

粗糙地、海面色散特性研究

黄泽贵^{1,2}, 李爱飞², 张冬梅³

(1.空军工程大学 导弹学院,陕西 三原 713800;2.驻29所军事代表室,四川 成都 610036;3.空军工程大学 电讯工程学院,陕西 西安 710077)

摘要:由于在研究粗糙地海面的超宽带特性时,需顾及介电常数随频率变化而变化的特点。因此,有必要研究粗糙地海面中随机介质的介电常数随频率变化的色散特性。通过自由水和结合水色散特性的数值比较,提出了一种包含结合水的新土壤介电常数模型,研究了新旧模型随频率变化的特性,结果表明新的土壤模型比 Dobson 模型更合理地表征了土壤的介电常数。同时,针对海水的色散特性,通过单、双 Debye 模型的数值对比,提出了修正的 Meissner 模型,研究了海水在不同温度下的色散特性,分析了不同温度下的松弛频率,结果表明第 2 个松弛频率的引入显著拓展了 Debye 模型的有效范围,从而证明了新模型的有效性。

关键词:粗糙地、海面;介电常数;色散特性;结合水;Debye 模型

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.05.011

中图分类号:TN606;O411.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2009)05-0050-05

电波传播、通信、目标识别、环境系统检测、遥感、生物医学诊断、工程材料测试等众多学科的应用需要,推动了粗糙表面研究的全面发展:表面轮廓从低维拓展到高维,表面模拟从随机函数发展到分形建模,求解方法从低阶解析法发展到高阶解析法^[1]以及高效精确的数值解法^[2],入射电磁波从平面波发展到高维高斯宽波束,分析对象从地物特性求解、发射率研究等发展到表面参数反演、重构等研究^[3]。纵观论及粗糙表面特性求解的文献发现,它们的求解都是基于单一频率下的数值解或解析值,没有考虑土壤、植被、海水等随机介质参数随频率急剧变化的色散特性。近年来复杂环境中雷达目标的地物探测和识别^[4],推动了粗糙表面超宽带特性的研究。而在粗糙地、海面超宽带特性的研究中^[5],土壤和海水等均是色散介质,它们的介电常数常随照射频率的改变而改变。因此,有必要研究粗糙地、海面中随机介质随频率变化的色散特性。

1 土壤的介电常数

土壤分干土和潮湿土壤 2 类,干土介电常数实部一般在 2-4 变化,而且基本上与频率、温度无关,虚部的典型值小于 0.05。因此,这里只针对潮湿土壤的介电常数模型展开研究。

潮湿土壤的介电常数与土壤湿度、含盐量和温度等因素有关,围绕它们对介电常数的影响及其应用的研究不断,因为土壤湿度在环境科学、水文地理学和气象学等方面具有重要作用,含盐量在监测耕地的盐化等方面也有重要作用,而土壤发射率的变化也能用来监测地表温度的变化^[6]。因此,在粗糙表面散射特性的研究中,常将介电常数作为一个重要的因子来考虑,因为它不仅影响到后向散射或镜像散射^[7],也影响到表面的色散特性。

在土壤介电常数模型的研究中,Dobson 等人^[8]提出了半经验模型,它由经验模型和体模型混合组成,是目前最为常用的模型,其一般式为:

* 收稿日期:2008-06-05

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2005F23)

作者简介:黄泽贵(1976-),男,四川宁遂人,博士,主要从事电磁散射理论计算、电子对抗研究。

E-mail:zghuang203@163.com

$$\epsilon_{soil}^c = v_s \epsilon_s^c + v_a \epsilon_a^c + v_{fw} \epsilon_w^c + v_{bw} \epsilon_w^c \tag{1}$$

式中： ϵ_s 、 ϵ_a 、 ϵ_w 、 ϵ_w 分别表示土壤固体材料、空气、自由水、结合水的介电常数； $v_s = 1 - v_\varphi$ ； $v_a = v_\varphi - m_b$ ； $m_b = v_{fw} + v_{bw}$ ； v_{fw} 、 v_{bw} 分别表示自由水、结合水的空隙度； $v_\varphi = (\rho - \rho^d) / \rho$ ， v_φ 表示土壤空隙度， ρ^d 表示干土密度， $\rho^d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ ， ρ 表示土壤密度。根据实验测量结果，当 $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$ 时， $\epsilon_s = 4.7$ 。

为了便于说明我们提出的新模型，下面首先分析自由水和结合水介电常数的色散特性。在盐度 $s \leq 10\%$ ，温度 $T = 22^\circ\text{C}$ 条件下，自由水、结合水介电常数的 Debye 型方程分别为：

$$\epsilon_w = 4.9 + \frac{75}{1 + jf/18} - j \frac{18\sigma}{f} \tag{2}$$

$$\epsilon_w = 2.9 + \frac{55}{1 + (jf/0.18)^{1/2}} \tag{3}$$

式中 σ 为水的离子电导率，单位是 sm^{-1} ，它与盐度的关系为 $\sigma \approx 0.16 \text{ s} - 0.0013 \text{ s}^2$ 。图 1 给出了自由水、结合水介电常数随频率的变化特性。

从图 1 中可以看出，自由水介电常数的实部 $\text{Re}(\cdot)$ 随频率的升高而单调减小；虚部 $-\text{Im}(\cdot)$ 则随频率的升高先增大后减小。通过分析结合水介电常数的色散特性可知，结合水介电常数随频率变化的特性与自由水相似，只是其转角频率远小于自由水，但其随频率变化的趋势远大于前者。

为深入对比在不同频段下，自由水与结合水随频率变化的特性，计算了不同频率下二者实部的变化，结果见图 2。从图 2 可知，在低频段 ($f < 1 \text{ GHz}$)，自由水和结合水的介电常数相当；在中频段 ($1 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$)，自由水的介电常数明显大于结合水；而在较高频段 ($f > 20 \text{ GHz}$)，结合水的介电常数与自由水相当。二者虚部的变化特性与实部一致。因此，随着地物特性的深入研究，Dobson 等人采用舍弃式 (1) 中的结合水来近似计算土壤介电常数的算法，显然是不准确的。

为此，文中提出了土壤介电常数新的半经验模型，即：

$$\epsilon_{soil}^c = (1 - v_\varphi) \epsilon_s^c + v_\varphi - m_b + v_{fw} \epsilon_w^c + v_{bw} \epsilon_w^c \approx 1 + \frac{\alpha}{\rho} (\epsilon_s^c - 1) + m_b^\beta (\epsilon_w^c + \epsilon_w^c - 1) \tag{4}$$

式中： α 的最优值为 0.65； β 是可调整参数，由沙土、粘土含量确定，即：

$$\beta = 1.09 - 0.11s_o + 0.18c \tag{5}$$

式中 $s_o(\%)$ 、 $c(\%)$ 分别为沙土、粘土含量，如果土壤中沙土、粘土的含量分别为 42.0%、8.5%，其余为泥土的含量，由此可求出土壤的 $\beta = 1.06$ 。需要说明的是，通过式 (1) 与式 (4) 的比较可知，新的半经验模型保留了结合水对介电常数的贡献。也就是说，在研究土壤介质的色散特性时，应共同考虑自由水和结合水的作用，特别是在较高频段下。

为对比新旧模型的差异，图 3 给出了不同频段下新旧模型的计算值。需要说明的是，图 3 采用的是 New-Re、New-Im 和 Dobson-Re、Dobson-Im 分别

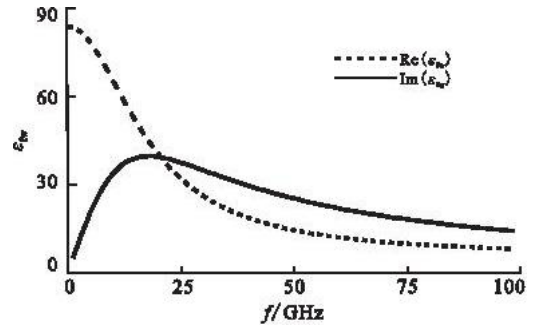


图 1 自由水介电常数随频率的变化
Fig. 1 The permittivity of free-water following frequency

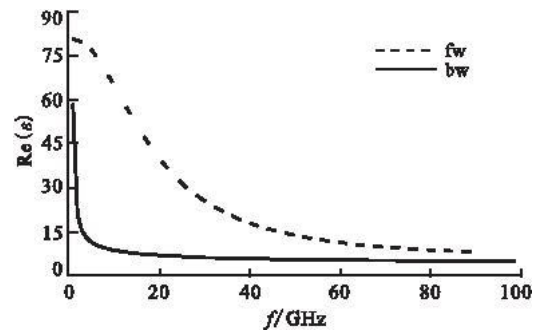


图 2 自由水和结合水介电常数实部随频率的变化
Fig. 2 The real part of permittivity of free-water and bound-water following frequency

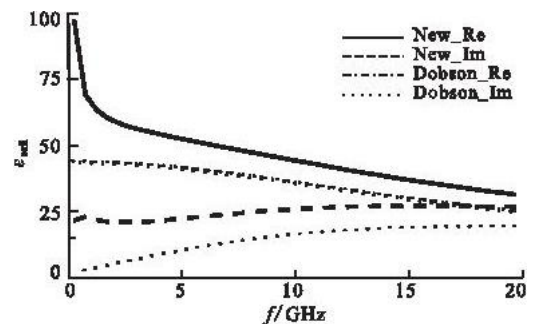


图 3 不同土壤模型介电常数的比较
Fig. 3 The permittivity of different soil models following frequency

表示新旧模型的实部、虚部。由图 3 可知,旧模型对结合水

的舍弃近似,造成的误差较大,特别是在 10 GHz 以内。因此,在研究粗糙地面的色散特性时,应基于本文提出的新模型展开研究。

2 海水的介电常数

海水介电常数对海面发射、大气传播及微波辐射传输研究等具有重要作用,它是照射频率、海水温度和盐度的函数。在海水介电常数模型的研究中,1997 年 Klein 等人^[9]提出了单 Debye 模型,即:

$$\epsilon_{sea}(T,S) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon(T,S) - \epsilon_{\infty}}{1 + \left[j \frac{f}{f_1(T,S)} \right]^{1-\eta}} - j \frac{\sigma(T,S)}{(2\pi\epsilon)f} \quad (6)$$

式中 η 表征松弛时间参数,一般取 0.02 ± 0.007 。实验测量表明,单 Debye 模型仅在 $f \leq 2.66$ GHz 时有效,当频率升高时误差变大。

针对单 Debye 模型不能适用于高频,Stogryn 的双 Debye 模型又不能适用于低温的特点,2004 年 Meissner 等人^[10]提出了双 Debye 海水介电常数模型,即:

$$\epsilon_{sea}(T,S) = \epsilon_{\infty}(T,S) + \frac{\epsilon(T,S) - \epsilon(T,S)}{1 + j \frac{f}{f_1(T,S)}} + \frac{\epsilon(T,S) - \epsilon_{\infty}(T,S)}{1 + j \frac{f}{f_2(T,S)}} - j \frac{\sigma(T,S)}{(2\pi\epsilon)f} \quad (7)$$

式中 $f_1(T,S)$ 、 $f_2(T,S)$ 分别表示一阶、二阶 Debye 松弛频率(GHz),即:

$$f_1(T,S) = \frac{45 + T}{a_1 + a_2 T + a_3 T^2} [1 + S(b_1 + b_2 T + b_3 T^2)] \quad (8)$$

$$f_2(T,S) = \frac{45 + T}{a_1 + a_2 T + a_3 T^2} [1 + S(b_1 + b_2 T)] \quad (9)$$

式中: S 表示含盐量(%); T 表示海面温度($^{\circ}\text{C}$); a_i ($i=1,2,\dots,6$)、 b_k ($k=1,2,\dots,5$) 分别表示测量值和理论计算值的匹配参数,其值和其它表达式见文献^[10]。

由式(7)可以看出,Meissner 等人的双 Debye 模型没有考虑松弛参数的影响。为了使双 Debye 模型适用更高频段,提出了修正的 Meissner 模型,即:

$$\epsilon_{sea}(T,S) = \epsilon_{\infty}(T,S) + \frac{\epsilon(T,S) - \epsilon(T,S)}{1 + \left[j \frac{f}{f_1(T,S)} \right]^{1-\eta}} + \frac{\epsilon(T,S) - \epsilon_{\infty}(T,S)}{1 + \left[j \frac{f}{f_2(T,S)} \right]^{1-\eta}} - j \frac{\sigma(T,S)}{(2\pi\epsilon)f} \quad (10)$$

当要研究高频或低温下纯水的介电常数时,只需令盐度含量 $S=0$ 。值得指出的是,对比式(10)与式(7)可知,修正的双 Debye 海水模型中增加了松弛频率的时间参数对介电常数影响的考虑。

图 4 给出了式(10)求得的介电常数随频率的变化,其中 $\eta=0.012$, $S=0.035$ 。从图 4 中可看出随着频率的升高,海水介电常数迅速减小。总的来说,温度越高,介电常数越大。不同温度、频段下,实、虚部的变化规律并不一致,低温时,实部在 X 波段以下迅速减小,虚部变化却很缓慢;常温时,两者的变化则相反,这就是介电常数虚部对发射率影响较大的缘故,因为此时虚部随频率的变化很大。这也说明在求解海面的色散

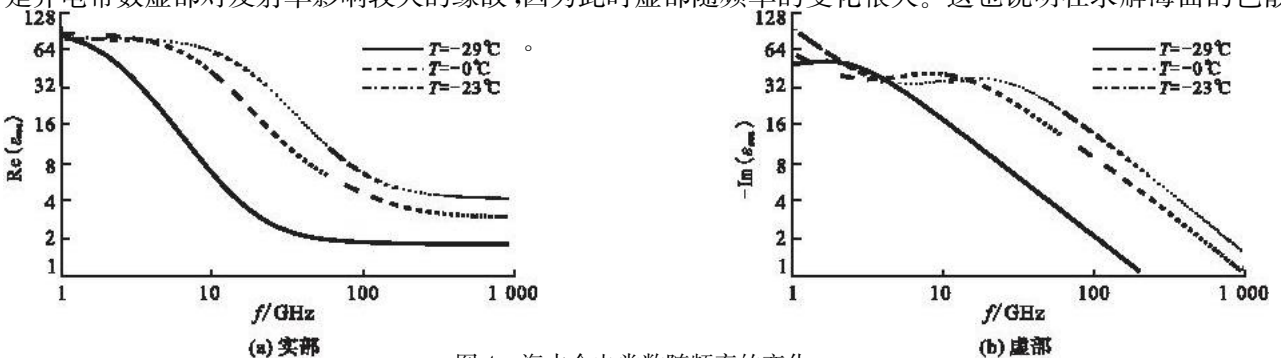


图 4 海水介电常数随频率的变化

Fig. 4 The permittivity of sea-water following frequency

图5给出了4组频率下,海水介电常数随温度的变化关系,此时含盐量同图4。从图中可以看出,温度升高,介电常数增大,不同频段下增大的幅度不同;当频率超过W波段时,温度变化对介电常数的影响很小。需要进一步说明的是,较低温度($T < -50^{\circ}\text{C}$)下,此时冰的介电常数的实部会随着温度的升高而减小。

为了说明新的双Debye海水模型的正确性,图6给出了2个松弛频率随温度的变化关系,含盐量同图5。从图6可知,第1个松弛频率的变化范围为0.5668 GHz—2.6595 GHz,而第2个松弛频率的变化范围为10.779 GHz—335.33 GHz,正是第二个松弛频率更大的变化范围,才拓宽了海水(纯水,盐度 $S=0$)在不同频段和温度下介电常数的表征,这也证实了新模型的优越性。

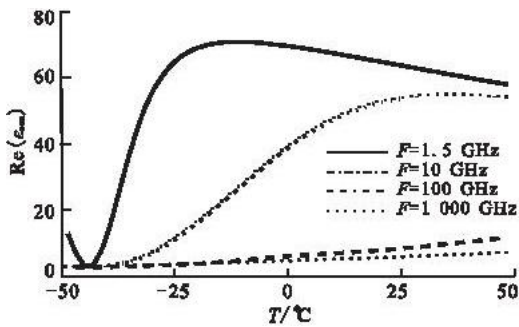


图5 海水介电常数实部随温度的变化

Fig. 5 The real part of permittivity of sea-water following temperature

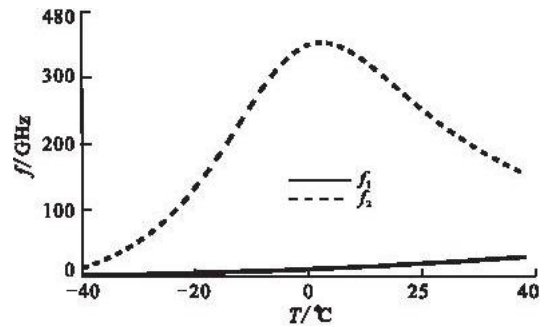


图6 2个松弛频率随温度的变化

Fig. 6 Two relaxation frequency following temperature

3 结束语

在雷达目标环境特性研究中,环境介电常数的特性会显著影响目标的散射特性,尤其是在超宽带照射条件下。为便于准确研究粗糙地、海面的超宽带散射,文中就粗糙地、海面中介电常数的色散特性进行了研究。为此,在分析土壤、海水介电常数模型的基础上,分别提出了新的半经验土壤模型和松弛时间修正的双Debye海水模型,更为准确地求解了粗糙地、海面中随机介质的色散特性。在土壤色散特性的研究中,对比了自由水和结合水介电常数随频率变化的特性,分析了新旧土壤模型色散特性在不同频段下的特点。在海水色散特性的研究中,研究了修正的双Debye模型的色散特性,分析了不同频率下介电常数随温度的变化关系。

参考文献:

- [1] 黄泽贵,童创明,胡国平.粗糙表面低掠入射散射特性研究[J].电子与信息学报,2007,29(2):482—485.
HUANG Zegui, TONG Chuangming, HU Guoping. Study of Low-grazing Angle Scattering Effect from Gaussian Rough Surface[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(2): 482—485. (in Chinese)
- [2] Ku H C, Awadallah R S, McDonald R L, et al. Fast and Accurate Algorithm for Electromagnetic Scattering From 1-D Dielectric Ocean Surfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(8): 2381—2391.
- [3] 童创明,黄泽贵,胡国平.高阶微扰法的有效性研究[J].电子学报,2007,35(9):1745—1748.
TONG Chuangming, HUANG Zegui, HU Guoping. Study of Validity of High-order Small Perturbation Method [J]. Journal of Electronics, 2007, 35(9): 1745—1748. (in Chinese)
- [4] Firoozabadi R, Miller E L, Rappaport C M, et al. Subsurface Sensing of Buried Objects under A Randomly Rough Surface Using Scattered Electromagnetic Field Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(1): 104—117.
- [5] King W L, Qin L, Leung T, et al. On the Analysis of Statistical Distributions of UWB Signal Scattering by Random Rough Surfaces Based on Monte Carlo Simulations of Maxwell Equations [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(12): 3200—3206.
- [6] 张俊荣,王丽魏,张德海.植被和土壤的微波介电常数[J].遥感技术与应用,1995,10(3):40—50.

- ZHANG Junrong, WANG Liwei, ZHANG Dehai. Microwave Permittivity of Plant and Soil [J]. Sensing Technology and Application, 1995, 10(3):40—50. (in Chinese)
- [7] Ceraldi E, Franceschetti G, Iodice A, et al. Estimating the Soil Dielectric Constant Via Scattering Measurements Along the Specular Direction [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 43(2): 295—305.
- [8] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, et al. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil —part II: Dielectric mixing Models [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 23(1):35—46.
- [9] Klein L A, Swift C T. An Improved Model for the Dielectric Constant of Sea Water at Microwave Frequencies [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1977, 25(1):104—111.
- [10] Meissner T, Wentz J. The Complex Dielectric Constant of Pure and Sea Water From Microwave Satellite Observations [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(9): 1836—1849.

(编辑:田新华)

Study of the Dispersion of Rough Land and Sea Surface

HUANG Ze-gui^{1,2}, LI Ai-fei², ZHANG Dong-mei³

(1. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyua 713800, Shaanxi, China; 2. Military Representative of PLA at Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China; 3. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: On account of the changing of permittivity along with frequency, it is necessary that the dispersion of rough land and sea surface should be studied. Based on the study of dispersion of land surface, a novel model including the bound water is presented by comparing the dispersion of bound water with that of free water. The relationship between permittivity and frequency is studied, and the result shows that the model is more preferable than the Dobson's. On the other hand, a modified model for the permittivity of sea surface is presented by comparing the single and double Debye models in relaxation law. The dispersion of sea surface is studied, and the relaxation frequencies are analyzed at different temperature respectively. The results show that it is the second relaxation frequency that obviously expands the effective range of Debye model, which confirms the validity of the new model.

Key words: rough land and sea surface; permittivity; dispersion; banded water; Debye model