

文章编号: 0253-2239(2006)07-0971-4

组合大视场星敏传感器自主定轨中的星光折射*

薛申芳^{1,2} 宁书年¹ 金声震² 孙才红²

(¹ 中国矿业大学北京校区机电与信息工程学院, 北京 100083)
(² 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要: 就组合大视场星敏传感器卫星自主定轨方法中的恒星观测, 在球形大气假设下, 直接由大气折射率、光在大气中的折射路径和斯涅耳定律出发, 建立星光大气折射模型。在 60 km 高度以上星光穿过时不产生大气折射的假设下, 得到星光在 60 km 高度的大气层上的仰角 θ_{60} 、星光折射角 γ 和星光切线高度 h 的关系, 且当星光穿过 20~60 km 的高度大气范围时, θ_{60} 的范围约在 $0^\circ \sim 7^\circ$ 之间。最后应用该大气折射模型进行了轨道确定仿真, 说明折射模型的有效性。

关键词: 大气光学; 自主定轨; 组合大视场星敏传感器; 大气折射; 星光切线高度; 星光仰角

中图分类号: TP301.6 文献标识码: A

The Starlight Refraction in Autonomous Orbit Determination for Satellite By Large Field of View Star Sensors

Xue Shenfang^{1,2} Ning Shunian¹ Jing Shengzhen² Sun Caihong¹

(¹ Machine Electron and Information Engineering Institute, China University of Mining and Technology, Beijing 100083)
(² National Astronomical Observatories, the Chinese Academy of Science, Beijing 100012)

Abstract: By supposing the atmosphere is of spherical symmetry, starlight refraction model is given deriving from atmospheric refractive index, refractive path in atmosphere and Snell law for the observing method by large field of view star sensors in autonomous orbit determination. On the assumption that the starlight refraction does not happen on the spherical surface whose altitude is larger than 60 km, the relations among the elevation angle θ_{60} of starlight on atmospheric altitude of 60 km, the starlight refraction angle γ and the starlight tangent altitude h are obtained. And the result shows that range of change of θ_{60} is from 0° to 7° . At last, the orbit determination simulation is done using this refraction model, and the validity of the model is shown.

Key words: atmospheric optics; autonomous orbit determination; large field of view star sensors; atmosphere refraction; starlight tangent altitude; starlight angle of elevation

1 引 言

组合大视场星敏传感器, 它是由三个高精度 CCD 星敏传感器组装而成, 三个传感器中心轴严格轴对称, 在某一锥面均匀分布, 通过标定得到仪器。该仪器低成本、高精度、大视场, 在任何时刻能同时观测到地球边缘附近的三颗恒星, 其实时性强, 利用穿过地球边缘附近的恒星信息来确定卫星轨道。组合大视场星敏传感器对星光穿过地球边缘附近的恒星同时观测就是要利用星光折射去间接地敏感地平。避免了通常使用的红外仪地平仪这种测量地平的仪器,

因为红外仪地平仪具有扫描运动带来不稳定致使其精度较低(角分量级)且其寿命较短的缺点^[1]。

当星光穿过地球附近大气层时, 星光会被折射, 星光折射角可以通过星敏传感器的观测结果和星表得到, 星光切线高度可以由星光折射角得, 再由卫星、地球、观测星光之间的几何关系, 可以确定地心在卫星本体坐标系中的位置, 然后利用卫星姿态所确定的卫星本体坐标系与地心惯性坐标系之间的转换关系, 得到卫星在地心惯性坐标系中的位置。本文主要对组合大视场星敏传感器所观测到星光的星光折射有关参量进行探讨。

* 中国科学院科技创新基金(CXJJ-83)资助课题。

作者简介: 薛申芳(1957~), 男, 河北威县人, 副教授, 博士, 主要从事信息技术、卫星自主导航等研究。

E-mail: xueshenfang@126.com

收稿日期: 2005-04-01; 收到修改稿日期: 2005-08-11

2 星光折射模型

假定地球是圆球体,其半径为 R_e ,大气折射率球面均匀,即与地球同心的任意大气层上大气物理参量相同,大气折射率仅为大气层高度的函数,星光在水平方向不产生折射。就星敏感器的视场为 $20^\circ \times 20^\circ$,利用全天球导航星表 SKY2000 对视场内可能出现的恒星数目(剔除双星、变星和角距过小的恒星)进行了遍历仿真统计,结果表明,对于 4.5 等以上恒星,视场内星数多于 4 颗的概率大于 99.9%,视场内星数多于 9 颗的概率大于 99.72%,视场内星数少于 2 颗的概率小于 0.025%,盲区非常少^[2]。从而可知亮于 4.5 等的恒星从数量上就可以满足星敏感器识别的要求。故我们可以假定每个星敏感器可以接受到一条以上穿过地球边缘附近大气层的星光,我们把这样的星称为折射星。因为在高度小于 20 km 的范围内为地球紫外边缘大气层,星敏感器识别恒星比较困难,而在大于 60 km 的范围以外大气稀薄,星光折射很小,所以组合大视场星敏感器的视场是针对星光穿过地球边缘附近 20~60 km 范围(称为折射大气层)的恒星,且假设高度为 60 km 以上时星光不产生折射。这样,星光由恒星出发以直线传播到 60 km 高度的大气层上的 B 点,进入大气层后会以曲线传播至 60 km 高度的大气层上的 A 点,穿出折射大气层后又以直线传播被敏感器所敏感接收,如图 1 所示。

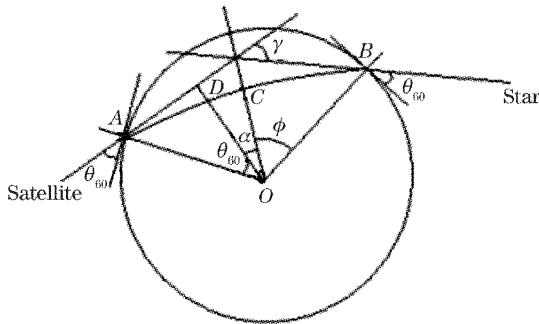


图 1 光路示意图

Fig. 1 The path of starlight refraction

我们把星光经折射所转过的角度称为星光折射角 γ ;连接地心 O 和穿入折射大气层前的星光(称为恒星星光)与穿出折射大气层后的星光(称为视在星光)的交点,且交折射光线于 C 点,记 $r_0 = |OC|$;再过 O 作视在星光的垂线,垂足为 D 点, $h = |OD| - R_e$ 称为星光切线高度;由大气的球形对称性假设知道,恒星星光和视在星光在 60 km 高度的大气层上有相同的仰角,记之为 θ_{60} ,在 C 点处的仰角 θ_0 为零,即

$\theta_0 = 0$,且落在大气层内的光线关于 OC 是对称的;由几何关系知道, $\angle AOD = \theta_{60}$, $\angle COD = \alpha = \gamma/2$, $\phi = \alpha + \theta_{60}$ 。在满足大气球面分层假设下,星光传播满足斯涅耳(Snell)定律

$$nr \cos \theta = T, \tag{1}$$

其中 T 为常量, θ 为以地心为中心、半径为 r 大气层上折射光线的仰角, n 为星光在任意高度、半径为 r 的大气层上的大气折射率。大气折射率是波长的函数,在可见光波段,波长变化对折射率效应并不大(小于 10^{-5})。统计资料表明,对可见光波段而言,从 9~60 km 高度,大气折射率模型可用表达式^[3]

$$n(h) = 10^{-6} N_9 \exp[-c_{a9}(h - 9)] + 1 \tag{2}$$

表示。这里 N_9 为海拔 9 km 处的折射率, c_{a9} 为 9~60 km 海拔高度的指数衰减系数(km^{-1}), h 为海拔高度, $n(h)$ 为高度 h 处的大气折射率。

为了计算 ϕ 角,由图 2 可知

$$d\beta = \frac{\cot \theta}{r} dr, \tag{3}$$

由斯涅耳定律可得

$$\theta_{60} = \arccos\left(\frac{n_0 r_0}{n_{60} r_{60}}\right), \tag{4}$$

以及

$$\cot \theta = \frac{n_0 r_0 \cos \theta_0}{\sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2}} = \frac{n_0 r_0}{\sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2}}, \tag{5}$$

其中 $r_{60} = R_e + 60$, n_0 和 n_{60} 分别表示半径为 r ,和 r_{60} 的球面上的大气折射率。从而

$$\left\{ \begin{aligned} \phi &= \int_{r_0}^{r_{60}} d\beta = n_0 r_0 \int_{r_0}^{r_{60}} \frac{dr}{\sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2}}, \\ \gamma &= 2n_0 r_0 \int_{r_0}^{r_{60}} \frac{dr}{r \sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2}} - 2\arccos \frac{n_0 r_0}{n_{60} r_{60}}, \end{aligned} \right. \tag{6}$$

且由图 1 可知,星光切线高度为

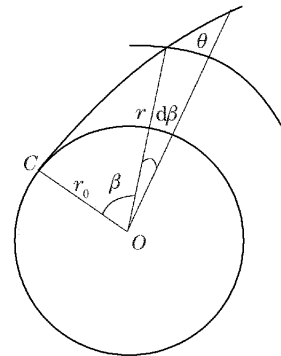


图 2 星光折射示意图

Fig. 2 The sketch of refracted starlight

$$h = r_{60} \cos \theta_{60} - R_e. \quad (8)$$

对上述星光折射模型进行数值计算, 计算结果参见表 1。

表 1 星光折射参量计算结果

Table 1 The result of starlight refraction parameters

r_0/km	$\theta_{60}/(^{\circ})$	$\gamma/(')$	h/km
20	6.3	281.7	20.5
21	6.2	245.4	21.4
22	6.2	213.8	22.4
23	6.1	186.4	23.3
24	6.0	162.5	24.3
25	5.9	141.7	25.2
26	5.8	123.7	26.2
27	5.8	107.9	27.2
28	5.7	94.2	28.1
29	5.6	82.3	29.1
30	5.5	71.9	30.1
31	5.4	62.8	31.1
32	5.3	54.9	32.1
33	5.2	48.0	33.1
34	5.1	42.0	34.1
35	5.0	36.7	35.1
36	4.9	32.1	36.0
37	4.8	28.1	37.0
38	4.7	24.6	38.0
39	4.6	21.6	39.0
40	4.5	18.9	40.0
41	4.4	16.5	41.0
42	4.3	14.5	42.0
43	4.1	12.7	43.0
44	4.0	11.1	44.0
45	3.9	9.7	45.0
46	3.8	8.5	46.0
47	3.6	7.4	47.0
48	3.5	6.5	48.0
49	3.3	5.6	49.0
50	3.2	4.9	50.0
51	3.0	4.2	51.0
52	2.8	3.6	52.0
53	2.7	3.1	53.0
54	2.5	2.6	54.0
55	2.2	2.2	55.0
56	2.0	1.8	56.0
57	1.7	1.5	57.0
58	1.4	1.1	58.0
59	1.0	0.7	59.0
60	0	0	60.0

表 1 给出了 r_0 、 θ_{60} 、 γ 和 h 的一些离散结果。可以看出, 随着 r_0 的增加, θ_{60} 和 γ 在递减, θ_{60} 的变化范

围在 $0^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 之间, γ 的变化范围在 $0' \sim 300'$ 之间, h 随 γ 的增加呈指数衰减(如图 3 所示)

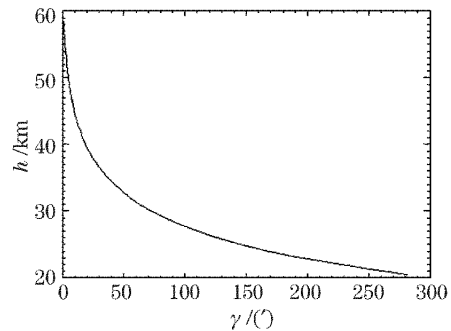


图 3 星光折射角 γ 与星光切线高度 h 的关系

Fig. 3 The relation between γ and h

3 在卫星轨道确定中的应用

把上述折射模型应用到组合大视场星敏传感器自主定轨方法中, 对低轨道卫星只考虑地球非球形摄动因素^[4], 利用卡尔曼滤波进行仿真。轨道初始条件为: 仿真初始历元 J2000.0^[5], 轨道半长轴 $a = 7136.635 \text{ km}$, 轨道倾角 $i = 65^{\circ}$, 扁心率 $e = 1.809 \times 10^{-3}$, 真近点角 $f = 0^{\circ}$, 升交点赤经 $\Omega = 1^{\circ}$, 近升角距 $\omega = 1^{\circ}$, 轨道周期 $T = 100 \text{ min}$; 仿真滤波模型和其他仿真初始参量参看文献^[6]; 仿真结果如图 4 所示。由于地球非球形引力是保守力摄动, 无耗散效应, 轨道不会收缩, 轨道面会发生进动, 在所给初始条件下, 轨道面在一日内西退大约 2.8° , 这与理论结果^[7]是一致的。

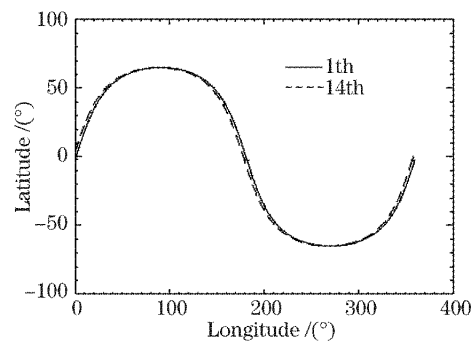


图 4 第 1 圈和第 14 圈卫星轨道在天球上的轨迹

Fig. 4 The tracks of the 1th and 14th orbits on the celestial sphere

4 结 论

本文根据组合大视场星敏传感器自主定轨的需要, 直接由大气折射率和光在大气中的折射路径出发, 通过建立大气折射模型, 对星光折射有关参量进

行了研究。该大气折射模型的建立方法基本反应了星光的传波过程,数值计算结果给出了恒星星光和视在星光的仰角范围约为 $0^{\circ}\sim 7^{\circ}$, 这为组合大视场星敏感器的组装以致于能有效观测折射星提供了一个重要参量。计算结果显示,当大气比较稳定时, h 随 γ 的变化可以近似地用指数函数来拟合。通过轨道确定仿真,进一步说明了折射模型的可靠性。

参 考 文 献

- 1 Yang Daming. *Spacecraft Attitude Control System* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000. 73~77 (in Chinese)
杨大明. 空间飞行器姿态控制系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000. 73~77
- 2 Xue Shenfang. *The Research on Orbit Perturbation in Autonomous Orbit Determination for Satellite* [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2005, 1: 13~14 (in Chinese)
薛申芳. 卫星自主定轨中轨道摄动研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京校区), 2005. 1: 13~14
- 3 Lu Yuan, Ling Yongshun, Nie Jinsong. Study on the refraction error of laser beam through the earth's atmosphere[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(1): 69~72 (in Chinese)
路 远, 凌永顺, 聂劲松. 激光穿过大气层时的折射误差研究[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(1): 69~72
- 4 Xue Shenfang, Jin Shengzhen, Ning Shunian *et al.*. The atmospheric drag in an autonomous orbit determination for satellite[J]. *J. China University of Mining and Technology*, 2005, 15(1): 32~35
- 5 Purple Mountain Observatory, Chinese Academe of Science. *Chinese Astronomical Calendar in 2004* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 93, 501 (in Chinese)
中国科学院紫金山天文台. 2004年中国天文年历[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 93, 501
- 6 Xue Shenfang, Sun Caihong, Ning Shunian *et al.*. The extended Kalman filtering algorithm improvement in orbit estimation[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 40(33): 203~206 (in Chinese)
薛申芳, 孙才红, 宁书年 等. 卫星轨道估计中广义卡尔曼滤波算法改进[J]. *计算机工程与应用*, 2004, 40(33): 203~206
- 7 Zhang Renwei. *Satellite Orbit Attitude Dynamics and Control* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1998. 131 (in Chinese)
章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998. 131
- 8 Weng Ningquan, Zeng Zongyong, Gong Zhiben. The refraction correction of optical measurement to the satellite[J]. *Chin. J. Quantum Electronics*, 2001, 18(6): 560~566 (in Chinese)
翁宁泉, 曾宗泳, 龚知本. 卫星目标光学测量大气折射修正[J]. *量子电子学报*, 2001, 18(6): 560~566
- 9 Rong Jian, Deng Daizhu, Zhong Xiaochun. Atmospheric refraction affects the system of space-earth satellite communication[J]. *Laser J.*, 2004, 25(5): 49~50 (in Chinese)
荣 健, 邓代竹, 钟晓春. 大气折射对空地卫星光通信链路影响的研究[J]. *激光杂志*, 2004, 25(5): 49~50
- 10 Yang Bo, Fang Jiancheng, Wu Xiaojie. Comparisons of autonomous orbit determination methods for spacecraft using starlight refraction[J]. *Aerospace Control*, 2001, (3): 1~11 (in Chinese)
杨 博, 房建成, 伍小洁. 星光折射航天器自主定轨方案比较[J]. *航天控制*, 2001, (3): 1~11
- 11 He Junhua, Chen Liangyi. A method of data correction of atmospheric refraction index[J]. *J. Applied Optics*, 2004, 25(1): 58~59 (in Chinese)
何俊华, 陈良益. 一种大气折射数据修正方法[J]. *应用光学*, 2004, 25(1): 58~59
- 12 Chang Zhiguo, Zhang Jun. Simulative model and applied experimentation of atmospheric refractive index near the ground layer[J]. *J. PLA University of Science and Technology*, 2004, 5(2): 86~89 (in Chinese)
常治国, 张 军. 近地层大气折射指数梯度分布模拟模型及其应用实验[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 5(2): 86~89