

# 重复轨道 SIR-C 极化干涉 SAR 数据植被覆盖区土壤水分反演研究

李新武, 郭华东, 李 震, 陈 权

数字地球重点实验室, 中国科学院 对地观测与数字地球科学中心, 北京 100190

**摘 要:** 提出了一个针对重复轨道 SIR-C 数据的极化干涉 SAR 植被覆盖地表土壤水分反演方法, 同时, 探讨和分析了极化干涉 SAR 最大似然反演分解模型在植被覆盖区土壤水分反演中的潜力和有效性。利用极化干涉 SAR 最大似然反演分解模型重建消除了体散射分量的植被覆盖下地表极化相干矩阵; 计算同极化和交叉极化地表后向散射系数, 并利用 Oh 模型和二面角(Dihedral)散射模型估算植被覆盖下地表的土壤水分; 将反演的植被覆盖下地表土壤水分结果与野外实测土壤水分结果和该区域 1951—2006 年的气候数据进行比较和分析, 初步结果表明: 基于极化干涉 SAR 最大似然反演分解模型的植被覆盖区土壤水分反演方法得到的结果具有足够高的估计精度。

**关键词:** 极化干涉 SAR, 植被覆盖地表, 最大似然反演分解模型, 土壤水分估计

**中图分类号:** TP722.6

**文献标识码:** A

## 1 引 言

如何利用成像雷达数据估计植被覆盖区土壤水分是当前雷达遥感应应用研究的一个重点和难点问题。近年来出现的极化干涉雷达(PolInSAR)是集极化雷达和干涉雷达的理论、方法、技术为一体的新型前沿雷达遥感技术。对于极化干涉雷达, 在分辨率单元内, 干涉相位和相干性对散射中心位置的高度敏感以及地表散射对散射中心的影响提供了一种估计植被覆盖地表下甚至是弱地表散射的敏感方法; 同时, 极化在地表参数的反演中具有重要的作用。因此, 极化干涉雷达在估计植被覆盖下地表参数如土壤水分方面具有很大的应用潜力(Irena 等, 2003; Cloude 等, 2004)。

近年来, 利用极化干涉 SAR 估计植被覆盖地表的土壤水分研究方面, 提出了反演森林覆盖地表土壤水分的负 Alpha 方法(Cloude & Williams, 2005), 该方法主要利用机载 E-SAR 数据和模拟数据进行负 Alpha 的估计进而得到土壤水分, 但该方法结果的有效性还需要进一步的验证; 2007 年 Nuemann 等基于负 Alpha 方法的思想, 针对农业区地表结合有方

向体积+地表二层模型进行了面体散射分离的模型和方法研究, 得到了初步结果, 但仍需要进一步的研究和验证(Neumann 等, 2007); 2004 年 Tabb 等提出了能分离植被体散射分量从而重建地表极化相干矩阵的极化干涉 SAR 最大似然反演分解模型, 但是, 对于用该模型用于反演植被覆盖区土壤水分的潜力和有效性还没有进行研究(Tabb 等, 2004)。总的来说, 利用极化干涉 SAR 反演植被覆盖地表土壤水分的研究还处于一个初步的研究阶段。

## 2 研究区域和数据源

新疆和田位于塔克拉玛干沙漠地区, 深居内陆, 远距海洋, 四周高山(天山、昆仑山、帕米尔高原)环绕, 属暖温带大陆性荒漠气候, 全年干旱少雨, 年平均气温 11.0℃—12.1℃, 年降水量 28.9—47.1mm, 年蒸发量 2198—2790mm。因此, 该地区地表状况总体上比较稳定, 年内季节性差异稍大, 但年际差异较小。研究区域位于新疆和田地区的绿洲(37.12°N, 79.59°E), 绿洲区域具有较丰富的植被覆盖, 地表主要植被有防护林, 经济林如苹果树、梨树

收稿日期: 2008-03-21; 修订日期: 2008-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 40501050)和国家重点基础研究计划(973 计划)(编号: 2009CB723906)。

第一作者简介: 李新武, (1973—), 男。2002 年在中国科学院遥感应用研究所获理学博士学位, 现为中国科学院对地观测与数字地球科学中心副研究员; 主要研究领域为极化和干涉雷达遥感, 发表学术论文 30 余篇。E-mail: xwli@ceode.ac.cn。

和葡萄树等, 灌丛, 农作物(主要是棉花、玉米和小麦)和少量的草地, 卡拉喀什河从南向北穿过该区域。

实验数据是 1994 年 10 月 9 日和 10 日的 SIR-CL 波段定标的全极化单视复数据。另外, 为了最后结果的定量验证, 收集和整理了 2003 年 8 月 13—17 日期间本研究组为“ENVISAT/ASAR 多极化数据土壤水分反演研究”课题开展的星—地同步试验获取的该区域的土壤水分实测数据, 同时, 从国家气象局网站下载了和田地区和田观测站 1951—2006 年的气候观测数据(国家气象局, 2006)。

### 3 重复轨道 SIR-C 极化干涉 SAR 植被覆盖区土壤水分反演方法

极化干涉相干矩阵重建地表极化相干矩阵的方法主要基于 Tabb 等(2004)提出的最大似然反演分解模型。

#### 3.1 基于极化干涉 SAR 最大似然反演分解模型的地表极化相干矩阵重建

##### 3.1.1 植被结构和地形参数估计

根据极化干涉 SAR 最大似然反演分解模型, 对于体散射无限制的情况(Treuhaft & Siqueria, 2000; Tabb 等, 2004), 方程(1)和方程(2)用于估计植被结构和地形参数,

$$f = 3\log(1 - \cos \theta) - \log |A_{\theta+\phi}| - \log |A_{\phi}| \quad (1)$$

$$\theta = \pi - 2 \tan^{-1} \left[ \frac{-|A_{\phi}|}{3|A_{\phi}|} \right] \quad (2)$$

式中  $f$  是最大似然函数。  $\theta \in (0, 2\pi)$ ,  $\phi \in (-\pi, \pi)$ ,  $A_{\phi} = \bar{T} - \bar{O}_{\phi}$ ,  $A_{\theta+\phi} = \bar{T} - \bar{O}_{\theta+\phi}$ ,  $\bar{T} = \frac{1}{2} \times (T_{11} + T_{22})$ ,  $\bar{O}_{\phi} = \frac{1}{2} \times (e^{-j\phi} O_{12} + e^{j\phi} O_{12}^H)$ ,  $\bar{O}_{\theta+\phi} = \frac{1}{2} \times (e^{-j(\theta+\phi)} O_{12} + e^{j(\theta+\phi)} O_{12}^H)$ ,  $T_{11}$  和  $T_2$  是标准的厄尔米特相干矩阵, 它们分别包含了天线 1, 2 每幅图像的全极化信息。  $O_{12}$  和  $O_{12}^H$  ( $H$  代表共轭转置) 是  $3 \times 3$  的复矩阵, 不仅包含了极化信息, 还包含了两幅图像不同通道的干涉相位信息。基于方程(1)和方程(2), 参数  $\theta$  和  $\phi$  的估计可以通过对  $\phi$  进行一维搜索并且当  $f$  取最大时来实现。

##### 3.1.2 地表极化相干矩阵的重建

地表极化相干矩阵最优重建的过程如下:

(1) 利用估计的  $\theta$  和  $\phi$ , 计算矩阵  $A_{\phi}$  和  $A_{\theta+\phi}$ ;

(2) 基于计算得到的  $A_{\phi}$  和  $A_{\theta+\phi}$ , 令  $\hat{T}_v = (1 - \cos \theta)^{-1} A_{\phi}$

对  $V A_{a2} V^H = \hat{T}_v^{-1/2} A_{\theta+\phi} \hat{T}_v^{-1/2}$  进行特征分解, 其中  $V$  是特征向量,  $A_{a2}$  是对角矩阵, 对角线元素是

特征值。

(3) 利用(2)的结果, 最后得到  $T_s$ -地表极化相干矩阵的表达式如下,

$$T_s = K_1 T_v^{1/2} V A V^H T_v^{1/2} \quad (3)$$

式中,  $T_v = K_2 \hat{T}_v$ ,  $A = p(A_{a2}(1 - \cos \theta)^{-1} + I) - I$ ,  $p = \frac{1 + \lambda_3}{1 + (1 - \cos \theta)^{-1} \lambda_{a2,3}}$ ,  $I$  是单位矩阵,  $\lambda_{a2,3}$  是对角矩阵  $A_{a2}$  的第 3 个特征值,  $\lambda_3$  是预设值, 此处设  $\lambda_3 = 0.05$ ,  $K_1$  和  $K_2$  是常数。对于地表极化相干矩阵  $T_s$ , 包含两个散射分量: 来自地表的直接散射分量及来自树和地表相互作用的二面角散射分量。

#### 3.2 基于地表极化相干矩阵 $T_s$ , 估计同极化 HH、VV 和交叉极化 HV 的地表相对后向散射系数

基于重建的地表极化相干矩阵  $T_s$ , 可以有两种思路来进行土壤水分的估计:(1)通过  $T_s$  得到 Freeman Alpha 角和极化熵, 利用 Hajnsek 等提出的扩充布拉格面散射模型 H-Alpha 反演方法得到 Alpha 角小于  $45^\circ$  的介电常数值(Irena 等, 2003); 利用二面角面散射模型得到 Alpha 角大于  $45^\circ$  的介电常数值(Freeman & Durden, 1998; Irena, 2001); (2)基于重建的地表极化相干矩阵  $T_s$ , 首先得到同极化 HH 和 VV, 交叉极化 HV 的后向散射系数, 利用现有的 Oh 或 Dubois 模型以及二面角散射模型进行土壤水分反演(Oh 等, 1992; Topp 等, 1980; Irena, 2001)。本文采用第 2 种方法, 主要原因是第 1 种方法的适用范围受到入射角大小的限制, 当入射角很小时, 该方法只能反演得到小范围的介电常数值。由于本文所用 SIR-C 数据的入射角为  $23^\circ$ , 因此, 针对 SIR-C 重复轨道数据, 需要采用第 2 种方法得到植被覆盖下的土壤水分值。

为了从散射机理上更好的理解  $T_s$  的物理意义和从  $T_s$  得到 HH, VV 及 HV 的后向散射系数, 下面给出  $T_s$  的具体形式(Freeman & Durden, 1998; Irena, 2001)

$$T_s = T_g - T_{gv} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{12}^* & t_{14} & t_{15} \\ t_{13}^* & t_{15}^* & t_{16} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{22}^* & t_{24} & t_{25} \\ t_{23}^* & t_{25}^* & t_{26} \end{bmatrix} \quad (4)$$

右边的两个矩阵分别代表地表直接散射分量以及地表与树干相互作用的二面角散射分量。基于上面的矩阵, 同极化 HH 和 VV 以及交叉极化 HV 的相对后向散射系数可以写为(Irena, 2001)

$$\sigma_{HH}^0 = 10 \log_{10}(((t_{11} + t_{21}) + (t_{14} + t_{24}) + 2 \operatorname{Re}(t_{12} + t_{22})) \sin \theta) / 2) \quad (5)$$

$$\sigma_{VV}^0 = 10 \log_{10}(((t_{11} + t_{21}) + (t_{14} + t_{24}) - 2 \operatorname{Re}(t_{12} + t_{22})) \sin \theta) / 2) \quad (6)$$

$$\sigma_{HV}^0 = 10 \log_{10}(((t_{16} + t_{26}) \sin \theta) / 2) \quad (7)$$

这里所说“相对后向散射系数”主要是因为从  $T_s$  得到的后向散射系数没有乘上常数因子。

### 3.3 利用 Oh 模型和二面角(Dihedral)散射模型估算土壤水分

由于重建得到的后向散射分量包括来自地表的直接散射及来自地表和树干的二面角散射, 因此, 在具体进行模型反演时, 将根据重建极化相干矩阵得到的 Alpha 角的大小选用不同模型进行反演。当 Alpha 角小于  $45^\circ$  时, 用 Oh 模型进行计算; 当 Alpha 角大于  $45^\circ$  时, 用二面角散射模型进行计算(Oh 等, 1992; Topp 等, 1980; Irena, 2001)。

## 4 数据处理

本研究用 1994 年 10 月 9—10 日的 SIR-C L 波段全极化单基线干涉雷达数据来进行植被覆盖区土壤水分反演方法的试验研究。数据处理主要用 GAMMA SAR 干涉处理软件和研究组自己开发的软件。下面就数据处理的几个关键步骤进行较为详细的描述。

### 4.1 基于物理散射机理的初始基线估计

由于绿洲的地形相对平坦, 本文采用轨道参数和 FFT 功率谱方法相结合进行初始基线的平行和垂直分量估计; 为了获得更为准确的初始基线, 本研究选择 HH-VV 干涉估计初始基线, 因为 HH-VV 的散射机理主要对应的是二面角散射, 它的散射中心位于地表, 可以消除植被高度产生的类地形信号对基线估计的影响。

### 4.2 平地相位去除

基于估计的初始基线, 由于干涉 SAR 几何引起的平地相位将从  $O_{12}$  和  $O_{12}^H$  消除, 为了保持极化相干矩阵  $R_m$  的厄米特正定性, 在这里  $O_{12}$  和  $O_{12}^H$  将分别乘以一个公共的相位因子  $e^{-j\phi}$  或  $e^{j\phi}$  来进行平地相位消除, 否则,  $R_m$  的正定性将可能被破坏, 最终导致无解。方程(8)是去除平地相位以后的极化干涉相干矩阵表达式。

$$R_m^f = \begin{bmatrix} T_{11} & e^{-j\phi} O_{12} \\ e^{j\phi} O_{12}^H & T_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $R_m^f$  为去平地相位以后的极化干涉相干矩阵。为了证明该极化相干矩阵仍然是正定的, 同样满足维希特分布, 令  $D_1 = k_1 e^{-j\phi}$ , 那么,

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1^{*T} & k_2^{*T} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 D_1^{*T} & D_1 k_2^{*T} \\ k_2 D_1^{*T} & k_2 k_2^{*T} \end{pmatrix}, \text{ 表明去平地相位}$$

后, 矩阵的正定性未被破坏, 仍然满足维希特分布(Roger & Charles, 2005; 张尧庭、方开泰, 2006)。

### 4.3 全最大似然反演模型估计参数 $\theta$ 和 $\phi$

由于该最大似然反演分解模型只适用于植被区域, 因此, 在进行参数估计时将植被区和非植被分开处理。在这里  $\phi \in (-\pi, \pi)$ ,  $\theta \in (0, 2\pi)$ , 考虑到计算效率和最大似然解的可靠性,  $\phi$  的步长取  $\pi/720$ 。利用方程(1)和方程(2), 用一维的搜索算法估计  $\theta$  和  $\phi$ 。从方程(1)和方程(2)可见, 为了得到准确的  $\phi$  和  $\theta$ , 矩阵  $A_\phi$  和  $A_{\phi+\theta}$  也必须满足厄米特正定的性质, 并且, 要有足够大的样本数保证最大似然估计解的精度(Steven, 2003)。

### 4.4 地表极化相干矩阵 $T_s$ 的重建

在地表极化相干矩阵  $T_s$  重建过程中, 可取  $\lambda_3 = 0.05$  并令  $\lambda_{a2,3}$  是矩阵  $A_{a2}$  的最小的特征值, 目的是保证矩阵  $T_s$  的厄米特正定性。

## 5 初步试验结果分析及验证

研究区域属于农业和森林混合区, 主要植被有防护林, 经济林如梨树、苹果树和葡萄树等和农作物, 也包括较多的灌丛和少量的草地。图 1(a)是 1994-10-09 SIR-C L 波段的 HH+VV 通道的幅度图像。图 1(a)HH+VV 通道的后向散射分量包含的后向散射信息从物理机理上主要来自植被和地表的单次散射回波; 图 1(b)是去掉平地相位以后 HH+VV 通道的干涉图, 从图中可见, 平地相位已显著去除。但是, 值得注意的是: 在去除平地相位时, 用一个公共的相位因子乘以极化干涉相干矩阵是必须的。

图 2(a) 是用 1994-10-09 的 SIR-C L 波段的全极化数据计算得到的熵值图像。从图中可见, 在植被覆盖比较丰富的区域熵值很高。但是, 在图的左上角区域, 由于这个区域属于裸露的土壤, 熵值很低。在卡拉喀什河区域, 熵值仍然很低, 主要原因是在该时期, 卡拉喀什河的河床水位很低, 多数地方是裸露土壤及大小不等的鹅卵石和砾石等。图 2(b)是从重建的地表极化相干矩阵得到的熵值图, 与图 2(a)的熵值进行比较, 整个图像的熵值显著降低, 这个变化是非常合理的, 主要原因是由植被散射引起的体散射分量被有效的消除, 所以熵值显著降低。

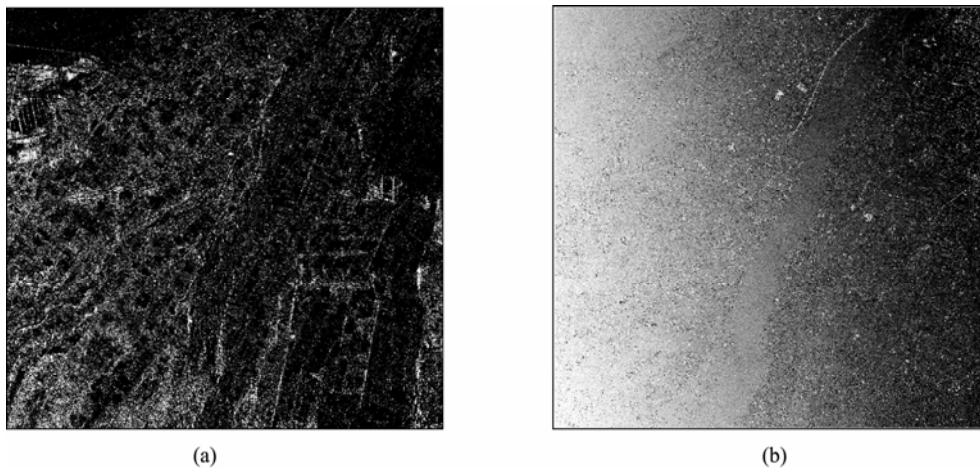


图1 HH+VV通道的幅度图像(a)及HH+VV干涉对去除平地相位后的干涉图(b)

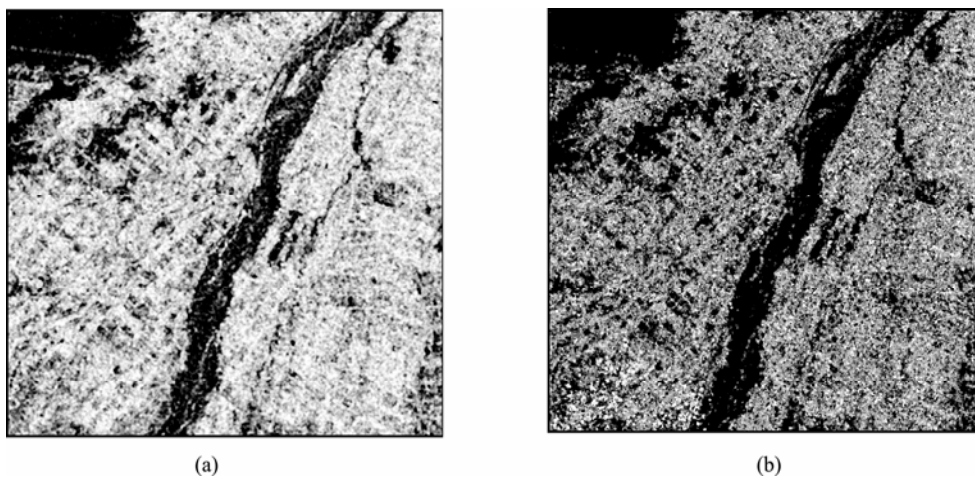


图2 1994-10-09 SIR-C L波段全极化数据得到的熵值图像(a)及从重建的地表极化相干矩阵 $T_s$ 得到的熵值图(b)

图 3(a)是从重建的地表极化相干矩阵  $T_s$  得到的 Alpha 角图, 图像的右边从中间往下的线状区域对应于实验区二面角散射较强的区域, 因此, 由重建得到的  $T_s$  计算得到的 Alpha 角均大于  $45^\circ$ , 从而反映了重建结果的正确性。

图 3(b)以及图 4(a)、(b)分别是  $T_s$  得到 HH, VV 和 HV 的相对后向散射值, 图像的右边从中间往下区域对应于二面角散射很强的区域, 在 HH 和 VV 图像均有所体现, 但在 HV 图像则没有, 因为在这里 HV 主要反映由地表粗糙度引起的后向散射信息。需要说明的是, 由于 HH, VV 和 HV 的后向散射量值差别很大, 因此, 在这里 HH, VV 和 HV 的大小通过亮度是不能直接比较的; 另外, 在计算时试验区的非植被区域已经被剔除。

图 5 是基于重建的  $T_s$  反演得到的土壤水分图, 其中裸露地表区域的土壤水分值直接利用 Oh 反演模型得到。土壤水分为零的点是不符合反演模型条

件的点。从图 6 可见, 裸露地表区域的土壤水分值, 如图像的左上角和图像中部的卡拉喀什河大部分区域相对较低, 主要原因是该区气候比较干燥, 靠近沙漠和戈壁地区; 另外, 在卡拉喀什河区域, 地表除了裸露的土壤外, 还有很多大小不等的鹅卵石和砾石分布, 总体上该区域土壤水分较低。在植被覆盖较多的区域, 土壤体积水分含量值要比裸露区域偏高, 大部分处于 8%—18%, 少部分区域处于 25% 左右, 根据该区域的地表状况和该时期的天气条件, 认为这个反演结果是合理的。

为了进一步对结果进行定量比较和验证, 研究组选取了墨玉县一个农场作为本研究土壤水分反演精度的验证区, 该农场对应于图 5 的白色矩形区域, 该区域主要有防护林和经济林, 防护林为白杨等, 经济林主要有梨树、苹果树和桃树等, 植被覆盖较为丰富。该农场具有成片的林地, 是比较理想的研究和实验验证区。图 6 是 2003 年 8 月中旬研究组在

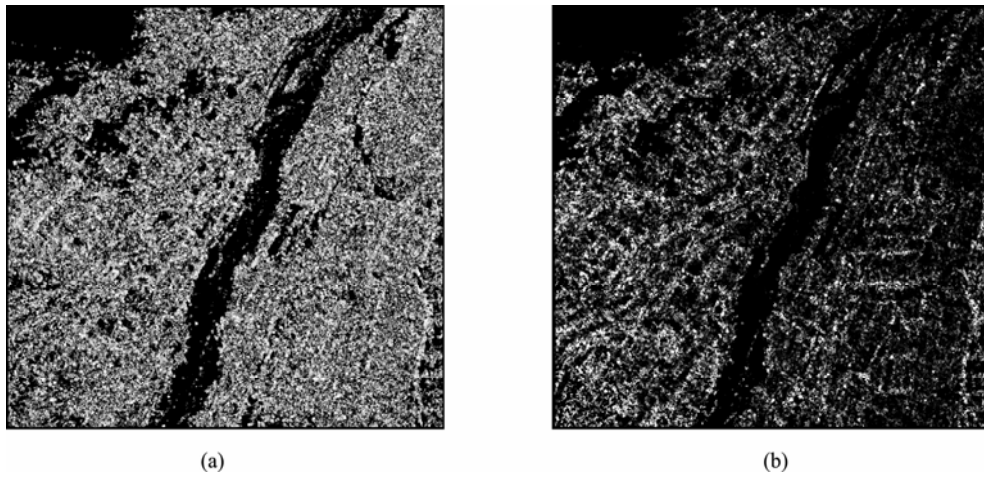


图3 从重建的地表极化相干矩阵 $T_s$ 得到的Alpha角度图(a)和从 $T_s$ 得到的HH相对后向散射图像(b)

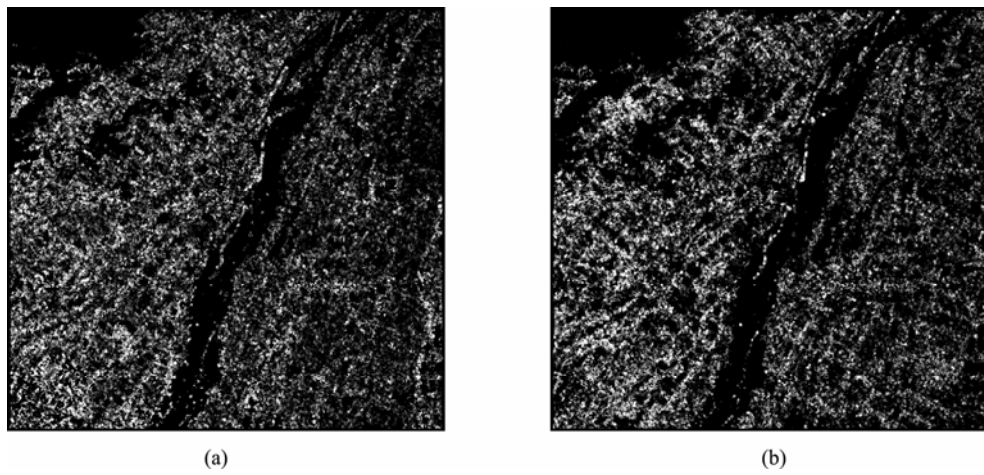


图4 (a)、(b) 分别是从 $T_s$ 得到 VV 和 HV 的相对后向散射图像

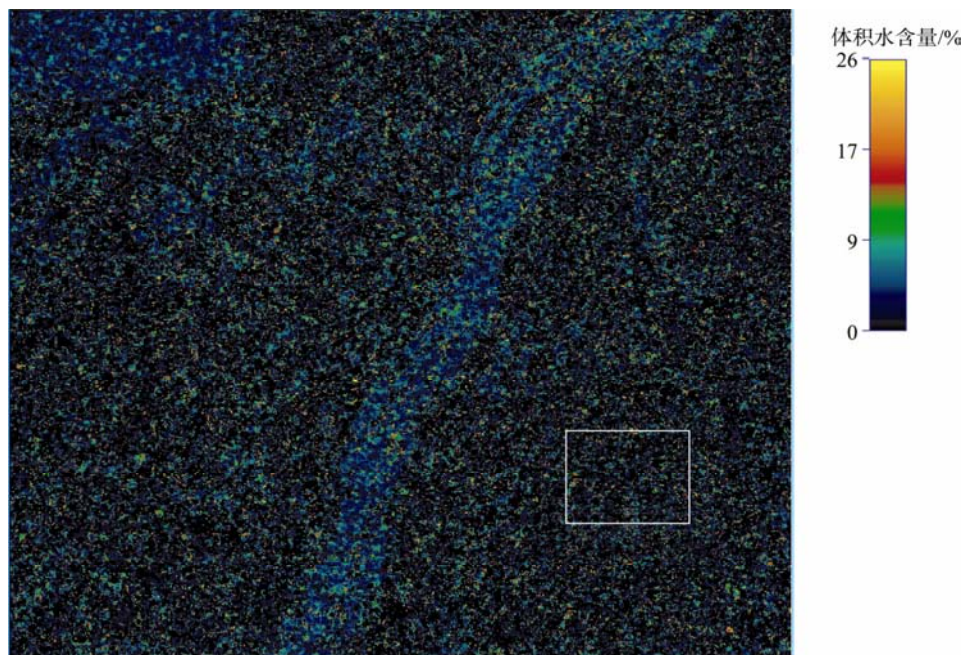


图5 基于重建的 $T_s$ 反演得到的土壤水分图/(%)

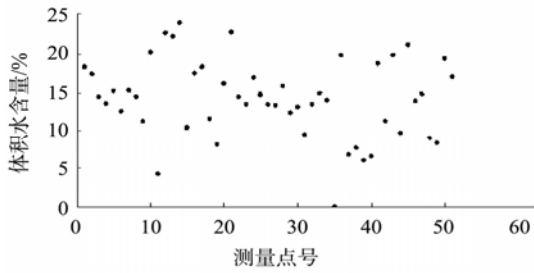


图6 2003年8月实测的该绿洲区域各点的地表土壤水分平均值

该绿洲区域进行 ENVISAT 土壤水分试验时采集的实测土壤水分值。2003-08-13 研究组在该农场进行了较为详细的地表测量和信息收集, 包括该农场森林(防护林)和经济林的高度, 植被类型以及该区域的土壤水分测量样品。经过实验室测量和整理, 得到该区域 5 个植被覆盖地表采样点的土壤体积含水量分别为: 0.15044, 0.13463, 0.15134, 0.14332, 0.16169, 它们的均值为 0.14829, 标准偏差为 0.01006。同时, 从图 5 的白色矩形区域提取该农场区域的土壤水分值(除去裸露地表和不符合模型反演条件的值), 经过计算得到该农场区域的土壤水分平均值为 0.11782, 标准偏差为 0.04736。从以上结果看, 算法反演得到的土壤水分值与实测结果比较反演结果偏低。可能原因是: (1) 1994 年和 2003 年两年的年份差异造成的; (2) 该区域 8 月和 10 月土

壤水分的月份差异所致。为了进一步分析造成这种差异的原因, 研究组对该地区和田气象站观测的 1951—2006 年的气候资料进行了分析和研究。图 7(a)是 1951—2006 年和田地区 8 月和 10 月的温度图; 图 7(b)1951—2006 年和田地区 8 月份和 10 月份的降水数据图。从图 7 的结果看, 该区域在 56 年间, 8 月和 10 月的温度比较稳定, 8 月均温约 24°, 10 月均温约 12°; 该区域 8 月和 10 月降水很少, 8 月份降水最高 3mm, 相对 8 月降水多于 10 月, 并且, 10 月份在大部分年份基本没有降雨, 地表比较干旱。2003 年 8 月份的平均降雨量为 0.8mm, 1994 年 10 月份的平均降雨量为 0。通过上面的分析得出: 10 月份该区域地表状况比较稳定, 地表变化由年际引起的差异较小, 因此, 实测数据结果高于估计结果的原因是由于该地区 8 月份降雨量比 10 月份多即月份差异造成的, 年份影响不大, 在 10 月份大多数年份降雨为零。因此, 反演得到的 10 月份的土壤水分比 8 月份实测的土壤水分结果低是正常的。

通过上面的土壤水分实测结果和反演方法估计的土壤水分结果在墨玉县农场区域的定量比较和分析以及该区域气候资料的分析和讨论可以看出: 基于极化干涉 SAR 最大似然反演分解模型的植被覆盖区土壤水分反演方法得到的结果是合理和可信的, 且具有较高的反演精度。

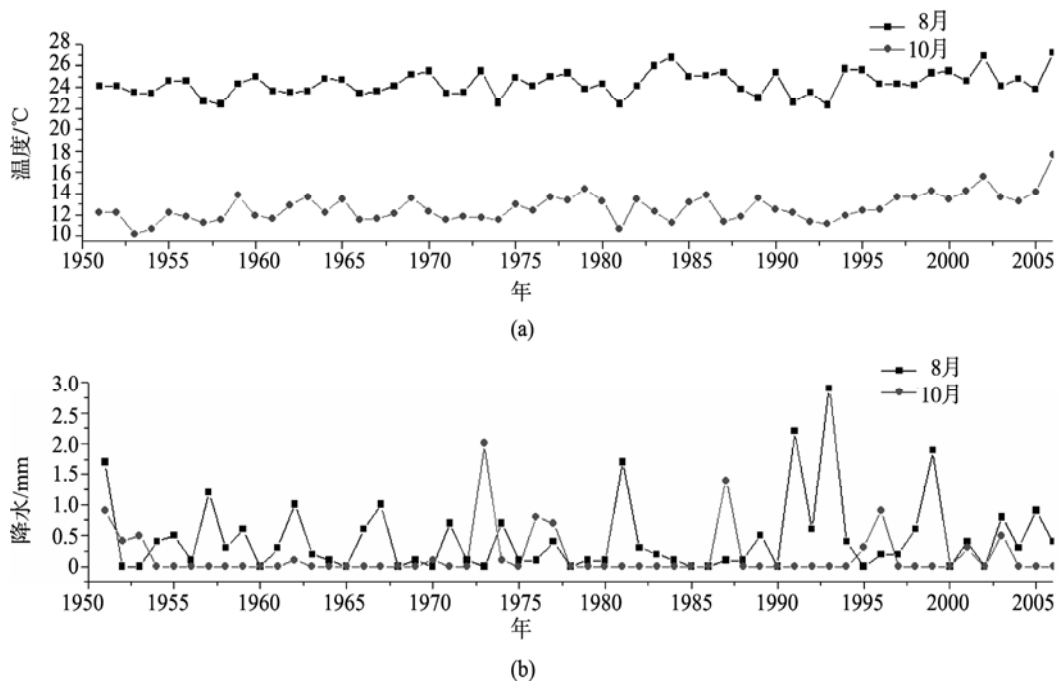


图 7 和田地区气象站 1951—2006 年的气候温度(a)和降水(b)数据  
(位置 N37.10°, E79.90°, 高程: 1375m)

## 6 结 论

本文基于SIR-C L波段极化干涉雷达数据和极化干涉SAR最大似然分解模型,提出了一个完整的用重复轨道SIR-C极化干涉雷达数据反演植被覆盖区土壤水分的方法,同时,通过对极化干涉雷达最大似然分解模型在土壤水分反演上的潜力和有效性分析,初步结果表明:基于该模型的植被覆盖地表土壤水分反演方法的反演结果具有足够高的精度。为了成功地进行高精度的土壤水分反演:(1)高精度的植被结构和地表地形参数的估计是必须的;(2)为了保持极化干涉相干矩阵的正定性质,在去除平地相位时,必须乘以一个公共的相位因子。下一步研究工作将主要进行:(1)精炼反演方法以得到更为精确的植被结构和地表地形参数值,得到更为准确的土壤水分值;(2)寻求和采集可以进行机或星—地同步试验的极化干涉雷达新数据,进一步验证方法的有效性和结果的正确性。

**致 谢** 感谢北京交通大学的张玉川同学给予研究工作的支持和有价值的讨论。

## REFERENCES

- Cloude S R and Williams M. 2005. The negative Alpha filter: a new processing technique for polarimetric SAR interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett.*, **2** (2): 187—191
- Cloude S R, Corr D G and Williams M L. 2004. Target detection be-

neath foliage using polarimetric synthetic aperture radar interferometry. *Waves in Random Media*, **14**: S393—S414

- Freeman A and Durden S. 1998. A three-component model for polarimetric SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **34** (3): 963—973
- Irena H, Pottier E and Cloude S R. 2003. Inversion of surface parameters from polarimetric SAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, **41** (4): 727—744
- Irena H. 2001. Inversion of Surface Parameters Using Polarimetric SAR. *Ph. D. thesis*. Germany
- Neumann M, Daniel S, Ferro-Famil L, Allain S, Reigber A and Pottier E. 2007. Ground-agriculture separation by means of polinsar. *Polinsar'2007 Conference*
- Oh Y, Sarabandi K and Ulaby F T. 1992. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **30** (2): 963—973
- Tabb M, Flynn T and Carande R. 2004. Full maximum likelihood inversion of PolInSAR scattering models. *IGARSS'2004*
- Topp G C, Davis J L and Annan A P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, **16** (3): 574—582
- Treuhaft R N and Siqueira P. 2000. Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar. *Radio Science*, **35** (1): 141—178

## 附中文参考文献

- Roger A H and Charles R J. 2005. 矩阵分析. 北京, 机械工业出版社
- Steven M K 著(美). 罗鹏飞, 张文明, 刘忠, 赵艳丽译. 2003. 统计信号处理基础—估计与检测理论. 北京, 电子工业出版社
- 国家气象局. 2006. 和田地区 1951—2006 年的气候数据
- 张尧庭, 方开泰. 2006. 多元统计分析引论. 北京, 科学出版社