

## Що е TPOINT?

**TPOINT е уникален програмен пакет, който анализира насочването на телескопа.** Той е в употреба от много години на много телескопи по света, включая Keck, ESO VLT, ALMA and GBT. Принципът на работа е много прост – следят се звезди по цялото небе, записват се изходните данни във всеки случай и след това данните захранват TPOINT. С помощта на мощно, но лесно за използване моделиране и графични команди, вие можете след това да определите и измерите де-колимациите и огъванията на вашия телескоп. Включвайки в управлението на телескопа корекционния модел намерен от TPOINT, много от ефектите се компенсират и грешките в насочването драстично намаляват.

**Подобряването на насочването, което TPOINT прави възможно, изглежда впечатляващо;** един телескоп, който преди е изисквал използване на карти за отъждествяване и ръчно търсене на обекта, или времеемко отъждествяване по близки ярки звезди, след моделирането поставя слабия обект точно в центъра на полето даже на силен окуляр.

**TPOINT е просто необходимост за роботизираните телескопи.** CCD-наблюдението упростила задачата – насочваме телескопа, правим експозиция и след това изчитаме и намираме изображението спрямо центъра на кадъра – всеки път. В най-добрите случаи TPOINT осигурява точност на ниво 1"-2", позволявайки напълно автоматизирано обслужване на наблюдението. Любителските телескопи обикновено имат точност 1' или, понякога, 1/2 от тази величина.

Освен, че прави насочването бързо и сигурно, TPOINT има и това не толкова очевидно предимство, че посредством подходящо програмно осигуряване на управлението на телескопа (например, основано на библиотеките *TCSpk* и *CPK* на *Tpoint Software*) **значително се подобрява и воденето.** Това става чрез постоянно коригиране на механичните ефекти като циклични грешки в отчетните колела и декодерите, но и в резултат на отчитане на грешки в инструменталния полюс. Места, за които полюсът е невидим, не са проблем за TPOINT, който може да измери грешката на полюса с точност от няколко ъглови секунди просто анализирайки насочването в достъпни точки от небето.

Данните на TPOINT диктуват точните установки, необходими за оптималното насочване на полярната ос, важно, за да се минимизира въртенето на полето.

**Достъпни са 2 версии на TPOINT.** Една, съвместна разработка на *Tpoint Software* и *Software Bisque*, е Windows-базирана система, напълно интегрирана с телескопните контролни системи в пакета *TheSky*. Другата, един „pro“-инструмент, който използва традиционния командно-базиран операторски интерфейс, е достъпна от автора чрез *Tpoint Software*. Тази последна версия е същата, която се използва в големите обсерватории; тя работи под MS-Windows, Linux или Mac OS X. Може да работи и с други Unix-платформи; например, в ESO 4×8 m VLT тя работи с HP-ситеми, а на 8-m Gemini – със системи на Sun.

# Насочването на телескопа

Patrick Wallace

## В какво е проблемът?

Когато искам да погледна към Юпитер с моя 8-инчов рефлексор, аз въртя телескопа около монтировката му, докато планетата се центрира в търсача, след което тя е и в окуляра. Достатъчно просто. Следва M57: намирам Лира, насочвам се на около  $\frac{1}{3}$  от разстоянието между  $\beta$  и  $\gamma$ , и се поглеждам наоколо. Но ако обектът е пределно слаб? Тогава се нуждаем от карта за отъждествяване, светя с червена светлина, всеки път чудейки се къде е северът в окуляра и дали картата не е обърната „ляво-дясно“. И даже в комфорта на контролните зали на съвременните големи телескопи, при които грижата за адаптирането към тъмнина или възможността от преохлаждане са намалени, използването на карта за отъждествяване, макар и широко практикувано, е неприемливо заради голямата загуба на време – около 1US\$/сек за най-големите телескопи!

По-приемливо е телескопът да се позиционира, движейки го, докато индикаторните показания (било по отчетни кръгове, на екрана на компютъра или нещо друго) съвпадат с координатите на обекта. Така се постъпва при големите, а и при много любителски днешни телескопи, и както *винаги* се насочват радио-телескопите. Но това, което на пръв поглед изглежда лесно – само да се изравнят показанията на RA/Dec с желаните – става неочаквано сложен проблем, толкова голям, че на много от телескопите, способни да го осъществят, се налага да се ползват карти за отъждествяване. В тази статия се разглежда какво се включва в насочването чрез „абсолютно изчисление“ и показва как да се отчетат особеностите на всеки отделен телескоп. Техниките, описани тук, водят до начален етап в осъществяване на насочването. Най-добрите от телескопите в гигантските обсерватории могат да се насочат с точност 1"-2", или колкото е диаметърът на Галилеевите спътници на Юпитер; не е необичайно даже да се постави звезда право в процеп на спектрографа. Много телескопи могат сигурно да поставят приемника върху диска на планета без човешка намеса, а някои могат автоматично и да поставят звезда за гидиране. Любителските телескопи могат да гонят нивото 30" RMS (т.е., телескопът е в кръг от 30" около 60% от времето), което осигурява попадане на обекта в центъра дори на най-силния окуляр.

## Накъде, смятате, че гледате Вие?

Първият проблем при насочването на телескопа е да решим какво искаме да видим: мишената (обекта). Обикновено определяме обекта чрез неговите координати: *ректасцензия* и *деклинация* (RA/Dec).

.....

Както ще видим, познаването на RA/Dec не е достатъчно. Броят на корекциите и трансформациите, които трябва да се извършат, преди да насочим телескопа, е обезкуражително голям. Отделно от това е и оскъдицата от данни, за да извършим това. Вие можете да изчислите „истинското“ място, но как да сте сигурни, че отговорът е верен?

## Накъде, смятате, че гледа Вашият телескоп?

Вторият проблем при насочването на телескопа е как да го поставим в исканото положение? Това включва измерване на ориентацията на двете монтажни оси. Традиционно е всяка ос да се снабди с отчетен кръг, така че, за една екваториална монтировка, каквато ще разглеждаме тук, трябва да се отчетат „часовият ъгъл“ и деклинацията (т.е. HA/Dec). Теоретически, показанието на HA-кръга е върху допълнителен подвижен кръг, задвижван от звезден часовник. Двата кръга заедно образуват аналогов компютър, реализиращ пресмятането  $RA = ST - HA$  (където ST е местното звездно време), така че RA може да се *постави* или *отчете* направо. На някои по-стари професионални телескопи подобна роля играят т.н. *селсини* („синхронизатори“) – електромеханични устройства за показване на координатите на контролния пулт. При съвременните телескопи монтажните оси са снабдени с цифрови кодери (датчици) и/или стъпкови двигатели. Датчиците са или „абсолютни“, или „инкрементални“. Абсолютните датчици показват

ориентацията на оста директно, така че и да изключите захранването, вие ще знаете накъде е насочен телескопът. Инкременталните датчици, които са много по-евтини от абсолютните, просто помнят дъгата, на която оста се е завъртяла. Високата цена на абсолютните датчици означава, че даже на големи професионални телескопи един такъв датчик с достатъчно висока разделителна способност за посрещане изискванията за насочване, може да се окаже недостъпен. В такъв случай, като правило, се реализира „нулиране“, при което преминаването през едно или няколко дадени положения с известни абсолютни стойности се отчита с висока точност и *нул-пунктът* на инкременталния датчик се установява по подходящ начин. За установяване на нул-пункта може да се използва и положението на ярка звезда. Стъпковите двигатели осигуряват както завъртането на телескопа, така и отчитането на положението, в което е застанал. Последната функция е следствие от това, че електрониката, осигуряваща импулсите, знае колко са били подадени и, следователно, на какъв ъгъл се е завъртяла оста на двигателя. Това съответствие е в сила докато двигателят не „преплъзва“ заради претоварване.

Датчиците и стъпковите двигатели обикновено са закрепени към оста с някакъв вид зъбна предавка. Зъбните колела осигуряват дълговременна позиционна точност, но трябва да са много точни, за да осигурят водене с висока плавност. Ролкови или трансмисионни предавки могат да постигнат исканата плавност по-лесно, но пък са склонни към преплъзване.

Конструкцията – датчиците или самите стъпкови мотори, както и зъбчатките, свързващи ги с осите, обикновено са ограничаващият фактор за точното насочване на телескопа. Много големи телескопи не могат да достигнат позиционната си точност само защото не могат да си позволят датчици с достатъчно качество. Проблемът е още по-сериозен за любителските инструменти.

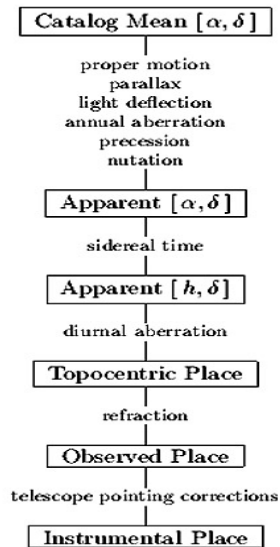
### Що е „позиция“?

Оглеждайки някои от техническите препятствия, които трябва да се преодолеят, за да се достигне точно автоматично насочване, трябва отново да разгледаме мотивацията за това. Нещо повече, трябва да сме наясно защо си струва да се стремим към точно „сляпо“ насочване, при което даже е постижима по-висока точност, ако първо намерим ярка „звезда за сравнение“ около интересувания ни обект и след това отместим телескопа на малко разстояние. (Тази техника се прилага при някои известни космически телескопи.)

Едно съображение за точно абсолютно позициониране е това, че, в зависимост от начина по който управлението на телескопа работи, можем да подобрим движението на телескопа без да гиديرаме. Това е така, защото *воденето* е по същество *диференциално насочване*: двете са просто различни аспекти на едно и също нещо. Другото е в това, че изследването свойствата на телескопа за абсолютно позициониране е важен инструмент за диагностика; най-малкото, това би ни дало данни за деколимация на полярната ос на телескопа, както и да изяви поведението на лагерите, нестабилна оптика и други недостатъци, за които може да има механично „лечение“. Точното насочване ще подобри оперативната ефективност, особено важна за големите инструменти. И още едно предимство е това, че точно насочване към всеки нужен обект е достъпно просто въвеждайки отчетните данни: моментна астрометрия! Това е полезно при архивиране на CCD-експозиции, изискващи точни координати за да се улесни последващият достъп до данните.

### Три стъпки, за да насочим телескопа

Имаме координатите на обект и искаме да завъртим осите на нашия телескоп така, че да го видим. Би било удобно, ако за това трябва само да поставим тези координати на отчетните кръгове. За съжаление, нужно е повече, отколкото всичко това; ние живеем на въртяща се и покращаща се планета, обикаляща около една звезда, гледаме през атмосфера и използваме несъвършенна механика: всички тези фактори трябва да се отчетат. Последователността на трансформациите и настройките, които трябва да направим, са показани на диаграмата на Фиг.1.



Фигура 1.

Последователност на трансформации, нужни за да се преобразува позицията от каталога в данни за поставяне на монтировката на телескопа.

Процедурата се свежда до 3 стъпки: от **средна позиция към видима (моментна) позиция**; от **видима към наблюдаема** и от **наблюдаема към инструментална**. Първата стъпка, от средна към моментна отчита прецесията, нутацията и годишната аберация. Втората – от моментна към наблюдаема, отчита въртенето на Земята, географското положение на телескопа и атмосферната рефракция. Последната стъпка изисква корекция на инструменталните неточности, една девствена територия за повечето производители на телескопи.

### Какво значи „средно място“?

Ако искаме да наблюдаваме една планета, ние можем в повечето случаи да вземем „моментното“ („видимо“) място от *Astronomical Almanac*. Видимото място са координатите RA/Dec по отношение на небесния екватор и точката на пресичането му с плоскостта на земната орбита (от своя страна „непостоянна“). Таблиците „ден-за-ден“ на положенията на планетите са необходими заради бързото им и сложно собствено движение може да включва и отчитане на прецесията и различни други ефекти, обуславящи видимото им положение на небето. Но това на практика е невъзможно за звезди, галактики и т.н., за които каталогът може да предложи само един комплект RA/Dec за всеки обект, вместо различни координати „ден-за-ден“. За да се заобиколи тази трудност, позициите в каталога са дадени по отношение на екватора и равноденствието за определен момент, „епоха“; нещо повече, тези *екватор* и *равноденствие* са мислени, движещи се *равномерно* и *плавно*, за разлика от реалните екватор и равноденствена точка. Това равномерно движение, добре познатият 26000-годишен кръг на прецесията на земния полюс около полюса на еклиптиката, заедно с постепенното накланяне на еклиптиката, е дълговременния компонент на сложно движение, предизвикано от гравитационното влияние на телата от слънчевата система (но главно на Луната) върху въртящата се и деформирана Земя. Това постоянно движение се нарича „обща прецесия“ и води до промени до 50" годишно в координатите на звездите. Остатъчните колебания, най-големият компонент от които има период от 18.6 години и се нарича „нутация“, и повлиява позиционирането на телескопа на ниво 10". Епохата, определяща средния екватор и равноденствие се изписва като година, например, „1950“, но често включва и допълнението „.0“ като предупреждение, че това е нещо повече от календарна година. За допълнително усложнение, епохата може да има представка "B" или "J" (за "Besselian" и "Julian" съответно), които не е нужно да разглеждаме тук. (И, щом стана дума, да кажа, че тук няма да разглеждам отклонението на

светлината, годишния паралакс, денонощната аберация, движението на полюса, както и разликата между FK4, FK5 и ICRF, неща, които имат значение само ако искате да постигнете насочване с точност 1"). Когато двойката RA/Dec се придружава, например, с „1950.0”, това означава „по отношение на средния екватор и равноденствие за епоха 1950.0”, или за по-кратко „равноденствие 1950” (но никога „епоха 1950”). Забележете, че:

а) – звездата никога не заема в действителност дадените координати RA/Dec и

б) – средното място *не е, както грешно се смята, „средното място в течение на дадената година”* – това е фактически *най-близката позиция в началото* на годината.

За щастие, много от объркванията, свързани с епоха/равноденствие днес е в миналото. От 1990-те небесните положения почти винаги се дават по отношение на International Celestial Reference System (ICRS), която на практика е същото, като "mean J2000". Бъдещите звездни каталози ще се отнасят към ICRS и J2050 (например) никога няма да се появи.

След отчитането и на *собствените движения*, преобразуването от *средно в моментно* положение става с прилагане на нестандартни алгоритми, отчитащи прецесия, нутация и годишна аберация. Тези три ефекта имат значение за големите телескопи; нутацията (до 10") и дори аберацията (до 20") могат да се пренебрегнат без особена вреда за повечето любителски телескопи.

## Видът от Вашата обсерватория

На следващо място се налага да отчетем това, че обсерваторията се намира на повърхността на Земята и на дъното на атмосферния океан. Ще се нуждаем:

- а) – от географските координати на обсерваторията ( $\phi, \lambda$ ) и височината над морето  $h$ ;
- б) – околните налягане и температура;
- в) – времето.

За обекти от слънчевата система, но не за звезди и т.н., трябва да отчетем и *геоцентричния паралакс* и ефектите от *крайната скорост на светлината*. За планетите ефектите са съвсем малки, но за Луната отчитането на паралакса е от значение, водещ до отклонение  $\sim 1^\circ$ . За успешно *сляпо насочване* е нужно да знаем точно *времето* и то като универсално време, UT1. Това не е съвсем същото, като *Coordinated Universal Time*, UTC, получавано от официалното гражданско време чрез добавяне или изваждане на цяло число часове (а за някои места и половинки часове); за да получим UT1 от UTC добавяме корекция "Delta UT", отчитаща неравномерното въртене на Земята. Предвидените UT от *International Earth Rotation Service* са достъпни по Интернет. Тъй като Delta UT може да расте до 0.9 сек (когато към UTC се добавя „скок-секунда” за да се уравният гражданското и слънчевото времена), което пък влияе на насочването с около 10", това е важен ефект при големите телескопи и следва да се отчита. Но за любителските телескопи е пренебрежим, особено ако са с абсолютни датчици.

От UT1 и използвайки стандартни алгоритми, можем да изчислим средното гринуичко звездно време (Greenwich Mean Sidereal Time). Добавяйки (на изток от Гринуич) географската дължина получаваме местното средно звездно време (Local Mean Sidereal Time). Накрая добавяме члена за нутацията, наречен „уравнение на равноденствията”, за да получим „местното моментно звездно време (Local Apparent Sidereal Time)”. Това е именно членът ST в уравнението  $HA = ST - RA$ , даващо ни часовия ъгъл. От така определените HA/Dec и географската ширина на обсерваторията, можем да получим „топоцентрическите” азимут и височина. [Нова схема, въведена от IAU през 2000 замести звездното време (Sidereal Time) с нещо по-просто, наречено „ъгъл на завъртане на Земята” ("Earth rotation angle", ERA).]

ERA работи с нова форма на моментната позиция наречена „междинно място” ("intermediate place"), за което нул-пунктът на RA е почти точно в нул-пункта на ICRS-RA, избягвайки всякакви усложнения с еклиптиките и равноденствията.

Следва корекцията за рефракцията. Идващият от една звезда лъч се изкривява, преминавайки през атмосферата, надолу и затова обектът изглежда „повдигнат“ на небето в сравнение с мястото, където би трябвало да се наблюдава. За място на морския бряг ефектът е около 1' за височина над хоризонта 45°; при по-ниски височини над хоризонта ефектът бързо нараства, достатъчно, за да сплеска диска на залязващото Слънце забележимо. Ефектът зависи главно от налягането и температурата около телескопа; за любителските телескопи са достатъчни средните данни за мястото, но при големите телескопи трябва да има метео-датчици, въвеждащи постоянно данните в системата за управление. (Наблюдава се и атмосферна дисперсия, при която звездното изображение се разтяга в спектър с дължина между синята и червената област няколко ").

### Какво прави Вашата монтировка на телескопа

Предходните стъпки ни дадоха „наблюдаваното място“, т.е., положението, където един идеален телескоп с перфектна монтировка и идеално настроен би видял звездата. Но ние имаме реален телескоп, отклоняващ се от идеалния в различна степен в различните си характеристики. Неговите отчети могат да са отместени; компонентите на монтировката – несъосни; тубусът може да е огънат под собствената си тежест; полярната му ос може да не сочи истинския небесен полюс. Бихме могли да се опитаме да подобрим и настроим системата, докато се удовлетворим, но освен съображения за времеемкост и цена, може да се окаже трудно да определим къде точно е проблемът. По-практично е да определим неточностите и да ги компенсирате, коригирайки задаваните координати (или коригирайки изходните телескопни данни, което води до същия резултат). Проблемът за моделиране на всички изкривявания и нерегулярности в монтировката на телескопа може да изглежда трудно решим. Но се оказва, че значително подобряване на позиционните възможности могат да се постигнат просто като се коригират шепа добре разбрани ефекти, които в една или друга степен телескопът показва. Тези ефекти се описват от 6 чисто геометрични параметъра, допълнени от 2-3 огъвания. За една екваториална монтировка 6-те геометрични члена са както следва:

<i>term</i>	<i>description</i>	$\Delta h$	$\Delta \delta$
IH	h index error	IH	
ID	$\delta$ index error		ID
CH	collimation error	CH sec $\delta$	
NP	$h/\delta$ nonperpendicularity	NP tan $\delta$	
MA	polar axis left-right misalignment	- MA cos h tan $\delta$	MA sin h
ME	polar axis vertical misalignment	ME sin h tan $\delta$	ME cos h

Таблица 1.

Шестте геометрични члена за екваториална монтировка.  $h$  и  $\delta$  са часовият ъгъл и деклинацията.

Параметрите IH и ID са просто корекциите в нул-пунктовете на отчитаните часов ъгъл и деклинация. Грешката на колимацията CH описва колко точно е колимирана оптиката на телескопа в тубуса, дали тубусът е под прав ъгъл спрямо деклинационната ос и всяко отместване в посока изток-запад на нишковия кръст, центъра на CCD-матрицата, или каквато и да е друга ползвана контролна точка. Предполага се, че деклинационната ос е под прав ъгъл спрямо полярната ос; NP описва всяко отклонение от това състояние. MA и ME описват отместването на инструменталната от истинската полярна ос,  $\uparrow$  за ME и  $\leftrightarrow$  за MA. (Алт-азимуталните телескопи имат подобен набор от параметри; нул-пунктовете са по азимуталната и височинната оси, колимационната грешка е ляво-дясно, а не изток-запад, не-перпендикулярността е между споменатите оси и де-колимационните параметри описват N-S и E-W наклоните на азимуталната ос).

В допълнение към тези чисто геометрични параметри се добавят 3 типа огъвания, които често се проявяват:



term	description	$\Delta h$	$\Delta \delta$
TF	tube flexure	$TF \cos \phi \sin h \sec \delta$	$TF (\cos \phi \cos h \sin \delta - \sin \phi \cos \delta)$
FO	fork flexure		$FO \cos h$
DAF	$\delta$ axis flexure	$- DAF (\cos \phi \cos h + \sin \phi \tan \delta)$	

Таблица 2.

Три различни вида огъвания.

$\phi$  е географската ширина на мястото.

TF описва провисването на телескопа, което е толкова по-голямо, колкото по-ниско го насочваме. FO е огъването на вилката, винаги съществуващо при екваториалните вилки, но понякога и при вилки тип „хомот“ или „конска подкова“. Този ефект може да бъде голям: например, при 120-инчовия Lick FO е около 4'. DAF е усукването (flap) на свободния край на деклинационната ос, например, при германска екваториална или английска монтировка. Повечето малки телескопи се нуждаят от отчитане или на FO, или на DAF, като може да има и малко TF. Често се наблюдават и хармоници, дължащи се на децентровки и ексцентровки на различните оси и водещи колела.

В горните таблици всеки от коефициентите IH...DAF представлява малък ъгъл, представян обикновено в ("). Формулите за dHA и dDec дават корекциите, които следва да се добавят към отчетите на телескопа („телескопните координати“). Наборът от стойности на коефициентите и формулите задават *позиционния модел на телескопа*, различните членове, които се добавят, за да се получи крайната корекция за всяка ос. Прилагайки модел с 6-те геометрични параметъра и, да кажем, огъването на вилката, може да се достигне забележителен ефект в позиционната точност на телескопа. Без корекция би било необходимо да локализирате обекта по търсача, трудна задача, ако е слаб. С прилагане на моделната корекция обикновено обектът се появява центриран дори и в най-силния окуляр – по всяко време, по цялото небе.

Видяхме как да насочим телескопа, знаем какви изчисления да изпълним с каталожните координати на звездата, за да предвидим положението ѝ в дадена нощ; знаем какво да направим, за да отчетем местоположението на обсерваторията и ефектите в атмосферата; знаем как да използваме корекциите в насочването и имаме представа какъв модел да ползваме. Но има нещо, което не е още изяснено. Как да узнаем кои величини да използваме за коефициентите IH, ID и т.н.? Стартираме TPOINT.

## Преодоляване на пропастта с TPOINT

TPOINT е програмен пакет, интерактивен инструмент, който „разшифрова“ за позиционния модел на даден телескоп наблюденията на положенията на звездите. Той се използва в професионалните обсерватории навсякъде по света (Keck, GBT, Gemini, ALMA, AAT, ARC, WIYN, WHT, UKIRT, JBO, IRTF, NSST, ESO, CTIO, SOAR, MMT, Magellan, LBT...) на телескопи с най-различна конструкция – екваториална и алт-азимутална, оптически/ИЧ и радио. TPOINT върши 3 неща:

- Приема списъци с наблюдения за насочване, уточнявайки: (i) къде в действителност е била звездата и (ii) къде телескопните отчети са показали, че е била тя.
- Оптимизира избран от потребителя позиционен модел (желаният списък с имена на коефициенти) към наблюденията, така че стойностите на коефициентите да дават възможно най-добро съгласие между положенията на звездите и показанията на телескопа.
- Представя в различни графики остатъчните позиционни грешки (резидуалите). Ако графиките покажат, че са останали систематични грешки, операторът може да включи допълнителни членове в модела и да повтори сметките.

Засега са достъпни две TPOINT-версии с един и същ софтуер в основата, но предлагащи различен стил на ползване. Те са наследници на програми, развити за ААТ през 1970-те и след това приложени в много големи обсерватории върху VAX/VMS и Unix платформи. Едната версия, понякога наричана "proTPOINT", е достъпна от *Tpoint Software*; тя изглежда досущ като оригиналната TPOINT, но работи на PC-та под MS-Windows или Linux. Другата TPOINT е на *Software Bisque* и е интегрирана с техния астро-пакет *TheSky*. Тя има разширен потребителски интерфейс, работи под различни Microsoft Windows операционни системи и е напълно съвместима с функциите в системата за управление на телескопи *TheSky*. И двете версии на TPOINT използват една и съща моделна техника и дават идентични резултати.

Ето как се ползва TPOINT:

1. Насочвате телескопа в набор от звезди по цялото небе (TPOINT се доставя с няколко каталога с подходящи звезди) и центрирате изображенията в кръста или върху избран CCD-пиксел. Записвате *каталожните координати* на звездите, *телескопните координати* (отчетите за RA/Dec) и звездното време.
2. Стартирате пакета TPOINT: залагате наблюденията и въвеждате позиционния модел.
3. Прилагате позиционния модел към телескопа.

Единствената „хитрост“ се крие в Стъпка 3. Ако телескопът е с компютърна управляваща система, която вече поддържа TPOINT-корекции (*TheSky* на *Software Bisque* и *PC-TCS* на *Comsoft* са два примера), тогава *прилагането на модела* означава просто въвеждане на нов набор числа. Ако не е така, тогава трябва да набавите инструменти, необходими за прилагане на корекциите. Това е проблем, на който производителите на телескопи следва да обърнат внимание: или да се напишат нови управляващи програми, или, за телескопи без компютър, да се използват известни пакети за генериране на нужната таблица.

Трябва винаги да се има предвид, че един отличен резултат, регистриран с TPOINT, е от малка полза, ако не е получен при нормални обстоятелства. Акуратно боравене с модела, внимателно следене и настройка при необходимост са от съществено значение. Но за да се получи секундна точност на позициониране при големите съвременни телескопи означава съответни грижи не само за положенията на звездите, но и за положението на фокалната повърхност, върху която се проектира звездното изображение. Това изисква умели грижи, мощен *on-line* инструментариум за калибровка и щателни настройки всяка нощ.

### Какво означава всичко това?

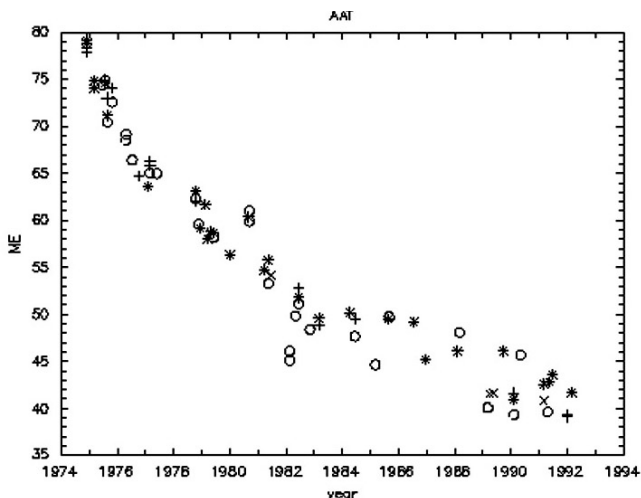
Двете таблици представят някои описания на TPOINT-корекции за реални физични ефекти: ако NP е 50", TPOINT е оценил, че двете оси на монтировката са отклонени на квадрат от тази величина. Често се поставя въпросът дали е нужно в позиционния модел да се залагат по този начин механичните ефекти – защо да се борим с тях с тези формули, когато набор от хармоници или полиноми би работил точно така и може би по-добре? Има най-малко две причини механично-базираното приближение на TPOINT да е за предпочитане:

- „Механичният“ модел е „по-уютен“, с по-малко параметри и изискващ по-малко наблюдения, за да се установи точно. Той изглежда се държи и по-добре: полиномите в частност работят добре вътре в дефинитивната област на наблюденията, но извън нея „полудяват“.
- От „механичният“ модел могат да се научат много полезни неща. Например, може да се разбере отклонението от полюса, даже за места, откъдето Полярната звезда не се вижда, както и може да се установят признаци за наклон на монтировката на огледалото или други проблеми, искащи „механично“ лечение.



Щом сте се справили с механичното приближение, TPOINT вече е напълно въоръжен за използване и на хармоници, и на полиноми за крайната „битка“.

Независимо дали ще се ползват „механични“ или други модели, важно е да се прави разлика между повтаряемите ефекти и случайния шум. Задавайки набор от наблюдения е съблазнително да се добавят членове в уравненията на модела докато RMS (средната квадратична грешка) стане толкова малка, колкото бихте искали да бъде. Но как да знаете, дали имате реално описание на свойствата на телескопа, или не просто влияние на шума? Отговорът е да се изследва повторемостта на модела от един тест към друг. Ако коефициентите, които очаквате да бъдат постоянни, се държат така, тогава моделът дава предвидими величини и струва нещо. Ако стойностите на коефициентите се менят силно от тест към тест, то те са безполезни и трябва да се отстранят от модела. Но все пак, някои параметри следва да се очаква, че могат да се променят. Ако на осите има не абсолютни, а инкрементални датчици, то отчитането става след начално позициониране по някаква звезда и, следователно, стойностите на параметрите IH и ID естествено, всеки път са различни. Също така, ако оптиката се преюстира или CCD-камерата се мести, то параметрите CH и ID няма да са константи. Важно за практиката е да усещаме кои параметри трябва или не да бъдат запазени от тест към тест, когато търсим нови параметри (за включване в модела – к.прев.). TPOINT включва средства за комбиниране на данни от множество тестове, така че системните грешки могат да се отделят от шума; преди данните да могат да се обединят, важно е от всеки набор данни да се отстранят параметрите, които могат да се променят. Дълговременното следене за поведението на позиционните параметри може да се окаже интересно. На Фиг. 2 е показана графика на грешката от деколимация по височина на полярната ос (параметърът ME) за AAT за период от 20 години.



**Фигура 2.**

*Промяна на височината над хоризонта на полярната ос на Anglo-Australian Telescope, отбелязваща снижение от няколко секунди годишно. Ефектът може да се дължи на улягане на бетонната основа, което се съгласува със забавянето на ефекта с годините. Всяка точка отразява един позиционен тест; различните знаци се отнасят до различните системи, окачени в първичния фокус на AAT.*

Има постоянен дрейф надолу, достигнал до около 50". Причината е неясна: улягане само на колоната или дори на целия фундамент на сградата или даже промяна на подземния воден слой в местността. По-късно ще кажем и за юстировката на полярната ос.

### Експлоатационни аспекти

Даже и за най-добрите телескопи е обичайно да се прави известна *калибровка в началото на нощта*. Това е по същество един мини-позиционен тест с последваща настройка на съвсем малко параметри. При телескопи с абсолютни датчици 3 звезди дават добра оценка за параметрите CH и ID за цялата нощ (за алт-азимутални монтировки – параметрите са CA и IE); 5-6 звезди са достатъчни за настройка на параметрите IH или IA (за алт-аз); още 2-3 звезди и към списъка можем да добавим и настройка на параметрите за полярната ос – ME и MA (AW и AN за алт-аз). По-малко звезди са достатъчни, ако параметрите са с достатъчно голяма стойност и изискванията за точност – по-умерени. Един пълноразмерен позиционен тест, включващ 50-100 звезди, може да бъде много времеемък и за компютърно управляеми телескопи често се прави без намесата на оператор, използвайки CCD-камерата или

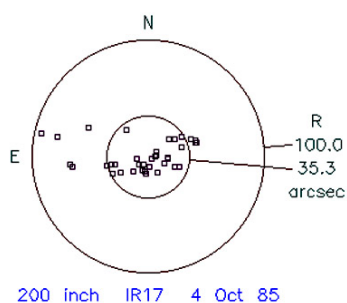
автогида за докарване на телескопа преди да се отчитат данните за всяка звезда. Подобрите любителски телескопи са напълно в състояние да изпълнят такъв роботизиран тест, но все пак е нужно присъствие на човек, за да следи движението на телескопа за избягване на аварии.

Практически полезно свойство на TPOINT е способността му да определи полярната ос без никакви специални наблюдения за тази цел на звездни трекове или на Полярната звезда. Процедурата е директна. Прави се обикновен позиционен тест с колкото може повече звезди по цялото видимо небе. След това се използва TPOINT, за да се фитира модел, включващ всички стандартни параметри, включително членовете за несъосност на полярната ос – MA и ME. След това полярната ос може да се съоси с небесната по азимут, завъртайки монтировката на ъгъл  $MA/\cos\phi$  (спазвайки правилно знаците) и по височина над хоризонта по разликата между измерената и желаната стойност на ME. Препоръчителната стойност на ME е тази, съответстваша на изменената заради рефракцията, а не на истинския полюс (отговаряща на  $ME = 0$ ), за да се минимизира въртенето на полето. При съосяване на полярната ос с „рефрактиралния“ полюс (нещо, което всички стандартни методи се опитват да правят) скоростта на водене около зенита става точно „табличната“ –  $15''/\text{сек}$ . Рефракцията сплесква леко картината и, ако инструменталната ос е строго успоредна на земната, скоростта на водене става малко по-малка от  $15''/\text{сек}$ ; обаче, повдигайки леко инструменталната ос за да нацели рефрактиралния полюс, ускоряваме леко скоростта на следене, така че двата ефекта се компенсират!

## TPOINT в действие

За да покажем, какво може да прави TPOINT, нека погледнем 3 различни телескопа: голям стар екваториал, един голям по-нов, с алт-азимутална монтировка и един качествен любителски телескоп.

Ще започнем с данните за *Hale 200-inch* на Паломар – набор от 39 наблюдения, включващи звезди по цялото небе до  $16^\circ$  височина (над хоризонта – к. пр.). Използвайки прости нул-пункт корекции (IH and ID), RMS-грешката е  $35''$ : TPOINT-диаграмата на разсейване (Фиг. 3) показва къде трябва да се появят звездите при „сляпо“ насочване.

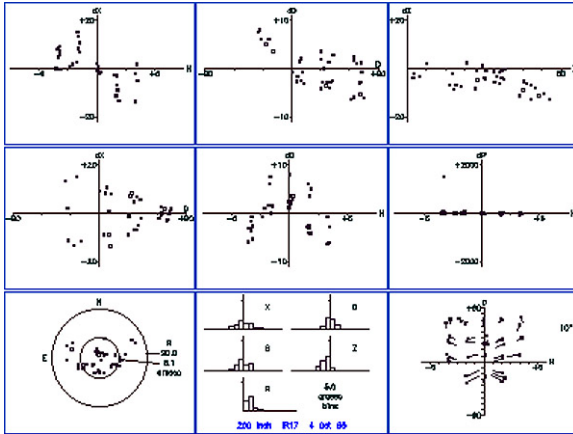


Фигура 3.

*Вътрешна точност на позициониране за 200-inch Hale. Единствените корекции, които са приложени, са за нул-пунктовете на часовия ъгъл и деклинацията. Тази диаграма на разсейване показва къде би трябвало всяка звезда да се появи след просто задаване на координатите ѝ на пулта; колкото по-добре е позиционирането, толкова по-тясно се групират данните. Вътрешната окръжност показва точността на позициониране, която показват 50% от звездите в примера – в случая,  $35''$ .*

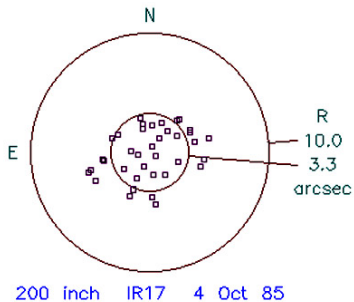
Резултатът е вече значително по-добър от често цитираната величина  $1'$  и показва важността от основните корекции на позиционната астрономия – прецесия, нутация, аберация, рефракция. Сега ще поискаме TPOINT да използва стандартния 6-параметричен „геометричен“ модел. Той води до впечатляваща средноквадратична грешка от  $8''$  (Фиг. 4). На този етап предлагаме набор от различни графики на резидуалите за да видим некоригираните ефекти (Фиг. 5).

**Фигура 5.**



Набор от графики, генерирани с TPOINT за 5-м телескоп и с 6-параметричен модел. Очевиден е дрейф по двете оси – часов ъгъл (горе-вляво, E-W грешка срещу часов ъгъл) и деклинация (горе, център, деклинационна грешка срещу деклинация). На този етап изглежда се регистрират огъване на тубуса (горе-вдясно, грешка в зенитното разстояние срещу зенитното  $\rho$ -е) и на вилката (в центъра, грешка в деклин. срещу часов ъгъл) но това се отстранява когато дрейфа се коригира. Останалите графики са: E-W грешки срещу деклинация (център-ляво), неперпендикулярност на осите срещу часов ъгъл (център-дясно); диаграма на разсейването (долу-вляво), разпределение на грешките (долу-център) и карта на вектора на грешките по небето (долу-вдясно).

Има знаци за де-центровка по двете оси – RA и Dec; добавяйки в модела членове HNSH и HDSD (синусоидални първи хармоници по всяка ос за да се съгласува наблюдаваната фаза), достигаме точност от 3.3" (Фиг. 6).

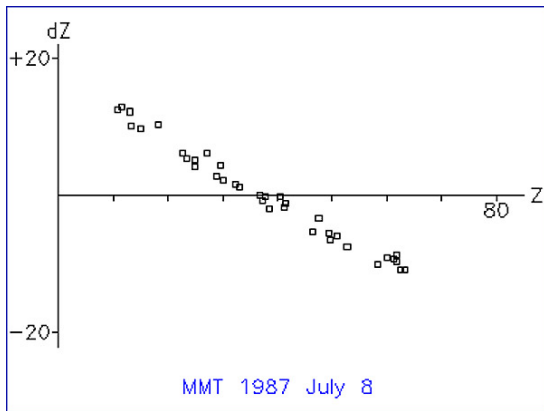


**Фигура 6.**

Резултатът от добавяне на параметрите HNSH и HDSD в модела за 200-inch телескоп. Точността на позициониране сега е 3.3" RMS, един превъзходен резултат. Външната окръжност е почти колкото размера на диска на Сатурн.

Това е изключително добър резултат по всички стандарти и е показател за това, колко забележителен е този 5-м телескоп; фактически по-нататъшна работа с TPOINT свидетелства, че максималната точност може да бъде под 2" RMS. Всъщност, първоначалната управляваща система на 5-м телескоп е включвала аналогови елементи – зъбни колела, ексцентрици и селсини – вместо компютри и кодери. Системата е изобретена от астронома Sinclair Smith (от Маунт Уилсън обс., к.пр.), който трагично умира преди конструирането да се осъществи. Разработката е завършил Ed Poitras, но по едни или други причини никога не е била построена. Както и да е, 5-м е получил в 1940-те система за насочване с 5"-на точност.

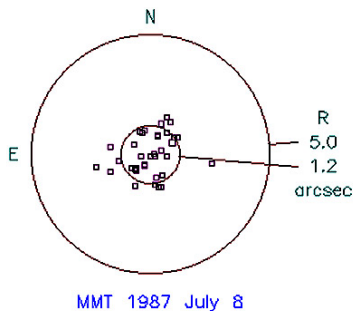
Вторият пример е съвременен алт-азимутален телескоп: MMT, *Multiple-Mirror Telescope* в Аризона, който неотдавна бе трансформиран в едно-огледален 6.5-м инструмент. Суровите данни, наблюдения на 36 звезди, са добити, използвайки централния контролен телескоп (в много-огледалната схема – к.пр.). Точността след настройката на нул-пунктовете по азимут и височина, IA и IE, е 7.7". Добавяйки CA, NPAE, AW и AN за да завършим базовия 6-параметричен геометричен модел за алт-аз монтировка, получаваме съвсем слабо подобрене до около 7.4" RMS, което говори, че *монтировката* е юстирана много добре. От графиката на вертикалния компонент на позиционната грешка в зависимост от зенитното отстояние (Фиг. 7) се вижда, че има значително огъване на тубуса (или възможно улягане).



**Фигура 7.**

Резидуалите за зенитното разстояние на ММТ след прилагане на базовия 6-параметричен модел: графиката свидетелствува за значително огъване на тубуса.

Щом се добави TF-параметър в модела, RMS се подобрява невероятно, до 1.9". Има също свидетелства за де-центровка по азимут, а добавка на член НАСА води до RMS=1.2" (Фиг. 8).

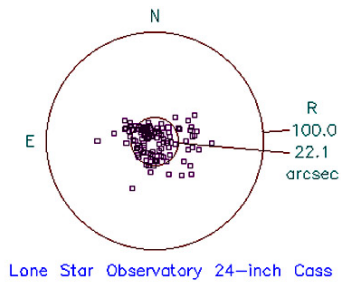


**Фигура 8.**

Добавяйки в модела на ММТ параметрите TF и НАСА получаваме RMS 1.2". Максималната точност, която позволява монтировката на ММТ е може би много под 1".

По-нататъшна работа може да покаже, че монтировката на ММТ би могла да позволи точност от 0.6", но доказателството за това изисква по-многообектен тест (или комбиниране на няколко теста). Подобен впечатляващ резултат е получен и за ESO VLT (четири 8-м телескопа в Чили), и за Gemini (8-м на Хавай и в Чили), използвайки тестове със стотици звезди, довеждайки RMS значително под 1".

Накрая, за да покажем какво може да се получи с любителско сферично огледало, да видим резултата за 60-см касегрен на Lone Star Observatory в Caney, Oklahoma, построен от група от 12 любители от Далас, Тексас. Преди прилагането на TPOINT-анализ, телескопът е имал точност на насочване 10', затруднявайки поставянето на слаби обекти. Предварителни TPOINT-тестове разкриват де-колимация на полярната ос от около 0.2° (12') плюс индикации за махачен наклон и циклични грешки в часовия ъгъл. Показаният тук тест е изпълнен след: (i) юстировка на полярната ос съгласно предварителните TPOINT-резултати, (ii) идентифицирани и включени свободни параметри и (iii) замяна на съществуващото задвижване на зъбни колела с по-добра червячна система. Тестът включва 123 звезди разделени през около 10° и трае около 2 часа. По-ранният тест с TPOINT е осигурил достатъчно добър модел за контролната компютърна система, за да се позиционират звездите направо в 800-кратен окуляр с осветен кръст, без нужда от търсач. Базовият 6-параметричен геометричен модел дава обещаващите 46" RMS. Циклични грешки, често присъстващи заради остатъчни де-центровки на лагерите и т.н., както и огъване са очевидни. Добавени са 5 допълнителни параметри: HSH (корекции в часовия ъгъл пропорционални на  $\sin \text{АН}$ ), HXCH (E-W корекции, пропорционални на  $\cos \text{НА}$ ), HDCH (корекции в деклинацията, пропорционални на  $\cos \text{НА}$ ) и, накрая, FO и HDSH2 (корекции в деклинацията, пропорционални на  $\cos \text{НА}$  и  $\sin 2\text{НА}$  съответно). Не бе забелязано огъване на тубуса. Крайният 11-параметричен модел осигурява RMS 22" (Фигура 9), което е и крайният резултат.



**Фигура 9.**

Възможности за насочване на 60-см касегрен в Lone Star Observatory. Базовият 6-коэффициентен модел осигурява 46" точност. След корекция за различни огъвания и де-центровки (HNSH, HXCH, HDCC, FO и HDSH2) е достигната точност 22" RMS за този любителски построен компютърно управляван телескоп. Вътрешната окръжност има размер почти колкото диска на Юпитер.

Не бих могъл да изразя този резултат по-добре от казаното от Barry Smith, шеф на Lone Star Observatory, няколко седмици след теста:

*"Абсолютно невероятно за визуални наблюдения насочване. Насочих се в гъмжилото на Uppsala-галактиките и телескопът отиваше на всяка от тях... Галактика след галактика от 15 до 16.5 величина се виждаха. Съгласен съм, аз не виждах много детайли у една 16.5<sup>m</sup> галактика, но, знаейки къде да гледам, и убеждавайки се, че ултра-слабото петънце се движи заедно с полето, аз можех да добавя нова галактика в моя личен списък".*

Превод: Д. К.