

# 微波主被动遥感相关特性的数值 模拟和实验对比\*

金亚秋 黄兴忠

(复旦大学电子工程系 波散射和遥感中心 上海 200433)

**摘要** 本文采用一层具有粗糙界面的连续随机介质模型, 计算双站散射系数和后向散射系数, 由互易性定理计算热发射率。数值模拟了植被在整个生长过程中后向散射和热发射的变化, 以及它们的相关特征。理论结果与几种植被的主被动遥感实验数据作了比较和讨论, 阐明了微波主被动遥感的一些相关的数值特征。

**关键词** 主被动相关性, 数值模拟, 实验比较

## 1 引言

当今微波遥感要求发展多频段多极化主被动手段联合的遥感定量信息提取的理论和办法。而迄今对于主动和被动遥感数据之间的相关特征的研究还是远远不够的。在同一地区同一频段获得的主被动遥感数据是否相互一致, 主动遥感的后向散射系数  $\sigma_{hh}$ 、 $\sigma_{vv}$ , 与被动遥感的发射率  $e_h$ 、 $e_v$  随有关物理参数的变化, 有何相关的特征表现。比如,  $60^\circ$  观察角下 0dB 的  $\sigma$  是否与  $e=0.9$  相一致;  $\sigma=8\text{dB}$  又是否与  $e=0.8$  相一致; 不同植被若均有  $e=0.8$ , 则它们的  $\sigma$  又有多少区别。反之, 若均有  $\sigma=8\text{dB}$ , 则它们的  $e$  又有多少区别; 不同种类的植被  $\sigma-e$  有什么明显的不同, 地表的特征性物理参数(如植被层高度, 含水量等)对  $\sigma-e$  的相关性有何影响。诸如此类的问题还远未有一个满意的回答。由于主被动遥感相关特征的理论尚缺乏充分的研究, 至今还缺少主被动联合遥感的数据进行充分的收集, 以及在理论上予以解释和比较。

本文将从一层具有粗糙界面的随机介质的散射模型出发, 计算双站散射系数  $\gamma_{pq}$  ( $p, q=v, h$ ) 和后向散射系数  $\sigma_{hh}$ 、 $\sigma_{vv}$ 。由互易性定理和  $\gamma_{pq}$ , 计算热发射率  $e_h$ 、 $e_v$ 。然后比较  $e$  和  $\sigma$  的相关关系, 以及各种地表在整个生长期过程中,  $\sigma-e$  相关特征的表现。在  $\sigma-e$  的数值计算中, 采用实验中测得的全部参数, 理论计算结果与几种植被主被动遥感的实验量进行了比较和讨论。

## 2 互易性定理下的 $\sigma-e$ 关系

对于平坦界面的随机介质, 利用平行分层的平均 Green 函数和广义的 Born 近似, 可推导得到平行分层弱起伏随机介质的一阶双站散射系数  $\gamma_{pq}$  ( $p, q=v, h$ ) 和后向散射

\* 国家自然科学基金、中国科学院长春净月潭遥感开放实验站基金和上海应用物理研究中心资助项目

收稿日期: 1994年9月19日; 收到修改稿日期: 1995年1月26日

系数  $\sigma_{pp}(p, q = v, h)^{[1]}$ 。考虑下垫界面的随机粗糙面, 并略去上界面反射时, 一层随机介质总的双站散射系数应包含粗糙面的面散射和随机介质的体散射。由互易性定理, 一层具有下垫粗糙界面的随机介质的热发射率为:

$$e_p(\theta) = 1 - \frac{1}{4\pi} \int d\hat{\Omega}_s [\gamma_{pv}^{(RS)}(\theta, \theta_s, \varphi - \varphi_s) + \gamma_{ph}^{(RS)}(\theta, \theta_s, \varphi - \varphi_s)] e^{-2k''_{1z} d \sec \theta} - \frac{1}{4\pi} \int d\hat{\Omega}_s [\gamma_{pv}(\theta, \theta_s, \varphi - \varphi_s) + \gamma_{ph}(\theta, \theta_s, \varphi - \varphi_s)], p = v, h \quad (1)$$

其中  $\gamma_{pq}^{(RS)}$  为下垫粗糙界面的双站散射系数。我们采用粗糙表面均方根坡度小于 0.25 时的标量近似法<sup>[2]</sup>, 和给定的 Gauss 相关函数的相关长度  $l_s$ , 起伏方差  $\sigma_s$ , 来估算  $\gamma_{pq}^{(RS)}$ 。因子  $e^{(-2k''_{1z} d \sec \theta)}$  表示面散射经过厚度为  $d$  的随机介质产生的平均衰减, 其中  $k''_{1z}$  是  $k_{1z}$  的虚部。  $k_1 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_m}$ ,  $\varepsilon_m$  为随机介质的平均介电常数。(1) 式右端第三项的  $\gamma_{pq}$  为平坦界面的随机介质的双站散射系数<sup>[1]</sup>。用同一组参数产生的双站散射系数  $\gamma_{pq}^{(RS)}$  和  $\gamma_{pq}$ , 可得到对应的后向散射系数  $\sigma_{hh}$ 、 $\sigma_{vv}$ , 以及由(1)式得到热发射率  $e_h$ 、 $e_v$ 。由此可建立同一组参数下的  $\sigma - e$  相关关系。

对于植被层的主被动遥感, 按双色散模式的经验公式, 由植被含水重量比  $m_g$ , 来计算植被材料平均介电常数  $\varepsilon_v$ <sup>[3]</sup>。由  $\varepsilon_v$  和植被材料的体积占空比  $f_v$ , 计算该植被的平均介电常数  $\varepsilon_m$ 。由于  $\varepsilon_v$  明显地区别于植被层中的空气背景  $\varepsilon_0$ , 由  $\varepsilon_v$ 、 $f_v$  计算的介电起伏方差  $\delta_\varepsilon$  往往相当大。因此, 我们应用各向同性的强起伏理论<sup>[3]</sup>, 定义随机起伏变量:

$$\xi(\bar{r}) = 3 \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_0} \left[ \frac{\varepsilon(\bar{r}) - \varepsilon_g}{\varepsilon(\bar{r}) + 2\varepsilon_g} \right] \quad (2)$$

由平均值  $\langle \xi \rangle = 0$  确定描述强起伏随机介质平均特征的  $\varepsilon_g$ 。  $\varepsilon_g$  是随机介质有效介电常数的似稳场近似。  $\varepsilon_g$  比  $\varepsilon_m$  更有效地反映了强起伏随机介质的平均特征。当随机介质为弱起伏时,  $\varepsilon_g$  与  $\varepsilon_m$  相同。我们用  $\varepsilon_g$ 、 $\delta_\xi$  取代  $\varepsilon_m$ 、 $\delta_\varepsilon$  来计算(1)式中的  $\gamma_{pq}$ 。

### 3 数值模拟结果和讨论

我们首先讨论一层大豆在生长过程中热发射率  $e_h$ 、 $e_v$  的日变化情况。图 1 虚线联结的空心点是大豆在频率 1.2GHz, 观察角  $\theta = 10^\circ$  时,  $e_h$ 、 $e_v$  在整个生长过程中的测量值<sup>[4]</sup>。实线是我们计算(1)式的理论仿真数值结果。可以看出在生长初期, 地面有明显不同的 V、H 极化的热发射起决定性的影响。而随植被的增长, 植被对地面热发射的遮蔽和其本身热发射将逐步增强。与此相对应的, 用同一组参数计算得到的后向散射  $\sigma_{hh}$ 、 $\sigma_{vv}$ , 如图 2 所示。图中虚线为无植被层时粗糙表面的后向散射, 实线是包括粗糙面和随机介质层的总的后向散射。可以看出  $e_h$ 、 $e_v$ , 以及  $\sigma_{hh}$ 、 $\sigma_{vv}$  的日变化均呈较为单调的递增。

在以上计算中, 采用了实验给出的各实测参数<sup>[4]</sup>。图 3 给出了土壤表面湿度的日变化, 由此计算下垫土壤的介电常数<sup>[3]</sup>。图 4 给出大豆生长过程中高度的日变化。

图 5 给出三种地表, 即玉米, 小麦, 裸露土壤, 在  $10^\circ$  观察角下 1.2GHz 水平极化

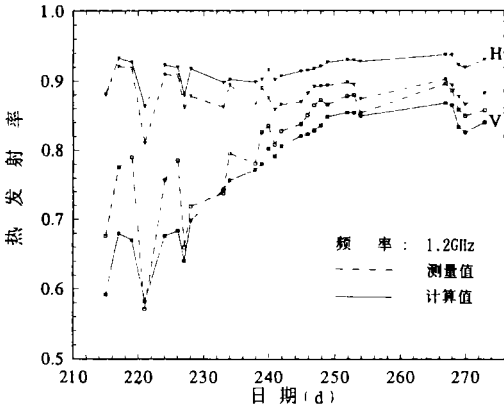


图1 大豆生长过程中热发射率的日变化  
 频率 1.2GHz,  $\theta=10^\circ$ ,  $k_0 \sigma_s=0.3$   
 $k_0 l_s=0.3$ ,  $l_p=0.65\text{cm}$ ,  $l_z=1.3\text{cm}$

Fig.1 Temporal variation of polarized emissivity of bean

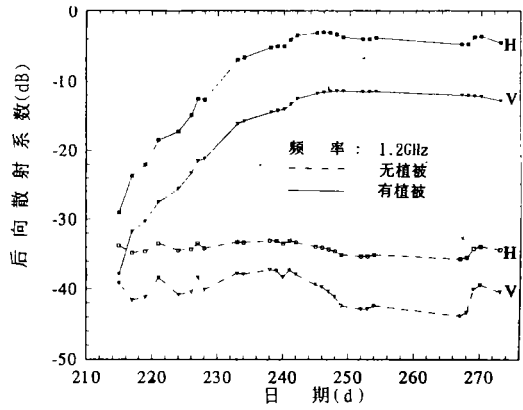


图2 大豆生长过程中后向散射系数的日变化  
 频率 1.2GHz,  $\theta=10^\circ$ ,  $k_0 \sigma_s=0.3$   
 $k_0 l_s=0.3$ ,  $l_p=0.65\text{cm}$ ,  $l_z=1.3\text{cm}$

Fig.2 Temporal variation of back scattering coefficient of bean

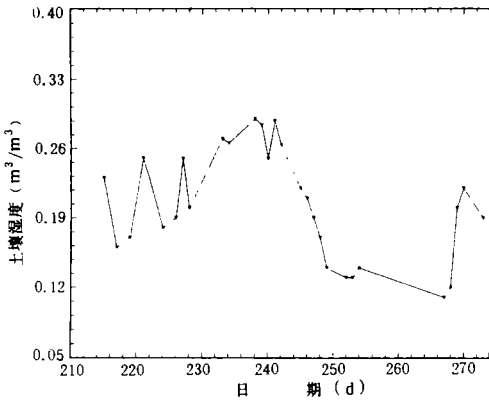


图3 大豆生长过程中土壤表面湿度的日变化测量值

Fig.3 Experimental data of soil moisture during growth of bean

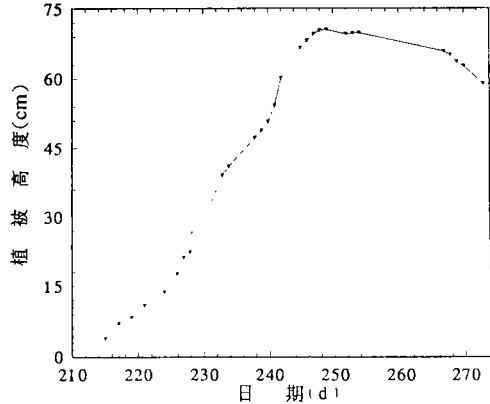


图4 大豆生长过程中高度的日变化

Fig.4 Temporal variation of bean height

的  $\sigma_{hh} - e_h$  的仿真数据。其中黑点是实验值<sup>[5]</sup>, 空心点是我们在参数选择范围内产生的理论仿真数据。可以看出各种地表的  $\sigma - e$  的分布有一定的差异。因此, 由  $\sigma - e$  的分布有助于地表植被的分类与识别。

图6和图7给出燕麦生长过程中在  $60^\circ$  观察角, 频率为 4.9GHz 的热发射率的日变化。其中空心点是实验值<sup>[6]</sup>, 黑点是我们的理论仿真数值结果。二者有相当好的匹配。在我们的计算中采用了实验给出的全部实测参数。

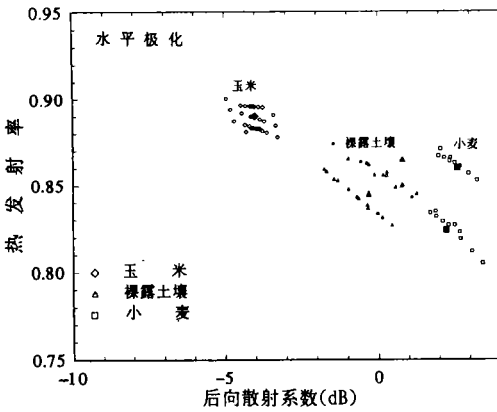


图 5 三种地表的 $\sigma$ - $e$  相关关系

Fig.5 The correlation of  $\sigma$  and  $e$  for three different surfaces

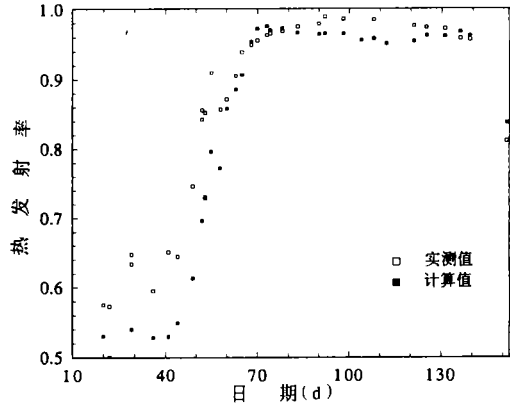


图6 燕麦生长过程中水平极化热发射率的日变化

频率 4.9GHz,  $\theta=60^\circ$ ,  $k_0 \sigma_s=2$

$k_0 l_s=10$ ,  $l_p=0.25\text{cm}$ ,  $l_z=0.5\text{cm}$

Fig.6 Temporal variation of horizontally polarized emissivity of oat

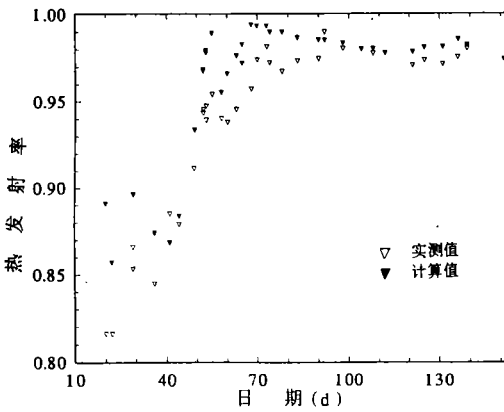


图 7 燕麦生长过程中垂直极化热发射率的日变化

频率 4.9GHz,  $\theta=60^\circ$ ,  $k_0 \sigma_s=2$

$k_0 l_s=10$ ,  $l_p=0.25\text{cm}$ ,  $l_z=0.5\text{cm}$

Fig.7 Temporal variation of vertically polarized emissivity of oat

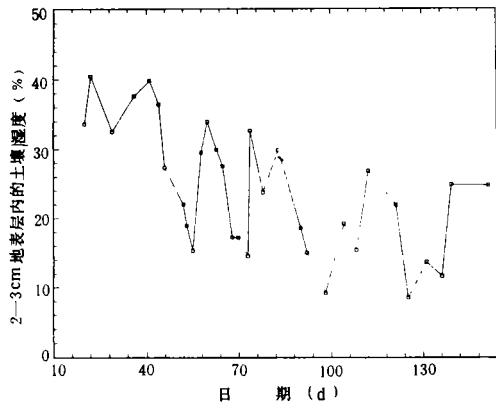


图 8 燕麦生长过程中土壤表面湿度的日变化测量值

Fig.8 Experimental data of soil moisture during growth of oat

图8 给出下垫土壤表面含水量的日变化, 由此计算下垫土壤的介电常数。图 9 给出植被材料中含水重量比  $m_g$  的日变化, 由此计算植被材料的  $\epsilon_v$ 。

图 10 给出植被层高度  $d$  的日变化。图 11 给出植被层单位面积上含水量  $W$  的日变化。由  $m_g$ ,  $d$ ,  $W$  和干燥植被材料比重  $\rho$  ( $\approx 0.3\text{g/cm}^3$ ), 计算植被材料的体积占空比  $f_v$  为:

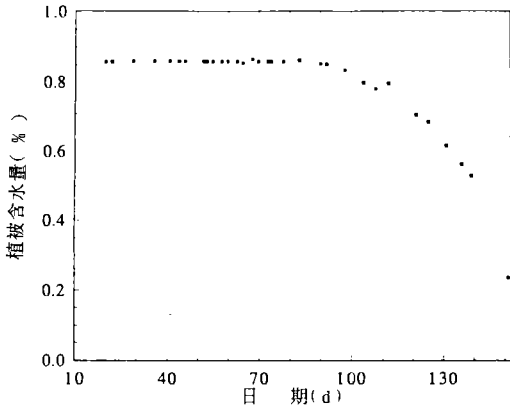


图9 燕麦生长过程中含水重量比 $m_g$ 的日变化  
Fig.9 Temporal variation of gravimetric moisture of oat

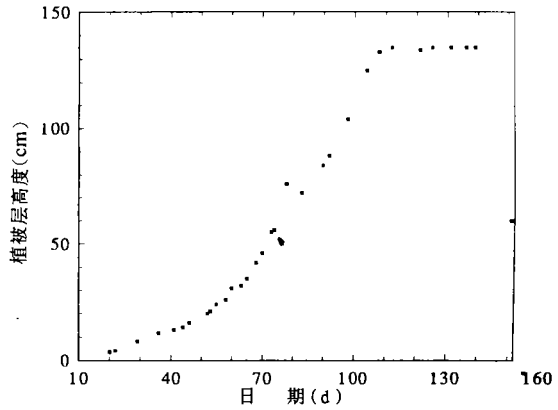


图10 燕麦生长过程中高度的日变化  
Fig.10 Temporal variation of height during growth of oat

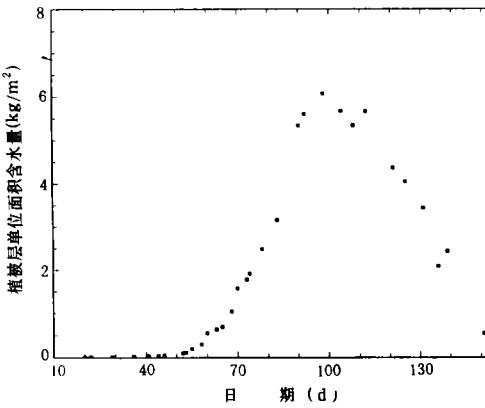


图11 燕麦生长过程中单位面积上含水量 $W$ 的日变化  
Fig.11 Temporal variation of water content during growth of oat

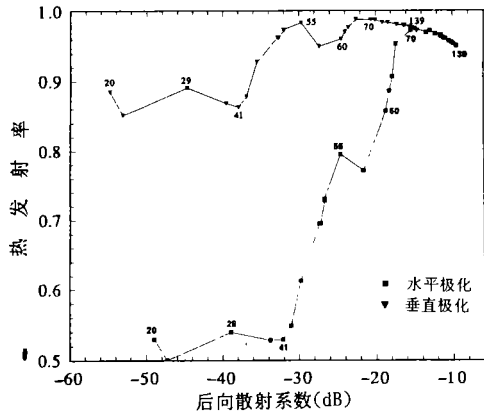


图12 燕麦生长过程中的 $\sigma - e$  相关关系  
Fig.12 The correlation of  $\sigma$  and  $e$  during growth of oat

$$f_v = \frac{W(1 - m_g)}{\rho dm_g} \cdot 10^{-3} \tag{3}$$

由  $\epsilon_v$ ,  $f_v$  计算  $\epsilon_g$  和  $\delta_\epsilon$ 。

由这些参数计算了  $\sigma - e$  在整个生长过程中的变化, 如图 12 所示, 离散点是我们的理论计算值, 点附近的数字表示对应的日子。我们对于具平坦界面的一层各向同性的随机介质作一近似的分析。一阶后向散射系数(水平极化)可写为<sup>[3]</sup>

$$\sigma_{hh}(\theta) = 2\pi^2 \varphi_{\xi}(0) k_0^4 \left| \frac{X_{01}}{D_2} \right|^2 \left\{ \frac{1}{4k_{1z}''} (1 - e^{-4k_{1z}'' d}) (1 + |R_{12}|^4 e^{-4k_{1z}'' d}) + 4d |R_{12}|^2 e^{-4k_{1z}'' d} \right\} \quad (4)$$

其中  $\varphi_{\xi}(k)$  为相关函数  $\langle \xi \xi^* \rangle$  的 Fourier 变换,  $X_{01}$  为观察区至随机介质层的透射系数, 这里近似为 1, 同时亦将多次反射因子  $|D_2|^2 \approx 1$ .  $|R_{12}|^2$  是下垫界面的反射率. 另一方面, 由起伏逸散定理可计算一层具平坦界面的随机介质的热发射率为<sup>[3]</sup>

$$e_h(\theta) = \frac{k_0 \varepsilon_g''}{\cos \theta \varepsilon_0} \frac{1}{2k_{1z}''} \left[ \left| \frac{X_{01}}{D_2} \right|^2 (1 - e^{-2k_{1z}'' d}) (1 + |R_{12}|^2 e^{-2k_{1z}'' d}) \right] + \frac{k_0 \varepsilon_2''}{\cos \theta \varepsilon_0} \frac{1}{2k_{2z}''} \left| \frac{X_{01} X_{12}}{D_2} \right|^2 e^{-2k_{1z}'' d} \quad (5)$$

其中右端第一项为随机介质层的热发射, 第二项是下垫介质的热发射. (5) 式的解是起伏逸散定理的零阶解, 即是平行分层均匀介质的热发射率.

比较(4)和(5)式, 我们可以看出, 当光学厚度  $k_{1z}'' d \ll 1$  时,

$$\sigma_{hh}(\theta) \approx 2\pi^2 \varphi_{\xi}(0) k_0^4 d (1 + |R_{12}|^4 e^{-4k_{1z}'' d} + 4|R_{12}|^2 e^{-4k_{1z}'' d}) \quad (6)$$

以及(5)式随机介质层的热发射率

$$e_h(\theta) \approx \sqrt{\frac{\varepsilon_g'}{\varepsilon_0}} 2k_{1z}'' d (1 + |R_{12}|^2 e^{-2k_{1z}'' d}) \quad (7)$$

这样当  $d \rightarrow 0$  时, 有

$$\left. \frac{\partial \sigma_{hh}}{\partial d} \right|_{d=0} = 2\pi^2 \varphi_{\xi}(0) k_0^4 \gg \left. \frac{\partial e_h}{\partial d} \right|_{d=0} = \sqrt{\frac{\varepsilon_g'}{\varepsilon_0}} 2k_{1z}'' \quad (8)$$

因此在植物生长初期 ( $d \sim 0$ ),  $\sigma_{hh}$  的变化率远大于  $e_h$  的变化率, 因此  $\sigma_{hh}$  有明显的增长, 而  $e_h$  则几乎没有变化. 这可在第 41 天之前的  $\sigma_{hh} - e_h$  关系图中看出. 而当  $k_{1z}'' d \gg 1$  时, 界面反射可忽略, 后向散射系数和热发射率分别为:

$$\sigma_{hh}(\theta) \approx \pi^2 \varphi_{\xi}(0) k_0^4 \frac{1}{2k_{1z}''} (1 - e^{-4k_{1z}'' d}) \quad (9)$$

$$e_h(\theta) \approx \sqrt{\frac{\varepsilon_g'}{\varepsilon_0}} (1 - e^{-2k_{1z}'' d}) \quad (10)$$

此时  $\sigma_{hh} \sim k_0^4 \varphi_{\xi}(0)$  对于频率和相关长度有灵敏的变化, 衰减因子  $1 - e^{(-4k_{1z}'' d \sec \theta)}$  亦较小. 而  $e_h(\theta)$  的衰减因子  $e^{(-2k_{1z}'' d \sec \theta)}$  相对地大些, 植被层的散射遮蔽而使热发射率略为下降. 这是在第 70 天之后的情形. 而当  $k_{1z}'' d$  不很小亦不很大时, 则随植被的生长, 散射粒子增多使得散射增强; 另一方面, 散射粒子作为热发射体, 发射体增多而增强了热发

射,同时此时后向散射遮蔽热发射还不显著。因此,  $\sigma$  与  $e$  均有明显增强,这是第 41 天至第 70 天之间的情形。对于  $\sigma_{vv} - e_v$  的讨论,亦可得类似的结论。因此,  $\sigma - e$  的相关特征的日变化似乎比图 1, 2 各自单调递增的日变化更易区分植被不同的生长阶段。

## 4 结 论

本文采用一层具粗糙界面的连续随机介质模型,由互易性定理,计算了几种植被的微波极化的双站散射系数  $\gamma_{pq}$ , 后向散射系数  $\sigma_{vv}$ ,  $\sigma_{vw}$  和热发射率  $e_h$ ,  $e_v$ 。建立了后向散射和热发射率的定量的相关关系,数值模拟了植被在整个生长过程中  $\sigma - e$  的变化及其相关特征。数值模拟的结果与几种植被主被动遥感的实验数据进行了很好的比较。 $\sigma - e$  的相关特征有利于不同植被的分类和识别,比用  $\sigma$ 、 $e$  各自独立的变化更易用于植被不同生长阶段的区分。

## 参 考 文 献

- [1] Zuniga M, J A Kong, Active and Remote Sensing of Random Media, J. APPL. Phys. 1980, 51 (1): 74 — 79.
- [2] Ulaby F T, R K Moore, A K Fung. Microwave Remote Sensing: In: Radar Remote Sensing and Surface Sacttering and Emission Theory, Addison Wesley Pub. 1982, 2.
- [3] 金亚秋, 电磁散射和热辐射的遥感理论, 北京: 科学出版社, 1993.
- [4] Wigneron J P, Y Kerr A Chanzy, Y Q jin. Inversion of Surface Parameters from Passive Microwave Measurements over a Soybean Field, Remote Sensing of Environment, 1993 46, 67 — 72.
- [5] Coppo P, et al., Sensitivity of Active and Passive Microwave Sensors to Soil Moisture of Vegetated Field, IGARSS'90, 1990, 3, 1851 — 1854.
- [6] Matzler C, Passive Microwave Signature Catalog 1989 — 1992, Institute of Applied Physics, University of Bern, Switzerland, 1992.

## 作 者 简 介

金亚秋, 男, 1947 年 9 月生。美国麻省理工学院电气工程与计算机科学系博士。现为上海复旦大学电子工程系教授, 博士生导师。主要研究方向为电磁波散射传输和定量遥感理论, 已在国内外发表个人专著 3 部, 学术论文 110 篇。

## Numerical Simulation and Comparison with Measurements for the Correlation of Active and Passive Microwave Remote Sensing

Jin Yaqiu    Huang Xingzhong

*(Wave Scattering and Remote Sensing Centre Dep. Electronic Engineering, Fudan University)*

**Abstract** Employing the model of a layer of continuous random medium with an underlying rough surface, the bistatic scattering and back-scattering coefficients are calculated. By using the reciprocity, the emissivity is also calculated. Numerical results simulate the change of the backscattering and emissivity of the vegetation canopies and their correlation during whole growth period. Theoretical results are compared with the measurements of active and passive remote sensing of several vegetation canopies. The correlated characteristics of microwave active and passive remote sensing are discussed.

**Key words** correlation of active and passive, simulation, comparison with data