

文章编号: 1007 4619(2006)05 0777-06

# Envisat 1 双极化雷达数据建模及应用

李 震<sup>1</sup>, 陈 权<sup>1,2</sup>, 任 鑫<sup>2,3</sup>

(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101;

2 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3 中国科学院 国家天文台, 北京 100101)

**摘 要:** 根据欧空局 Envisat 1 卫星上 ASAR 传感器的系统参数和双极化特点, 利用 AIEM 模型模拟, 建立了裸露地表同极化后向散射模型和粗糙度参数计算模型。前者把同极化总后向散射系数表达成入射角和两个地表参数(土壤水分和粗糙度)的函数; 后者给出了用双极化雷达数据计算粗糙度的方法。把这两个模型结合, 用于土壤水分反演, 分别用模拟数据和实测数据验证, 良好的结果证明了这两个模型的可靠性和实用性。双极化后向散射模型的建立, 将为以后 PALSAR(日本)和 RADARSAT 2(加拿大)多极化雷达数据的应用打下基础。

**关键词:** Envisat 1; ASAR; 后向散射; AIEM; 土壤水分

中图分类号: TP722.6 文献标识码: A

## Modeling Envisat 1 Dual Polarized Data and Its Applications

LIZhen<sup>1</sup>, CHEN Quan<sup>1,2</sup>, REN Xin<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 National Astronomical Observatories Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract** Bare surface co-polarized backscattering model and roughness computing model is established using AIEM simulated data based on the configuration and dual polarized nature of Envisat 1 ASAR data. The former expresses co-polarized backscattering coefficient as the function of incidence angle and two surface parameters (namely, soil moisture and roughness); and the later gives the method to obtain roughness using dual polarized radar data. Soil moisture is estimated by combining the two models and validation is performed by both simulated data and *in-situ* data. The results show that the two models are reliable and useful. The foundation of dual polarized model will benefit to modeling and applications of multi polarized radar data on PALSAR (Japan) and RADARSAT-2 (Canada) in the future.

**Key words** Envisat 1; ASAR; backscattering; AIEM; soil moisture

## 1 引 言

欧空局 2002 年发射的 Envisat 1 卫星, 搭载着 ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) 传感器。

该传感器是 ERS 1/2 卫星上 SAR 传感器的改进设备。其中最主要的改进是, 观测极化方式由 SAR 的单极化观测 (VV), 提高到可进行双极化 (VV HH, HH HV 或 VV VH) 观测。如何对双极化的 ASAR 数据建模, 成了一个值得研究的问题。

收稿日期: 2006-03-07; 修订日期: 2006-05-22

基金项目: 国防科工委项目 (编号: KJSX0303), “863”项目 (编号: 2003AA131053), 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 李 震 (1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 1988 年毕业于武汉测绘科技大学航测系, 1998 年获中国科学院兰州冰川冻土研究所理学博士学位。目前主要从事环境遥感和微波遥感研究, 已发表论文 60 余篇。

建模是反演的基础,是遥感定量化的关键。在主动微波遥感领域,决定裸地后向散射强度的地表参数主要是地表粗糙度和土壤含水量 ( $M_v$ )。地表粗糙度由均方根高度 ( $s$ )和相长度 ( $l$ )表示,两者分别在垂直和水平方向对地表粗糙度进行表达。但是,在一些研究<sup>[1-2]</sup>中,粗糙度用组合粗糙度参数  $Z_s$  来表示 ( $Z_s = s^2 / l$ ),主要目的是减少未知数,达到简化模型的目的。

本文根据 ASAR 传感器的系统参数,通过 A IEM 模型<sup>[3-4]</sup>的模拟数据,分别建立了同极化雷达后向散射模型和双极化雷达数据粗糙度计算模型。为了验证模型的可靠性,将两种模型结合,用于土壤水分反演。分别采用模拟数据和实测数据验证,结果表明两种模型结合后能有效地反演土壤水分,证明了

模型的可靠性。

## 2 建立同极化雷达后向散射模型

### 2.1 土壤含水量 ( $M_v$ ) 和后向散射系数之间的关系分析

HH 极化和 VV 极化的后向散射简化模型,把总后向散射系数表示成入射角、土壤水分和地表粗糙度的函数。通过大量的模拟分析并结合以前的研究结论<sup>[2,5]</sup>,把土壤含水量与后向散射系数 (dB) 的关系用一个对数式来表达:

$$\sigma_{HH}^0 = A_{HH} \ln(M_v) + f(\text{roughness}) \quad (1)$$

$$\sigma_{VV}^0 = A_{VV} \ln(M_v) + f(\text{roughness}) \quad (2)$$

用这个对数关系去拟合模拟数据,如图 1 所示。

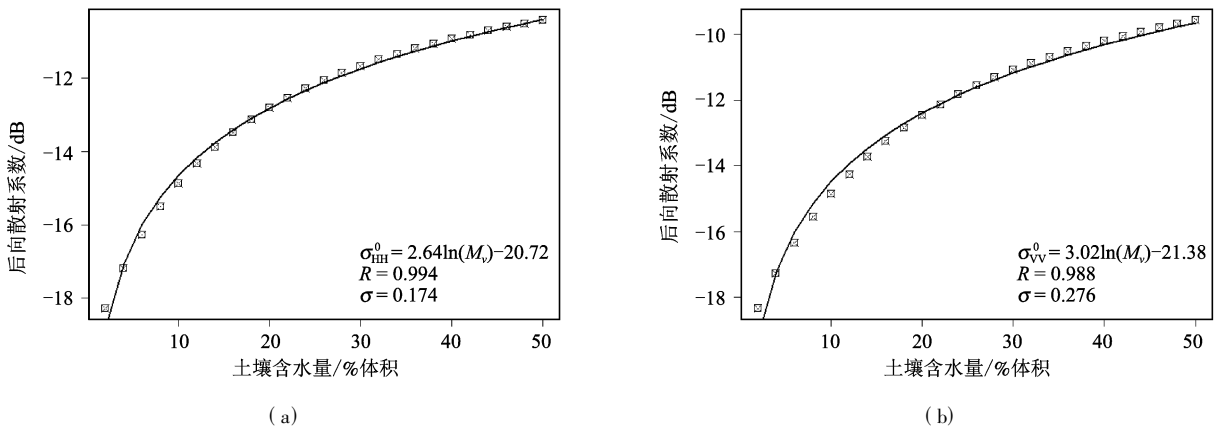


图 1 用对数关系拟合土壤含水量和后向散射系数 ( $\theta = 46^\circ, s = 0.7\text{m}, l = 9.0\text{cm}$ )

(a) HH 极化; (b) VV 极化

Fig 1 Fitting soil moisture and backscatter using e based logarithm ( $\theta = 46^\circ, s = 0.7\text{m}, l = 9.0\text{cm}$ )

(a) HH-POL; (b) VV-POL

由图 1 可以看到,无论水平极化还是垂直极化方式,都能得到很高的拟合系数,相关系数  $R$  分别为 0.994 和 0.988 中误差  $\sigma$  分别为 0.174 和 0.276 表明用 (1) 和 (2) 式表达土壤水分和后向散射系数的关系是合理的。

### 2.2 地表粗糙度同雷达后向散射系数之间的关系分析

地表粗糙度问题在雷达建模中比较复杂,主要是因为包括两个未知数 ( $s$  和  $l$ ),而且当其中一个固定成不同值时,另一个对后向散射系数的影响程度不一致<sup>[5]</sup>。本研究用  $Z_s$  来表示地表粗糙度,将  $Z_s$  与后向散射系数的关系用一个对数式来表达:

$$\sigma_{HH}^0 = B_{HH} \ln(Z_s) + f(M_v) \quad (3)$$

$$\sigma_{VV}^0 = B_{VV} \ln(Z_s) + f(M_v) \quad (4)$$

用 (3) 和 (4) 式去拟合模拟数据,结果如图 2 所示。

从图 2 可以看到,用组合粗糙度参数  $Z_s$  来表达地表粗糙度,一方面达到了减少未知数的目的;另一方面,  $Z_s$  与后向散射系数之间存在很好的对数关系,相关系数能达到 0.97 以上。

### 2.3 建立裸露地表同极化后向散射系数模型

结合 2.1 和 2.2 小节中的结论,把后向散射系数表示成  $M_v$  与  $Z_s$  的函数:

$$\sigma_{HH}^0 = A_{HH}(\theta) \ln(M_v) + B_{HH}(\theta) \ln(Z_s) + C_{HH}(\theta) \quad (5)$$

$$\sigma_{VV}^0 = A_{VV}(\theta) \ln(M_v) + B_{VV}(\theta) \ln(Z_s) + C_{VV}(\theta) \quad (6)$$

(5) 和 (6) 式中 6 个参数 ( $A_{HH} - C_{VV}$ ), 利用入射角  $10^\circ - 50^\circ$  中每个角度的拟合值,并再次拟合成入

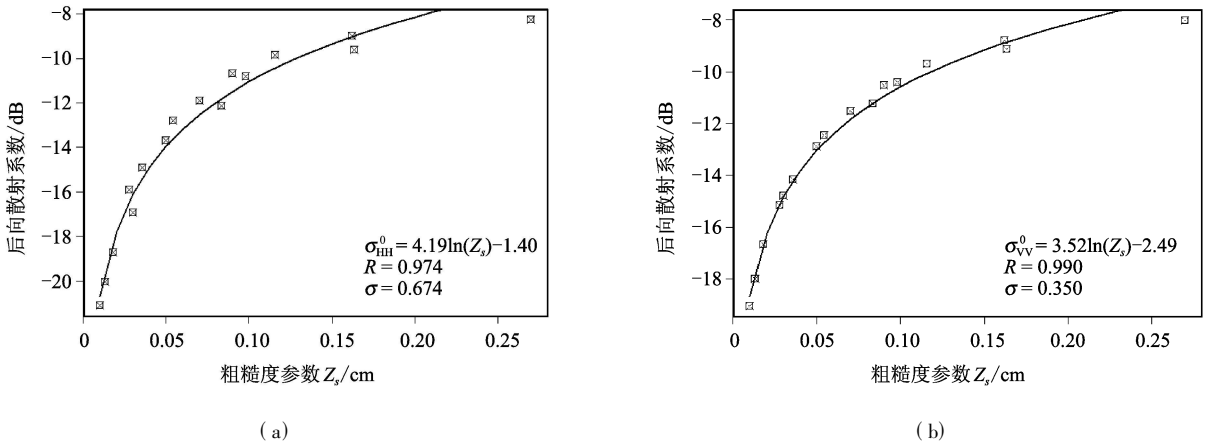


图 2 用对数关系拟合粗糙度 ( $Z_s$ ) 和后向散射系数 ( $\theta=46^\circ, s=0.7\text{m}, f=9.0\text{cm}$ )

(a) HH 极化; (b) VV 极化

Fig 2 Fitting roughness( $Z_s$ ) and backscatter using e based logarithm ( $\theta=46^\circ, s=0.7\text{m}, f=9.0\text{cm}$ )

(a) HH-POL; (b) VV-POL

射角的函数,其表达式分别为:

$$\left. \begin{aligned} A_{HH}(\theta) &= 0.85 + 3.53\cos\theta - 1.56\cos^2\theta \\ B_{HH}(\theta) &= -1.02 + 12.251\sin\theta - 6.25\sin^2\theta \\ C_{HH}(\theta) &= 4.98 - 15.89\cos\theta + 17.14\cos^2\theta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

和

$$\left. \begin{aligned} A_{VV}(\theta) &= 4.59 - 3.18\cos\theta + 1.43\cos^2\theta \\ B_{VV}(\theta) &= -0.92 + 11.67\sin\theta - 7.32\sin^2\theta \\ C_{VV}(\theta) &= 10.97 - 33.09\cos\theta + 28.42\cos^2\theta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

至此,已建立了同极化后向散射系数模型((5)和(6)式),为了验证模型的准确性,把模型的输出结果与 A IEM 模型的输出相比较,结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看到,建立的模型与 A IEM 模型计算的后向散射系数非常接近,最大误差不超过 2dB,误差小于 1dB 的占总数的 80% 以上。

### 3 双极化雷达数据 $Z_s$ 计算模型

地表粗糙度一直是雷达数据建模和定量反演中的关键问题,这是因为粗糙度对后向散射系数有很大的影响。研究表明<sup>[6-8]</sup>,土壤水分对后向散射系数的影响为 5—7dB,而粗糙度对后向散射系数的影响可以达到 10dB 以上。如何定量表达地表粗糙度,成了一个困扰中外科学家的难题。

本节为了确定组合地表粗糙度参数  $Z_s$ ,分别分析了同极化后向散射系数(dB)差(即  $\sigma_{VV}^0 - \sigma_{HH}^0$ )、交叉极化后向散射系数(dB)差( $\sigma_{HV}^0 - \sigma_{HH}^0$ 和  $\sigma_{VH}^0 - \sigma_{VV}^0$ )与  $Z_s$  之间的关系,建立了双极化雷达数据粗糙度参数( $Z_s$ )计算模型。经过大量的模拟研究,提出了在三种数据源情况下的计算  $Z_s$  的方法。

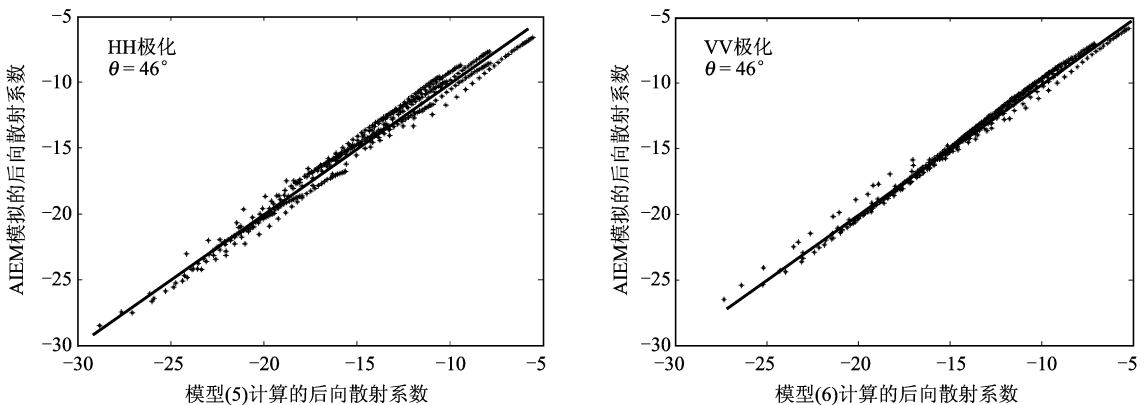


图 3 建立的后向散射模型与 A IEM 模型比较(以  $46^\circ$  入射角为例)

Fig 3 The comparison of developed backscatter model and A IEM model(incidence angle is  $46^\circ$ )

### 3 1 同极化差 ( $\sigma_{VV}^0 - \sigma_{HH}^0$ ) 计算 $Z_s$

如果已知数据为  $\sigma_{HH}$  和  $\sigma_{VV}$ , 则同极化差与组合粗糙度参数  $Z_s$  之间存在下面的非线性关系, 即:

$$\Delta\sigma^0 = A(\theta) \ln(\sqrt{Z_s}) + B(\theta) \quad (9)$$

式中,  $\Delta\sigma^0 = \sigma_{VV}^0 - \sigma_{HH}^0$  (dB),  $A(\theta)$  和  $B(\theta)$  是只与入射角有关的系数, 表达式为:

$$A(\theta) = -0.42 - 6.13\cos\theta + 6.56\cos^2\theta \quad (10)$$

$$B(\theta) = 0.32 - 5.48\cos\theta + 5.18\cos^2\theta \quad (11)$$

图 4(a) 给出了  $46^\circ$  入射角时的拟合结果。

### 3 2 交叉极化差 ( $\sigma_{VH}^0 - \sigma_{HV}^0$ ) 计算 $Z_s$

如果已知数据为  $\sigma_{VV}$  和  $\sigma_{VH}$ , 交叉极化差  $\Delta\sigma_{VV}^0 = \sigma_{VH}^0 - \sigma_{HV}^0$  与  $Z_s$  的关系可表示为:

$$\Delta\sigma_{VV}^0 = A_v(\theta) \ln(Z_s) + B_v(\theta) \quad (12)$$

$A_v(\theta)$  和  $B_v(\theta)$  的表达式为:

$$A_v(\theta) = 2.49 - 2.91\sin\theta + 2.00\sin^2\theta \quad (13)$$

$$B_v(\theta) = -14.86 + 11.44\sin\theta - 5.31\sin^2\theta \quad (14)$$

图 4(b) 中给出了  $46^\circ$  入射角时的拟合结果。

### 3 3 交叉极化差 ( $\sigma_{HV}^0 - \sigma_{HH}^0$ ) 计算 $Z_s$

如果已知数据为  $\sigma_{HH}$  和  $\sigma_{HV}$ , 交叉极化差  $\Delta\sigma_{HH}^0 = \sigma_{HV}^0 - \sigma_{HH}^0$  与  $Z_s$  的关系可表示为:

$$\Delta\sigma_{HH}^0 = A_h(\theta) \sqrt{Z_s} + B_h(\theta) \quad (15)$$

$A_h(\theta)$  和  $B_h(\theta)$  的表达式为:

$$A_h(\theta) = 18.657 - 26.889\sin\theta + 10.809\sin^2\theta \quad (16)$$

$$B_h(\theta) = -27.016 + 27.735\sin\theta - 13.151\sin^2\theta \quad (17)$$

图 4(c) 中给出了  $46^\circ$  入射角时的拟合结果。

由图 4 可以看到, 模拟数据与  $Z_s$  计算模型之间有良好的拟合关系, 尤其是当数据源是交叉极化差时(图 4(b)和图 4(c)), 模型与模拟数据的拟合系数都能达到了 0.9 以上。

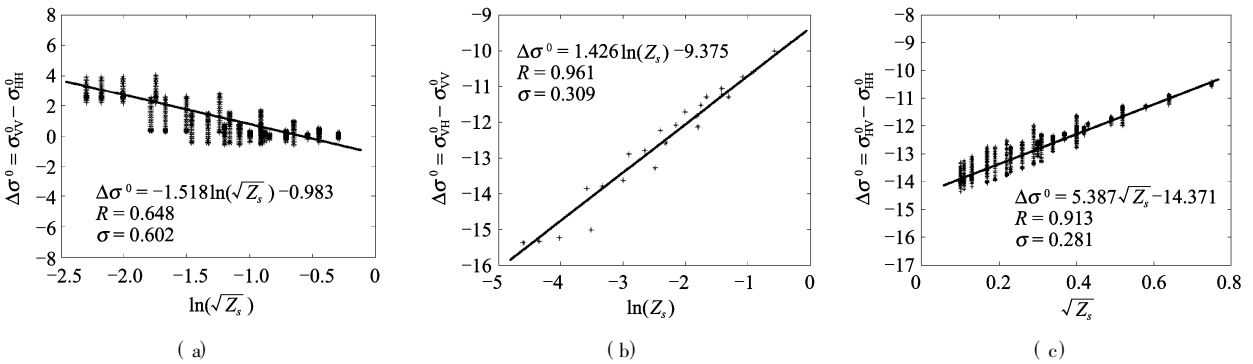


图 4  $Z_s$  计算模型在三种数据源情况下的拟合关系(以  $46^\circ$  入射角为例)

Fig 4  $Z_s$  computing model fitting results at three condition(incidence angle is  $46^\circ$ )

## 4 建模的应用

结合建立的同极化后向散射模型和粗糙度参数计算模型, 进行地表土壤水分的定量反演。并进行两种形式的验证: (1) A IEM 模拟数据验证; (2) ASAR 实测数据验证。

实测数据采用 2003 年 8 月 12 日新疆和田地区 VV/VH 极化方式雷达图像(中心入射角为  $33^\circ$ )及地面同步观测土壤水分数据。结合(6)和(12)式, 得到土壤水分的反演方法:

$$\left. \begin{aligned} Z_s &= \exp\left\{ \frac{\Delta\sigma_{VV}^0 - B_v(\theta)}{A_v(\theta)} \right\} \\ M_v &= \exp\left\{ \frac{\sigma_{VV}^0 - B_{VV}(\theta) \ln(Z_s) - C_{VV}(\theta)}{A_{VV}(\theta)} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

把用 A IEM 模拟的后向散射系数根据(18)式计算得到的土壤水分输出结果与 A IEM 输入土壤水分相比较, 所得的比较结果和绝对误差分布如图 5 所示。

由图 5 可以看到, 模型输出与 A IEM 输入土壤水分的相关系数达到了 0.979 绝对误差 90% 以上小于 5(% 体积), 这就用模拟数据验证了反演的土壤含水量的可靠性, 也证明了建立的两个模型的可靠性。

利用实测的 ASAR 数据和同步观测土壤水分数据对(18)式的反演方法进行验证, 结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 实测的土壤水分同模型的反演结果之间有良好的相关性, 相关系数达到了 0.930 最大绝对误差是 6%, 其中 80% 的反演结果最大绝对误差在 4% 以内, 这就用实测数据验证了

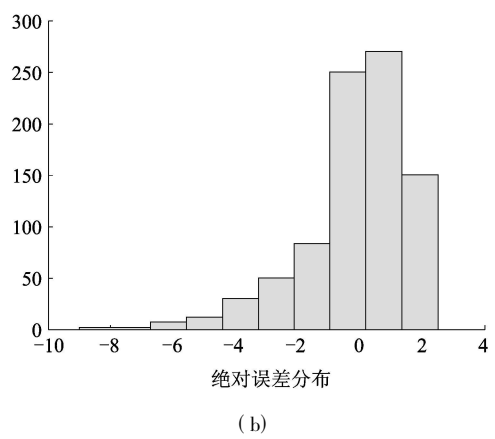
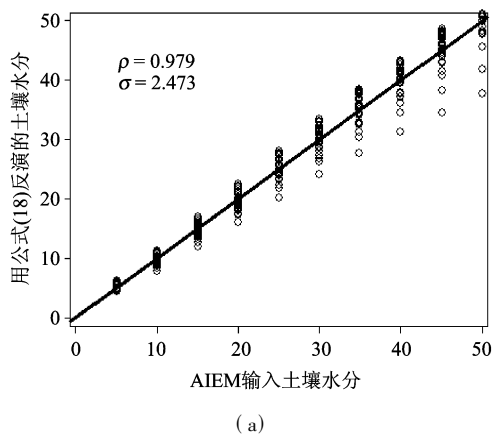


图 5 用模拟数据验证土壤水分估算方法 (18 式)

Fig 5 Validation of soilmoisture estimation using simulated data(The validation of fomula 18)

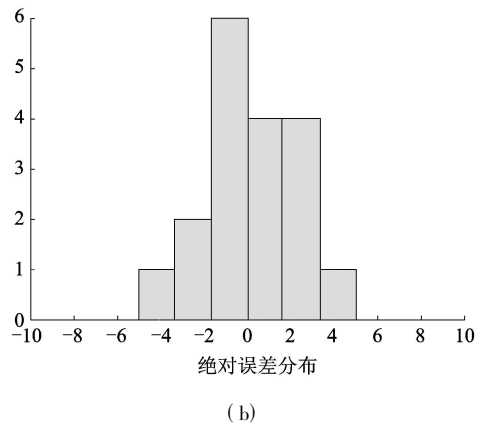
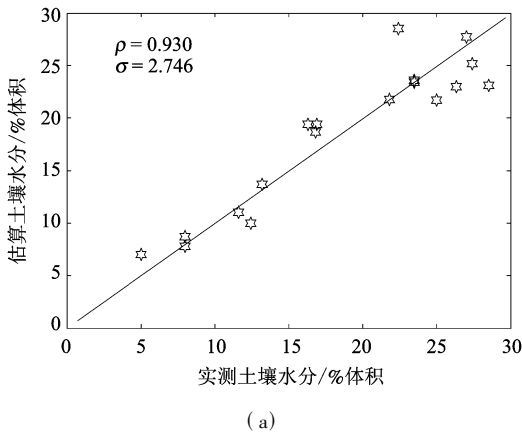


图 6 实测数据验证结果

Fig 6 Validation of soilmoisture estimation using *in situ* data

土壤水分反演方法和两个模型的可靠性。

## 5 结 论

(1) 建立了 ASAR 数据同极化后向散射模型, 把水平极化和垂直极化的后向散射系数表达成入射角 ( $\theta$ )、土壤水分 ( $M_v$ ) 和粗糙度 ( $Z_s$ ) 的一个简单函数;

(2) 根据 ASAR 数据的双极化特点, 提出了双极化雷达数据粗糙度参数 ( $Z_s$ ) 计算模型, 给出了用 ASAR 的双极化数据 (VV HH, HH HV 或 VV VH) 计算地表粗糙度参数 ( $Z_s$ ) 的方法;

(3) 把以上两个模型结合, 应用到土壤水分反演中, 分别用模拟数据和实测数据进行验证, 得到了较好的效果。

需要指出的是, 在建立粗糙度参数 ( $Z_s$ ) 计算模型时, VV VH 极化组合方式有最好的相关性, 而收

集到的星载 ASAR 数据也是这种极化方式, 所以得到的土壤水分估算结果较好, 但是, 由于 ASAR 交叉极化数据的信噪比较低, 实测雷达数据反演粗糙度的结果很不理想。下一步的工作要继续收集不同卫星、不同极化组合方式及不同入射角的数据, 进一步验证和改进这两个模型。

## 参 考 文 献 (References)

[ 1 ] Li Z, Shi J G, Guo H D. Measuring Soil Moisture Change with Vegetation Cover Using Passive and Active Microwave Data[ C]. IGARSS' 02. 3071— 3074

[ 2 ] Ren X. A Surface Moisture Inversion Technique Using Multi Polarization and Multi Angle Radar Images [ D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences. M. S. Dissertation. 2004. [任鑫. 多极化、多角度 SAR 土壤水分反演算法研究 [ D]. 中国科学院研究生院硕士学位论文, 2004 ]

[ 3 ] Fung A K, et al. Backscattering from a Randomly Rough Dielectric Surface[ J]. *IEEE Transactions on Geoscience and*

- Remote Sensing* 1992 **30**: 356–369.
- [ 4 ] Yang H *et al* Temporal and Spatial Soil Moisture Change Pattern Detection Using Multi temporal Radarsat SCANSAR Images[ C]. IGARSS' 03
- [ 5 ] Chen Q, Li Z, Wang L. An Analysis of Applying S-Band SAR of HJ1C to Soil Moisture Change Retrieval[ J]. *Remote Sensing for Land & Resources* 2005 (2): 12–16 [陈权, 李震, 王磊. 环境小卫星 S波段 SAR监测土壤水分变化应用分析[ J]. 国土资源遥感, 2005 (2): 12–16.]
- [ 6 ] Yisok Ok, Kan al Sarabandi, Ulaby F T. An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces[ J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1992 **30**: 370–381.
- [ 7 ] Pascale C Dubois, Jakob van Zyl. Measuring Soil Moisture with Imaging Radars[ J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1995 **33**: 915–926.
- [ 8 ] Shi J G, Wang J an es, Hsu Ann Y *et al* Estimation of Bare Surface Soil Moisture and Surface Roughness Parameter Using L-band SAR Image Data[ J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1997 **35**: 1254–1266.