

文章编号 1004-924X(2003)03-0296-05

# 地平式光电望远镜天顶盲区影响因素

吉桐伯<sup>1</sup>, 陈娟<sup>1</sup>, 杨秀华<sup>1,2</sup>, 陈涛<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022;

2. 吉林大学 网络中心, 吉林 长春 130012)

**摘要:**以常规代数方法,分析探讨了地平式光电望远镜天顶盲区形成的机理,结果显示跟踪架最大方位角速度、目标的飞行高度和飞行速度这三个参数确定了天顶盲区范围。利用天文球坐标系进行了分析,结果表明跟踪架最大方位角速度的限制是导致望远镜存在天顶盲区的最主要原因。在北纬 60°跟踪赤纬不同的目标得到了具体跟踪数据,通过对比方位、俯仰角速度在天顶附近的变化规律,验证了天顶盲区首要影响因素是跟踪架方位角速度。

**关键词:**地平式;跟踪伺服系统;天顶盲区

**中图分类号:**TH743 **文献标识码:**A

## Factors affecting the zenith blind spot of an altitude-azimuth optoelectronic telescope

Ji Tong-bo, Chen Juan, Yang Xiuhua, Chen Tao

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;

2. Network Center, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** The formation of the zenith blind spot of an altitude-azimuth optoelectronic telescope is analysed using a conventional algebraic method, and the results indicate that the scope of the zenith blind spot is determined by the maximum azimuth angular velocity of the tracking gimbal and the flight altitude and flight speed of the target. The analysis made in the astronomical spherical coordinates shows that the limit on the maximum azimuth angular velocity of the tracking gimbal is the primary cause for the zenith blind spot of an altitude-azimuth optoelectronic telescope. Specific data were obtained by tracking targets with different declinations at latitude 60° north, and it is verified by comparing the variations of azimuth and pitch angular velocities near the zenith that the major factor affecting the zenith blind spot is the azimuth angular velocity of the tracking gimbal.

**Key words:** altitude-azimuth form; tracking servo system; zenith blind spot

## 1 引言

随着航天技术的不断发展,对空间目标监测设备跟踪各种空间目标的能力提出了越来越高的要求<sup>[1-2]</sup>。光电望远镜是一种集光机电于一体的

空间目标监测仪器,其跟踪架(又称为机架,转台,万向架)是光电望远镜承载光电测量传感器的机电一体化平台。跟踪架结构模式主要为地平式<sup>[3-4]</sup>,即俯仰-方位式。地平式结构是很多雷达和光学卫星跟踪系统采用的形式,其综合性能(体积、重量、半径、跟踪性能等)较高,特别是系统软

收稿日期:2003-01-16;修订日期:2003-03-03.

基金项目:国家高科技 863 资助项目(No. 2002AA883021)

硬件成熟性高,工作可靠性高<sup>[5-7]</sup>。其最大缺点是在天顶附近,由于望远镜视轴与方位轴重合,方位角速度接近无穷大,所以不能保证跟踪架平稳跟踪,导致目标丢失,即存在一天顶盲区。深入研究天顶盲区,是地平式光电望远镜跟踪系统研制中的一项重要课题。

## 2 天顶盲区的常规分析

### 2.1 天顶盲区成因

假设目标在某一较短时间内作水平匀速直线运动,如图 1 所示<sup>[8]</sup>。图中目标位于  $a$  点,由  $a$  向  $b$  飞行, $o$  点为跟踪架所在位置,  $aoc = E_1$ ,  $aob = A_1$ ,  $A_1$  为跟踪系统检测出的转角误差。目标飞到  $b$  点时,望远镜视轴实际指向  $a$  点,地平式跟踪架要通过方位和俯仰两个轴的转动使望远镜视轴从  $oa$  转到  $ob$ (即需要把  $aob$  平面上跟踪系统检测出的横向误差  $A_1$  转化为  $cod$  平面上的方位误差  $A$ ),以达到跟踪目标的目的。

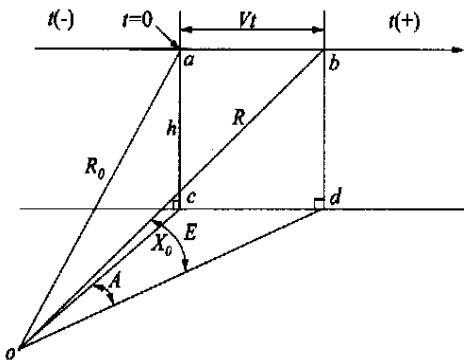


图 1 水平直线匀速运动目标跟踪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tracking a horizontally moving object with constant velocity

当  $A$  和  $A_1$  均很小时,可设  $E = E_1$ ,有:

$$A = A_1 \times \sec E_1, \quad (1)$$

这就是方位支路的正割补偿原理。由式(1)可见,当仰角  $E_1$  不为零时,方位误差  $A$  总是大于跟踪系统横向误差  $A_1$ ,而且在横向误差  $A_1$  不变时,方位误差  $A$  随着仰角  $E_1$  一起增大,当仰角趋于  $90^\circ$  时,方位误差  $A$  趋于无穷大。对式(1)求导,可得方位角速度: $\dot{A}$

$$\dot{A} = dA/dt = (dA_1/dt) \times \sec E_1, \quad (2)$$

由式(2)可见,当仰角趋于  $90^\circ$  时,望远镜视轴与方位轴几乎重合,方位角速度趋于无穷大,如果所

需跟踪方位角速度大于跟踪架的方位角速度最大值,则目标进入天顶盲区,跟踪系统丢失目标。

方位支路需进行正割补偿,仿真结果如图 2 所示。在  $0^\circ \sim 60^\circ$  之间,正割补偿值的增长极为微小,因而实践中常把这一区间作为保精度跟踪的仰角变化范围。随着仰角  $E_1$  升高,方位误差  $A$  在  $65^\circ \sim 75^\circ$  之间已经有较为明显的上升趋势,此后上升趋势进一步增强,约在  $83^\circ$  左右就开始急剧上升,这时正割补偿值对方位误差的放大作用是极为显著的,在实际执行跟踪任务时,也反应了上述分析,仰角大于  $75^\circ$  后,系统在方位角方向出现轻微抖动,随着仰角不断升高,抖动越来越明显,直至丢失目标。

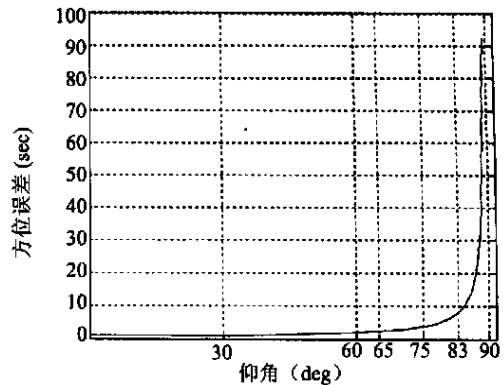


图 2 方位误差变化曲线图

Fig. 2 Schematic diagram of the azimuth error

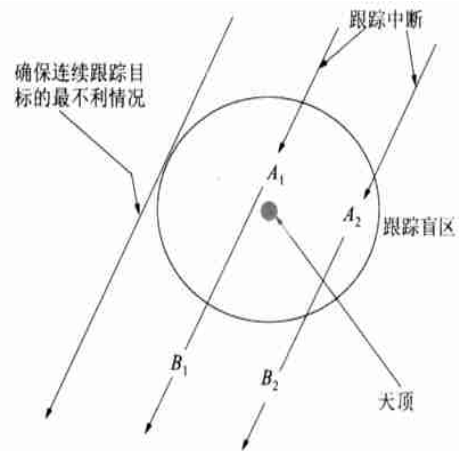


图 3 地平式跟踪系统的天顶跟踪盲区示意图

Fig. 3 Tracking lost due to the zenith blind spot

其实际跟踪情况如图 3 所示,圆形区域内即为天顶盲区,与圆形区域边界相切的轨迹为确保跟踪目标不丢失的极限情况,而轨迹  $B_1$ 、 $B_2$  在天顶盲区内的  $A_1$ 、 $A_2$  部分则目标丢失,跟踪中断。

### 2.2 确定天顶盲区范围的参数

地平式跟踪系统总是存在着天顶盲区,但盲区大小并不固定,而是由方位最大跟踪角速度  $\dot{A}_{max}$ 、目标的飞行高度  $h$  和飞行速度  $V$  这几个参数所确定。

仍以图 1 为例加以说明,图中  $A$  为方位角,  $E$  为俯仰角,  $h$  为目标距地面高度,  $X_0 = oc$  为航路捷径,即  $o$  到  $c$  点的距离,  $c$  为航捷点,  $E_1$  为航捷点的俯仰角,  $V$  为目标飞行速度。由图 1 可得:

$$A = \arctan \left( \frac{Vt}{h} \tan E_1 \right), \quad (3)$$

式(3)对时间  $t$  求导,得方位角速度:

$$\dot{A} = \frac{V}{h} \tan E_1 \cos^2 A, \quad (4)$$

由式(4)可知,当  $\dot{A} = 0$  时(即在航捷点处),方位角速度出现最大值:

$$\dot{A}_{max} = \frac{V}{h} \tan E_1, \quad (5)$$

所以

$$E_1 = \arctan \left( \frac{\dot{A}_{max} h}{V} \right), \quad (6)$$

对于某一运行在固定轨道的卫星目标而言,其飞行速度  $V$  为一确定值,航捷点处的俯仰角  $E_1$  显然是跟踪系统跟踪某一目标所能达到的最大俯仰角  $E_{max}$ ,则有:

$$E_{max} = \arctan \left( \frac{\dot{A}_{max} h}{V} \right), \quad (7)$$

由式(7)可知,系统的方位最大跟踪角速度  $\dot{A}_{max}$  越大,目标飞行高度  $h$  越高,则跟踪系统所能达到的最大俯仰角  $E_{max}$  越大,相应的天顶盲区越小,但是实际的跟踪系统要受到各种干扰因素的影响,天顶盲区总是要比式(7)推导出的理论值略大一些。

### 3 天文球坐标系中的天顶盲区分析

光电望远镜跟踪的目标主要是卫星,而卫星监测主要基于天文球坐标系,有必要在此坐标系中对天顶盲区作进一步分析。光电望远镜在执行卫星目标跟踪观测任务时,必须将其轨道参数由赤道坐标系转化成地平坐标系的形式<sup>[9]</sup>,把赤纬  $\delta$  和时角  $t$  转化成天顶角  $Z$  和方位角  $A$ ,如已知观测点的地

理纬度  $\phi$ ,有以下关于时角  $t$  的公式<sup>[10]</sup>:

$$Z(t) = \arccos(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t), \quad (8)$$

$$A(t) = \arctan \left[ \frac{\sin t}{\sin \phi \cos t - \cos \phi \tan \delta} \right], \quad (9)$$

$$p(t) = \arctan \left[ -\frac{\sin t}{\sin \phi \cos t - \cos \phi \tan \delta} \right], \quad (10)$$

上式中方位角  $A$  和星位角  $p$  均位于以过观测点的子午线(天顶以南)为中心的  $-90^\circ$  到  $90^\circ$  范围内(设向西为正),所处象限由式(9)、(10)反正切函数中的分子、分母的相关符号所确定。对上述关于时角  $t$  的公式求导,得出相应的速度:

$$\dot{Z} = -\cos \delta \sin A, \quad (11)$$

$$\dot{A} = \frac{\sin \delta \cos A / \tan Z}{\sin^2 Z}, \quad (12)$$

$$\dot{p} = \cos \delta \cos A / \sin Z. \quad (13)$$

式(12)中方位角速度在航捷点正上方(即天极点处)达到最大绝对值:

$$\dot{A}_{max} = \cos \delta / \sin(\delta - \phi). \quad (14)$$

式(11)表明天顶角  $Z$  的绝对变化率必定慢于时角  $t$ ,当  $Z$  趋于  $0$  时,方位角速度和星位角速度急剧增大,事实上,在天顶附近星位角与方位角的变化极其相似。显然,最大方位角速度的限制是导致望远镜存在天顶盲区的最主要影响因素。

### 4 具体跟踪数据分析

以地平式望远镜对空中目标进行跟踪,考虑时角  $t$  以  $0.25^\circ/\text{min}$  的恒星速率变化,观测地点位于北纬  $60^\circ$ ,得到不同赤纬 ( $30^\circ \sim 90^\circ$ ) 目标所对应的跟踪角速度,如表 1 所示。

从表 1 可以看出,在北纬  $60^\circ$  观测赤纬为  $60^\circ$  的目标,当仰角达到  $90^\circ$  时(此时目标恰好通过天顶),方位角速度无穷大。如果系统的保精度跟踪角速度为  $1^\circ/\text{min}$ ,则距天顶  $9^\circ$  以内为跟踪盲区;如

果系统的保精度跟踪角速度提高至为 3 9/min,则 天顶盲区减小为 2.5 。

表 1 不同赤纬位置下空中目标的最大角速度

Tab.1 Fastest tracking speeds of the target for given declination at latitude 60° north

目标赤纬 (deg)	仰角范围 (deg)	最大方位角速度 (deg/min) (左-右)	最大俯仰角速度 (deg/min) (下-上)
30.0	0.0 - 60.0	0.1966 - 0.4330	- 0.1250 - 0.1250
40.0	10.0 - 70.0	0.1808 - 0.5599	- 0.1250 - 0.1250
50.0	20.0 - 80.0	0.1587 - 0.9254	- 0.1250 - 0.1250
55.0	25.0 - 85.0	0.1434 - 1.6449	- 0.1250 - 0.1250
58.0	28.0 - 88.0	0.1302 - 3.7910	- 0.1250 - 0.1250
59.0	29.0 - 89.0	0.1237 - 7.3391	- 0.1250 - 0.1250
59.5	29.5 - 89.5	0.1191 - 14.246	- 0.1250 - 0.1250
60.0	30.0 - 90.0	- - 0.1443	- 0.1250 - 0.1250
60.5	30.5 - 89.5	- 13.826 - 0.1429	- 0.1231 - 0.1231
61.0	31.0 - 89.0	- 6.9094 - 0.1414	- 0.1212 - 0.1212
62.0	32.0 - 88.0	- 3.3588 - 0.1384	- 0.1174 - 0.1174
65.0	35.0 - 85.0	- 1.2120 - 0.1290	- 0.1057 - 0.1057
70.0	40.0 - 80.0	- 0.4924 - 0.1116	- 0.0855 - 0.0855
80.0	50.0 - 70.0	- 0.1269 - 0.0675	- 0.0434 - 0.0434
85.0	55.0 - 65.0	- 0.0516 - 0.0380	- 0.0218 - 0.0218
90.0	60.0 - 60.0	0.0000 - 0.0000	0.0000 - 0.0000

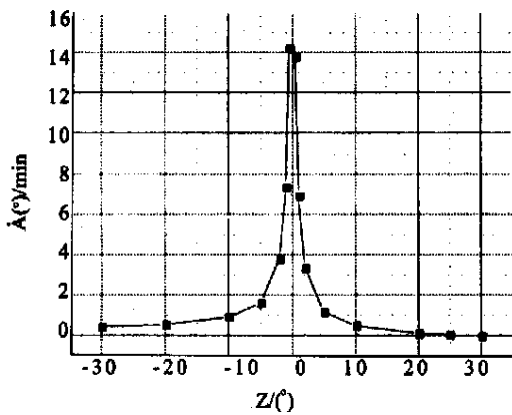


图 4 方位角速度变化图

Fig. 4 Azimuth velocity vs zenith angle

天顶角在 0°~ 30°之间变化时,表 1 中的方位、俯仰角速度变化如图 4、5 所示。在天顶角 0°附近,方位角速度急剧增大,直至趋于无穷,而俯仰角速度作线性减小,变化平稳。可见,目标过顶时方位角速度远比俯仰角速度变化剧烈,例如在天顶角 1 附近,相差接近 60 倍,因而方位角速度是天顶盲区的最主要影响因素。这验证了图 2 中关于方位误差的仿真结果。

实验中使用主频为 866 MHz 的工控机,进行坐标变换需耗时 2 ms,即集中所有系统资源时每

秒可进行 50 万次变换。另一易被忽视的现象是,目标过顶时俯仰角符号改变需要时间,耗时长短取决于望远镜的驱动能力。由于跟踪架传动装置的动态滞后,目标过顶时进行高精度跟踪是不可能的。

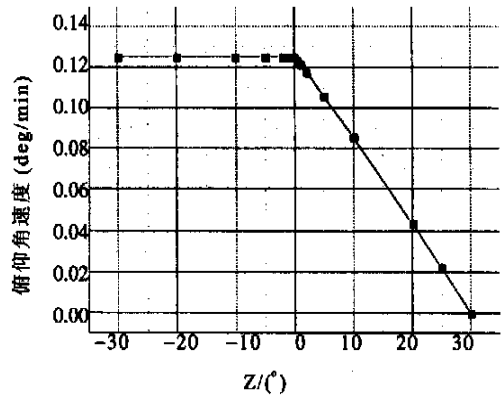


图 5 俯仰角速度变化图

Fig. 5 Altitude velocity vs zenith angle

望远镜在数字引导状态下进行实验时,由于数字引导数据直接给出了跟踪方位角和俯仰角,方位支路不必加入正割补偿环节,望远镜运行平稳,理论轨迹与实际轨迹基本吻合。可见,应用前馈技术可以明显改善跟踪性能。

## 5 结束语

地平式光电望远镜因其结构影响,天顶附近总是或多或少的存在着跟踪盲区,原理上无法克

服。天顶盲区的最主要影响因素是跟踪架方位角速度。由于跟踪架传动装置的动态滞后,在天顶盲区附近进行高精度跟踪是不可能的。上述分析为如何解决天顶盲区问题提供了理论依据。

### 参考文献:

- [1] 马品仲. 4.3 m 天文望远镜研究[J]. 大连理工大学学报,1994,34(5):527-532.  
MA P ZH. Research on 4.3 m astronomical telescope[J]. *Journal of dalian university of technology*, 1994,34(5):527-532. (in Chinese)
- [2] 杜俊峰,李正周. GD-220 光电经纬仪轴系的精度分析[J]. 光学 精密工程,2002,10(4):416-419.  
DU J F, LI ZH ZH. Analysis of the axial accuracy of the GD-220 photoelectric theodolite[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(4):416-419. (in Chinese)
- [3] 陈涛,陈娟,王旭超,等. 光电经纬仪跟踪架结构模式浅析[J]. 吉林工学院学报,2002,23(3):19-22.  
CHEN T, CHEN J, WANG X CH, et al. A simple analysis on the gimbal model in the optoelectronic tracking system[J]. *Journal of Jilin Institute of Technology*, 2002,23(3):19-22. (in Chinese)
- [4] HODGE L. Pointing control of a large ground-based laser tracking telescope [J]. *SPIE*, 1992, 1679:261-273.
- [5] 马品仲. 我国大型天文与空间望远镜展望[J]. 中国航天,1993,(12):7-9.  
MA P ZH. Prospects of large astronomical and space telescope[J]. *Aerospace China*, 1993,(12):7-9. (in Chinese)
- [6] 陈涛,陈娟,蒋风华. 伺服系统两种低速非线性补偿方法的对比实验[J]. 光学 精密工程,2003,11(1):94-97.  
CHEN T, CHEN J, JIANG F H. Two low-speed nonlinear compensations for servo system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003,11(1):94-97. (in Chinese)
- [7] 王建立. 光电经纬仪电视跟踪、捕获快速运动目标技术的研究[D]. 中国科学院长春光机与物理研究所,2002.  
WANG J L. *Study on photoelectric theodolite TV tracking, capture fast moving targets technology* [D]. Thesis in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)
- [8] 马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光电工程,1989,16(3):3-34.  
MA J G. Basic problem on acquisition, tracking and pointing system technologies[J]. *Optics Engineering*, 1989,16(3):3-34. (in Chinese)
- [9] SEEBER G. 卫星大地测量学[M]. 北京:地震出版社,1998.  
SEEBER G. *Satellite measurements on the earth* [M]. Beijing: Earthquake publishing house,1998.
- [10] 马品仲. 现代空间观测设备研究[J]. 航空与航天,1993,11(1):7-11.  
MA P ZH. Research on modern space observation equipment[J]. *Avigation & Aerospace*, 1993,11(1):7-11. (in Chinese)

作者简介:吉桐伯(1974-),男,山东昌邑人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,研究方向为光电跟踪测量、计算机控制技术。E-mail:jitongbo@sohu.com