

引用格式:Yang Jianwei,Zhao Kai,Li Xiaofeng,*et al.*Research and Analysis on Dual-band Microwave Radiative Attenuation Properties of Forests Litter[J].Remote Sensing Technology and Application,2017,32(2):255-261.[杨建卫,赵凯,李晓峰,等.林下枯枝落叶层双频段微波辐射衰减特性研究与分析[J].遥感技术与应用,2017,32(2):255-261.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2017.2.0255

林下枯枝落叶层双频段微波辐射衰减特性研究与分析

杨建卫^{1,2},赵 凯^{1,3},李晓峰^{1,3},郑兴明^{1,3},姜 涛^{1,3},李 雷^{1,4}

(1.中国科学院东北地理与农业生态研究所,吉林 长春 130102;
2.中国科学院大学,北京 100049;3.中国科学院长春净月潭遥感试验站,吉林 长春 130102;
4.吉林大学地球探测科学与技术学院,吉林 长春 130026)

摘要:林下枯枝落叶层会衰减来自土壤的微波辐射信号,降低微波辐射亮温对地表参数变化的敏感性,从而影响林下地表参数的反演精度。为了定量研究枯枝落叶层的衰减特性,基于 $\tau-\omega$ 模型,通过严格的理论推导证明了利用不同厚度下的枯枝落叶层亮温计算衰减系数的可行性,并基于该理论方法设计可控实验,获取了双频段(18.7 GHz 和 36.5 GHz)上不同厚度、不同重量含水量的枯枝落叶层亮温值,然后定量分析了枯枝落叶层的衰减系数随重量含水量的变化过程,同时根据计算的消光系数,分析了不同厚度、不同重量含水量下的枯枝落叶层透过率。结果表明:较干燥的枯枝落叶层的衰减系数较小,透过率较高,但是随着含水量增大,衰减系数会出现急剧的增加,从而造成透过率骤减;高频波段的衰减系数变化更加迅速,由枯枝落叶层引起的衰减作用更加明显;单次散射反照率 ω 随重量含水量的变化趋势为先升高后降低。该研究有利于理解森林系统中微波辐射传输过程,纠正森林区微波辐射亮温,提高森林下地表参数遥感反演精度。

关 键 词:枯枝落叶层; $\tau-\omega$ 模型;双频段;衰减系数;透过率

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2017)02-0255-07

1 引 言

地球上三分之一的陆地被森林覆盖。森林是地球上规模最大、生态功能最完善的陆地生态系统,对地球系统中的水循环、碳循环、能量循环和生态平衡起着不可替代的作用,是地球生态系统最重要的维系者。森林覆盖下地表参数的变化(例如积雪和土壤湿度),是陆地与大气相互作用的关键参数,对气候变化具有一定的反馈作用^[1-3]。卫星被动微波遥感是获取森林覆盖下地表参数的重要手段^[4-5]。大量实验观测和理论研究也验证了被动微波遥感技术具有监测林下地表参数的能力^[6-9]。

尽管微波具有一定的穿透性,但林下枯枝落叶层会对目标信息的微波遥感探测造成干扰,导致林下地表参数的遥感反演精度不高^[10-12]。Schmugge等^[13]在 Konza 大草原进行航空实验时,发现枯草层的存在会明显提高地表的发射率,特别是湿的情况下更加明显。Saleh等^[14]发现降雨后的草地对水分具有拦截作用,从而使土壤、杂草和植被引起的发射率难以解耦,造成了土壤水分的反演困难。Della Vecchia等^[15]通过对辐射传输模型进行改进,考虑了枯枝落叶和粗糙度的影响,模拟了针叶林 1.4 GHz 的发射率,并利用实测数据进行了验证,结果发现枯枝落叶层对总的发射率的贡献是不容忽视

收稿日期:2016-06-20;修订日期:2017-02-13
基金项目:国家自然科学基金面上项目“集成光学与微波遥感苏打盐碱地盐含量的反演方法研究”(41371345),国家自然科学基金项目“东北地区森林下雪深被动微波遥感反演的关键影响参数观测与研究”(41471289),国家自然科学基金项目“被动微波遥感土壤水分反演精度与空间异质特征的相关性研究”(41301369)。
作者简介:杨建卫(1988—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要从事微波辐射传输理论研究。E-mail:stu_yangjianwei@163.com。
通讯作者:赵 凯(1963—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事微波遥感机理以及仪器研制研究。E-mail:zhaokai@neigae.ac.cn。

的。Grant 等^[16]研究针叶林下枯枝落叶层的水分变化与冠层发射率的关系,发现枯枝落叶层的存在导致冠层发射率很高。Guglielmetti 等^[17]基于零阶辐射传输模型,通过林下灌水实验发现较湿的枯枝落叶对 L 波段亮温影响很大,说明落叶层的存在会影响土壤水分的遥感估算精度。Schwank 等^[18]基于相干辐射传输模型发现当落叶层湿度增加时,辐射计观测到的土壤—落叶层系统 L 波段辐射亮温先随着湿度的增加而增加,到一定程度后随着湿度的增加而降低。Demontoux 等^[19]在实验室通过波导法测量了枯枝落叶层介电常数,发现落叶层介电常数与落叶层重量含水量具有良好的函数关系,结合实测数据发现落叶层重量含水量与土壤体积含水量之间具有线性关系,利用理论模拟表明 3 cm 厚度的落叶层可以让土壤表面发射率增加 0.15,发射率大约增加了 20%。Grant 等^[8]基于 L-MEB 模型对比了土壤、土壤—枯枝落叶层、土壤—草丛的发射率,发现土壤水分敏感性在草丛和枯枝落叶下显著降低。长春净月潭遥感站实验报告指出干燥枯枝落叶层在 18.7 GHz 时的衰减系数小于 36.5 GHz,分别为 0.09 Np/cm 和 0.19 Np/cm,而随着湿度的增加两者都增大^[20]。Kurum 等^[21]利用 L 波段辐射计,基于辐射传输模型发现去除枯枝落叶后,其测量的发射率是降低的,即很薄的枯枝落叶层会增加森林的发射率。André 等^[22]利用超宽波段探地雷达 (GPR) 研究阔叶林区的衰减特性,发现枯枝落叶层在 0.8~4 GHz 波段范围内,雷达信号衰减程度随着频率的增加和落叶厚度的增加而增大,这主要是因为散射和介电损耗。以上关于枯枝落叶层的研究中:①关于枯枝落叶层辐射特性的研究颇少(特别是针对 K 和 Ka 波段),无法完成枯枝落叶介电模型和辐射传输模型的验证;②仅有的研究都是围绕针叶林落叶层开展,有关阔叶林落叶层的研究较少;③大多数研究利用辐射计直接测量枯枝落叶的辐射亮温,然后对比分析了其随含水量的变化,几乎没有关于枯枝落叶层对微波辐射的衰减作用的研究;④以上研究基本都是在森林系统环境中进行测量,使得辐射传输特性受到森林“黑箱”的影响,不容易从根本上认识枯枝落叶层的衰减特性。

本文结合 $\tau-\omega$ 模型,通过严格的理论推导,证明了通过不同厚度的枯枝落叶层亮温计算衰减系数的可行性,然后设计可控测量实验,在开放的环境中利用地基被动微波辐射计 (K 和 Ka) 获取了不同厚度、不同含水量的阔叶林枯枝落叶层双频段亮温值,

在理论和实验设计上计算了其衰减系数,最后定量分析了枯枝落叶层对微波辐射的衰减作用和单次散射反照率 ω ,为林下地表参数反演模型的改进提供了实测数据。了解和定量研究枯枝落叶层微波辐射衰减特性,不但能够提高对复杂森林系统电磁波散射与辐射理论的认识,还将改善因对森林微波辐射传输机理解释不足而导致的林下参数识别精度不高的现状,为高精度探测林下地表参数提供理论支持和数据参考。

2 理论方法

如图 1 所示,辐射计垂直向上观测,根据 $\tau-\omega$ 模型可得样品的微波辐射亮温为:

$$T_{AN} = r_V \cdot T_{SKY} + (1 - \omega) (1 - r_V) \cdot T_0 \quad (1)$$

其中: ω 代表单次散射反照率, T_0 代表枯枝落叶层物理温度, T_{SKY} 代表天空辐射亮温, $r_v = e^{-k_e \cdot d}$ 为透过率, k_e 为消光系数,是衰减系数 k_a 和散射系数 k_s 之和,即, $k_e = k_a + k_s$ 。依据式(1)可得:

$$r_V = \frac{T_A - (1 - \omega) \cdot T_0}{T_{SKY} - (1 - \omega) \cdot T_0} = e^{-k_e \cdot d} \quad (2)$$

假设样品的含水量和几何结构不变,其单次散射反照率不变,依据式(1),进行不同样品厚度 d_1 、 d_2 的测量,可得:

$$T_{A1} = r_{V1} \cdot T_{SKY} + (1 - r_{V1})(1 - \omega) \cdot T_0 \quad (3)$$

$$T_{A2} = r_{V2} \cdot T_{SKY} + (1 - r_{V2})(1 - \omega) \cdot T_0 \quad (4)$$

由式(2)~(4)可得:

$$T_{A1} - T_{A2} = (r_{V1} - r_{V2}) \cdot [T_{SKY} - (1 - \omega) \cdot T_0] \quad (5)$$

同理,进行厚度 d_3 、 d_4 的测量,可得:

$$T_{A3} - T_{A4} = (r_{V3} - r_{V4}) \cdot [T_{SKY} - (1 - \omega) \cdot T_0] \quad (6)$$

比较式(5)、(6)得:

$$\frac{r_{V1} - r_{V2}}{r_{V3} - r_{V4}} = \frac{T_{A1} - T_{A2}}{T_{A3} - T_{A4}} = \frac{e^{-k_e \cdot d_1} - e^{-k_e \cdot d_2}}{e^{-k_e \cdot d_3} - e^{-k_e \cdot d_4}} \quad (7)$$

测量时,取 $d_3 = d_1$ 、 $d_2 = 2d_1$ 、 $d_4 = 3d_1$,则:

$$\begin{aligned} \frac{T_{A1} - T_{A2}}{T_{A3} - T_{A4}} &= \frac{e^{-k_e \cdot d_1} - e^{-2k_e \cdot d_1}}{e^{-k_e \cdot d_1} - e^{-3k_e \cdot d_1}} \\ &= \frac{1 - e^{-k_e \cdot d_1}}{1 - e^{-2k_e \cdot d_1}} = \frac{1}{1 + e^{-2k_e \cdot d_1}} \end{aligned} \quad (8)$$

整理得:

$$\frac{T_{A1} - T_{A2}}{T_{A2} - T_{A4}} = e^{k_e \cdot d_1} \quad (9)$$

则:

$$\ln\left(\frac{T_{A1} - T_{A2}}{T_{A2} - T_{A4}}\right) = k_e \cdot d_1 \quad (10)$$

由上式得:

$$k_e = \frac{\ln\left(\frac{T_{A1} - T_{A2}}{T_{A2} - T_{A4}}\right)}{d_1} \tag{11}$$

由式(3)、(4)变换得:

$$T_{A1} - (1 - \omega) \cdot (1 - r_{V1}) \cdot T_0 = r_{V1} \cdot T_{SKY} \tag{12}$$

$$T_{A2} - (1 - \omega) \cdot (1 - r_{V2}) \cdot T_0 = r_{V2} \cdot T_{SKY} \tag{13}$$

由上两式得:

$$\frac{T_{A1} - (1 - \omega) \cdot (1 - r_{V1}) \cdot T_0}{T_{A2} - (1 - \omega) \cdot (1 - r_{V2}) \cdot T_0} = \frac{r_{V1}}{r_{V2}} \tag{14}$$

整理得:

$$1 - \omega = \frac{T_{A1} \cdot r_{V2} - T_{V2} \cdot r_{V1}}{(r_{V2} - r_{V1}) \cdot T_0} \tag{15}$$

由上式即可求得单次散射反照率 ω 。因 $1 - \omega = k_a/k_e$,由此可以得到介质的衰减系数 k_a 。

通过以上推导和证明可以看出:如果已知 3 个厚度(d_1 、 $2d_1$ 、 $3d_1$) 枯枝落叶层的亮温值,则可以得到消光系数和衰减系数,也就能计算得到透过率。以上理论是实验设计的依据和指导。

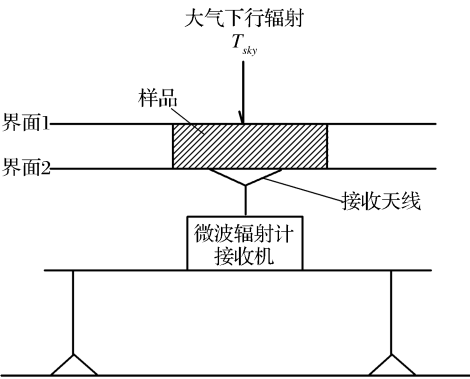


图 1 $\tau-\omega$ 模型辐射传输示意图

Fig.1 Radiative transfer sketch of $\tau-\omega$ model

3 实 验

实验选在中科院东北地理与农业生态研究所净月潭遥感试验站进行,该地建有标准测试场,以及齐全的观测设备,可以用来深入开展可控实验,同时具有大面积的落叶阔叶林—杨树。2016 年 4 月 27 日~5 月 3 日,天气晴,微风,最高气温 23℃,最低气温 14℃。依据第 2 节的理论推导,利用 Ka 和 K 波段辐射计获取了枯枝落叶层 3 个厚度下不同含水量的亮温值。

3.1 样本准备

在地势平坦的杨树林区采集枯枝落叶,然后通过实验室烘干称重(65℃,72h),其原始状态重量含水量为 3.60%,密度为 14.34kg.m⁻³,厚度为 5cm,

占空比为 1.02%。其中,重量含水量表达式为:

$$wmc = \frac{W_w}{W_t} \times 100\%$$

其中: W_w 和 W_t 分别表示水的重量和枯枝落叶混合物总重量。占空比计算公式为:

$$v = \frac{N \times V_s}{V_{total}} \times 100\%$$

其中: N 代表叶子的个数, V_s 代表单片叶子的体积, V_{total} 表示枯枝落叶混合物总的体积。

3.2 实验设备

样品装置是由聚四氟乙烯材料(底部)和亚克力板(四周)组成,长宽高分别为 50cm×50cm×20cm,能够满足 K 和 Ka 微波辐射计的视场范围。聚四氟乙烯材料介电损耗非常小,其介电常数约为 2.45,则根据菲涅耳公式计算得到其透过率为 95.7%,并最终进行了亮温修正。

试验仪器以 K 和 Ka 波段辐射计为主,展开不同含水量、不同厚度的枯枝落叶层亮温测量实验,仪器的主要参数表 1 所示。

表 1 辐射计基本参数

Table 1 Basic parameters of radiometers		
波段	Ka	K
中心频率/GHz	36.5	18.7
带宽/MHz	400	400
灵敏度/K	0.15	0.15
精度/K	2	2
波束角/°	15	15

3.3 试验步骤

根据之前的理论推导,只要获取 3 个厚度的枯枝落叶层亮温值,就可以计算得到衰减系数和透过率。为了分析不同重量含水量下的衰减系数和透过率,因此实验中需要对不同厚度、不同含水量枯枝落叶层进行辐射测量。

(1)首先将采集回的样品放进标准样品装置中,然后利用辐射计进行枯枝落叶层原始状态的辐射亮温测量。

(2)使用喷壶定量洒水,然后人工搅拌均匀,静置 30 min,最终称重确定的重量含水量,逐次完成不同含水量的枯枝落叶层亮温观测;注意由于该实验中含水量通过喷壶控制,考虑到截留水和落叶本身水分的介电特性不同而引起微波辐射的差异,为此实验前进行了落叶的吸水实验,发现:在 6 h 内其吸水率约为 4.22%,2 h 内为 1.21%,即吸水特性

很差,所以主要考虑的是截留水的微波辐射特性。

(3)继续进行其他厚度、含水量的枯枝落叶层亮温测量。

实验过程中,其测量的重量含水量、占空比和厚度参数如表 2 所示。

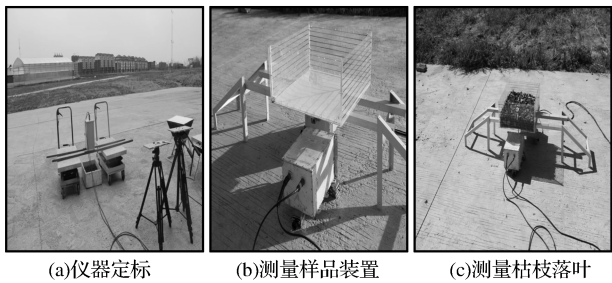


图 2 枯枝落叶层亮温测量实验

Fig.2 Brightness temperature of litter layer

表 2 枯枝落叶基本参数

Table 2 Basic parameters of litter

波段	重量含水量/%	枯枝落叶占空比/%	厚度/cm
Ka	3.60	1.02	5、10、15
	14.20	1.34	
	27.70	1.42	
	34.70	1.60	
	46.60	1.71	
	57.50	1.85	
	63.80	1.85	
K	7.60	0.72	5、10、15
	19.70	0.77	
	33.20	0.80	
	53.40	0.97	
	67.70	1.16	

4 结果分析

根据推导的理论方法,计算得到衰减系数和透过率。图 3(a)表示枯枝落叶层的衰减系数随重量含水量的变化:衰减系数随含水量增大呈指数型上升,当含水量超过 20%时,衰减系数急剧增加,这主要随着含水量的增大,其介电常数增大,从而引起介电损耗的增大;但是当含水量特别大时(超过 53.4%),辐射计接收的亮温主要为水的辐射特性,即不同的厚度、相同的含水量下的枯枝落叶层的亮温变化不大,此时计算的衰减系数不再适用。图 3(b)表示透过率随厚度、重量含水量的变化:厚度越大,透过率越小;相同的厚度,含水量越大,透过率越低;含水量超过 20%时,透过率急剧下降,这主要是含水量增大引起消光系数的急剧增加,从而导

致透过率的急剧下降;当含水量较高时,透过率随厚度变化不明显,主要是高含水量,高介电损耗导致微波辐射的强衰减所致。

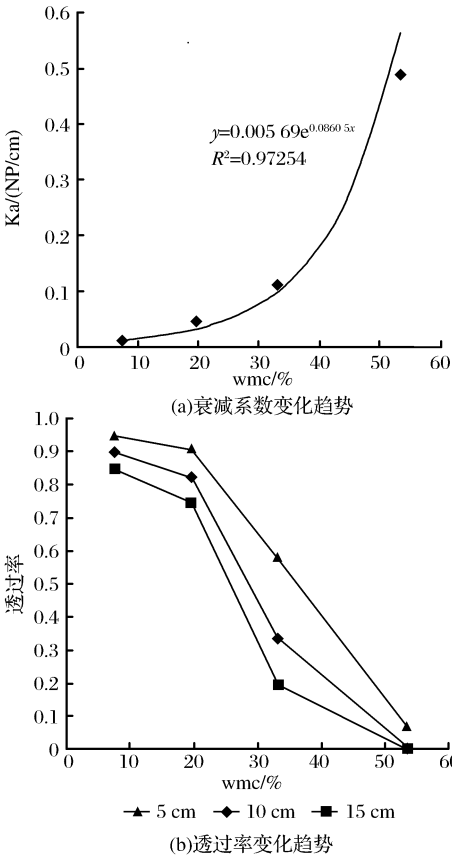


图 3 K 波段衰减系数和透过率

Fig.3 The attenuation coefficient and transmission of K-band

图 4(a)为 Ka 波段枯枝落叶层的衰减系数随含水量的变化:衰减系数随含水量增大呈指数型上升,当含水量超过 15%时,衰减系数急剧增加,这主要随着含水量的增大,其介电常数增大,从而引起介电损耗的增大,同时由于 Ka 波段频率较高,其介电常数对水更加敏感;当含水量超过 35%时,此时的亮温主要受水高介电损耗影响,即亮温值不再变化,所以计算的衰减系数不再适用。图 4(b)表示透过率随厚度、重量含水量的变化:厚度越大,透过率越小;相同的厚度,含水量越大,透过率越低;含水量超过 15%时,透过率急剧下降,这主要是含水量增大引起消光系数的急剧增加,从而导致透过率的急剧下降;当含水量较高时,透过率随厚度变化不明显,主要是高含水量,高介电损耗同样导致了 Ka 波段微波辐射的强衰减。

由于频率对介电常数的变化很敏感,从而导致衰减系数的变化,因此图 5 比较了两个频段的衰减系数以及变化速率。图 5(a)表示两个频段的枯枝落叶层衰减系数随含水量的变化:频率越高,衰减系

数越大,这主要是介电常数与频率紧密相关;频率越高,对水的敏感性越强,即衰减系数较早出现急剧上升的现象。图 5(b)表示了衰减系数随含水量的变化率,可以看出:高频波段的衰减系数变化率始终比低频波段要高,这主要是高频率对水更加敏感,而且随着含水量的增加,两个频段的变化率差异越来越大。但是根据理论可以得知:当含水量足够大时,两个频段的辐射特性都主要受水的强介电损耗影响,即相同的含水量会导致相近或相同的衰减系数。

量低于 28% 时, Ka 波段的单次散射反照率明显的高于 K 波段,说明散射效应明显,当含水量高于 28% 时,由于高频较低频的衰减效应强烈,从而出现了相反的现象,即 Ka 波段的 ω 低于 K 波段。

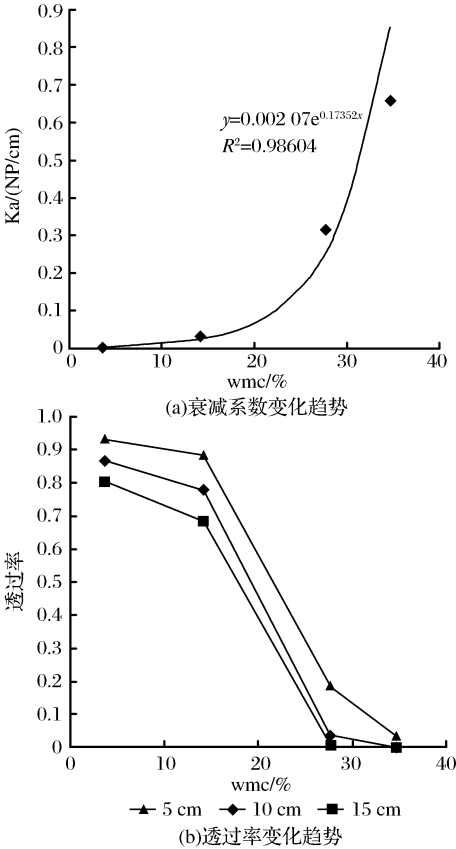


图 4 Ka 波段衰减系数和透过率

Fig.4 The attenuation coefficient and transmission of Ka-band

图 6 给出了 Ka 和 K 波段的单次散射反照率 ω 随重量含水量的变化。可以看出:两个波段的 ω 都介于 0.05~0.22 之间;当含水量很低时,其 ω 都相对较小,这主要是干燥的枯枝落叶介电常数与空气介电常数相近,从而引起的散射较小;随着含水量的增加,其介电差异导致 ω 增加,当含水量达到一定值,其 ω 达到了最大,例如 Ka 和 K 波段分别在重量含水量为 19.7% 和 33.2% 时 ω 达到最大值 0.22 和 0.21;但是当含水量分别大于 19.7% 和 33.2% 时,其单次散射反照率逐渐下降,这主要是高含水量,高介电损耗导致的强衰减所致,即散射效应降低;当含水

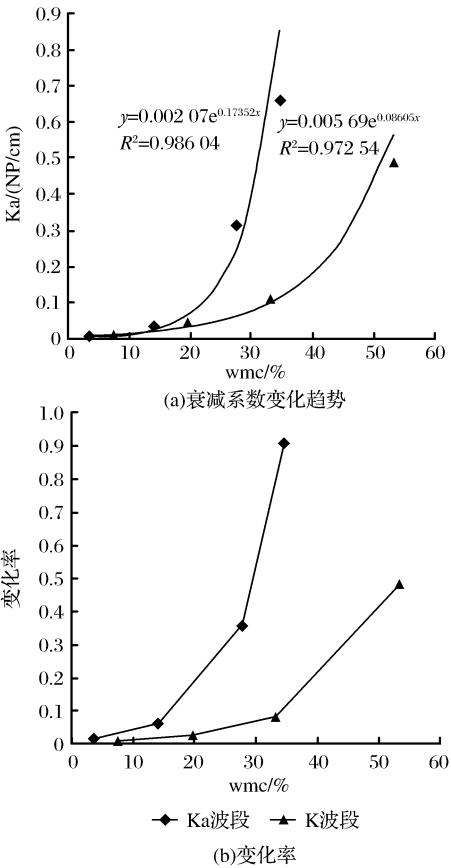


图 5 双频段衰减系数以及变化率比较

Fig.5 Comparison of the attenuation coefficient and transmission

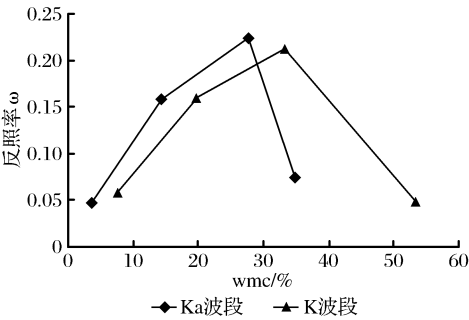


图 6 双频段单次散射反照率 ω 比较

Fig.6 Comparison of the single scattering albedo ω

5 结 语

本文结合经典的 τ - ω 模型,从理论上证明了利用不同厚度下枯枝落叶层亮温值计算衰减系数的可行性。然后基于该理论设计可控实验,利用双频段微波辐射计获取了不同厚度、不同重量含水量下的

枯枝落叶层亮温值,最后定量分析了枯枝落叶层的衰减系数和透过率变化;较干燥的枯枝落叶层的衰减系数较小,透过率较高,但是随着含水量增大,衰减系数会出现急剧的增加,从而造成透过率很低;高频波段的衰减系数变化更加迅速,由枯枝落叶层引起的衰减作用更加明显。Ka 和 K 波段的单次散射反照率随含水量的变化范围大约为 0.05~0.22 之间。随着含水量的增加,其变化趋势为开口向下的抛物线形式,即含水量低和含水量较高时,其 ω 均较小,而中间某个含水量时最高,例如 Ka 和 K 波段分别在 19.7% 和 33.2% 时 ω 达到最大值 0.22 和 0.21。基于 τ - ω 模型提出的枯枝落叶层衰减系数计算方法具有以下优点:①具有坚实的理论基础和可靠的实验设计,解决了定量分析衰减特性的难题;②可以得到多个参数,例如消光系数、衰减系数、单次散射反照率以及透过率等,同时明确了散射和吸收引起的消光作用;③在计算消光系数时,通过不同厚度的亮温差做商,从而消减了定标带来的误差,提高了数据的精度。但是在数据分析过程中发现该实验方法具有一定的局限性,主要表现在:①对于较湿的枯枝落叶层,该方法不能用来计算衰减系数,这主要是含水量高,辐射计接收的亮温主要为水的辐射特性,此时的亮温值变化不大或由于散射作用存在一定的起伏,对于非常干燥的枯枝落叶层,其定标方程存在非线性关系,此时计算的亮温值可能存在一定的偏差,从而导致衰减系数的变化,实验中对双频段进行了多个含水量的观测,但是 Ka 和 K 波段的使用范围分别为 3.7%~34.7% 和 7.6%~53.4%,其双频段适用范围存在差异主要是高频对水更加敏感;②实验中假设样品的含水量和几何结构不变,实际上改变厚度时势必会造成几何结构的改变,从而引起单次散射反照率的变化,曾试图在森林中进行非破坏性取样,保持其原始状态,但是发现很难,操作性不强。此次实验是冬季实验的基础,目前主要是研究枯枝落叶层衰减特性与含水量的关系,冬季时我们将针对落叶中水分冻结时的辐射特性继续进行实验。因为冰的介电常数是已知的,微波辐射穿过枯枝落叶层时主要表现为散射特性,此时的衰减特性不再占主导作用,这又是另一种情况。

下一步的研究工作将继续通过此理论方法推导出枯枝落叶层表面反射率,然后结合菲涅耳反射定律获取不同含水量下的介电常数,研究枯枝落叶层的介电特性,并发展其介电模型,从而确定枯枝落叶层的固有特性;同时,继续改进实验的方法,利用

多频段微波辐射计(1.4、18.7、36.5 GHz)观测土壤—枯枝落叶层系统的亮温,最终把枯枝落叶层集成到积雪模型(例如 MEMLS 模型)或土壤水分模型(例如 τ - ω 模型)下垫面描述中,为构建“地表参数—森林”微波辐射模型奠定基础,最终实现林下地表参数反演精度的提高。

参考文献(References):

- [1] Peñuelas J, Rutishauser T, Fiella I. Ecology. Phenology Feedbacks on Climate Change[J]. Science, 2009, 324(5929): 887-893.
- [2] McMahon S M, Schlesinger W H. Evidence for A Recent Increase in Forest Growth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(107): 3611-3615.
- [3] Lawrence H. Modelling the Effects of Surface Roughness and A Forest Litter Layer on Passive Microwave Observations: Application to Soil Moisture Retrieval by the SMOS Mission [J]. 2010.
- [4] Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J P, et al. Soil Moisture Retrieval from Space: the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Mission [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(8): 1729-1735.
- [5] Woodhouse I H. Introduction to Microwave Remote Sensing [M]. Beijing: Science Press, 2014. [Woodhouse I H 著;董晓龙,徐星欧,徐曦煜译.微波遥感导论[M].北京:科学出版社,2014.]
- [6] Chang A T C, Rango A. Algorithm Theoretic Basis Document (ATBD) for the AMSR-E Snow Water Equivalent Algorithm, Version 3.0 [R]. NASA, 1999.
- [7] Foster J L, Sun C, Walker J P, et al. Quantifying the Uncertainty in Passive Microwave Snow Water Equivalent Observations [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(2): 187-203.
- [8] Grant J P, Van d G A A, Schwank M, et al. Observations and Modeling of a Pine Forest Floor at L-band [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(7): 2024-2034.
- [9] Shi Jiancheng, Du Yang, Du Jingyang, et al. Progresses on Microwave Remote Sensing of Land Surface Parameters [J]. Science China: Earth Science, 2012, 42(6): 814-842. [施建成, 杜阳, 杜今阳, 等.微波遥感地表参数反演进展[J].中国科学:地球科学, 2012, 42(6): 814-842.]
- [10] Jackson T J, Schmugge T J. Vegetation Effects on the Microwave Emission of Soils [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 36(3): 203-212.
- [11] Paloscia S, Macelloni G, Pampaloni P, et al. Airborne Multi-frequency L- To Ka-Band Radiometric Measurements over Forests [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2507-2513.
- [12] Lang R H, Utku C, de Matthaeis P, et al. ESTAR and Model Brightness Temperatures over Forests: Effects of Soil Moisture [J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001, 3(5): 1300-1302.
- [13] Schmugge T J, Wang J R, Asrar G. Results from the Push

- Broom Microwave Radiometer Flights over the Konza Prairie in 1985 [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(5): 590-596.
- [14] Saleh K, Wigneron J P, Rosnay P D, *et al.* Semi-empirical Regressions at L-band Applied to Surface Soil Moisture Retrievals over Grass [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 101(3): 415-426.
- [15] Della Vecchia A, Ferrazzoli P, Wigneron J P, *et al.* Modeling Forest Emissivity at L-band and a Comparison With Multi-temporal Measurements [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(4): 508-512.
- [16] Grant J, Wigneron P, *et al.* A Field Experiment on Microwave Forest Radiometry: L-band Signal Behaviour for Varying Conditions of Surface Wetness [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 109(1): 10-19.
- [17] Guglielmetti M, Schwank M, Matzler C, *et al.* FOSMEX: Forest Soil Moisture Experiments with Microwave Radiometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(3): 727-735.
- [18] Schwank M, Guglielmetti M, Matzler C, *et al.* Testing a New Model for the L-band Radiation of Moist Leaf Litter [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(7): 1982-1994.
- [19] Zhang S, Hou L, Sun T. Electromagnetic Characterization of Soil-Litter Media: Application to the Simulation of the Microwave Emissivity of the Ground Surface in Forests [J]. European Physical Journal Applied Physics, 2008, 44(3): 303-315.
- [20] Changchun Jingyuetan Remote Sensing Experiment Station, Chinese Academy of Science. Snow Ground-based Remote Sensing Experiment Report in 2010, <http://jyrs.iga.cas.cn/>, 2010, 2016. [DB/OL]. [中国科学院东北地理与农业生态研究所所长春净月潭遥感试验站. 2010 年积雪地基遥感实验报告 [DB/OL]. <http://jyrs.iga.cas.cn/>, 2010, 2016.]
- [21] Kurum M, O'Neill P E, Lang R H, *et al.* Impact of Conifer Forest Litter on Microwave Emission at L-band [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(4): 1071-1084.
- [22] Andre F, Jonard M, Lambot S. Non-Invasive Forest Litter Characterization Using Full-wave Inversion of Microwave Radar Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(2): 828-840.

Research and Analysis on Dual-band Microwave Radiative Attenuation Properties of Forests Litter

Yang Jianwei^{1,2}, Zhao Kai^{1,3}, Li Xiaofeng^{1,3},
Zheng Xingming^{1,3}, Jiang Tao^{1,3}, Li Lei^{1,4}

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Changchun Jingyuetan Remote Sensing Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China*; 4. *Faculty of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China*)

Abstract: The litter layer can attenuate microwave radiation from the soil, reduce the sensitivity of the brightness temperature of the microwave radiation to the surface parameter variation, which lead to poorer inversion accuracy. In order to study attenuation characteristics of litter quantitatively, it firstly proves the feasibility of using the different thickness' bright temperature to calculate the attenuation coefficient, which is based on τ - ω model. Secondly it designs controlled experiment to obtain the bright temperature of dual band (18.7 GHz and 36.5 GHz) under the different thickness and weight moisture content of litter layer. Then it analyses the process of attenuation coefficient of litter with different weight water content and studies the transmission of litter under different thickness and weight moisture content based on extinction coefficient. Conclusions include: (1) the extinction coefficient is very small, but transmission is high when the litter is dry and the extinction coefficient will increase dramatically with increasing water moisture content; (2) the extinction coefficient of high frequency changes more rapidly than low frequency. Lastly, it discusses the limitations and applicable conditions of the proposed method.

Key words: Litter; τ - ω model; Dual band; Attenuation coefficient; Transmissivity