

文章编号: 1007-4619 (2004)03-0201-06

用多阶 Mueller 矩阵解对非均匀地表植被生物量和土壤湿度的迭代反演

梁子长, 金亚秋

(复旦大学波散射和遥感信息教育部重点实验室, 上海 200433)

摘要: 根据一层随机非球形粒子矢量辐射传输方程的一阶与高阶 Mueller 矩阵解的数值模拟及其差异, 提出了在一些参数已知的条件下, 用水平与垂直同极化和交叉极化的后向散射测量反演植被覆盖下地表湿度和植被散射元单位面积占空比的迭代方法。利用模拟测量数据以及机载合成孔径雷达 (AirSAR) 实测数据, 对不同土壤湿度和单位面积占空比的情况进行了反演试验。

关键词: VRT 方程; Mueller 矩阵; 非球形粒子; 迭代反演

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

1 引言

空对地遥感的一项主要目标是获取地面植被生物量和地表的湿度。近年来, 合成孔径雷达 (SAR) 极化测量与成像技术促进了地面的物理信息反演的应用研究^[1-5]。但是现有主被动遥感的反演大都是基于单次散射的简化模型^[6,7]或经验性统计, 忽略了高阶散射, 也缺少普适性强的理论方法。用非均匀植被地表 SAR 观测成像同时进行生物量与地表湿度的反演更是少见。

求解主动矢量辐射传输 (VRT) 方程一般较少涉及高阶散射解, 我们在文献[8]中发展了计算 VRT 方程高阶 Mueller 解的分层迭代法, 从而能实现高阶散射解和散射观测的模拟计算。本文利用该方法计算了一层非球形散射粒子 VRT 方程的高阶 Mueller 矩阵解, 并和一阶解一起模拟垂直与水平同极化和交叉极化的 Mueller 矩阵元素的后向散射测量值。由一阶解与高阶解的差异, 我们提出反演 SAR 图像观测的非均匀植被地表中各像素元的地面湿度和植被散射元单位面积占空比的迭代方法, 并用极化后向 Mueller 矩阵解加噪声后的模拟测量值以及机载合成孔径雷达 (AirSAR) 实际测量数据进行了反演试验。

2 VRT 方程的 Mueller 矩阵解

如图 1 所示, 一层散射介质的 VRT 方程写为:

$$\cos \theta \frac{d}{dz} \mathbf{I}(\theta, \varphi, z) = -\overline{\kappa}_e(\theta, \varphi) \cdot \mathbf{I}(\theta, \varphi, z) + \int_0^\pi d\theta' \sin \theta' \int_0^{2\pi} d\varphi' \overline{P}(\theta, \varphi; \theta', \varphi') \cdot \mathbf{I}(\theta', \varphi', z) \quad (1)$$

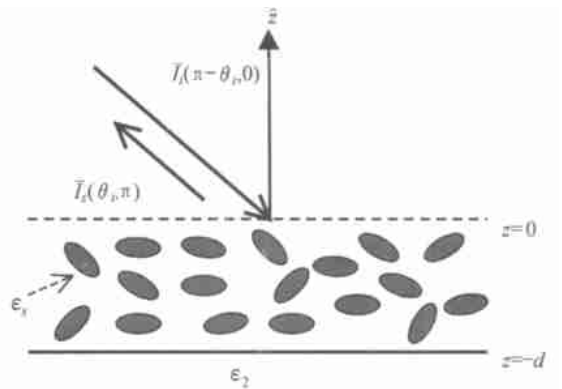


图 1 问题的几何结构

Fig. 1 Geometry of the problem

其中 $\overline{\kappa}_e$ 为消光系数矩阵, \overline{P} 为相矩阵。边界条件可写为 ($0 < \theta < \pi/2$):

收稿日期: 2002-10-21; 修订日期: 2003-02-19

基金项目: 国家重点基础研究规划项目 2001CB309401, 国家自然科学基金 60171009 资助项目。

作者简介: 梁子长 (1978-), 男, 复旦大学无线电物理硕士研究生, 在国内外学术刊物上发表 10 多篇论文。

$$\begin{cases} \mathbf{I}(\pi - \theta, \varphi, z=0) = \mathbf{I}_0 \delta(\cos \theta - \cos \theta_i) \delta(\varphi) \\ \mathbf{I}(\theta, \varphi, z=-d) = \mathbf{R}_{12}(\theta) \cdot \mathbf{I}(\pi - \theta, \varphi, z=-d) \end{cases} \quad (2)$$

其中 \mathbf{I}_0 为入射 Stokes 矢量, $(\theta_i, \varphi_i=0)$ 为入射角, $\mathbf{R}_{12}(\theta)$ 是下垫界面反射率矩阵。

在 $z=0$ 处散射 Stokes 矢量可以用 Mueller 矩阵 \mathbf{M} 表示成:

$$\mathbf{I}_s(\theta, \varphi) = \mathbf{M}(\theta, \varphi; \pi - \theta_i, 0) \cdot \mathbf{I}_0 \quad (3)$$

其中 \mathbf{M} 为(模拟或测量的)各阶 Mueller 矩阵之和, 即

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}^{(1)} + \mathbf{M}^{(2)} + \dots + \mathbf{M}^{(n)} \quad (4)$$

其中一阶 Mueller 矩阵解 $\mathbf{M}^{(1)}$ 可解析地表示成散射粒子几何大小、介电常数 ϵ_s 、单位面积占空比 fd (f 为单位体积占空比) 以及下垫介质介电常数 ϵ_2 等的函数^[6]。其它各高阶 Mueller 矩阵解可用 VRT 方程(1)的高阶散射的分层迭代法计算^[8]。该方法通过将散射介质层分为多个薄层 Δd , 利用薄层的一阶 Mueller 矩阵, 并根据散射强度在各薄层间的传递关系, 依次迭代计算出总散射介质层各高阶 Mueller 矩阵解 $\mathbf{M}^{(n)}$ ($n > 1$)。其中相邻两薄层 ℓ 与 $\ell \pm 1$ 层之间向下和向上的辐射传递公式为:

$$\mathbf{I}_s^{(\ell)}(\pi - \theta) = \mathbf{I}_s^{(\ell)}(\pi - \theta) + \mathbf{I}_s^{(\ell-1)}(\pi - \theta) \times \exp\left[-\kappa_{e\ell} \Delta d \sec \theta\right] \quad (5a)$$

$$\mathbf{I}_s^{(\ell)}(\theta) = \mathbf{I}_s^{(\ell)}(\theta) + \mathbf{I}_s^{(\ell+1)}(\theta) \exp\left[-\kappa_{e\ell} \Delta d \sec \theta\right] \quad (5b)$$

其中 $\kappa_{e\ell}$ 为第 ℓ 薄层消光系数, $\mathbf{I}_s^{(\ell)}$ 是第 n 阶传递的第 ℓ 薄层的总散射强度, $\mathbf{I}_s^{(\ell)}$ 是第 n 阶第 ℓ 薄层本身(记下标 s , self)的散射强度, 并由 $(n-1)$ 阶解迭代求得:

$$\mathbf{I}_s^{(\ell)}(\theta) = \int_{\pi/2}^{\pi} \mathbf{M}_s^{(1)}(\theta, \theta') \cdot \mathbf{I}_s^{(\ell-1)}(\theta') \sin \theta' d\theta' + \int_0^{\pi/2} \mathbf{M}_s^{(1)}(\theta, \theta') \cdot \mathbf{I}_s^{(\ell+1)}(\theta) \sin \theta' d\theta' \quad (6)$$

其中 $\mathbf{M}_s^{(1)}(\theta, \theta')$ 为第 ℓ 薄层的一阶 Mueller 矩阵, 详细的计算过程请参见文献[8]。

若下垫介质为土壤, 则 ϵ_2 主要由土壤体湿度 m_v 决定, 由 m_v 经验计算 ϵ_2 的公式可参考文献[6]。因此, Mueller 矩阵解元素 $M_{pq}(p, q = v, h, v, h)$ 分别代表垂直和水平极化)是待求未知生物量 fd 和土壤湿度 m_v 的函数。在散射粒子几何大小与介电常数 ϵ_s 假定为已知的情况下, 一阶 $\mathbf{M}_{pq}^{(1)}$ 可写成是 fd 和 m_v 的函数:

$$\mathbf{M}_{pq}^{(1)} = \mathbf{M}_{pq}^{(1)}(fd, m_v) \quad (7)$$

而且在实际的问题中 fd 与 m_v 的取值范围是有限的, 在其取值范围内 $\mathbf{M}_{pq}^{(1)}$ 一般随着 fd 和 m_v 单调变化, 因此在本文中进一步假定 $\mathbf{M}_{pq}^{(1)}$ 和 fd 与 m_v 有一一对应的关系。

3 随机非球形粒子参数的迭代反演

在已知粒子大小(如椭球粒子半轴长 a, c , 柱体半径 A 与半高 H) 和介电常数 ϵ_s 时, 可获得某一入射角 θ_i 的左上角四个 Mueller 矩阵元素 $M_{vv}, M_{hh}, M_{lv}(=M_{vh})$ 。由方程(7), 可以用变步长扫描法求解出下垫土壤湿度 m_v 与单位面积占空比 fd 二个未知量。变步长扫描的过程如下:

给定 m_v 和 fd 的初始值, 及初始步长 Δm_v 和 Δfd 。将(7)式的计算值 $\mathbf{M}^{(1)}(fd, m_v)$ 与测量值(或多阶之和模拟值) \mathbf{M} 的误差

$$Err = [\mathbf{M}_{vv}^{(1)}(fd, m_v) - M_{vv}]^2 + [\mathbf{M}_{vh}^{(1)}(fd, m_v) - M_{vh}]^2 + [\mathbf{M}_{hh}^{(1)}(fd, m_v) - M_{hh}]^2 \quad (8)$$

作为判断扫描方向及终止循环的标准。

首先扫描土壤湿度。将步长 Δm_v 加到土壤湿度 m_v , 然后计算(8)式的 Err , 并与前一步的该误差值比较, 若更小则继续照原方向扫描, 更大或相等则先改变步长 $\Delta m_v = -0.5 m_v$, 即缩小步长并改变扫描方向后再继续循环。当 Δm_v 小于某一值时则跳出该重循环, 并保留此时一重循环后的 m_v 和最小误差 Err_{min} 。

然后扫描单位面积占空比, 将步长 Δfd 加到 fd 上。而对于 m_v 则恢复步长 Δm_v 初始值, 从上一次得到的 m_v 值开始再一次扫描 m_v , 得到此单位面积占空比下的新的土壤湿度 m_v 及 Err_{min} 。然后根据前后两次 Err_{min} 的比较结果, 再对步长 Δfd 作扫描处理并循环。最后当 Δfd 小于某一值时跳出循环, 并将此时的 m_v 和 fd 作为方程(7)的解。

m_v 和 fd 的取值总有一定的限制。对于每一个固定 fd 值, 总可找到 m_v 值, 使得误差(8)式最小, 得到满足方程(7)的解。可以看出, 采用该扫描法有几个好处: 首先求解时间少, 除第一次 m_v 需从给定值扫描外, 以后每次扫描, 因 fd 是一步步该变, m_v 均只需稍作变动; 其次最后结果与初始值和初始步长的选取无关, 而且精度容易控制。迭代反演的步骤总结为:

(1) 令(7)式的

$$\mathbf{M}_{pq}^{(1)}(fd, m_v) \approx \text{测量(或模拟)的 } \mathbf{M} \quad (9)$$

这里上标(1)₁ 表示一阶 Mueller 矩阵的第一次迭代反演值。用变步长扫描求解,得到第一次迭代反演值 $m_V^{(1)}, fd^{(1)}$ 。

(2) 由 $m_V^{(1)}$ 和 $fd^{(1)}$, 计算第一次近似的高阶 Mueller 矩阵解 $M^{(2)1}, \dots, M^{(n)1}$, 并令

$$\overline{M}^{(1)2}(fd, m_V) \approx \overline{M} - \sum_{j=2}^n \overline{M}^{(j)1} \quad (10)$$

然后用变步长扫描求解,得到第二次迭代反演值 $m_V^{(2)}$ 和 $fd^{(2)}$;

(3) 重复步骤(2),直到第 m 次迭代反演值 $m_V^{(m)}$ 和 $fd^{(m)}$ 收敛为止。

4 数值结果及讨论

4.1 模拟测量数据的反演

频率为 1.4GHz 的平面电磁波入射到一层厚为 $d=200\text{cm}$, 有下垫反射面的散射介质上,入射角为 $\theta_i=39^\circ$,非球形散射粒子取为小椭球,其半轴长分别为 $a=b=2.0\text{cm}$, $c=0.05\text{cm}$,其空间取向 Euler 角

在 $\beta \in (0^\circ, 60^\circ)$, $\gamma \in (0^\circ, 360^\circ)$ 内均匀分布,介电常数 $\epsilon_s=22.5+7.5i$ 。

分别利用(5)式和分层迭代法^[8]计算该散射介质层在占空比 $f=0.005$ 和 $f=0.01$ 时,不同土壤湿度情况下 VRT 方程的一阶及高阶 Mueller 矩阵解(至三阶),将其和作为 Mueller 矩阵解的模拟测量值:

$$\overline{M}(\text{模拟}) = \overline{M}^{(1)} + \overline{M}^{(2)} + \overline{M}^{(3)} \quad (11)$$

然后对各情况下的模拟测量数据,分别用上一节的步骤反演 fd 和 m_V 。在迭代反演过程中,限制土壤湿度 $m_V < 0.5$ 。

图 2 给出了土壤湿度的迭代反演情况,其中图标 1、2、3 分别表示迭代反演的次数。可以看出第 1 次的迭代反演值较偏离对角线,与真实值有很大差别,而第 3 次的迭代反演值与真实值较吻合。而且 $f=0.01$ 时第 1 次迭代反演结果完全偏离,这是因为散射介质层光学厚度较大,减弱了下垫面反射的作用。同时,高阶散射在总的后向散射中的贡献增大,完全掩盖了下垫面反射在一阶 Mueller 矩阵解中的作用,但在第 3 次迭代后可得很好的反演结果。

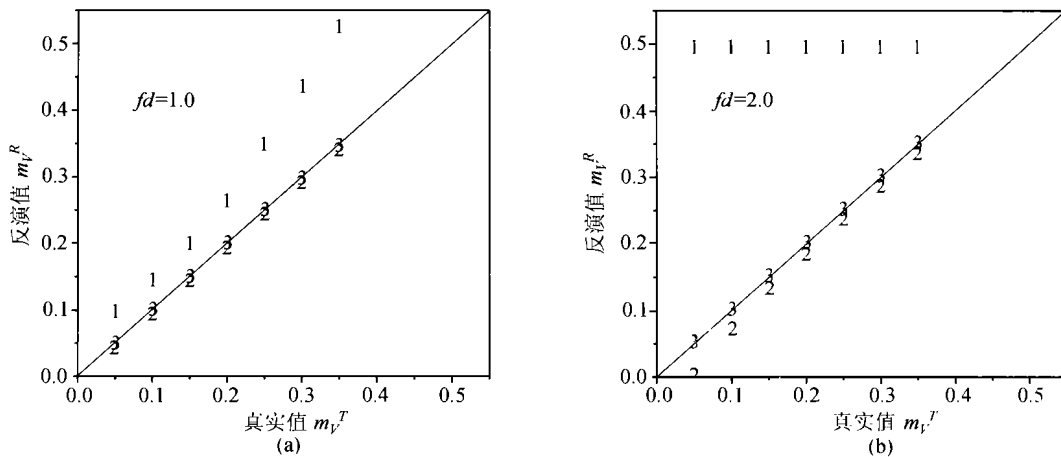


图 2 土壤湿度 m_V 的反演
Fig.2 Retrieval of soil moisture m_V

类似地,在选定土壤湿度 $m_V=0.05$ 和 $m_V=0.25$ 后,分别求解不同单位面积占空比情况下 VRT 方程的 Mueller 矩阵解,并利用(11)式得到模拟测量值 \overline{M} 。图 3 为迭代反演值 fd^R 与真实值 fd^T 的对照,可见第 2 次迭代反演值即与真实值吻合。

由于测量数据包含可能的各种噪声,我们在前述模拟测量数据的基础上加入随机噪声实现多次反演(取噪声幅度为交叉极化 Mueller 矩阵元素 M_{vh} 的 10% 之内)。图 4 给出了模拟测量数据中实现 10 次

随机噪声后进行的反演值分布。可以看出,反演值在以真实值, $\overline{m}_V^T=0.25, f d^T=1.0$ 为中心的两边随机摆动。反演平均值分别为 $\overline{m}_V^R=0.241, f d^R=0.953$, 尽管有所偏离,但与真实值还是相当一致的。

4.2 实际测量数据的反演

图 5 为选自 1994 年美国宇航局 JPL 实验室机载合成孔径雷达(AirSAR)在北美北部山区实验测量数据的 \overline{M} , 该区域非均匀地分布有幼年松树林^[9]。已知

植被厚大致在 $d=380\text{cm}$, 可看成由树干、主枝和从枝混合组成。计算时三者均采用柱状粒子模型^[6], 树干、主枝和从枝的占空比比例固定为 1:2:1, 其它参数

见表 1。实测的单位面积占空比平均为 $fd^T = 2.0(0.2 < fd^T < 3.8)$ 。该区域土壤介电常数实际测量为 $\epsilon_2 = 8.0 + 1.0i$, 换算成土壤湿度 $m_V^T = 0.15$ 。

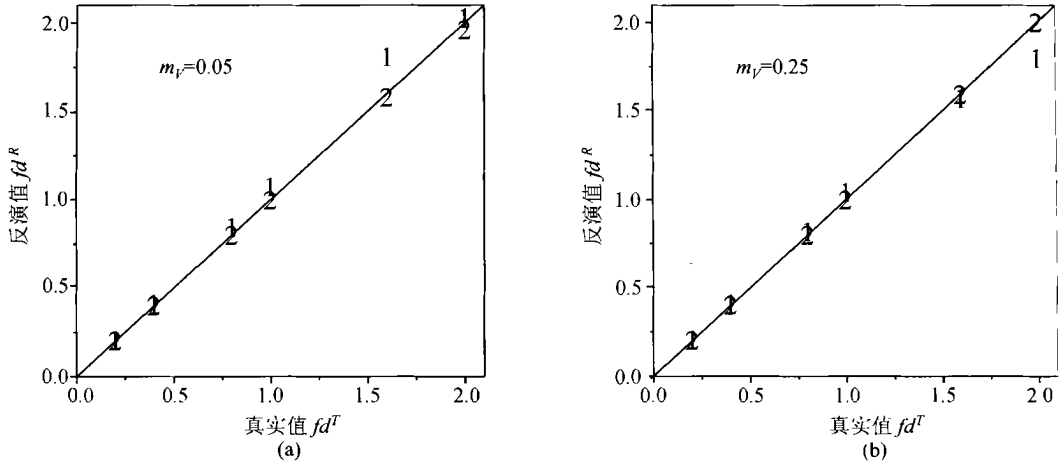


图 3 单位面积占空比 fd 的反演

Fig. 3 Retrieval of fractional volume per unit area fd

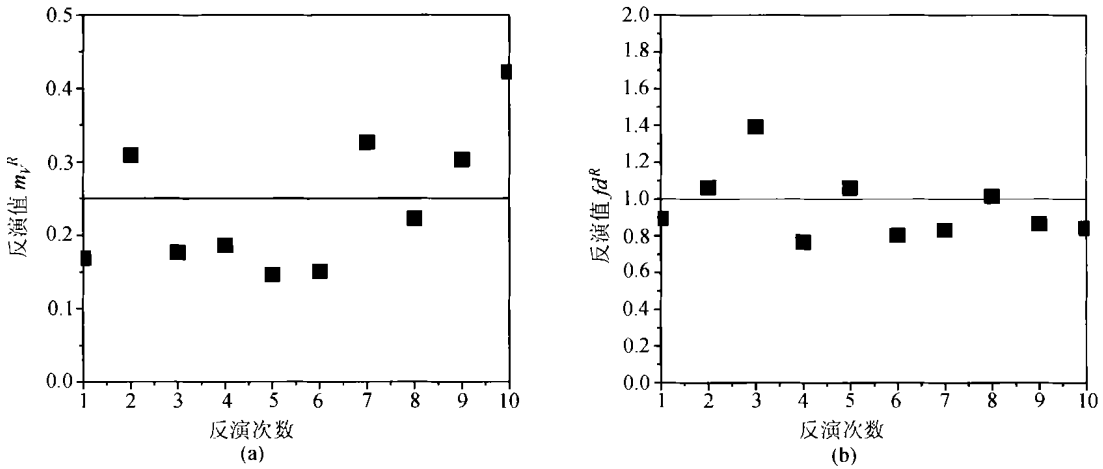


图 4 随机噪声影响下的反演

Fig. 4 Retrieval with random noise

表 1 松树林的实测参数^[3]

Table 1 Measured parameters of the pines

	介电常数 ϵ_*	柱半径 A/cm	半高 H/cm	β 角 $^*/(^{\circ})$	γ 角 $^{\circ}$
树干	$20.5 + 6.0i$	2	190	(0, 10)	(0, 360)
主枝	$29.5 + 9.0i$	0.5	40	(70, 90)	(0, 360)
从枝	$29.5 + 9.0i$	0.2	12.5	(0, 90)	(0, 360)

其中 * 表示为假定的参数。

将图 5 中 4×4 个像素元平均成一个像素元, 并用上一节的方法求出第 1 次迭代反演值。且平均整幅图像土壤湿度的第 1 次反演值, 将其作为植被层的下垫土壤湿度, 然后计算此土壤湿度下不同占空比时, VRT 方程的一阶解在总的 Mueller 矩阵解中的

比值, 并拟合成以下的曲线形式:

$$X_{pq}(fd) = a_1 + (1 - a_1) \exp(-a_2 \cdot fd) \quad (12)$$

其中 $a_1 \in (0, 1)$ 和 a_2 为拟合参数。以此修正反演过程中扫描时的误差计算式(8):

$$Err = [M_{vv}^{(1)}(fd, m_V) - M_{vv} X_{vv}(fd)]^2 + [M_{vh}^{(1)}(fd, m_V) - M_{vh} X_{vh}(fd)]^2 + [M_{hh}^{(1)}(fd, m_V) - M_{hh} X_{hh}(fd)]^2 \quad (13)$$

再进行第 2 次迭代反演。图 6 即为第 2 次反演结果。第 1 次和第 2 次迭代反演的典型值为 $m_V^{(1)} = 0.22, fd^{(1)} = 1.5, m_V^{(2)} = 0.20, fd^{(2)} = 1.7$, 可见相对于第 1 次迭代反演值, 土壤湿度的第 2 次反演值减

小,单位面积占空比增大,更接近实际值。

当然,这类非均匀地表的反演,需要尽可能了解

地表面植被的实况,比如是松树林、阔叶林,或是农作物。这样,模拟的各阶 M 就易于接近真实值。

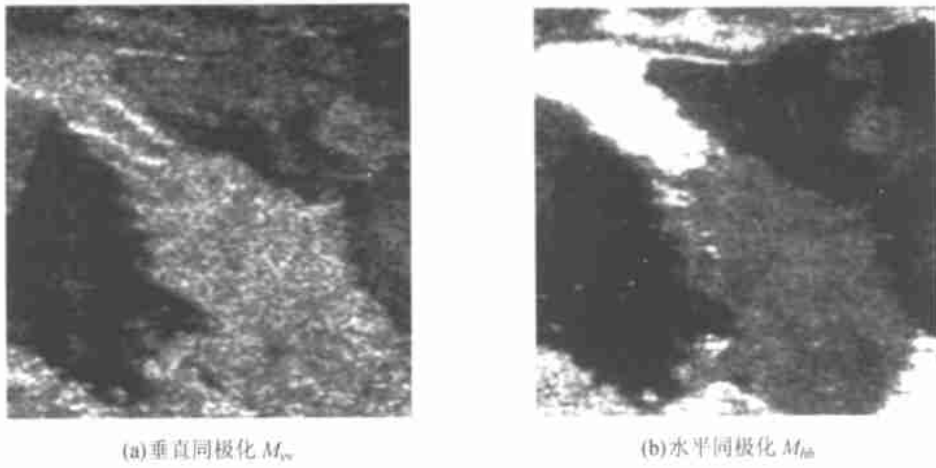


图 5 P 波段下 AirSAR 图像
Fig. 5 An image of AirSAR at the P band

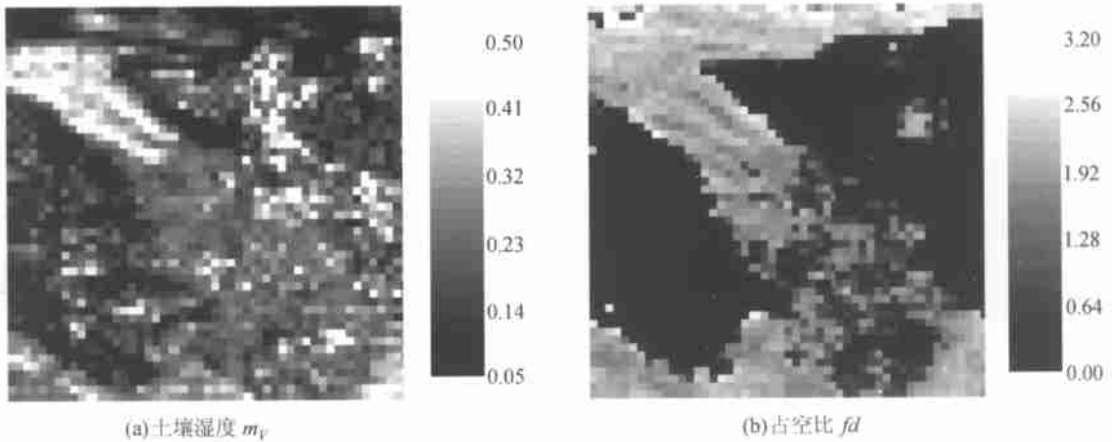


图 6 迭代反演值 m_v 和 fd 的空间分布图像
Fig. 6 Spatial distribution of retrieved m_v and fd

5 结 论

本文根据一层随机非球形粒子矢量辐射传输方程的一阶与高阶 Mueller 矩阵解的数值模拟及其数值的差异,提出了在植被一些参数已知的条件下,用水平与垂直同极化和交叉极化的后向散射测量反演土壤湿度和植被单位面积占空比的迭代方法。并利用模拟测量数据和 AirSAR 实测数据,对不同土壤湿度和植被单位面积占空比的情况进行了反演试验,并且分析了模拟数据含随机噪声对反演的影响。反演结果表明在地面植被种类分布情况比较了解的情况下,我们的反演方法是十分有效的。

参 考 文 献 (References)

[1] Macelloni G, et al. The Relationship Between the Backscattering Coefficient and the Biomass of Narrow and Broad Leaf Crops [J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 2001, 39(4): 873-884.

[2] Roger D, Roo D, Yang D, Ulaby F W. A Semi-Empirical Backscattering Model at L-Band and C-Band for a Soybean Canopy with Soil Moisture Inversion [J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 2001, 39(4): 864-872.

[3] Moghaddam M, Saatchi S. Monitoring Tree Moisture Using An Estimation Algorithm Applied to SAR Data from BOREAS [J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1999, 37(2): 901-916

[4] Kurvonen L, Pulliainen J, Hallikainen M. Retrieval of Biomass in Boreal Forests from Multi-temporal ERS-1 and JER-1 Images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1999, 37(1): 198-205.

[5] Van Oevelen P J, Hoekman D H. Radar Backscatter Inversion Tech-

- niques for Estimation of Surface Soil Moisture: EFEDA-Spain and HAPEX-Sahel Case Studies [J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1999, **37**(1): 113–123.
- [6] Jin Y Q. Electromagnetic Scattering Modelling for Quantitative Remote Sensing [M]. Singapore World Scientific, 1994.
- [7] Tsang L *et al.* Polarimetric Remote Sensing [M]. New York Elsevier, 1990.
- [8] Liang Z, Jin Y Q. Iterative Approach of High-Order Scattering Solution for Vector Radiative Transfer of Inhomogeneous Media Layer [J]. *Acta Physica Sinica* 2003, **52**(2): 247–255. [梁子长, 金亚秋, 非均匀散射层矢量辐射传输(VRT)方程高阶散射解的迭代法[J]. *物理学报*, 2003, **52**(2): 247–255.]

Iterative Inversion of Canopy Biomass and Surface Moisture by Using Multi-Order Mueller Matrix Solution of Vector Radiative Transfer Equation

LIANG Zi-chang, JIN Ya-qiu

(Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Fudan University, Ministry of Education, Shanghai 200433, China)

Abstract: Based on numerical difference between the first-order and high-order Mueller matrix solutions, an iterative method for inversion of surface moisture and fraction per unit area of random small spheroids from polarimetric backscattering measurement is developed. Using numerical simulation and measured AirSAR data of polarimetric Mueller matrix, the inversion of different surface moisture and fraction per unit area are studied.

Key words: VRT equation; Mueller matrix; non-spherical particle; iterative inversion