

文章编号 1004-924X(2009)04-0745-05

运动补偿成像光谱仪的地面分辨率

李欢^{1,2}, 向阳¹, 冯玉涛^{1,2}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对用运动补偿增加成像光谱仪能量积分时间的情况, 推导出了其地面分辨率和望远系统焦距选择的一般表达式。运动补偿成像光谱仪地面分辨率与指向反射镜转角成反比关系, 转角大时地面分辨率低, 反之亦然。给定成像光谱仪探测器像元尺寸为 $20\ \mu\text{m}$, 飞行轨道高度为 $600\ \text{km}$, 光线摆角 $\leq 30^\circ$, 以星下点、最大摆角和整个运动补偿段地面分辨率中值为 $30\ \text{m}$ 为依据来计算望远系统的焦距, 求得望远系统焦距为 $400, 470, 435\ \text{mm}$, 并给出了此时的地面分辨率相对比值与光线摆角的关系曲线。对于积分时间一定的情况, 推导出指向反射镜的反扫角速度公式。结果表明: 指向反射镜反扫角速度是卫星运动速度、飞行轨道高度、对目标进行凝视测量时光线的提前摆角、飞行时间及地球半径的函数, 改变指向反射镜反扫的角速度, 可使积分时间增大 N 倍。

关键词: 成像光谱仪; 望远系统; 运动补偿; 指向反射镜; 地面分辨率

中图分类号: TH744.1; TH703 **文献标识码:** A

Ground resolution for imaging spectrometer with motion compensation

LI Huan^{1,2}, XIANG Yang¹, FENG Yu-tao^{1,2}

- (1 *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The general expressions of the ground resolution and the telescope focal length for an imaging spectrometer were deduced to investigate the increase of energy integral time with motion compensation. The ground resolution is inverse proportion to the pointing angle for the imaging spectrometer with the motion compensation. It will decrease when the pointing angle increases, and vice versa. By giving a pixel size of $20\ \mu\text{m}$ for a detector, an orbit altitude of $600\ \text{km}$ and a beam deflexion angle low than 30° for the imaging spectrometer, the effective focal length of the telescope was calculated ($400, 470$ or $435\ \text{mm}$), and the relation curves between the relative ratios of ground resolution and the beam deflexions were presented. On the situation of certain integral time, the expression of anti-scanning angular velocity of the pointing mirror was deduced. The result indicates that the anti-scanning angular velocity of the pointing mirror is the functions of the velocity of secondary planet, orbit alti-

收稿日期: 2008-06-25; 修订日期: 2008-07-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60538020)

tude, the beam deflexion angle ahead of schedule on gazing an object, aviation time and the radius of the earth. The integral time will increase by N times when anti-scanning angular velocity of the pointing mirror is changed.

Key words: imaging spectrometer; telescope; motion compensation; pointing mirror; ground resolution

1 引言

成像光谱仪^[1-2]由于将景物像元的光谱分成了几十乃至上百个光谱通道,从而使得其焦平面阵列探测器^[3]每个像元所接收到的能量大为降低。为了获得足够的信噪比^[4-5],目前 COIS^[6]、Hyperion^[7]、CHRIS^[8]等成像光谱仪都采用了仪器的观测视轴对地面运动补偿^[9](GMC),增加积分时间的方法提高信噪比。这也是当前焦平面器件帧频限制条件下为获得地面分辨率高的图像不得不采取的措施。

运动补偿是通过将指向反射镜逆飞行方向旋转,使卫星在同一时间飞行对应的星下点距离为地面观测距离的 n 倍来增加探测器积分时间的方法。设指向反射镜 45° 放置时,成像光谱仪观测的是星下点景物 S_0 ,为了增加能量积分时间,卫星在起始位置 A_0 时将指向反射镜对向卫星运动前方目标 B_0 ,然后逆飞行方向旋转指向反射镜,当卫星从 A_0 点飞至 A_t 点,对应的地面观测区域为 B_0B_t 。因为卫星对 B_0B_t 区域的观测时间与对 S_0S_t 区域(指向反射镜不动)的相同,所以,在地面分辨率相同的情况下,采用运动补偿将增加探测器像元的能量积分时间,从而,增加系统的信噪比。

由于采用了运动补偿的方式,使成像光谱仪在不同观测角时的观测距离不同,所以其地面分辨率将随观测角而变,对望远系统焦距和指向反射镜的反扫角速度产生了一定的影响,本文对此问题进行了具体分析。

2 地面分辨率特性

运动补偿原理如图 1 所示, R 为地球的半

径, H 为卫星飞行轨道高度。

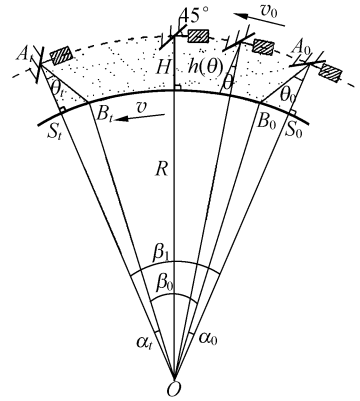


图 1 运动补偿原理图

Fig. 1 Motion compensation principle figure

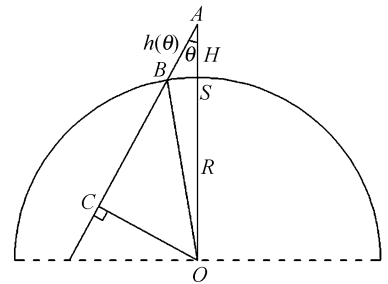


图 2 观测距离与地球半径、飞行轨道高度和光线摆角的关系

Fig. 2 Relation between observation distance and the earth radius, orbit altitude and beam deflexion angle

当指向反射镜相对 45° 星下点的摆角为 $\theta/2$ 时,光线的摆角为 θ 。设所用探测器像元尺寸为 d ,望远系统的焦距为 f ,那么地面像元分辨率(文中简称“地面分辨率”):

$$D = \frac{h(\theta)}{f} d, \quad (1)$$

其中, $h(\theta)$ 为成像光谱仪到地面观测点的距离。由图 2 可见:

$$h(\theta) = AC - BC, \quad (2)$$

因为:

$$AC = (R+H) \cdot \cos \theta, \quad (3)$$

$$BC = \sqrt{OB^2 - OC^2} = \sqrt{R^2 - [(R+H) \sin \theta]^2}, \quad (4)$$

所以:

$$h(\theta) = (R+H) \cos \theta - \sqrt{R^2 - (R+H)^2 \sin^2 \theta}, \quad (5)$$

将式(5)代入式(1),得

$$D \equiv D(\theta) = \frac{(R+H) \cos \theta - \sqrt{R^2 - (R+H)^2 \cdot \sin^2 \theta}}{f} d, \quad (6)$$

由式(6)可见,成像光谱仪的地面分辨率在整个运动补偿过程中是变化的。

3 望远系统焦距

对运动补偿段地面分辨率不同的要求,决定对望远系统的焦距选择也将不同。设要求成像光谱仪在光线摆角为 θ_0 时地面分辨率为 D_0 ,那么,由式(6)推得望远系统的焦距:

$$f_0 = \frac{(R+H) \cos \theta_0 - \sqrt{R^2 - (R+H)^2 \cdot \sin^2 \theta_0}}{D_0} d, \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得到此要求下,整个运动补偿过程中地面分辨率与光线摆角的关系如下:

$$D \equiv D(\theta) = \frac{(R+H) \cos \theta - \sqrt{R^2 - (R+H)^2 \cdot \sin^2 \theta}}{(R+H) \cos \theta_0 - \sqrt{R^2 - (R+H)^2 \cdot \sin^2 \theta_0}} D_0, \quad (8)$$

由式(8)推得,光线摆角为 θ 时的地面分辨率相对光线摆角为 θ_0 时的比值:

$$\frac{D(\theta)}{D_0} = \frac{(R+H) \cos \theta - \sqrt{R^2 - (R+H)^2 \cdot \sin^2 \theta}}{(R+H) \cos \theta_0 - \sqrt{R^2 - (R+H)^2 \cdot \sin^2 \theta_0}} D_0, \quad (9)$$

设所用探测器像元尺寸 $d = 20 \mu\text{m}$,飞行轨道高度 $H = 600 \text{ km}$,地球半径 R 取 $6\,378.137 \text{ km}$,光线摆角 $|\theta| \leq 30^\circ$,以星下点、最大摆角、中值为 30 m ,利用式(7),求得 f_0 分别为 400 、 470 和 435 mm 。由式(9)求得此时 $D(\theta)/D_0 \sim \theta$ 关系曲线,如图3所示。

由图3可见,当以星下点为依据时,在 $|\theta| \leq 15^\circ$ 范围内, $1 \leq D(\theta)/D_0 \leq 1.04$; 在 $15^\circ \leq |\theta| \leq 30^\circ$

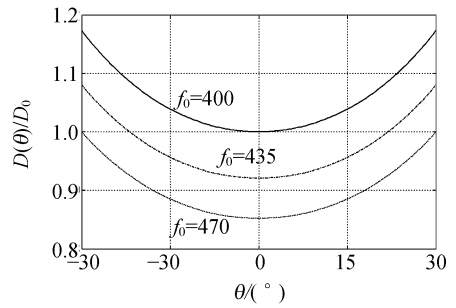


图3 望远系统焦距分别为 400 、 435 和 470 mm 时,地面分辨率相对比值与光线摆角的关系

Fig. 3 Relation between relative ratio of ground resolution and beam deflexion angle

时, $1.04 \leq D(\theta)/D_0 \leq 1.18$ 。

当以最大摆角为依据时,在 $|\theta| \leq 15^\circ$ 范围内, $0.85 \leq D(\theta)/D_0 \leq 0.89$; 在 $15^\circ \leq |\theta| \leq 30^\circ$ 时, $0.89 \leq D(\theta)/D_0 \leq 1$ 。

当以整个运动补偿段地面分辨率中值为依据时,在 $|\theta| \leq 21.9^\circ$ 时, $0.92 \leq D(\theta)/D_0 \leq 1$; 在 $21.9^\circ \leq |\theta| \leq 30^\circ$ 时, $1 \leq D(\theta)/D_0 \leq 1.08$ 。

4 指向反射镜反扫角速度

根据万有引力定律,可知卫星的运动速度:

$$v_0 = \sqrt{G \cdot M / (R+H)}, \quad (10)$$

式中, G 为万有引力常数, M 为地球质量。

成像光谱仪星下点速度:

$$v = v_0 \cdot R / (R+h), \quad (11)$$

当不采用运动补偿时,探测器像元积分时间为:

$$t = \frac{D}{v} = \frac{D}{R \cdot v_0 / (R+h)} = \frac{D(R+h)}{R \cdot v_0}, \quad (12)$$

假设采用运动补偿增加探测器积分时间 N 倍,成像光谱仪指向反射镜的反扫^[8]角速度 ω 。

由图1可知, $A_0A_t = v_0 \cdot t$, $S_0S_t = vt$,若积分时间增大为 N 倍,则 $S_0S_t = N \cdot B_0B_t$, $\beta_0 = \beta_t / N$ 。又因为 $\beta_t = v_0 \cdot t / (R+h)$,则: $\beta_0 = v_0 \cdot t / [N(R+h)]$ 。在三角形 A_0B_0O 和三角形 A_tOB_t 中分别应用正弦定理,得

$$\frac{\sin(\pi - \theta_0 - \alpha_0)}{R+h} = \frac{\sin \theta_0}{R}, \quad (13)$$

$$\frac{\sin(\pi - \theta_t - \alpha_t)}{R+h} = \frac{\sin \theta_t}{R}, \quad (14)$$

解得:

$$\alpha_t = \beta_1 - \beta_0 - \alpha_0 = \left(1 - \frac{1}{N}\right) \cdot \frac{v_0 t}{R+h} - \left[\arcsin\left(\frac{R+h}{R} \sin \theta_0\right) - \theta_0 \right], \quad (15)$$

$$\frac{d\theta_t}{dt} = \frac{\frac{R+h}{R} \cos \alpha_t - 1}{1 - 2\left(\frac{R+h}{R}\right) \cos \alpha_t + \left(\frac{R+h}{R}\right)^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right) \cdot \frac{v_0}{R+h}, \quad (16)$$

$$\omega = \frac{1}{2} \cdot \frac{d\theta_t}{dt} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{N}\right) \frac{v_0}{R+h} \cdot \frac{\frac{R+h}{R} \cos \left[\left(1 - \frac{1}{N}\right) \frac{v_0 t}{R+h} - \arcsin\left(\frac{R+h}{R} \sin \theta_0\right) + \theta_0 \right] - 1}{1 + \left(\frac{R+h}{R}\right)^2 - 2\left(\frac{R+h}{R}\right) \cos \left[\left(1 - \frac{1}{N}\right) \frac{v_0 t}{R+h} - \arcsin\left(\frac{R+h}{R} \sin \theta_0\right) + \theta_0 \right]}, \quad (17)$$

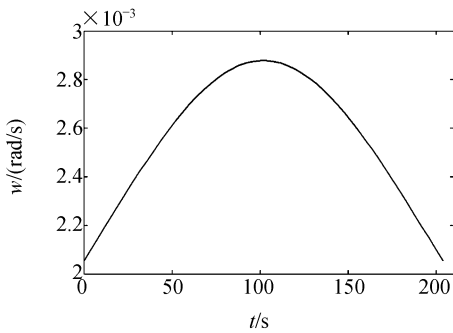


图 4 积分时间增大为 2 倍时,一次运动补偿的时间和指向反射镜反扫角速度的关系曲线

Fig. 4 Relation between integral time and anti-scanning angular velocity of pointing mirror for one motion compensation, when integral time is added to 2 times

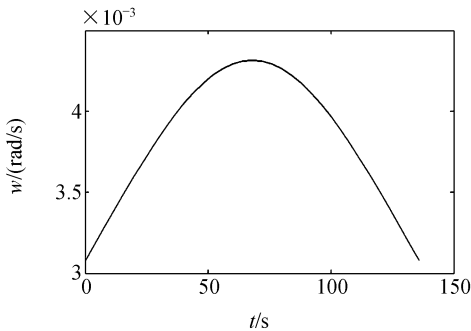


图 5 积分时间增大为 4 倍时,一次运动补偿时间和指向反射镜反扫角速度的关系曲线

Fig. 5 Relation between integral time and anti-scanning angular velocity of pointing mirror for one motion compensation, when integral time is added to 4 times

由式(17)可见,指向反射镜的反扫角速度 ω 是卫星运动速度 v_0 、飞行轨道高度 H 、对目标进行凝视测量时光线的提前摆角 θ_0 、飞行时间 t 及地球半径 R 的函数。改变指向反射镜反扫的角速度,可使积分时间增大 N 倍。图 4、5 分别为积分时间分别增大为 2 倍和 4 倍时一次运动补偿的时间与指向反射镜反扫角速度的关系曲线。

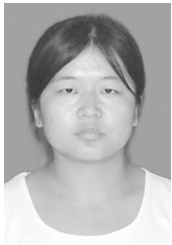
5 结 论

运动补偿成像光谱仪的地面分辨率与指向镜转角相关,转角大地面分辨率低,反之亦然。当以星下点地面分辨率为准选择望远系统焦距时,所需望远系统的焦距最短,但是,地面分辨率仅在星下点附近区域能够满足应用需求。当以最大摆角地面分辨率为准选择望远系统焦距时,虽然地面分辨率在整个运动补偿段都能够满足应用需求,但是,所需望远系统的焦距最长。如果以运动补偿段地面分辨率中值为准选择望远系统焦距,那么,望远系统的焦距适中,并且,地面分辨率在整个运动补偿段都能较好地满足应用需求。因此,在综合考虑地面分辨率的应用需求、系统的体积和重量等因素后,可以取整个运动补偿段中地面像元分辨率中值为准来确定成像光谱仪望远系统的焦距。对于积分时间一定的情况,推导出了运动补偿成像光谱仪指向反射镜的反扫角速度公式。

参考文献:

- [1] AGOETZ A F H, SOLOMON G V J, ROCK B N. Imaging spectrometry for earth remote sensing [J]. *Science*, 1985, 228: 1147-1153.
- [2] 李幼平, 禹秉熙, 韩昌元, 等. 成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 974-979.
LI Y P, YU B X, HAN CH Y, *et al.*. Tradeoff optimization design of optical configuration on imaging spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 974-979. (in Chinese)
- [3] KERKES J P, LANDGREBE D A. Parameter trade-offs for imaging spectroscopy systems [J]. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 1991(29): 57-65.
- [4] 李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度[J]. *光学精密工程*, 2006, 15(1): 112-116.
LI Y P, YU B X, WANG Y P, *et al.*. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 15(1): 112-116. (in Chinese)
- [5] DAVIS C O, CARDER K. Requirements driven design of an imaging spectrometer system for characterization of the coastal environment [J]. *SPIE*, 1997, 3118: 322-327.
- [6] PEARLMAN J, SEGAL C, LIAO L. Development and operations of the EO-1 hyperion imaging spectrometer [J]. *SPIE*, 2004, 4135: 243-253.
- [7] CUTTE M A, LOBB D R, WILLIAMS T L, *et al.*. Intergration and testing of the compact high-resolution imaging spectrometer (CHRIS) [J]. *SPIE*, 1999, 3753: 180-191.
- [8] 吴宏圣, 潘凝, 翟林培. TDI CCD全景式航空相机的像移补偿误差分析[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(6): 545-549.
WU H SH, PAN N, ZHAI L P. Image motion compensation error analysis for TDI CCD panoramic aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 545-549. (in Chinese)

作者简介:



李欢(1979—),女,吉林长春人,博士研究生,主要从事成像光谱仪光学系统设计方面的研究。E-mail: cclhuan@126.com



冯玉涛(1980—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事成像光谱仪方面的研究。E-mail: fytciom@126.com

导师简介:



向阳(1963—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事成像光谱遥感方面的研究。E-mail: xiangy@sklao.ac.cn