

基于 INS/GPS 数据的机载 SAR 图像地理编码系统研究¹

沈 汀

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 该文论述了根据飞机地理坐标数据对机载 SAR 图像进行地理编码的原理和方法; 推导了系统的计算方程以及误差方程; 分析了利用 INS 数据、GPS 数据以及 INS/GPS 综合数据对机载 SAR 图像地理编码系统的设计特点, 给出了系统的计算仿真结果。

关键词 机载 SAR 图像, 地理编码, INS/GPS 数据综合

中图分类号 TN957.7

1 概 述

机载 SAR 图像地理编码系统用于完成机载 SAR 原始斜距图像上各像素点的地理坐标计算和标注, 以确定图像的位置和方向。在实时座舱显示中生成带地理坐标标注的图像; 在地面回放处理后生成地理编码图像。该系统以飞机的即时经纬度, 高度以及飞行航迹角等地理坐标数据作为输入信息, 根据 SAR 成像的几何关系, 计算出图像上各像素点的经纬度坐标, 或合成到原始图像上, 或形成与原始图像各像素相对应的经纬度数据库。按照国际通用的遥感图像产品等级划分标准, 经地理编码后的机载 SAR 图像可达到 2A 级^[1]。以此图像为基础, 用户可根据不同使用要求, 进行斜地转换、几何校正、地图投影等变换, 还可以利用地面控制点进行几何精校正、数学高程模型 (Digital Elevation Models, DEM) 校正、直至生成地图影像, 正投影图以及配合地理信息系统应用^[2]。因此, 机载 SAR 地理编码图像丰富了 SAR 原始图像的信息, 在军事侦察、洪水监测、地形测绘等方面有重要应用价值。

2 系统工作原理

2.1 相关坐标系及其转换关系

机载 SAR 在成像飞行时可归纳为多种坐标系与之相关, 主要有地球坐标系 (e 系)、地理坐标系 (t 系)、机体坐标系 (b 系)、天线平台坐标系 (m 系) 以及图像坐标系 (n 系)^[3], 其转换关系及坐标系定义如下:

(1) 地球坐标系 ($o_e x_e y_e z_e$) 与地理坐标系 ($o_t x_t y_t z_t$) 之间, 当以经度 (λ)、纬度 (L) 表示地球上某点 o_t 的位置时可以得到它们之间的转换关系, 即 t 系到 e 系的转换, 其位置矢量 P 的直角坐标表达式为

$$\begin{pmatrix} P_x^t \\ P_y^t \\ P_z^t \end{pmatrix} = C_e^t \begin{pmatrix} P_x^e \\ P_y^e \\ P_z^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin L & \cos L \\ 0 & -\cos L & \sin L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_x^e \\ P_y^e \\ P_z^e \end{pmatrix} \quad (1)$$

(2) 机体坐标系 ($o_b x_b y_b z_b$) 可定义为以 SAR 载机的重心为坐标系原点 o_b , 纵轴 $o_b x_b$ 平行于机身轴线, 指向飞机运动前方。竖轴 $o_b z_b$ 在飞机对称平面内, 垂直于 $o_b x_b$ 轴线, 指向上方。横轴 $o_b y_b$ 垂直于机身纵向平面 $o_b x_b z_b$, 构成右手坐标系。

¹ 1998-02-18 收到, 2000-01-22 定稿

(3) 天线平台坐标系 ($o_m x_m y_m z_m$) 可定义为以天线平台中心为原点 o_m , $o_m x_m$ 轴与天线平台横轴相重合, 指向飞机运动前方. $o_m z_m$ 轴与天线平台纵轴相重合, 指向上方. $o_m y_m$ 轴垂直于天线平台横轴和纵轴所确定的平面, 构成右手坐标系.

(4) 机载 SAR 图像坐标系 ($x_n x_n y_n z_n$) 可定义为以近距图像起始点为原点 o_n , $o_n y_n$ 轴沿距离向指向远端, $o_n x_n$ 轴沿方位向指向成像方向, $o_n z_n$ 轴垂直于 $o_n x_n y_n$ 所决定的平面, 指向上方.

通过飞机的姿态角即航向角 (φ')、俯仰角 (θ)、横滚角 (γ), 经方向余弦变换后, 可以得到从 b 系到 t 系的转换. 当天线平台的 $o_m x_m$ 轴、 $o_m y_m$ 轴、 $o_m z_m$ 轴分别跟踪飞机的偏流角、横滚角、俯仰角变化后, 可以隔离掉机体坐标系的影响, 得到从 m 系到 t 系的转换. 当忽略天线平台的跟踪误差及飞行姿态角的测量误差时, 天线平台坐标系可以完全保持与当地水平面平行且方位轴 ($o_m x_m$ 轴) 与真北轴 ($o_t y_t$ 轴) 之间的夹角等于飞机的飞行航迹角 (φ). t 系和 m 系的位置矢量关系式可表示为

$$\mathbf{P}^n = C_t^m \mathbf{P}^t \quad (2)$$

其中, \mathbf{P}^n 为天线平台中心的位置矢量; \mathbf{P}^t 为飞机质心的位置矢量; 当忽略飞机质心位置与天线平台中心的位置差时, C_t^m 可表示为 t 系到 m 系的方向余弦矩阵. 再忽略天线平台的跟踪误差及姿态角的测量误差, 即 $\gamma = \theta = 0$, 则 (2) 式可进一步化简, 用直角坐标表达式可表示为

$$\begin{pmatrix} P_x^m \\ P_y^m \\ P_z^m \end{pmatrix} = C_e^m \begin{pmatrix} P_x^t \\ P_y^t \\ P_z^t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_x^t \\ P_y^t \\ P_z^t \end{pmatrix} \quad (3)$$

(3) 式即为天线平台坐标到地理坐标的投影关系式, 其中 φ 为飞机的飞行航迹角.

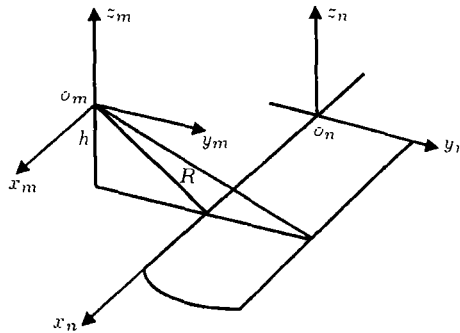


图 1 天线平台坐标系与图像坐标系的关系

利用机载 SAR 成像的固有几何关系, 可以完成天线平台坐标系 (m 系) 到图像坐标系 (n 系) 的转换, 如图 1 所示, 其中天线平台坐标系的跟踪水平面 $o_m x_m y_m$ 平行于图像坐标系水平面 $o_n x_n y_n$, 且 $o_m x_m$ 轴平行于 $o_n x_n$ 轴; $o_m y_m$ 轴平行于 $o_n y_n$ 轴, 相应的 $o_m z_m$ 轴平行于 $o_n z_n$ 轴, 这样 n 系到 m 系之间除了存在斜距投影关系外不存在相对角运动, 因此, 方向余弦矩阵为单位阵, 其位置矢量 \mathbf{Q}^n 关系式可表示为

$$\mathbf{Q}^n = C_m^n \mathbf{P}^m + \mathbf{R} = \mathbf{I} \mathbf{P}^m + \mathbf{R} \quad (4)$$

设飞机的飞行高度为 h ，机载 SAR 近距为 R ，成像方向以左侧视为正；右侧视为负，则天线平台中心的位置矢量 P^n 与相应的图像坐标系中的对应点 Q^n 的矢量关系式可进一步表示为

$$Q^n = P^n + \begin{pmatrix} 0 \\ \pm\sqrt{R^2 - h^2} \\ -h \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.2 图像像素点经纬度坐标的计算方法

设机载 SAR 原始图像在距离向沿图像坐标系 $o_n y_n$ 轴的坐标用空间采样点数 j 表示；沿图像方位向的坐标系 $o_n x_n$ 轴的坐标用空间采样点数 i 表示。考虑单张机载 SAR 图像的平面信息。图像坐标系可进一步由图 2 表示，其中原点位于图像方位起始点 $i = 0$ 和测绘带近距起始点 $j = 0$ ，当飞机位于 P_i 位置时，图像上任意点的坐标可表示为 $Q(i, j)$ 。

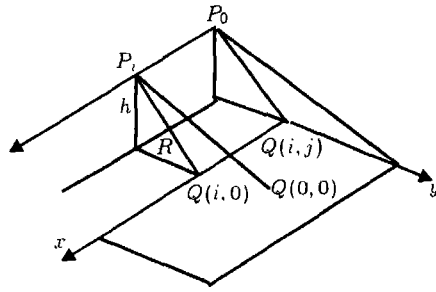


图 2 SAR 载机与图像的空间几何关系

利用 (1)，(2)，(4) 式可以求出图像上任意点 $Q_{i,j}^n$ 在地球坐标系中的位置矢量 $Q_{i,j}^e$ ，其矢量表达式为

$$Q_{i,j}^e = (C_e^n)^{-1} C_e^m P_i^e + (C_e^n)^{-1} R = P_i^e + (C_e^m)^{-1} R \quad (6)$$

其中， $C_e^m = C_t^m C_e^t$ ； P_i^e 为飞机在 i 位置的地球坐标系中的位置矢量。相应的 $Q_{i,j}^n$ 在地球坐标系中的投影表达式可表示为

$$\begin{pmatrix} Q_{i,j,x}^e \\ Q_{i,j,y}^e \\ Q_{i,j,z}^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{i,x}^e \\ P_{i,y}^e \\ P_{i,z}^e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\cos \varphi_i \sin \lambda_i & -\sin \lambda_i \sin \varphi_i & \cos \lambda_i \cos L_i \\ +\sin \varphi_i \cos \lambda_i \sin L_i & -\cos \varphi_i \sin L_i \cos \lambda_i & \\ \cos \varphi_i \cos \lambda_i & \sin \varphi_i \cos \lambda_i & \sin \lambda_i \cos L_i \\ +\sin \varphi_i \sin \lambda_i \sin L_i & -\cos \varphi_i \sin \lambda_i \sin L_i & \\ -\cos L_i \sin \varphi_i & \cos L_i \cos \varphi_i & \sin L_i \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ \pm\sqrt{R^2 - h^2} + j \cdot \Delta R \\ -h_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中 (λ_i, L_i, h_i) 为飞机在 i 位置的地理坐标系中的位置矢量； φ_i 为该位置的飞行航迹角； ΔR 为 SAR 系统距离向的空间采样距离。飞机在 i 位置的地球坐标系中的位置矢量 P_i^e 可以由该位置在地理坐标系中的位置矢量 (λ_i, L_i, h_i) 计算出来^[4]。其转换关系式为

$$\begin{pmatrix} P_{i,x}^e \\ P_{i,y}^e \\ P_{i,z}^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R_N + h_i) \cos L_i \cos \lambda_i \\ (R_N + h_i) \cos L_i \sin \lambda_i \\ (R_N(1-f)^2 + h_i) \sin L_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中 $R_N = R_e / \sqrt{(1-f)^2 \sin^2 L + \cos^2 L}$, R_e, f 为地球参考椭球参数, 按我国 1980 年后所采用的椭球参数: $R_e = 6378140\text{m}, f = 298.257$. 当已知图像上任意点 $Q_{i,j}^n$ 位于地球坐标系中的位置矢量 $Q_{i,j}^e$ 时, 可以计算出该点在地理坐标系中的位置矢量 $(\lambda_{i,j}, L_{i,j})$, 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{i,j,主} &= \text{tg}^{-1} (Q_{i,j,y}^e / Q_{i,j,x}^e) \\ L_{i,j} &= \text{tg}^{-1} \left[\frac{(R_e + h)^2}{[(1-f)R_e + h]^2} \cdot \frac{Q_{i,j,z}^e}{\sqrt{Q_{i,j,x}^e{}^2 + Q_{i,j,y}^e{}^2}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由于地理纬度由南纬到北纬的变化, 其定义域: $-90^\circ \sim +90^\circ$, 所以 $L_{i,j}$ 取实际值就可以表示像素点纬度。经度分成东经和西经, 其定义域为: $+180^\circ \sim -180^\circ$, 经度 $\lambda_{i,j}$ 有象限判别问题, 判断方法如表 1 所示。这样, (7), (8), (9) 式的联立求解即为机载 SAR 图像各像素点的经纬度坐标的计算方法。

表 1 地理编码系统经度计算及象限判别表

$Q_{i,j,x}^e$ 的符号	$Q_{i,j,y}^e$ 的符号	$\lambda_{i,j}$ 实际值	$\lambda_{i,j}$ 所在象限
+	+	$\lambda_{i,j,主}$	东经: $0 \sim 90^\circ$
-	-	$\lambda_{i,j,主} + 180^\circ$	东经: $90^\circ \sim 180^\circ$
-	-	$\lambda_{i,j,主} - 180^\circ$	西经: $-180^\circ \sim -90^\circ$
+	-	$\lambda_{i,j,主}$	西经: $-90^\circ \sim 0^\circ$

2.3 图像像素点经纬度坐标的计算仿真

(1) 飞行参数 以内蒙某地区一段实际的飞行参数作为仿真的飞机地理坐标数据, 飞行参数见表 2。

(2) 设机载 SAR 系统参数如表 3。

(3) 机载 SAR 系统按以上参数飞行所得到的右侧视图像, 其方位及边界参数如图 3, 其中, 以点目标 D, E, F 为地面仿真参考点。

根据飞机实际飞行参数 (表 1) 和机载 SAR 系统参数 (表 2), 按 (7), (8), (9) 式联立求解可获得 3 个地面参考点目标的仿真结果如表 4。

表 2 仿真计算的飞行参数表

航高 h	飞行航迹角 (真北) φ	起始点经纬度	结束点经纬度	飞行距离 d
8400m	92.54°	N40°31.43' E112°27.55'	N40°31.18' E112°34.96'	10.4418km 10.4418km

表 3 仿真计算的机载 SAR 系统参数

侧视方向	近距 R	距离向空间 采样距离 ΔR_j	距离向空间 采样点数	方位向空间 采样距离 ΔR_i
右	14.93km	2.27m	4096	2.27m

表 4 地面参考点目标的计算仿真结果

	像素点位置 (i, j)	仿真点经纬度	参考点经纬度	仿真误差 (m)
参考点目标 D	841, 919	N40°23.65211' E112°28.51715'	N40°23.65199' E112°28.51719'	0.229
参考点目标 E	2142, 1418	N40°23.04088' E112°30.61401'	N40°23.04116' E112°30.61404'	0.521
参考点目标 F	1223, 2259	N40°22.01073' E112°29.13284'	N40°22.01055' E112°29.13209'	1.108

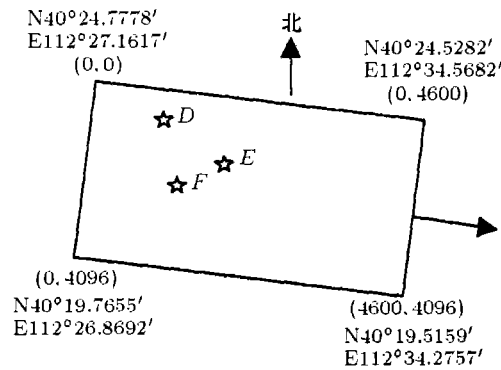


图3 机载 SAR 图像方位及边界参数示意图

3 系统设计

3.1 INS 数据的特点

在惯性导航系统 INS (Inertial Navigation System) 中, 由于陀螺漂移的影响使得 INS 输出数据的测量误差随时间积累不断增加, 从而影响了导航数据的精度。民用条件下, 惯性导航系统的典型定位误差为 1 mile/h 圆概率误差 (Circular error probability)^[5]。如果将 INS 数据应用到机载 SAR 地理编码系统中, 随着飞行时间的增加将造成图像像素点定位误差不断积累增大, 因此 INS 数据通常不能满足实用化的机载 SAR 地理编码图像的精度要求。

3.2 GPS 数据的特点

导航卫星的全球定位系统 (GPS, Global Positioning System)。它的导航性能和定位精度主要取决于导航卫星的工作状态和性能以及 GPS 接收机对卫星的星历数据的接收和计算。差分技术的使用, 使得 GPS 高动态实时定位的精度可以达到米级。与 INS 相比, 机载 GPS 属于被动式的导航系统, 具有定位精度高, 无数据漂移等优点。其位置测量精度可以满足机载 SAR 地理编码图像的精度要求^[6]。由于 GPS 不能提供飞机的飞行姿态数据, 无法满足机载 SAR 天线对机体坐标系的隔离要求, 因此需要配合飞机姿态测量设备 (如垂直陀螺仪、航向陀螺仪或 INS) 一起组成飞行导航和姿态测量系统。

3.3 利用 INS/GPS 综合数据进行地理编码系统设计

如前所述, 机载 GPS 是机载 SAR 地理编码系统理想的飞机位置坐标的数据源。但是由于 GPS 系统本质上是一种无线电导航设备, 与 INS 相比它极易受到干扰, 因此在实际应用中通常需要利用其它导航设备与 GPS 组合实现 GPS 的完善性检测, 提高了 GPS 数据的可靠性。目前, 广泛采用 INS 和 GPS 嵌入式组合方式的一体化设计。这种组合方式综合了两种导航系统的优点, 弥补了各自的缺点, 既实现了 GPS 的完整性检测又克服了 INS 系统的陀螺漂移误差, 是机载 SAR 地理编码系统理想的使用设备^[7]。对于飞机上目前仍广泛使用的独立的 INS 和 GPS 系统可以采用数据综合方式实现组合^[4]。这种数据综合方法的优点是工作简单, 便于工程实现, 由于两系统独立工作, 使导航系统还有一定的冗余度。卡尔曼滤波器是实现 INS 和 GPS 系统位置速度信息综合的数学方法, 它利用两系统的位置和速度信息的差值作为测量值, 经综合卡尔曼滤波, 估计出 INS 系统误差, 再进行位置和速度信息修正, 其原理框图如图 4 所示。

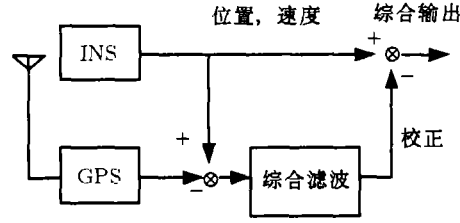


图 4 INS/GPS 数据综合系统框图

4 系统误差分析

机载 SAR 图像各像素点经纬度坐标的定位精度决定了地理编码系统的误差。除系统计算误差外，另一个主要误差源是飞机地理坐标参数的测量误差^[8]。

计算误差主要取决于 SAR 图像上各像素点的空间采样间隔，按前面的仿真条件计算，当空间采样间隔为 2.27 m 时，系统的计算误差不会超过 3.2m。因此，机载 SAR 系统的分辨率越高，计算误差的影响越小。

根据经纬度坐标的计算方程可以建立系统的测量误差方程。由 (7)，(8) 式可以得到像素点的地球坐标表达式：

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= (R_N + h) \cos L \cos \lambda + (-\sin \lambda \cos \varphi - \cos \varphi \sin L \cos L) \\ &\quad \times (\pm\sqrt{R^2 - h^2} + j \cdot \Delta R) - h \cdot \cos \lambda \cos L \\ Q_y &= (R_N + h) \cos L \sin \lambda + (\sin \varphi \cos \lambda - \cos \varphi \sin \lambda \sin L) \\ &\quad \times (\pm\sqrt{R^2 - h^2} + j \cdot \Delta R) - h \cdot \sin \lambda \cos L \\ Q_z &= [R_N(1 - f)^2 + h] \sin L + (\cos L \cos \varphi)(\pm\sqrt{R^2 - h^2} + j \cdot \Delta R) - h \cdot \sin L \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由于系统输入数据 λ, L, φ, h 存在测量误差 $\Delta\lambda, \Delta L, \Delta\varphi, \Delta h$ ，使得经地理编码算法获得的像素点的地球坐标系坐标数据产生误差 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ，其表达式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \frac{\partial Q_x}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial Q_x}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial Q_x}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial Q_x}{\partial h} \Delta h \\ \Delta y &= \frac{\partial Q_y}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial Q_y}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial Q_y}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial Q_y}{\partial h} \Delta h \\ \Delta z &= \frac{\partial Q_z}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial Q_z}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial Q_z}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial Q_z}{\partial h} \Delta h \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

对于 SAR 图像上的像素点如果在地球坐标系的坐标产生误差 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ，必然引起该像素点的经纬度坐标的定位误差，考虑到地理编码系统的计算误差 $\varepsilon_\lambda, \varepsilon_L$ ，因此总的系统定位误差 $\Delta\lambda_{i,j}, \Delta L_{i,j}$ 的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\lambda_{i,j} &= \frac{\sec \lambda}{R_N} (-\sin \lambda \cdot \Delta x + \cos \lambda \cdot \Delta y) + \varepsilon_\lambda \\ \Delta L_{i,j} &= \frac{[(1 - f)^2 \sin^2 L + \cos^2 L]^{3/2}}{(1 - f)^2 \cdot R_e} \\ &\quad \times (-\sin L \cos \lambda \cdot \Delta x - \sin L \sin \lambda \cdot \Delta y + \cos L \cdot \Delta z) + \varepsilon_L \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

(11), (12) 式给出了地理编码系统定位误差的计算方法。

此外, 在系统定位误差的计算中忽略了机载 SAR 系统作用距离 R 的误差影响。因为机载 SAR 系统的作用距离 R 由系统定时控制, 由于定时时间控制精度高, 使得作用距离 R 的误差控制在 1m 以内, 因此该数据误差可以忽略。考虑到机载 SAR 在大气层内近地飞行, 在机载条件下可以忽略电磁波大气折射对 SAR 系统作用距离的影响^[9]。

另外, 在进行 m 系到 t 系位置矢量转换 ((3) 式) 时忽略了天线平台的跟踪误差和飞行姿态角的测量误差, 这是因为在机载 SAR 系统中经常使用陀螺稳定平台使天线波束保持空间指向稳定, 这样稳定误差可作为小角度处理而忽略掉。

参 考 文 献

- [1] A. K. Wilson, W. Mockridge, Geometric rectification of airborne sensing data using GPS-based attitude and position information, In Proc. of the Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, San Francisco, USA, June 1996, III-73-III-82.
- [2] R. Scharf, H. Schwan, U. Thonnessen, Reconnaissance in SAR images, In Proc. of EUSAR'98, Friedrichshafen, Germany, 1998, 343-345.
- [3] (苏) 顿斯科夫, 等著, 周广森译, 郑家声校, 雷达摄影测量, 北京, 测绘出版社, 106.
- [4] 袁信, 愈济祥, 陈哲编著, 导航系统, 北京, 航空工业出版社, 1993, 7-9, 176-177.
- [5] 郭秀中编著, 惯导系统陀螺仪理论, 北京, 国防工业出版社, 1996, 4-5.
- [6] P. Ibsen, R. Guarino, Synthetic aperture radar (SAR) image focus performance during maneuvers, Proc. of SPIE, Vol.2747, Orlando, FL, USA, 1996, 67-78.
- [7] B. Reid, B. Scherzinger, E. Lithopoulos, The position and orientation system (POS) for airborne survey applications, In Proc. of the Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, San Francisco, USA, June, 1996, I -607- I -613.
- [8] D. Blacknell, *et al.*, Geometric accuracy in airborne SAR images, IEEE Trans. on AES, 1989, AES-25(2), 241-258.
- [9] R. L. Fante, Turbulence-induced distortion of synthetic aperture radar images, IEEE Trans. on GE, 1994, GE-32(4), 958-961.

STUDIES ON GEOCODING SYSTEM FOR AIRBORNE SAR IMAGE BASED ON INS/GPS DATA

Shen Ting

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract This paper theoretically presents the geocoding principle and method for airborne SAR system image, which is converted only by the positional and directional data from the aircraft mounted SAR. The calculated equations and error functions of the geocoding SAR system are derived and the differences of the geocoding SAR image converted by INS data, GPS data or INS/GPS combined data are also analyzed. Besides, the simulated results are suggested in this paper.

Key words Airborne SAR image, Geocoding, INS/GPS data

沈汀: 男, 1965年生, 高级工程师, 主要从事机载 SAR 的天线稳定技术, 惯性测量、飞机导航及机载 SAR 运动补偿方面的研究工作。