

毫米波三基线 InSAR 系统误差校正和信号分析

潘舟浩^{*①②③} 刘波^{①②③} 李道京^{①②} 乔明^{①②}

^①(微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^③(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 该文研究了毫米波三基线 InSAR 系统误差校正问题, 给出了系统误差校正方案, 以实现三通道信号间的幅相一致性。分析了脉冲压缩处理的效果、通道间的干扰影响、系统相位稳定性、慢时间频谱、幅相一致性程度。给出了三基线干涉测角去模糊的方法以及地面测试实验方案。地面实测数据的处理和分析结果, 验证了该文方法的有效性, 并检验了该毫米波三基线 InSAR 的系统性能。

关键词: InSAR; 误差校正; 信号分析; 干涉测角; 毫米波雷达

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)10-2464-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00028

Millimeter Wave Three Baseline InSAR System Error Correction and Signal Analysis

Pan Zhou-hao^{①②③} Liu Bo^{①②③} Li Dao-jing^{①②} Qiao Ming^{①②}

^①(National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Beijing 100190, China)

^②(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper focuses on the system error correction of a millimeter-wave three-baseline InSAR. The system error correction scheme is presented, in order to achieve the signal amplitude and phase consistency between three channels. The effect of pulse compression, the impact of interference between channels, system phase stability, the slow time spectrum, amplitude and phase consistency level are analyzed. The unambiguous interferometric angle method based on three-baseline and the experiment on ground is presented. The effectiveness of the method proposed and the validity of the performance of millimeter-wave three-baseline InSAR are indicated by real data results.

Key words: InSAR; Error correction; Signal analysis; Interferometric angle; Millimeter wave radar

1 引言

与激光、红外和可见光谱段相比, 毫米波段的电磁波对云雾和烟尘有较强的穿透能力, 毫米波 SAR 和 InSAR 具有较强的全天候全天时地对地观测性能, 已得到广泛的研究^[1-4]。除应用于基础测绘领域外, 由于毫米波对植被的穿透能力远小于厘米波, 特别适于提取观测目标的表面信息, 当毫米波 InSAR 和长波段 InSAR 结合时, 可以更准确地测量植被厚度并获取生物蓄积量信息, 在林业监测也具有广阔的应用前景。

与厘米波段相比, 毫米波 SAR 更易于实现超高

分辨率成像, 在同样长度的交轨干涉基线下毫米波 InSAR 也更容易实现高精度的高程测量, 但其较短波长形成的相位缠绕会产生严重的高程模糊问题, 为此需考虑使用多基线干涉测量技术^[5-7]。

和普通的 2 维成像 SAR 不同, 具有 3 维成像能力的 InSAR 要求具有很高的相位测量精度^[8], 这对系统信号的相干性和通道间的幅相一致性提出了很高的要求。毫米波信号的相位噪声较高, 为使毫米波 InSAR 系统获得高质量的相干信号, 需采用低相位噪声频率源和固态功率放大器。与此同时, 为解决宽带信号通道间的幅相一致性问题, 可采用毫米波开关完成不同通道射频信号的切换并使用一路接收机完成宽带信号接收, 最后再利用数字技术实施宽带系统补偿。

该文研究了毫米波三基线 InSAR 系统误差校

2011-01-12 收到, 2011-07-12 改回

国家 863 计划项目 (2009AA12Z103) 和国家 973 计划项目 (2009CB72400) 课题资助

*通信作者: 潘舟浩 stronger_pzh@163.com

正问题，给出了地面测试实验方案，介绍了地面实测数据的处理和分析结果。

2 系统描述

毫米波三基线 InSAR 工作原理如图 1 所示，其中 a_1, a_2, a_3 表示 3 个天线， R 表示斜距， H 表示载机高度， θ 表示天线视角， z 表示 P 点的高度。

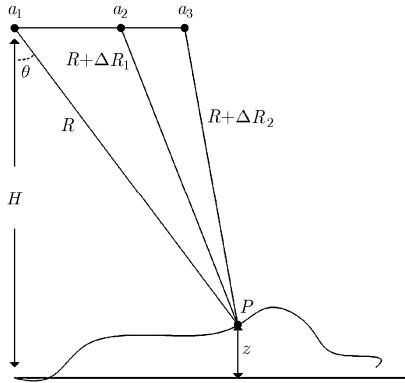


图 1 毫米波三基线 InSAR 工作示意图

毫米波三基线 InSAR 系统组成如图 2 所示。为使系统简化并保证宽带信号通道间的幅相一致性，系统采用毫米波开关组合利用时分复用单接收机技术完成信号接收，系统工作在一发三收模式，即天线 1 始终发射 LFM 信号，天线 1，天线 2，天线 3(以下简称 a_1, a_2, a_3) 轮流接收。为使毫米波 InSAR 系统获得高质量的相干信号，本文中的雷达系统采用低相位噪声频率源和固态功率放大器。毫米波三基线 InSAR 参数如表 1 所示。

由于波长较短，毫米波 InSAR 存在较严重的测角模糊问题，本文毫米波 InSAR 不同基线下的测角不模糊范围如表 2 所示。

其中 0.6 m 和 0.4 m 基线以 3 和 2 互质，根据中国余数定理，可将 0.6 m 和 0.4 m 基线的测角不模糊范围扩大为原来的 3 倍和 2 倍，分别为 $-1.4943^\circ \sim 1.5033^\circ$ 和 $-1.4920^\circ \sim 1.5058^\circ$ ，此时系统的测角不模糊范围已和天线波束宽度相等，故该文 InSAR 可较好地解决高程模糊问题。

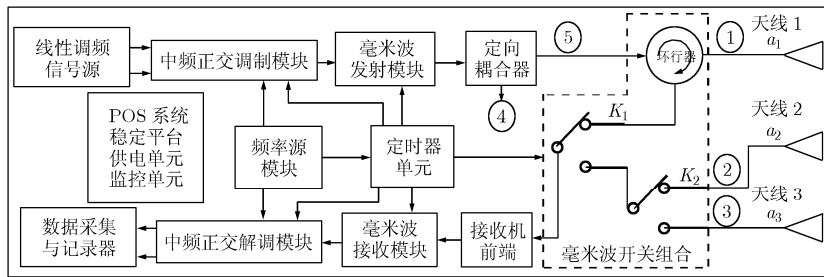


图 2 毫米波三基线 InSAR 系统组成和测试框图

表 1 InSAR 系统参数

中心频率 f_0	35 GHz	基线与水平方向夹角 α	0°
基线长度 B	1 m, 0.6 m, 0.4 m	系统带宽	180 MHz
天线视角 θ	35°	波束宽度	$3^\circ \times 3^\circ$
AD 采样率	600 MHz	脉冲宽度	12 μ s
系统 PRF	12 kHz	单通道 PRF	4 kHz
方位向带宽	500 Hz	距离向分辨率	0.83 m

表 2 不同基线测角不模糊范围

天线	基线长度(m)	范围($^\circ$)
天线 1 和天线 2	0.6	$-0.4981 \sim -0.5011$
天线 2 和天线 3	0.4	$-0.7460 \sim -0.7529$
天线 1 和天线 3	1	$-0.2992 \sim -0.3003$

3 系统误差校正方案

由于硬件的非理想特性，雷达收发系统内部各器件及传输通道会引入系统误差。系统误差首先体现在距离向，主要表现为回波信号距离向幅度和相位的畸变，其次表现在通道间的幅相不一致，进一步会影响干涉测量高程精度，因此必须对系统误差进行校正。

3.1 距离向幅相误差提取

距离向幅相误差提取在系统测试状态下进行，将图 2 中定向耦合器的输出端口⑤改接匹配负载，将 3 天线与测试端口①，②，③断开。

测试过程如下：将从定向耦合器耦合端口④获取的发射信号经过衰减以后注入测试端口①，测试端口②，③无信号输入。开关自动切换接收天线，当开关切换到 a_1 接收状态时，接收到的信号即为携带通道 1 系统误差的信号，记为 s_1 ；当开关切换到 a_2

接收状态时,此时 a_2 中没有信号,接收到的信号即为 a_1 对 a_2 的干扰信号,记为 s_{12} ;当开关切换到 a_3 接收状态时,此时 a_3 中没有信号,接收到的信号即为 a_1 对 a_3 的干扰信号,记为 s_{13} 。同理,将信号分别注入测试端口②或者测试端口③,此时其余两个测试端口无信号输入。

测试端口与接收信号的对应关系如表3所示。其中, s_i 表示携带通道 i 系统误差的信号; s_{ij} 表示 a_i 对 a_j 的干扰信号($i, j = 1, 2, 3$)。关于干扰信号的影响将在4.2节中详细讨论。

表3 测试端口与接收信号的关系

端口	a_1 状态	a_2 状态	a_3 状态
测试端口①	s_1	s_{12}	s_{13}
测试端口②	s_{21}	s_2	s_{23}
测试端口③	s_{31}	s_{32}	s_3

s_1, s_2, s_3 携带了由线性调频信号源到数据采集记录器整个信号路径中各个环节(不涉及天线但包括毫米波开关)引入的系统误差。实际距离向幅相误差提取过程中,为减少噪声的影响,在频域将每个通道的多个脉冲信号取平均后提取幅相误差。

取平均之后的通道1,通道2,通道3信号定义为 sm_1, sm_2, sm_3 。以理想线性调频信号为参考,可提取不同通道的距离向幅相误差,理想线性调频信号参数如表1所示。

3.1.1 系统幅频误差的提取 sm_1 的幅频特性可以由理想信号的幅频特性与通道1系统误差的幅频特性相乘来表示^[9],即

$$A'_1(f) = A(f)A_{\text{delta}1}(f) \quad (1)$$

其中 $A'_1(f)$ 表示 sm_1 的幅频特性, $A(f)$ 表示理想信号的幅频特性, $A_{\text{delta}1}(f)$ 表示通道1系统误差的幅频特性。因此,可以得到通道1系统误差的幅频特性,在频域的表达式即为

$$A_{\text{delta}1}(f) = \frac{A'_1(f)}{A(f)} \quad (2)$$

同理可得,通道2和通道3的系统误差,在频域的表达式即为

$$A_{\text{delta}2}(f) = \frac{A'_2(f)}{A(f)} \quad (3)$$

$$A_{\text{delta}3}(f) = \frac{A'_3(f)}{A(f)} \quad (4)$$

其中 $A'_2(f), A'_3(f)$ 分别表示 sm_2, sm_3 的幅频特性; $A_{\text{delta}2}(f), A_{\text{delta}3}(f)$ 分别表示通道2和通道3系统误差的幅频特性。

3.1.2 系统相频误差的提取 sm_1 的相频特性可以由理想信号的相频特性与通道1系统误差的相频特性相加来表示,即

$$\phi'_1(f) = \phi(f) + \phi_{\text{delta}1}(f) \quad (5)$$

其中 $\phi'_1(f)$ 表示 sm_1 的相频特性, $\phi(f)$ 表示理想信号的相频特性, $\phi_{\text{delta}1}(f)$ 表示通道1系统误差的相频特性。因此,可以得到通道1系统误差的相频特性,在频域的表达式即为

$$\phi_{\text{delta}1}(f) = \phi'_1(f) - \phi(f) \quad (6)$$

同理可得,通道2和通道3系统误差的相频特性,在频域的表达式即为

$$\phi_{\text{delta}2}(f) = \phi'_2(f) - \phi(f) \quad (7)$$

$$\phi_{\text{delta}3}(f) = \phi'_3(f) - \phi(f) \quad (8)$$

其中 $\phi'_2(f), \phi'_3(f)$ 分别表示 sm_2, sm_3 的相频特性; $\phi_{\text{delta}2}(f), \phi_{\text{delta}3}(f)$ 分别表示通道2和通道3系统误差的相频特性。

3.2 距离向幅相误差校正

首先,利用已经获取的幅频误差函数和相频误差函数来构建误差校正函数,如式(9)

$$H_{\text{delta}}(f) = A_{\text{delta}}(f)\exp\{j\phi_{\text{delta}}(f)\} \quad (9)$$

假设回波信号的频域表达式为

$$S_{\text{echo}}(f) = A_{\text{echo}}(f)\exp\{j\phi_{\text{echo}}(f)\} \quad (10)$$

则幅相校正后的信号为

$$S_{\text{corr}}(f) = \frac{S_{\text{echo}}(f)}{H_{\text{delta}}(f)} = \frac{A_{\text{echo}}(f)}{A_{\text{delta}}(f)} \cdot \exp\{j[\phi_{\text{echo}}(f) - \phi_{\text{delta}}(f)]\} \quad (11)$$

针对每一个通道,分别使用对应的误差校正函数进行校正。经实测数据验证,此方法能有效消除因系统内部各器件及传输通道而引入的误差。

3.3 通道间幅相误差校正

由于在提取每个通道幅相误差时,均使用同一个参考信号 $A(f)\exp\{j\phi(f)\}$,因此每个通道使用对应的幅相校正函数进行校正后,将与参考信号一致,同时实现了通道间的幅相一致性,完成了通道间的幅相误差校正。

4 系统误差校正后的信号分析

4.1 脉冲压缩处理

下面主要对通道1信号幅相校正前后进行匹配脉冲压缩处理,分析脉冲压缩结果的主要参数,检验幅相误差校正方案的有效性。通道2和通道3分析方法相同,仅给出脉冲压缩结果的主要参数。

从图3中可以直观地看出,不进行幅相误差校正,脉冲压缩存在严重的失配问题;幅相校正后脉冲压缩结果接近理想信号的脉冲压缩结果。进一步

计算可得，通道 1，通道 2，通道 3 幅相误差校正后的峰值旁瓣比依次为-13.23 dB，-13.25 dB，-13.23 dB，积分旁瓣比依次为-9.63 dB，-9.65 dB，-9.64 dB。

尽管通常毫米波系统的相位噪声电平较高，但由于本文中毫米波雷达采用了低相位噪声频率源和固态发射机，实际信号经过有效的幅相校正处理，其脉冲压缩结果虽然远区旁瓣较高，但与理想情况相比，其峰值旁瓣比和积分旁瓣比的变化不大。

4.2 通道间干扰分析

在理想情况下，当 a_1 处于接收状态时，接收通道只接收到 a_1 中的回波，但是在实际工作中，由于开关的隔离度有限，导致通道间信号相互干扰， a_2 和 a_3 对 a_1 的干扰信号将混入通道 1 中。同理，在 a_2 或 a_3 处于接收状态时，也会受到另外两个天线的干扰。

因此，为了分析干扰信号对通道 1，通道 2，通道 3 信号的影响，同时考察毫米波开关的隔离度，以通道 1 为例做以下分析。将系统测试状态下提取

的通道 1 信号 s_1 和干扰信号 s_{21}, s_{31} 看作 a_1 中的回波和 a_2 及 a_3 对 a_1 的干扰信号，分别使用通道 1 的幅相误差校正函数进行校正，然后再进行脉冲压缩处理。通道 2 和通道 3 的处理方法相同，仅给出结果。

由图 4 可以看出，干扰信号脉冲压缩峰值点位置会有一定的偏移，并且其能量很小，对各个通道的的影响不大。经计算可得开关的隔离度大于 24 dB，与开关的隔离度标称值相符。

4.3 系统相位稳定性

为分析系统相位稳定性，从每个通道取出 2048 个脉冲信号，幅相校正后进行脉冲压缩处理，然后考察方位向脉冲压缩峰值点相位的变化情况。

由图 5 和表 4 可知，每个通道的相位均值很小，接近于零，表明每个通道相位误差校正效果较好，同时也保证了 3 个通道的相位一致性；每个通道的相位均方差也较小，表明系统具有较高的相位稳定性。

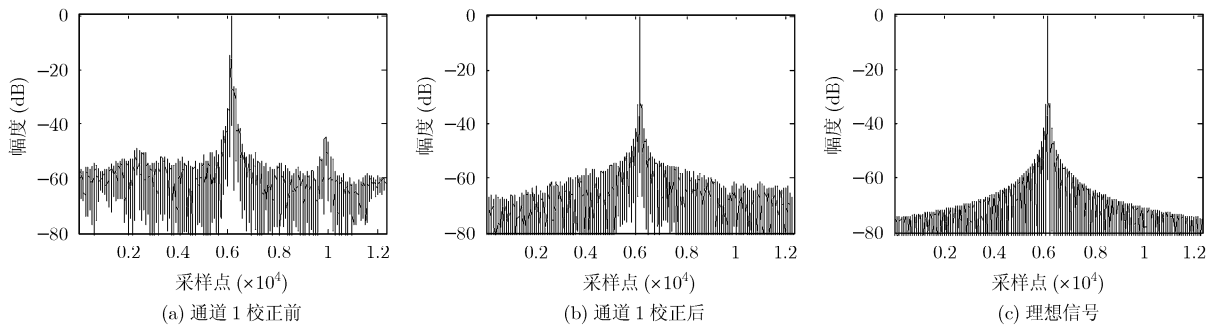


图 3 通道 1 信号幅相误差校正前后脉冲压缩结果与理想信号的对比

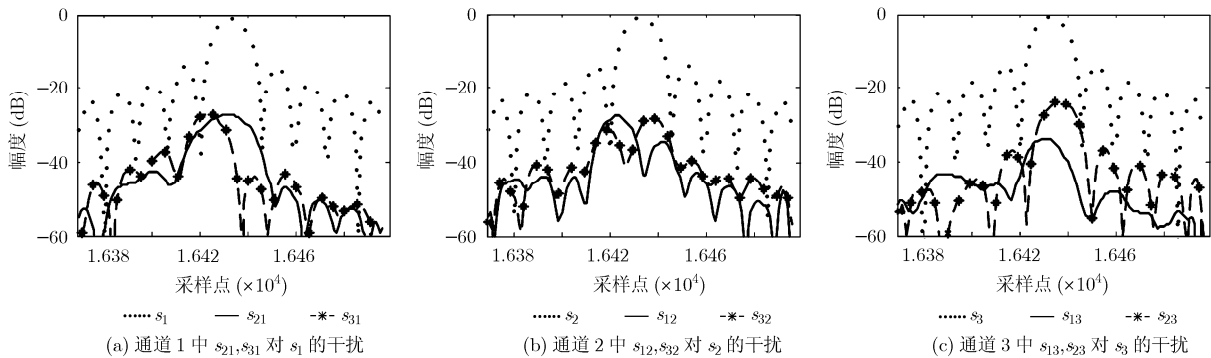


图 4 各个通道干扰信号的影响

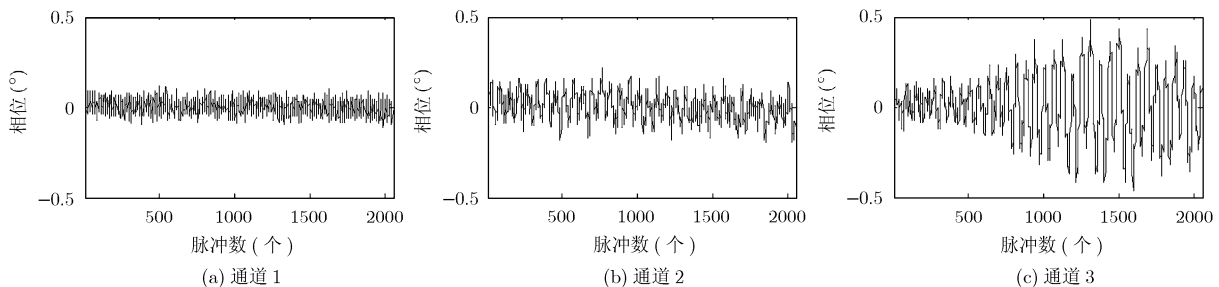


图 5 各个通道脉冲压缩峰值点相位的变化情况

表 4 相位变化均值和均方根误差

	通道 1	通道 2	通道 3
均值($^{\circ}$)	-6.4785×10^{-6}	1.2230×10^{-6}	-2.8569×10^{-6}
均方差($^{\circ}$)	0.0372	0.0679	0.1683

4.4 慢时间频谱分析

从图 5 中,可以看出信号相位在慢时间方向有较为明显的调制,对 3 个通道信号慢时间频谱进行分析,可检查系统的杂散和谐波电平,通道 3 信号调制最明显,其慢时间频谱如图 6 所示。

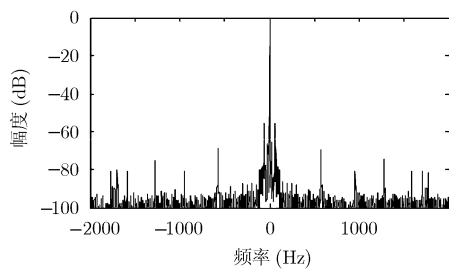


图 6 通道 3 信号慢时间频谱

从图 6 可看出,在本系统方位带宽 500 Hz 之内,系统的杂散和谐波电平优于 -55 dB,在方位带宽之外,系统的杂散和谐波电平优于 -70 dB。

4.5 幅相一致性分析

本文中的毫米波雷达为实现通道间信号的幅相一致性,采用了毫米波开关组合完成不同天线的信号切换并使用一路接收机在时分复用方式下完成宽带信号接收,最后用幅相误差校正函数进行校正。

从图 7 可以看出,由于 3 个通道的系统误差不同,

每个通道需要采用不同的幅相校正函数进行校正。

对幅相校正后的信号进行分析, a_1 与 a_2 的干涉相位均值为 $-7.7015 \times 10^{-6} (^{\circ})$; a_1 与 a_3 的干涉相位均值为 $-3.6217 \times 10^{-6} (^{\circ})$; a_2 与 a_3 的干涉相位均值为 $4.0799 \times 10^{-6} (^{\circ})$ 。 a_1 与 a_2 的幅度差均值为 -1.4507×10^{-7} ; a_1 与 a_3 的幅度差均值为 -1.2137×10^{-6} ; a_2 与 a_3 的幅度差均值为 -1.0687×10^{-6} 。

上述分析结果表明,幅相误差校正后,系统 3 个通道已经具有良好的幅相一致性。

5 地面测试实验

InSAR 的核心功能是干涉测角,将本文毫米波三基线 InSAR 的 3 个天线水平放置,可利用地面目标检验系统的测角功能并实施距离标定。地面测试实验情况如图 8 所示,其中, O 点表示雷达中心位置,目标 A, B, C 是位于雷达波束宽度内 3 个较孤立的建筑物,可近似看作 3 个孤立的点目标。以谷歌地图中测得的目标距离和角度为参考值(如表 5 所示),用回波数据测得的距离和角度与参考值进行比较和分析。

由于目标 A, B, C 不是理想的点目标,因此雷达回波脉冲压缩后并不能形成 3 个孤立的峰值点,实际回波数据脉冲压缩后的结果如图 9 所示,根据系统参数计算强散射点的距离,以误差最小为原则,排除干扰回波,可以得到目标 A, B, C 与雷达中心位置 O 之间的距离分别为 3676.8 m, 3542.3 m, 3133.3 m,与表 5 所列的参考值之间的误差分别为 -3.2 m, -8 m, 3.3 m。对该误差进行距离标定,可完成距离标定工作。

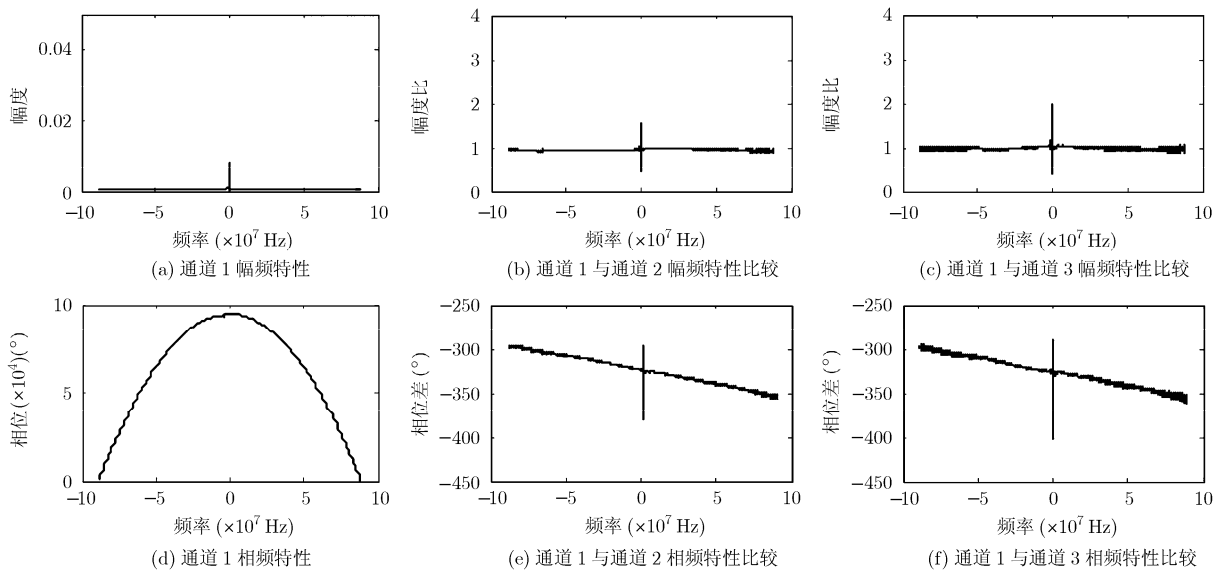


图 7 通道 1 幅相校正函数和通道 1 与通道 2, 通道 3 幅相校正函数的比较



图 8 地面测试实验情况

表 5 谷歌地图中获取的距离和角度参数

	距离(m)	角度(°)
OA	3680	$\angle BOA$ 1.35
OB	3550	$\angle BOC$ -0.37
OC	3130	

根据表 1 中的系统参数可知，雷达的距离向分辨率为 0.83 m，但系统天线因水平放置， 35° 视角转为斜视角，1 m 的基线会导致目标到天线 0.57 m 的距离差，二者可以比拟，因此距离向需要平移配准。配准采用了插值后做包络互相关的方法^[10]，插值倍数为 16。图 10 仅给出了对目标 B 配准后的脉冲压缩结果，对目标 A、C 的处理情况相同。

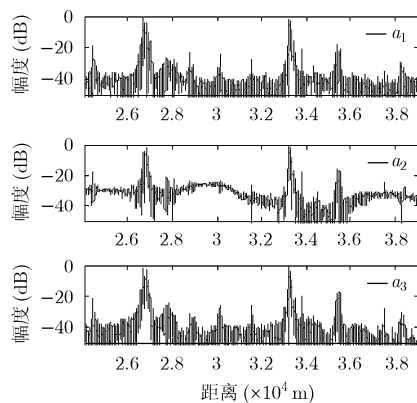


图 9 各通道回波脉冲压缩结果

配准完成后以目标 B 为参考点，即可通过共轭相乘的方法得到干涉相位，并获得干涉测角结果，计算得到的相对角度如表 6 所示。由于目标非理想点目标，表 6 的结果为多散射点的统计平均。

表 6 干涉测角结果

	$\angle BOA$ (°)	$\angle BOC$ (°)
天线 12	1.2821	-0.3752
天线 23	1.1867	-0.3923
天线 31	1.2440	-0.3821

比较表 5 和表 6 中的分析结果，可知雷达干涉测角结果和谷歌地图给出的角度接近，验证了本文毫米波三基线 InSAR 系统的干涉测量性能。

6 结束语

该文研究了毫米波三基线 InSAR 系统误差校正问题，给出了距离向幅相误差校正方案，以实现 3 个通道信号间的幅相一致性。分析了脉冲压缩处理的效果、通道间的干扰影响、系统相位稳定性、慢时间频谱、幅相一致性程度。本文给出的 InSAR 系统误差校正、地面测试实验方案对 InSAR 系统的研制具有指导意义。

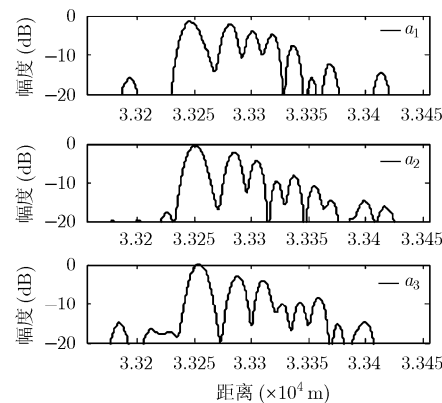


图 10 配准后目标 B 在各个通道中的脉冲压缩结果

参考文献

[1] Magnard C, Meier E, Ruegg M, *et al.* High resolution millimeter wave SAR interferometry[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Barcelona, Spain, July 23-27, 2007: 5061-5064.

[2] Essen H, Fuchs H H, and Pagels A. High resolution millimeterwave SAR for the remote sensing of wave patterns[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Barcelona, Spain, July 23-27, 2007: 963-966.

[3] Essen H, Hiigelen M, Johannes W, *et al.* High resolution millimetre wave measurement radars for ground based SAR and ISAR imaging[C]. Radar Conference, Rome, May 26-30, 2008: 1-5.

[4] Chen Juan. Imaging study for MMW high squint azimuth scan SAR[C]. 2nd Asian-Pacific Synthetic Aperture Radar Conference (APSAR2009), Xi'an, China, Oct. 26-30, 2009:

- 354-356.
- [5] Mao Zhi-jie, Liao Gui-sheng, Liu Xiang-yang, *et al.* An eigenspace-like algorithm for multibaseline InSAR phase unwrapping[C]. 2nd Asian-Pacific Synthetic Aperture Radar Conference (APSAR2009), Xi'an, China, Oct. 26-30, 2009: 779-783.
- [6] Zhang Hong-min, Jin Guo-wang, Xu Qing, *et al.* Simulation of interferograms for multi-baseline InSAR study[C]. 2nd Asian-Pacific Synthetic Aperture Radar Conference (APSAR2009), Xi'an, China, Oct. 26-30, 2009: 408-411.
- [7] Magnard C, Meier E, Small D, *et al.* Processing of MEMPHIS millimeter wave multi-baseline InSAR data[C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Honolulu Hawaii USA, July 25-30, 2010: 4302-4305.
- [8] 王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 32-63.
- [9] 矫伟, 梁兴东, 丁赤飏. 基于内定标信号的合成孔径雷达系统幅相误差的提取和校正[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(12): 1883-1886.
- Jiao Wei, Liang Xing-dong, and Ding Chi-biao. Extraction and correction of SAR amplitude and phase errors based on internal calibration signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(12): 1883-1886.
- [10] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 297-301.
- 潘舟浩: 男, 1986 年生, 硕博连读生, 研究方向为雷达信号与信息处理.
- 刘 波: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号与信息处理.
- 李道京: 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为雷达系统和雷达信号处理.