

УДК 004.932

## Проект системы координатного обеспечения АСУ облучателя тип 3 РАТАН-600, результаты апробации алгоритма поиска координат на растровом изображении

*В.С. Вакурин, А.А. Стороженко, В.И. Жаров, А.А. Гречкин*

ФГБУН Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика, Российская Федерация  
vvs@sao.ru

Поступила в редакцию 29 сентября 2023 г.

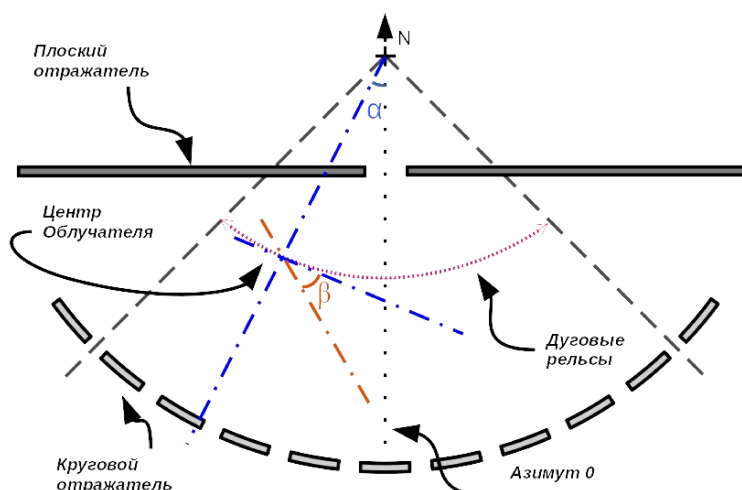
**Аннотация.** В 2019 году на радиотелескопе РАТАН-600 была введена в опытную, а затем и в штатную эксплуатацию новая система автоматического управления (АСУ) облучателя тип 3, что обеспечило новые возможности по управлению параметрами движения элементов облучателя и в целом позволило начать цикл методических работ по внедрению нового режима наблюдений с сопровождением объектов. Для повышения качества сопровождения, внедрения новых автоматизированных режимов наблюдений необходимо интегрировать в АСУ облучателя систему координатного обеспечения. В работе исследованы подходы к решению задачи автоматизированного координатного обеспечения работы облучателя тип 3 радиотелескопа РАТАН-600.

**Ключевые слова:** автоматизация, преобразование Хафа, задача локализации, методы анализа изображений

### 1 Введение

Координатное обеспечение облучателя № 3 радиотелескопа РАТАН-600 относится к известному классу задач координатного обеспечения (Савиных, 2015), сводящихся к установлению взаимоотношений между геодезической и астрономической системами координат. Наблюдатель, находящийся на земле, устанавливает эти отношения с помощью геодезических систем (Максимова, 2013). В процессе наблюдения за астрономическими объектами требуется восстановление астрономических координат по заранее известным соотношениям диаграммы направленности радиотелескопа РАТАН-600 и геодезической координате центра вторичного (приемного) зеркала. Исследовательской проблемой является повышенная точность нахождения текущей геодезической координаты, которая вытекает из этих взаимоотношений, требования повторяемости наблюдений. В задаче наблюдения и сопровождения космических объектов (Солнца) появляется проблема, вызванная противоречием между требуемым оперативным вычислением текущей геодезической координаты при перемещении кабины облучателя и пассажным (неподвижным) характером работы облучателя, первоначально определенными разработчиками телескопа. В частности, в Стороженко и др. (2021) определены задачи как для замыкания обратной связи АСУ движения облучателя (положение облучателя), так и для подсистемы АСУ обеспечения наблюдений (уточнение истинного путевого угла – углового смещения расположения кабины облучателя). В настоящей работе мы исследовали возможные подходы и нашли приемлемое решение этих проблем. Целью работы является создание прототипа системы координатного обеспечения облучателя № 3.

Задача определения геодезических координат может быть сведена до задачи вычисления местных координат (пространственных, прямоугольных) на участке дугового пути движения облучателя № 3 (Максимова, 2013). Необходимая погрешность установки на заданный азимут в пассажном режиме определена как 1 мм (рис. 1). Местная координатная задача может быть поставлена как вычисление относительных координат либо вычисление абсолютных координат (Berka, 1983).



**Рис. 1.** Координатная система кабины облучателя № 3 в антенной системе «Юг+Плоский»,  $\alpha$  – путевой угол (координата центра облучателя на дуговом пути),  $\beta$  – относительный угол разворота кабины

## 2 Решение координатной задачи, локализация координатной метки

Задача координатного обеспечения может быть решена с помощью нахождения абсолютной координаты машиночитаемой метки (задача локализации) в зоне контроля на пути хода облучателя по дуговым рельсам (Atali et al., 2018). Дополнительными условиями являются: наличие достаточного количества информации, которое способна вместить такая метка (несколько сотен идентификаторов), помехоустойчивость чтения этой информации и быстрый эвристический алгоритм нахождения метки на растровом изображении. Таким условиям удовлетворяет QR-метка (Zhang et al., 2015), помехоустойчивость исследована в Karrach et al. (2020). К недостаткам данного подхода можно отнести ограничения точности детектирования координат QR, что является современной исследовательской проблемой. В частности, в работе Teoh et al. (2022) ошибка в модельных расчетах составляет  $\approx 0.4$  мм, а в работе Karrach et al. (2020) – от 6 до 10 мм. В нашем случае попиксельный метод восстановления матрицы проективного преобразования (Teoh et al., 2022) не применим по причине сложной помеховой обстановки и возможного размывания границ метки, запыления объектива в реальных условиях эксплуатации. Решением такой проблемы было бы использование групповой статистики пикселей и, в наилучшем варианте, переход в субпиксельный диапазон измерений. Тем не менее в этой работе проведена оценка точности восстановления координат в зависимости от расстояния до метки для объектива  $f2.8$ . Из перечисленных в этой работе режимов наиболее перспективно, с нашей точки зрения, выглядит использование удаления от объектива 40 см и 30 см для метки шириной 5 см. Для доведения точности распознавания технической метки до требуемой был использован прикладной прием двустадийной детекции (Brinkmann, 1999), выделение предполагаемых границ объекта.

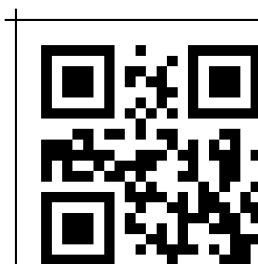
## 3 Алгоритм распознавания координат машиночитаемой метки

Для обеспечения процесса наблюдений данными о координатах облучателя  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 1) необходимо двухкоординатное выделение машиночитаемой метки с растрового изображения. Известны разные подходы к решению данной проблемы, приведенные в частности в работе Zhong et al. (2017). Поскольку предполагаемая машиночитаемая метка имеет черно-белый растр, мы использовали преобразование Хафа – алгоритм, применяемый для параметрической идентификации геометрических элементов растрового изображения (Hough, 1962; Ершов, 2018). Результаты поиска проходят фильтр на заданную эвристику, например расположение пересечений в заданном квадрате относительно элементов QR-метки. В работе Ершов (2018) показано, что для изображения  $512 \times 512$  восстановление истинных параметров дискретной прямой методом Хафа имеет ошибку менее пикселя. В этой работе для парных прямых ошибка локализации  $\sigma_R$  определена как для диадических прямых и ограничена соотношением:

$$\left(\frac{\log_2 n}{\sqrt{22}}\right) \leq \sigma R \leq \frac{\sqrt{2} \cdot \log_2 n}{6}, \quad (1)$$

где  $n = 2 \cdot k$  – сторона изображения.

В случае обнаружения более одного пересечения прямых возможно использовать другие, например усредняющие геометрическое место алгоритмы для более точного поиска координаты пересечения линий, выбора наилучшей точки на основании подобранной эвристики (Виноградов и др., 1977). Предлагается совместить алгоритм детекции QR-метки с нахождением координат пересечения линий (рис. 2).



**Рис. 2.** Изображение машиночитаемой метки, содержащей QR-маркер и координатные линии, используемой для восстановления координаты места установки метки

#### 4 Апробация алгоритма распознавания координат машиночитаемой метки

Макет системы распознавания технической метки потребовался для определения шага получаемой шкалы измерений и определения оптимальных настроек объектива и представлял собой подъемный столик с микрометрическим винтом, на котором была закреплена метка, а также камеру, закрепленную неподвижно, горизонтально, с направлением визирной оси на подъемный столик. Использовалась камера Panasonic WV-SP306 1 Мп с объективом Fujinon YV10x5HR4A-SA2L 1:1.6/5–50 mm 1/3 CS. Оценочная характеристика порога чувствительности шкалы составила 120–150 мкм по центру визирной оси, 200–220 мкм – цена деления шкалы (ожидаемая точность хода) на стенде в незашумленных условиях внутри помещения. На этом же макете осуществлялось вычисление матриц дисторсии объектива (Penate-Sanchez et al., 2013). Такие оценки хорошо согласуются с расчетными (Ершов, 2018), согласно которым для ROI  $256 \times 256$  нижняя оценка погрешности составляет 0.57 пикселя, верхняя – 0.6361 пикселя, для ROI  $100 \times 100$  – 0.49058–0.5423 пикселя. Для поля зрения объектива 300 мм шаг шкалы для небольшой метки должен составлять 114.66 мкм и 126.89 мкм соответственно. Для натуральных испытаний использовалась камера Panasonic WV-SP306 с объективом Fujinon YV10x5HR4A-SA2L, настроенным на поле зрения  $300 \times 300$  мм и расстоянием фокуса до машиночитаемой метки 300 мм. Испытания проводились на неподвижно закрепленной на облучателе № 3 камере с размещением меток вдоль северного рельса дугового пути. Методика проведения испытаний заключалась в неоднократных перемещениях кабины облучателя как можно более точно к исходной (начальной) координате. Координаты облучателя измерялись разрабатываемой системой координатного обеспечения, а также с использованием внешнего (эталонного) измерительного комплекса Leica. Тестирование показало что координаты, полученные обоими комплексами, в пределах допустимых техническим заданием. После удаления дисторсии объектива значения дискретной разрешающей способности системы достигали 0.34 мм в единицах пройденного пути кабины облучателя тип 3.

## 5 Прототип системы координатного обеспечения

Программный комплекс, реализующий функционал, разработан на языке Python (Россум и др., 2001) с использованием библиотек `opencv` (Bradski, 2000). Для обеспечения выдачи координаты внешним системам реализован REST-интерфейс посредством `http`-запросов. Оценочная скорость обработки кадра составила 400 мс. Также реализован режим работы с двумя камерами для вычисления путевого угла. В дальнейшем для интеграции в подсистему АСУ предполагается расширить функционал ПО поддержкой протокола `ModBus TCP`. Для целевой задачи координатного обеспечения, автоматического сопровождения и вычисления путевого угла рассматривались различные схемы расположения камер: по диагонали север-юго-запад; над южным рельсом; под опорными бобышками вторичного зеркала. Вариант под опорными бобышками вторичного зеркала облучателя № 3 позволяет определять местные координаты с минимальным влиянием горизонтирования облучателя и изгибных деформаций рамы облучателя, однако с учетом технико-экономических особенностей рассматриваемых схем был выбран вариант расположения над южным дуговым рельсом с возможностью установки дополнительной камеры над северным дуговым рельсом.

## 6 Проблемы и обсуждение

Апробация нескольких способов решения координатной задачи показала высокую сложность приемлемого решения. Несмотря на хорошие результаты, полученные на исследовательском стенде, испытания на облучателе показали, что по некоторым координатным осям достижение точности в 340 мкм возможно только после удаления искажений, вносимых оптической системой (дисторсии объектива), а значит, полная точность алгоритма в эксплуатационных условиях зависит от конструкции, качества изготовления конкретного объектива и его настроек. Испытания прототипа системы в апреле 2023 года показали, что распознавание комбинированной метки происходит устойчиво в условиях осадков, однако в условиях солнечной засветки в середине дня требуется затенение камеры с объективом и поля зрения камеры. Возможно решение этой проблемы применением алгоритмов поиска бинарного градиента на растровых изображениях со смещением границы бинаризации применительно к алгоритму Хафа (Николаев, 2023).

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность технику Лаборатории радиометров континуума САО РАН Борисову Алексею Николаевичу, принимавшему деятельное участие в сборке, настройке прототипа системы, а также Первакову Алексею Алексеевичу, руководителю группы наблюдений Солнца РАТАН-600.

## Литература

- Виноградов И.М., 1977. Математическая энциклопедия. / Ред. Виноградов И.М. и др. М.: Советская Энциклопедия. Т. 1. [Vinogradov I.M., 1977. In Vinogradov I.M. et al. (Eds.), *Encyclopedia of Mathematics*. Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya, vol. 1. (In Russ.)]
- Ершов Е.И., 2018. Быстрое преобразование Хафа как инструмент анализа двумерных и трехмерных изображений в задачах поиска прямых и линейной кластеризации. (Дис. канд. физ.-матем. наук). Москва. [Ershov E.I., 2018. *Fast Hough Transform as a tool for analyzing two-dimensional and three-dimensional images in tasks of searching for lines and linear clustering*, PhD thesis. Moscow. (In Russ.)]
- Максимова М.В., 2013. Инженерные изыскания. Т. 2. С. 18–21. [Maksimova M.V., 2013. *Inzhenernye izyskaniya*, vol. 2, pp. 18–21. (In Russ.)]
- Николаев Д.П., 2023. Методы и алгоритмы Хаф-анализа изображений в системах технического зрения. (Дис. докт. физ.-матем. наук). Москва. [Nikolaev D.P., 2023. *Methods and algorithms of Hough analysis of images in technical vision systems*, PhD thesis. Moscow. (In Russ.)]
- Россум Г., Дрейк Ф.Л.Дж. и др., 2001. Язык программирования Python. М.: Вильямс. [Rossum G., Drake F.L., Jr., 2001. *Python Reference Manual*. M: Williams. (In Russ.)]
- Савиных В.П., 2015. Перспективы науки и образования. Т. 2. С. 51–59. [Savinykh V.P., 2015. *Perspektivy nauki i obrazovaniya*, vol. 2, pp. 51–59. (In Russ.)]

- Стороженко А.А., Богод В.М., Лебедев М.К. и др., 2021. XXV Всероссийская ежегодная конференция “Солнечная и солнечно-земная физика–2021”. Санкт-Петербург. С. 249. doi:10.31725/0552-5829-2021-249-252 [Storozhenko A.A., Bogod V.M., Lebedev M.K., et al., 2021. XXV All-Russian Annual Conference ‘Solar and Solar-Terrestrial Physics–2021’. Saint Petersburg, P. 249. doi:10.31725/0552-5829-2021-249-252 (In Russ.)]
- Atali G., Garip Z., Ozkan S.S., Karayel D., 2018. Academic Perspective Procedia, vol. 1, pp. 31–38, doi:10.33793/acperpro.01.01.9.
- Berka Karel, 1983. Measurement: Its Concepts, Theories and Problems. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, doi:10.1007/978-94-009-7828-7.
- Bradski G., 2000. The OpenCV Library. Dr. Dobb’s Journal of Software Tools, vol. 120, pp. 122–125.
- Brinkmann R., 1999. The Art and Science of Digital Compositing, 1st Ed. Morgan Kaufmann-Academic Press, p. 184.
- Hough P.V.C., 1962. Method and means for recognizing complex patterns, U.S. Patent 30696541962.
- Karrach L., Pivarciova E., Bozek P., 2020. J. Imaging, vol. 6, p. 67, doi:10.3390/jimaging6070067.
- Penate-Sanchez A., Andrade-Cetto J., Moreno-Noguer F., 2013. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 35, no. 10, pp. 2387–2400, doi:10.1109/TPAMI.2013.36.
- Teoh M.K., Teo K.T.K., Yoong H.P., 2022. Computation, vol. 10, iss. 9, p. 147, doi:10.3390/computation10090147.
- Zhang H., Zhang C., Yang W., Chen C.-Y., Member I., 2015. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Zhuhai, China, pp. 2501–2506, doi:10.1109/ROBIO.2015.7419715.
- Zhong X., Zhou Y., Liu H., 2017. Int. J. Adv. Robot. Syst., vol. 14, doi:10.1177/1729881417693489.

## Coordinate support system of the automated control system of the irradiator cabin type 3 on RATAN-600: results of applying the coordinate search algorithm

*V.S. Vakurin, A.A. Storozhenko, V.I. Zharov, A.A. Grechkin*

Special Astrophysical Observatory, 369167 Nizhnij Arkhyz, Karachai-Cherkessian Republic, Russian Federation  
*vvs@sao.ru*

**Abstract.** In 2019, a new automatic control system (ACS) of the antenna feed type 3 was put into experimental and then into regular operation on the RATAN-600 radio telescope, which provided new opportunities for controlling the movement parameters of the elements of the antenna feed and, in general, allowed starting a series of methodological work on the implementation of a new observation mode with tracking of objects. To improve the quality of the tracking mode and to implement the new automated observation modes, it is necessary to integrate a coordinate support system into the ACS of the antenna feed. The paper investigates approaches to solving the problem of automated coordinate support for the operation of the antenna feed type 3 on the RATAN-600 radio telescope.

**Key words:** automation, Hough transform, localization problem, image analysis methods