности оси высоты относительно оптической оси телескопа ( $\psi_{noe}$ ) и относительно азимутальной оси ( $\psi_{nae}$ ), деформации под действием гравитации ( $\beta$ ). Для учета этих эффектов распространенным подходом является введение функции поправок, которые добавляются к показаниям датчиков:

$$\phi_t^*(\phi_e, \theta_e, \vec{p}_{pm}) = \phi_e + \Delta\phi(\phi_e, \theta_e, \vec{p}_{pm}), \quad \theta_t^*(\phi_e, \theta_e, \vec{p}_{pm}) = \theta_e + \Delta\theta(\phi_e, \theta_e, \vec{p}_{pm}), \quad (5)$$

где  $\phi_t^*$  и  $\theta_t^*$  – функции расчета направления телескопа,  $\phi_e, \theta_e$  – показания датчиков положения,  $\Delta\phi$  и  $\Delta\theta$  – функции поправок,  $\vec{p}_{pm}$  – вектор параметров модели наведения,  $\vec{p}_{pm} = (\phi_{offset}, \theta_{offset}, \tau_{north}, \tau_{east}, \psi_{noe}, \psi_{nae}, \beta, \dots)$ . Функции поправок являются суммой членов с коэффициентами из  $\vec{p}_{pm}$ , вывод может быть найден, например, в [8]. Вектор  $\vec{p}_{pm}$  может быть расширен дополнительными параметрами, как в [9, 10].

Этот подход достаточно прост и легко расширяем, что позволяет подобрать оптимальную модель для различных телескопов, одиноко имеет ряд недостатков, в том числе плохо работает при углах близких к зениту и не позволяет рассчитать угол  $\alpha_c$  поворота фокальной плоскости (см. выражение (3)), что может быть существенным при больших значениях параметров  $\tau_{north}$ ,  $\tau_{east}$ ,  $\psi_{noe}$  и  $\psi_{nae}$ , что также указано в [11]. Расчет угла поворота фокальной плоскости представлен в разделе 2.1.

Для оценки направления телескопов TAIGA-IACT используются следующие функции поправок:

$$\begin{aligned} \Delta\phi(\phi_e, \theta_e) = & \phi_{offset} - \tau_{north} \sin(\phi_i) \operatorname{tg}(\theta_i) - \tau_{east} \cos(\phi_i) \operatorname{tg}(\theta_i) + \\ & + \psi_{noe} \sec(\theta_i) - \psi_{nae} \operatorname{tg}(\theta_i) + p_1 \sin(2\phi_i) + p_2 \cos(2\phi_i) + \\ & + p_3 \sin(3\phi_i) \sin(\theta_i) + p_4 \cos(\phi_i/4) \cos(\theta_i) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta\theta(\phi_e, \theta_e) = & \theta_{offset} - \tau_{north} \cos(\phi_i) + \tau_{east} \sin(\phi_i) - \beta \cos(\theta_i) + \\ & + q_1 \sin(\theta_i) + q_2 \sin(2\phi_i) + q_3 \sin(\phi_i) + q_4 \cos(\phi_i), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\phi_i = \phi_e + \phi_{offset}$  и  $\theta_i = \theta_e + \theta_{offset}$  – несмещенные показания датчиков положения телескопа,  $\phi_{offset}$  и  $\theta_{offset}$  – смещение датчиков положения валов,  $\tau_{north}$  и  $\tau_{east}$  – углы наклона телескопа на север и восток соответственно,  $\psi_{nae}$  – угол отклонения от перпендикулярности оси высоты относительно оси азимута,  $\psi_{noe}$  – отклонения от перпендикулярности оси высоты относительно оптической оси,  $\beta$  – коэффициент прогиба мачт,  $p_1, p_2, p_3, p_4, q_1, q_2, q_3, q_4$  – дополнительные параметры.

## 2.1. Расчета угла поворота фокальной плоскости

Для расчета угла поворота  $\alpha_c$  фокальной плоскости воспользуемся строгой моделью телескопа. Опишем телескоп в предположении небольших наклонов телескопа ( $\tau_{north}$  и  $\tau_{east}$ ), отклонения от перпендикулярности оси высоты относительно оптической оси и относительно азимутальной оси ( $\psi_{noe}$  и  $\psi_{nae}$ ), тогда ось азимута может быть записана как:

$$\vec{a} = R_{\vec{v}_y}(\tau_{north})R_{\vec{v}_x}(\tau_{east})\vec{v}_z, \quad (8)$$

где  $R_{\vec{v}}(\varphi)$  – матрица поворота на угол  $\varphi$  вокруг вектора  $\vec{v}$  (против часовой стрелки смотря в направлении вектора  $\vec{v}$ ),  $R_{\vec{v}}(\varphi) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ,  $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$ ,  $\vec{v}_x, \vec{v}_y, \vec{v}_z$  – единичные

векторы, направленные вдоль осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно,  $\vec{a}$  – ось азимута. Ось высоты  $\vec{e}$  может быть описана как:

$$\vec{e} = -R_{\vec{v}_y}(\tau_{north})R_{\vec{v}_x}(\tau_{east} + \psi_{nae})\vec{v}_y, \quad (9)$$

а направление  $\vec{t}_0$  телескопа при заданных осях:

$$\vec{t}_0 = R_{\vec{v}_y}(\tau_{north})R_{\vec{v}_x}(\tau_{east} + \psi_{nae})R_{\vec{v}_z}(\psi_{noe})\vec{v}_x. \quad (10)$$

Тогда направление телескопа  $\vec{t}$  при повороте по осям можно записать как:

$$\vec{t} = R_{\vec{a}}(\phi_{int})R_{\vec{e}}(\theta_{int})\vec{t}_0, \quad (11)$$

где  $\phi_{int} = \phi_e + \phi_{offset}$  и  $\theta_{int} = \theta_e + \theta_{offset}$  – внутренние координаты телескопа, такие что при  $(\phi_{int}, \theta_{int}) = (0, 0)$ ,  $t = t_0$ . Тогда для расчета угла поворота возьмем вектор  $\vec{g}_0$  как проекцию вектора  $-\vec{v}_z$  на плоскость с нормалью  $\vec{t}_0$ :

$$\vec{g}_0 = (\vec{v}_z \cdot \vec{t}_0) \cdot \vec{t}_0 - \vec{v}_z \quad (12)$$

а угол  $\alpha_c$  поворота камеры рассчитывается, как угол:

$$\alpha_c = \angle(R_{\vec{a}}(\phi_{int})R_{\vec{e}}(\theta_{int})\vec{g}_0, (\vec{v}_z \cdot \vec{t}) \cdot \vec{t} - \vec{v}_z) + \alpha_{c0}, \quad (13)$$

где  $\alpha_{c0}$  – поворот системы координат фокальной плоскости в положении телескопа  $t_0$ . Подобный подход также представлен в [11].

## 2.2. Проведение измерений модели наведения

Измерения для определения параметров модели наведения проводятся регулярно между сезонами наблюдений. Во время измерений внутри камеры в фокусе находится экран. Телескоп наводится последовательно на ряд ярких звезд, меняя источник после серии снимков ССД камеры. По снимкам определяется положения позиционных светодиодов и положение изображения яркой звезды на экране, согласно алгоритму, описанному в [12]. Положение изображения звезды затем преобразуется на фокальную плоскость  $(x_c, y_c)$  (см. (2)).

## 2.3. Оценка параметров модели наведения

Для оценки параметров модели с учетом поворотов фокальной плоскости, решается следующая оптимизационная задача:

$$\sum_{i=1}^N \omega_i^2 \|\mathbf{X}_i^* - \mathbf{X}(\phi_t^*(\phi_{e,i}, \theta_{e,i}, \vec{p}_{pm}), \theta_t^*(\phi_{e,i}, \theta_{e,i}, \vec{p}_{pm}), \phi_{s,i}, \theta_{s,i}, f, \alpha(\phi_{e,i}, \theta_{e,i}, \vec{p}_{pm}))\|^2 \rightarrow \min_{\vec{p}_{pm}} \quad (14)$$

где  $N$  – количество измеренных положений,  $\mathbf{X}_i^* = (x_{c,i}^*, y_{c,i}^*)$  – измеренные положения изображения звезды на фокальной плоскости с помощью калибровочного экрана и ССД камеры; функцией  $\mathbf{X}(\phi_t, \theta_t, \phi_s, \theta_s, f, \alpha)$  обозначен расчет координат  $(x_c, y_c)$  из уравнения (2) по заданному положению телескопа  $(\phi_t, \theta_t)$ , положению источника  $(\phi_s, \theta_s)$ , и углу поворота фокальной плоскости;  $\phi_t^*(\phi_{e,i}, \theta_{e,i}, \vec{p}_{pm})$  и  $\theta_t^*(\phi_{e,i}, \theta_{e,i}, \vec{p}_{pm})$  – оценки модели наведения из выражения (5) по заданным показаниям датчиков положения  $(\phi_{e,i}, \theta_{e,i})$ ;  $\alpha(\phi_{e,i}, \theta_{e,i}, \vec{p}_{pm})$  – расчет угла поворота фокальной плоскости из раздела 2.1. Минимизация проводится методом градиентного спуска.

## Заключение

В работе представлены модель камеры телескопа (2), модель наведения и алгоритм расчета угла приворота фокальной плоскости (13), используемые для работы атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT. Основным результатом работы является алгоритм получения параметров модели наведения по положению яркой звезды на калибровочном экране с учетом вращений фокальной плоскости, вызванными небольшими отклонениями от перпендикулярности осей и наклонами телескопа.

Представленные в данной работе модели и методы реализованы в виде программного комплекса, который используется в работе атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT и позволяет достичь необходимой точности. Результаты, полученные с использованием представленных в данной работе моделей и методов, представлены в [5] и согласуются с данными, полученным по ССД камере, а также дополнительным измерениям с использованием анодных токов на ФЭУ со специальным крестообразным сканированием яркой звезды, в том числе на значительном удалении источника от оптической оси телескопа.

*Работа выполнена на УНУ «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ», поддержана Минобрнауки России (соглашение 13.УНУ.21.0007, государственное задание FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024), РНФ (проект 19-72-20067 (раздел 3), РФФИ (проект № 19-52-44002), грантом ИГУ для молодых ученых № 091-20-308. Автор выражает глубокие благодарности за поддержку, помощь и ценные советы членам коллаборации TAIGA<sup>1</sup> и своему научному руководителю в аспирантуре Сидорову Денису Николаевичу.*

## Литература

1. Budnev, N. TAIGA – an Advanced Hybrid Detector Complex for Astroparticle Physics and High Energy Gamma-Ray Astronomy in the Tunka Valley / N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeev, E. Bonvech, V. Boreyko et al // Journal of Instrumentation. – 2020. – P. C09031.
2. Kuzmichev, L. Experimental Complex TAIGA / L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazykov, M. Blank, A. Borodin // Physics of Atomic Nuclei. – 2020. – V. 83, № 9. – P. 1375–1382.
3. Gress, O. The Wide-Aperture Gamma-Ray Telescope TAIGA-HiSCORE in the Tunka Valley: Design, Composition and Commissioning / O. Gress, I. Astapov, N. Budnev, P. Bezyazeev, A. Bogdanov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2017. – V. 845. – P. 367–372.
4. Sveshnikova, L.G. Detecting Gamma Rays with Energies Greater than 3–4 TeV from the Crab Nebula and Blazar Markarian 421 by Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes in the TAIGA Experiment / L.G. Sveshnikova, M. Blank, A. Bulan, P. Volchugov, N.N. Kalmykov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2021. – V. 85, № 4. – P. 398–401.
5. Zhurov, D. First Results of the Tracking System Calibration of the TAIGA-IACT Telescope / D. Zhurov, O. Gress, D. Sidorov, I. Astapov, P. Bezyazeev // Journal of Physics. – 2019. – V. 1181, № 1. – Article ID: 012045.
6. Forsyth, D.A. Computer Vision: a Modern Approach / D.A. Forsyth, J. Ponce. – Boston: Pearson Education, 2003.

---

<sup>1</sup><https://taiga-experiment.info/members>

7. Grinyuk, A. Monte Carlo Simulation of the TAIGA Hybrid Gamma-Ray Experiment / A. Grinyuk, E. Postnikov, L. Sveshnikova // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2020. – V. 83, № 2. – P. 262–267.
8. Condon, J.J. GBT Pointing Equations / J.J. Condon // *GBT Memos and Reports*. – 1992. – V. 75. – P. 1–15.
9. Mangum, J.G. Evaluation of the ALMA Prototype Antennas / J.G. Mangum, J.W.M. Baars, A. Greve, R. Lucas, R.C. Snel, P.T. Wallace, M. Holdaway // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. – V. 118, № 847. – 2006. – P. 1257–1301.
10. Lew, B. Improving Pointing of Torun 32-m Radio Telescope: Effects of Rail Surface Irregularities / B. Lew // *Experimental Astronomy*. – 2018. – V. 45. – P. 81–105.
11. Wallace, P.T. Rigorous Algorithm for Telescope Pointing / P.T. Wallace // *Advanced Telescope and Instrumentation Control Software*. – 2002. – P. 125–136.
12. Zhurov, D.P. Glare Separation and Parametrization of Images of Stars on the Calibration Screen for Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes TAIGA-IACT / D.P. Zhurov, D.N. Sidorov // *South Ural Youth School of Mathematical Modeling*. – Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2021.

Дмитрий Павлович Журов, аспирант, Институт информационных технологий и анализа данных, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Российская Федерация); младший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутский государственный университет (г. Иркутск, Российская Федерация), sidney28@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 3 сентября 2021 г.*

MSC 03H10

DOI: 10.14529/mmp210409

## MODELING FOR POINTING OF IMAGING ATMOSPHERIC CHERENKOV TELESCOPES IN TAIGA EXPERIMENT

*D.P. Zhurov*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

E-mail: sidney28@yandex.ru

TAIGA-IACT telescopes are Imaging Atmospheric Cherenkov telescopes that are part of the hybrid experimental complex TAIGA, located 50 km from Lake Baikal in the Tunka Valley, Republic of Buryatia, Russia. The telescope operation requires accurate determination of the telescope direction and the position of a source on the camera plane. The telescope positioning system consists of stepper motors, shaft encoders, and a CCD camera mounted on the telescope dish. The position of the telescope is determined using shaft encoders with a pointing model, as well as using CCD camera images by astrometry of the sky region. The positions of sources on the telescope camera are calculated using the camera model and the estimated telescope direction. The telescope focal plane rotation angle is calculated by knowing the telescope pointing model parameters. This paper presents the developed models and methods used for the TAIGA-IACT telescope pointing.

*Keywords: telescope pointing model; IACT; TAIGA experiment.*

*Received September 3, 2021*