

# 机载双天线 InSAR 数据生成高精度 DEM 的误差分析<sup>①</sup>

孙中昶<sup>②</sup> 郭华东<sup>③</sup> 李新武

(中国科学院对地观测与数字地球科学中心 北京 100094)

**摘要** 结合机载双天线干涉合成孔径雷达(InSAR)正侧视成像模型,分析了机载双天线 InSAR 数据处理中存在的影响数字高程模型(DEM)高程精度和点位精度的主要因素,包括平台高度、斜距、干涉相位、基线长度、基线倾角、中心多普勒频率以及载机姿态,着重分析了平台高度、基线长度、基线倾角以及侧视角等因数的变化与 DEM 误差之间的关系。选用机载双天线 InSAR 数据进行了干涉实验,并对生成的 DEM 进行了误差分析,实验分析结果和误差定量分析的结果相一致。对机载双天线 InSAR 数据处理进行误差分析有利于提高 DEM 的高程和点位精度,也有利于机载双天线 InSAR 系统设计及飞行试验设计,因而具有重要实用意义。

**关键词** 机载干涉合成孔径雷达, 双天线, 数字高程模型(DEM), 误差分析, 误差传播

## 0 引言

干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)成像作为一种主动微波三维遥感成像技术,具有全天时、全天候、穿透性强、精度高、效率高等特点,已成为当前快速获取地面三维信息的重要手段之一。尤其是机载双天线 InSAR 系统不存在时间失相关问题,可以依据用户需求进行数据获取,且具有大比例尺、高分辨率、高精度、实时获取与处理、机动灵活等特点<sup>[1]</sup>,在地形制图方面有着巨大的优势。最早的 InSAR 测图技术研究可以追溯到 1974 年, Graham<sup>[2]</sup> 利用交叉轨道 InSAR 干涉技术进行地形制图。1986 年 Zebker 和 Goldstein<sup>[3]</sup> 对这种技术进行了改善,从此以后, InSAR 技术作为地形测图的一种有效方法,越来越多地应用到地形测量中,并且已经在实践中证实了其可靠性<sup>[4-8]</sup>。目前,国际上机载 InSAR 系统主要有 TOP-SAR、DO-SAR、STAR-3i/4i、AeS-1、ORBISAT-1 等,这些系统已经证实机载 InSAR 系统具有获取高精度数字高程模型(digital elevation model, DEM)的能力<sup>[7-10]</sup>。国内,2004 年中国科学院电子学研究所首次成功研制了“机载双天线 InSAR 系统”原理样

机<sup>[11]</sup>。2005 年,中国电子科技集团第三十八研究所也成功研制了“机载双天线 X 波段 InSAR 系统”<sup>[12]</sup>。

误差处理和分析作为 InSAR 数据处理过程的主要内容之一,得到诸多的研究<sup>[5,13-17]</sup>,但是这些研究主要是针对星载 InSAR 高程的误差分析。本文结合机载双天线 InSAR 正侧视成像模型和定位模型,分析讨论了影响机载双天线 InSAR 高程精度和点位精度的主要因素,并且对这些因素进行了误差分析。最后利用机载双天线 InSAR 数据进行了试验,并对其生成的高精度 DEM 进行了精度评定。

## 1 机载双天线 InSAR 测量原理

图 1 为机载双天线 InSAR 成像示意图。图中, $S_1$ 、 $S_2$  表示两副天线的位置;天线之间的距离用基线距  $B$  表示,  $B_{\parallel}$  和  $B_{\perp}$  分别表示基线在视线方向的平行分量和垂直分量;基线与水平方向的夹角即基线倾角为  $\alpha$ ;  $H$  表示平台高度;  $\theta$  是天线  $S_1$  的参考视线角;地面一点  $P$  到天线  $S_1$  和  $S_2$  的距离分别用  $R_1$  和  $R_2$  表示,  $P$  点的高程由  $h$  表示。设  $\lambda$  为载波波长,  $\varphi$  为相位差,根据机载双天线 InSAR 正侧视模型的几

① 863 计划(2007AA120304,2010AA22202),973 计划(2009CB723906)和中国科学院研究生科技创新(Y021003101A)资助项目。

② 男,1983 年生,博士;研究方向:微波遥感;E-mail:zhongchang26@126.com

③ 通讯作者,E-mail:hdguo@ceode.ac.cn

(收稿日期:2010-05-25)

何关系,则有

$$\begin{aligned}\varphi &= -\frac{2\pi}{\lambda}(R_2 - R_1) \approx -\frac{2\pi}{\lambda}B_{\parallel} \\ &= -\frac{2\pi}{\lambda}B\sin(\theta - \alpha)\end{aligned}\quad (1)$$

$$\theta = \alpha - \arcsin\left(\frac{\lambda\varphi}{2\pi B}\right) \quad (2)$$

$$h = H - R_1 \cos\theta = H - R_1 \cos\left(\alpha - \arcsin\left(\frac{\lambda\varphi}{2\pi B}\right)\right) \quad (3)$$

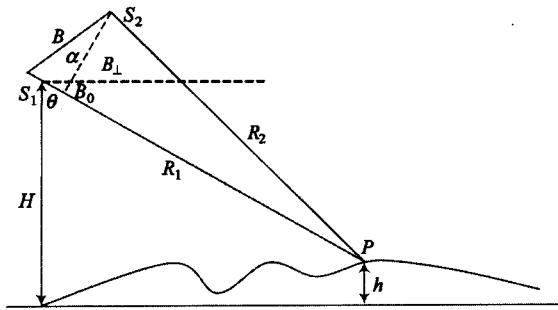


图 1 机载双天线 InSAR 成像示意图

在正侧视的成像模型中,利用载机的飞行数据信息,对目标进行定位。为了能够更加精确地确定目标点的位置,通过测量多普勒频移,引入斜视角  $\beta$ ,得到目标点在高斯平面上的坐标为  $P(P_x, P_y)$ ,其计算公式为<sup>[17,18]</sup>

$$P_x = S_x - \frac{R_1 \sin\theta}{\cos\beta} \sin(\theta_y - \varepsilon) \quad (4)$$

$$P_y = S_y - \frac{R_1 \sin\theta}{\cos\beta} \cos(\theta_y - \varepsilon) \quad (5)$$

$$\sin\beta = \frac{\lambda f_{dc}}{2V} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{V_x}{V_y}\right) \quad (7)$$

式中,  $(S_x, S_y)$  为载机在高斯平面上的坐标,  $\theta_y$  为载机偏离正北方向的偏航角,  $f_{dc}$  为多普勒中心频率,  $V$  为载机速度,  $(V_x, V_y, V_z)$  为载机速度矢量,  $V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2$ , 其中  $X, Y, Z$  表示空间直角坐标系。

从式(1) – (7) 得知, 影响 DEM 精度的主要参数有平台高度  $H$ 、斜距  $R_1$ 、相位差  $\varphi$ 、基线长度  $B$ 、基线倾角  $\alpha$  以及载机的姿态。

## 2 DEM 高程精度影响因素误差分析

### 2.1 相位偏置误差的影响

相位测量误差主要由信噪比(SNR)、多视数、基

线去相关、像元失匹配等因素造成的,其对 DEM 每一点的影响是波动的,即增加了每一点的统计方差<sup>[13]</sup>。

机载双天线 InSAR 复图像失配准误差是影响相位测量误差的主要因素之一,为机载 InSAR 系统引入系统误差,文献[5]给出了像元失配准标准差  $\sigma_x$  和相位标差  $\sigma_\varphi$  之间的定量关系:

$$\sigma_\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \sigma_x (1 - \cos\theta) \quad (8)$$

热噪声、采样和处理过程中引进的误差都会造成图像中一定程度的信噪比损失,信噪比 SNR 和相关系数  $\gamma$  存在如下的关系:

$$\gamma = \frac{1}{1 + SNR^{-1}}, SNR \neq 0 \quad (9)$$

为降低热噪声的影响,一个行之有效的方法是多视处理,设  $L$  为视数,则相位标准差  $\sigma_\varphi$  与视数、信噪比的关系<sup>[19]</sup>可用式

$$\sigma_\varphi = \frac{1}{\sqrt{2L}} \sqrt{\frac{1 + 2SNR}{SNR + SNR^2}} \quad (10)$$

表示,或用图 2 表示,从图 2 可以看出,相位标准差  $\sigma_\varphi$  随视数  $L$  和信噪比 SNR 的增大而减小。

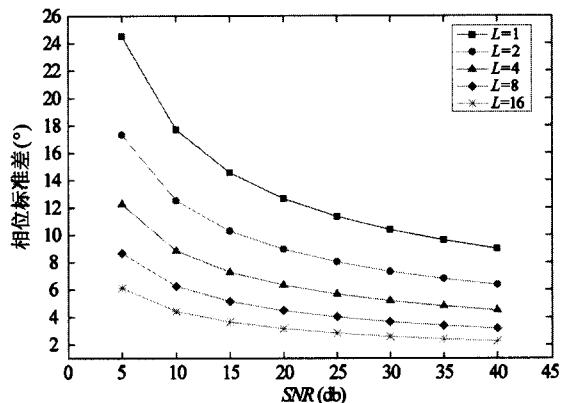


图 2 相位标准差与视数、信噪比的关系

根据式(1) – (3),对相位差  $\varphi$  进行求导,可以得到每一个像元的高程误差和相位差的关系:

$$\frac{dh}{d\varphi} = -\frac{\lambda R_1 \sin\theta}{2\pi B \cos(\theta - \alpha)} \quad (11)$$

### 2.2 雷达系统参数的影响

从式(1) – (3) 分析可知,影响 DEM 高程精度的主要雷达系统参数有平台高度  $H$ 、斜距  $R_1$  基线长度  $B$ 、基线倾角  $\alpha$ 。根据式(1) – (3),对这些参数进行全微分,推出系统参数误差和 DEM 高程精度之间的关系:

$$dh = \begin{pmatrix} 1 & -\cos\theta & R_1 \sin\theta & -\frac{R_1 \sin\theta \tan(\theta - \alpha)}{B} \\ (dH \ dR_1 \ d\alpha \ dB)^T \end{pmatrix} \quad (12)$$

### 2.3 载机姿态的影响

影响 DEM 高程精度的载机姿态主要有侧滚角  $\theta_r$  和俯仰角  $\theta_p$ , 载机姿态误差主要由 GPS/IMU 精度所决定的。其中由于雷达到地面点的距离很长, 从而使侧滚角误差严重影响了 DEM 高程精度, 侧滚角误差会引起整个 DEM 的旋转, DEM 高程误差与侧滚角误差的关系如下所示<sup>[5]</sup>:

$$\frac{dh}{d\theta_r} = R_1 \sin\theta \quad (13)$$

式中,  $dh$  为 DEM 高程误差,  $d\theta_r$  为侧滚角误差。

另外, 文献[20]基于三维重建模型推导了 DEM 高程对俯仰角  $\theta_p$  的敏感度方程, 得出高程误差与俯仰角误差之间的关系:

$$\frac{dh}{d\theta_p} = R_1 (\cos\theta_p \sin\theta - \ell \sin\theta_p) \quad (14)$$

式中,  $\ell = -\sqrt{1 - \sin^2\theta} \cos(\alpha + \theta_r)$ 。

### 2.4 误差分析

综上所述, 影响 DEM 高程精度的主要参量有平台高度  $H$ 、斜距  $R_1$ 、相位差  $\varphi$ 、基线长度  $B$ 、基线倾角  $\alpha$  以及载机的姿态(侧滚角  $\theta_r$  和俯仰角  $\theta_p$ )。根据协方差传播定律, 如果这些参数的误差之间互不影响, 则这些因素对 DEM 的影响关系如下:

$$\begin{aligned} \sigma_h^2 &= \sigma_H^2 + \cos^2\theta \sigma_{R_1}^2 + (R_1 \sin\theta)^2 \sigma_\alpha^2 \\ &\quad + \left( -\frac{\lambda R_1 \sin\theta}{2\pi B \cos(\theta - \alpha)} \right)^2 \sigma_\varphi^2 \\ &\quad + \left( -\frac{R_1 \sin\theta \tan(\theta - \alpha)}{B} \right)^2 \sigma_B^2 + (R_1 \sin\theta)^2 \sigma_{\theta_r}^2 \\ &\quad + (R_1 (\cos\theta_p \sin\theta - \ell \sin\theta_p))^2 \sigma_{\theta_p}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

事实上, 这些参数的误差之间不可能相互独立, 如果考虑它们之间的影响关系, 则记:

$$\begin{aligned} K &= \begin{pmatrix} 1 & -\cos\theta & R_1 \sin\theta & -\frac{\lambda R_1 \sin\theta}{2\pi B \cos(\theta - \alpha)} \\ & -\frac{R_1 \sin\theta \tan(\theta - \alpha)}{B} & R_1 \sin\theta \\ & R_1 (\cos\theta_p \sin\theta - \ell \sin\theta_p) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

$$d\Phi = (dH \ dR_1 \ d\alpha \ d\varphi \ dB \ d\theta_r \ d\theta_p)^T \quad (17)$$

且

$$D_{\Phi\Phi} = \begin{pmatrix} \sigma_H^2 & \sigma_{HR_1} & \sigma_{H\alpha} & \sigma_{H\varphi} & \sigma_{HB} & \sigma_{H\theta_r} & \sigma_{H\theta_p} \\ \sigma_{HR_1} & \sigma_{R_1}^2 & \sigma_{R_1\alpha} & \sigma_{R_1\varphi} & \sigma_{R_1B} & \sigma_{R_1\theta_r} & \sigma_{R_1\theta_p} \\ \sigma_{H\alpha} & \sigma_{R_1\alpha} & \sigma_\alpha^2 & \sigma_{\alpha\varphi} & \sigma_{\alpha B} & \sigma_{\alpha\theta_r} & \sigma_{\alpha\theta_p} \\ \sigma_{H\varphi} & \sigma_{R_1\varphi} & \sigma_{\alpha\varphi} & \sigma_\varphi^2 & \sigma_{\varphi B} & \sigma_{\varphi\theta_r} & \sigma_{\varphi\theta_p} \\ \sigma_{HB} & \sigma_{R_1B} & \sigma_{\alpha B} & \sigma_{\varphi B} & \sigma_B^2 & \sigma_{B\theta_r} & \sigma_{B\theta_p} \\ \sigma_{H\theta_r} & \sigma_{R_1\theta_r} & \sigma_{\alpha\theta_r} & \sigma_{\varphi\theta_r} & \sigma_{B\theta_r} & \sigma_{\theta_r}^2 & \sigma_{\theta_r\theta_p} \\ \sigma_{H\theta_p} & \sigma_{R_1\theta_p} & \sigma_{\alpha\theta_p} & \sigma_{\varphi\theta_p} & \sigma_{B\theta_p} & \sigma_{\theta_r\theta_p} & \sigma_{\theta_p}^2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

根据协方差传播定律, 则总的测高精度可表示为

$$\sigma_h^2 = \mathbf{K} \mathbf{D}_{\Phi\Phi} \mathbf{K}^T \quad (19)$$

### 3 DEM 点位精度影响因素误差分析

由式(4)–(7)可知, 影响 DEM 点位精度的因素有基线倾角  $\alpha$ 、相位差  $\varphi$ 、基线长度  $B$ 、系统平台高度  $H$  以及位置  $(S_x, S_y)$ 、中心多普勒频率  $f_{dc}$ 、载机姿态(偏航角  $\theta_r$  以及载机速度矢量  $(V_x, V_y, V_z)$ )。对式(2)进行全微分得

$$d\theta = d\alpha - \frac{\lambda}{2\pi B \cos(\theta - \alpha)} d\varphi - \frac{\tan(\theta - \alpha)}{B} dB \quad (20)$$

对式(3)、(4)分别进行全微分并且结合式(20), 根据协方差传播定律, 如果这些参数的误差之间互相独立, 可推出各因素对 DEM 点位精度的影响关系如下:

$$\begin{aligned} \sigma_{P_x}^2 &= \sigma_{S_x}^2 + \left( \frac{\sin\theta \sin(\theta_y - \varepsilon)}{\cos\beta} \right)^2 \sigma_{R_1}^2 \\ &\quad + \left( \frac{R_1 \cos\theta \sin(\theta_y - \varepsilon)}{\cos\beta} \right)^2 \sigma_\alpha^2 \\ &\quad + \left( \frac{\lambda R_1 \cos\theta \sin(\theta_y - \varepsilon)}{2\pi B \cos\beta \cos(\theta - \alpha)} \right)^2 \sigma_\varphi^2 \\ &\quad + \left( \frac{R_1 \cos\theta \sin(\theta_y - \varepsilon) \tan(\theta - \alpha)}{B \cos\beta} \right)^2 \sigma_B^2 \\ &\quad + \left( \frac{R_1 \sin\theta \cos(\theta_y - \varepsilon)}{\cos\beta} \right)^2 \sigma_{\theta_r}^2 + a_0^2 \sigma_{f_{dc}}^2 \\ &\quad + a_1^2 \sigma_{V_x}^2 + a_2^2 \sigma_{V_y}^2 + a_3^2 \sigma_{V_z}^2 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{P_y}^2 &= \sigma_{S_y}^2 + \left( \frac{\sin\theta \cos(\theta_y - \varepsilon)}{\cos\beta} \right)^2 \sigma_{R_1}^2 \\ &\quad + \left( \frac{R_1 \cos\theta \cos(\theta_y - \varepsilon)}{\cos\beta} \right)^2 \sigma_\alpha^2 \\ &\quad + \left( \frac{\lambda R_1 \cos\theta \cos(\theta_y - \varepsilon)}{2\pi B \cos\beta \cos(\theta - \alpha)} \right)^2 \sigma_\varphi^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left( \frac{R_1 \cos \theta \cos(\theta_y - \varepsilon) \tan(\theta - \alpha)}{B \cos \beta} \right)^2 \sigma_B^2 \\
& + \left( \frac{R_1 \sin \theta \cos(\theta_y - \varepsilon)}{\cos \beta} \right)^2 \sigma_{\theta_y}^2 + b_0^2 \sigma_{f_{dc}}^2 \\
& + b_1^2 \sigma_{V_X}^2 + b_2^2 \sigma_{V_Y}^2 + b_3^2 \sigma_{V_Z}^2
\end{aligned} \quad (22)$$

式中:

$$\begin{aligned}
a_0 &= -\frac{\lambda R_1 \sin \theta \sin \beta \sin(\theta_y - \varepsilon)}{2 V \cos^3 \beta} \\
a_1 &= \frac{R_1 V_Y \sin \theta \cos(\theta_y - \varepsilon)}{(V_X^2 + V_Y^2) \cos \beta} \\
&+ \frac{R_1 V_X \sin \theta \sin^2 \beta \sin(\theta_y - \varepsilon)}{V^2 \cos^3 \beta} \\
a_2 &= -\frac{R_1 V_X \sin \theta \cos(\theta_y - \varepsilon)}{(V_X^2 + V_Y^2) \cos \beta} \\
&+ \frac{R_1 V_Y \sin \theta \sin^2 \beta \sin(\theta_y - \varepsilon)}{V^2 \cos^3 \beta} \\
a_3 &= \frac{R_1 V_Z \sin \theta \sin^2 \beta \sin(\theta_y - \varepsilon)}{V^2 \cos^3 \beta} \\
b_0 &= -\frac{\lambda R_1 \sin \theta \sin \beta \cos(\theta_y - \varepsilon)}{2 V \cos^3 \beta} \\
b_1 &= -\frac{R_1 V_Y \sin \theta \sin(\theta_y - \varepsilon)}{(V_X^2 + V_Y^2) \cos \beta} \\
&+ \frac{R_1 V_X \sin \theta \sin^2 \beta \cos(\theta_y - \varepsilon)}{V^2 \cos^3 \beta} \\
b_2 &= \frac{R_1 V_X \sin \theta \sin(\theta_y - \varepsilon)}{(V_X^2 + V_Y^2) \cos \beta} \\
&+ \frac{R_1 V_Y \sin \theta \sin^2 \beta \cos(\theta_y - \varepsilon)}{V^2 \cos^3 \beta} \\
b_3 &= \frac{R_1 V_Z \sin \theta \sin^2 \beta \cos(\theta_y - \varepsilon)}{V^2 \cos^3 \beta}
\end{aligned}$$

则总的点位方差  $\sigma_{P_{xy}}^2$  为

$$\sigma_{P_{xy}}^2 = \sigma_{P_x}^2 + \sigma_{P_y}^2 \quad (23)$$

如果上述参数的误差之间不相互独立, 考虑它们之间的影响关系, 则记:

$$\begin{aligned}
K_{P_x} &= \left( 1 - \frac{\sin \theta \sin(\theta_y - \varepsilon)}{\cos \beta} - \frac{R_1 \cos \theta \sin(\theta_y - \varepsilon)}{\cos \beta} \right. \\
&\quad \frac{\lambda R_1 \cos \theta \sin(\theta_y - \varepsilon)}{2 \pi B \cos \beta \cos(\theta - \alpha)} \\
&\quad \frac{R_1 \cos \theta \sin(\theta_y - \varepsilon) \tan(\theta - \alpha)}{B \cos \beta} \\
&\quad \left. - \frac{R_1 \sin \theta \cos(\theta_y - \varepsilon)}{\cos \beta} \right) a_0 a_1 a_2 a_3
\end{aligned} \quad (24)$$

$$dP_x = (dS_x \ dR_1 \ d\alpha \ d\varphi \ dB \ d\theta_y \ df_{dc} \ dV_X \ dV_Y \ dV_Z)^T \quad (25)$$

且

$$D_{XX} =$$

$$\begin{pmatrix}
\sigma_{S_i}^2 & \sigma_{S,R_i} & \sigma_{S,\alpha} & \sigma_{S,\varphi} & \sigma_{S,B} & \sigma_{S,\theta_i} & \sigma_{S,f_{dc}} & \sigma_{S,V_1} & \sigma_{S,V_1} & \sigma_{S,V_2} \\
\sigma_{S,R_i} & \sigma_{R_i}^2 & \sigma_{R,\alpha} & \sigma_{R,\varphi} & \sigma_{R,B} & \sigma_{R,\theta_i} & \sigma_{R,f_{dc}} & \sigma_{R,V_1} & \sigma_{R,V_1} & \sigma_{R,V_2} \\
\sigma_{S,\alpha} & \sigma_{R,\alpha} & \sigma_a^2 & \sigma_{\alpha\varphi} & \sigma_{\alpha B} & \sigma_{\alpha\theta_i} & \sigma_{\alpha f_{dc}} & \sigma_{\alpha V_1} & \sigma_{\alpha V_1} & \sigma_{\alpha V_2} \\
\sigma_{S,\varphi} & \sigma_{R,\varphi} & \sigma_{\alpha\varphi} & \sigma_\varphi^2 & \sigma_{\varphi B} & \sigma_{\varphi\theta_i} & \sigma_{\varphi f_{dc}} & \sigma_{\varphi V_1} & \sigma_{\varphi V_1} & \sigma_{\varphi V_2} \\
\sigma_{S,B} & \sigma_{R,B} & \sigma_{\alpha B} & \sigma_{\varphi B} & \sigma_B^2 & \sigma_{B\theta_i} & \sigma_{B f_{dc}} & \sigma_{B V_1} & \sigma_{B V_1} & \sigma_{B V_2} \\
\sigma_{S,\theta_i} & \sigma_{R,\theta_i} & \sigma_{\alpha\theta_i} & \sigma_{\varphi\theta_i} & \sigma_{B\theta_i} & \sigma_\theta^2 & \sigma_{\theta f_{dc}} & \sigma_{\theta V_1} & \sigma_{\theta V_1} & \sigma_{\theta V_2} \\
\sigma_{S,f_{dc}} & \sigma_{R,f_{dc}} & \sigma_{\alpha f_{dc}} & \sigma_{\varphi f_{dc}} & \sigma_{B f_{dc}} & \sigma_{f_{dc}}^2 & \sigma_{f_{dc} V_1} & \sigma_{f_{dc} V_1} & \sigma_{f_{dc} V_2} & \sigma_{f_{dc} V_2} \\
\sigma_{S,V_1} & \sigma_{R,V_1} & \sigma_{\alpha V_1} & \sigma_{\varphi V_1} & \sigma_{B V_1} & \sigma_{\theta V_1} & \sigma_{f_{dc} V_1} & \sigma_{V_1 V_1} & \sigma_{V_1 V_1} & \sigma_{V_1 V_2} \\
\sigma_{S,V_2} & \sigma_{R,V_2} & \sigma_{\alpha V_2} & \sigma_{\varphi V_2} & \sigma_{B V_2} & \sigma_{\theta V_2} & \sigma_{f_{dc} V_2} & \sigma_{V_1 V_2} & \sigma_{V_1 V_2} & \sigma_{V_1 V_2}
\end{pmatrix} \quad (26)$$

根据协方差传播定律, 则  $X$  方向的点位精度可表示为

$$\sigma_{P_x^2} = K_{P_x} D_{XX} K_{P_x^T} \quad (27)$$

同理, 可以推出在各量误差之间不相互独立的情况下  $Y$  方向的点位精度, 在此不予赘述。

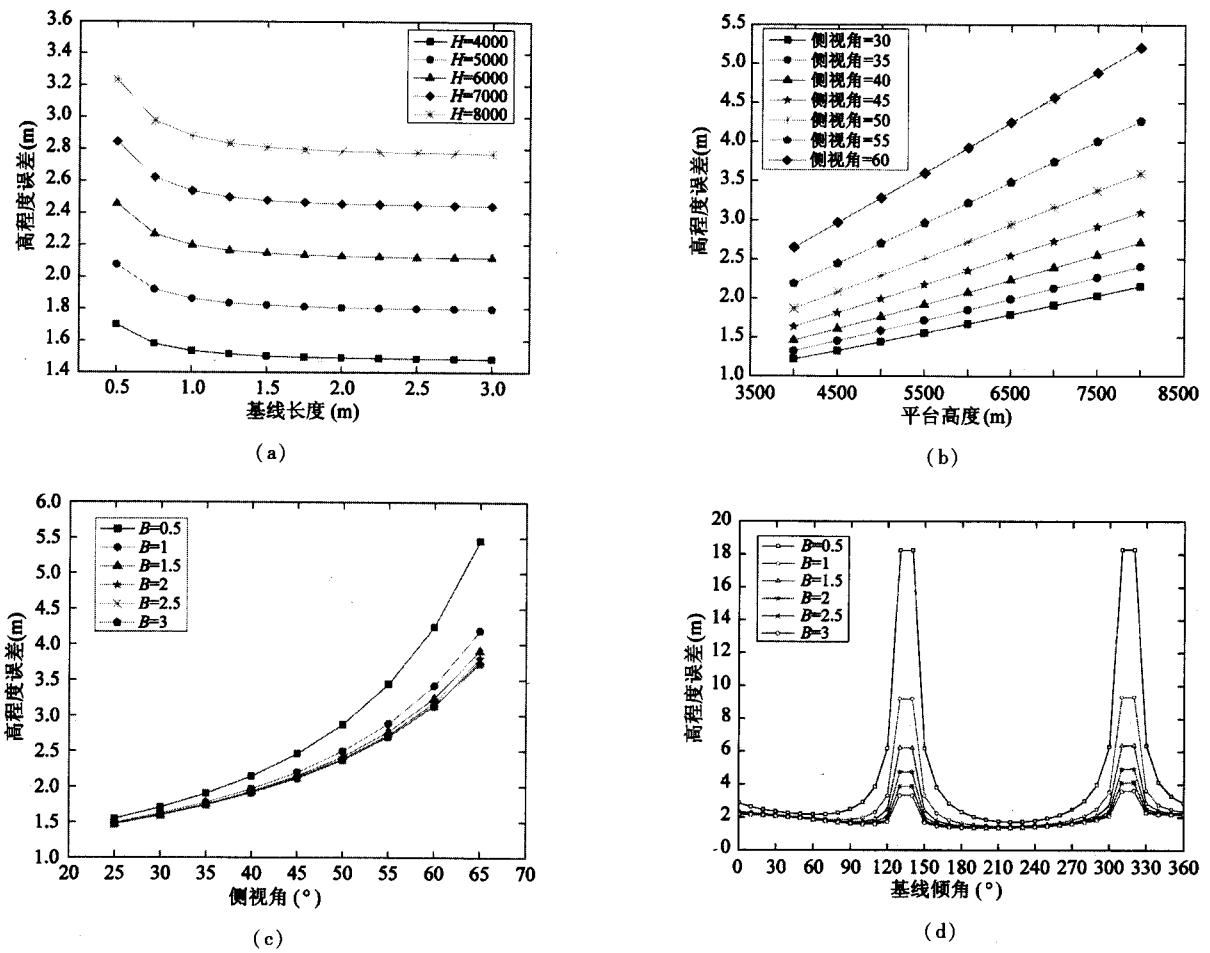
## 4 误差定量分析及实验

### 4.1 误差定量分析

为了便于对误差因素进行定量化分析, 假设各误差要素之间相互独立。表 1 为误差定量分析所用

表 1 机载双天线 InSAR 雷达系统参数及其精度

参数	值
波长	0.031229(m)
相位误差	1(°)
斜距误差	0.5(m)
基线长度误差	0.1(mm)
基线倾角误差	0.008(°)
中心多普勒频率	130(Hz)
中心多普勒精度	3(Hz)
横滚角	0.0205(弧度)
偏航角	0.003655(弧度)
载机速度	150.3234(m/s)
载机北向速度 $V_X$	0.358(m/s)
载机东向速度 $V_Y$	149.876(m/s)
载机地向速度 $V_Z$	0.017(m/s)
POS 定位精度	0.5(m)
POS 测角精度	0.008(°)
POS 测速精度	0.5(m/s)
俯仰角	0.03288(弧度)

图3 基线长度  $B$ 、平台高度  $H$ 、基线倾角  $\alpha$  以及侧视角  $\theta$  与高程误差之间的关系

的机载双天线 InSAR 雷达系统参数及其精度,其中,雷达系统选用 POS/AV510 进行定姿、定位。在此条件下,根据式(15)、(21)、(22)分别定量分析基线长度  $B$ 、平台高度  $H$ 、基线倾角  $\alpha$  以及侧视角  $\theta$  和 DEM 高程误差、点位误差之间的影响关系。

图 3 示出了基线长度  $B$ 、平台高度  $H$ 、基线倾角  $\alpha$  以及侧视角  $\theta$  与高程误差之间的关系。其中(a)表示高程误差随基线长度和平台高度的变化情况( $\alpha = 20^\circ, \theta = 45^\circ$ ),高程误差随着载机平台高度的增大而增大,随着基线长度的增大而减小;(b)表示高程误差随平台高度和侧视角的变化情况( $\alpha = 20^\circ, B = 0.6\text{m}$ ),高程误差随着载机平台高度和侧视角的增大而增大,并且增大的幅度随着彼此的增加而增加;(c)表示高程误差随侧视角和基线长度的变化情况( $\alpha = 20^\circ, H = 6000\text{m}$ ),高程误差随着侧视角的增大而增大,随着基线长度的增大而减小;(d)表示高程误差随基线倾角和基线长度的变化情况( $H = 6000\text{m}, \theta = 45^\circ$ ),高程误差随着基线倾角的增大会出现两次比较大的波动,尤其在区间

[ $120^\circ$   $150^\circ$ ]和区间[ $300^\circ$   $330^\circ$ ]之间,随着基线的减小高程误差急剧增大,在进行雷达系统设计时,不宜选择这两个区间的值作为基线倾角。

图 4 为基线长度  $B$ 、平台高度  $H$ 、基线倾角  $\alpha$  以及侧视角  $\theta$  与  $X$  方向点位误差之间的关系。其中(a)表示  $X$  方向点位误差随基线长度和平台高度的变化情况( $\alpha = 20^\circ, \theta = 45^\circ$ ),高程误差随着载机平台高度的增大而增大,而基线长度的变化不会给  $X$  方向点位误差带来影响;(b)表示  $X$  方向点位误差随平台高度和侧视角的变化情况( $\alpha = 20^\circ, B = 0.6\text{m}$ ), $X$  方向点位误差随着载机平台高度和侧视角的增大而增大,并且增大的幅度随着彼此的增加而增加;(c)表示  $X$  方向点位误差随侧视角和基线长度的变化情况( $\alpha = 20^\circ, H = 6000\text{m}$ ), $X$  方向点位误差随着侧视角的增大而增大,而基线长度的变化不会给  $X$  方向点位误差带来影响;(d)表示  $X$  方向点位误差随基线倾角和基线长度的变化情况( $H = 6000\text{m}, \theta = 45^\circ$ ),基线倾角和基线长度的变化不会给  $X$  方向点位误差带来明显变化。

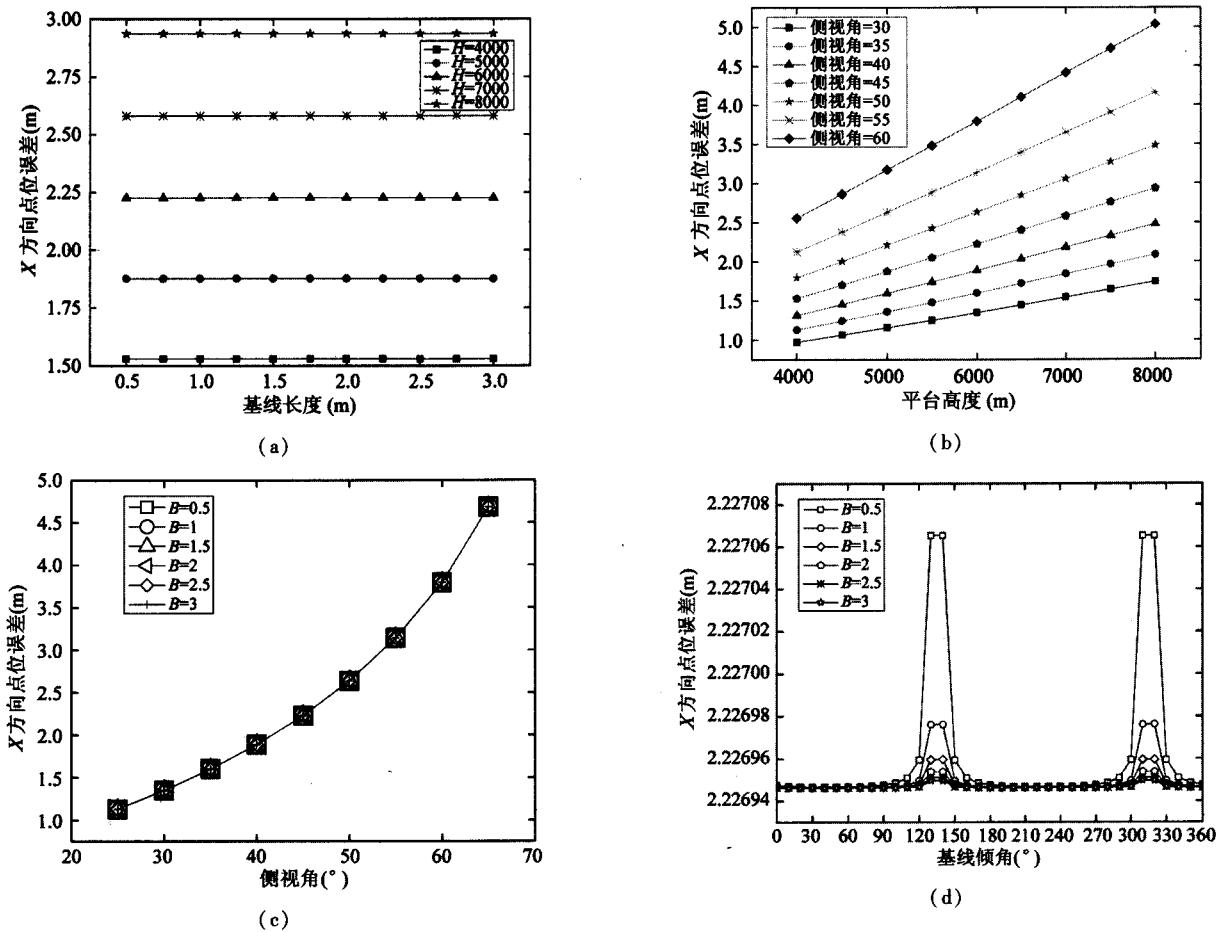
图4 基线长度B、平台高度H、基线倾角 $\alpha$ 以及侧视角 $\theta$ 与X方向点位误差之间的关系

图5为基线长度 $B$ 、平台高度 $H$ 、基线倾角 $\alpha$ 以及侧视角 $\theta$ 与Y方向点位误差之间的关系。其中(a)表示Y方向点位误差随基线长度和平台高度的变化情况( $\alpha = 20^\circ, \theta = 45^\circ$ )，高程误差随着载机平台高度的增大而增大，随着基线长度的增大而减小；(b)表示Y方向点位误差随平台高度和侧视角的变化情况( $\alpha = 20^\circ, B = 0.6\text{m}$ )，Y方向点位误差随着载机平台高度和侧视角的增大而增大，并且增大的幅度随着彼此的增加而增加；(c)表示Y方向点位误差随侧视角和基线长度的变化情况( $\alpha = 20^\circ, H = 6000\text{m}$ )，Y方向点位误差随着侧视角的增大而增大，随着基线长度的增大而减小；(d)表示Y方向点位误差随基线倾角和基线长度的变化情况( $H = 6000\text{m}, \theta = 45^\circ$ )，Y方向点位误差随着基线倾角的增大会出现两次比较大的波动，尤其在区间 $[120^\circ, 150^\circ]$ 和区间 $[300^\circ, 330^\circ]$ 之间，随着基线的减小Y方向点位误差急剧增大，在进行雷达系统设计时，不宜选择这两个区间的值作为基线倾角。

#### 4.2 实验及结果分析

基于以上的误差定量分析，选用我国山东济宁

市某平坦区域的机载双天线X波段InSAR数据作为实验数据，对其生成的高精度DEM进行误差分析。该实验中机载InSAR系统的频率9.6GHz(X波段)、平台高度6165.9858m、基线长度0.557m、基线倾角20.387°。

经复图像配准、相位滤波、相位解缠及地理编码等处理后生成DEM。为了评估DEM的精度，选择了39个实测的GPS控制点与InSAR生成的DEM进行对比分析，从而得到DEM的高程中误差以及平面点位中误差。

表2列出了利用地面检核点检测的精度统计表，统计了JH01~JH39共39个检测点，对检测点的点位误差和高程误差进行了统计分析。图6为X方向和Y方向误差分布图，图7为实测高程与InSAR高程误差统计曲线图。表2中X方向中误差达到 $\pm 3.547\text{m}$ ，Y方向中误差达到 $\pm 9.300\text{m}$ ，高程中误差达到 $\pm 2.584\text{m}$ ，这与误差定量分析的结果相一致，该结果和文献[20]采用三维重建模型进行外定标的精度相一致。但是Y方向误差较大，在9m上下浮动，其均值为9.149m，这可能是由于GPS记

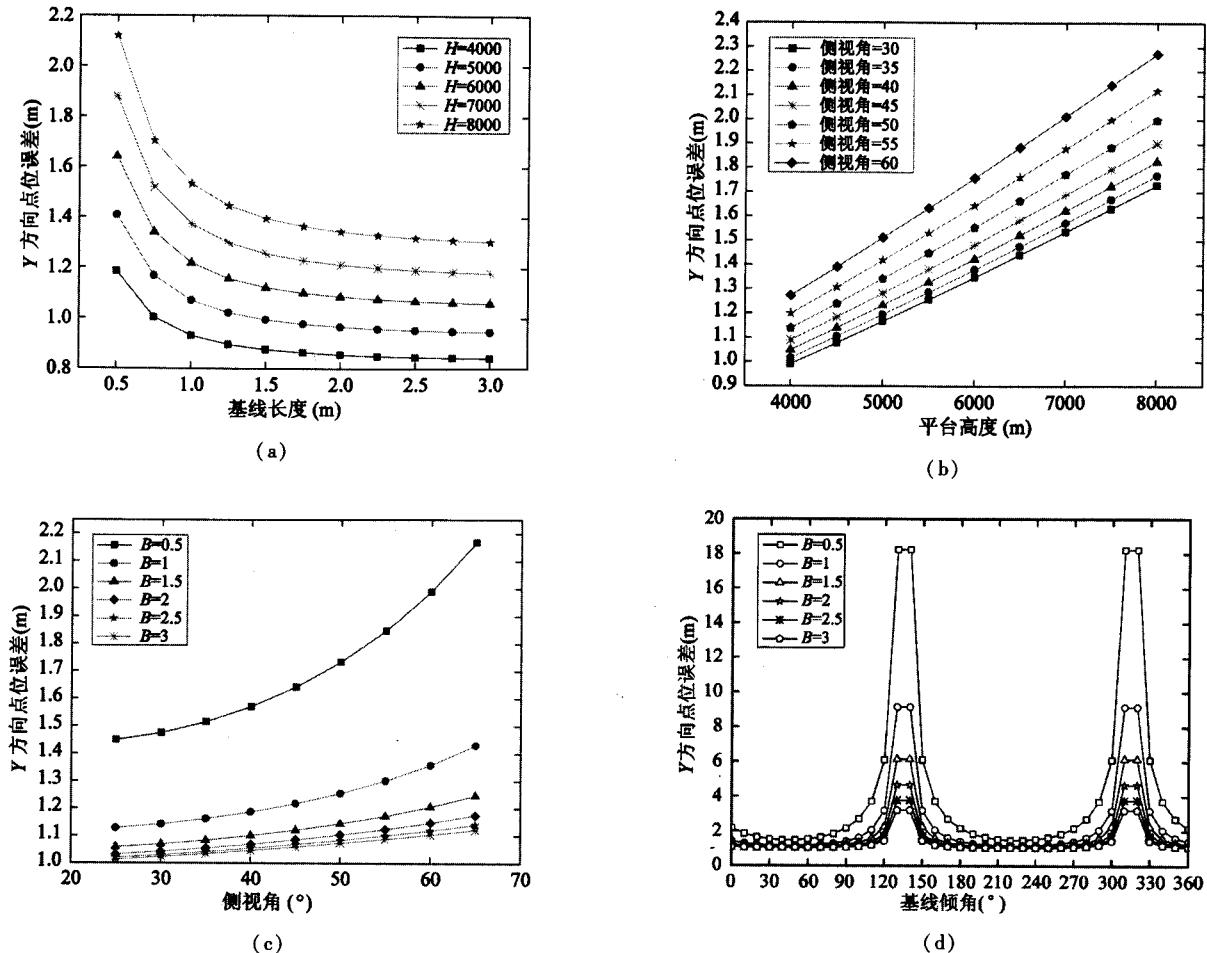
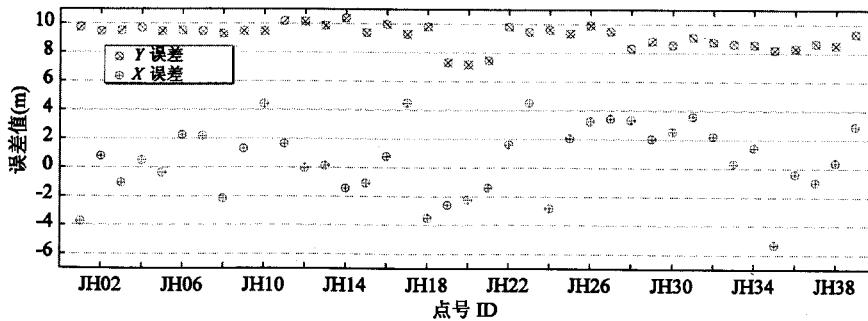
图 5 基线长度  $B$ 、平台高度  $H$ 、基线倾角  $\alpha$  以及侧视角  $\theta$  与  $Y$  方向点位误差之间的关系

表 2 利用地面检核点检测 DEM 精度统计表(单位:m)

误差类型	$X$ 方向误差	$Y$ 方向误差	点位中误差	高程误差
误差均值	2.078	9.149	---	1.763
中误差	$\pm 3.547$	$\pm 9.300$	$\pm 9.935$	$\pm 2.584$

图 6  $X$  和  $Y$  方向误差分布图

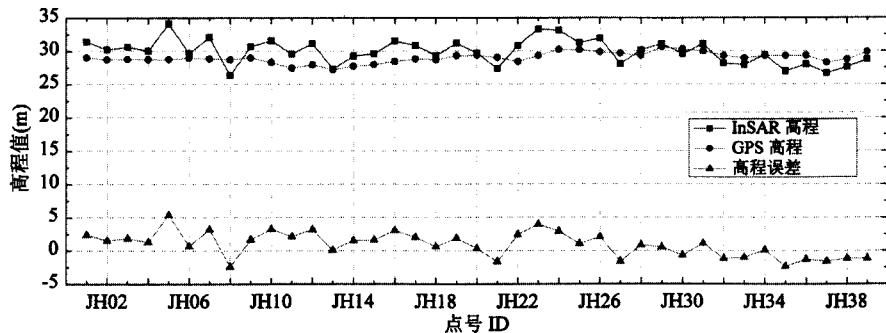


图 7 实测高程与 InSAR 高程误差统计曲线图

录的载机轨迹与图像点位没有精确对准造成的系统误差<sup>[20]</sup>。

## 5 结论

本文结合机载双天线 InSAR 正侧视成像模型和定位模型,分析讨论了机载双天线 InSAR 数据处理中存在的影响 DEM 精度的主要因素,并且对这些因素进行了误差分析。最后利用机载双天线 InSAR 数据进行了实验,并对其生成的高精度 DEM 进行了误差分析。通过机载双天线 InSAR 数据处理中的误差分析以及实验结果分析,可以得出如下结论:

(1) DEM 误差随着平台高度和侧视角的增大而增大;高程误差和 Y 方向点位误差随着基线的增大而减小,随着基线倾角的增大会出现两次比较大的波动,尤其在区间 [120° 150°] 和区间 [300° 330°] 之间,随着基线的减小误差急剧增大,在进行雷达系统设计时,不宜选择这两个区间的值作为基线倾角;基线倾角和基线长度的变化不会给 X 方向点位误差带来影响。

(2) 对机载双天线 InSAR 数据进行干涉处理,并对其生成的 DEM 进行误差分析,其结果和误差定量分析的结果相一致,但 Y 方向点位误差较大,这可能是由于 GPS 记录的载机轨迹与图像点位没有精确对准造成的系统误差。

(3) 对机载双天线 InSAR 数据处理进行误差分析,一方面有利于提高 DEM 的高程和点位精度;另一方面,便于机载双天线 InSAR 系统设计以及飞行试验设计,在实际应用中具有很好的实用意义。

**致谢:**感谢中科院电子学研究所提供的机载双天线 InSAR 数据。

## 参考文献

- [1] 黄国满,张继贤,赵争等.机载干涉 SAR 测绘制图应用系统研究.测绘学报,2008,37(3):277-279
- [2] Graham L C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. *Proceedings of IEEE*, 1974, 62(6):763-768
- [3] Zebker H, Goldstein R. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(B5):4993-4999
- [4] Madsen S N, Zebker H A, Martin J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1):246-256
- [5] Zebker H A, Werner C L, Rosen P A, et al. Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4):823-836
- [6] Wilkinson A J, Datcu M. Interferometric SAR topographic mapping, a Bayesian model-based approach. In: *Proceedings of the Communications and Signal*, Grahams-town, South Africa, 1997. 83-88
- [7] Wimmer C, Siegmund R, Schwabisch M, et al. Generation of high-resolution DEMs of the Wadden Sea with airborne interferometric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5):2234-2245
- [8] Thomas M C. Topographic mapping in the equatorial belt using dual-frequency airborne IFSAR (Geo-SAR). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2008, 8:939-944
- [9] Li X P, Baker A B, Hutt T. Accuracy of airborne IFSAR mapping. In: *Proceedings of the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXII International Congress, Washington, USA. 2002
- [10] Rombach M, Moreira J. Description and applications of the multi-polarized dual band OrbiSAR-1 InSAR sensor. In: *Proceedings of the International Radar Conference*, Adelaide, Australia, 2003. 245-250
- [11] Xiang M, Wu Y, Li S, et al. Introduction on an experi-

- mental airborne InSAR system. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005. 4809-4812
- [12] Sun L, Zhang C, Hu M. Performance analysis and data processing of the airborne X-Band InSAR system. In: Proceedings of the 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007. 541-545
- [13] 李振洪, 刘经南, 许才军. InSAR 数据处理中的误差分析. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(1): 72-76
- [14] 刘国林, 郝晓光, 薛怀平等. 影响 InSAR 测高精度因素的相关性分析. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(1): 55-58
- [15] 孙造宇, 梁甸农, 张永胜. 星载 InSAR 系统 DEM 重建及其误差分析. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1336-1340
- [16] 张磊, 伍吉仓, 陈艳玲. InSAR 高程模型及其精度分析. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(2): 108-111, 119
- [17] Lou L, Liu S, Tang X, et al. Accuracy analysis of airborne InSAR system based on DGPS/IMU. In: Proceedings of the 2009 the 6th International Symposium on Digital Earth, Beijing, China, 2009. 042242175
- [18] 张薇, 向茂生, 吴一戎. 基于正侧视模型的机载双天线干涉 SAR 外定标方法. 遥感技术与应用, 2008, 3(23): 346-350
- [19] Ramon F. Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis. New York/Boston/Dordrecht/London/Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002. 95-98
- [20] 张薇, 向茂生, 吴一戎. 基于三维重建模型的机载双天线干涉 SAR 外定标方法及实现. 遥感技术与应用, 2009, 1(24): 83-87

## Error analysis of high-precision DEM generated from airborne dual-antenna interferometric SAR data

Sun Zhongchang, Guo Huadong, Li Xinwu

(Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

### Abstract

Based on the bore-sight imaging model of an airborne dual-antenna interferometric synthetic aperture radar (InSAR), the paper analyses the main factors affecting the digital elevation model (DEM)' elevation error and point error in airborne dual-antenna InSAR data processing, including the platform height, slant range, phase, baseline length, baseline angle, center Doppler frequency, and the carrier aircraft attitude, and emphatically investigates the influences of the platform height, baseline length, baseline angle, and the look angle on DEM errors. The airborne dual-antenna X-band InSAR data was used to conduct the interferometric experiment, and the DEM was obtained and its error analysis was performed. The experiment and the analysis show that the data processing results are consistent with the quantitative error analysis. It is concluded that the error analysis of airborne dual-antenna InSAR data processing is great significance in practice because it can help to improve the DEM accuracy and help to design an airborne dual-antenna InSAR system and its flight test.

**Key words:** airborne interferometric synthetic aperture radar, dual-antenna, digital elevation model (DEM), error analysis, error propagation

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>