

文章编号 1004-924X(2015)03-0871-08

用于三轴转台的卫星跟踪策略

王伟国*, 刘廷霞, 李岩, 张文豹, 李博, 姜润强, 徐涛
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对纬轴工作范围为 $\pm 20^\circ$ 的三轴跟踪架结构不能跟踪半球空域内所有卫星的问题,本文研究了卫星跟踪原理,结合纬轴受限的三轴结构特点,推导出了三轴之间关系的公式,并由此仿真得出了 STTA 卫星跟踪策略算法。跟踪仰角 70° 以上的卫星时,采用方位轴定位式水平式跟踪,这种跟踪方式既利用了水平式结构保精度跟踪天顶附近目标的优势,又克服了地平式结构有天顶跟踪盲区问题;跟踪仰角 70° 以下的卫星时,采用方位轴随动式水平式跟踪,这种跟踪方式使地平式跟踪方式和水平式跟踪方式有机地结合起来,实现优势互补,达到了更为理想的跟踪效果。该跟踪策略不仅解决了三轴转台纬轴工作范围受限问题,而且能够捕获跟踪半球空域内所有卫星,并保证卫星全程在保精度跟踪范围内。最后设计了实验,证明了该跟踪策略算法的有效性和可行性。

关键词:三轴转台;卫星跟踪策略;水平式跟踪架;地平式跟踪架

中图分类号:TP273;V556 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152303.0871

Secondary planet tracking tactic arithmetic for three-axis turntable

WANG Wei-guo*, LIU Ting-xia, LI Yan, ZHANG Wen-bao, LI Bo, JIANG Run-qiang, XU Tao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wangwei5878@sina.com

Abstract: The three-axis tracking structure of vehicular opto-electronic equipment with a latitude axis range of $\pm 20^\circ$ can not track all secondary planets in the half-airspace. So, this paper explores the principle of satellitic tracking, derives the relationship formulas between three axes and gives a tracking tactic arithmetic for the STTA satellite by a simulation. When a secondary planet with a tracking elevation above 70° is tracked, the azimuth-position horizon tracking mode is adopted. It not only uses the superiority of the horizon gimbal mode with a lower tracking error, but also conquers the altazimuth gimbal with tracking dead zone. When a secondary planet with a tracking elevation bellow 70° is tracked, the azimuth gimbal and following up mode is adopted. It combines the superiority of the horizon gimbal and altazimuth gimbal and receives the better effect. This arithmetic not only has solved three-axis turntable vehicular space but also has ensured the secondary planet in an assuring range and can capture all secondary planets in the half-airspace. The experimentation is designed, which verifies that the tracking tactic arithmetic is effective and feasible.

Key words: three-axis turntable; satellitic tracking tactic; horizontal gimbal; alt-azimuth gimbal

收稿日期:2014-03-24;修订日期:2014-04-29.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA7031024G)

1 引言

新型武器装备不断发展使得仅依靠固定式布站光电设备完成作战任务存在很大困难,因此,对武器装备的机动性、方便布站等提出了更高的要求。另一方面由于光电设备要装载在载车上,故对光电设备的重量、体积、运输等提出了严格要求。目前项目中的跟踪目标主要是中低空卫星,故跟踪转台要具有过天顶目标的高精度跟踪能力,而一般地平式跟踪架不具备此能力,因此多采用水平式结构跟踪架^[1-2]。传统的地基水平式跟踪架,经轴和纬轴的工作范围都为 $\pm 90^\circ$,可以跟踪瞄准半球空域内所有轨道的卫星,但是,传统的地基水平式跟踪架结构庞大,受载车空间限制,不易实现车载。为了解决载车空间有限的问题,有学者设计了纬轴工作范围受限的三轴跟踪转台来实现过天顶目标的高精度跟踪。纬轴受限的三轴跟踪架主要由方位轴、经轴、纬轴和视轴组成,其经轴可在 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 工作,纬轴可在 $-20^\circ \sim +20^\circ$ 工作,方位轴可在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 工作。

本文在深入研究了卫星目标跟踪原理的基础上,结合纬轴受限的三轴跟踪架的结构特点,提出了 STTA 卫星跟踪策略算法。该算法推出了三轴之间的关系公式,并结合卫星目标轨道特点提出了跟踪转台的 3 种跟踪方式:①方位轴定位式水平式跟踪,即方位轴固定在 ΔA 处,由经轴和纬轴构成的水平式结构对卫星进行跟踪;②方位轴随动式水平式跟踪,即采用经轴和纬轴构成的水平式结构对卫星进行跟踪的同时,方位轴位置随动;③地平式跟踪,即纬轴固定在 0° ,利用由方位轴和经轴构成的地平式结构对卫星进行跟踪。第三种跟踪策略使地平式跟踪和水平式跟踪两种跟踪方式有机地结合起来,实现优势互补,可以达到更为理想的跟踪效果。

2 三轴转台卫星跟踪策略算法

2.1 三轴转台工作角度分析

对于光电设备而言,跟踪架的结构设计至关重要,其影响整个跟踪系统的跟踪精度和快速性等性能指标^[3]。其中地平式结构就是由于结构本身固有的缺陷而对天顶附近的卫星目标无能为力^[4]。因此地平式工作方式适应于目标仰角较低情况,一般情况下可以保精度跟踪仰角在 75° 以下的目标,对超过 75° 以上卫星目标进行跟踪时,方位轴的跟踪角速度将增大 4 倍以上,会影响跟踪精度^[3],因此当卫星过境顶角小于 75° 及以下时采用地平式跟踪方式。

水平式结构适于目标仰角较高的情况,尤其适合对过顶卫星目标进行跟踪。因此,当对卫星过顶角度大于 75° 时,采用水平式跟踪方式。

水平式结构适于目标仰角较高的情况,尤其适合对过顶卫星目标进行跟踪。因此,当对卫星过顶角度大于 75° 时,采用水平式跟踪方式。

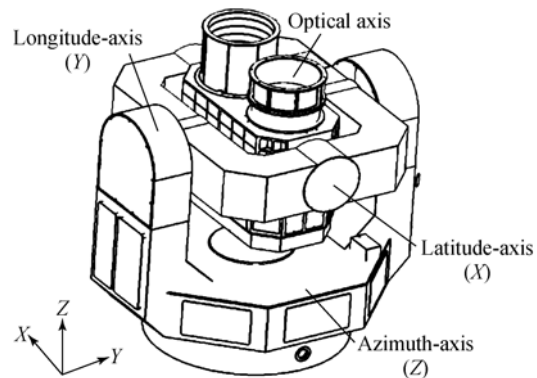


图 1 三轴转台结构图

Fig. 1 Structure frame of three-axis turntable

工程中三轴转台的结构形式如图 1 所示,三轴转台由方位轴(Z轴)、经轴(Y轴)、纬轴(X轴)和视轴组成。其中:方位轴垂直于地平面,经轴与地平面平行,纬轴与经轴垂直,视轴与纬轴垂直。方位轴、经轴和纬轴的转动使视轴沿不同方向移动。视轴垂直于经轴(Y轴)时纬轴(X轴)处于零位(纬轴 0°),纬轴平行于水平面时经轴处于零位(经轴 0°),方位轴的零位指向天文北极。纬轴只能在 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 工作;方位轴可在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 工作,经轴可在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 工作。为了解决转台装车空间受限问题,经轴(Y轴)不能做得很长,否则,会限制纬轴(X轴)的转动范围。

三轴跟踪转台采用正交方式的三轴结构。根据卫星数据和三轴跟踪转台的特点,调整卫星跟踪策略使跟踪转台工作于方位轴定位式水平式跟踪或方位轴随动式水平式跟踪或地平式跟踪,以达到更为理想的卫星跟踪效果。下面详细介绍 STTA 卫星跟踪策略算法。

2.2 跟踪策略算法推导

为了使纬轴受限的三轴结构能够对半球空域的所有卫星进行有效地捕获跟踪,现根据卫星目

标跟踪原理,对卫星过境过顶角度进行分析推导。卫星过境过程示意图如图2所示。

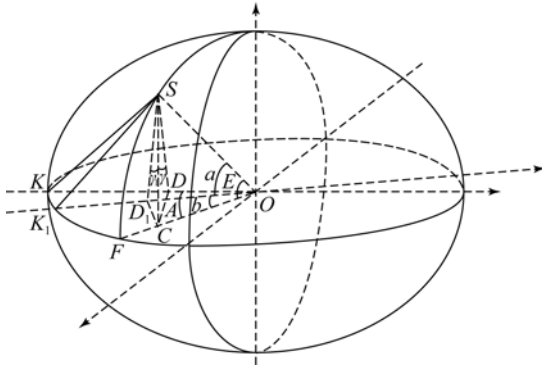


图2 卫星过境工作角度示意图

Fig.2 Sketch map of satellite transit working angle

如图2所示, S为卫星目标, $\angle KOK_1 = \Delta A$ 为地平式结构的方位轴转角, $\angle KOF = A$ 为地平式结构方位视角, $\angle SOF = E$ 为地平式结构俯仰角。 $\angle SDC = \gamma$ 为卫星的高点视角, $\angle SD_1C = \gamma_1$

$$\tan(\gamma_1) = \frac{SC}{D_1C} = \frac{DC \cdot \tan(\gamma)}{D_1C} = \frac{OC \cdot \sin(A) \cdot \tan(\gamma)}{OC \cdot \sin(A - \Delta A)} = \frac{\sin(A) \cdot \tan(\gamma)}{\sin(A - \Delta A)} \quad (4)$$

由公式(4)可得:

$$\gamma_1 = \arctan \frac{\tan(\gamma) \cdot \sin(A)}{\sin(A - \Delta A)} \quad (5)$$

在 $\triangle SOD_1$ 中可得:

$$\cos(\beta) = \frac{OD_1}{SO} \quad (6)$$

在 $\triangle SOC$ 中可得:

$$\cos(E) = \frac{OC}{SO} \quad (7)$$

$$\tan(E) = \frac{SC}{OC} \quad (8)$$

在 $\triangle D_1OC$ 中可得:

$$\cos(A - \Delta A) = \frac{OD_1}{OC} \quad (9)$$

由式(6)、式(7)、式(9)可得:

$$\alpha = \arccos(\cos(A - \Delta A) \cdot \cos(E)) \quad (10)$$

在 $\triangle DOC$ 中, 由 $\sin(A) = \frac{DC}{OC}$ 可得:

$$DC = OC \cdot \sin(A) \quad (11)$$

由式(1)、式(8)、式(11)可推导出:

$$\gamma = \arctan \left[\frac{\tan(E)}{\sin(A)} \right] \quad (12)$$

由公式(5)、(10)、(12)可得:

为水平式结构纬度角, $\angle SOK_1 = \alpha$ 为水平式结构的经度角, 文中假设 $\angle FOK_1 = A - \Delta A$ 。

$\alpha, \gamma_1, A, E, \gamma, \Delta A$ 的关系推导如下:

α, γ_1 分别代表在方位轴相对卫星的升降点连线的平行线旋转一定角度 ΔA 时, 设备经轴与纬轴的观测星的工作角度。为了考察对天顶卫星的观测能力, 需要推导 α, γ_1 与星点对应建立在升降点连线坐标系下的方位视角 A 与高视点 γ 之间的关系, 推导过程如下:

图2中, 在 $\triangle SDC$ 中, 由 $\tan(\gamma) = \frac{SC}{DC}$ 可得:

$$SC = DC \times \tan(\gamma) \quad (1)$$

在 $\triangle D_1OC$ 中, 由 $\sin(A - \Delta A) = \frac{D_1C}{OC}$ 可得:

$$D_1C = OC \times \sin(A - \Delta A) \quad (2)$$

在 $\triangle SD_1C$ 中可得:

$$\tan(\gamma_1) = \frac{SC}{D_1C} \quad (3)$$

把式(1)和式(2)带入式(3)可得:

$$\begin{cases} \gamma_1 = \arctan \left[\frac{\tan(\gamma) \cdot \sin(A)}{\sin(A - \Delta A)} \right] \\ \alpha = \arccos(\cos(A - \Delta A) \cdot \cos(E)) \\ \gamma = \arctan \left[\frac{\tan(E)}{\sin(A)} \right] \end{cases} \quad (13)$$

由公式(13)可以看出, 通过约束 α, γ_1 的工作范围, 反推获取方位角 A 、俯仰角 E 与高视点 γ 的边界值, 就可以找到满足纬轴受限三轴转台的卫星跟踪方式, 下面结合实际卫星数据仿真得出卫星跟踪策略的具体算法。

2.3 卫星跟踪策略算法仿真分析

卫星跟踪策略算法仿真分析方法: 根据卫星轨道根数, 利用 Orbitron3.7 软件, 输入光电设备站址的经度、纬度和高度数值, 选定满足过顶条件的卫星(选择过顶仰角大于 55° , 且捕获角度大于 30° 的卫星, 按大概每间隔 $3^\circ \sim 5^\circ$ 选择一颗卫星), 再利用 PVisiblePrediction 软件解算出所选卫星站址地平式结构轨道数据^[8-10]。利用解算的卫星轨道数据和三轴转台的关系式(13), 采用 matlab 对卫星跟踪策略算法进行仿真分析。仿真时分两种情况: ①根据公式(13), 经轴角度 α 和纬轴角度

γ_1 的关系式中取 $\Delta A=0^\circ$, 即方位轴转角为 0° , 指向正北(正常情况的水平式结构); ②根据公式(13), 取 $\Delta A=A$, 方位轴旋转到与卫星的升降点

连线平行的位置, 即卫星过顶时所对应的地平式结构的方位视角 A 处。计算仿真分析卫星数据统计见表 1。

表 1 卫星仿真数据分析

Tab. 1 Analysis of satellite simulation data

(°)

卫星 星号	过顶 仰角	ΔA	$\Delta A=0^\circ$ 方位轴对北				方位轴定点 $\Delta A=A$			
			纬轴工作 范围	经轴工作 范围	纬轴过顶 角度	经轴过顶 角度	纬轴工作 范围	经轴工作 范围	纬轴过顶 角度	经轴过顶 角度
17035	89.29	297.38	-46.29~46.11	-43.49~43.55	0.33	-0.63	5.16~-11.94	-59.78~59.69	0.7	0
06059	88.36	293.5	-54.23~54.82	-31.06~29.69	0.64	-1.47	-2.69~3.68	-59.52~59.89	1.6	0
22675	85.36	71.96	38.22~-35.26	-11.88~19.88	1.44	4.41	2.16~4.9	-39.7~39.58	4.64	0
12435	82.31	54.31	48.32~-41.89	-41.13~47.61	4.48	6.26	4.62~7.68~3.26	-59.83~59.82	7.69	0
06965	80.13	289.69	-50.44~56.79	-37.86~23.76	3.31	-9.3	6.2~9.9~4.25	-59.62~59.82	9.87	0
12803	76.86	94.55	-38.79~36.27	9.72~17.56	-1.03	13.1	10.42~13.14~11.28	38.63~-38.39	13.14	0
00876	73.01	307.5	-36.38~51.72	-51.58~35.82	10.25	-13.63	8.01~16.99~10.97	-59.65~59.23	16.99	0
29444	70.47	120.53	-56.26~38.33	-25.77~50.31	-9.78	19.53	12.38~19.53~11.83	59.2~-59.21	19.53	0
07291	65.79	307.9	-30.58~53.93	-54.47~31.62	14.59	-19.54	13.9~24.21~14.65	-58.98~58.79	24.21	0
22307	61.8	267.06	27.42~-30.23	-30.16~-27.35	-1.39	-28.14	24.94~28.17~24.97	32.17~-32.16	28.17	0
17589	59.49	61.08	59.16~-33.27	-11.55~53.14	14.21	27.28	18.99~30.52~18.68	-57.92~58.04	30.51	0

由表 1 可知: 方位轴旋转角度 $\Delta A=0^\circ$ 时, 即正常情况下的水平式跟踪, 纬轴工作范围都超出了 $\pm 20^\circ$; 方位轴旋转角度 $\Delta A=A$ 时, 只有过顶仰角大于 70° 的卫星在纬轴的工作范围内。因此, 对过顶仰角大于 70° 的卫星, 应采用方位轴定位式水平式跟踪, 即方位轴定位在 $\Delta A=A$ 处, 全程采用水平式跟踪。但是, 不宜采用方位轴随动式水平式跟踪, 因为方位轴随动的位置值是地平式结构解算的卫星轨道数据位置值, 存在地平式天顶跟踪盲区。方位轴定位式水平式跟踪既利用了水平式结构保精度跟踪天顶附近目标的优势, 又克服了地平式结构天顶跟踪盲区问题。

而对于小于 70° 卫星, 可以采用方位轴随动式水平式跟踪或地平式跟踪两种跟踪方式:

方位轴随动式水平式跟踪: 以水平式跟踪方式为主, 同时方位轴位置随动, 随动位置值为地平式结构方式解算的卫星轨道数据位置值。这种跟踪

方式类似地平式跟踪而优于地平式跟踪, 使地平式跟踪方式和水平式跟踪方式有机地结合起来, 实现优势互补, 达到更为理想的跟踪效果。

地平式跟踪方式: 因为过顶仰角小于 70° , 在地平式跟踪方式的保精度跟踪范围内, 可以采用纬轴定位在 0° , 全程采用地平式跟踪。

首先选取编号为 06059, 过顶仰角为 88.36° 的卫星来分析正常水平式跟踪和方位轴定位式水平式跟踪特性。根据公式(13), 在经轴角度 α 和纬轴角度 γ_1 关系式中取 $\Delta A=0^\circ$, 得出正常水平式跟踪两轴的卫星跟踪轨道数据如图 3(a) 和图 4(a) 所示。由卫星跟踪原理及公式(13)取 $\Delta A=A$, 即卫星过顶时所对应的地平式结构的方位视角 A 处, 由该卫星轨道数据可知, 卫星过顶时 $A=293.5^\circ$, 方位轴定位到 $\Delta A=293.5^\circ$ 处, 得出方位轴定位式水平式跟踪两轴的卫星跟踪轨道数据如图 3(b) 和图 4(b) 所示。

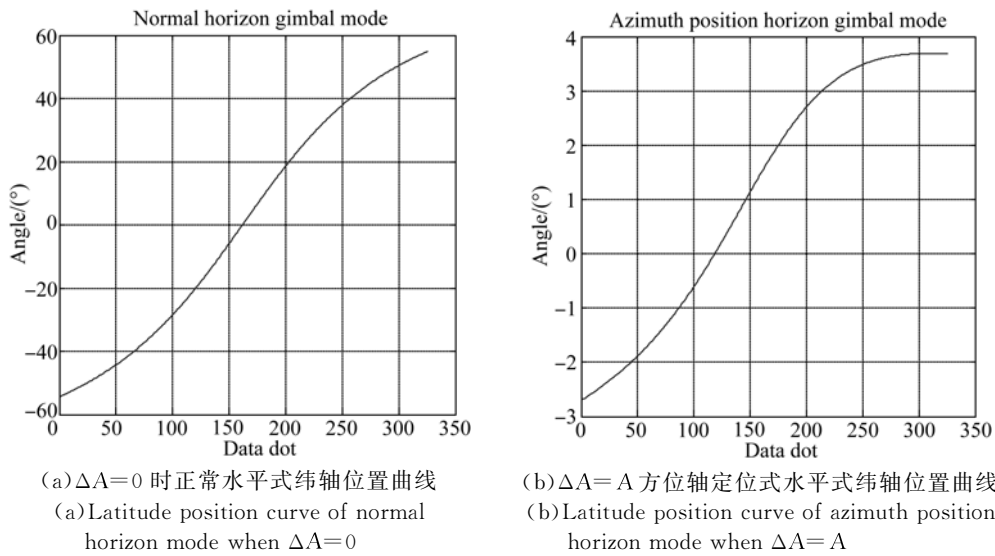


图 3 卫星水平式纬轴位置曲线

Fig. 3 Horizon mode latitude position curves

由图 3(a)可知,正常情况下水平式跟踪方式在卫星的有效捕获跟踪过程中,纬轴在 $-54.23^\circ \sim 54.82^\circ$ 下工作,但卫星进入段超出了 $\pm 20^\circ$ 时,无法对卫星进行捕获跟踪。由图 3(b)可知,方位

轴定位在 ΔA 处时的水平式跟踪,纬轴工作范围为 $-2.69^\circ \sim 3.68^\circ$,能够对卫星进行捕获跟踪,可以有效地解决纬轴受限问题。

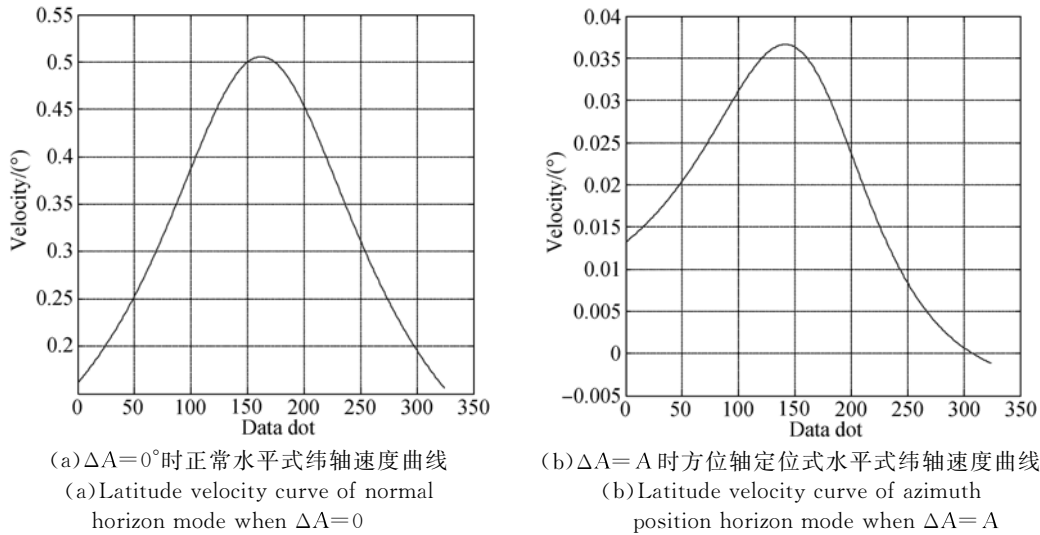


图 4 水平式纬轴速度曲线

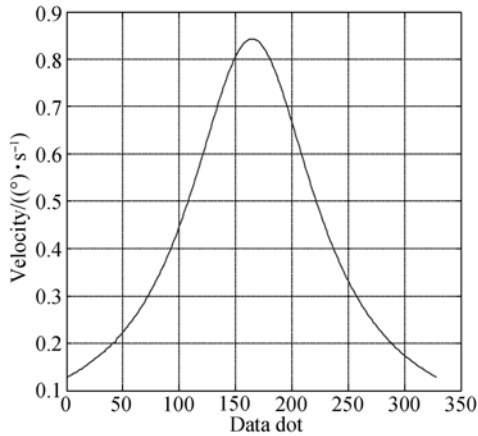
Fig. 4 Latitude velocity curves of horizon mode

对于卫星目标的水平式跟踪,加速度一般为千分之几,可以不予考虑,这里分析两种情况下的速度特性。对照图 4(a)和图 4(b)可知,方位轴定位式水平式跟踪速度值比正常情况的水平式跟踪速度值减小了一个数量级,因此,采用方位轴定位式水平式跟踪不但解决了纬轴工作范围受限的问题,而且还提高了跟踪性能。

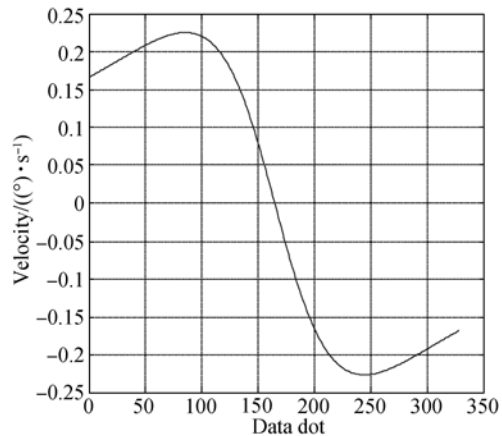
其次选取编号为 17589,过顶仰角为 59.49° 的卫星来分析方位轴随动式水平式跟踪和地平式跟踪特性。方位轴随动式水平式跟踪是由经轴和纬轴构成的水平式结构为主的跟踪,方位轴随动,即公式(13)纬轴角度 γ_1 公式中取 $A-\Delta A=0^\circ$,这时纬轴处于 0° 附近,跟踪速度接近零;地平式跟踪方式是由方位轴和经轴(俯仰轴)构成的地平

式结构为主的跟踪,纬轴定位在 0° ,速度值为零,所以两者的纬轴速度值基本一致;由随动式水平式跟踪原理可知,方位轴随动位置值就是由地平式结构方式解算的卫星轨道数据的位置值,因此方位轴随动速度值与地平式跟踪的方位轴速度值是一致的,如图 5(a)所示;由图 5(b)可知方位轴随动式水平式跟踪与地平式跟踪的经轴速度值是

一致的。虽然从跟踪策略算法上分析,两者的轨道数据是一致的,但是从伺服控制原理可知,方位轴随动式水平式跟踪类似地平式跟踪而优于地平式跟踪,它使地平式跟踪方式和水平式跟踪方式有机地结合起来,实现优势互补,达到更为理想的跟踪效果,跟踪性能优于地平式。下面通过试验来验证跟踪策略算法的正确性。



(a) 地平式跟踪和随动式水平式跟踪方位轴速度曲线
(a) Azimuth velocity curve of altazimuth gimbal and following up tracking



(b) 地平式跟踪和随动式水平式跟踪经轴速度曲线
(b) Longitude velocity curve of altazimuth gimbal and following up tracking

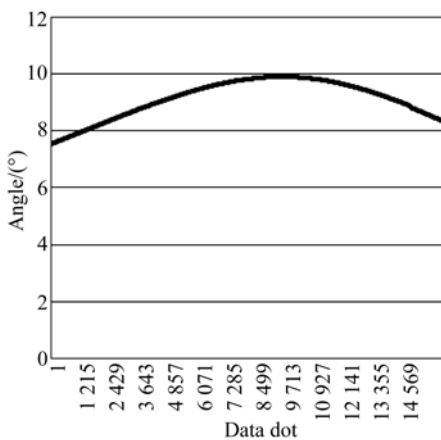
图 5 地平式跟踪和随动式水平式跟踪速度曲线

Fig. 5 Velocity curves of altazimuth gimbal and following up tracking

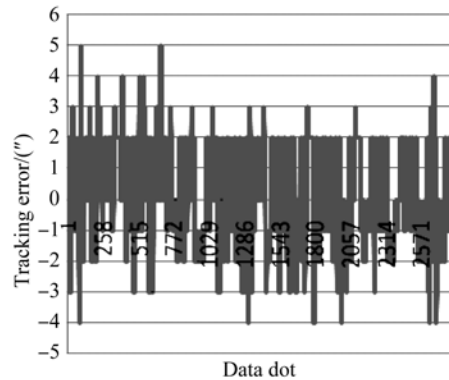
3 试验

为了验证三轴转台 STTA 卫星跟踪策略算法的正确性,做了大量试验,选用各种过顶仰角卫星进行卫星捕获跟踪,每次实验中获得 11 组有效数

据。根据跟踪策略算法选择过顶仰角为 80.125° 的卫星,过顶时对应的方位观测角 $A=290.9^\circ$ 。方位轴定位到 $\Delta A=A$ 处,全程采用方位轴定位式水平式跟踪,纬轴的工作范围和跟踪精度如图 6 所示。由图 6 可知,纬轴的工作范围在 $\pm 20^\circ$ 内,从而解决了纬轴工作范围受限问题。跟踪精度均方根为 $1.67''$ 。



(a) 方位轴定位式水平式跟踪纬轴工作范围
(a) Latitude range azimuth-position mode



(b) 方位轴定位式水平式跟踪精度
(b) Tracking error azimuth-position horizon mode

图 6 方位轴定位式水平式跟踪的性能

Fig. 6 Performance of azimuth-position horizon tracking mode

选择过顶仰角为 65.79° 卫星,采用方位轴随动式水平式跟踪进行捕获跟踪实验,跟踪结果如图 7(a)所示。选择过顶仰角为 59.46° 卫星,采用地平式跟踪进行捕获跟踪,跟踪结果如图 7(b)所示。对照两图可知,对于仰角低于 70° 的卫星,采

用两种跟踪方式都能有效实现跟踪,方位轴随动式跟踪精度的均方根为 $1.37''$,地平跟踪方式跟踪精度的均方根为 $2.25''$ 。因此,对于仰角低于 70° 卫星目标,最好采用方位轴随动式水平式跟踪方式。

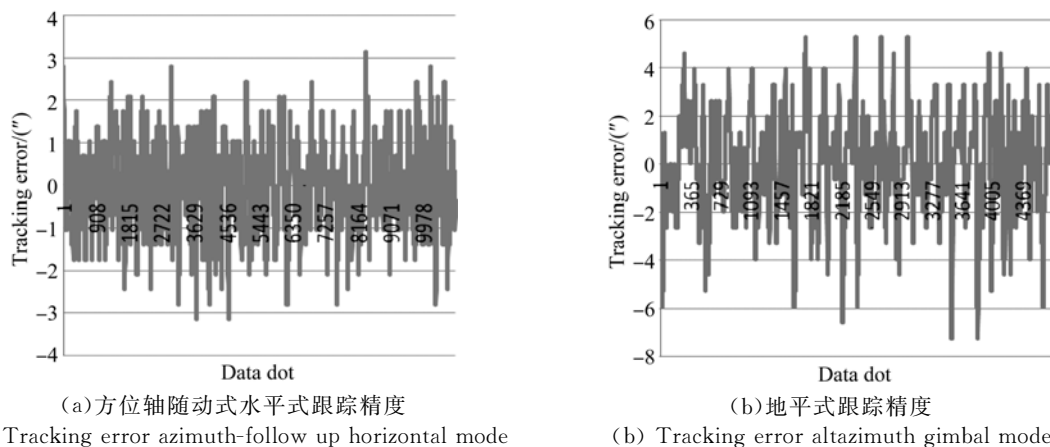


图 7 方位轴随动水平式和地平式的跟踪精度
Fig. 7 Tracking errors of altazimuth gimbal and following up modes

4 结 论

针对纬轴工作范围为 $\pm 20^\circ$ 的三轴跟踪架结构不能跟踪半球空域内所有卫星的问题,本文在研究了卫星跟踪原理的基础上,结合纬轴受限的三轴结构特点,推导出了三轴关系式,并由此仿真得出了 STTA 卫星跟踪策略算法。

跟踪仰角大于 70° 的卫星时,采用方位轴随动式水平式跟踪,即方位轴先定位在卫星过顶时对应的方位观测值 A 处,全程采用由经轴和纬轴构成的水平式跟踪,这样既充分利用了水平式结

构保精度跟踪天顶附近目标的优势,又克服了地平式结构有天顶跟踪盲区问题。

跟踪仰角小于 70° 的卫星时,既可以采用方位轴随动式水平式跟踪,也可以采用地平式跟踪,但前者的跟踪性能优于后者,而且前者能使两种方式有机结合起来,实现优势互补,达到更理想的跟踪效果。

试验证明,STTA 卫星跟踪策略算法有效地解决了三轴转台纬轴工作范围受限的问题,不但能跟踪半球空域内所有卫星,而且可以使过顶目标的高精度跟踪能力达到更为理想的跟踪效果。

参考文献:

[1] 徐涛,李博,刘廷霞,等. 车载光电跟踪系统跟踪转台的初始标定 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 782-789.
XU T, LI B, LIU T X, et al.. Initial calibration of tracking turntable for vehicle-borne opto-electronic tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 782-789. (in Chinese)

[2] 汤勇,顾宏斌,张丛喆. 高精度光学头部位置定位系统 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 488-495.

TANG Y, GU H B, ZHANG C ZH. High accurate optical head pose tracker system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 488-495. (in Chinese)

[3] 檀立刚,戴明,刘晶红,等. 机载光电测量设备目标自主定位误差分析 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3133-3140.
TANG L G, DAI G, LIU J H, et al.. Error analysis of target automatic positioning for airborne photo-electric measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 3133-3140. (in Chinese)

[4] 韩光宇,张国玉,曹立华. 卫星激光测距中发射光路

- 光机结构设计 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(7): 1669-1674.
- HAN G Y, ZHANG G Y, CAO L H. Opto-mechanical structural design of laser emitting system for SLR [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(7):1669-1674. (in Chinese)
- [5] 刘兴法, 马佳光, 刘顺发, 等. 视轴偏角对三轴光电跟踪系统跟踪过程的影响 [J]. 光电工程, 2005, 32(5):4-8.
- LIU X F, MA J G, LIU SH F, *et al.*. Effect of declination angle of sight axis on three-axis photoelectric tracking system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(5):4-8. (in Chinese)
- [6] 徐征峰, 陈洪斌, 刘顺发, 等. 视轴偏心三轴跟踪机架指向精度分析 [J]. 光电工程, 2007, 34(4): 12-16.
- XU ZH F, CHEN H B, LIU SH F, *et al.*. Analysis for pointing error of three-axis photoelectric theodolite with collimation axis eccentricity [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(4):12-16. (in Chinese)
- [7] 韩雪冰, 张景旭, 赵金字, 等. 水平式光电望远镜目标定位误差的预测 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(7):1595-1604.
- HAN X B, ZHANG J X, ZHAO J Y, *et al.*. Forecast for orientation errors of alt-alt photoelectric telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1595-1604. (in Chinese)
- [8] 于洋, 郭立红, 李丹. SGP4/SDP4 模型应用于水平式光电跟踪设备的卫星轨道预报 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6):1406-1412.
- YU Y, GUO L H, LI D. Applications of SGP4 / SDP4 model in satellite orbit forecasting with horizontal photoelectric tracking equipment [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(6): 1406-1412. (in Chinese)
- [9] 倪谷炎, 华卫红, 姜宗福, 等. 三轴跟踪平台算法研究 [J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(1):115-118.
- NI G Y, HUA W H, JIANG Z F, *et al.*. Research on three-axis mount tracking algorithms [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2005, 27(1):115-118. (in Chinese)
- [10] 官伯林. 三轴光电跟踪系统跟踪策略和控制研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学.
- GUANG B L. *Tracking Strategy and Control Method of Three-axis Photoelectric Tracking Systems* [D]. Xi'an: Xidian University. (in Chinese)

作者简介:



王伟国(1970—),男,吉林通化人,博士,研究员,2002年于吉林大学获得硕士学位,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电经纬仪的精密控制及总体设计。E-mail: wangwei5878@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)