

星载成像光谱仪运动补偿数学模型的建立与计算实现

汪逸群 颜昌翔

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 为了降低星载成像光谱仪对探测器帧频的要求,提高成像光谱仪对某些特定暗目标的观测能力,建立了星载成像光谱仪运动补偿数学模型并提出了工程计算实现方法。介绍了成像光谱仪运动补偿原理,然后按成像光谱仪像面上像移为匀速度补偿的方式建立运动补偿数学模型,给出了不同积分倍数下一次成像的最大观测时间和最大观测距离。指出了实现理论运动补偿曲线的最优工程计算方法。

关键词 成像光谱仪; 运动补偿; 数学模型; 工程实现

中图分类号 TP70; TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.121103

Foundation and Computation Realization of Space-Borne Hyperspectral Imager's Motion Compensation Math Model

Wang Yiqun Yan Changxiang

*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China*

Abstract To decrease the frame frequency requirements of space-borne imager and improve the hyperspectral imager's observation ability of a dark object, motion compensation model and its engineering computation realization method are proposed. Firstly, The motion compensation theory of hyperspectral imager is introduced. Furthermore, The motion compensation model according to the uniform speed compensation method on the hyperspectral imager's focal plane is established. The max observation time and interval are also presented in this paper. Finally, the optimized engineering computation method of the mathematical model is indicated.

Key words hyperspectral imager; motion compensation; mathematical model; engineering realization

OCIS codes 110.2960; 280.4788; 120.5800; 120.7280

1 引言

星载成像光谱仪是20世纪80年代在多光谱遥感成像技术的基础上发展起来的新一代光学遥感器。它在军事上能够揭露伪装、判明真假目标,从而开辟了军事侦察的新技术手段;在民用的农、林、水、土、矿等资源调查与环境监测等广泛领域也有重要的应用前景。但由于成像光谱仪将景物像元的信息分成几十乃至上百个光谱通道,从而使得焦平面阵列探测器每个像元所接受到的能量大幅降低,直接导致信噪比严重下降,在高空间分辨率(优于30 m)的条件下成像光谱仪信噪比往往无法满足实际应用需求。要获得更高的信噪比,在系统的光学参数和探测器都确定的情况下,只有通过增加积分时间来实现。在成像光谱仪望远镜前端设置扫描镜进行运动补偿是增加积分时间的有效方法之一,美国的高分辨率成像光谱仪(HIRIS)、彗星核遥感成像光谱仪(CRISP)等均采用了该方法增加积分时间以提高信噪比。这也是当前焦平面器件帧频有限条件下为获得高空间分辨率图像不得不采取的措施^[1-3]。

收稿日期: 2014-04-26; 收到修改稿日期: 2014-07-08; 网络出版日期: 2014-11-14

基金项目: 国家863计划(2011AA12A103)、中国地质调查局工作项目(1212011120227)

作者简介: 汪逸群(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事空间精密扫描机构设计与检测技术、航空航天高光谱成像技术等方面的研究。E-mail: hitwyq@126.com

为了实现地运动补偿,有必要建立相应的数学模型,再根据轨道高度、地面像元分辨率、探测器帧频、补偿倍数等参数计算出成像光谱仪在轨工作条件下的扫描镜角位置-角速度关系曲线,为运动补偿扫描镜的研制奠定理论基础。空间相机像移补偿模型方面的研究已经比较完善^[4-8],但星载成像光谱仪扫描镜对地运动补偿方面的数学模型还未见报道。

根据成像方式成像光谱仪主要分光机扫描式、推帚式和凝视成像式三种。其中光机扫描式成像光谱仪主要适用于低空间分辨率的应用场合,而凝视成像式成像光谱仪在卫星平台上所获取的空间维和光谱维信息不是同时获取的,需要较为复杂的后处理才能得到同一目标物不同波段的信息。推帚式成像光谱仪以固体自扫描方式,使用面阵探测器的一维单元对目标地进行扫描,具有信噪比高的特点,能够同时达到高光谱分辨率和高灵敏度的目的,是目前高空间分辨率星载成像光谱仪的首选方案。本文针对此成像光谱仪开展扫描镜运动补偿研究,以进一步提高推帚式成像光谱仪的空间分辨率和信噪比。

2 基于扫描镜的成像光谱仪运动补偿原理

成像光谱仪对地面目标推扫成像时,由于卫星飞行速度很高,探测器上每个像元接收地面目标辐射的时间(积分时间)很短,当地面目标较暗时,探测器的信噪比很低。例如,在轨道高度 $H=400\text{ km}$,飞行速度 $V=6.878\text{ km/s}$,地面像元分辨率 $\delta=10\text{ m}$ 时,探测器每个像元积分时间只有 1.45 ms ,探测器帧频将高达 687.8 frame/s ,这样高的帧频要求是当前探测器技术水平很难达到的。

为了降低对探测器高帧频的要求,增加仪器对某些特定暗目标的观测能力,可以将扫描镜逆卫星推扫方向旋转,实现对某些特定目标的运动补偿,以增加这些目标在探测器上的积分时间。

扫描镜对地面目标进行运动补偿的原理如图1所示,扫描镜与卫星飞行方向成 45° 放置时成像光谱仪将对星下点进行观测,在卫星平台位于1位置时将扫描镜转动 $\alpha/2$,使瞬时视场光轴沿飞行方向前摆 α 指向星下点 B_1 前方的 D_1 点,然后控制扫描镜按一定规律转动,使光轴逆飞行方向相对卫星平台后摆,到3位置完成一次运动补偿。然后再迅速调整扫描镜,使光轴由 C_1 点指向 B_2 点,进行下一次运动补偿。若平台由1位置飞行到3位置对应的星下点距离为 $A_1B_1=nL$,对应的地面观测距离 $C_1D_1=L$,则相对不作运动补偿情况,探测器对目标区域 C_1D_1 的积分时间增大为 n 倍。

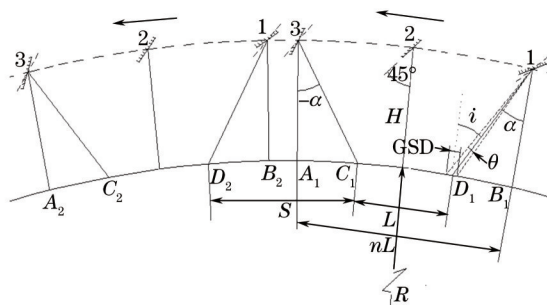


图1 扫描镜运动补偿原理示意图

Fig.1 Motion compensation theory sketch of scanning mirror

采用运动补偿技术可以增加地面目标在探测器上的积分时间,但同时减少了对地面目标的观测范围。探测器像元积分时间增加 n 倍,地面目标观测范围将减少。同时考虑到下一次运动补偿前,须将扫描镜沿飞行方向快速返回,这期间须中断的一些观测距离即为观测盲区。

3 成像光谱仪运动补偿数学模型的建立

3.1 无侧视条件下的扫描镜角速度控制表达式

按成像光谱仪像面上像移为匀速度补偿的方式来建立数学模型,其原理是利用望远镜前方的扫描镜相对地物运动作向后摆扫运动,以降低地物相对成像光谱仪的运动速度,使地物像在焦面上的运动速度为匀速运动,该匀速运动的速度值恒定为成像仪无扫描镜运动对星下点成像时像运动的 $1/n$, n 即为积分的倍数,称为 n 倍补偿。

在卫星无侧视机动的条件下,星载成像光谱仪像面上像移为匀速度方式的运动补偿如图2所示。

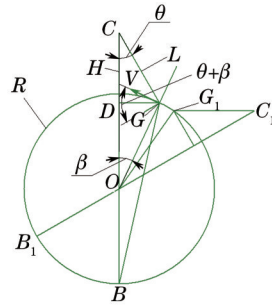


图2 像面上像移为匀速度方式的运动补偿示意图

Fig.2 Motion compensation theory of uniform speed image motion on image plane

像移速度计算公式为:

$$V_p = \left[\frac{V \cos(\theta + \beta)}{L} - \omega \right] f, \quad (1)$$

式中 θ 为主光线与星地连线的夹角, ω 为主光线的旋转角速度, V 为地物相对成像仪的运动速度, L 为地物点到成像仪主点的距离, β 为地心地物连线和星地连线的夹角, f 为成像仪焦距。

星下点时, 无像移速度为:

$$V_{p0} = \frac{V}{H} f, \quad (2)$$

式中 H 为星体的真高度。

运动补偿后要使:

$$V_p = \frac{V_{p0}}{n}. \quad (3)$$

根据(1)式和(3)式可得出:

$$\omega = \left[\frac{\cos(\theta + \beta)}{L} - \frac{1}{nH} \right] V, \quad (4)$$

由图2有:

$$(L \sin \theta)^2 = (L \cos \theta - H)[2R - (L \cos \theta - H)], \quad (5)$$

式中 R 为地球半径。得出:

$$L = (R + H) \cos \theta - \left\{ [(R + H) \cos \theta]^2 - H^2 - 2HR \right\}^{1/2}, \quad (6)$$

另由余弦定理, $\triangle OCG$ 中:

$$\cos(\pi - \theta - \beta) = \frac{R^2 + L^2 - (H + R)^2}{2RL}, \quad (7)$$

可得:

$$\cos(\theta + \beta) = \frac{(H + R)^2 - R^2 - L^2}{2RL}, \quad (8)$$

将(8)式代入(4)式得:

$$\omega = \left\{ \frac{(H + 2R)H}{2R \left[(R + H) \cos \theta - \left\{ [(R + H) \cos \theta]^2 - H^2 - 2HR \right\}^{1/2} \right]^2} - \frac{1}{2R} - \frac{1}{nH} \right\} V. \quad (9)$$

由(9)式可以看出, 要控制的角速度目标值与指向角度 θ 、运动补偿倍数 n 和地物相对速度 V 有关, 而与时间无关。

3.2 无侧视条件下的成像时间和覆盖地面长度

根据(9)式, 令等号右边为 $\omega(\theta)$, 左边可记为 $\frac{d\theta}{dt}$, (9)式可改写为:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega(\theta), \quad (10)$$

改写为:

$$\frac{d\theta}{\omega(\theta)} = dt, \quad (11)$$

两边积分,得到:

$$t = \int_0^\theta \frac{d\theta}{\omega(\theta)}. \quad (12)$$

(12)式假定了时间从角度为0开始算起到 θ 为止,但此式对于小于0的时间也是适用的。

假定下列各条件:

$R = 6374 \text{ km}$, $H = 400 \text{ km}$, θ 范围为 $[-\frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{6}]$, $n \in [3, 8]$, 轨道倾角 i_0 为 43° , 可以估计地物相对运动速度:

$V = 6.878 \text{ km/s}$ 。

下面计算起止角度范围内,被观测地面的距离由图2可得:

$$dS = \left[V dt - \frac{L \cdot \omega}{\cos(\theta + \beta)} dt \right]. \quad (13)$$

将(11)式代入(13)式得:

$$dS = \left[\frac{V}{\omega} - \frac{L}{\cos(\theta + \beta)} \right] d\theta. \quad (14)$$

将(8)式代入(14)式:

$$dS = \left\{ \frac{V}{\omega(\theta)} - \frac{2R}{[(H+R)^2 - R^2]/L^2 - 1} \right\} d\theta. \quad (15)$$

两边从0开始积分:

$$S = \int_0^\theta \frac{V}{\omega(\theta)} d\theta - \int_0^\theta \frac{2RL^2}{(H+R)^2 - R^2 - L^2} d\theta. \quad (16)$$

据(12)式得到:

$$S = V \cdot t - \int_0^\theta \frac{2RL^2}{(H+R)^2 - R^2 - L^2} d\theta. \quad (17)$$

将(4)式代入(13)式得到:

$$dS = \left\{ V dt - \frac{L \cdot \{\cos(\theta + \beta)/L - (1/nH)\} V}{\cos(\theta + \beta)} dt \right\} = \left\{ V dt - \left[V - \frac{LV}{nH \cos(\theta + \beta)} \right] dt \right\} = \frac{LV dt}{nH \cos(\theta + \beta)}. \quad (18)$$

代入(4)和(8)式,得到:

$$dS = \frac{2RL^2 V}{nH [(H+R)^2 - R^2 - L^2] \omega(\theta)} d\theta. \quad (19)$$

根据图2,被观测段距离为 GG_1 之间的弧长,计算式为:

$$S = \int_0^\theta \frac{2RL^2 V}{nH [(H+R)^2 - R^2 - L^2] \omega(\theta)} d\theta. \quad (20)$$

根据(12)式和(13)式及上述诸条件,计算结果如表1所示。

表1 无侧视条件下,不同积分倍数下一次成像最大观测时间和最大观测距离

Table 1 Maximal observation time and distance once of different integral multiples without side-glance

Multiple	3	4	5	6	7	8
Time /s	78.286	68.329	63.504	60.654	58.772	57.437
Observation distance /km	197.56	129.08	95.893	76.292	63.349	54.163

4 运动补偿控制曲线的计算及控制方案

由于卫星飞行姿态参数变化、扫描镜指向角度变化等,导致扫描镜补偿运动是一个非常复杂的运动过程,其函数表达式非常复杂。这里考虑理想卫星姿态条件下,扫描镜运动补偿角速度与指向角的关系可由(9)式表示,如图3所示。

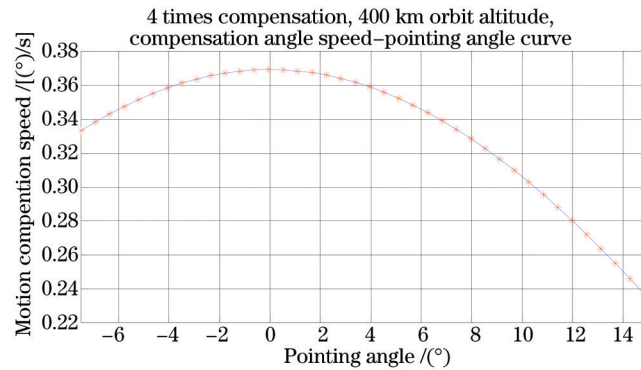


图3 扫描镜运动补偿角速度-角位置曲线

Fig.3 Motion compensation theory of pointing mirror

对图3中的运动补偿曲线进行二次曲线拟合,可得:

$$f(x) = p_1 \times x^2 + p_2 \times x + p_3, \quad (21)$$

式中 $f(x)$ 为扫描镜运动补偿角速度; x 为扫描镜角位置。

按 95% 的置信区间拟合,则:

$$p_1 = -0.000607 \quad (-0.0006143, -0.0005997),$$

$$p_2 = -2.004 \times 10^{-5} \quad (-8.975 \times 10^{-5}, 4.967 \times 10^{-5}),$$

$$p_3 = 0.3685 \quad (0.3681, 0.3689).$$

可以看出,复杂的曲线可以近似用二次曲线拟合,其最大相对误差不超过 1.2%,大部分在 0.4% 以下。

还可以考虑用直线段近似逼近曲线。分为五段: $[-7.5 -2.5]$, $[-2.5 2.5]$, $[2.5 7.5]$, $[7.5 11.5]$, $[11.5 15]$, 经过拟合,结果如图5所示。相对误差最大处为 0.7%。

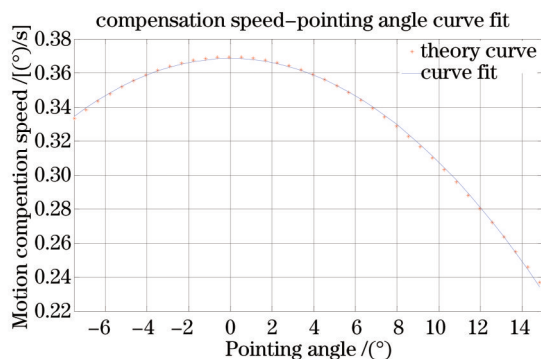


图4 扫描镜运动补偿角速度与指向角关系二次曲线拟合

Fig.4 Motion compensation angle speed and pointing angle quadratic curve fit of scanning mirror

通过以上分析,可以证明在理想姿态条件下,可以采用三种方法来实现补偿运动曲线:

a) 直接计算

综合采用各种参数计算,这种方法最精确,但需要一定的时间。如果时间足够短,采用此方法不影响控制精度。计算完毕后,以指令形式控制指向镜运动。

通过计算估计,若按不同间隔更新速度值,误差如表2所示。

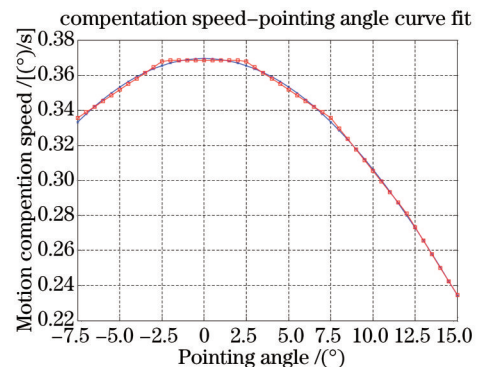


图5 补偿角速度与指向角关系多线段曲线拟合

Fig.5 Polyline curve fit of compensation angle speed and pointing angle

表2 400 km 高度、4倍补偿按不同间隔更新速度值误差表

Table 2 Error value table of different updating time intervals with 400 km altitude and 4 multiple compensation

Updating time interval/s	Maximal single error/($''$)	Maximal accumulative total positive error /($''$)	Maximal accumulative total negative error /($''$)	Total error /($''$)
0.1	-0.0813	5.8780	-23.0797	-17.2017
0.2	-0.3133	11.9108	-46.9474	-35.0366
0.5	-1.9085	30.1566	-118.1553	-87.9987
1.0	-6.4716	61.0059	-235.5650	-174.5591

b) 二次曲线计算

这种方法可以节约计算时间,通过简化近似的方法,综合其他参数,便于控制的实现。缺点是有一定的模型误差。

c) 直线段插值计算

这种方法只有匀加速、匀速和匀减速三种运动方式,比较利于控制,同时其估计误差小于第二种方法,而且得到估计值时间也短。

5 结 论

根据像面像移匀速补偿的方式建立了星载成像光谱仪运动补偿数学模型,确定了运动补偿扫描镜的运动曲线,讨论了实现该运动曲线的方法,并做出了比较。从简化控制的角度考虑,采用直线段插值的方法较利于控制系统执行机构部分的独立性且能保证较好的精度。

参 考 文 献

- 1 Feng Yutao, Xiang Yang, Chen Xu. The characteristics of spectral radiance measured by imaging spectrometer with motion compensation[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(2): 107-111.
冯玉涛, 向阳, 陈旭. 运动补偿下短波红外成像光谱仪的信噪比特性[J]. *红外技术*, 2009, 31(2): 107-111.
- 2 J W Warren, K J Heffernan, S J Conard, *et al.*. The contour remote imager and spectrometer (CRISP)[C]. *SPIE*, 2004, 5163: 84-98.
- 3 J Warren, K Strohbehn, S Murchie, *et al.*. Selected configuration tradeoffs of contour optical instrument[J]. *Acta Astronautica*, 2003, 52(2): 111-116.
- 4 Wu Xingxing, Liu Jinguo, Zhou Huaide, Image motion compensation of space camera with large field of view using earth ellipsoid[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0528001.
武星星, 刘金国, 周怀得. 应用地球椭球大视场空间相机像移补偿[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0528001.
- 5 Zhang Shuqing, Li Tao. Analysis on different rates image motion of space camera with a scanning mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0228006.
张树青, 李韬. 含扫描反射镜的星载相机异速像移分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0228006.
- 6 Wang Chong, You Zheng, Xing Fei, *et al.*. Image motion velocity field for wide view remote sensing camera and detectors exposure integration control[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0511002.
王翀, 尤政, 邢飞, 等. 大视场空间遥感相机的像速场及图像传感器曝光积分控制[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0511002.
- 7 Liu Haiqiu, Xu Shuyan, Wang Dong, *et al.*. Space camera image motion measurement based on images from time delayed integration sensors overlapped area[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0511002.
刘海秋, 徐抒岩, 王栋, 等. 基于空间相机时间延迟积分传感器拼接区图像的像移测量[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0511002.
- 8 Qian Yixian, Hong Xueting, Jin Weimin. Motion measurement of dual-CCD imaging system based on optical correlator [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0708002.
钱义先, 洪雪婷, 金伟民. 光学相关的双CCD成像系统图像运动位移测量[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0708002.