

**Consideraciones acerca del apuntado óptico
para el radiotelescopio de 40 m del CAY**

Pere Planesas

Informe Técnico OAN 2005-1

2005.01.14

Capítulo 1

El sistema de adquisición de datos

1.1. Introducción

Se trata de evaluar las posibilidades de instalar transitoriamente un telescopio óptico solidario a la estructura móvil del radiotelescopio de 40 m de diámetro (rt40m) recién montado en el Centro Astronómico de Yebes con el fin de realizar las comprobaciones iniciales del apuntado del radiotelescopio.

No se trata de instalar un sistema permanente, como el de algunos interferómetros milimétricos y submilimétricos, donde es utilizado para la determinación del modelo de apuntado inicial tras cada traslado de las antenas y para la comprobación ocasional del apuntado. En algún telescopio submilimétrico se podría emplear también como sistema de autoguiado. En nuestro caso, se trata de poder determinar un apuntado preliminar de la antena tan pronto como sea posible controlarla con un prototipo del programa de control, instante en que ninguna referencia aún se tiene de la orientación precisa de la antena y sin necesidad de disponer de un sistema receptor sensible instalado.

La solución adoptada suele ser instalar un pequeño telescopio óptico dotado de una cámara CCD (e.g. Mangum, 2004) o de una cámara de tv con intensificador de imagen (OVRO mmI) capaz de obtener la posición de un número suficiente de estrellas, cuyas posiciones muy precisas se conocen (eg. catálogo Tycho con un millón de estrellas).

Dado que lo que se pretende es determinar el apuntado observando un número suficiente de estrellas que se encuentren sobre el horizonte, el telescopio puede ser de pequeño tamaño, a determinar. Aún con ello, hay numerosas limitaciones a tener en cuenta.

Como conclusión, se propone la realización de pruebas de observación de estrellas del catálogo Hipparcos con un telescopio compacto de 90–100 mm de apertura equipado con una CCD de 31 kpx usada antiguamente en el astrógrafo. En caso de necesitar un mayor campo visual, y tras comprobar que el sistema es viable, se procedería a adquirir una CCD moderna de mayor superficie (> 1 Mpx).

1.2. Limitaciones

1. No es posible realizar el apuntado de día, salvo que la CCD sea sensible a la radiación infrarroja (NIR). En este caso hay que colocar un filtro adecuado que deje pasar el IR. Conviene tener en cuenta que algunas CCDs, pensadas para la obtención de imágenes ópticas, llevan incorporado un filtro para 'eliminar' la radiación IR incidente.
2. Es necesario poder enfocar, especialmente si la CCD responde a un amplio rango de longitudes de onda y se emplean varias bandas (V, I).
3. No es posible realizar el apuntado si hay nubes.
4. El apuntado que se obtendrá corresponderá al eje óptico del telescopio óptico y no al eje radio del radiotelescopio, por lo que es esperable un desplazamiento angular entre ellos, que habrá que reducir reajustando la orientación del telescopio óptico, operación que deberá estar prevista en la instalación. El primer apuntado será, probablemente, una larga operación.

1.3. El sistema completo

Constará de:

1. Un telescopio óptico.
2. Una cámara CCD.
3. Una rueda de filtros (opcional).
4. Una caja de conmutadores para activar y desactivar los distintos motores y actuadores: apertura y cierre de la tapa del telescopio, arranque y apagado de la cámara, apertura y cierre del *shutter* (para protección y *dark frame*), control de la rueda de filtros, ...
5. Un módulo de adquisición de datos.
6. Un ordenador para el control de la cámara y el módulo.
7. Un sistema de reducción de los datos y visualización del resultado.
8. Un armazón no deformable, sujetable con rigidez y orientable con precisión.

1.4. Lugar de instalación

1.4.1. Telescopio instalado en el subreflector

Necesidades

1. Instalación de un armazón en la parte posterior del subreflector donde se pueda instalar el telescopio y todos sus accesorios y controles.
2. Apertura y cierre motorizado de la tapa frontal del telescopio.
3. Conmutador de alimentación de la CCD y del equipo de toma de datos.
4. Conmutador de alimentación de la rueda de filtros, si la hay.
5. Control del enfoque, especialmente si la CCD cubre los rangos visual e infrarrojo.

Quizás los dos últimos puntos se puedan solucionar con un único control, que permita quitar y poner un filtro IR junto con el corrector de foco IR, suponiendo que no sea necesario enfocar en ningún otro caso. Sin embargo, los cambios de temperatura ambiente pueden hacer necesario el reenfoque entre distintas sesiones de observación e incluso dentro de una misma sesión.

Además, dado que esta instalación deberá permanecer una temporada de, previsiblemente, varias semanas se necesitará:

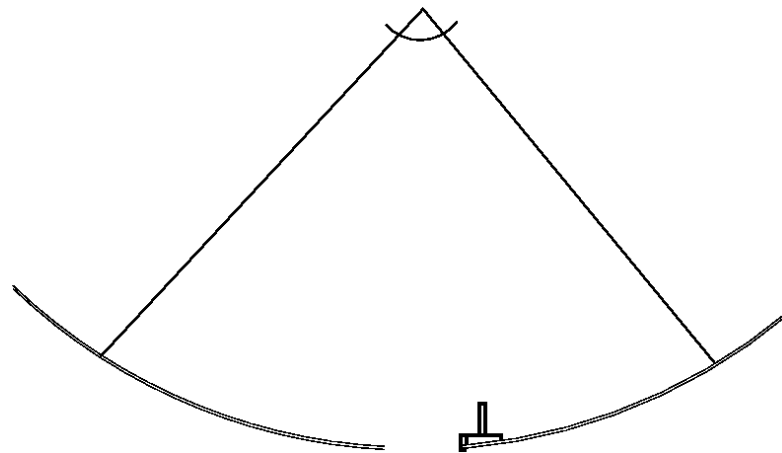
6. Protección de todo el equipo de la intemperie.
7. Sujeción firme y bien orientada. Y orientable.

Entre las dificultades principales en aplicar esta opción al rt40m se encuentran:

1. Acceso al subreflector necesario para la instalación, manipulación y desinstalación.
2. No se pueden instalar más cables que los que ya hay, lo que obliga a transformar la corriente a lo que necesita cada motor, actuador, CCD, etc.
3. Los datos deben necesariamente bajar por red Ethernet, lo que obliga a instalar un procesador complejo en la toma de datos, que hay que alimentar y controlar. Quizás también exista la posibilidad de bajarlos a través de uno de los interfases RS232 instalados.

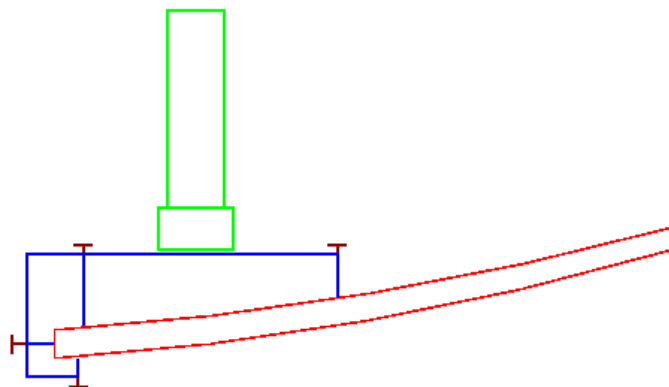
1.4.2. Telescopio instalado en el anillo central

Una solución alternativa es instalar el telescopio en un armazón temporal instalado en el anillo central y apoyado en la parte interior del reflector principal. Este armazón debe ser suficientemente largo para que el campo visual del telescopio no sea tapado por el subreflector. Se simplifica su sujeción si se coloca en la parte baja del anillo, posición en la que no interfiere el tetrapodo que sostiene el subreflector. Hay que verificar que es posible sujetar el armazón en un panel (tal como se indica en las figuras) o bien en las vigas que sujetan a éstos.



Desventajas:

1. Posiblemente la desventaja principal de esta opción sea que la diferencia entre los ejes óptico y radio sea mayor que en el otro caso, puesto que no compensa por la deformación gravitatoria del tetrapodo.
2. El armazón es más pesado.



Todo lo demás son ventajas:

1. Es totalmente accesible.
2. Fácil de instalar y de quitar (a comprobar tras el montaje final de todas las estructuras en el radiotelescopio).
3. Relativamente fácil de reorientar.
4. No hay limitación en la alimentación de los diversos motores.
5. Algunos de los controles pueden ser manuales: poner y quitar la tapa protectora, manipular los filtros, arrancar los diversos sistemas, ...
6. Se pueden extraer los datos hacia un ordenador próximo mediante un interfase habitual de las cámaras CCD (en los antiguos era RS232, actualmente suele ser USB). Este ordenador se puede controlar a distancia mediante la red Ethernet instalada en la cabina.

En el diseño del armazón hay que tener la precaución de que ni el subreflector, ni las patas que lo soportan cubran el campo visual del telescopio, aun cuando se desplacen por deformación gravitatoria.

Puede haber dificultades para acceder al anillo central por la presencia de un cilindro interior que puede estar cubierto por una membrana.

1.4.3. Telescopio instalado en un panel

Una solución similar a la anterior y que quizás sea más factible desde el punto de vista del acceso, consistiría en perforar uno de los paneles interiores, que fuera accesible desde la estructura que los sujeta, y hacer que el telescopio asome por tal perforación. Cuando se retirara el telescopio se debería colocar una tapa plástica en su lugar. Los demás comentarios son similares al caso antes descrito.

1.5. Parámetros de un telescopio

Límite de difracción:

$$\theta_d = \frac{\lambda}{D} = 250'' \frac{\lambda(\mu\text{m})}{D(\text{mm})}$$

Para la longitud de onda de mayor rendimiento de las cámaras CCD, próxima a la banda I: $\lambda = 750 \text{ nm} = 0,75 \mu\text{m}$ resulta:

$$\theta_d('') \simeq 188''/D$$

Si va equipada con un filtro V (centrado en $\lambda = 550 \text{ nm}$) resulta:

$$\theta_d(\prime\prime) \simeq 138\prime\prime/D$$

La escala en el plano focal viene dada por el inverso de la focal, o sea:

$$E = \frac{206}{M f(\text{mm})} \prime\prime/\mu\text{m}$$

donde f es la distancia focal del telescopio y M es el factor de aumento de una posible lente de Barlow. Si no la hay será $M = 1$.

1.6. Parámetros de una CCD

La CCD viene caracterizada por el tamaño p del pixel (pueden ser rectangulares p_x, p_y), por el número de pixels N en cada dirección (N_x, N_y , suelen estar en las relaciones 4:3 o 1:1) y por su sensibilidad.

El tamaño real p del pixel deberá ser:

$$p < \frac{\theta_d}{E} \mu\text{m}$$

El campo visual L viene limitado por el tamaño de la CCD:

$$L = N p E (\prime\prime)$$

Dado el desajuste inicial previsible, conviene que este campo sea grande. Una buena combinación de telescopio y CCD será aquella en la que el tamaño del pixel de la CCD sea el máximo adecuado para la escala que da el telescopio.

Ejemplo

Consideremos el caso de un telescopio de $D = 60 \text{ mm}$ (aproximadamente 2,5 pulgadas) y $f = 600 \text{ mm}$. Los valores anteriores (para $\lambda 0,75\mu\text{m}$) serán:

$$\begin{aligned}\theta_d &= 3,1\prime\prime \\ E &= 0,34\prime\prime/\mu\text{m} \\ p &< 0,91 f/D = 9,1 \mu\text{m}\end{aligned}$$

Consideremos una cámara CCD típica de 600 pixeles de $9 \mu\text{m}$ cada uno. Su campo visual será:

$$L = 1836\prime\prime = 30'$$

que corresponde al tamaño medio de la Luna.

1.6.1. Tamaño del pixel

Conviene expresar el tamaño del pixel en diversas unidades:

$$1 \text{ pixel} = 10^{-3} \frac{p(\mu\text{m})}{M f(\text{mm})} \text{ rad} = 206'' \frac{p(\mu\text{m})}{M f(\text{mm})} = 3,44' \frac{p(\mu\text{m})}{M f(\text{mm})}$$

El límite de difracción del telescopio puede expresarse en función del tamaño del pixel:

$$w_d(\text{pixels}) = \frac{\theta_d('')}{p('')} = 6,8 \frac{M f(\text{mm})}{p(\mu\text{m}) D(\text{mm})}$$

Si observamos una estrella (objeto puntual) con un telescopio pequeño y con buena visibilidad (*seeing*), el tamaño, en pixels, que dará vendrá dado por w_d , entendido como tamaño a mitad de intensidad. En otro caso, cuando el seeing s (entendido en sentido FWHM) domine la máxima resolución alcanzable, el tamaño w será correspondientemente mayor:

$$w(\text{pixels}) = \frac{s('')}{p('')}$$

1.6.2. Brillo detectado

El brillo máximo B' de una estrella medido en la CCD expresado en ADU/s, (siendo ADU la unidad típica de medida en la CCD, que se expresará como un número entre 0 y 255 para una CCD de 8 bits), se relaciona con su flujo S' (en ADU s⁻¹ px²) por:

$$S' = 1,13 B' w^2$$

A su vez, se relaciona con la magnitud m medida con un telescopio de diámetro D (mm) mediante:

$$m = m_0 - 2,5 \log S' + 5 \log D$$

donde m_0 depende del detector (sensibilidad, superficie del pixel).

La magnitud límite detectable con dicho telescopio viene dada por:

$$m_{lim} = m_1 + 5 \log D(\text{mm}) + 1,25 \log T_{exp}(\text{s})$$

siendo T_{exp} el tiempo de exposición acumulado y m_1 un valor que depende de la CCD empleada.

Por otra parte, el flujo S expresado en janskys se relaciona con la magnitud visual V mediante la relación:

$$S = 3540 \cdot 10^{-0,4V} \text{ Jy}$$

El factor de conversión útil entre las dos expresiones del flujo (S y S') puede expresarse como:

$$\alpha = \frac{S}{S' \cdot 10^{-6} p^2 / f^2} \frac{\text{Jy/sr}}{\text{ADU/s}}$$

donde se ha hecho intervenir la superficie del pixel a fin de obtener un factor que hace que podamos expresar el brillo B de un modo independiente de la CCD usada. En efecto, el brillo medido:

$$B = \alpha B'$$

tiene como unidades: Jy s^{-1} .

1.7. Costes

Los precios que se dan en esta sección son orientativos.

1.7.1. Telescopio

Conviene que sea pequeño y razonablemente resistente a la intemperie.

Los telescopios utilizados por los astrónomos aficionados no son resistentes a la lluvia, pues obviamente no es un requisito para ellos. Algunos telescopios usados por los observadores de aves (denominados *telescopios terrestres*) cumplen los requisitos de ser pequeños (el diámetro del objetivo está entre 60 y 80 mm) y herméticos (aquellos que están rellenos de nitrógeno). Sus precios dependen del diámetro del objetivo ($\propto D^2$), de la calidad de las lentes que lo componen (fluorita/multitratado $\simeq 2$) y de la marca.

Algunos precios orientativos son (SEO 2003, e internet):

Opticron $D = 66$ mm, modelo HR-66-GA V45: 495 € (adaptador foto digital: 170 €)

Zeiss $D = 65$ mm, fluorita, modelo Diascope 65 T: 1036 €

Kowa $D = 60$ mm, multitratado, modelo TS 601: 400 €

Kowa $D = 66$ mm, multitratado, modelo TS 662: 506 €

Kowa $D = 82$ mm, multitratado, modelo TSN-822M: 683 €

Kowa $D = 82$ mm, fluorita, modelo TSN-824M: 1350 €

Nikon $D = 80$ mm, modelo Spotting Scope D80: 525 € (adaptador fotográfico: 400 €)

Vixen $D = 80$ mm, modelo Geoma: 477 € (adaptador fotográfico: 52 €)

(Conviene comprobar que el modelo elegido efectivamente es hermético y con N_2 .)

En caso de decidirse por un telescopio no hermético (situado en el anillo del telescopio o protegido), hay muchas más opciones. Entre los muy compactos Maksutov (precios sin trípode) se encuentran:

Sky-Watcher Maksutov MAK90SP ($D = 90$ mm = 3,5 pulgadas, $f = 1250$ mm, longitud 28 cm): 275 €

Sky-Watcher Maksutov MAK102SP ($D = 102$ mm = 4 pulgadas, $f = 1300$ mm, longitud 33 cm): 350 €

Celestron C90 Maksutov Spotting Scope ($D = 90$ mm, $f = 1200$ mm, hermético, longitud 28 cm): 260 €



Para estos telescopios se tiene ($\lambda 0,75\mu\text{m}$):

$$\begin{aligned}\theta_d &= 2,1'' \\ E &= 0,17''/\mu\text{m} \\ p &< 12,6 \mu\text{m}\end{aligned}$$

El campo que dan en una CCD es reducido debido a su larga focal. Para maximizarlo, debe emplearse una CCD con pixeles grandes, del orden de $12 \mu\text{m}$.

Telescopios refractores de corta focal (catálogo Valkanik, precios sin trípode):

SkyWatcher SW804 ($D = 80 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm}$, longitud 48 cm): 300 €

SkyWatcher SW1025 ($D = 102 \text{ mm}$, $f = 500 \text{ mm}$, longitud $> 50 \text{ cm}$): 350 €

SkyWatcher SW1206 ($D = 120 \text{ mm}$, $f = 600 \text{ mm}$, longitud $> 60 \text{ cm}$): 400 €

Para el segundo de ellos se tiene ($\lambda 0,75\mu\text{m}$):

$$\begin{aligned}\theta_d &= 1,8'' \\ E &= 0,41''/\mu\text{m} \\ p &< 4,5 \mu\text{m}\end{aligned}$$



1.7.2. Lente de Barlow

El precio de una lente de Barlow de 2 o 3 aumentos viene a ser de unos 200 € . Su efecto es el de reducir el campo visual en la misma proporción que su aumento. Para el uso que queremos darle al sistema, probablemente no sea necesario incorporar tal lente.

1.7.3. Cámara CCD

Me he limitado a cámaras de pequeño formato, de menos de 1 Mpxl (Roma 2004):

Sin refrigerar:

Meade Deep Sky Imager (sensor de 510×492 px de $9,6 \times 7,5 \mu\text{m}$, color, conector USB, software, <http://www.meade.com/dsi/overview.html>): 385 €.

Atik 1HS (sensor de 640×480 px de $5,6 \mu\text{m}$, conector USB?): 378 €

Atik 2HS (sensor de 640×480 px de $7,4 \mu\text{m}$, conector USB?): 480 €

Refrigeradas:

SBIG ST4 (sensor de 192×164 pixels de $13,75 \times 16 \mu\text{m}$, RS232): disponible en el CAY.

Starlight Xpress MX916 (sensor de 376×290 px de $23,2 \times 22,4 \mu\text{m}$, USB aparte): $\sim 2,500$ €

SBIG STV Estándar (sensor de 656×480 px de $7,4 \mu\text{m}$, conexión TV y RS-232, unidad de control, software): 2.842 €

SBIG ST-7XME Estándar (sensor de 765×510 px de $9 \mu\text{m}$, conexión USB, software, descarga en 1 s): 2.842 €

Cámaras de ~ 2 Mpx:

SBIG ST-2000XM (sensor de 1600×1200 px de $7,4 \mu\text{m}$, conexión USB, software, descarga en 4,5 s): 4818 €

1.7.4. Webcam

Otra posible solución consistiría en adaptar una webcam al telescopio. En general, las webcams sólo se utilizan para observar astros del sistema solar (Luna y planetas), pero también se han usado para la observación de estrellas dobles.

En este caso se necesita una webcam, un adaptador de ésta al portaoculares y un filtro de cristal transparente que proteja la CCD haciendo la cámara estanca. Los precios orientativos respectivos son: 100, 40 y 20 €.

Ejemplos

Dos cámaras con un precio de 70 – 80 €.

- Philips ToUcam Pro II (chip PCVC740K) equipada con USB o con Firewire, tiene una CCD de 640×480 pixels de $5,6 \mu\text{m}$ y se considera muy sensible. Para esta cámara se ha determinado $m_1 \simeq -0,2$.
- Logitech QuickCam Pro 4000, equipada con USB, tiene una CCD de 640×480 pixels de $\dots\mu\text{m}$, y, según las especificaciones, permite sacar imágenes fijas del doble de resolución (¿truco de software?).

Dificultades

1. Las webcams suelen ser de 8 bits, por lo que al observar sucesivamente estrellas de muy diferente magnitud resulta necesario adaptar el tiempo de exposición a la magnitud esperable.
2. Dado que su ritmo de generación de imágenes va, típicamente, de 1 a 50 imágenes por segundo, suele ser necesario realizar una acumulación de éstas por software.
3. La respuesta de las webcams no es necesariamente lineal.
4. Suelen estar optimizadas para el rango visual.
5. Son mucho más ruidosas que las CCDs refrigeradas (el ruido se reduce a la mitad por cada 7° que se consiga bajar su temperatura. Si se consigue bajar unos 35° respecto de la temperatura ambiente, su sensibilidad aumentará $2^5 = 32$ veces.)

Hay lugares donde se describe cómo aumentar el tiempo de exposición de este tipo de cámaras: <http://www.astrocam.org/> y <http://www.qcuiag.co.uk/>.

1.8. Primera solución propuesta

Se trata de una solución muy barata y posiblemente suficiente para lo que se pretende. Se basa en el uso de un pequeño telescopio, adaptable a un armazón en cualquiera de las posibles posiciones de enganche y el aprovechamiento de una cámara ST4 antiguamente usada en el astrógrafo doble del CAY. Una dificultad con ella puede ser el que su software asociado funciona en MS-DOS. Sus características son: sensor de 192×164 con pixels de $13,75 \times 16 \mu\text{m}$.

Partiendo de las características técnicas de la cámara ST4 refrigerada podemos determinar las características del telescopio que mejor se adapta a ella. Su focal deberá ser:

$$p < \frac{s}{E} \quad \text{de donde} \quad f > \frac{206 p}{s}$$

Para un *seeing* típico de $s = 3''$ y usando $p = 16 \mu\text{m}$, resulta que nos convendrá usar un telescopio de focal $f > 1100$ mm. Cualquiera de los dos Maksutov antes citados ($D = 90$ mm, $F \simeq 1200$ mm) cumple este requisito. El modelo de Celestron tiene la ventaja añadida de ser hermético, según las especificaciones, por lo que podría ser colocado en el subreflector.

1.8.1. Campo visual

Dado que el chip de la cámara es prácticamente cuadrado ($N_x \times p_x \simeq N_y \times p_y$), con estos telescopios el campo visual será de: $L = N p E \simeq 445'' = 7'4$ y el tamaño de los pixels será de: $2,3'' \times 2,7''$.

El campo visual es pequeño, por lo que las primeras pruebas de apuntado pueden resultar muy trabajosas. Convendrá iniciarlas con observaciones de la Luna, seguidas de las de planetas y estrellas muy brillantes.

1.8.2. Tiempo de exposición

Según las especificaciones de la cámara, para ella es $m_1 \simeq 2,2$. El tiempo de exposición necesario para detectar una estrella de magnitud m con estos telescopios de $D = 90$ mm vendrá dado por:

$$T_{exp}(\text{detec}) = 10^{0,8m-9,6} \text{ s}$$

lo que equivale a detectar una estrella de magnitud 12 en un segundo. En el menor tiempo de exposición de la cámara (0,01 s) se puede detectar una estrella de magnitud 9. Será necesario determinar en la práctica el tiempo de exposición adecuado para que una estrella de magnitud m dé una imagen con una elevada relación señal a ruido. Un valor estimativo puede ser:

$$T_{exp}(\text{imagen}) > 10^{0,8m-5,0} \text{ s}$$

Es decir, si se desea obtener la imagen de una estrella de magnitud 7 con una buena señal a ruido se tendrá que emplear un tiempo de exposición de, al menos, 4 segundos. Una magnitud más supone un tiempo mayor en un factor 6.

Deberán obtenerse valores empíricos de T_{exp} con la cámara y el telescopio instalados y en las condiciones reales de Yebes.

Por otra parte, el tiempo de descarga de la imagen es largo, de 6 segundos, debido a la vieja electrónica y el interfase RS232 que emplea. En cualquier caso, este tiempo será siempre menor que el empleado por la antena para dirigirse y adquirir otra estrella de apuntado.

En cambio, la realización de un mapeado (tipo *raster*) de una zona en busca de una estrella identificable puede ser un proceso lento. El cubrir la zona en que se encuentra una estrella del catálogo Hipparcos exigirá, en promedio, tomar 16 imágenes, lo que supone varios minutos en total.

1.8.3. Uso de un refractor compacto

Si hay cabida para un telescopio de longitud total mayor (unos 50 cm, quitándole la visera protectora), se puede utilizar uno de los refractores compactos antes citados. Para

el mediano de ellos, SW1025 ($D = 102 \text{ mm}$, $f = 500 \text{ mm}$), empleado con la cámara ST4 se obtiene un campo visual de: $L = 18'$ y un tamaño medio de pixel de $6'$.

En comparación con los Maksutov, en este caso el campo visual es mayor y el tiempo de exposición menor (debido a la mayor apertura), lo cual lo hace más atractivo. Su mayor tamaño puede ser un inconveniente que no haga viable su uso, salvo que se escogiera el de menor tamaño SW804 ($D = 80 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm}$), cuya apertura puede ser escasa en cuanto a los tiempos de integración requeridos.

1.8.4. Número de estrellas observables

Dependiendo de la magnitud que se logre detectar en un tiempo de exposición razonable, se dispondrá de un determinado número de estrellas detectables en el rango visible. En la tabla siguiente se da este número para un hemisferio del cielo suponiendo una distribución isótropa de estrellas y unas condiciones de extinción atmosférica medias (extinción cenital de 0,3 magnitudes en la banda V; véase el Capítulo 2 de esta memoria).

Magnitud máxima	Número de estrellas observables
5,0	350
5,5	600
6,0	1.100
6,5	1.900
7,0	3.300
7,5	5.700
8,0	9.900

1.8.5. Segunda fase

Una vez comprobado el funcionamiento del sistema y la viabilidad del método para realizar una primera determinación del apuntado, puede resultar conveniente expandir el sistema utilizando una CCD nueva que dote al sistema de un mayor campo. El uso, el Maksutov Celestron, de la cámara ST-2000XM con 1600×1200 píxeles de $7,4 \mu\text{m}$ nos proveería de un campo mucho más conveniente:

$$p'' = 1''3 < \theta_d$$

$$L = 34' \times 25'$$

Su uso con el SW1025 daría un campo aún mayor:

$$p'' = 3''0 \simeq s > \theta_d$$

$$L = 81' \times 60'$$

1.8.6. Viabilidad de la solución propuesta

La realización secuencial de cada uno de los pasos que siguen es imprescindible para la viabilidad de esta solución:

1. Comprobación del funcionamiento de la CCD disponible y de su software asociado. Se debe contar con la colaboración de Julián García Aparicio, quien la utilizó durante años con el astrógrafo doble del CAY.
2. Adquisición de un telescopio compacto (longitud < 60 cm), de apertura $D \geq 90$ mm, sin trípode pero con posibilidad de enganche sólido (en rosca), del estilo de los Maksutov citados o quizás los SkyWatcher. Preferiblemente hermético y con focal $f \leq 1250$ mm, cuanto más corta mejor.
3. Integración en laboratorio de la CCD y el telescopio, comprobando su funcionamiento (control y adquisición de imágenes).
4. Decisión del lugar de colocación del sistema (telescopio, CCD y unidad de control y adquisición de datos), teniendo en cuenta el espacio disponible, su accesibilidad, la alimentación, el control y la transmisión de datos, la posibilidad de instalación de un armazón adecuado, y evaluando la necesidad de colocar una tapa protectora al objetivo del telescopio y el modo de accionarla.
5. Diseño y construcción del armazón.
6. Instalación y realización de medidas.

Capítulo 2

Estrellas observables

2.1. Catálogos

Entre los catálogos recientes con coordenadas precisas y un recubrimiento de todo el cielo destacan los dos obtenidos mediante la misión Hipparcos. Estos son:

1. Catálogo Hipparcos: con 188.218 estrellas, completo hasta magnitud 7,3–9,0, dependiendo del tipo de estrellas y de la latitud galáctica. En promedio da unas 2,8 estrellas por grado cuadrado, o sea 0,5 estrellas en un área igual al disco lunar.
2. Catálogo Tycho: con 1.058.332 estrellas, completo hasta magnitud $V = 10,5$. En promedio da 25 estrellas por grado cuadrado, o sea 5 estrellas en un área igual al disco lunar.

A continuación se evaluará el número de estrellas accesibles en un momento dado en el cielo visible para una magnitud medida dada. Las magnitudes indicadas en los catálogos corresponden a fuera de la atmósfera, es decir corregidas de extinción atmosférica.

2.2. Extinción atmosférica

La extinción es fuertemente dependiente de la altura (o la masa de aire, A) y de la banda de observación.

La extinción atmosférica hace que la intensidad I medida sea menor que la intensidad incidente I_0 fuera de la atmósfera. La relación entre ellas se puede expresar como:

$$\frac{I}{I_0} = a_\lambda^A = 10^{-0,4 \Delta m} = 10^{-0,4(\Delta m_0 + \Delta m_z)}$$

donde Δm_0 (“extinción cenital”) es el incremento en magnitud en el cénit y Δm_z (“reducción al cénit”) es el incremento en magnitud con respecto del cénit en una observación a un ángulo cenital z . El coeficiente a_λ se denomina “coeficiente de transmisión”.

En el cénit es $A = 1$, de donde: $\Delta m_0 = -2,5 \log a_\lambda$. Esta es la corrección a aplicar en una observación cenital. En cualquier otra dirección, hay que añadir la reducción al cénit: $\Delta m_z = -2,5 \log a_\lambda (A - 1) = \Delta m_0 (A - 1)$.

Aun cuando la extinción debiera determinarse en cada ocasión, en la práctica en cada observatorio se usa una extinción media para cada banda. Unos valores orientativos para la altitud de Yebes, calculados según el procedimiento de Hayes y Latham (1975) y suponiendo una atmósfera seca, son:

Banda	λ (nm)	a_λ	Δm_0	τ_0
U	370	0,58	0,59	0,54
B	440	0,74	0,33	0,30
V	550	0,83	0,20	0,18
R	640	0,88	0,14	0,13
I	800	0,93	0,076	0,070

En esta tabla se ha incluido una columna con la opacidad cenital equivalente τ_0 , parámetro habitual en Radioastronomía ($\Delta m_0 = 1,086 \tau_0$).

Como puede verse, la intensidad medida en el cénit se reduce al 83 % de la incidente o, equivalentemente, supone un aumento de 0,20 magnitudes. Esto es típico de alta montaña y lugares secos. En días húmedos, la transmisividad disminuye por debajo del 80 %. En un día promedio la extinción puede ser de 0,3 magnitudes y la transmisividad del 75 % (Sidgwick 1971).

2.2.1. Masas de aire

Típicamente la masa de aire A se da un función del ángulo cenital z mediante: $A = \sec z = 1/\cos z$. Esta expresión sólo es válida si no se observa a baja altura, o sea para $z < 75^\circ$ o $h > 15^\circ$ (altura para la que el error supera el 1 %). En otros casos es necesario usar una expresión más compleja: en un lugar cuya distancia al centro de la Tierra es R (en Yebes es $R = 6370$ km) y con una atmósfera que puede representarse por una altura H , tenemos:

$$A = \frac{\sqrt{(R \cos z)^2 + 2 H R} - R \cos z}{H}$$

La altura H (en km) se obtiene como el cociente entre la presión total local y la densidad del aire.

Ejemplo

La presión media en Yeves (Planesas, 2003) es $p_{tot} = p_{sec} + p_{agua} = 904,5 + 8,9 = 913,4 \text{ mbar} = 9134 \text{ km m}^{-3} \simeq 0,90 \text{ atm}$ y la temperatura media es de $12,7^\circ\text{C}$, con lo que aplicando la ecuación de los gases perfectos para obtener la densidad media:

$$\rho = \frac{M}{R} \frac{p}{T} = \frac{28,96 \text{ g mol}^{-1}}{82,06 \text{ cm}^3 \text{ atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}} \frac{0,90 \text{ atm}}{286 \text{ K}} = 0,001112 \text{ g cm}^{-3} = 1,112 \text{ kg m}^{-3}$$

de donde resulta una escala de alturas para la atmósfera en Yeves de:

$$H = \frac{p}{\rho} = \frac{9134}{1,112} = 8214 \text{ m} \simeq 8,2 \text{ km}$$

2.3. Distribución de las estrellas por magnitudes

El número de estrellas hasta una magnitud dada que se obtiene de los catálogos Hipparcos y Tycho viene dado en la tabla siguiente:

Magnitud	Número de estrellas	Número acumulado
-1.5 a -1.0	1	1
-1.0 a -0.5	1	2
-0.5 a 0.0	2	4
0.0 a 0.5	6	10
0.5 a 1.0	5	15
1.0 a 1.5	7	22
1.5 a 2.0	27	49
2.0 a 2.5	44	93
2.5 a 3.0	79	172
3.0 a 3.5	113	285
3.5 a 4.0	231	516
4.0 a 4.5	393	909
4.5 a 5.0	699	1.608
5.0 a 5.5	1.211	2.819
5.5 a 6.0	2.176	4.995
6.0 a 6.5	3.794	8.789
6.5 a 7.0	6.615	15.404
7.0 a 7.5	11.059	26.463
7.5 a 8.0	19.029	45.492
8.0 a 8.5	31.957	77.449
8.5 a 9.0	52.951	130.400
9.0 a 9.5	86.917	217.317
9.5 a 10.0	142.955	360.272

El número de estrellas acumulado con una magnitud igual o inferior a m (última columna) se puede aproximar mediante: $N(m) = 2,79^{(m+2,47)}$ o, mejor aún, con:

$$N(m) = (4,2 + 1,33 m) e^m$$

para $m \leq 10$.

El número de estrellas visibles en un momento dado, de noche oscura sin luna, con cielo completamente despejado, con atmósfera seca, y suponiendo que el límite de detección del ojo humano está en la magnitud 6,5, sería de unas 4400 estrellas. Sin embargo, este número se reduce drásticamente si se tiene en cuenta la extinción atmosférica. En el rango visual y en condiciones medias en Yebes, se reduce a unas 2000 estrellas. Ello corresponde a una estrella cada 10 grados cuadrados del cielo visible en tal instante.

2.4. Fracción de cielo explorable

En un instante dado es visible un hemisferio celeste, pero a lo largo del año se puede explorar una mayor fracción del cielo ($0,5 < f_{\text{cielo}} < 1$) debido a la rotación y la traslación terrestres.

La declinación mínima visible a una altura h_{min} sobre el horizonte desde un lugar del hemisferio norte de latitud ϕ es:

$$\delta_{\text{min}} = h_{\text{min}} + \phi - 90^\circ$$

La fracción de cielo explorable por encima de una declinación δ_{min} es:

$$f_{\text{cielo}} = \frac{1 - \sin \delta_{\text{min}}}{2} = \cos^2[(h + \phi)/2]$$

Ejemplo: para $h_{\text{min}} = 5^\circ$ y $\phi = 40^\circ 5$ (Yebes) son: $\delta_{\text{min}} = -44^\circ 5$ y $f_{\text{cielo}} = 0,85$.

2.5. Bibliografía

1. Hayes, D.S., Latham, D.W.: 1975, ApJ 197, 593.
2. Mangum, J.: 2004, *The ALMA optical pointing systems. Design considerations and prototype description.*
3. Mobberley, M.: 2004, *The new amateur astronomer*, Springer Verlag.
4. Planesas, P.: 2002, *Corrección por refracción atmosférica para el radiotelescopio de 40m del CAY*, Informe Técnico CAY 2003-2.
5. Roma, Óptica: 2004, *Lista de precios de cámaras CCD para 2004*, <http://www.opticaroma.com/astronomia/>.
6. SEO/BirdLife: 2003, *Catálogo invierno 2003-2004*.
7. Sidgwick, J.B.: 1971, *Amateur astronomer's handbook*, Faber and Faber.