

Autoguiding system for the 2-m RCC telescope of the Rozhen National Astronomical Observatory

Tanyu Bonev¹, Hristo Lukarski², Ivan Parov³,
Svetoslav Neykov⁴, Valeri Marinkov¹, and Krassimir Yaramov¹

¹ Institute of Astronomy and National Astronomical Observatory, Bulgarian Academy of Sciences

² Space Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences

³ Faculty of Physics, Department of Astronomy, University of Sofia

⁴ Faculty of Mathematics and Informatics, University of Sofia

`tbonev@astro.bas.bg`

(Conference talk)

Abstract. This paper describes the design, the parameters, and the basics of operation of the autoguider for the 2-meter telescope of the Rozhen National Astronomical Observatory. The results of tests are presented which aimed the characterization the response of the telescope against short-time corrections. Special attention is devoted to particular details of the system which were included in order to assure correct operation of the autoguider in case of sporadic displacements from the nominal telescope tracking. First tests of long exposure observations obtained with autoguiding show a substantial increase of the imaging quality in the Ritchey-Chretien focus of the 2-m telescope. The autoguiding system was designed and manufactured with financial support by UNESCO – Regional Bureau for Science and Culture Europe (BRESCE).

Key words: Autoguider, Rozhen NAO, 2-m telescope

Система за автоматично гидиране на 2-метровия РКК телескоп на Националната Астрономическа Обсерватория Рожен

Таню Бонев, Христо Лукарски, Иван Паров,
Светослав Нейков, Валери Маринков и Красимир Ярѐмов

В тази статия са описани дизайнът, параметрите и принципът на действие на автогида за 2-метровия телескоп на Националната Астрономическа Обсерватория, Рожен. Представени са резултатите от тестовите, направени с цел характеризиране реакцията на телескопа при кратковременни корекции. Обърнато е внимание на някои детайли в управлението на автогида, предвидени с цел правилна реакция при спорадични отклонения в положението на телескопа по време на водене. Първите резултати от наблюдения с дълги експозиции и включено автогидиране показват значително подобряване на качеството на изображенията получавани във фокуса Ричи-Кретиен на 2-м телескоп. Системата за автоматично гидиране бе конструирана и изработена с финансовата помощ на UNESCO - Регионално бюро за Наука и Култура, Европа (BRESCE).

Увод

Дори най-прецизните системи за управление на съвременните телескопи не са в състояние да гарантират перфектно следене на наблюдаваните астрономически обекти. Причините за това са добре известни (огъване на инструмента, промяна на рефракцията по време на наблюденията, неперпендикулярност на осите и много други [Михельсон, 1976]). Влиянието на тези фактори е толкова комплексно, че не е възможно те да бъдат отчетени алгоритмично. Ето защо, управлението на всички съвременни телескопи включва системи за автоматично гидиране. Тези системи са базирани на непрекъснат контрол на наблюдавания обект (или звезди в неговата околност), анализ на неговото положение и обратна връзка с телескопа. В тази статия ние описваме системата за автоматично гидиране на 2-м телескоп на Националната астрономическа Обсерватория, Рожен.

1 Описание на автогида

1.1 Логическа схема и параметри

Логическата схема на системата за автоматично гидиране е представена на фигура 1. CCD-камерата получава периодично изображения на избраната за гидиране

звезда. Тези изображения се трансферират на персонален компютър, свързан в мрежа със CCD-камерата. Програма, разработена за целта, анализира изображението и взема решение за необходимостта от корекция. Ако корекция е необходима, компютърът подава команда към телескопа посредством контролер.



Fig. 1. Логическа схема на автогида.

1.2 Външен дизайн на сензорния блок

Външният вид на автогидащата система е показан на Интернет страница, където освен детайлно описание е публикувана и инструкцията за експлоатация на системата[‡]. Механичната и оптическа система на автогида са базирани на оригиналната система за гидиране, доставена с 2-метровия телескоп през 1978 г. от заводите Карл-Цайс, Йена. Тази система за светоелектрично управление на следенето[§], която не бе въведена в експлоатация в оригиналното си изпълнение, е оптимално съгласувана с офсетната оптика на 2-метровия телескоп. Тя дава възможност както за автоматична работа, така и за визуален контрол на полето, съдържащо избраната за гидиране звезда. Външният дизайн на сензорния блок е аналогичен на оригиналната система за автоматично гидиране. Съществените разлики са във вътрешната структура на системата, която е описана в следващата част.

1.3 Вътрешен строеж

Общ вид на автогида е представен на фигура 2. Оптическата схема на автогида е запазена. Съществени различия са внесени в детекторната част и свързаните с нея детайли на механичната система. В оригиналната система светлината се регистрира само в кратките интервали от време, когато завъртяното (посредством отражение от въртящо се клиновидно огледало) изображение на звездата пресича четирите елемента на кръстовидна диафрагма и попада върху фотоумножителя. В новия сензорен блок фотоумножителят е заменен със CCD-матрица. Параметрите на системата са представени в таблица 1.

Table 1. Основни параметри на компонентите на автогидащата система.

CCD	Контролер
SONY ICX204, 1024 x 768 px	4 команди: $\pm\alpha$, $\pm\delta$
размер на пиксела: $4.65\mu\text{m} \times 4.65\mu\text{m}$	Прецизност: 10 msec
ADC: 12 bit	RESET
Охлаждане: Peltier	Автотест
LAN скорост: 100 Mbit/s	

[‡] <http://www.astro.bas.bg/~tbonev/Autoguider/Autoguider.html>

[§] LNK = Lichtelektrische Nachführung Kontrolle, номер 16 00 79 : 001.26 от техническата документация на 2-м телескоп.

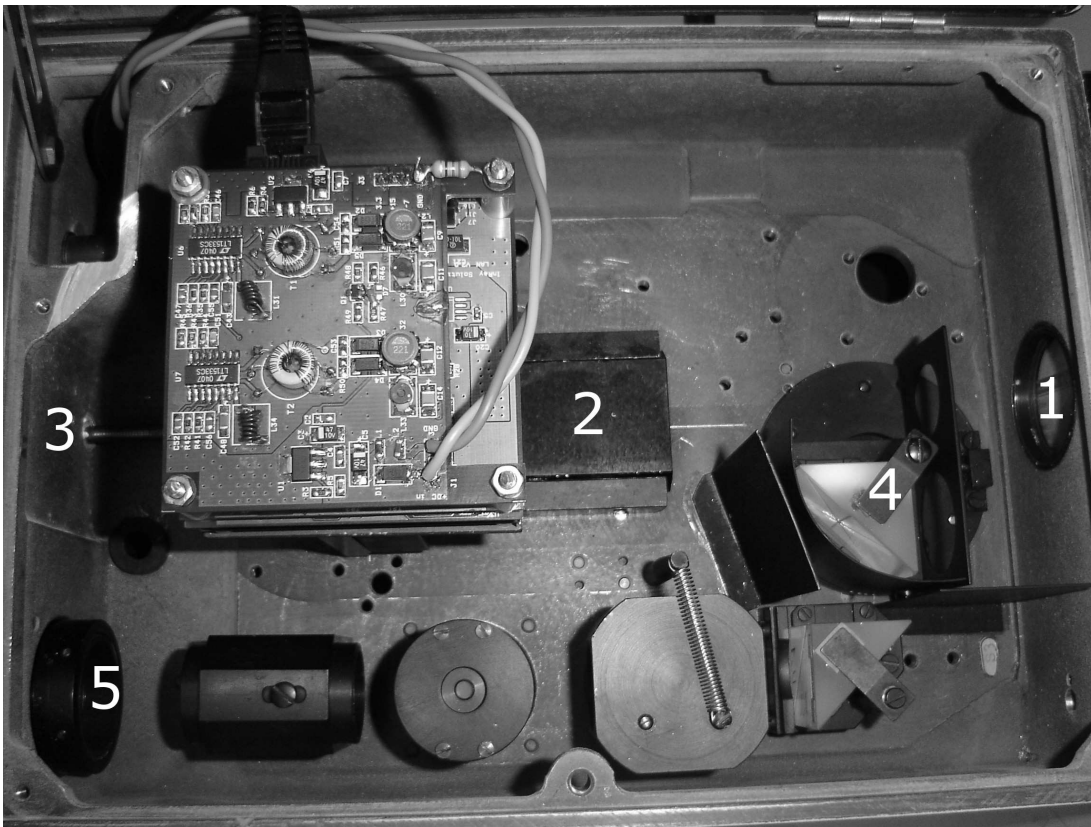


Fig. 2. Разположение на оптичните елементи в сензорния модул на автогида. С номера са отбелязани следните детайли: 1-вход на лъчите от избраната за гидиране звезда, 2-водач, "лястовича опашка", по който целият модул носещ CCD-матрицата се движи за фокусиране, 3-винт за фокусиране, 4-призма, отклоняваща лъчите към оптическия канал за визуален контрол, 5-изход към окуляра. Самата CCD-матрица не се вижда, намира се в ляво от означението "2", под платката.

Премахнато е въртящото се клиновидно огледало. Сега изображението на избраната за гидиране звезда се формира от обектива на офсетния блок върху CCD-матрица без междинни отражения. Новата система няма движещи се части, което повишава нейната ефективност и надеждност. Допълнително ефективността на системата се повишава от използването на цялата светлина от обекта интегрирана по време на експозицията.

1.4 Избор на софтуерна платформа за управление на камерата

За улесняване на разработката на софтуер е добре да се използват максимален брой готови компоненти. Обикновено официалната развойна среда съдържа операционна система, оптимизирана за съответния чип, заедно с разнообразни библиотеки. Сериозен недостатък е, че първо тези решения са скъпи и второ не се предлага кодът към тях. Въпреки че се предоставя документация, често пъти тя е недостатъчна за цялостното разбиране на системата. Необясними бъгове биха се открили много по-бързо, ако има достъп до кода.

Широко използвана алтернатива с отворен код е операционната система Линукс и нейната версия за устройства без поддръжка на виртуална памет (без MMU) – uClinux (Ю Си Линукс). Предимствата при използването на Линукс в подобни

проекти обикновено превъзхождат неговите недостатъци. Използването на един и същи код за компактни системи и за настолни компютри прави възможно писането и тестването на програмите на настолен компютър и последващото им интегриране в компактните системи. Така знанията на програмистите са директно приложими в новата среда. Фактът, че цялата система е с отворен код улеснява придобиването на знания за цялостната архитектура, ускореното откриване на грешки и адаптирането на системата за специфични нужди. Съществен фактор за преминаването към Линукс е съществуването на широк набор от библиотеки. Пример за това е TCP/IP стекът, вграден в ядрената, различни протоколи, като USB и множество драйвери. За обработка на цифрови изображения може да се спомене проектът OpenCV на Intel.

Разбира се, заедно с всички споменати предимства, използването на този софтуер има и недостатъци. Тъй като той по начало е замислен като операционна система за стандартни компютри, съществуват много слоеве на абстракция, които усложняват цялостната архитектура, увеличават крайната големина на кода и натоварват процесора с много инструкции, което съответно забавя цялостната работа на системата. Намалява ефективността на кешовете, задължително изисква използването на оперативна памет. Друг недостатък при използването на софтуера uClinux е, че той не поддържа виртуална памет, поради ограниченията на устройствата в които работи. Това не е голяма пречка, понеже има начини на заобикаляне на споменатото ограничение, приложени от общността в значителен брой програми.

Взимайки предвид предимствата и недостатъците на алтернативните възможности, за настоящия проект бе избрана платформа базирана на Линукс и по-специално версията uClinux, съобразена с възможностите на използвания процесор.

2 Изследване поведението на телескопа

Системата за гидиране трябва да знае предварително с каква скорост ще се движи телескопът при подаване на команда за корекция. 2-метровият телескоп има 5 скорости, при най-бавната от които ("най-фина") телескопът се движи с ъглова скорост $1.5'/\text{min}$. При подаване на команда за движение телескопът не е в състояние да се задвижи моментално с номиналната си скорост. За практическо установяване на реакцията на телескопа бяха направени серия експерименти с корекции по ректасцензия и деклинация, при включена "най-фина" скорост на движение. Резултатите от тези експерименти са показани на фигура 3.

Горният панел на лявата колона на фигура 3 показва отклонението на телескопа по ректасцензия при различни времена на корекция, задавани ръчно от автогидиращата система. Горният панел на дясната колона на фигура 3 показва отклонението на телескопа по деклинация при различни времена на корекция, задавани ръчно от автогидиращата система. Измерените промени в положения бяха апроксимирани с линейна зависимост. Получените от тази апроксимация наклони са вписани във фигурите. Те представляват търсената зависимост между измерено отместване и време необходимо за възстановяване на това отместване. Тази зависимост бе използвана в програмирането на обратната връзка с телескопа.

Забелязано бе, че изображенията се преместват не само в посока на задаваната корекция, но и перпендикулярно на нея, т.е. по другата ос. Тези отклонения са представени в долните панели на фигура 3. Не е ясно дали тези отклонения са предизвикани от електронен шум в системата за пренасяне на данни по време на корекции или от неточности в механиката на системата.

За уточняване природата на отклоненията в посока на координатите, по които не се извършват корекции, бе направена серия от измервания на положения на точков източник (звезда) без подаване на сигнал за движение по която и да е ос. Резултатите от тези измервания са представени на фигура 4. Измерените флукутации са близки до тези получени по време на корекции, в направление перпендикулярно на извършваната в момента корекция и достигат стойности по-големи от $1'' (\approx 20\text{px})$. Спорадичното появяване на такива флукутации и техните

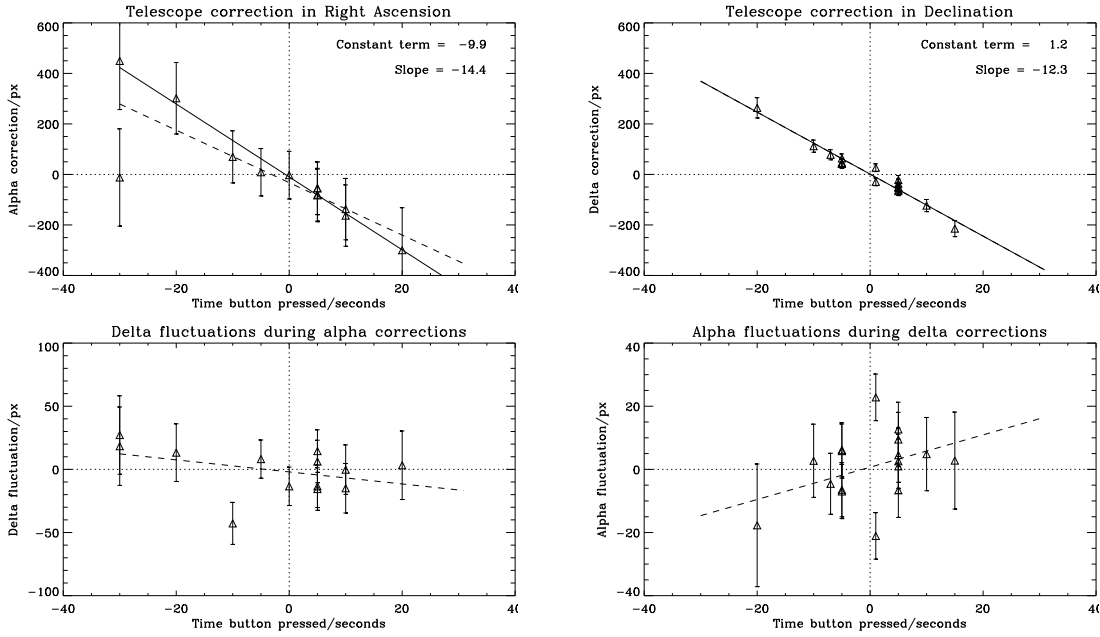


Fig. 3. Изследване реакцията на 2-м телескоп по време на корекции. Абсцисната ос съдържа продължителността на корекцията. По ординатата са нанесени измерените премествания на изображението в пиксели. Измерванията са направени върху кадри, получени с камерата на автогида. Мащабът е $1'' \approx 20\text{px}$.

високи стойности не могат да бъдат пренебрегнати. Ето защо представеният тук анализ бе необходима стъпка в процеса на разработка алгоритъма за обратна връзка.

3 Алгоритъм за обратна връзка

Алгоритъмът за обратна връзка с телескопа намира центъра на тежестта на полученото изображение и го сравнява със центъра на тежестта от предходната интеграция. Ако разликата е по-малка от зададена от потребителя граница започва следващата интеграция, без да се извършва корекция. Ако разликата е по-голяма, но зададената граница е надвишена за първи път, също започва следваща интеграция, без да се извърши корекция. Тази особеност е включена в алгоритъма за да се избегнат корекции, когато измереното отклонение е в резултат на случайна флуктуация. При две последователни отклонения в една и съща посока, автогидащата система анализира стойностите на двете отклонения и сравнява резултата със зададена за този случай гранична стойност. Ако тя е надвишена, автогидът включва двигателите на телескопа за корекция за определен интервал от време. Продължителността на този интервал се изчислява от зависимостта:

$$\begin{pmatrix} \Delta t_\alpha \\ \Delta t_\delta \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{pmatrix},$$

където трансформационната матрица T има следния вид:

$$T = \begin{pmatrix} t_{\alpha X} & 0 \\ 0 & t_{\delta Y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}$$

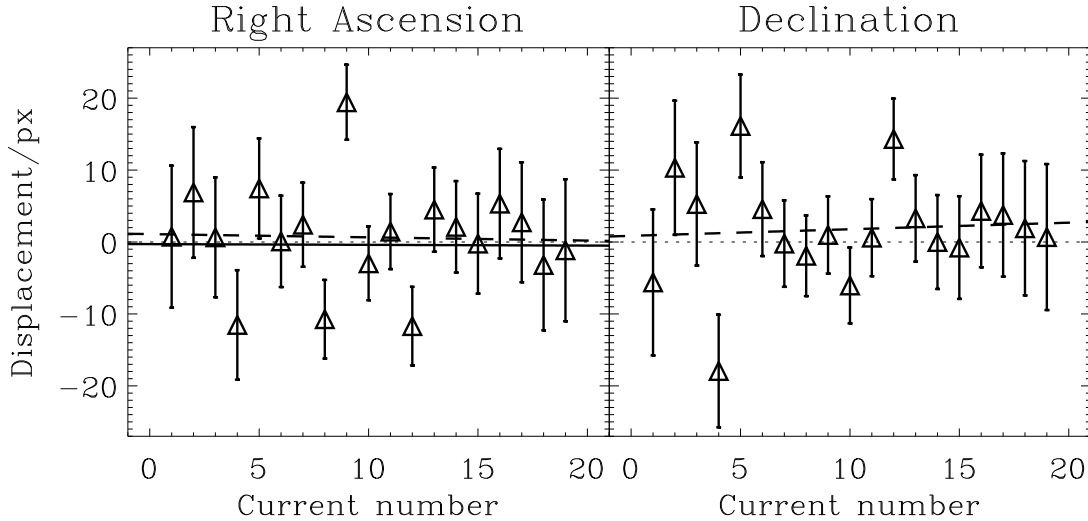


Fig. 4. Изследване поведението на 2-м телескоп при водене без корекции. По оста X е нанесен поредния номер на изображението. По оста Y са нанесени стойностите на центъра на тежестта на избрана звезда, измерени в изображенията. Тези изображения са получени с камерата на автогида, мащабът е $1'' \approx 20$ px.

Тук $t_{\alpha X}$ и $t_{\delta Y}$ са времената за включване на движение около осите α и δ , при измерено преместване на центъра на тежестта на изображението от 1 пиксел ($\Delta X = 1$ px и $\Delta Y = 1$ px), а ϕ е позиционният ъгъл, на който е завъртяна системата ($\phi = 0$ съответства на стандартната астрономическа ориентация, при която $+X$ съвпада с $-\alpha$, а $+Y$ съвпада с $+\delta$). Стойността на Δt_{α} е коригирана с $\cos \delta$. В алгоритъма е заложена възможност за анализ на последователност от k корекции, където $k > 2$.

Програмата, която работи по описания алгоритъм (iMag.exe) има още една съществена задача - да осъществява интерфейса между автогидиращата система и потребителя. Чрез нея се извършват следните функции:

1. Стариране на системата.
2. Осъществяване на връзката между сензорния модул и персоналния компютър.
3. Избиране на полето, в което да се търси звезда за гидиране.
4. Задаване радиуса на звездата
5. Задаване на координатите на звездата и положението на телескопа (на Изток/Запад от колоната)
6. Задаване на експозицията.
7. Задаване размера на зоната, в която се изчислява центъра на тежестта на звездата.
8. Възможност за ръчно задаване на времената за корекция и стартиране на корекцията.

Повече информация за работата с програмата, както и с цялата система за автоматично гидиране се намира в следната Интернет страница:

<http://www.astro.bas.bg/~tbonev/Autoguider/Autoguider.html>

4 Избиране на звезда за гидиране

За работа със системата за автоматично гидиране е необходима подходяща звезда. Най-слабата звезда, с която са направени тестове до момента (20.08.2006 г.) е звездата GSC 221675. Нейната звездна величина е 11.2 и за 10 секундна интеграция измереният сигнал в максимума (ядрото) на изображението е 240 ADU над нивото

на фона. Използването на по-ярки звезди дава възможност за по-кратки времена на интеграция и по-надеждно определяне на центъра на тежестта на изображението. Търсенето на подходяща звезда за гидиране чрез сканиране в зоната на действие на офсетния гид отнема много време и няма гаранция, че намерената звезда е най-добрата в работната зона на офсета. Това обстоятелство ни мотивира да създадем метод за бързо и целенасочено намиране на най-подходящата за гидиране звезда. За целта бе написана програма на IDL:

```
derive_XY_for_tracking_star,
```

която изчислява координатите на офсетния гид, при които в неговото поле попада предварително избраната звезда за гидиране. Подробна инструкция за работа с програмата ще намерите в сайта на автогида[¶].

5 Резултати

За тестване на правилното функциониране на системата бе направено сравнение между кадри получени с включено и с изключено автоматично гидиране. Резултатите от едно такова сравнение са показани на фигура 5.

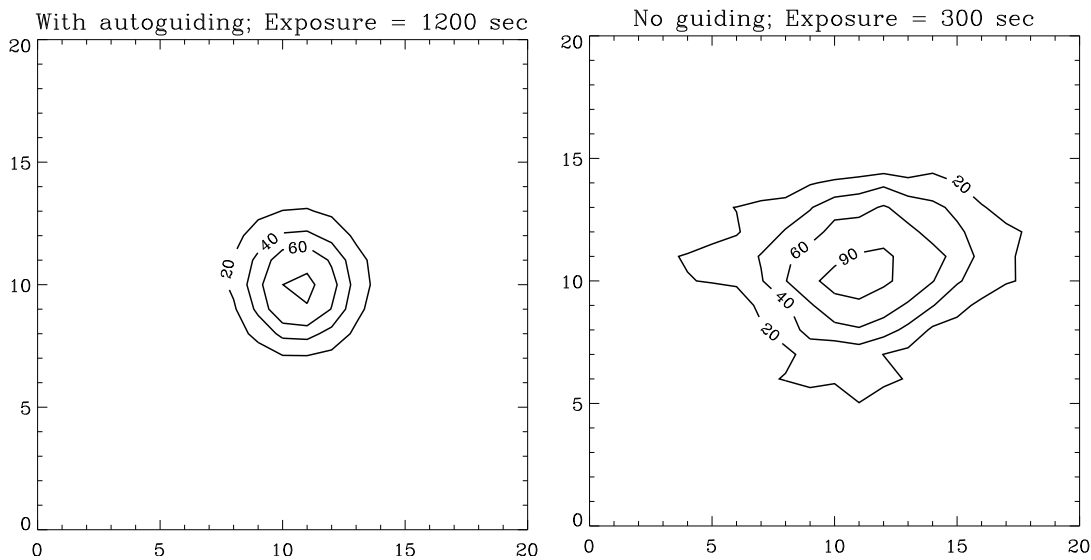


Fig. 5. Сравнение на звездни изображения в кадри получени с (ляво) и без (дясно) включена система за автоматично гидиране. В двата случая максимума на изображението е нормиран на 100. Показаните нива на интензитета са еднакви в двата кадра и са: 20, 40, 60 и 90. Звездните изображения са взети от кадри получени с камерата Photometrics, мащабът е $0.3''/\text{px}$.

Изофотната карта на изображението в ляво е на звезда взета от изображение получено с експозиция 20 мин. В дясно е показана звезда от изображение получено без автоматично гидиране в продължителност на 5 мин. За обективност на сравнението двете звездни изображения са нормирани към еднаква максимална стойност $= 100$. Въпреки четири пъти по-дългата експозиция изображението получено с гидиране показва по-добра концентрация около максимума. Ядрото на изображението (стойностите по-големи от 50) е концентрирано в зона с диаметър по-малък от

[¶] <http://www.astro.bas.bg/~tbonev/Autoguider/Autoguider.html>

1". В изображението получено с гидиране се забелязва леко остатъчно изтегляне във вертикална посока (деклинация). Това се дължи на лошата юстировка на полярната ос на 2-метровия телескоп по време на тестовете. Отместването на обекта в резултат на лоша юстировка се коригира от автогидиращата система, но корекциите се извършват през интервали от време еквивалентни на времето за интеграция на сигнал от системата. В рамките на този интервал от време наблюдаваният обект може да се премести от своята позиция върху кадъра. Това преместване е различно и е функция както на координатите на обекта, така и на отклонението на часовата ос на телескопа от небесния полюс.

Полярната ос на 2-метровия телескоп бе юстирана няколко месеца след получаване на представените тук резултати. След тази юстировка се наблюдава значително редуциране на честотата на корекции при автоматично гидиране, което доведе до допълнително подобряване на качеството на изображенията.

Заклучение

Автогидът за RC-фокуса на 2м телескоп е въведен в експлоатация. Използването на автогида подобрява съществено качеството на получаваните изображения и повишава ефективността на работа, освобождавайки наблюдателите от необходимостта да гидират визуално. Автогидът дава възможност за анализиране на поведението на телескопа. Чрез автогида могат да се правят фини корекции на положението на телескопа, недостъпни до момента.

Автогидиращата система може да бъде усъвършенствана в следните направления: Автоматично установяване на офсета в позицията на най-подходящата за гидиране звезда, намаляването на ефективния фокус на системата с цел повишаване на светлосилата и полето на зрение. Предстои тест за работа на автогида монтиран към търсача на 2-м телескоп.

Автогидът за RC-фокуса на 2м телескоп бе проектиран и изработен с финансовата помощ на регионалното бюро на UNESCO за наука и култура в Европа (Regional Bureau for Science and Culture Europe (BRESCE)). Авторите са благодарни на колегите от Института по Астрономия и от Катедра Астрономия на Софийския университет, които предоставиха част от своето наблюдателно време за тестове на автогида.

References

Михельсон, Н. Н., 1976, Оптические телескопы, Наука, Москва