

# 冰雪散射和热辐射的定量研究\*

金亚秋 韦剑 肖平

(复旦大学电子工程系, 上海 200433)

**摘要** 本文研究了冰雪样品的相关函数及其相关长度与等效球形冰粒子有效平均半径的对应关系;利用密集粒子的矢量辐射传输方程,数值计算了包括多次散射的一层冰雪的微波热辐射,并与星载遥感的实验测量结果进行了比较和讨论。

**关键词** 电磁波散射;相关长度;积雪散射和热辐射;密集粒子的辐射传输

## 1. 引言

积雪是冰粒子和空气的随机混合物(湿雪还包含有液态水),各种物理状况下的积雪的散射和热辐射是空对地遥感测量的重要问题之一。由于冰粒子的占空比(单位体积积雪中冰粒子所占体积)相当高,约在20~50%之间,密集粒子散射的相干作用使得以往矢量辐射传输方程(VRT)采用的粒子散射相互独立的假定不能成立。因此,必须用修正的密集粒子的矢量辐射传输(DVRT)方程<sup>[1]</sup>,来研究冰雪的散射和辐射。在DVRT方程中,消光和散射系数的计算考虑了密集分布的粒子的散射相干性。但是,在以往冰雪的辐射传输的数值计算中,有关参数的选取缺少一致的规范,有一定的任意性。将冰雪模拟成一层密集分布的球形粒子,其平均半径大小也是靠数据拟合来选取。因此,有必要应用DVRT方程,进行冰雪散射和热辐射特征的定量研究和参数数值的灵敏度试验。

本文用冰雪样品剖面的图象处理,得到随机分布的冰粒子产生的介电起伏的相关函数及其相关长度。然后,对Stogryn<sup>[2]</sup>相关长度和粒子大小的近似关系作一修正,而确定冰雪理论模式中球形冰粒子有效平均半径的大小。利用DVRT方程和离散坐标特征值法<sup>[3]</sup>,求解包括多次散射的一层冰雪的微波热辐射。数值结果与星载遥感的测量数据进行了比较和讨论。

## 2. 相关长度和球形粒子半径

描述随机介质散射特征的一个重要的函数是介电常数随机起伏的相关函数及其相关长度。但是,相关长度与散射元的几何大小之间很难有一个严格的定量关系。由于乾雪是冰粒子和空气混合的随机介质,可以比较方便地做成样品。用有色过冷液体灌入冰雪的空气间隙中冻结,然后刨平,制成剖面照相,图象灰度予以数字化。图1是我们得到的雪的样品,其中黑色为空气间隙,白色为冰粒子。

对雪的整个剖面  $N_x \times N_y$  个象素点,任一点  $\epsilon(i, j)$  赋值1(空气)或3.2(冰)。平

1991.07.18 收到,1992.04.13 定稿。

\* 国家自然科学基金资助课题,霍英东教育基金会资助课题。

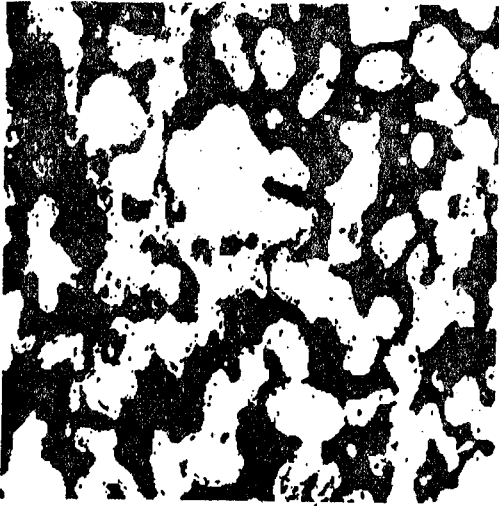


图 1 乾雪样品剖面数字化图象

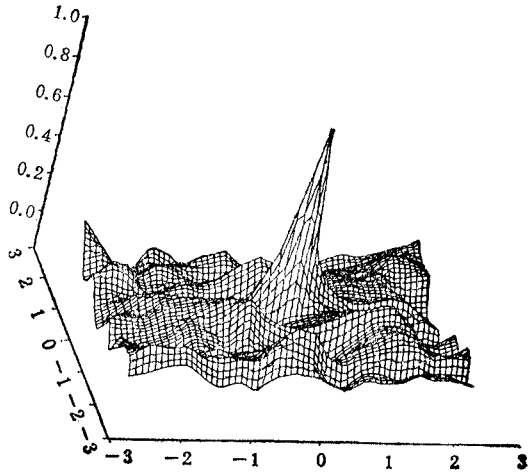


图 2 相关函数的二维图象

均介电常数和介电起伏方差分别写成

$$\varepsilon_m = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{j=1}^{N_x} \sum_{i=1}^{N_y} \varepsilon(i, j) \quad (1a)$$

$$\delta^2 = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{j=1}^{N_x} \sum_{i=1}^{N_y} [\varepsilon(i, j) - \varepsilon_m]^2 \quad (1b)$$

在  $N_x \times N_y$  的整幅图象中, 选取其中  $n_x \times n_y$  个象素点的子区域为基准图象, 则子区域的平均介电常数  $\varepsilon_{m_0}$  和介电起伏方差  $\delta_0^2$  亦可由(1)式计算, 只是  $N_x, N_y$  用  $n_x, n_y$  代替. 这样, 计算相关函数

$$C(x, z) = \frac{1}{n_x n_y \delta \delta_0} \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{i=1}^{n_y} [\varepsilon(i, j) - \varepsilon_{m_0}] [\varepsilon(i+x, j+z) - \varepsilon_m] \quad (2)$$

图 2 是图 1 样品相关函数的二维图象. 可以看出, 相关函数近于指数分布  $\exp(-r/l)$ , 其中  $l$  为相关长度. 对于图 1 样品, 有  $N_x = N_y = 322$ , 选  $n_x = n_y = 132$ , 算得  $\varepsilon_m = 2.111$ ,  $f = 0.505$ ,  $\delta = 1.1$ ;  $\varepsilon_{m_0} = 2.187$ ,  $\delta_0 = 1.097$ , 以及  $l = 0.22\text{mm}$ .

Stogryn<sup>[2]</sup> 曾用特征函数和概率论方法得到指数形相关函数的相关长度与对应的球形粒子半径  $a$  的近似关系式

$$l = (4/3)(1-f)a \quad (3)$$

但是, 由于粒子实际上具有大小分布, 而大粒子起的散射作用要显著得多. 因此, 球形粒子平均半径要比(3)式算出的要大一些, 或称系数 4/3 应减小些. 我们采用

$$l = 0.8(1-f)a \quad (4)$$

由此, 图 1 样品球形粒子有效平均半径约为  $0.6\text{mm}$ . 一般情况下,  $a$  应在  $0.5 \sim 1.5\text{mm}$  之间.

### 3. DVRT 方程的数值结果

一层密集分布的球形粒子的 DVRT 方程可写为<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned} \cos \theta \frac{d}{dz} T_B(\theta, z) = & -\kappa_s T_B(\theta, z) + \kappa_a T_1 \\ & + \frac{1}{4\pi} \kappa_s \int_0^\pi d\theta' \sin \theta' \bar{P}(\theta, \theta') T_B(\theta', z) \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $T_B =$  柱矢量  $[T_v, T_h]$  为极化的辐射亮度温度, 下标  $v, h$  分别表示垂直和水平极化;  $T_1$  为随机介质层物理温度;  $\bar{P}$  为相矩阵。消光系数  $\kappa_s$ , 散射系数  $\kappa_s$ , 和吸收系数  $\kappa_a$  由 DVRT 理论中的密集散射粒子层中有效传播常数来计算<sup>[1]</sup>。边界条件写成 ( $0 \leq \theta < \pi/2$ ):

$$T_B(\pi - \theta, z = 0) = 0 \quad (6a)$$

$$T_B(\theta, z = -d) = \bar{R}(\theta) T_B(\pi - \theta, z = -d) + \bar{t}(\theta) T_2 \quad (6b)$$

其中  $\bar{R}$  和  $\bar{t}$  分别为下垫界面  $z = -d$  处反射率和透射率对角化矩阵;  $T_2$  为下垫介质的物理温度。

我们用离散坐标的 Gauss 求积法和特征值-特征矢量法<sup>[1]</sup>, 求解 DVRT 方程 (5) 式和 (6) 式, 得到  $T_B(\theta, z = 0)$ , 以及  $T_B$  与各有关参数(频率、极化、视角、雪层厚度、冰球粒子大小, 占空比, 下垫面的介电特性等等)之间定量的函数关系。图 3 给出 37GHz,  $\theta = 50^\circ$  时, 不同积雪厚度下垂直和水平极化的辐射亮度温度, 以及与星载遥感 Nimbus-6 号测得的垂直极化辐射亮度温度<sup>[3]</sup>的比较。在 37GHz 这样高的频率上, 层厚的增加, 使得有更多的粒子增强散射, 而遮蔽了热发射, 使辐射亮度温度明显降低。改变  $a$  的大小进行数值模拟计算, 可以表明, 对于具有较大半径冰晶粒子的人工堆积积雪、或溶解后再冻结的积雪, 强烈的散射使辐射亮度温度明显降低。而对于粒子半径较小的新雪, 辐射亮度温度随层厚增加而可能增高。

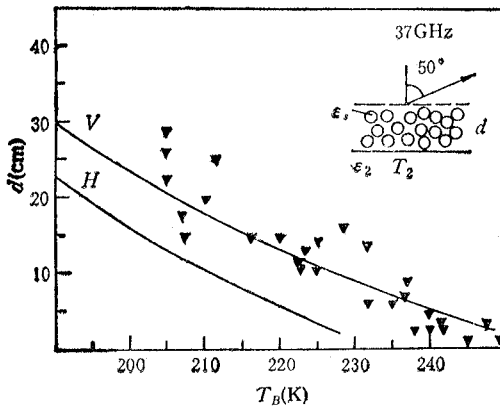


图 3 37GHz 不同积雪厚度下的辐射亮度温度  
 $\theta = 50^\circ$ ,  $\epsilon_s = (3.2 + i0.0032)\epsilon_0$ ,  $f = 0.4$ ,  
 $a = 0.07\text{cm}$ ,  $\epsilon_2 = (6 + i1)\epsilon_0$ ,  $T_1 = T_2 = 273\text{K}$ .

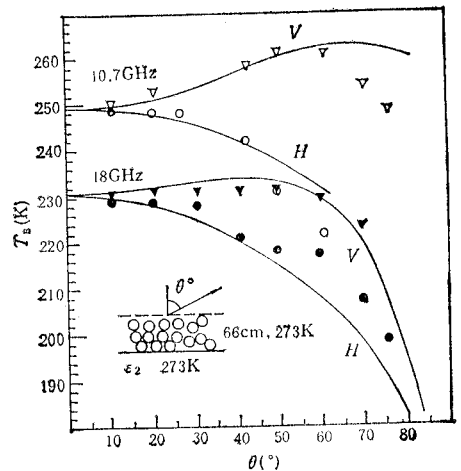


图 4 不同视角的辐射亮度温度  
 $a = 0.08\text{cm}$ ,  $f = 0.3$ ; 10.7GHz:  
 $\epsilon_2 = (5 + i1)\epsilon_0$ ; 18GHz:  $\epsilon_2 = (4.8$   
 $+ i2)\epsilon_0$ .

图 4 给出 10.7 和 18GHz 不同视角的辐射亮度温度, 以及与实验测量<sup>[4]</sup>的比较。

#### 4. 结论

我们用冰雪样品作图象处理, 得到相关函数及其相关长度。利用修正的 Stogryn 公式, 确定了相关长度与球形冰粒子有效平均半径的对应关系。利用密集随机分布的球形粒子的矢量辐射传输方程和特征值-特征矢量求解方法, 数值计算了包括多次散射的极化的辐射亮度温度。指出粒子有效平均半径的大小是表征雪况的最重要参数之一。对辐射亮度温度与频率、极化、视角、层厚、下垫面介电特性等参数之间的函数对应关系, 进行了定量的讨论。理论结果与遥感的实测结果作了比较, 结果基本是一致的。

#### 参 考 文 献

- [1] 曾亮, 金亚秋, 物理学进展, **10**(1990)1, 57—99.
- [2] A. Stogryn, *IEEE Trans. on GR*, **GR-22**(1984)2, 150—154.
- [3] A. Rango, A. Chang, J. L. Foster, *Nodic Hydrology*, **10**(1979)1, 25—40.
- [4] J. C. Shiue et al., Remote sensing of snowpack with microwave radiometers for hydrologic application, *Proc. 12th Int. Symp. Rem. Rem. Sens. Environ.*, Vol. 2, Ann. Arbor, (1978), pp. 877—886.

## QUANTITATIVE APPROACH TO SCATTERING AND THERMAL EMISSION OF SNOW ICE

Jin Yaqiu Wei Jian Xiao Ping

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)

**Abstract** By using an image of snow sample, the correlation function and correlation length were obtained experimentally. Then the effective radius of discrete spherical scatterer in the radiative transfer model was determined. By solving the vector radiative transfer equation for a slab of densely-distributed scatterers, the polarized brightness temperatures, including multiple scattering effect, from a layer of snow were numerically calculated, and favorably compared with the measurements from spaceborne remote sensing.

**Key words** Electromagnetic wave scattering; Correlation length; Scattering and emission from snowpack; Radiative transfer of dense scatterers