

人造卫星光学可见期实时预测方法

高 策^{1,2} 乔彦峰¹

(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中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为了得到能够满足光电经纬仪观测条件的卫星光学可见期范围, 讨论了卫星的光学可见期预测方法, 从高度、地影和天光三个影响因素进行系统地分析, 得出对应的约束方程, 给出了可进行光学观测的时间范围, 并在某型号光电经纬仪系统的轨道预报软件中成功应用。选取 INTERCOSMOS 等四颗人造卫星进行连续数天的观测实验, 大量实验数据表明该方法能够精确提供卫星可观测弧段的可观测时间范围, 精度达到 103.629 ms, 大幅缩减了操作人员的等待时间, 提高了卫星定轨跟踪的工作效率。

关键词 测量; 光学可见期; 光电经纬仪; 天光; 地影

中图分类号 V557+.4

OCIS 110.0110 110.6770 280.0280 280.3400

文献标识码 A

A Real-Time Forecast Method for Visible Span of Artificial Satellite

Gao Ce^{1,2} Qiao Yanfeng¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to provide the visible span of satellite for photoelectrical theodolite, we discuss the forecast method for the visible span of artificial satellites. Three important factors including height, shadow and sunlight are analyzed. The method has been used on a certain kind of photoelectrical theodolite. Choosing INTERCOSMOS and other three satellites as samples, experimental results indicate that this method can provide accurate visible span of satellite and fulfill the requirement precision of 103.629 ms. The method reduces the waiting time and advances the efficiency of operating staffs.

Key words measurement; visible span; photoelectrical theodolite; sunlight; shadow

1 引 言

光电经纬仪是广泛应用于军事和航天领域的光学精密测量仪器。作为对人造卫星轨道的高精度测量手段, 具有不受地面杂波干扰, 不受星上能量限制, 测量精度高等特点。但和其他光学系统一样光电经纬仪要求目标具备光学可见性。光电经纬仪对卫星的测量活动在测站坐标精密确定、卫星精密定轨以及地球动力学的其他应用研究方面发挥着重要的作用^[1]。在对卫星进行捕获的过程中, 光电经纬仪需要待测量的目标具备可见性, 光学可见期预测就是计算光电经纬仪在什么时间内, 在什么位置能够观测到卫星。要保证观测条件, 首先必须保证卫星与测站的相对高度符合观测条件。其次, 卫星本身是不发光的, 必须反射太阳光, 所以该卫星必须被太阳直接照射。最后, 还需要在天空背景足够暗的情况下, 卫星才能被光学设备所捕获。因此为准确预测卫星的可见区间必须全面考虑高度、天光、地影等约束条件的限制^[2]。本文通过对各种约束条

收稿日期: 2010-08-12; 收到修改稿日期: 2010-09-13

基金项目: 国家 863 计划(2006AA703104)资助课题。

作者简介: 高 策(1981—), 男, 硕士研究生, 助理研究员, 主要从事计算机应用以及光电测控技术等方面的研究。

E-mail: gaoc2006@yahoo.com.cn

导师简介: 乔彦峰(1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电测控技术及相关领域等方面的研究。

件的系统分析,精确计算出通用的卫星可见期预测方法,并成功应用于卫星的轨道预测软件中,为卫星的观测提供了准确有效的可见弧段轨道信息。

2 原理与方法

预报卫星的光学观测时间范围,就要解高度、地影、天光三个约束条件的方程^[3]。

2.1 高度约束方程

如图 1 所示,在地心坐标系中有

$$\rho_x Z_x + \rho_y Z_y + \rho_z Z_z = \rho \sin E, \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} Z_x = \cos \theta \cos \phi \\ Z_y = \sin \theta \cos \phi \\ Z_z = \sin \phi \end{cases}, \quad (2)$$

当 θ 为观测站的地方恒星时, ϕ 为观测站的地理纬度。观测站卫星和地心之间的关系为

$$\rho_w = r_s + R_w \quad (3)$$

式中 ρ_w 为观测站至卫星斜距矢量^[4], r_s 为卫星向径, R_w 为观测站矢量。

测站矢量 R_w 在给定的椭球体中为

$$\begin{cases} X = -G_1 \cos \phi \cos \theta \\ Y = -G_1 \cos \phi \sin \theta \\ Z = -G_2 \sin \phi \end{cases}, \quad (4)$$

式中 G_1, G_2 的定义分别为

$$\begin{cases} G_1 = \frac{a_e}{\sqrt{1 - (2f - f^2 \sin^2 \phi)}} + H \\ G_2 = \frac{(1 - f)^2}{\sqrt{1 - (2f - f^2 \sin^2 \phi)}} + H \end{cases}, \quad (5)$$

式中 a_e 为地球赤道半径, f 为地球扁率, H 为观测站相对于所采用的椭球体表面高度。

由(1)~(5)式整理可得高度的约束方程为

$$x \cos \phi \cos \theta + y \cos \phi \sin \theta + z \sin \phi = \rho \sin E + G, \quad (6)$$

式中

$$G = G_1 \cos^2 \phi + G_2 \sin^2 \phi. \quad (7)$$

2.2 地影约束方程

r_s 和太阳位置矢量 R_s 的几何关系如图 2 所示。

则有

$$r_s \cdot R_s = rR \cos \psi. \quad (8)$$

当卫星进出地影时 r_s 和 R_s 之间的夹角满足

$$\cos \psi = \frac{-(r_s^2 - R_s^2)^{1/2}}{r_s}. \quad (9)$$

(9)式必须满足 $\frac{\pi}{2} \leq \psi \leq \frac{3}{2}\pi$, 同时

$$\cos \psi = \frac{x_\infty R_s \cdot P + y_\infty R_s \cdot r_s}{R_s \cdot r_s}, \quad (10)$$

式中 $x_\infty = r_s \cos f$, $y_\infty = r_s \sin f$ 。定义两个辅助角度变量 β 和 ξ 。

在卫星绕地球运行周期内, β 和 ξ 的变化是很慢的,可以近似为常量^[5]。由(10)式得

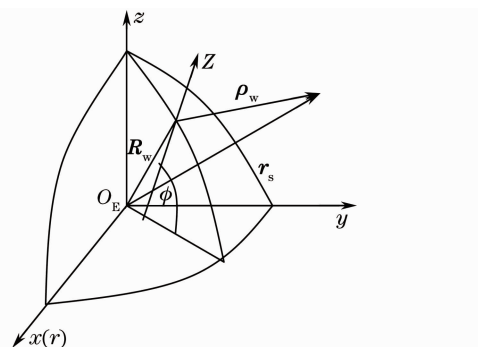


图 1 卫星与测站在地心坐标系下的几何关系

Fig.1 Geometric relationship between satellite and measurement station in geocentric coordinate system

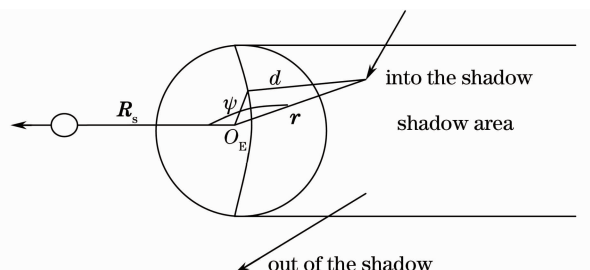


图 2 卫星进出地影示意图

Fig.2 Relationship between satellite and the shadow

$$\cos \psi = \beta \cos f + \xi \sin f. \quad (11)$$

另外,

$$r_s = \frac{P}{1 + e \cos f}. \quad (12)$$

由(8)~(12)式整理得到卫星进出地影的约束方程为

$$\mathbf{R}_s^2 (1 + e \cos f)^2 + P^2 (\beta \cos f + \xi \sin f)^2 - P^2 = 0. \quad (13)$$

2.3 天光约束方程

太阳与观测站在地心坐标系中的相对位置如图3所示,则有

$$\rho_x Z_x + \rho_y Z_y + \rho_z Z_z = -\rho \sin h_a, \quad (14)$$

式中 \mathbf{Z} 为观测站天顶单位矢量,

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_m, \quad (15)$$

\mathbf{R}_m 为测站单位矢量。若用太阳的方向余弦代替 $\frac{\boldsymbol{\rho}}{\rho}$ 则有

$$\frac{\mathbf{R}_s}{R_s} = \begin{bmatrix} \cos \nu_s \\ \sin \nu_s \cos \xi \\ \sin \nu_s \sin \xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_s \\ \eta_s \\ \zeta_s \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中 $\nu_s = 4.8883394 + 0.017202791d + 0.03345 \sin(6.2482906 + 0.0172019697d)$, $\xi = 0.40920619 - 0.6218433 \times 10^{-8}d$, d 为相对 1950.0 的积日数。由于 $\mathbf{R}_s \approx \rho \approx 1.496 \times 10^8 [1 - 0.016725 \times \cos(6.2482906 + 0.0172019697d)]^{[6]}$, 则有

$$\mathbf{R}_s \approx \rho \begin{bmatrix} \xi_s \\ \eta_s \\ \zeta_s \end{bmatrix}. \quad (17)$$

由(14)~(17)式整理得到天光约束方程为

$$\rho(\xi_s \cos \phi \cos \theta + \eta_s \cos \phi \sin \theta + \zeta_s \sin \phi) = \rho \sin h_a + G, \quad (18)$$

式中 G 由(7)式给出, G_1, G_2 定义参见(5)式。

引入常量

$$\begin{cases} A = \rho \xi_s \cos \phi \\ B = \rho \eta_s \cos \phi \\ C = \rho \sin h_a + G - \rho \zeta_s \sin \phi \end{cases}, \quad (19)$$

则(18)式可简化为

$$A \cos \theta + B \sin \theta = C. \quad (20)$$

方程(20)可得两解 θ_1 和 θ_2 , 分别对应日出前和日落后, 再由

$$\theta = \theta_0 + \dot{\theta}(t - t_0) + \lambda_E \quad (21)$$

计算出对应的 t_1 和 t_2 , 这就是一天中太阳高度(相对于测站)角为 h_a 的两个时刻, 即位于 (ϕ, λ_E) 处的观测站, 只有在 $t_1 \geq t \geq t_2$ 区间内, 天光才满足观测条件^[7]。

综上所述, 只有同时满足高度、地影、天光三个约束方程的时间和区域, 才能进行对卫星的光学观测。

3 实验数据

为验证方法的正确性, 在某型号光电经纬仪上进行了卫星光学可见期的预测实验, 实验时间选在 2010 年 5 月至 6 月之间, 站点坐标为东经 125.4°, 北纬 43.8°, 海拔 219 m。采用四颗卫星进行实验, 卫星轨道根数为 TLE 格式^[8], 根数内容如表 1 所示。

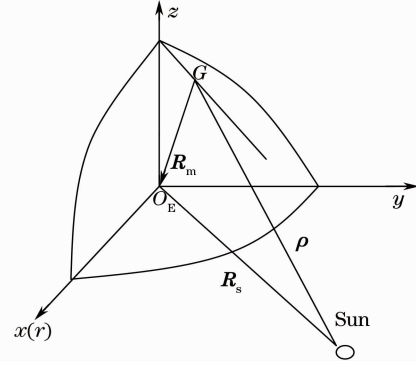


图3 观测站和太阳的几何关系

Fig. 3 Relationship between site and the sun

表 1 实验卫星轨道数据

Table 1 Orbit data of satellites in experiment

Satellite ID	Orbit data(TLE)							
SL-14 R/B	1)	18749U	88001B	10146.75795603	.00000053	00000-0	36953-5	0912
	2)	18749	82.5138	198.1724	0019788	151.3307	208.8997	14.81686022208486
SL-3 R/B	1)	14208U	83075B	10145.73642300	-.00000112	00000-0	-35146-5	09141
	2)	14208	97.6305	200.6797	0045015	311.0996	48.6341	15.02376739459234
INTERCOSMOS 24	1)	20261U	89080A	10146.33754889	.00000106	00000-0	31963-4	01709
	2)	20261	82.5956	237.6437	1213322	271.9969	74.2935	12.53485887942575
SL-8 R/B	1)	14484U	83111B	10146.76574666	.00001759	00000-0	56163-4	021412 14484
	2)	82.8467	247.3794	0420888	266.6061	88.6944	14.75258254351002	

卫星轨道预报的软件中根据(6)、(13)、(18)式三个约束方程对解算出的轨道进行过滤,计算出可观测时段。并记录目标实际出现和消失在视场中的时间段段信息,记录如表 2 所示。

表 2 卫星光学可见期预测误差

Table 2 Error of the visible span forecasted for satellites

Satellite ID	Data	Forecasted start time /UTC	Measured start time /UTC	Forecasted end time /UTC	Measured end time /UTC	Error on start time /ms	Error on end time /ms
SL-14 R/B	May 27th	12 h 51 min	12 h 51 min	12 h 57 min	12 h 57 min	110	160
		06 s 570 ms	06 s 680 ms	45 s 890 ms	46s 50 ms		
SL-3 R/B	May 27th	13 h 20 min	13 h 20 min	13 h 26 min	13 h 26 min	120	100
		16 s 850 ms	16 s 970 ms	09 s 700 ms	09 s 800 ms		
INTERCO SMOS	May 27th	15 h 04 min	15 h 04 min	15 h 21 min	15 h 21 min	-90	20
		20 s 450 ms	20 s 360 ms	59 s 120 ms	59 s 140 ms		
SL-8 R/B	May 27th	17 h 06 min	17 h 06 min	17 h 12 min	17 h 12 min	110	-20
		26 s 170 ms	26 s 280 ms	32 s 360 ms	32 s 340 ms		
SL-14 R/B	June 2th	12 h 19 min	12 h 19 min	12 h 20 min	12 h 20 min	-120	120
		20 s 780 ms	20 s 660 ms	48 s 480 ms	48 s 600 ms		
SL-3 R/B	June 2th	12 h 50 min	12 h 50 min	12 h 56 min	12 h 56 min	100	10
		16 s 70 ms	16 s 170 ms	09 s 450 ms	09 s 460 ms		
INTERCO SMOS	June 2th	14 h 34 min	14 h 34 min	14 h 51 min	14 h 51 min	150	-130
		37 s 40 ms	37 s 190 ms	59 s 200 ms	59 s 70 ms		
SL-8 R/B	June 2th	16 h 36 min	16 h 36 min	16 h 42 min	16 h 42 min	100	20
		29 s 100 ms	29 s 200 ms	34 s 170 ms	34 s 190 ms		

从采样数据中可以看出,有些目标在预报期之前即被观测到,而有些目标是观测期后发现的,预测时间的这种随机性与设备的光学探测能力、天空背景以及目标亮度有关,这些是造成预测时间与实际测量时间偏差的主要影响因素。通过连续多日对这四颗卫星的预测时间段与测量时间段进行比较,计算得出时间预报精度为 103.629 ms。

4 结 论

通过对影响卫星可见性的高度、地影、天光三个影响因素的深入分析,推导并得出三个约束方程^[9],在卫星轨道程序中应用约束方程,准确地对卫星的可见弧段进行预测。选取 INTERCOSMOS 等四颗人造卫星进行连续数天的观测实验,实验数据表明预测精度达到 103.629 ms,满足了设备的使用要求,将该方法成功应用于某型号光电经纬仪的日常卫星跟踪任务,能够精确计算卫星的可见弧段,减少了设备等待时间,大大提高了日常测量任务的工作效率。

参 考 文 献

- 1 程伯辉,刘小龙,丁 剑. 对 GPS36 卫星激光测距最佳观测时间的研究[J]. 测绘科学, 2006, 31(3): 65~66

- 2 陈芳允, 贾乃华. 卫星测控手册[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 348~353
- 3 Yan Aimin, Zhou Yu, Sun Jianfeng *et al.*. Technology and progress of compound-axis pointing in satellite laser communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 40601
闫爱民, 周煜, 孙建锋等. 卫星激光通信复合轴光跟瞄技术及发展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(4): 040601
- 4 刘利生, 李迎春. 外弹道测量数据处理[M]. 北京: 国防工业出版社. 2001, 46~53
- 5 Wan Qiang, Guo Yanlong, Wang Xiaobing *et al.*. Present status and progress of laser cooperative targets for SLR[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(5): 20~23
万强, 郭延龙, 王小兵等. 卫星激光测距合作目标技术现状和进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(5): 20~23
- 6 Zhong Hongjun, Yang Mengfei, Lu Xin. Calibration method of star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1343~1348
钟红军, 杨孟飞, 卢欣. 星敏感器标定方法研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1343~1348
- 7 Gan Xinji, Fu Youyu, Guo Jin. Error analysis of star magnitudes scale of space target scene simulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 211~215
甘新基, 付有余, 郭劲. 空间目标场景模拟器的星等定标误差分析[J]. 光学学报, 2009, **29**(s1): 211~215
- 8 Shao Jun, Shen Xueju, Li Gang *et al.*. Study on identification and tracking technology for moving targets based on optical correlation[J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(6): 630~632
邵珺, 沈学举, 李刚等. 基于光学相关的运动目标跟踪识别技术研究[J]. 激光技术, 2009, **33**(6): 630~632
- 9 Yan Meili, Zhao Yunfeng. Key technology of laser optical system testing facility[J]. *OME Information*, 2010, **27**(5): 29~31
闫美丽, 赵云峰. 激光光学系统测试设备的关键技术研究[J]. 光机电信息, 2010, **27**(5): 29~31