

利用 SIR-C极化数据提取地面参数*

王翠珍 郭华东

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘 要 本文根据简化的积分公式模型(IEM),分析了面散射过程中后向散射系数与地面参数之间的关系。利用航天飞机成像雷达(SIR-C)获取的极化雷达图像,提取新疆北部地区冲积扇的散射系数以及介电常数(湿度)与粗糙度。由图像获得的地面参数数据,可以用于分析冲积扇成因、时代以及期次的关系。

关键词 极化,极化分析,IEM模型,地面参数

1 引 言

地面参数是指地面与雷达入射波相互作用过程中,影响地面回波散射特性的一系列参数,包括地表的复介电常数、湿度、粗糙度(离散高度及相关长度)等。极化雷达技术的发展,为自动识别与提取地面参数提供了可能。极化数据以散射矩阵或 Stokes 矩阵为基本记录单元,比传统雷达数据更准确地描述了地面散射特征^[1]。同时,各种面散射模型描述了后向散射系数与地面参数之间的相互关系,是参数提取的基础。

90年代以前,最经典的3种面散射模型是几何光学模型(GOM)、物理光学模型(POM)、以及小扰模型(SPM)^[2]。这3种模型的应用以地面粗糙度为前提,几何光学模型适用于较粗糙而起伏较小的地面;物理光学模型适用于较平滑而起伏较小的地面;小扰模型适用于平滑而起伏较大的地面,三者有严格的界限^[3]。假设 k_1 为空气的波数, s 为地面离散高度, l 为相关长度, m 为地面的均方根坡度, $m = \sqrt{2} s / l$; R_c 为微粗糙面半径,则三者的应用范围:

GOM模型: $k_1 s > \frac{\sqrt{10}}{2 \cos \theta}$, $k_1 l > 6$, $R_c > \lambda$

POM模型: $m < 0.25$, $k_1 l > 6$, $R_c > \lambda$

SPM模型: $k_1 s < 0.3$, $k_1 l < 3.0$

但是,在实际应用中,地面粗糙度千变万化,上述

3种模型的适用条件往往难以严格区分^[4]。90年代初,Fung在以上3种模型的基础上,将地面粗糙度的限制条件融合到一起,建立了IEM模型,适用于不同粗糙表面的地面散射。IEM模型十几年来不断发展完善,本文就是利用简化的IEM模型进行地面参数提取。

2 简化的 IEM 模型

IEM面散射模型可描述为^[5]:

$$\sigma_{pp} = \frac{k^2}{2} \exp(-2k_z^2 s^2) \sum_{n=1}^{\infty} s^{2n} |I_{pp}^n|^2 \frac{W^n(-2k_x, 0)}{n!} \quad (1)$$

其中, $k_z = k \cos \theta$, $k_x = k \sin \theta$; θ 指入射角;pp为极化状态,如HH, VV, HV; W 为地面能量谱,即地面相关函数的傅立叶频谱。假设地面相关函数为高斯分布,即 $\rho(\zeta) = \exp(-\zeta^2 / l^2)$, ζ 为地面任意两点之间的距离。则一阶能量谱:

$$W = \frac{(kl)^2}{(a + bkl)^2 (1 + 4kl \sin \theta)^2} \quad (2)$$

常数 a, b 可由统计分析获得。因此,当 $n = 1$ 时,对式(1)进行简化计算,可得一阶IEM模型公式^[6,7]:

$$\sigma_{pp} = |\alpha_{pp}|^2 \left[\frac{S_r}{a_{pp}(\theta_i) + b_{pp}(\theta_i) S_r} \right] \quad (3)$$

S_r 是仅仅与离散高度 s 有关的地面粗糙度参数:

$$S_r = (k_1 s)^2 W \quad (4)$$

α 是只依赖于入射角和介电常数的变量,为简化计算,我们只分析复介电常数的实部:

* 国家自然科学基金资助项目, NASA合同项目。

收稿日期: 1997-09-22; 收到修改稿日期: 1997-11-21

$$\alpha_{\text{HH}} = \left[\frac{\varepsilon - 1}{(\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta})^2} \right] \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{VV}} = \left[\frac{(\varepsilon - 1)(\sin^2 \theta - \varepsilon(1 + \sin^2 \theta))}{(\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta})^2} \right]$$

这样,式(3)简化的 IEM 模型公式中只有 3 个未知量,即后向散射系数 σ 、介电常数 ε 以及地面离散高度 s ,常量 a, b 可由统计分析的方法确定下来。

3 地面后向散射系数特性与地面参数的计算

3.1 后向散射系数

极化数据以 Stokes 矩阵 M 为基本记录单元,描述了不同极化状态的地物后向散射特性。设定极化椭圆率角 χ 和方向角 ψ ,则根据极化分析理论,后向散射系数^[2]:

$$\sigma_{\pi}(\psi_r, \chi_r, \psi_t, \chi_t) = 4\pi A^t \langle M \rangle A^r / r_1 r_2 \quad (6)$$

其中, r_1, r_2 是极化雷达在方位向和距离向的分辨率; A^r 为接收的归一化 Stokes 矢量, A^t 为发射的归一化 Stokes 矢量:

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\psi \cos 2\chi \\ \sin 2\psi \cos 2\chi \\ \sin 2\chi \end{bmatrix}$$

极化数据以 10bytes 压缩方式记录,经过定标及解码处理后,可得^[1]:

$$\sigma_{\text{HV}} = S_{\text{HV}} S_{\text{HV}}^* = q \times [(B(3) + 127) / 255]^2$$

$$\sigma_{\text{VV}} = S_{\text{VV}} S_{\text{VV}}^* = q \times [(B(4) + 127) / 255]^2 \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{HH}} = S_{\text{HH}} S_{\text{HH}}^* = q - \sigma_{\text{VV}} - \sigma_{\text{HV}}$$

其中, $q = [B(2) / 254 + 1.5] \times 2^{2n}$, $B(n)$ 为第 n 个 byte 的极化数据。

3.2 介电常数

式(3)中, α_{pp} 是只依赖于入射角和介电常数的参量。分别计算 $\sigma_{\text{VV}}, \sigma_{\text{HH}}$ 及 $\sqrt{\sigma_{\text{VV}} \sigma_{\text{HH}}}$, 可得:

$$\sigma_{\text{VV}} = \frac{\alpha_{\text{VV}}^2 \sqrt{\sigma_{\text{VV}} \sigma_{\text{HH}}}}{a \sqrt{\sigma_{\text{VV}} \sigma_{\text{HH}}} + b \alpha_{\text{VV}} \alpha_{\text{HH}}} \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{HH}} = \frac{\alpha_{\text{HH}}^2 \sqrt{\sigma_{\text{VV}} \sigma_{\text{HH}}}}{a \sqrt{\sigma_{\text{VV}} \sigma_{\text{HH}}} + b \alpha_{\text{VV}} \alpha_{\text{HH}}}$$

即:

$$\alpha_{\text{VV}}^2 + \alpha_{\text{HH}}^2 = \frac{a(\sigma_{\text{VV}} + \sigma_{\text{HH}})}{\sqrt{\sigma_{\text{VV}} \sigma_{\text{HH}}}} \alpha_{\text{VV}} \alpha_{\text{HH}} + b(\sigma_{\text{VV}} + \sigma_{\text{HH}}) \quad (9)$$

在入射角已知的条件下, α_{VV} 与 α_{HH} 都是只对应于介电常数 ε 的变量,因此式(9)是一个一元二次方程,与公式(5)结合,可以求出介电常数的值。

3.3 地面粗糙度

描述地面粗糙度的参量有两个:地面离散度 s (即高度的标准离差)和地面相关系数。对于一维离散数据,某像元单位地面的离散高度^[3]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N Z_i^2 - N(\bar{Z})^2}{N-1}} \quad (10)$$

其中, Z_i 是任一样本的地面高度(对应于特定基准面), \bar{Z} 是平均高度。

对于常见的粗糙表面,假设地面相关系数为高斯分布,即 $\rho(\zeta) = \exp(-\zeta^2/l^2)$,相关系数等于 $1/e$ 的长度间隔 ζ 被定义为相关长度 l 。地面相关长度提供了估计地面两点相互独立的一种基准。由公式(2),地面能量谱是相关长度的函数,在入射角已知的前提下,经过统计分析,可以求出相关长度的值,然后由式(4)计算地面离散高度。

4 计算与分析

本文利用 1994 年 10 月获取的 L 波段 SIR-C 极化数据提取地面参数。该成像时间为实验区枯水季节,地表无水流。实验区位于新疆北部戈壁滩,由图版 I 图 1 可见,实验区内有两个较大规模的冲积扇 F1 与 F2。在两个冲积扇中分别沿扇心、扇中、扇缘划 3 个剖面(F1-1, F1-2, F1-3, F2-1, F2-2, F2-3),对每条剖面平均统计 50 个样本,用来分析整个冲积扇的地面参数以及地面散射特征。

图 2 是冲积扇 F1 与 F2 的散射系数图,除个别样本外,两个冲积扇均表现出 $\sigma_{\text{VV}} > \sigma_{\text{HH}}$, 满足 IEM 面散射模型的前提条件,未符合条件的少许样本表明有体散射过程,如植被散射等。冲积扇 F1 的散射系数比 F2 小,且表现出较规则的峰—谷—峰的形式,在横向上从冲积扇的边缘向中心散射系数由大变小。冲积扇 F2 散射系数较大,但分布比较杂乱,无明显的变化趋势。

图 3 是 6 条剖线的介电常数分布图,从总体来

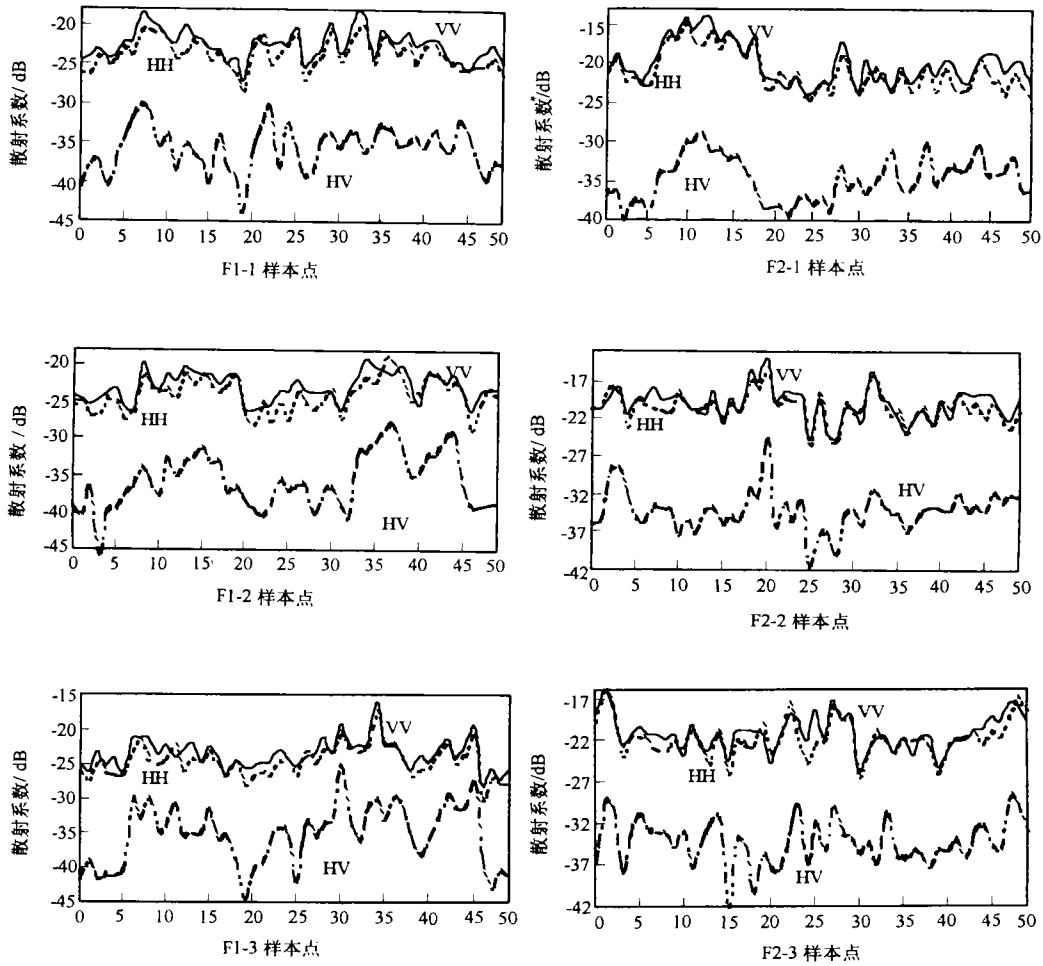


图 2. 冲积扇 F1 与 F2 6 条剖线的散射系数曲线

Fig.2 Backscatter Coefficients curves of six profile lines of alluvial fans (F1 and F2).

看, F1 平均介电常数要比 F2 大, 但分布都很杂乱, 图中难以区分。为此, 我们分析它们的方差 $y = (x - \bar{x})^2$ (图 4)。F1 方差曲线比 F2 平滑, 只有几个峰值点, 说明 F1 介电常数的离散程度较小, 分布均匀, 而 F2

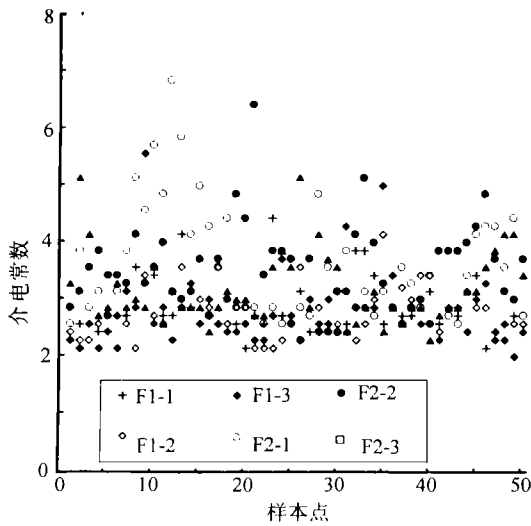


图 3 6 条剖线的介电常数曲线

Fig.3 Dielectric constants curves of six profile lines

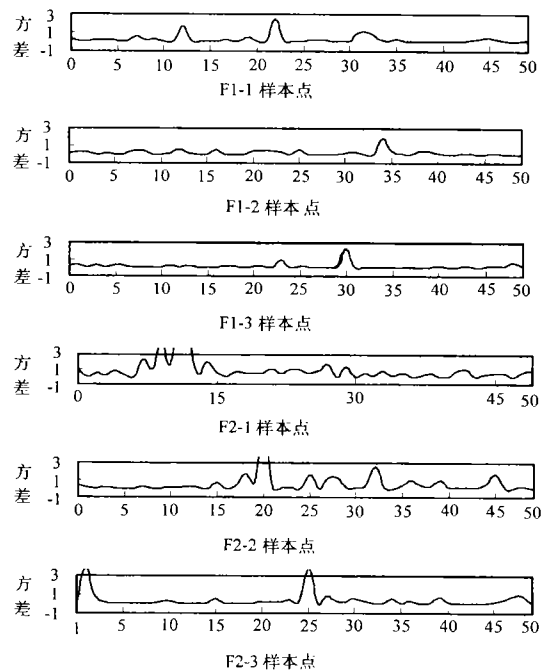


图 4 6 条剖面介电常数的方差分布曲线

Fig.4 Dielectric constants' variance analysis of six profile lines

介电常数的差别较大。而且,对于同一个冲积扇,从扇心到扇缘介电常数离散程度逐渐变大^[8,9]。同时,对于特定频率、特定土壤类型,土壤湿度与介电常数成正比,因此我们认为实验区介电常数值反映了土壤湿度的大小。

冲积扇的粗糙度包括地面离散高度和地面相关

常数。为分析这些参数对它们平均值的离散程度,即粗糙度分布的均匀性,我们分析它们的标准偏差:

$$y = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n^2}}$$

其中, n 指样本总数。

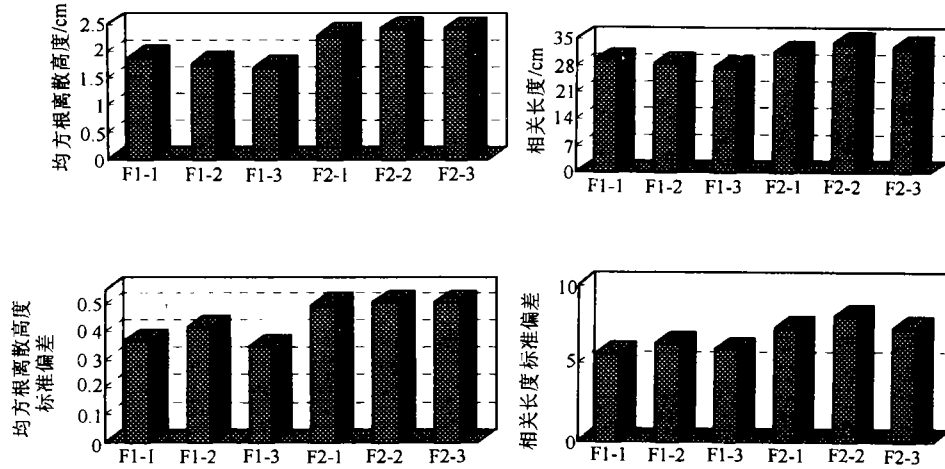


图 5 6 条剖线的粗糙度(离散高度与相关长度)曲线以及它们的标准偏差分布曲线

Fig.5 rms height, coherent length and standard deviation curves of six profile lines

从图 5 可见,F1 离散高度及相关长度小且分布较均匀,F2 离散高度及相关长度大且变化较大,说明冲积扇 F2 的冲积物颗粒粗糙且地面起伏较大,而 F1 的冲积物颗粒小且地面均匀,起伏小。对于同一个冲积扇,从扇心到扇缘,F1 表现出明显的冲积物颗粒变小且地面起伏变小的趋势,横向上从中间向两侧颗粒分布逐渐均匀;而 F2 无明显变化趋势。

5 结 论

本文根据一阶 IEM 模型,分析了地面散射系数与土壤参数、介电常数、湿度、地面离散高度以及相关长度之间的关系,并利用极化雷达数据,提取出新疆北部戈壁滩两处冲积扇的散射系数(图版 I 图 1)以及地面参数的介电常数和粗糙度(图版 I 图 6,图 7)。

两处冲积扇介电常数与粗糙度的比较,表明二者的不同,冲积扇的形成时间先后以及冲积扇的多期复合程度是有差别的。横向及纵向地面参数均呈现有规律变化的冲积扇 F1 有可能是单期且年代较新,地面参数变化大且无规律的冲积扇 F2 往往是多期复合的产物。

参 考 文 献

1 Bruce Chapman. SIR-C Data Compression Software User

Guide. JPL, 1994.

- 2 F. T. Ulaby, C. Elachi. Radar Polarimetry for Geoscience Applications. Artech House, 1990.
- 3 F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung. Microwave Remote Sensing, II. Addison-Wesley Publishing Company, 1982.
- 4 Y. K. Sarabandi, F. T. Ulaby. An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30** (2).
- 5 A. K. Fung. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications. Artech House, 1994.
- 6 J. C. Shi, J. J. Van Zyl, J. V. Soares, E. T. Engman. Development of Soil Moisture Retrieval Algorithms from L-Band SAR Measurements. Proceedings IGARSS'92, 1992, 495-497.
- 7 J. C. Shi, J. J. Van Zyl. Estimation of Soil Moisture and Surface Roughness Parameters Using L-band SAR Image Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35** (5).
- 8 M. T. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. C. Dobson. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil Part I: Empirical Models and Experimental Observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **23** (1).
- 9 J. R. Wang, T. J. Schmugge. An Empirical Model for the Complex Dielectric permittivity of soils as a Function of water Content. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1980, **18** (4).

作者简介

王翠珍,女,生于1971年10月22日,1993年7月毕业于

山东矿业学院,1996年3月在中国科学院遥感应用研究所攻读地图学与遥感专业,获硕士学位。现在主要研究极化雷达以及极化分析理论与应用,雷达数据图像处理等。

Estimation of Surface Parameters from Polarimetric SIR-C Data

Wang Cuizhen Guo Huadong

(*Institute of Remote Sensing Applications, CAS Beijing 100101*)

Abstract Surface parameters refer to the complex dielectric constants, moisture, surface rms height and coherent length, etc. This paper analysed the simplified one-step IEM Model, and estimated the backscattering coefficients, dielectric constants and surface roughness(rms height and coherent length) with the SIR-C L-band Polarimetric data for Xinjiang area. The surface parameters derived from polarimetric data can be used to analyse the forming courses, time and stages of alluvial fans.

Key words Polarimetry, Polarimetric Analysis, IEM Model, Surface Parameters