

SAR 土壤水分反演中的介电常数实部简化模型

曾江源^{1,2}, 李震¹, 陈权^{1*}, 毕海芸^{1,2}

(1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:利用 Dobson 半经验模型建立模拟数据库,用建立的模拟数据库对 Hallikainen 关系式进行最小二乘回归,标定其在 SAR 关键频点下的系数并进行适当改进,最终建立了介电常数实部与土壤体积含水量关系的简化模型.对建立的简化模型进行验证和对比,结果表明,简化模型在精度上优于 Hallikainen 经验模型,并且与复杂的 Dobson 半经验模型相比,具有良好的精度和实用性.

关键词:介电常数;土壤水分;SAR;简化模型

中图分类号:TP722.6;S152.7 文献标识码:A

A simplified model of the real part of the soil complex permittivity for soil moisture estimation from SAR image

ZENG Jiang-Yuan^{1,2}, LI Zhen¹, CHEN Quan^{1*}, BI Hai-Yun^{1,2}

(1. Center for Earth Observation and Digital Earth Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A simulated database built with the Dobson semi-empirical model was fitted to the Hallikainen formula by the least square regression method. The coefficients at key frequency points of SAR were calibrated with some improvement. The simplified model between the real part of the complex permittivity and the soil volumetric moisture content was established. It was validated and compared with other models. The results show that the simplified model has better accuracy than the Hallikainen empirical model, and also has good accuracy and practicality compared with the complex Dobson semi-empirical model.

Key words: dielectric constant; soil moisture; SAR; simplified model

PACS: 95.75.RS; 92.40.Lg

引言

土壤水分即土壤含水量是地球生态系统的非常重要的组成部分,它是全球水圈、大气圈和生物圈水分和能量交换的重要组成部分,也是地表干旱信息最重要的表征参量^[1]. 频繁的全球土壤水分观测对很多环境学科,例如洪水监测^[2],改良土壤侵蚀模型^[3],天气和气候预报^[4]以及农业应用^[5]都至关重要. 因此,获取大范围地表土壤水分时空分布信

息是一个迫切需要解决的问题.

微波遥感监测土壤水分的物理基础是土壤的介电特性与土壤的含水量之间有非常密切的联系. 同时有研究表明,对于某一特定土壤,其介电常数的实部由土壤的含水量决定;而土壤介电常数的虚部会同时受到土壤含水量与含盐量的影响^[6]. 所以,对于特定土壤类型,建立介电常数实部与土壤体积含水量之间关系,是微波遥感监测土壤水分过程中必须解决的问题.

收稿日期:2011-12-15,修回日期:2012-07-14

Received date: 2011-12-15, revised date: 2012-07-14

基金项目:973 项目(2010CB951403,2009CB723901);863 项目(2011AA120403);国家自然科学基金(41101391)

Foundation items: Supported by 973 Program (2010CB951403,2009CB723901);863 Program (2011AA120403);National Natural Science Foundation of China (41101391)

作者简介 (Biography): 曾江源 (1988-),男,湖南娄底人,硕博连读生,主要从事主被动微波土壤水分反演和介电模型研究. E-mail: zengjiangyuan@163.com.

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: qchen@ceode.ac.cn.

Topp^[7]在大量试验基础上,根据四种土壤的试验结果拟合得到了土壤体积含水量与土壤介电常数的三次多项式方程,该模型优点是公式表达简洁,不需要任何土壤类型参数的输入,但 Topp 模型适用面狭窄,只适合轻质地土壤含水量与土壤介电常数关系的拟合,且因为模型忽略了土壤质地的影响,导致误差较大;此外,Alharathi^[8]以及 Ferre^[9]根据实验结果提出了 m_v 与 $\varepsilon^{0.5}$ 之间的线性表达式, Malicki^[10]考虑了土壤容重的影响,利用多种土壤数据建立了 m_v 与 $\varepsilon^{0.5}$ 的非线性关系,但是,此类模型也忽略了土壤质地的影响,适用性受到了很大的限制; Hallikainen^[11]根据不同土壤类型的实验结果提出了基于不同土壤类型的二次多项式拟和模型,因为模型中考虑到了土壤质地的影响,所以在精度和适用性上较 Topp 模型与 $m_v - \varepsilon^{0.5}$ 型模型有了较大的提高,但是,其用于标定系数的样本数过少 ($N < 100$),所以标定得到的系数说服力不强. 且一些典型的 SAR 常用频点,如 $L = 1.26$ GHz, $S = 3.2$ GHz, $C = 5.3$ GHz, $X = 9.6$ GHz 的系数未给出; Dobson^[12]等利用波导介电常数测量系统和自由空间传播技术获取的 5 种不同土壤类型的实测数据,提出了土壤介电常数与土壤体积含水量之间的半经验模型,即著名的 Dobson 半经验模型,由于 Dobson 模型适用电磁波频率范围宽,模拟精度较高,且模型中参数不依赖于具体土壤类型,这一模型已被广泛用于土壤介电常数计算. 在理论模型方面,主要有 Dobson^[12]等提出的土壤四分量混合理论模型和新近发展的由 Mironov^[13]等提出的 GRMDM 模型,这类模型考虑了土壤内在束缚水的介电特性,理论上更加完善,但是模型的参数较多,公式复杂,必须事先测定土壤的某些物理指标,在实际应用中存在较大困难,因此实用性不强.

土壤介电常数,特别是介电常数的实部变化是利用 SAR 技术监测土壤水分的基础. 本研究利用 Dobson 半经验模型建立的模拟数据库,标定国内外主要 SAR 传感器在 L/S/C/X 波段几个常用频点下的 Hallikainen 关系式的系数并进行适当改进,建立了这些频点下土壤介电常数实部的简化模型,最后,随机选取 Dobson 模型模拟的数据对简化模型以及插值后得到的相同频点下的 Hallikainen 经验模型进行对比,并利用实测数据对简化模型进行验证. 结果表明,简化模型在精度上优于 Hallikainen 经验模型,并且具有良好的实用性.

1 土壤介电模型

目前在描述土壤介电常数与土壤体积含水量之间关系的介电模型中,最常用的主要是 Hallikainen 经验模型和 Dobson 半经验模型.

1.1 Hallikainen 经验模型

Hallikainen 经验模型是基于不同土壤类型土壤实测数据的多项式拟和模型. 在给定的频率下(包括了 1.4 GHz, 4 GHz, 6 GHz, 8 GHz, 10 GHz, 12 GHz, 14 GHz, 16 GHz, 18 GHz),土壤介电常数实部与土壤水分的拟和关系为:

$$\varepsilon' = (a_0 + a_1S + a_2C) + (b_0 + b_1S + b_2C)m_v + (c_0 + c_1S + c_2C)m_v^2, \quad (1)$$

式中, S, C 分别表示土壤的砂土,粘土百分比含量; m_v 表示土壤的体积含水量; $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2$ 是标定系数.

Hallikainen 模型简单直观、易于实现,模型系数通过土壤介电常数的实测数据得到,但样本数过少 ($N < 100$),所以得到的系数的鲁棒性不强;此外,一些典型的微波波段的主要频点下的系数未给出.

1.2 Dobson 半经验模型

Dobson 半经验模型是利用 5 种不同土壤类型的实测数据建立的土壤混合介电模型,适用频率范围为 1.4 ~ 18 GHz. 1995 年 Neil R. Peplinski^[14-15]将 Dobson 模型的适用范围扩充为 0.3 ~ 18 GHz. 其土壤介电常数实部的具体表达式为:

$$\varepsilon' = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\varepsilon_s^\alpha - 1) + m_v^{\beta'} \varepsilon'_{fw} - m_v \right]^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (2)$$

上式中 ρ_b 表示土壤容重; ρ_s 表示土壤中固态物质密度,一般取 $\rho_s = 2.66$; ε_s 为土壤中固态物质介电常数,可以通过土壤固态物质密度 ρ_s 计算得到; α 表示一常数因子,对所有土壤的最优值为 0.65; m_v 表示土壤的体积含水量; β' 是可调的参数,它与土壤类型有关,可以通过土壤的砂土 S , 粘土 C 百分比含量计算得到; ε'_{fw} 表示自由水介电常数实部,可以通过温度和频率计算得到.

Dobson 模型是半经验模型,其优点是模拟的数据精度较高,但理论过程复杂,简洁性远不如 Hallikainen 经验模型. 该模型涉及的方程较多且繁琐,所需输入参数相比 Hallikainen 经验模型多出了土壤容重和土壤温度,而前者必须通过野外实测才能得到.

2 技术方案与过程

2.1 建立模拟数据库

以 Dobson 半经验模型为基础建立模拟数据库,此步骤是标定 Hallikainen 关系式系数的关键技术环节. 模型需要建立的模拟参数包括土壤体积含水量、土壤容重、土壤砂土含量、土壤黏土含量和土壤温度,建立的方法是设定每个参数变化的最大值、最小值和步长,代表整个参数的全部变化范围. 在分别设置频率为 $L = 1.26 \text{ GHz}$, $S = 3.2 \text{ GHz}$, $C = 5.3 \text{ GHz}$, $X = 9.6 \text{ GHz}$ 条件下,各输入参数的模拟范围如下表 1 中所示,考虑到实际地表情况,模拟数据库中只保留 $(S + C) \leq 1$.

表 1 Dobson 模型模拟数据库参数范围

Table 1 The range of parameters used to simulate the database by Dobson model

土壤表面参数	最小值	最大值	变化步长	单位
体积含水量 m_v	2	60	2	% by volume
土壤容重 ρ_b	0.9	1.7	0.1	g/cm^3
土壤温度 T	5	40	2	$^\circ\text{C}$
土壤砂土含量 S	5	95	10	%
土壤黏土含量 C	5	95	10	%

2.2 最小二乘回归标定系数

将 Hallikainen 关系式即式(1)的右边拆解成 9 项:

$$\epsilon' = a_0 + a_1S + a_2C + b_0m_v + b_1S \times m_v + b_2C \times m_v + c_0m_v^2 + c_1S \times m_v^2 + c_2C \times m_v^2, \quad (3)$$

其中把 $S, C, m_v, S \times m_v, C \times m_v, m_v^2, S \times m_v^2, C \times m_v^2$ 这 8 项看作独立变量, $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2$ 为待标定的系数,这样做的目的是为了将原来的非线性问题转化为线性问题. 因为已经在上一步中获得了具体频点下,不同 S, C, m_v 对应的土壤介电常数

实部的模拟数据库,所以在标定以上 9 个系数时,8 个独立变量都有具体的数值与之对应. 以 $S = 3.2 \text{ GHz}$ 波段为例,利用最小二乘回归分析得到的结果为:

$$\epsilon' = [2.382 + 0.334S + (-0.042)C] + [10.641 + 58.669S + 15.386C]m_v + [71.874 + (-57.241)S + (-13.887)C]m_v^2, \quad (4)$$

同理可以得到 $L = 1.26 \text{ GHz}$, $C = 5.3 \text{ GHz}$, $X = 9.6 \text{ GHz}$ 下介电常数实部简化模型,对以上四个频点的系数建立查找表,如表 2 所示.

表 2 $L/S/C/X$ 波段主要频点下简化模型查找表

Table 2 The look-up table of the simplified model at the main frequency points of the $L/S/C/X$ -band

f (GHz)	$\epsilon' = (a_0 + a_1S + a_2C) + (b_0 + b_1S + b_2C)m_v + (c_0 + c_1S + c_2C)m_v^2$								
	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	c_0	c_1	c_2
1.26	2.055	0.375	-0.053	12.368	68.943	18.075	84.677	-67.187	-16.291
3.2	2.382	0.334	-0.042	10.641	58.669	15.386	71.874	-57.241	-13.887
5.3	2.388	0.348	-0.033	10.418	56.211	14.750	68.507	-54.968	-13.351
9.6	2.408	0.384	-0.010	9.711	49.019	12.888	58.714	-48.303	-11.778

3 结果分析与对比

3.1 简化模型与 Dobson 模型对比

在第 2 节中,用 Dobson 模型建立了模拟数据库并结合最小二乘回归分析方法,标定了 $L = 1.26 \text{ GHz}$, $S = 3.2 \text{ GHz}$, $C = 5.3 \text{ GHz}$, $X = 9.6 \text{ GHz}$ 频点下 Hallikainen 关系式的系数. 为了更加直观的看出拟合的效果,将基于以上的 Hallikainen 关系式的数据与同条件下 Dobson 模型模拟的数据进行相应的对比. 为了对比的全面性,分别固定 $S = 0.4, C = 0.2$, 变化 m_v ; 固定 $m_v = 0.3, C = 0.2$, 变化 S ; 固定 $m_v =$

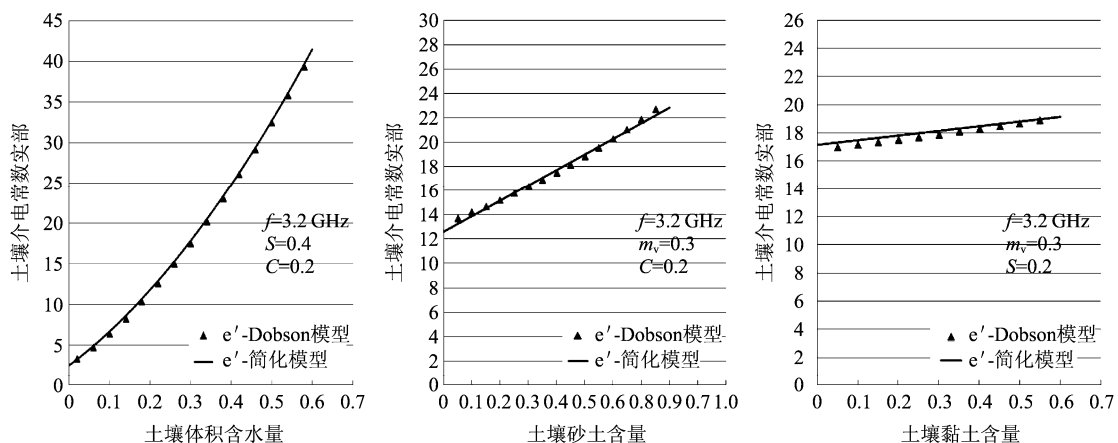


图 1 $S = 3.2 \text{ GHz}$ 下简化模型与 Dobson 模型的对比

Fig. 1 The comparison of the simplified model with the Dobson model ($S = 3.2 \text{ GHz}$)

0.3, $S=0.4$, 变化 C ; 对四个频点下两模型模拟的效果进行对比(其中, Dobson 模型模拟结果为土壤容重和温度双重循环后的均值). 以 3.2 GHz 为例(其余频点结果类似), 对比结果如图 1 所示.

从图 1 对比可以进一步看出, 利用 Dobson 模型建立的模拟数据库得到的基于 Hallikainen 关系式的简化模型, 与同条件下 Dobson 模型模拟的数据非常一致, 从而证明了简化模型的可靠性.

另外一方面, 土壤的介电常数实部不仅仅与土壤的体积含水量 m_v , 土壤的质地 S, C 有关, 同时也会受到土壤容重 ρ_b 以及土壤温度 T 影响. 为了进一步分析标定完系数后的简化模型的实用性, 固定两模型中的 S 和 C , 其中 $S=0.4, C=0.2$, 利用 Dobson 模型分别建立 $\rho_b=0.9, T=5; \rho_b=1.4, T=5; \rho_b=1.7, T=5; \rho_b=0.9, T=40; \rho_b=1.4, T=40; \rho_b=1.7, T=40$ 六种情况下的随机数据(其中 $\rho_b=0.9, \rho_b=1.7, T=5, T=40$ 均属于数据库中的极端值, 代表最大

误差可能出现的情况), 并设定平均绝对误差 (Mean Absolute Difference, 缩写为 MAD) 作为误差衡量标准, 对四个频点下两模型模拟的效果进行对比. 对比结果如图 2 至图 3 所示.

从图 2 至图 3 对比可以看出, 在 L, S, C 三个低频段下, 尽管土壤容重、温度的变化会对土壤介电常数实部产生一定的影响, 但即便在最极端的情况, 所建立的简化模型还是能与同条件下 Dobson 模型的数据较好的拟合, 只有两种情况, 其平均绝对误差大于 2, 其余大部分都控制在 1 以内, 说明简化模型在 L, S, C 波段能够较好的反映土壤介电常数实部与土壤体积含水量之间的关系, 具有良好的适用性.

X 波段因为频率较高, 介电常数实部受到温度的影响有所增加, 且误差主要随着体积含水量的升高而进一步增大, 当体积含水量低于 20% 时, 平均绝对误差较小, 拟合效果较好. 当体积含水量较大(如 >30%) 时, 平均绝对误差显著增大, 精度明显

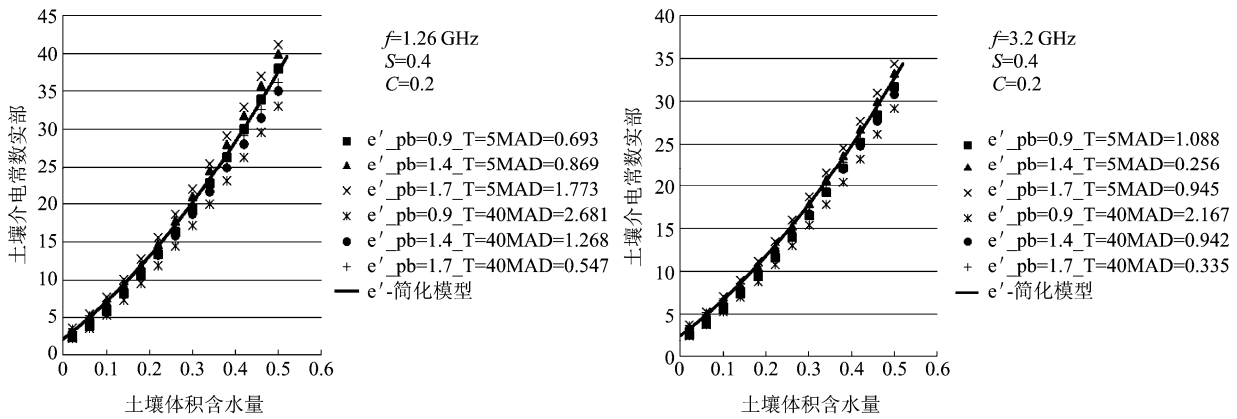


图 2 $L=1.26$ GHz、 $S=3.2$ GHz 下简化模型与 Dobson 模型的对比
Fig. 2 The comparison of the simplified model with the Dobson model ($L=1.26$ GHz, $S=3.2$ GHz)

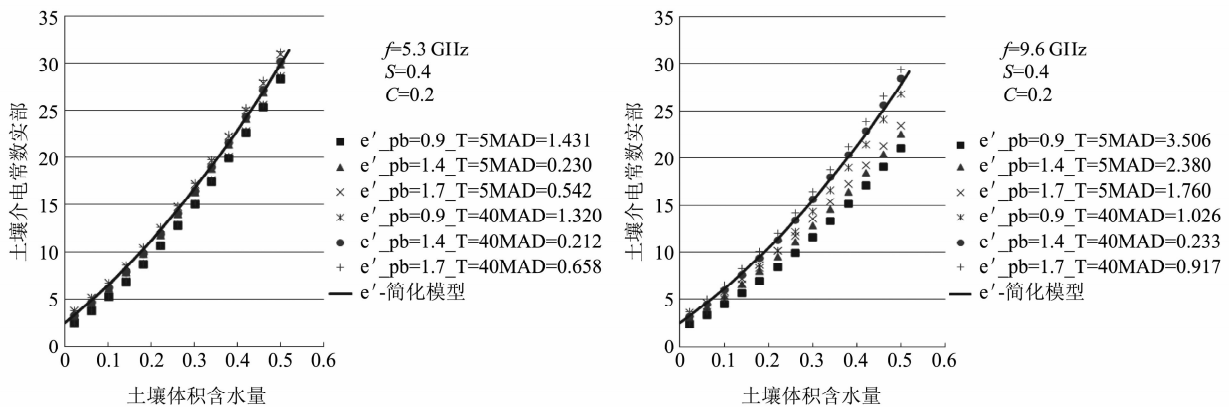


图 3 $C=5.3$ GHz、 $X=9.6$ GHz 下简化模型与 Dobson 模型的对比
Fig. 3 The comparison of the simplified model with the Dobson model ($C=5.3$ GHz, $X=9.6$ GHz)

降低,所以在较高频段如 X 波段,不能简单的将温度的影响忽略,必须将温度的影响考虑进模型当中.

3.2 改进的简化模型与 Dobson 模型对比

针对简化模型在 X 波段受到温度影响而精度降低的问题,将温度作为影响因子加入到模型中,得到适应于高频波段的改进的简化模型,改进后的简化模型形式如下所示:

$$\epsilon' = (a_0 + a_1S + a_2C + a_3T) + (b_0 + b_1S + b_2C + b_2C + b_3T)m_v + (c_0 + c_1S + c_2C + c_3T)m_v^2, \quad (5)$$

其中 T 表示土壤温度;其他参数的意义同式(1),这时需要标定的系数有 12 个.

利用第 2 节模拟的数据库,根据最小二乘回归分析的结果,就可以得到 $X = 9.6$ GHz 波段下,土壤介电常数实部改进的简化模型:

$$\epsilon' = [2.473 + 0.321S + (-0.021)C + (-0.001)T] + [6.569 + 46.958S + 12.299C + 0.134T]m_v + [49.952 + (-45.851)S + (-11.010)C + 0.259T]m_v^2, \quad (6)$$

为了对比模型改进后的效果,固定两模型中的 S, C 和 T ,其中 $S = 0.4, C = 0.2, T$ 分别取值为 $T = 5, T = 40$ 利用 Dobson 模型分别建立 $T = 5$ 时, $\rho_b = 0.9, \rho_b = 1.4, \rho_b = 1.7$;及 $T = 40$ 时 $\rho_b = 0.9, \rho_b = 1.4, \rho_b = 1.7$ 六种情况下的随机数据(其中 $\rho_b = 0.9, \rho_b = 1.7$ 属于极端情况),并设定平均绝对误差 MAD 作为误差衡量标准,对 $X = 9.6$ GHz 频率下两模型模拟的效果进行对比.对比结果如图 4 所示.

为了进一步直观的对改进的效果,对 $X = 9.6$ GHz 频率下未改进的简化模型与改进的简化模型的平均绝对误差(MAD)进行统计,如表 3 所示.

表 3 未改进的简化模型与改进的简化模型的 MAD 对比
Table 3 The comparison of MAD of the simplified model with the improved simplified model

六种对比情况	MAD	
	未改进的简化模型	改进的简化模型
$\rho_b = 0.9, T = 5$	3.506	2.081
$\rho_b = 1.4, T = 5$	2.380	0.955
$\rho_b = 1.7, T = 5$	1.760	0.403
$\rho_b = 0.9, T = 40$	1.026	1.601
$\rho_b = 1.4, T = 40$	0.233	0.403
$\rho_b = 1.7, T = 40$	0.917	0.342

从图 4 和表 3 可以清楚的看到在高频波段($X = 9.6$ GHz),加入温度因子后改进的简化模型相比之前未改进的简化模型在精度上有了明显的提高.改进后的简化模型的平均绝对误差基本上在 2 以内,大部分控制在 1 以内.因为改进后的简化模型考虑了温度在高频波段对介电常数实部的影响,因此模型在 X 波段也有了较好的精度.

3.3 简化模型与 Hallikainen 经验模型对比

为了检验 3.1, 3.2 节中建立的简化模型精度是否优于同条件下的 Hallikaninen 经验模型,利用 Hallikaninen 提供的查找表中的系数,选择相邻频率插值得到 $L = 1.26$ GHz, $S = 3.2$ GHz, $C = 5.3$ GHz, $X = 9.6$ GHz 下 Hallikaninen 关系式的 9 个系数.同样选择 Dobson 模型模拟数据库对插值后的 Hallikaninen 经验模型进行精度验证,以平均绝对误差(MAD)作为误差衡量标准,且对比条件与 3.1 节中的简化模型完全相同.最后计算简化模型与插值后得到的 Hallikaninen 经验模型在四个频点($L/S/C/X$)六种对比情况(同 3.1 节)下的 MAD 的平均值,并进行比较,比较的结果如表 4 所示.

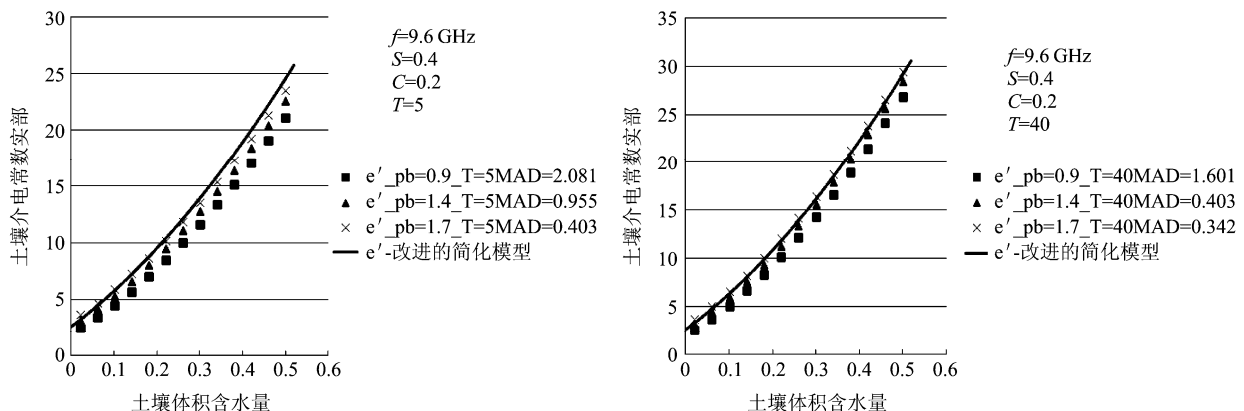


图 4 $X = 9.6$ GHz 下改进的简化模型与 Dobson 模型对比
Fig. 4 The comparison of the improved simplified model with the Dobson model ($X = 9.6$ GHz)

表 4 简化模型与 Hallikainen 经验模型的 MAD 的平均值对比

Table 4 The comparison of the average of MAD of the simplified model with the Hallikainen empirical model

频率(f) (GHz)	MAD 平均值	
	简化模型	Hallikainen 经验模型
$f=1.26$	1.305	2.417
$f=3.2$	0.956	1.863
$f=5.3$	0.732	1.460
$f=9.6$	0.964	1.705

从表 4 中可以很清楚地看出,在与 Dobson 模型模拟数据库做对比时,简化模型计算得到的 MAD 的平均值基本上控制在 1 以内,而同条件下的 Hallikainen 经验模型的 MAD 平均值大部分接近于 2. 由此可以看出,建立的简化模型在精度上要明显优于 Hallikainen 经验模型.

4 简化模型的验证

通过矢量网络分析仪 E8362B 测量得到北京周边采集的 10 个土壤样品介电常数实部数据,与同条件下简化模型模拟数据进行对比. 其中简化模型中土壤质地的数据,由于条件的限制无法得到目标区精细尺度 S 和 C 的分布情况,采用的是 NGDC 提供的 0.0833° (约 10 km) 分辨率的全球大尺度 S 、 C 数据代替^[16],土壤温度由插入式温度计测得,对以上建立的简化模型进行验证,结果如图 5 至图 6 所示.

从图 5 至图 6 对比的情况上看,实测数据与简化模型模拟的数据拟合程度较好,尤其在含水量较高时拟合程度最佳,误差较小. 四个频点下的相关系数都接近 0.9,说明实测数据与简化模型模拟数据高度相关,均方根误差基本控制在 3 左右,其中造成的误差一部分来源于模型本身,另外一方面也来自没有目标区域精细尺度的土壤质地数据.

5 结论

利用 Dobson 半经验模型建立的模拟数据库对 Hallikainen 关系式在 SAR 四个常用频点下进行了系数标定,得到了四个波段下土壤介电常数实部的简化模型. 尤其针对 X 波段数据受温度影响较大而精度较低的问题,进一步加入温度影响因子进行了改进.

建立了土壤介电常数的实部与土壤体积含水量 m_v 、土壤砂土含量 S 、土壤黏土含量 C ($L/S/C$ 三个波段的主要频点) 和土壤温度 T (X 波段的主要频点) 下的关系,可方便实现土壤介电常数实部到土

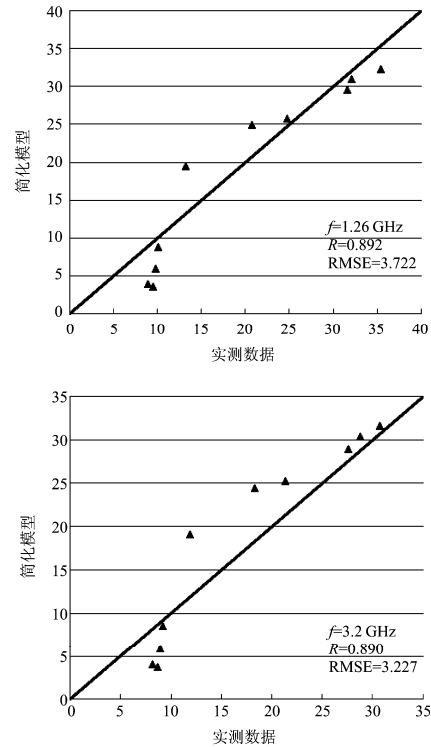


图 5 $L=1.26$ GHz、 $S=3.2$ GHz 下简化模型与实测数据对比

Fig. 5 The comparison of the simplified model with the measured data ($L=1.26$ GHz、 $S=3.2$ GHz)

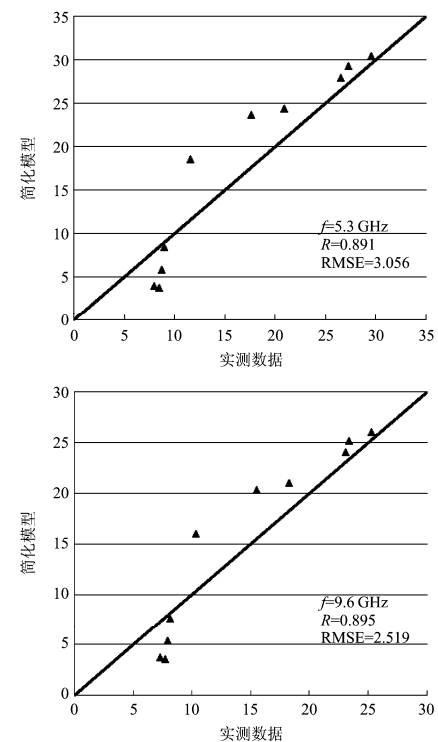


图 6 $C=5.3$ GHz、 $X=9.6$ GHz 下简化模型与实测数据对比

Fig. 6 The comparison of the simplified model with the measured data ($C=5.3$ GHz、 $X=9.6$ GHz)

壤体积含水量的转换. 如果使用者无法得到目标区精细尺度的 S 和 C 分布情况, 可利用全球大尺度的 S 和 C 数据替代; X 波段的土壤温度数据, 可由气象数据或其他遥感数据获得.

未来, 将在全国范围内选择一些典型的土壤类型样本, 如南方第四纪红粘土(代表地区江西省余江县及广东省南海市)、长三角水稻土(代表地区江苏省苏南的太湖平原、苏北的里下河平原)、华北潮土(代表地区河北省栾城县)、东北黑土(代表地区松辽平原)等开展相关的实测工作和模型的进一步验证和修订, 相关成果对于中国区域利用微波遥感技术监测土壤水分的工作将有重要意义.

REFERENCES

- [1] YAO Yun-Jun, QIN Qi-Ming, ZHAO Shao-Hua, *et al.* Retrieval of soil moisture based on MODIS shortwave infrared spectral feature [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (姚云军, 秦其明, 赵少华, 等. 基于 MODIS 短波红外光谱特征的土壤含水量反演. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(1): 99-104.
- [2] Western A W, Zhou S L, Grayson R B, *et al.* Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, **286**(1-4): 113-134.
- [3] Castillo V M, Gómez-Plaza A, Martínez-Mena M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: A simulation approach [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, **284**(1-4): 114-130.
- [4] Conil S, Douville H, Tyteca S. The relative influence of soil moisture and SST in climate predictability explored within ensembles of AMIP type experiments [J]. *Climate Dynamics*, 2007, **28**: 125-145.
- [5] Bolten J D, Crow W T, Jackson T J, *et al.* Evaluating the utility of remotely-sensed soil moisture retrievals for operational agricultural drought monitoring [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, **3**(1): 57-66.
- [6] SHAO Yun, LV Yuan, DONG Qing, *et al.* Study on soil microwave dielectric characteristic as salinity and water content [J]. *Journal of Remote Sensing* (邵芸, 吕远, 董庆, 等. 含水含盐土壤的微波介电特性分析研究. *遥感学报*), 2002, **6**(6): 416-423.
- [7] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines [J]. *Water Resour. Res.*, 1980, **16**(3): 574-582.
- [8] Alharthi A, Lange J. Soil water saturation: dielectric determination [J]. *Water Resour. Res.*, 1987, **147**(5): 378-384.
- [9] Ferre P A, Rudolph D L, Kachanoski R G. Spatial averaging of water content by time domain reflectometry: Implications for twin rod probes with and without dielectric coatings [J]. *Water Resour. Res.*, 1996, **32**(2): 271-279.
- [10] Malicki M A, Plagge R, Roth C H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil [J]. *Eur. J. Soil Sci.*, 1996, **47**(2): 357-366.
- [11] Hallikainen M T, Ulaby FT, Dobson M C, *et al.* Microwave dielectric behavior of wet soil-part I: Empirical models and experimental observation [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, **GE-23**(1): 25-34.
- [12] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, *et al.* Microwave dielectric behavior of wet soil part II: Dielectric mixing models [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, **GE-23**(1): 35-46.
- [13] Mironov V L, Dobson M C, Kaupp VH, *et al.* Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2004, **42**(4): 773-785.
- [14] Peplinski N R, Ulaby F T, Dobson M C. Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1995, **33**(3): 803-807.
- [15] Peplinski N R, Ulaby F T, Dobson M C. Corrections to dielectric properties of soils in the 0.3-1.3GHz ranges [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1995, **33**(6): 1340.
- [16] <http://www.ngdc.noaa.gov/ecosys/cdroms/reynolds/reynolds/reynolds.htm>, 1999, C. A. Reynolds, T. J. Jackson, and W. J. Rawls.