

文章编号: 1007-4619 (2002)06-0475-06

# 极化 SAR 干涉测量模拟研究

陈小英<sup>1,2</sup>, 洪 峻<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 电子学研究所, 北京 100080;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 极化 SAR 干涉测量将极化测量技术和干涉测量技术巧妙地结合, 能够提高干涉测量精度, 尤其是在植被覆盖的情况下, 不仅能够测量地表地形, 而且使得估计植被高度成为可能。因此, 近几年来国际上对极化 SAR 干涉测量技术的研究越来越重视, 极化 SAR 干涉测量已成为 SAR 应用技术发展的重要方向。通过模拟技术深入研究极化 SAR 干涉测量理论和方法, 并提出了一种新的极化 SAR 干涉测量改进算法, 模拟实验结果表明, 该算法可以进一步提高测量精度。

**关键词:** 合成孔径雷达(SAR); 极化 SAR 干涉测量; SAR 极化测量; SAR 干涉测量

**中图分类号:** TP722.6 **文献标识码:** A

## 1 引 言

目前 SAR 干涉测量技术在地形参数提取、微变化检测等许多应用方面取得了很大成功。干涉测量的精度很大程度上取决于形成干涉的两幅图像之间的相关性。引起相关性减小的因素很多, 也很复杂, 特别是在有植被覆盖时, 分辨单元内散射体分布在不同的高度所引起的去相关(体散射去相关)无法通过滤波消除, 造成干涉测量精度大大降低, 使 SAR 干涉的应用受到限制。单极化测量只能获得一种极化状态下目标的散射回波, 而全极化 SAR 近同时发射并同时接收 H、V 极化的脉冲, 对同一目标可以获得 HH、HV、VH、VV 4 幅不同的图像, 用极化 SAR 进行干涉测量, 至少可以得到 16 种极化状态的组合的干涉图。根据极化合成原理, 由一种极化基下的全极化数据可以得到任意椭圆极化基下的极化散射矩阵, 对于极化干涉可以得到任意两种极化状态组合, 从中选择相关性最大的组合来形成干涉图。可见将极化测量技术与干涉测量技术相融合为提高干涉测量精度, 提取植被覆盖下地表地形及估计植被高度提供了可能。因此, 极化 SAR 干涉技术研究已经成为重要的研究方向。

国际上对极化 SAR 干涉测量的研究是最近几年才发展起来的, 研究主要集中于 SAR 极化干涉测量的基本理论和方法<sup>[1,2]</sup>以及初步的实验<sup>[1,3,4]</sup>。相应提出了一些极化干涉的方法, 这些方法主要基于在一定的子空间内寻找使相干系数最大的极化基, 然后将图像转换到该基上求得干涉图。S. R. Cloude(1998)提出了极化干涉最优化和极化干涉相位分解的方法<sup>[1,2]</sup>, 该方法从理论上讲是目前公认的最佳方法。可以预见, 今后极化 SAR 干涉测量的研究将会得到更加深入迅速的发展。

Cloude 的极化干涉方法要求根据目标的极化散射特性来寻找最佳极化基和进行相位分解, 但是在实际应用中不能得到目标的极化散射矩阵, 而只能得到目标散射矩阵的测量数据。如果直接用测量数据进行处理, 则会引入一些非目标散射特性的因素, 从而影响最佳极化基的选取。本文针对这一问题进行了分析研究, 提出了新的改进算法。该算法要求先对散射测量矩阵进行极化定标, 并将测量矩阵中与部分目标无关的相位信息去掉, 然后再进行上述极化干涉处理。本文用模拟的技术手段验证了极化 SAR 干涉测量方法能够测量植被覆盖下地面的 DEM, 实现植被高度估计。实验结果表明, 本文提出的算法能进一步提高测量精度。

收稿日期: 2002-05-01; 修订日期: 2002-06-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“新型成像雷达对地观测机理及地物识别技术(49989001)”资助。

作者简介: 陈小英(1978—)女, 1999年毕业于长春光学精密机械学院电子工程系, 获学士学位。现为中国科学院电子学研究所现代信息技术研究室硕士研究生。2000年起至今从事极化 SAR 干涉技术研究。Email: xiaoying-ch@263.net

本文首先简要叙述了 S. R. Cloude 的极化干涉测量方法,然后详细的介绍了新的改进算法及其理论依据。并对模拟实验及结果进行了分析。

## 2 S. R. Cloude 极化干涉测量方法

本节仅对 S. R. Cloude 提出的极化干涉测量方法进行简要回顾,详细内容请参考[1][2]。全极化雷达测量目标的  $2 \times 2$  复散射矩阵  $[S]$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

为便于表达,将  $[S]$  表示为相干散射矢量  $\underline{k}$ 。考虑目标互易性,有  $S_{HV} = S_{VH}$ ,  $\underline{k}$  可简化为 3 维。对于干涉测量有  $\underline{k}_1, \underline{k}_2$ , 下标表示图像 1 或 2。

$$\underline{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV}, S_{VH} - S_{HV}, 2S_{HV}]^T \quad (2)$$

为得到矢量干涉表达式,定义自协方差矩阵  $[T_{11}]$ 、 $[T_{22}]$  和互协方差矩阵  $[\Omega_{12}]$ 。

$$\begin{aligned} [T_{11}] &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \underline{k}_1 \underline{k}_1^{*T} \\ [T_{22}] &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \underline{k}_2 \underline{k}_2^{*T} \\ [\Omega_{12}] &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \underline{k}_1 \underline{k}_2^{*T} \end{aligned} \quad (3)$$

引入归一化的复矢量  $\underline{\omega}_1$  和  $\underline{\omega}_2$ , 表示两种散射机制;  $\mu_1$  和  $\mu_2$  为  $\underline{k}_1$  和  $\underline{k}_2$  在  $\underline{\omega}_1$  和  $\underline{\omega}_2$  上的投影,表示在这两种散射机制下的散射分量。

$$\mu_1 = \underline{\omega}_1^{*T} \underline{k}_1 \quad \mu_2 = \underline{\omega}_2^{*T} \underline{k}_2 \quad (4)$$

干涉图定义为

$$\mu_1 \mu_2^* = (\underline{\omega}_1^{*T} \underline{k}_1) (\underline{\omega}_2^{*T} \underline{k}_2)^* = \underline{\omega}_1^{*T} [\Omega_{12}] \underline{\omega}_2 \quad (5)$$

相关系数的矢量表示为

$$\gamma = \frac{|\langle \mu_1 \mu_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle \mu_1 \mu_1^* \rangle \langle \mu_2 \mu_2^* \rangle}} = \frac{|\langle \underline{\omega}_1^{*T} [\Omega_{12}] \underline{\omega}_2 \rangle|}{\sqrt{\langle \underline{\omega}_1^{*T} [T_{11}] \underline{\omega}_1 \rangle \langle \underline{\omega}_2^{*T} [T_{22}] \underline{\omega}_2 \rangle}} \quad (6)$$

相关性对于极化有强烈的依赖,因此可以求出一种能产生最大的相关系数的极化状态的组合,即最佳极化基的求解问题。可以通过 Lagrangian 极值法来求解

$$L = \underline{\omega}_1^{*T} [\Omega_{12}] \underline{\omega}_2 + \lambda_1 (\underline{\omega}_1^{*T} [T_{11}] \underline{\omega}_1 - C_1) + \lambda_2 (\underline{\omega}_2^{*T} [T_{22}] \underline{\omega}_2 - C_2) \quad (7)$$

这可归结为两个  $3 \times 3$  复特征值问题,通常特征值  $v = \lambda_1 \lambda_2^*$ ,

$$\begin{aligned} [T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^{*T} [T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] \underline{\omega}_2 &= v \underline{\omega}_2 \\ [T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] [T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^{*T} \underline{\omega}_1 &= v \underline{\omega}_1 \end{aligned} \quad (8)$$

最大相关系数为  $\gamma_{\max} = \sqrt{v_{\max}}$ , 对应的最佳散射分量为  $\mu_{1_{opt}}$  和  $\mu_{2_{opt}}$ 。

相应的最佳干涉图为

$$\mu_{1_{opt}} \mu_{2_{opt}}^* = (\underline{\omega}_{1_{opt}}^{*T} \underline{k}_1) (\underline{\omega}_{2_{opt}}^{*T} \underline{k}_2)^* = \underline{\omega}_{1_{opt}}^{*T} [\Omega_{12}] \underline{\omega}_{2_{opt}} \quad (9)$$

解上述的特征值问题,可得到三个特征值  $v_1 \geq v_2 \geq v_3$ , 对应三对特征矢量

$$\begin{aligned} [T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^{*T} [T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] &= v_1 (\underline{\omega}_{2_1} \underline{\omega}_{2_1}^{*T}) + v_2 (\underline{\omega}_{2_2} \underline{\omega}_{2_2}^{*T}) + v_3 (\underline{\omega}_{2_3} \underline{\omega}_{2_3}^{*T}) \\ [T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] [T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^{*T} &= v_1 (\underline{\omega}_{1_1} \underline{\omega}_{1_1}^{*T}) + v_2 (\underline{\omega}_{1_2} \underline{\omega}_{1_2}^{*T}) + v_3 (\underline{\omega}_{1_3} \underline{\omega}_{1_3}^{*T}) \end{aligned} \quad (10)$$

特征矢量  $\underline{\omega}_{1_j}$  和  $\underline{\omega}_{2_j}$  是一种特殊的正交基,物理上可解释为散射机制之间统计独立,它们各对应三个散射机制,可以形成三个干涉图。

$$\mu_{1_j} \mu_{2_j}^* = (\underline{\omega}_{1_j}^{*T} \underline{k}_1) (\underline{\omega}_{2_j}^{*T} \underline{k}_2)^* = \underline{\omega}_{1_j}^{*T} [\Omega_{12}] \underline{\omega}_{2_j} \quad (11)$$

干涉图之间的相位差反映了不同的散射相位中心间的高度差,可以据此估计植被的高度。

$$\Delta\phi_{ij} = \arg(\mu_{1_j} \mu_{2_j}^*) - \arg(\mu_{1_i} \mu_{2_i}^*) \quad (12)$$

## 3 极化 SAR 干涉测量算法改进

极化 SAR 用于测量目标的散射矩阵  $S$ , 但实际得到的是测量矩阵  $M$ , 其测量模型可表示为:

$$\begin{aligned} M &= Ke^{i\theta} \begin{pmatrix} R_{HH} & R_{HV} \\ R_{VH} & R_{VV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{HH} & T_{HV} \\ T_{VH} & T_{VV} \end{pmatrix} + \\ &\begin{pmatrix} N_{HH} & N_{HV} \\ N_{VH} & N_{VV} \end{pmatrix} = Ke^{i\theta} RST + N \end{aligned} \quad (13)$$

其中  $M$  为测量矩阵,  $S$  为目标散射矩阵,  $N$  为等效噪声矩阵,  $R$  和  $T$  分别为接收失真矩阵和发射失真矩阵,  $\theta$  是系统总体绝对相位,  $K$  是系统总体绝对幅度, 为方便讨论此处假设为 1。显然当  $R$  和  $T$  不是单位矩阵时, 存在极化失真, 即  $M \neq S$ 。极化定标的目的就是测量矩阵  $M$  进行校正, 使校正后的矩阵  $M_C$  的元素间的相对关系能反映目标散射矩阵  $S$  的元素间的相对关系。如不特别指出, 以下的讨论的测量矩阵都是指极化定标后矩阵  $M_C$ 。

$$M_C = e^{i\theta} \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} = e^{i\theta} S \quad (14)$$

设  $k_{M_C}$  为由  $M_C$  形成的相干散射矢量, 而  $k_S$  是由  $S$  形成的, 则二者关系(15)所示。对于干涉测量, 相应

$$k_{M_C} = e^{i\theta} k_S \quad (15)$$

由于在实际雷达图像中信号的相位都是以  $2\pi$  为模来表示的,因此以下讨论都是在此前提下进行的,并且定义  $(\ )_{2\pi}$  来表示模为  $2\pi$  的相位值。

极化 SAR 图像像元的绝对相位可表示为式(16),而其在图像中的测量相位  $(\theta_m)_{2\pi}$  可表示为式(17),其中  $\theta_r$  为与雷达与目标间距离有关的传播相位,  $\theta_d$  为系统对信号的延迟相位,  $\theta_n$  为随机相位噪声,  $\theta_s$  为目标相位,包含在目标散射矩阵  $S$  中。

$$\theta_m = \theta_r + \theta_d + \theta_n + \theta_s = 4\pi r/\lambda + \theta_d + \theta_n + \arg(S) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} (\theta_m)_{2\pi} &= (\theta_s + \theta_r + \theta_d + \theta_n)_{2\pi} \\ &= (2S\pi + \psi_s + 2R\pi + \psi_r + 2D\pi + \psi_d + 2N\pi + \psi_n)_{2\pi} \\ &= (\psi_s + \psi_r + \psi_d + \psi_n)_{2\pi} = \psi_r + \psi_d + \psi_s + \psi_n - 2n\pi \\ n &= 0, 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (17)$$

其中,  $\theta_r = 2R\pi + \psi_r$ ,  $\theta_d = 2D\pi + \psi_d$ ,  $\theta_s = 2S\pi + \psi_s$ ,  $\theta_n = 2N\pi + \psi_n$ ,  $R, D, S, N$  为整数,  $\psi_s, \psi_r, \psi_d, \psi_n$  在  $0$  到  $2\pi$  之间取值。

相应地  $k_{Mc}$  的表达式变为

$$k_{Mc} = \exp(i(\psi_r + \psi_d + \psi_n + \psi_s)_{2\pi}) \cdot |k_S| \quad (18)$$

对于矢量干涉有

$$\begin{aligned} k_{Mc1} k_{Mc2}^* &= \exp(i[(\psi_{r1} - \psi_{r2})(\psi_{d1} - \psi_{d2}) + (\psi_{n1} \\ &\quad - \psi_{n2})]_{2\pi}) \cdot k_{S1} k_{S2}^* \end{aligned} \quad (19)$$

极化干涉测量方法是基于目标的极化散射特性来寻找最佳极化基和进行相干相位分解,因此公式(10)中,  $[T_{11}]$ ,  $[T_{22}]$ ,  $[\Omega_{12}]$  都应该用  $k_{S1}$  和  $k_{S2}$  来求得。但是在实际应用中,我们只能得到  $k_{Mc}$ , 而且也无法从中分离出  $k_S$ 。如果用  $M_{Mc}$  代替  $k_S$ , 则有

$$\begin{aligned} [\Omega_{12}]_{Mc} &= \frac{1}{N} \sum_p k_{Mc1p} k_{Mc2p}^* \\ &= \frac{1}{N} \sum_p \exp(i[(\theta_{r1p} - \theta_{r2p}) + (\theta_{d1p} - \theta_{d2p}) \\ &\quad + (\theta_{n1p} - \theta_{n2p})]_{2\pi}) \cdot k_{S1p} k_{S2p}^* \end{aligned} \quad (20)$$

对任意像元,当非目标散射特性的相位  $(\theta_{r1} - \theta_{r2}) + (\theta_{d1} - \theta_{d2}) + (\theta_{n1} - \theta_{n2}) \neq 0$  时,  $[\Omega_{12}]_{Mc} \neq [\Omega_{12}]_S$ , 二者用于式(10)得到的最佳极化基不同。其中,  $\Delta\theta_n = \theta_{n1} - \theta_{n2}$  是由随机相位噪声引起的,本文中暂不考虑它的影响,假设  $\Delta\theta_n = 0$ ;  $\theta_d = \theta_{d1} - \theta_{d2}$  是由系统对两幅图像信号的延时不相等造成的,对于稳定的干涉系统  $\Delta\theta_d$  应近似等于  $0$  或常数;干涉测量中目标到两个天线的距离不可能相等,因此,  $\Delta\theta_r = \theta_{r1} - \theta_{r2} \neq 0$ , 也不为常数。下面针对怎样消除  $\Delta\theta_r$  的影响进行具体的讨论。

在 SAR 图像中,像元的位置记录了该点的信号从发射到接收记录的时间  $T$ 。  $T$  由信号在天线与目

标之间往返传播的时间  $T_r$  和系统延迟时间  $T_d$  组成,可表示为

$$T = T_r + T_d = 2r/c + T_d \quad (21)$$

定义相位  $\theta_T$

$$\begin{aligned} \theta_T &= (4\pi/\lambda) \cdot (cT/2) = 2\pi c(T_r + T_d)/\lambda \\ &= 4\pi r/\lambda + 2\pi cT_d/\lambda \end{aligned} \quad (22)$$

已知  $4\pi r/\lambda = \theta_r = 2R\pi + \psi_r$ , 类似式(3.5)可定义  $2\pi cT_d/\lambda = \theta_{Td} = 2A\pi + \psi_{Td}$ ,  $A$  为整数,得到  $\theta_T$  的模为  $2\pi$  的表达式

$$\begin{aligned} (\theta_T)_{2\pi} &= (2R\pi + \psi_r + 2A\pi + \psi_{Td})_{2\pi} \\ &= (\psi_r + \psi_{Td})_{2\pi} = \psi_r + \psi_{Td} - 2k\pi \\ k &= 0, 1 \end{aligned} \quad (23)$$

将  $(\theta_T)_{2\pi}$  从  $(\theta_m)_{2\pi}$  中去除,则有

$$\begin{aligned} (\theta_m)_{2\pi}' &= ((\theta_m)_{2\pi} - (\theta_T)_{2\pi})_{2\pi} \\ &= ((\psi_r + \psi_d + \psi_s - 2n\pi) - (\psi_r + \psi_{Td} - 2k\pi))_{2\pi} \\ &= (\psi_s + \psi_d - \psi_{Td})_{2\pi} = \psi_s + \psi_d - \psi_{Td} - 2l\pi \\ l &= -1, 0, 1 \end{aligned} \quad (24)$$

如果将  $k_{Mc}$  乘以一个相位因子  $e^{-i(\theta_T)_{2\pi}}$ , 得到  $k'_{Mc}$ , 则

$$k'_{Mc} = \exp(i(\psi_s + \psi_d - \psi_{Td})_{2\pi}) \cdot |k_S| \quad (25)$$

对于干涉测量得到

$$\begin{aligned} [\Omega_{12}]_{Mc}' &= \frac{1}{N} \sum_p \exp(i[(\psi_{d1p} - \psi_{d2p}) \\ &\quad - (\psi_{Td1p} - \psi_{Td2p})]_{2\pi}) \cdot k_{S1p} k_{S2p}^* \end{aligned} \quad (26)$$

对于稳定的干涉系统,系统对两幅图像信号的延迟应当近似相等或差值不变,即近似满足

$$\begin{aligned} \theta_{d1} - \theta_{d2} &= C_1 \\ T_{d1} - T_{d2} &= C_2 \quad C_1, C_2 \text{ 等于 } 0 \text{ 或常数} \end{aligned} \quad (27)$$

此时得到  $[\Omega_{12}]_{Mc}' = e^{i(C_1 + C_2)} [\Omega_{12}]_S$ 。由式(10)可以得出,常数  $e^{i(C_1 + C_2)}$  不会影响最优极化基的求解。因此,可以用  $k'_{Mc}$  代替  $k_S$  应用于前述极化干涉测量方法。

根据以上论述,本文提出了一种新的改进算法。在该算法中先将相干散射矢量  $k_1$  和  $k_2$  乘以相位因子  $e^{-i(2\pi cT_r/\lambda)_{2\pi}}$  得到  $k'_1$  和  $k'_2$ , 利用  $k'_1$  和  $k'_2$  形成相干矩阵来求解最佳极化基,并进行相干相位分解。然后用得到的极化基对  $k_1$  和  $k_2$  转换,得到所求的干涉图。具体的算法流程见图 1。

## 4 模拟验证及结果分析

### 4.1 地面目标模型

在模拟中,地面目标模型采用了三层的相干散

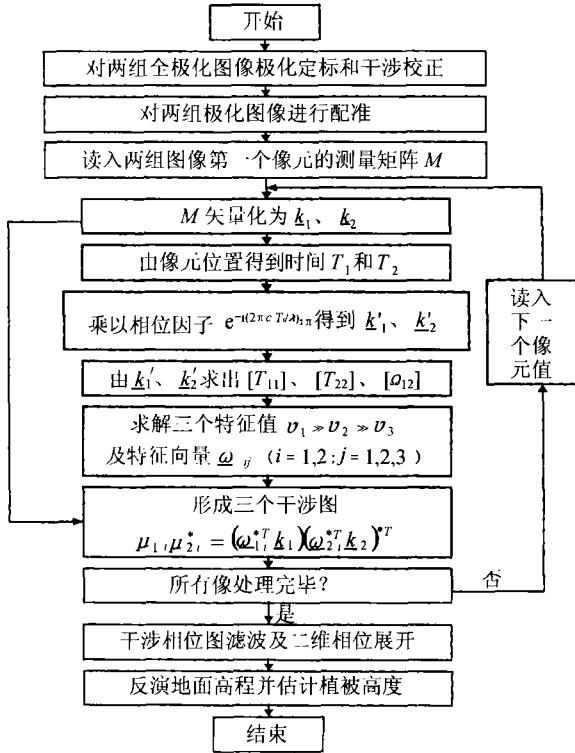


图 1 极化 SAR 干涉测量算法流程图

Fig. 1 The process of pol-SAR interferometric measurement

射模型<sup>[2,5]</sup>,模型的表达式为(4.1),下标  $i$  表示天线 1 或 2。模型的结构和干涉几何关系见图 2。

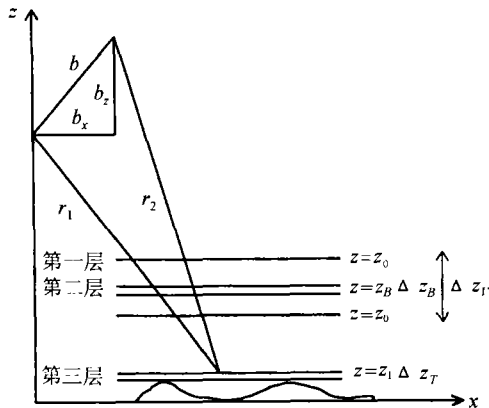


图 2 目标模型及干涉几何示意图

Fig. 2 The target model and interferometric geometry

$$k_i = \exp(4\pi r_{T_i}/\lambda) k_{T_i} + \exp(4\pi r_{B_i}/\lambda) k_{B_i} + \int_V \exp(4\pi r_i/\lambda) k_V(r_i) dr_i \quad (28)$$

目标模型分为如下三层:

第一层:  $k_V$  是  $z_0$  到  $z_1$  间均匀分布的微小颗粒的散射,这些散射之和表示树冠层的散射。 $\alpha_P$  决定颗粒的形状,本文取为 45,  $\theta_P$  为颗粒的随机取向,取  $0-\pi$  均匀分布。

$$k_V = A_P \begin{bmatrix} \cos\alpha_P \\ \sin\alpha_P \cos\theta_P \\ \sin\alpha_P \sin\theta_P \end{bmatrix} \quad (29)$$

第二层:  $k_B$  位于  $z = z_B$  处,表示树枝和树干的相互作用。 $\alpha_B$  决定散射机制类型,本文取为 60,  $\beta_B$  决定散射的取向,取本地入射角的 2 倍。

$$k_B = A_B \begin{bmatrix} \cos\alpha_B \\ \sin\alpha_B \cos\beta_B \\ \sin\alpha_B \sin\beta_B \end{bmatrix} \quad (30)$$

第三层:  $k_T$  位于  $z = z_T$  处,表示地面散射或地面与树干的互相作用。 $\theta$  为本地入射角,  $\beta$  为相对于雷达视线的转角,  $R_h, R_v$  为 Fresnel 散射系数。

$$k_T = k_{P0} = A_T \cos\theta \begin{bmatrix} R_h \cos^2 \beta - R_v \sin^2 \beta \\ (1/\sqrt{2})(R_h + R_v) \sin^2 \beta \\ R_h \sin^2 \beta - R_v \cos^2 \beta \end{bmatrix} \quad (31)$$

$A_P, A_B, A_T$  表示各层的散射幅度,可根据波长和目标参数调整其比例关系,表示不同的植被覆盖情况。

文中设定模拟区域为  $64 \times 64$  点,为简便起见,地表地形设为平地,高度为 1000m。植被在模拟区域内是均匀的,模型参数为  $z_0 - z_1 = 4\text{m}$ ,  $z_0 - z_T = 8\text{m}$ ,  $z_B = (z_0 + z_1)/2$ 。

### 4.2 极化干涉 SAR 模拟系统参数

表 1 模拟系统参数

Table 1 The system simulation parameters

| 发射信号频率 | 基线长度   | 基线倾角  | SAR 平台高度 | 天线视角 | 方位向分辨率 | 斜距分辨率 |
|--------|--------|-------|----------|------|--------|-------|
| 5.3GHz | 2.583m | 62.77 | 9000m    | 45   | 0.8m   | 3.75m |

### 4.3 模拟结果及分析

对  $A_P:A_B:A_T = 10:5:1$  的目标模拟数据应用本文提出的算法(模拟中考虑了图像中相位的模为  $2\pi$ ),得到与三个相关系数  $\gamma_1 \geq \gamma_2 \geq \gamma_3$  对应的三个干涉图及反演的高程。图 3 所示为在上述结果在某一定距离线上的值。图中,1st、2nd、3rd 分别代表干涉图 1、2、3。

由图 3(d)可见,该算法可以将位于不同高度的散射中心分离。散射中心之间的高度差在干涉图上就体现为干涉图之间的相位差,如图 3(c)所示。

反演得到三个高程的平均值分别为  $h1 = 1004.1\text{m}$ ,

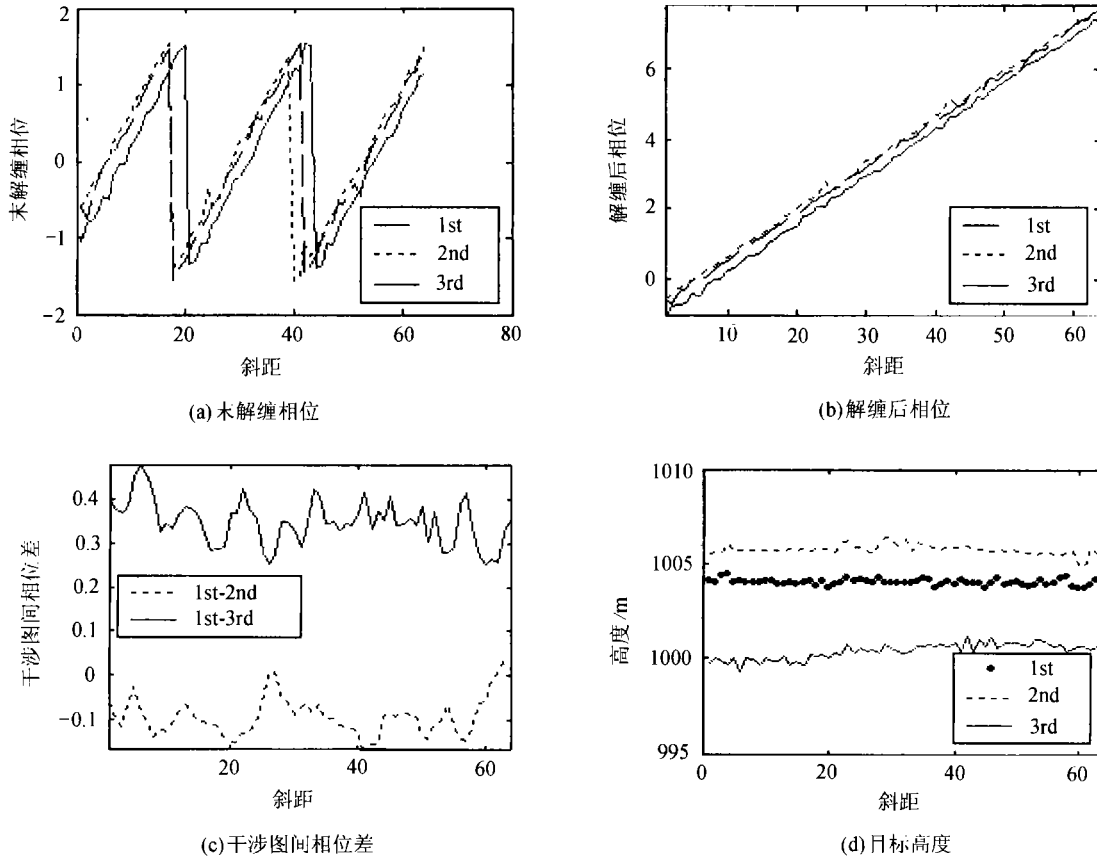


图 3 模拟实验结果

Fig.3 The results of simulation experiment

$h_2 = 1005.8\text{m}$ ,  $h_3 = 1001.0\text{m}$ 。模型中设定的三层散射的高度分别为  $h_{kv} = 1006\text{m}$ ,  $h_{kb} = 1006\text{m}$ ,  $h_{kt} = 1000\text{m}$ 。三个反演高程中  $h_3$  最接近  $h_{kt}$ , 可以认为  $h_3$  代表的就是地面的散射。而  $h_1$ 、 $h_2$  较为接近  $h_{kv}$ 、 $h_{kb}$ , 可以认为  $h_1$ 、 $h_2$  代表的是树冠或树枝的散射。可见,该算法可以测量植被覆盖下的地表地形,而且可以对植被高度进行初步估计。要精确估计植被高度需要具体分析得到的极化基代表什么散射机制,本文将不对此进行深入讨论。

本文还对改进算法、原有算法、单极化干涉测量地表 DEM 的精度进行了分析比较。

用三种方法对  $A_P:A_B:A_T = 10:5:1$  的目标模拟数据处理,并反演得到高程。极化干涉的两种算法分别得到三个高程结果,取最接近模型中地面高度的一个作为地面 DEM 的测量值。单干涉极化只能得到一个高程结果,将其作为地面 DEM 测量值。具体的结果见表 2。

由于本文的模拟中,模拟区域为均匀植被覆盖

的平地,因此可以将区域内平均高程作为一个对照的参数,表示为  $E(h)$ 。其他对照参数为高程均方差  $\sigma(h)$ ,相干系数  $\gamma$ 。

表 2 三种方法的测量 DEM 结果对照

Table 2 The comparison of three measurement method

|              | 平均高程<br>$E(h)/\text{m}$ | 高程均方差<br>$\sigma(h)/\text{m}$ | 相干系数<br>$\gamma$ |
|--------------|-------------------------|-------------------------------|------------------|
| 改进算法         | 1001.0                  | 1.3080                        | 0.9964           |
| 原有算法         | 987.3                   | 11.8243                       | 0.5305           |
| 单极化干涉(HH-HH) | 1009.2                  | 27.2937                       | 0.2072           |

当模型中  $A_P:A_B:A_T = 10:5:1$  时,体散射占主导地位。此时单极化干涉的相位图反映的是分辨单元内散射中心的高度,并不等于地面的高度,因此得到的高程图不能反映实际地面高度,而且精度较低。用原有的极化干涉算法,结果精度有所提高,但是由于极化基选取受非目标因素影响,还不太理想。用本文提出的改进算法则能获得较高的测量精度。

## 5 结 论

本文用模拟技术手段研究分析了极化干涉方法测量 DEM 的方法,并针对用 SAR 测量矩阵代替目标散射矩阵应用该方法时存在的问题,提出了新的改进算法,并将该算法用于植被覆盖情况下的地表高度提取和植被高度估计。模拟实验结果表明,该算法有效地提高了测量精度。

### 参 考 文 献 (References)

[1] S R Cloude, K P Papathanassiou. Polarimetric SAR interferometry[J].

*IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1998, 36(5):1551—1565.

[2] S R Cloude, K P Papathanassiou. Polarimetric Radar Interferometry [N]. SPIE'S 42nd Annual Meeting Proc. Windband Interferometry Sensing and Imaging Polarimetry, 1997, 3120:1551—1565.

[3] K P Papathanassiou, A Reigber, R Scheiber, R Horn, A Moreira, S R Cloude. Airborne polarimetric SAR interferometry [N]. *Proc. IEEE IGARSS'98*, 1998, 4:1901—1903.

[4] J M Lopez-Sanchez, L Sagues, J Fortuny, X Fabregas, A Broquetas, A J Sieber, S B cloude. Laboratory experiments of polarimetric Radar Interferometry: DEM generation and vegetation height estimation [N]. *Proc. IEEE IGARSS'99*, 1999, 4:2206—2208.

[5] S R Cloude, Eric Pottier. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1997, 35(1):68—78.

## Research on Polarimetric SAR Interferometry by Simulation Experiments

CHEN Xiao-ying<sup>1,2</sup>, HONG Jun<sup>1</sup>

(1. The Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The introduction of polarimetry to SAR interferometry makes it possible to improve the interferometric measurement resolution of the under-vegetation terrain and to estimate the height of vegetation targets. This paper introduces a new algorithm of polarimetric SAR interferometry, which can greatly improve the precision of the measurement. The coherent model of vegetation is used as the input of the polarimetric interferometric SAR system to get the simulation data, and the data is used to analysis and test the presented algorithm.

**Key words:** SAR; interferometric SAR; polarimetric SAR; polarimetric SAR interferometry