

斜轴式天文望远镜运动特性研究*

娄 铮^{1,2†} 程景全^{1,2} 左营喜^{1,2} 杨 戟^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210008)

摘要 相对于传统地平式或赤道式望远镜,斜轴式天文望远镜因其独特的机架结构形式更加适应例如南极等的极端台址环境.但由于这种望远镜形式的应用较少,针对其运动特性的研究还比较缺乏.首先详细讨论了斜轴式望远镜的优缺点,推导了斜轴坐标系与地平赤道坐标系之间的坐标变换关系,在此基础上研究了斜轴式望远镜在进行恒星跟踪时的运动特性,并与地平式望远镜进行了比较.另外,还研究了斜轴式望远镜的像场旋转特性,并分析了像旋对望远镜天线全息测量的影响.最后,还针对斜轴式望远镜的特点,推导了一套包含7个误差项的指向误差改正模型.

关键词 望远镜, 机架, 斜轴, 像旋, 指向模型

中图分类号: P111; 文献标识码: A

1 引言

传统天文望远镜根据其机架系统的不同,可以划分为赤道式望远镜和地平式望远镜.赤道式望远镜模拟了天体运动的规律,利用极轴的匀速旋转来实现对天体的跟踪.但是地平式机架具有更加优越的力学特性,镜面的重量可以通过高度叉臂直接传递到地面,因而在大中口径天文望远镜中得到了广泛应用^[1].赤道式和地平式机架所采用的是正交坐标系.在正交坐标系中,坐标参数为常数的平面之间互相垂直,因此各个坐标参数相互独立.除了上述具有正交坐标轴系的天文望远镜外,还存在着几种具有非正交轴系的天文望远镜,包括斜轴式望远镜、六杆平台式望远镜和具有双连杆支撑的特殊望远镜等^[2].在非正交轴系望远镜中,各个坐标参数平面之间不互相垂直,各个坐标参数会互相影响.斜轴式望远镜的机架系统包含两个运动轴,即位于望远镜下方的方位轴系和它上方与之成45度夹角的倾斜轴,而望远镜光轴又与倾斜轴成45度夹角(详见下节).这种特殊的望远镜机架已经应用于位于南极海岸的O'Higgins 9米射电望远镜^[3],中国南极Dome A 5米太赫兹望远镜(DATE5)^[4]也采用了这种特殊的候选机架形式,如图1所示.事实上,在近期的一些特大口径的望远镜设计中,类似的非正交斜轴系统还应用于它们的圆顶设计之中.双连杆式望远镜已用于一些小口径射电望远镜中,但总体而言,六杆

2014-07-09收到原稿, 2014-11-05收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11190014, 11373073)资助

†zhenglou@pmo.ac.cn

平台式和双连杆式的支撑系统在天文望远镜中应用很少. 本文作为DATE5望远镜预先研究课题之一, 仅仅讨论斜轴式望远镜机架系统运动特性.

相对于传统地平式或赤道式机架, 斜轴式机架更加适应极端台址环境(例如极低温, 强风速等特殊环境), 这是因为这种望远镜的整体机构可以全部处于一种封闭式外罩的保护之下(见图1), 外罩层具有光滑的外表面, 没有任何明显的空隙、沟槽和孔洞, 避免了在极低温条件下容易产生霜冻, 阻止望远镜运动的问题. 这种天文望远镜还可以充分利用内部仪器自身发热作为热源, 并通过内部空气循环系统, 在整个望远镜内形成并维持一个相对稳定且温和的热环境, 有利于望远镜驱动电机、传动机构和编码器等运动部件的正常工作. 此外, 斜轴和方位轴可以具有完全相同的机械结构, 使用同一种轴承、齿轮和编码器的设计, 从而简化机架结构设计, 降低望远镜制造成本.

相对于赤道式和地平式望远镜, 对斜轴式望远镜运动特性的研究十分缺乏. 斜轴式望远镜的两个旋转轴组成非正交轴系, 其运动特性较传统的地平式机架更为复杂, 在望远镜运动过程中像场还会产生特殊的附加旋转. 此外, 传统的地平式指向模型不再适用于斜轴式望远镜, 需重新推导适合斜轴式望远镜的指向模型. 本文推导了斜轴坐标系与地平和赤道坐标系之间的坐标变换关系, 然后在此基础上研究了斜轴式望远镜运动特性(包括天顶盲区和像场旋转特性等), 并与地平式望远镜进行了比较. 最后针对斜轴式望远镜推导了一套包含有7个误差项的指向误差校正模型.

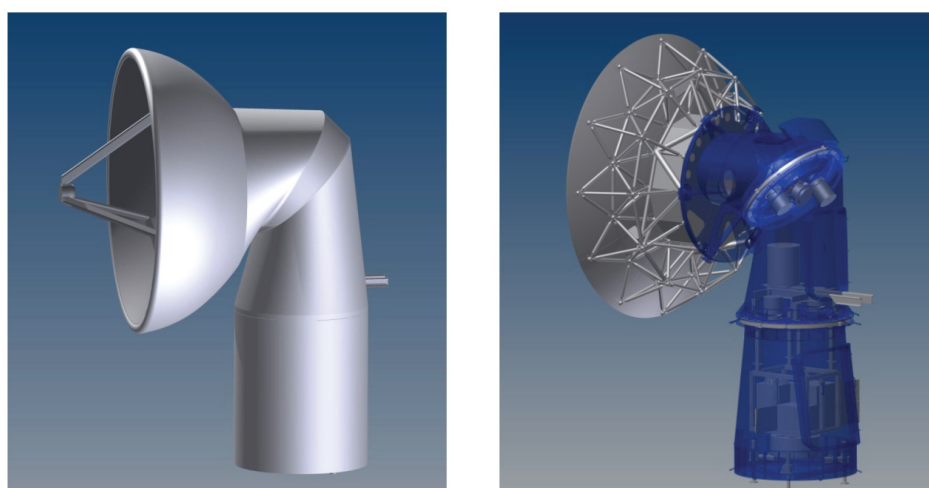


图 1 南极5米太赫兹望远镜(DATE5)概念设计图: (左)整体外观; (右)外罩内部结构

Fig. 1 A conceptual design of the 5 meters Dome A Terahertz Explorer (DATE5): (Left) with cladding; (Right) without cladding

2 斜轴-方位轴坐标系

斜轴式机架系统采用斜轴-方位轴坐标系, 其中斜轴与方位轴成 45° 夹角, 如图2所示. 天线主轴绕斜轴沿着一个圆锥面转动, 在转动过程中天线主轴与斜轴之间的夹角保持为 45° . 定义斜轴-方位轴系统下的坐标为 (α, β) , 其中 α 为斜轴坐标, 当 $\alpha=0^\circ$ 时, 天

线指向水平; 当 $\alpha=180^\circ$ 时, 天线指向天顶. 这样, 斜轴在望远镜方位轴上方扫过一个倾斜 45° 、锥顶角为 90° 的圆锥面, 该圆锥的母线就是望远镜光轴可能的指向. β 为方位轴坐标, 其定义与传统地平式天线系统中的方位轴坐标一致. 由于斜轴和方位轴不垂直, 斜轴的运动也会改变望远镜光轴的方位指向.

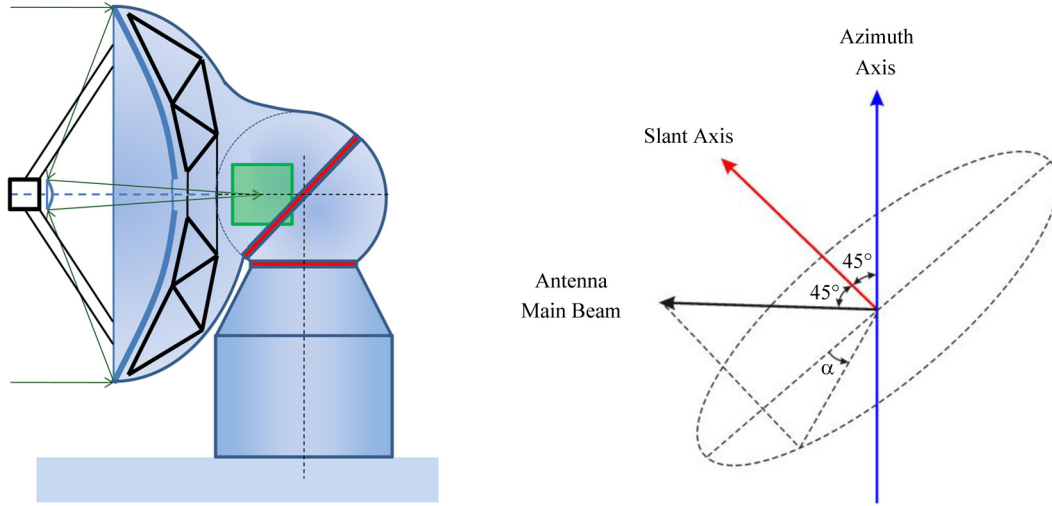


图 2 斜轴-方位轴系统: (左)结构示意图; (右)轴系几何关系图

Fig. 2 The slant-azimuth mount system: (Left) sketch of the mount structure; (Right) geometry of the axes

2.1 与地平坐标系之间的转换

根据坐标系几何关系, 斜轴-方位轴坐标 (α, β) 到俯仰轴-方位轴坐标 (θ, ϕ) 的转换关系如(1)式和(2)式所示:

$$\theta = \sin^{-1}(\sin^2 \frac{\alpha}{2}), \quad (1)$$

$$\phi = \beta + \tan^{-1}(\sqrt{2} \tan \frac{\alpha}{2}). \quad (2)$$

反之, 由俯仰轴-方位轴坐标 (θ, ϕ) 到斜轴-方位轴坐标 (α, β) 的转换关系如(3)式和(4)式所示:

$$\alpha = \cos^{-1}(1 - 2\sin\theta), \quad (3)$$

$$\beta = \phi - \tan^{-1} \sqrt{\frac{2\sin\theta}{1 - \sin\theta}}. \quad (4)$$

由(1)~(4)式可以看出, 由于斜轴与俯仰轴以及方位轴之间的非正交性, 斜轴的运动的同时会引起俯仰坐标和方位坐标的变化. 这也意味着, 为了实现单纯俯仰方向上的运动, 斜轴和方位轴需要协同运动. 由 α 变化引起的 (θ, ϕ) 变化曲线以及由 θ 变化引起的 (α, β) 变化曲线分别如图3所示.

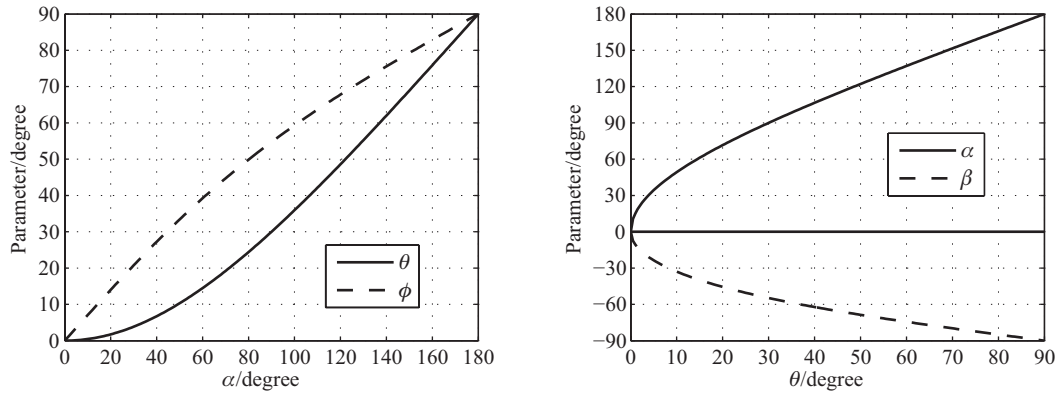


图 3 左: 由斜轴坐标 α 变化引起的俯仰-方位坐标 (θ, ϕ) 变化曲线; 右: 由俯仰坐标 θ 变化引起的斜轴-方位坐标 (α, β) 变化曲线

Fig. 3 Left: the variation of elevation-azimuth coordinates (θ, ϕ) versus slant coordinate α ; Right: the variation of slant-azimuth coordinates (α, β) versus elevation coordinate θ

对(1)~(4)式微分可得到俯仰轴-方位轴角速度和斜轴-方位轴角速度之间的转换关系, 如(5)~(8)式所示:

$$\frac{\dot{\theta}}{\dot{\alpha}} = \frac{\partial \theta}{\partial \alpha} = \frac{\sin \alpha}{2\sqrt{1 - \sin^4 \frac{\alpha}{2}}}, \quad (5)$$

$$\frac{\dot{\phi}}{\dot{\alpha}} = \frac{\partial \phi}{\partial \alpha} = \frac{\sqrt{2}/2}{1 + \sin^2 \frac{\alpha}{2}}, \quad (6)$$

$$\frac{\dot{\alpha}}{\dot{\theta}} = \frac{\partial \alpha}{\partial \theta} = \frac{\cos \theta}{\sqrt{\sin \theta - \sin^2 \theta}}, \quad (7)$$

$$\frac{\dot{\beta}}{\dot{\theta}} = \frac{\partial \beta}{\partial \theta} = \frac{\sqrt{2}/2}{\sqrt{\sin \theta + \sin^2 \theta}}. \quad (8)$$

$\dot{\theta}/\dot{\alpha}$ 和 $\dot{\phi}/\dot{\alpha}$ 随 α 变化的曲线如图4(左)所示, $\dot{\alpha}/\dot{\theta}$ 和 $\dot{\beta}/\dot{\theta}$ 随 θ 变化的曲线如图4(右)所示. 从图4(右)中可以看出, $\dot{\alpha}/\dot{\theta}$ 始终大于1, 这意味着为了实现一定的俯仰角速度, 斜轴转动的角速度必须始终大于这一俯仰角速度. 另外, $\dot{\alpha}/\dot{\theta}$ 随着俯仰角 θ 的减小而增大. 当天线指向接近天顶时($\theta \rightarrow 90^\circ$), $\dot{\alpha}$ 与 $\dot{\theta}$ 的比值趋近一个恒定的极小值 $\sqrt{2}$; 当天线指向接近水平方向时($\theta \rightarrow 0^\circ$), $\dot{\alpha}$ 与 $\dot{\theta}$ 的比值趋近无穷大, 但这个区间通常不在望远镜正常天文观测的工作区间内.

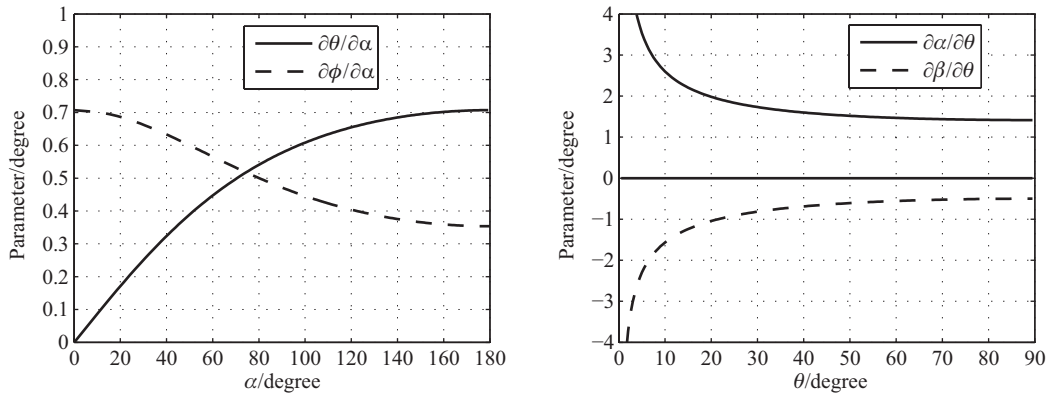


图 4 左: $\partial\theta/\partial\alpha$ 和 $\partial\phi/\partial\alpha$ 随斜轴坐标 α 的变化曲线; 右: $\partial\alpha/\partial\theta$ 和 $\partial\beta/\partial\theta$ 随俯仰坐标 θ 的变化曲线

Fig. 4 Left: the variation of $\partial\theta/\partial\alpha$ and $\partial\phi/\partial\alpha$ versus slant coordinate α ; Right: the variation of $\partial\alpha/\partial\theta$ and $\partial\beta/\partial\theta$ versus elevation coordinate θ

2.2 与赤道坐标系之间的转换

地平坐标系与赤道坐标系之间的转换公式为^[1]

$$\theta = \sin^{-1}(\sin\psi\sin\delta + \cos\psi\cos\delta\cos t), \quad (9)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\cos\delta\sin t}{\sin\psi\cos\delta\cos t - \cos\psi\sin\delta}, \quad (10)$$

其中, ψ 为地理纬度, δ 为赤纬, t 为时角. 上述两式对 t 求导, 可以得到地平式望远镜进行恒星跟踪时的俯仰角速度和方位角速度:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \cos\psi\sin\phi, \quad (11)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \sin\psi - \frac{\sin\theta\cos\phi\cos\psi}{\cos\theta}. \quad (12)$$

将(9)~(10)式代入(3)~(4)式, 可以得到斜轴坐标系与赤道坐标系之间的转换关系:

$$\alpha = \cos^{-1}(1 - 2\sin\psi\sin\delta - 2\cos\psi\cos\delta\cos t), \quad (13)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\cos\delta\sin t}{\sin\psi\cos\delta\cos t - \cos\psi\sin\delta} - \tan^{-1} \sqrt{\frac{2\sin\psi\sin\delta + 2\cos\psi\cos\delta\cos t}{1 - \sin\psi\sin\delta - \cos\psi\cos\delta\cos t}}. \quad (14)$$

将(11)~(12)式代入(7)~(8)式得到斜轴式望远镜进行恒星跟踪时的斜轴角速度和方位角速度分别为

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t} = \frac{\cos\theta\cos\psi\sin\phi}{\sqrt{\sin\theta - \sin^2\theta}}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial\beta}{\partial t} = \sin\psi - \frac{\sin\theta\cos\phi\cos\psi}{\cos\theta} - \frac{\sqrt{2}/2\cos\psi\sin\phi}{\sqrt{\sin\theta + \sin^2\theta}}. \quad (16)$$

以南极Dome A台址($\psi=-80^\circ 22'$)为例, 计算了斜轴式望远镜进行恒星跟踪时角度坐标及角速度随着赤纬和时角变化的曲线, 曲线如图5~8中的左侧所示. 作为比较, 利用地

平式望远镜进行恒星跟踪时角度坐标以及角速度随赤纬和时角变化的曲线如图5~8中的右侧所示. 从上述比较中可看出, 斜轴式望远镜进行恒星跟踪时的运动特性与地平式望远镜的运动特性十分相似. 但从图7中可看出, 在进行相同目标跟踪时, 斜轴需要实现比俯仰轴更大的角速度. 例如在 $\delta = -20^\circ$ 上进行跟踪时, 斜轴需要实现的最大角速度约为俯仰轴的两倍. 而两种望远镜在方位轴上的角速度差别不大. 当 $\delta = -80^\circ 22'$, $t = 0^\circ$ 时, 跟踪目标正好穿过天顶盲区, 此时对应方位轴上的角速度趋于无穷大, 如图8所示.

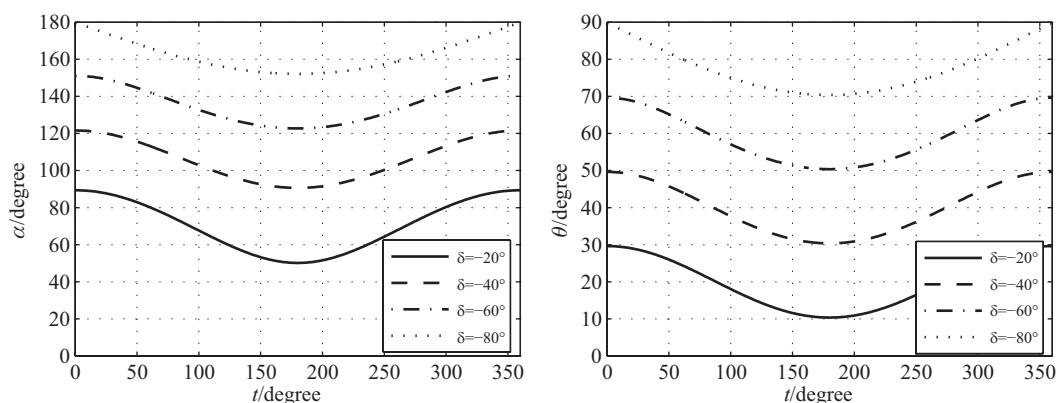


图 5 左: 斜轴坐标 α 随赤纬和时角变化曲线; 右: 俯仰坐标 θ 随赤纬和时角变化曲线

Fig. 5 Left: the slant coordinate α versus declination and hour angle; Right: the elevation coordinate θ versus declination and hour angle

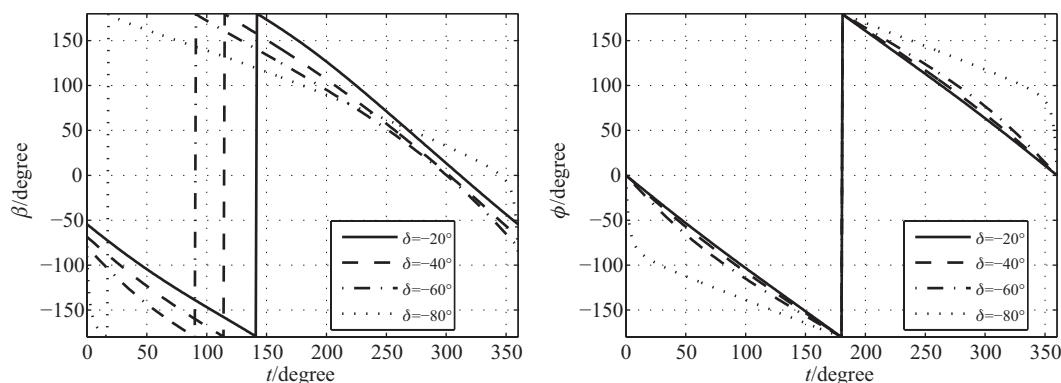


图 6 左: 方位坐标 β 随赤纬和时角变化曲线; 右: 方位坐标 ϕ 随赤纬和时角变化曲线

Fig. 6 Left: the azimuth coordinate β versus declination and hour angle; Right: the azimuth coordinate ϕ versus declination and hour angle

根据(13)~(16)式, 可以绘制出斜轴式望远镜等方位角速度线、等方位角加速度线和最高快动角速度线, 上述多条曲线的包络线共同决定了天顶盲区的形状和大小^[1, 5]. 针对南极Dome A台址纬度, 并以方位角速度 $<0.5^\circ/\text{s}$, 方位角加速度 $<0.05^\circ/\text{s}^2$ 和快动角速度 $<3^\circ/\text{s}$ 为边界条件绘制的斜轴式望远镜天顶盲区图如图9所示. 该盲区和同一条条件下地平式望远镜天顶盲区几乎完全相同, 这一实例说明斜轴式望远镜与地平式望远镜

具有非常相似的盲区特性. 然而, 斜轴式天文望远镜在建造时要特别注意机架的制造工艺. 如果天线主轴和斜轴夹角不等于 45° , 望远镜可能永远不能达到天顶的位置.

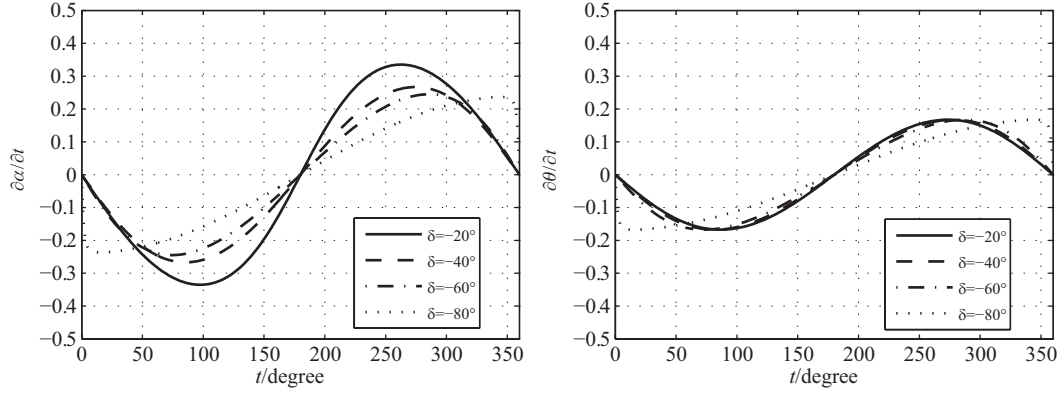


图 7 左: 斜轴角速度 $\partial\alpha/\partial t$ 随赤纬和时角变化曲线; 右: 俯仰角速度 $\partial\theta/\partial t$ 随赤纬和时角变化曲线

Fig. 7 Left: the slant velocity $\partial\alpha/\partial t$ versus declination and hour angle; Right: the elevation velocity $\partial\theta/\partial t$ versus declination and hour angle

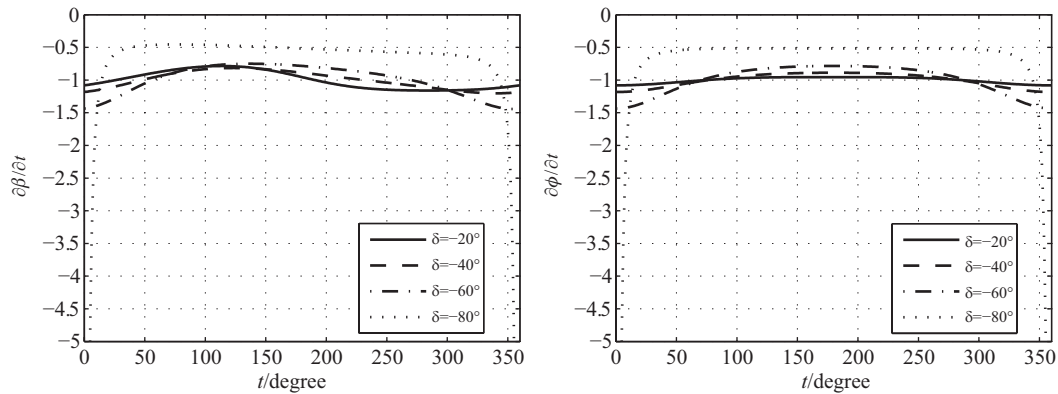


图 8 左: 方位角速度 $\partial\beta/\partial t$ 随赤纬和时角变化曲线; 右: 方位角速度 $\partial\phi/\partial t$ 随赤纬和时角变化曲线

Fig. 8 Left: the azimuth velocity $\partial\beta/\partial t$ versus declination and hour angle; Right: the azimuth velocity $\partial\phi/\partial t$ versus declination and hour angle

3 像场旋转效应

无论是地平式还是斜轴式天文望远镜, 在进行恒星跟踪时都会产生像场旋转效应. 像旋的偏转角度由星位角 p 来描述^[1]. 对于地平式望远镜, 星位角的表达式为:

$$p_1 = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial\theta}{\partial t}}{\frac{\partial\alpha}{\partial t} \cos\theta} = \tan^{-1} \frac{\sin t}{\tan\psi \cos\delta - \sin\delta \cos t}. \quad (17)$$

对于斜轴式望远镜, 其像旋角可分解为两个部分, 其中一部分等于地平式系统在恒星跟

踪时的星位角 p_1 , 另一部分为斜轴在运动过程中相对于地平式系统的附加星位角 p_2 , 即

$$p = p_1 + p_2, \quad (18)$$

$$p_2 = \tan^{-1} \frac{\sin \alpha (3 - \cos \alpha)}{2\sqrt{2}\cos^2 \theta}. \quad (19)$$

附加星位角(即附加像旋) p_2 随俯仰角的变化曲线如图10所示. 当天线指向水平方向时, 附加像旋为零; 当天线指向天顶时, 附加像旋达到其最大值 90° . 当天线处于低仰角时, 附加像旋随俯仰角变化的变化率较大; 而在高仰角时, 其变化率较小. 由于附加像旋会引起主反射面绕天线主轴的旋转, 因而会对主反射面全息测量产生一定的影响. 全息测量是射电天文望远镜反射面面形测量的重要手段^[6-7]. 该方法利用反射面口径场和远场之间的傅里叶变换关系来实现对反射面面形的精确测量. 在全息测量过程中, 需要采集天线在 u - v 面上的矢量远场分布. 在实际操作中, 发射天线通常固定在远处的塔架之上, 而被测天线作为接收天线相对发射天线做二维扫描运动, 从而得到被测天线在 u - v 面上的采样. 对于斜轴式天线, 天线体在扫描过程中, u - v 轴也会跟随着斜轴和方位轴的运动而旋转. 假设被测天线的初始姿态指向发射天线中心, 此时地平坐标为 (θ_0, ϕ_0) , 斜轴坐标为 (α_0, β_0) , u 轴和 v 轴分别与 θ 轴和 ϕ 轴重合. 当天线运动到新的位置 $(\alpha, \beta) = (\alpha_0 + \Delta\alpha, \beta_0 + \Delta\beta)$ 时, u 轴和 v 轴的方向矢量分别变为:

$$\vec{u}' = \bar{\bar{R}} \cdot \vec{u}, \quad (20)$$

$$\vec{v}' = \bar{\bar{R}} \cdot \vec{v}, \quad (21)$$

其中 $\bar{\bar{R}}$ 为像旋矩阵:

$$\bar{\bar{R}} = \begin{bmatrix} \cos \Delta p & -\sin \Delta p & 0 \\ \sin \Delta p & \cos \Delta p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$\Delta p = \tan^{-1} \frac{\sin \alpha (3 - \cos \alpha)}{2\sqrt{2}\cos^2 \theta} - \tan^{-1} \frac{\sin \alpha_0 (3 - \cos \alpha_0)}{2\sqrt{2}\cos^2 \theta_0}. \quad (23)$$

由于全息测量工作在低仰角区域, 此时微小的俯仰角变化可以导致较大的斜轴角变化, 从而产生较大的像旋. 假设全息测量的中心坐标为 $\theta_0 = 8^\circ$, $\phi_0 = 0^\circ$, 扫描范围为 $\Delta\theta = \pm 2^\circ$, $\Delta\phi = \pm 2^\circ$, 则由(23)式可以得到扫描过程中像旋幅度约为 $\Delta p = \pm 4^\circ$. 这个像场旋转会直接导致接收机与发射源之间的极化失配, 引起约0.3%的幅度误差. 这一误差可以在数据处理时得到补偿. 除极化失配外, u - v 轴的旋转还会导致 u - v 平面上的非均匀采样. 如图11所示, θ - ϕ 平面上的均匀采样扫描(左上)将导致 u - v 平面非均匀采样分布(右上). 如果在 θ - ϕ 平面上采用预先设定的非均匀采样扫描(左下), 来校正由于 u - v 轴旋转所产生的网格畸变, 则可以在 u - v 平面上获得均匀的采样分布(右下). 这是避免采样分布误差的一个行之有效的办法. 另外, 如果在全息测量中采用快速扫描OTF(on-the-fly)观测模式, 则可以通过OTF数据处理中的重新网格处理(Regriding)步骤来获取 u - v 平面上的均匀采样分布.

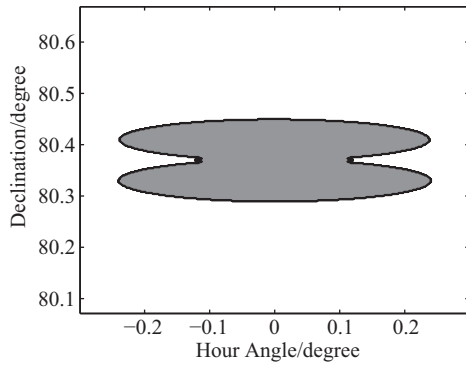


图 9 斜轴式望远镜天顶盲区(南极Dome A)

Fig. 9 The zenith blind spot of the slant-axis telescope (calculated for Dome A, Antarctica)

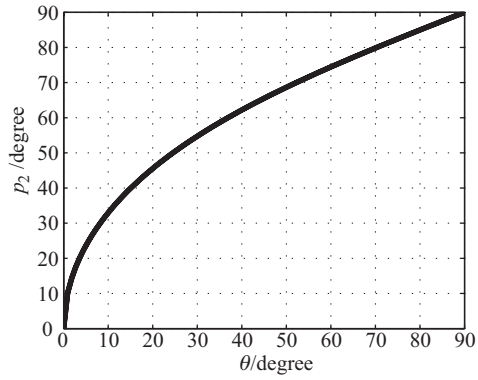
图 10 附加像旋 p_2 随俯仰角变化曲线

Fig. 10 The additional image rotation p_2 versus elevation for slant-axis telescopes

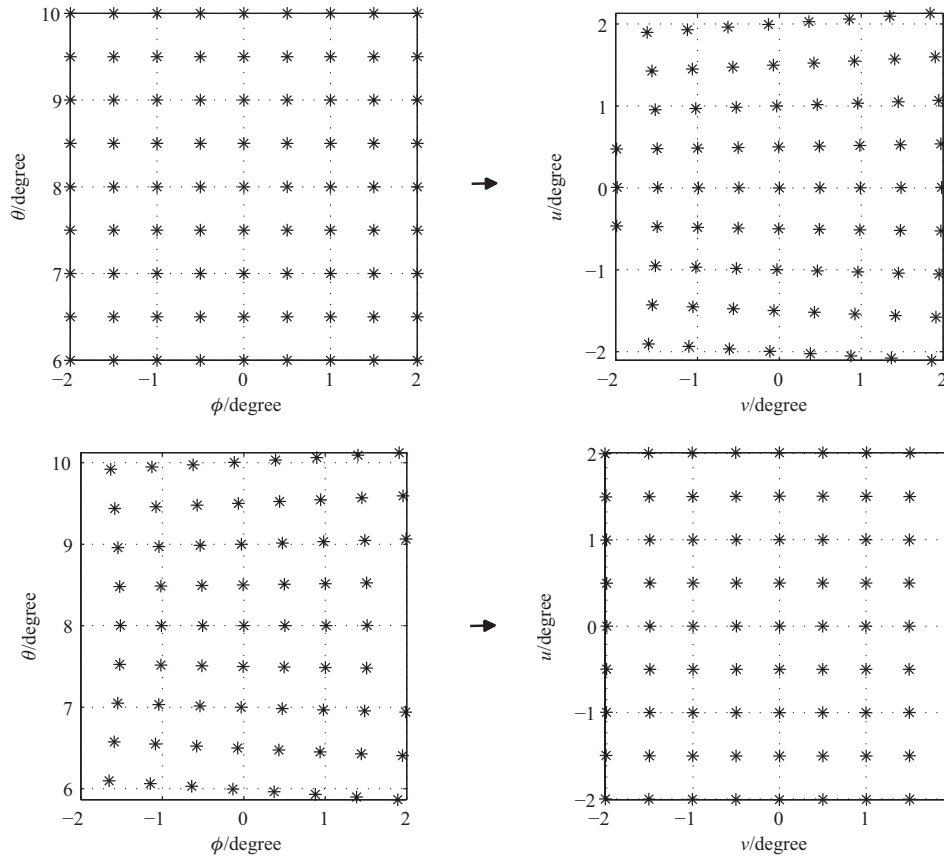


图 11 斜轴望远镜全息测量时, θ - ϕ 平面与 u - v 平面之间的采样映射关系: θ - ϕ 平面均匀扫描(左上)导致 u - v 平面非均匀采样分布(右上); θ - ϕ 平面非均匀扫描(左下)导致 u - v 平面均匀采样分布(右下).

Fig. 11 The mapping between samples in θ - ϕ plane and u - v plane during the holography measurement for a slant-axis telescope: a uniform sampling in the θ - ϕ plane (upper-left) causes non-uniform sampling in the u - v plane (upper-right); a non-uniform sampling in the θ - ϕ plane (lower-left) causes uniform sampling in the u - v plane (lower-right).

4 指向模型

和地平式望远镜一样, 斜轴式望远镜也需要借助于指向模型的公式来校正望远镜的指向误差. 由于斜轴式望远镜的两个旋转轴的非正交特性, 传统的地平式望远镜的指向模型已经不再适用, 需要重新推导针对斜轴机架系统的特殊的指向模型. 比较流行的地平式指向模型包含7项误差项^[8-9], 俯仰角和方位角的指向误差可以分别表示为:

$$\Delta\theta(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^7 \delta_i f_i(\theta, \phi), \quad (24)$$

$$\Delta\phi(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^7 \kappa_i g_i(\theta, \phi), \quad (25)$$

其中各误差项的意义和表达式如表1所示. 对于斜轴式望远镜, 也可以推导与(24)和(25)式类似的指向模型, 其中各误差项的意义和表达式如表2所示. 比较表1和表2可以看出, 斜轴式指向模型中的各误差来源与地平式指向模型十分相似, 但与斜轴(SL轴)相关的误差项表达式更为复杂, 其实际使用效果还有待天文观测验证.

表1 地平式指向模型中各误差项的意义和表达式
Table 1 The error terms in the pointing model for altazimuth telescopes

Term	Error Source	Contribution to elevation pointing error $f_i(\theta, \phi)$	Contribution to azimuth pointing error $g_i(\theta, \phi)$
1	AZ axis misalignment north-south	$\cos\phi$	$\tan\theta \sin\phi$
2	AZ axis misalignment east-west	$\sin\phi$	$-\tan\theta \cos\phi$
3	AZ encoder zero offset	0	1
4	Non-perpendicularity between EL and AZ axes	0	$\tan\theta$
5	EL encoder zero offset	1	0
6	Non-perpendicularity between EL and optical axes	0	$\sec\theta$
7	Gravitational flexure	$\cos\theta$	0

表 2 斜轴式指向模型中各误差项的意义和表达式
Table 2 The error terms in the pointing model for slant-axis telescopes

Term	Error Source	Contribution to elevation pointing error $f_i(\theta, \phi)$	Contribution to azimuth pointing error $g_i(\theta, \phi)$
1	AZ axis misalignment north-south	$\cos\phi$	$\tan\theta \sin\phi$
2	AZ axis misalignment east-west	$\sin\phi$	$-\tan\theta \cos\phi$
3	AZ encoder zero offset	0	1
4	Angle between SL and AZ axes $\neq 45^\circ$	$\frac{\sin\theta-1}{\cos\theta}$	$-\frac{\sin\phi(1-\cos\alpha)+\sqrt{2}\sin\alpha\cos\phi}{\cos\phi(1+\cos\alpha)+\sqrt{2}\sin\alpha\sin\phi}$
5	SL encoder zero offset	$\frac{\sin\alpha}{2\cos\theta}$	$\frac{\sqrt{2}\cos\alpha\cos\phi+\sin\alpha\sin\phi}{\cos\phi(1+\cos\alpha)+\sqrt{2}\sin\alpha\cos\phi}$
6	Angle between SL and optical axes $\neq 45^\circ$	$\frac{\sin\theta-1}{\cos\theta}$	$\frac{\sin\phi(1-\cos\alpha)+\sqrt{2}\sin\alpha\cos\phi}{\cos\phi(1+\cos\alpha)+\sqrt{2}\sin\alpha\sin\phi}$
7	Gravitational flexure	$\cos\theta$	0

5 结论

在天文望远镜的各种轴系系统之中, 非正交轴系的望远镜结构仅仅应用于屈指可数的几台望远镜之中. 然而斜轴式望远镜因其特殊的轴系安排, 具有外表面结构平滑、连续、全封闭, 有利于防霜和热控等显著优点, 特别适用于例如南北极地等的极端台址环境. 鉴于这种类型望远镜的潜在应用前景(例如南极天文^[10-13]等), 本文对其轴系特点进行了深入的研究.

本文推导了斜轴坐标系与地平坐标系和赤道坐标系之间的坐标变换关系, 并在此基础上研究了斜轴式望远镜在进行恒星跟踪时的运动特性, 并与地平式望远镜进行了比较. 在进行恒星跟踪时, 斜轴需要实现比俯仰轴更大的角速度. 在接近天顶的区域, 斜轴式望远镜与地平式望远镜具有相似的盲区特性. 另外, 本文研究了斜轴式望远镜的像旋特性, 并分析了像旋对天线全息测量的影响. 分析表明, 像旋对全息测量精度的影响不大, 并且可以通过数据处理的方法得到校正. 此外, 传统的地平式指向模型不再适用斜轴式望远镜. 本文还针对斜轴式望远镜推导了一套包含7个误差项的指向模型. 这些研究作为斜轴式天文望远镜的研制奠定了理论基础.

参 考 文 献

[1] 程景全. 天文望远镜原理和设计. 第一版. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 90-96
[2] Bock D. ATA Memo 4, 2000
[3] Plotz G, Klugel T, Neidhardt A. IVS 2011 Annual Report: 84
[4] Yang J, Zuo Y X, Zheng L, et al. RAA, 2013, 13: 1493

- [5] Watson F G. MNRAS, 1978, 183: 277
- [6] Bennett J C, Anderson A P, McInnes P A, et al. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1976, 24: 295
- [7] Baars J W M, Lucas R, Mangum J G, et al. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 2007, 49: 24
- [8] Ulich B L. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1981, 2: 293
- [9] Mangum J G. ALMA Memo #366
- [10] Storey J W V. 天文学报, 2006, 47: 407
- [11] Storey J W V. ChA&A, 2007, 31: 98
- [12] Lawrence J S, Ashley M C B, Burton M G, et al. 天文学报, 2007, 48: 48
- [13] Lawrence J S, Ashley M C B, Burton M G, et al. ChA&A, 2007, 31: 221

Study on the Motion Characteristics of Slant-Axis Astronomical Telescopes

LOU Zheng^{1,2} CHENG Jing-quan^{1,2} ZUO Ying-xi^{1,2} YANG Ji^{1,2}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(2 Key Laboratory for Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

ABSTRACT Due to its unique rotation mechanism, a slant-axis telescope mount offers better adaptability to extreme site conditions such as Antarctica compared to traditional equatorial and altazimuth mounts. However, devoted study on the motion characteristics of the slant-axis mount has not been reported yet. In this paper, the advantages and disadvantages of the slant-axis mount are first discussed, and the transformation relations between the slant-axis coordinate system and the horizontal and equatorial coordinate systems are then derived, based on which the motion characteristics of the slant-axis mount during normal sidereal tracking are studied and compared with altazimuth mounts. Image rotation behavior of the slant-axis mount is also studied, and its influence on the reflector holography measurements is analyzed. Finally, a seven-term pointing model suitable for slant-axis telescopes is derived.

Key words telescopes, mount, slant-axis, image rotation, pointing model