

# 基于摆扫反射镜的大视场成像像移模型

苗壮<sup>1,2</sup>, 何斌<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为实现大视场技术指标, 建立了一种基于摆镜转动的摆扫成像模型; 通过对摆扫成像与推扫成像模式的比较, 分析得出当横滚角等于摆镜转角的 2 倍时, 摆扫成像能够实现与推扫成像小姿态时相同的视场; 经过实验验证, 在横滚角为 2°、4°、6°、8°、10° 时, 文章的方法与推扫成像模型像移相对误差在 1% 以内, 偏流角大小相对误差在 0.001% 以内, 两种方法保持了较好的一致性, 保证了模型的合理性与正确性; 此外, 该模型还可以通过实时地控制摆镜的转动来实现穿航方向上的对地的扫描成像, 进而实现大视场、宽幅盖对地成像, 减小回访周期, 提高空间相机对地成像的工作效率。

**关键词:** 大视场; 摆扫成像; 推扫成像

## Image Motion Model of Large Field of View Imaging Based on Swing Mirror

Miao Zhuang<sup>1,2</sup>, He Bin<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To achieve the large field of view, it establishes the whiskbroom imaging model based on the rotating mirror. Comparing the whiskbroom and pushbroom models, it finds that when the roll angle is two times of the angle of the swing mirror, the pushbroom and whiskbroom has the same field of view. Through the experimental verification, at the small angle attitude 2°, 4°, 6°, 8°, 10°, the relative error of this model is within 1% and relative error of drift angle is within 0.001% of the pushbroom imaging model. Two ways have good consistency, ensuring the rationality and accuracy of the model. Besides, the model can scan imaging across the navigation direction by controlling the rotation of the swing mirror in real time to realize large field of view, wide swath of imaging, reducing the return period and improving the working efficiency of the space camera.

**Keywords:** large field of view; whiskbroom imaging; pushbroom imaging

## 0 引言

随着空间相机的发展, 其对地成像的需求不断增加, 大视场空间相机已成为遥感领域研究的重点和热点。增大视场可以获得高质量宽幅盖的地面图像, 减小相机的回访周期, 大大提高空间相机的工作效率<sup>[1]</sup>, 而增大视场通常会使得遥感器质量和体积的增加, 导致成本的巨额增长。如何在获得大视场指标的同时兼有轻小型化结构是当下空间相机设计权衡的指标<sup>[2-3]</sup>。国内方面, 有人提出侧摆成像<sup>[4]</sup>以实现对地扫描的大视场成像, 但现有的技术表明, 在轨运行的空间相机还只能进行小角度的侧摆和俯仰, 达不到所谓的大视场成像的技术指标。同时高分辨率空间相机与姿态角的配合度也很低, 大大降低了相机成像灵敏度, 而且相机的机动成像过程控制起来比较困难。因此, 本文提出一种基于摆镜转动的摆扫成像方式来代替推扫成像, 以实现对地成像过程的大视场成像。

空间相机对地成像过程中, 卫星平台的轨道运动、姿态变化、摆扫反射镜的摆动以及地球自转运动, 形成相机像面的像移速度矢量。为了保持空间相机像面与地物相对静止, 需要进行像移匹配。早在 2000 年, 王家骥等人就对像移相关问题进行了研究, 基于坐标变换理论建立了星下点像移速度矢量模型, 并成为国内像移速度模型经典解法<sup>[5]</sup>; 2009 年仲惟超等人针对卫星姿态建立了基于矢量的像移模型, 该模型不但适用于星下点成像, 还可用于侧摆和俯仰同时存在时的像移分析, 但是只适用于侧摆和俯仰在小角度变化时的情况<sup>[6]</sup>; 2013 年, 张媛等人基于 45° 反射镜建立的侧摆成像像移速度模型, 实现对卫星当前轨道所在地面投影区域的某一侧进行推扫, 增大了视场的探测角度, 但是并未实现对地投影过程中将星下点与投影区域的两侧同时扫描成像, 增加了相机的回访周期<sup>[4]</sup>; 2014 年杨飞等人提出了一种光线追迹摆扫成像像移模型, 但该模型适用于通过整机的滚动来实现对地摆扫成像, 相比于摆镜转动成像, 其控制过程更加的困难与复杂<sup>[7]</sup>。本文在坐标变换的基础上用矩阵分析方法, 结合摆镜旋转矩阵建立摆扫成像像移匹配模型, 该模型能够实现相机沿着轨道飞行的过程中, 通过摆镜的实时转动, 实现大视场、宽幅盖对地成像。

## 1 空间 TDICCD 相机摆扫成像模式

空间相机对地摆扫成像<sup>[8]</sup>模式如图 1 所示, 光轴经过摆镜

收稿日期: 2015-08-24; 修回日期: 2015-09-16。

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (863-2-5-1-13B)。

作者简介: 苗壮 (1990-), 男, 吉林桦甸人, 硕士研究生, 主要从事遥感成像方向的研究。

何斌 (1961-), 男, 吉林长春市人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学遥感相机 CCD 成像驱动电路设计方向的研究。

反射后指向地面景物点, 通过摆镜的转动, 光轴对地指向发生变化, 以此实现对地成像过程中的大视场扫描成像。

由光学反射定律知, 入射光线不变, 反射镜转动  $\xi$ , 则出射光线转过  $2\xi$ 。

如图 1, 当摆镜转过  $\omega_x t$ , 光轴对地指向改变  $2\omega_x t$ ; 推扫成像<sup>[9]</sup>过程中, 通过改变卫星的姿态角, 实现对星下点的某侧进行扫描成像。当相机绕着横滚轴转动  $\varphi$  时, 光轴由原先指向星下点的位置转动了  $\varphi$ , 实现侧摆成像。从图 1 和图 2 比较可知, 当相机的横滚角  $\varphi$  等于摆镜的转角 2 倍, 即  $2\omega_x t$  时, 光轴改变的角度相等, 即可以通过改变摆镜转动的角度来实现和相机的机动成像的等效视场效果。

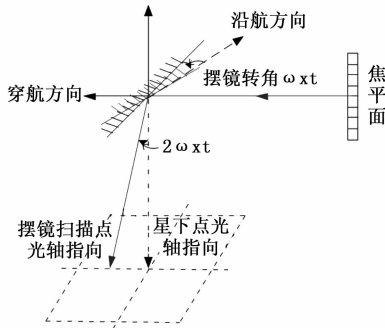


图 1 摆扫成像示意图

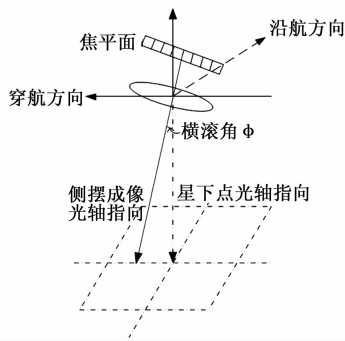


图 2 推扫成像示意图

## 2 摆扫成像像移速度矢量推导

根据摆扫成像的工作方式, 利用齐次坐标变换<sup>[5]</sup>计算地面景物到相面的坐标变换。如图 3 所示, 其中的各坐标系定义如下 (均采用右手坐标系):

景物地理坐标系  $G (G_1, G_2, G_3)$ :  $G$  系原点为光轴指向的地面景物点,  $G_3$  轴的指向为光轴指向相机方向,  $G_1$  轴与卫星轨道前进方向相同;

光轴景物地心坐标系  $K (K_1, K_2, K_3)$ : 其原点与地心重合,  $K_3$  轴指向相机光轴指向的景物点,  $K_1$  轴与过  $K_3$  轴垂直于轨道面的平面相垂直, 指向卫星轨道前进方向。将  $G$  系绕着  $G_1$  轴旋转摆镜转角以及地心角后, 再沿着  $G_3$  轴平移  $-R$ , 得到光轴景物坐标系;

地心惯性坐标系  $I (I_1, I_2, I_3)$ : 原点与地心重合,  $I_2$  轴指向地球北极,  $I_3$  轴指向卫星的轨道平面与赤道的降交点;

地球坐标系  $E (E_1, E_2, E_3)$ : 坐标系固连于地球, 原点

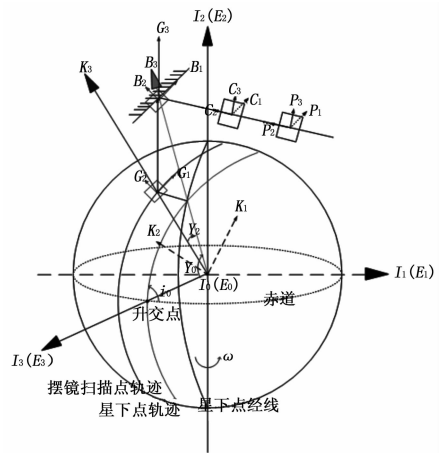


图 3 坐标变换示意图

与  $I$  系的原点重合,  $E_2$  指向北极, 地球坐标系在  $I$  系内逆时针方向以角速度  $\omega$  绕  $E_2$  轴转动;

卫星轨道坐标系  $B (B_1, B_2, B_3)$ : 原点在轨道上,  $B_1$  轴指向轨道切向,  $B_3$  轴指向天顶,  $B_2$  与轨道面垂直,  $B$  系在  $I$  系内, 沿着飞行轨道以角速度  $\Omega$  进行轨道运动;

卫星坐标系  $S (S_1, S_2, S_3)$ : 该坐标系原点与轨道坐标系原点重合, 卫星无姿态时两个坐标系重合, 卫星的三轴姿态  $\varphi, \theta, \psi$  是指  $S$  系在  $B$  系中的三轴姿态, 欧拉姿态角序为 123;

摆镜坐标系  $M (M_1, M_2, M_3)$ : 初始时刻, 卫星坐标系绕着  $S_1$  旋转  $45^\circ$  (为便于计算, 将初始时刻设为  $45^\circ$ ), 即为摆镜初始坐标系。摆镜扫描时, 摆镜坐标系绕着  $M_1$  以角速度  $\omega_x$  进行摆动;

相机坐标系  $C (C_1, C_2, C_3)$ : 相机物镜的主点为该坐标系的原点, 当相机在卫星内无安装误差或者很小时, 相机与卫星坐标系可以认为是重合的, 比例尺缩小  $f/L$  倍;

像面坐标系  $P (P_1, P_2, P_3)$ : 坐标系原点在像面中心,  $C$  系沿  $C_2$  轴平移  $f$ ,  $P_1, P_3$  与  $C_1, C_3$  反向后即得到  $P$  系,  $P_1, P_3$  组成像面。

由坐标系的定义知, 地面景物坐标系到像面坐标的变换关系如下:

$$G \xrightarrow{\begin{matrix} R1[2\omega_x t + \gamma_2] \\ T3[-R] \end{matrix}} K \xrightarrow{\begin{matrix} R1[-\gamma_2] \\ R1[-\gamma_0] \\ R1[-i_0] \end{matrix}} E \xrightarrow{\begin{matrix} R2[-\omega_x t] \\ R2[\gamma_0 + \Omega t] \\ T3[H_0] \end{matrix}} I \xrightarrow{\begin{matrix} R3[i_0] \\ R2[-] \\ R3[\theta] \end{matrix}} B \xrightarrow{\begin{matrix} R1[\phi] \\ R2[-] \\ R3[\theta] \end{matrix}} S$$

$$S \xrightarrow{\begin{matrix} R1[\pi/4] \\ R1[\pi t] \end{matrix}} M \xrightarrow{\begin{matrix} \text{Matrix } R \\ R1[-\omega_x t] \\ R1[-\pi/4] \end{matrix}} S \xrightarrow{S[f/L]} C \xrightarrow{T2[-f]} P$$

图 4 坐标变换过程示意图

(其中:  $X \rightarrow Y$  的坐标系变换过程中,  $R_i [\epsilon]$  表示绕着  $X_i$  旋转  $\epsilon$ ,  $T_i [\rho]$  表示沿着  $X_i$  轴平移  $\rho$ ,  $S_i [\delta]$  表示缩放  $\delta$ )。由此可得目标点坐标到像点坐标的变换关系如式 (1) 所示:

$$\begin{aligned}
 P = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f/L_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f/L_0 & 0 & -f \\ 0 & 0 & -f/L_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot M \cdot \\
 &\begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & H_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\gamma_0 + \Omega t) & 0 & -\sin(\gamma_0 + \Omega t) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\gamma_0 + \Omega t) & 0 & \cos(\gamma_0 + \Omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\begin{bmatrix} \cos(i_0) & \sin(i_0) & 0 & 0 \\ -\sin(i_0) & \cos(i_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & 0 & \sin(\omega t) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\omega t) & 0 & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\begin{bmatrix} \cos(i_0) & -\sin(i_0) & 0 & 0 \\ \sin(i_0) & \cos(i_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\begin{bmatrix} \cos(\gamma_0) & 0 & \sin(\gamma_0) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\gamma_0) & 0 & \cos(\gamma_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot K \cdot \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中：

$$\gamma_2 = \arcsin(L_0 \sin(-2\omega_x t)/R)$$

$$L_0 = H_0 \cos(2\omega_x t) - \sqrt{R^2 - H_0^2 \cos^2(2\omega_x t) - H_0^2 + R^2}$$

$K$  为地坐标系到地心惯性坐标系的变换矩阵：

$$\begin{aligned}
 K = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma_2) & \sin(\gamma_2) & 0 \\ 0 & -\sin(\gamma_2) & \cos(\gamma_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\omega_x t + \gamma_2) & -\sin(2\omega_x t + \gamma_2) & 0 \\ 0 & \sin(2\omega_x t + \gamma_2) & \cos(2\omega_x t + \gamma_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$M$  为摆镜扫描矩阵。摆扫成像过程：景物首先经过光学系统，然后经过扫描变换矩阵进入扫描镜动坐标系，由反射镜矩阵进行反射，再由扫描变换矩阵的逆矩阵转换到静坐标系中，获得出射矢量，由光学反射矢量<sup>[10]</sup>以及摆镜坐标系的定义知，摆镜初始时刻法线矢量为：

$$\vec{N} = 0\vec{i} - \frac{\sqrt{2}}{2}\vec{j} - \frac{\sqrt{2}}{2}\vec{k}$$

反射镜矩阵为：

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

所以摆镜旋转矩阵为：

$$\begin{aligned}
 M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega_x t) & -\sin(\omega_x t) & 0 \\ 0 & \sin(\omega_x t) & \cos(\omega_x t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega_x t) & \sin(\omega_x t) & 0 \\ 0 & -\sin(\omega_x t) & \cos(\omega_x t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

像面位置方程

$$P = \sqrt{P_1^2 + P_3^2} \quad (2)$$

将式 (1) 两边对时间  $t$  微分后，求出  $t=0$  的值，即可得到像面上各点的像移速度方程：

$$V_P = \left. \frac{dP}{dt} \right|_{t=0} = \begin{bmatrix} dP_1/dt \\ dP_2/dt \\ dP_3/dt \\ 0 \end{bmatrix}_{t=0} = \begin{bmatrix} V_{P_1} \\ V_{P_2} \\ V_{P_3} \\ 0 \end{bmatrix}_{t=0}$$

式中， $V_{P_1}, V_{P_3}$  分别为相机像面的前向像移速度和横向像移速度，其合速度（像移速度矢量模值）为：

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2} \quad (3)$$

偏流角（像移速度方向）为：

$$\beta = \frac{V_{P_3}}{V_{P_1}} = \frac{P_3}{P_1} \quad (4)$$

### 3 实验结果与分析

由式 (1) 知，当横滚角度  $\varphi=2\omega_x t=0^\circ$  时，该模型即为星下点成像像移模型，只是由于摆扫反射镜的存在，横向像移由  $P_2$  变为  $P_3$ ，前向像移仍为  $P_1$ 。为进一步验证本文建立的摆扫成像模型的合理性与可靠性，参考 XX 型号空间相机成像参数，将其带入到该模型中进行仿真并与推扫成像模型（小姿态侧摆成像）所得试验结果进行对比。

设定相机在轨参数如下：轨道倾角  $i_0=100.5^\circ$ ，相机焦距 2 m，轨道高度 1 200 km，卫星下行，摆镜转角分别为  $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ$ ，即侧摆成像<sup>[11]</sup>时横滚角度为  $2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$  时，计算出焦平面的像移位置以及偏流角。当摆扫成像时，摆镜转角改变，但此时的横滚角度设置为  $0^\circ$ 。通过实验可得表 1、图 6 和图 7，其中表 1 为不同摆动摆镜转角下的像面位置以及偏流角，图 6 和图 7 分别为不同摆镜转角下的摆扫成像模型与推扫成像模型的像面位置以及偏流角大小的比较。

由表 1 可知，摆镜的转角只对穿航方向的像移产生影响，随着转角的增加，穿航方向的分量增大，而沿航方向无变化，这与侧摆成像过程中的变化一致，即摆镜转角/横滚角只对穿航方向的像移产生影响而对沿航方向的像移没有影响。

表 1 不同摆动摆镜转角/横滚角下的像面位置以及偏流角

摆镜转角 $\omega_x t / (^{\circ})$	摆扫成像				横滚角度 $\varphi / (^{\circ})$	侧摆成像			
	$P_1 / \text{mm}$	$P_3 / \text{mm}$	$P / \text{mm}$	$\beta / (^{\circ})$		$P_1 / \text{mm}$	$P_2 / \text{mm}$	$P / \text{mm}$	$\beta / (^{\circ})$
2	0.245 67	138.1	138.1	-4.191 0	2	0.245 67	139.7	139.7	4.190 8
4	0.245 67	276.9	276.9	-4.186 3	4	0.245 67	278.6	278.5	4.186 1
6	0.245 67	414.3	414.3	-4.178 5	6	0.245 67	415.9	415.9	4.178 2
8	0.245 67	549.7	549.6	-4.167 7	8	0.245 67	551.3	551.3	4.167 3
10	0.245 67	682.5	682.5	-4.153 8	10	0.245 67	684.0	684.0	4.153 4

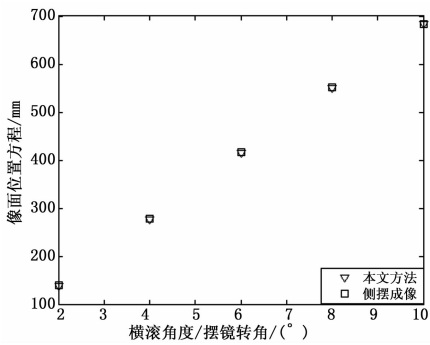


图 5 不同摆镜转角下的像面位置

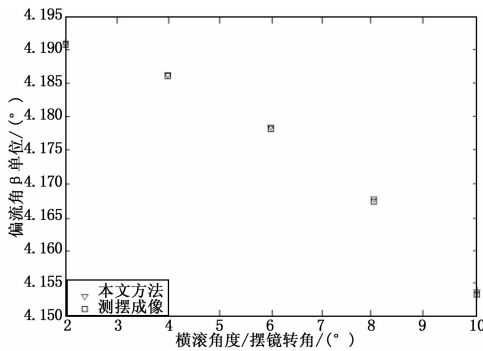


图 6 不同摆镜转角下的偏流角

由图 5、图 6 可知, 当横滚角度为小姿态角 ( $2^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ) 时, 本文的方法与侧摆成像模型的像移和偏流角基本相等, 由表 1 计算知, 像移相对误差在 1% 以内, 偏流角大小相对误差在 0.001% 以内, 两种方法保持了较好的一致性, 完全满足像移补偿的要求, 证明了该模型在小姿态下的合理性与正确性。相比于卫星平台的姿态控制, 摆镜的转动控制较为简单与容易, 该模型能够通过改变摆镜的转角, 实现与小姿态成像的等同效果。

此外, 该模型还可以通过对摆镜角速度的实时控制, 实现穿航方向上的扫描成像。当摆镜角速度为  $3^{\circ}/\text{s}$  时, 光轴的转动速度为  $6^{\circ}/\text{s}$  (目前的姿态角速度仅为  $1^{\circ}/\text{s}$ ), 在轨高度为 1 200 km 时, 光轴扫过的地面景物的速度

$$V_3 = (6 * 3.14 / 180) * 1\ 200\ \text{km/s} = 125.6\ \text{km/s}$$

飞行器对应的星下点速度

$$V_1 = \frac{H_0}{H_0 + R} * V_{\text{aircraft}} = 6.1\ \text{km/s}$$

由于地球自转产生的地面像移速度在沿航方向的分量

$$V_{2//} = \omega * R * \cos(180^{\circ} - 100.5^{\circ}) = 0.085\ \text{km/s}$$

穿航方向上的分量  $V_{2\perp} = \omega * R * \sin(180^{\circ} - 100.5^{\circ}) = 0.46\ \text{km/s}$  所以沿航方向的合速度

$$V_x = V_1 + V_{2//} = 6.185\ \text{km/s}$$

穿航方向像移速度

$$V_y = V_3 + V_{2\perp} = 126.06\ \text{km/s}$$

由图 7 可知, 由卫星运动, 地球自转, 摆镜转动导致地面景物移动速度在穿航方向上式沿航方向上的 21 倍, 即当卫星沿着轨道飞行 1 m 时, 可以通过摆镜转动实现穿航方向上幅宽 21 m 的扫描成像, 通过对 CCD 进行合理拼接, 可以保证相邻扫描线之间在星下点不漏扫, 不大部分重叠。

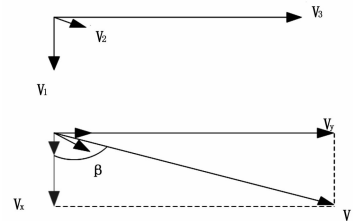


图 7 摆扫成像地面景物移动速度

为保证星下点不漏扫, 不大部分重叠, 可以采用单向摆动或者转动扫描, 图 8 为单向摆动式对地扫描成像的地面图形, 从图中可知, 相邻两次扫描成像之间条带方向一致, 保证了一定的重叠率, 确保了对地成像过程中星下点不漏扫, 不大部分重叠。

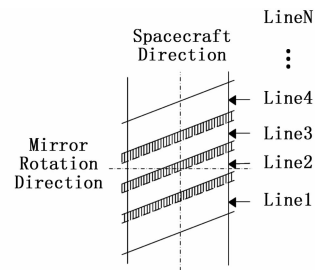


图 8 摆扫成像扫描地面图形 (单向摆动)

## 4 结论

在坐标变换的基础上用矩阵分析方法, 结合摆镜旋转矩阵建立摆扫成像像移匹配模型。该模型在小姿态角度 (横滚角度  $\leq 10^{\circ}$ ), 即横滚角  $\varphi$  分别等于  $2^{\circ}$ 、 $4^{\circ}$ 、 $6^{\circ}$ 、 $8^{\circ}$ 、 $10^{\circ}$  条件下, 与推扫成像模型相比像移相对误差在 1% 以内, 偏流角大小相对误差小于 0.001%, 两种方法保持了较好的一致性, 完全满足

像移补偿的要求,同时还能够实现与大姿态角度成像的相同视场,证明了该模型的正确性。此外通过对摆镜转动进行实时控制,实现了对地成像过程中的大视场、宽幅盖成像,减少回访周期,提高空间相机对地成像的工作效率。作为大视场空间相机成像像移补偿的一种计算方法,对工程应用具有一定的指导意义。

**参考文献:**

[1] 薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计 [J]. 光学学报, 2011, 31 (8): 1-6.  
 [2] 杨秉新. TDICCD 相机的相对孔径与器件像元尺寸关系的研究 [J]. 航天返回与遥感, 2001, 22 (2): 9-12.  
 [3] 芮涛. 大口径长焦距扫描成像光学系统像质研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

[4] 张媛. 星载 TDICCD 相机侧摆成像像移速度建模与分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
 [5] 王家骥, 于平, 颜昌翔. 航天光学传感器像移速度矢计算数学模型 [J]. 光学学报, 2004, 24 (12): 1585-1589.  
 [6] 仲惟超. 航天器轨道姿态和姿态参数对光学成像的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
 [7] 杨飞, 金光, 曲宏松. 航天时间延迟积分 CCD 相机摆扫成像快速几何校正设计与分析 [J]. 光学学报, 2014, 34 (1): 0111001-1-0111001-7.  
 [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/Whisk\\_broom\\_scanner](https://en.wikipedia.org/wiki/Whisk_broom_scanner).  
 [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Push\\_broom\\_scanner](https://en.wikipedia.org/wiki/Push_broom_scanner).  
 [10] 陈世平. 空间相机设计与实验 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.  
 [11] 程少园, 张丽, 高卫军, 等. 大视场空间相机侧摆成像时几何参数模型 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44 (6): 1872-1877.

(上接第 241 页)

$$\text{mean\_error\_percent} = \frac{|(r_{ise} - r_{mat})|}{r_{mat}} \times k \quad (3)$$

其中:  $r_{ise}$  表示 FPGA 硬件处理的结果,  $r_{mat}$  表示 Matlab 浮点计算的输出, 最终计算得到的误差百分比为 0.38%。由误差数据看出, 复用的 FPGA 结构在自适应权向量的抽取上具有高度的一致有效性。

当采样数据宽度为 32 bit, FPGA 芯片采用 xc7k325t 时, 观察表 2 中不同设计结构的硬件资源消耗。

由表 2 可知, 当阵元数较小时, 传统 GR-TSA 结构和改良的 GR-ITSA 结构都可以考虑作为自适应波束形成算法的实现结构, 但是当 sensor 数大于等于 4 时, 传统 GR-TSA 结构硬件资源消耗极大, 不再具有实用性, 观察此时的 XtremeDSP Slices 消耗发现, 复用的 GR-ITSA 结构能减少的消耗达 38% 以上。

表 2 不同硬件结构下的资源消耗

对比参数 功能单元		Slice Registers	Slice LUTs	DSP48 Slices
PE	bPE	2350(407600)	1253(203800)	32(840)
	zPE	8549	7716	22
	vPE	1475	837	20
	wPE	1059	774	12
算法	使用 PE 数	4 阵元时 PE 数	4 阵元 DSP 消耗比	
IQRD-SMI	1/2M(M+1)+3M	22 个	63.81%	
复用算法	2M+2	10 个	25.95%	

**5 结论**

为了避免自适应算法中复杂的权抽取, 首先研究了改进的逆 QR 分解 SMI 自适应算法, 接着运用 Systolic 阵列, 将算法的 FPGA 实现结构 GR-TSA 搭建出来。又研究了 FPGA 实现中各 PE 的具体实现方法, 其中用到了 CORDIC 技术与 DDS 技术。最后在传统 Systolic 阵列结构的基础上改进, 给出了复

用的 GR-ITSA 阵列结构, 并做了硬件定点仿真与软件浮点仿真的回馈分析。通过定量分析, 复用结构可以显著降低资源消耗, 在实际工程应用有效节约了成本。

**参考文献:**

[1] 宋丹, 曲绍君, 李高鹏. 基于失配处理的自适应干扰抑制系统 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (2): 480-483, 499.  
 [2] 包志强, 丁康利, 单洁. 基于脉动阵的自适应波束形成算法仿真 [J]. 无线通信技术, 2014, 23 (2): 1-5, 10.  
 [3] 宋博, 岳翠苹, 孙晶冬, 等. 自适应数字波束形成的研究与实现 [J]. 电视技术, 2014, 38 (3).  
 [4] 戴凌燕. 自适应波束形成技术应用基础研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2009: 2-16.  
 [5] 黄飞. 阵列天线快速自适应波束形成技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010: 16-20.  
 [6] 刘倩. 阵列天线自适应波束形成算法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 7-10.  
 [7] Teitelbaum K. A Flexible processor for a digital adaptive array radar [J]. IEEE Trans. Systems Magazine, 1991, AES (5): 18-22.  
 [8] 龚耀寰. 自适应滤波时域自适应滤波和智能天线 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.  
 [9] 王永良. 空时自适应信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.  
 [10] 冯地耘, 陈立万, 王悦善. 自适应波束形成与高性能 DSP [M]. 2007 年 9 月第一版. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.  
 [11] 刘千里. 基于 FPGA 的逆 QR 分解 SMI 算法的并行实现方法 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48 (26): 71-75, 161.  
 [12] Rader C M. V LSI Systolic arrays for adaptive nulling [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13 (7): 29-49.  
 [13] 龚耀寰, 李航, 苟仲文. 基于 CORDIC 的无开方 GIVENS 旋转处理方法 [J]. 电子科技大学学报 (自然科学版), 1997, 26 (6): 565-569.