

文章编号: 1007-4619 (2000) 04-0256-05

# 面目标微波辐射特性实验模型

李青侠, 张祖荫, 郭伟, 文光华

(华中理工大学 电子与信息工程系 图像识别与人工智能研究所, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 提出了一种面目标微波辐射特性实验模型(经验公式)的建立方法:由测得目标的天线温度经反演得到目标的视在温度、剔除天空引起的散射辐射温度后得到目标的亮度温度,再对亮度温度数据进行最小二乘拟合得到亮度温度的经验公式。用该方法建立的水面亮度温度的实验模型与水面亮度温度的半经验公式(理论模型)相比较,结果显示在测量所覆盖的水面表面温度范围(4—35℃)和测量角度 20°—65°内,两者很接近。并给出了用该方法建立的混凝土路、沥青路和碎石路的微波辐射特性实验模型。

**关键词:** 面目标;微波辐射特性;亮度温度;实验模型

**中图分类号:** TP722.6 **文献标识码:** A

## 1 引言

面目标是指其尺寸远大于波长平面的目标,例如陆地、水、天空等。不同的目标其微波辐射不同,各具其自身的特性。利用这些特性可以区别不同的目标,这是无源微波遥感、制导的基本原理。要研究无源微波遥感、制导技术及应用,必须研究目标的微波辐射特性。面目标的微波辐射特性用其亮度温度  $T_B(\theta, \varphi)$  表征。不同的目标其亮度温度不一样;同一目标在不同的状态下或具有不同的物理参数,其亮度温度也不同。本文用实验的方法研究面目标亮度温度的特征和规律,即面目标的微波辐射特性。

为了向中国的无源微波遥感提供基础数据,华中理工大学微波遥感研究室在1982年至1983年对7种典型地物目标(混凝土路、沥青路、黄土、草地、水面、碎石路、丛树林)及天空进行了大量的野外测试。为了进一步开展微波辐射特性的研究工作,在华中理工大学建立了微波辐射特性测试场<sup>[1]</sup>。此场于1993年11月建成。1994年3月通过鉴定,正式投入使用。微波辐射特性测试场内设有典型地物目标7个(混凝土路、沥青路、黄土、草地、水、碎石路、植被(水稻或小麦),且目标可更换),每个目标满足20°—80°的测量要求;自动测量设备一套,其中的辐

射计架设高度2.2 m,保证天线口面到被测目标表面的距离大于远场区距离;气象设备一套。

本文提出的面目标微波辐射特性实验模型的建立方法包括如下步骤:(1)由目标的天线温度反演出目标的视在温度;(2)从目标的视在温度中剔除天空引起的散射辐射温度得到目标的亮度温度;(3)对目标的亮度温度数据进行二维拟合得到目标的亮度温度的经验公式(即实验模型)。

## 2 辐射特性测量原理

图1为地面目标的微波辐射特性测试的示意图,辐射计离地面的高度为  $H$ 。采用水平分层的大气模型<sup>[2,3]</sup>,在方向  $(\theta, \varphi)$  上辐射计观测到的视在温度

$$T_{AP}(\theta, \varphi; H; p) = \frac{1}{L_a(\theta; H)} [T_B(\theta, \varphi; p) + T_{sc}(\theta, \varphi; p)] + T_{UP}(\theta; H) \quad (1)$$

其中,  $L_a(\theta; H)$  为被测地物到天线的传输路径上大气的损耗因子;  $T_B(\theta, \varphi; p)$  为地物在  $(\theta, \varphi)$  方向的  $p$  极化亮度温度;  $T_{sc}(\theta, \varphi; p)$  为地物在  $(\theta, \varphi)$  方向的  $p$  极化散射辐射温度;  $T_{UP}(\theta; H)$  为天线接收到的大气向上辐射的视在温度。由于采用水平分层的大气模型,大气向上辐射的视在温度与方向  $\varphi$  无关。在地面进行测量时,天线与被测目标之间的距离在

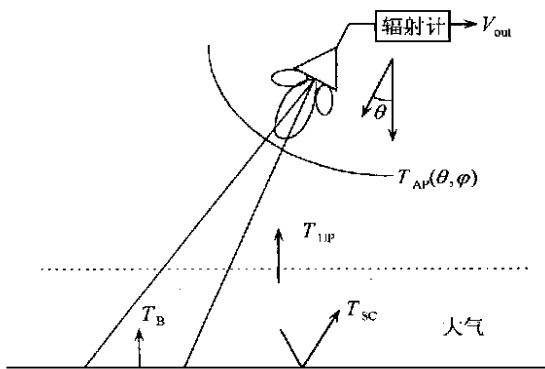


图 1 微波辐射特性测量示意图

Fig. 1 Illustration of measurement for microwave radiometric characteristics of terrain targets

几米到几十米之间，大气向上辐射的视在温度和大气对辐射的衰减作用均可忽略，因而式(1)可简化为

$$T_{AP}(\theta, \varphi; H; p) = T_B(\theta, \varphi; p) + T_{SC}(\theta, \varphi; p) \quad (2)$$

式中，天空引起的散射辐射温度

$$T_{SC}(\theta, \varphi; p) = \Gamma(\theta, \varphi; p) T_{DN}(\theta, \varphi; p) \quad (3)$$

$\Gamma(\theta, \varphi; p)$  为目标的反射系数， $T_{DN}(\theta, \varphi; p)$  为大气向下辐射的视在温度。

处在  $T_{AP}(\theta, \varphi)$  分布中的无耗天线的天线温度为

$$T_A(\theta, \varphi) = \frac{\iint_{4\pi} T_{AP}(\theta, \varphi) F_n(\theta, \varphi) d\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (4)$$

式中， $F_n(\theta, \varphi)$  为天线的归一化方向图。

若有耗天线的辐射效率为  $\eta_l$ ，物理温度为  $T_0$ ，则其天线温度为

$$T'_A = \eta_l T_A + (1 - \eta_l) T_0 \quad (5)$$

辐射计定标后就得出定标方程

$$V_{out} = aT_A + b \quad (6)$$

将辐射计天线对准目标，根据式(5)、(6)，由辐射计的输出  $V_{out}$  可得到  $T_A$ ；对积分方程(4)进行反演<sup>[2,4,5]</sup>得  $T_{AP}$ ；由式(2)从  $T_{AP}$  中剔除天空引起的散射辐射温度可得到目标的亮度温度<sup>[2]</sup>  $T_B$ 。

### 3 测量内容

1994 年 1 月—1995 年 9 月在华中理工大学微波辐射特性测试场<sup>[1]</sup>内，对 8 种典型面目标，每周测量 1—2 天，一天测量 3 次(上午、下午、晚上各一次)，每次测量均得到 8 个目标在不同的条件下的天线温度数据，共得到 168 次有效测量数据(对每一个

目标)。测量内容为：

**测量输出** 不同的条件下的天线温度。

**记录条件参数：**

- (1) 测量目标(8 个)，天空、混凝土路、沥青路、黄土、草地、水面、碎石路、植被(水稻或小麦)；
- (2) 极化，每个目标都测平行极化和垂直极化(天空除外)；
- (3) 角度，天空  $0^\circ - 90^\circ$ ，其它目标  $20^\circ - 85^\circ$ ；
- (4) 天气类型(如晴、阴、雾等)；
- (5) 目标的表面物理温度；
- (6) 大气温度；
- (7) 大气湿度；
- (8) 大气压；
- (9) 风速、风向。

测量过程由计算机自动控制，测量数据由计算机自动采集，存入磁盘中。每次测量完毕后打印数据表格一张。为了保证测量数据可靠，每周对辐射计定标一次。

### 4 数据处理

为了得到目标的亮度温度的经验公式(即实验模型)，需进行以下数据处理：

(1) 根据式(5)、(6)，从辐射计输出  $V_{out}$  得出天线温度  $T_A$ ；

(2) 对积分方程(4)进行反演得到视在温度  $T_{AP}$ ；

(3) 由式(2)从  $T_{AP}$  中剔除天空引起的散射辐射温度得到目标的亮度温度  $T_B$ ；

(4) 对亮度温度数据  $T_B$  进行二维拟合，得到亮度温度  $T_B$  的经验公式；

其中，由  $T_A$  得到  $T_B$ (或  $T_{AP}$ )的过程称为反演(或恢复)。

#### 4.1 从天线温度数据中反演视在温度

若对目标进行一维扫描，则式(3)可简化为<sup>[2]</sup>：

$$T_A(\varphi_0) = \int_0^{2\pi} T_{AP}(\varphi' + \varphi_0) G(\varphi') d\varphi' \quad (7)$$

式中

$$G(\varphi') = \frac{F_n(\varphi')}{\int_0^{2\pi} F_n(\varphi') d\varphi'} \quad (8)$$

被定义为天线的归一化增益函数。

将式(7)两端取傅氏变换、移项得：

$$T_{AP}(\omega) = \frac{T_A(\omega)}{G^*(\omega)} \quad (9)$$

测量用辐射计天线的  $G(\omega)$  的幅频特性示于图 2(a)中(虚线)。从图中可以看出， $G(\omega)$  的高频分量非常低，由于测得的  $T_{AP}(\omega)$  中包含的测量误差有一

定的值,因而由式(9)得到的  $T_{AP}(\omega)$ ,其高频分量将非常高。取反傅氏变换得到的视在温度将出现甚大的高频振荡。为了反演出稳定的视在温度, Holmes 利用傅氏变换提出了递推恢复近似反演法<sup>[4]</sup>。这种方法中的恢复次数只能是整数。但对于某些测量误

差,介于整数间的非整数次恢复,反演效果会更好。

既然  $G(\omega)$  的高频分量低是引起振荡的原因,那么将  $G(\omega)$  的高频分量提升是否可以反演出稳定的  $T_{AP}$  呢? 是否会引入大的误差呢?

图2(b)是用图2(a)中高频提升后的  $G(\omega)$  (实

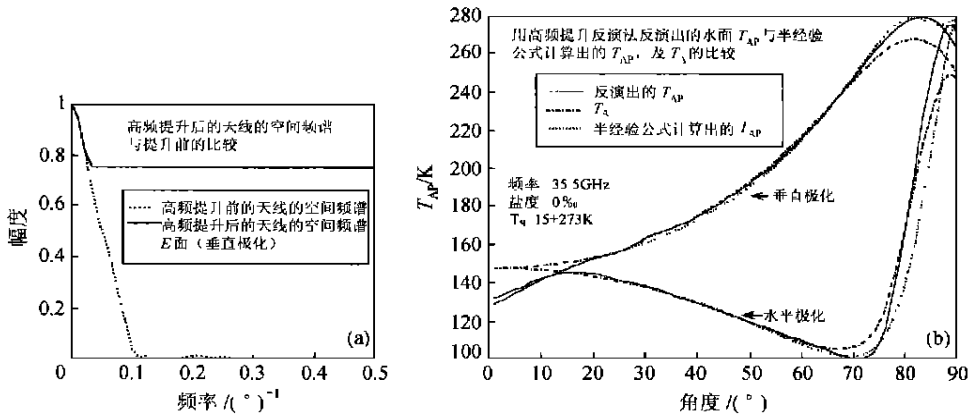


图 2 天线方向图的幅频特性及反演出的视在温度

(a)  $G(\omega)$  的幅频特性,虚线是其原来的特性,实线为高频提升后的特性;(b) 是用(a)中高频提升后的  $G(\omega)$  反演出的视在温度的结果

Fig. 2 Magnitude spectrum of antenna pattern and inverted apparent temperature

线)反演出的  $T_{AP}$  的结果。从图中可以看出将  $G(\omega)$  的高频幅度设置为 0.75 时,反演出的  $T_{AP}$  与半经验公式计算的结果非常接近,证明该方法是有用的。该方法中的天线方向图高频提升的幅度可以根据天线温度的测量误差调整,从而可以在保证不出现振荡的条件下得到尽可能好的反演结果。

作者称此反演方法为视在温度的天线方向图高频提升反演法(HFR, High-Frequency-Raised)。

#### 4.2 从 $T_{AP}$ 中剔除 $T_{SC}$ 得到目标的亮度温度 $T_B$

将(2)式重写如下:

$$T_{AP} = T_B + \Gamma T_{DN} \quad (2)$$

测量中,天空作为一个目标,其向下的辐射  $T_{DN}$  每次均被测得。若能求得反射系数,则可从上式中求得亮度温度。

目标的亮度温度与物理温度之间有如下关系

$$T_B = (1 - \Gamma) T_S \quad (10)$$

式中,  $T_B$  为目标的亮度温度,  $\Gamma$  为目标表面的功率反射系数,  $T_S$  为目标的表面物理温度。

将此式代入(2)式,得目标表面的功率反射系数,再代入式(2)得到

$$T_B = T_{AP} \frac{T_S - T_{DN}}{T_S - T_{DN}} \quad (11)$$

图 3 给出了恢复出的水面亮度温度经拟合得到

的经验公式与半经验公式(理论模型)<sup>[2,6]</sup> 计算出的水面亮度温度的比较。从图 3 中可以看出,在  $65^\circ - 85^\circ$  的范围内两者相差很大。可以断定这误差主要是在式(11)的计算中引入的,因为反演出的视在温度与半经验公式计算出的水面视在温度很接近,且拟合曲线与亮度温度数据很接近。 $T_S$ ,  $T_{AP}$ ,  $T_{DN}$  中均含有测量误差,在式(11)的计算中这些误差传播放大,造成恢复的亮度温度在  $65^\circ - 85^\circ$  的范围内误差很大。这一过程中所引起的误差决定了恢复出的亮度温度的误差水平。

#### 4.3 亮度温度 $T_B$ 数据的二维最小二乘拟合

拟合(或回归)是常用的由数据得到经验公式的方法<sup>[7]</sup>。经过比较,我们发现选用如下的二元多项式来拟合水面亮度温度数据是适合的。

$$P(\theta, T_S) = U(\theta) \cdot A \cdot V(T_S) \quad (12)$$

其中

$$U(\theta) = (1 \quad \cos(\theta) \quad \cos^2(\theta) \quad \cos^3(\theta) \quad \cos^4(\theta)),$$

$$V(T_S) = \begin{pmatrix} 1 \\ T_S \\ T_S^2 \end{pmatrix}$$

$\theta$  为测量角度,  $T_S$  为目标的表面物理温度,系数矩阵  $A$  是  $5 \times 3$  的矩阵。根据最小二乘原理可求得系数矩阵  $A$ 。

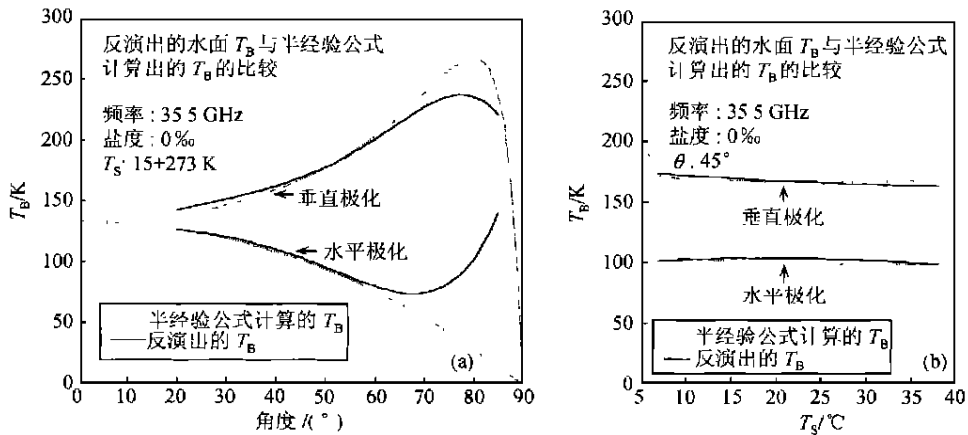


图 3 恢复出的水面亮度温度的经验公式(实验模型)与半经验公式(理论模型)计算出的水面亮度温度的比较

(a) 水面亮度温度与测量角度关系图;(b) 水面亮度温度与其表面物理温度的关系图

Fig. 3 Comparison of water brightness temperature calculated by empirical formula of inverted brightness temperature with that by semi-empirical formula (theoretical model)

图 3 给出了恢复出的水面亮度温度的经验公式(实验模型)与半经验公式(理论模型)<sup>[2,6]</sup>计算出的水面亮度温度的比较。从图 3 中可以看出,在测量所覆盖的表面温度范围和  $20^\circ - 65^\circ$  测量角范围内两者比较一致。证明实验模型在此范围内是有效的;同时也说明建立此实验模型的方法亦是有效的。

### 5 实验模型

我们对 8 个目标分别建立了其亮度温度  $T_B$  与

测量角度  $\theta$ 、表面温度  $T_s$  关系的经验公式(实验模型)。其中混凝土路、沥青路、碎石路这 3 种目标组成成分及结构比较稳定,亮度温度与测量角度、表面温度关系的表达式能较好地反映其特征。在此给出在晴天条件下这 3 种目标的经验表达式。表达式为式(12)的形式。对不同的目标或同一目标在不同的条件下,系数矩阵  $A$  不一样。各目标在晴天条件下的  $A$  分别为:

碎石路 A				混凝土路 A				沥青路 A			
水平极化		垂直极化		水平极化		垂直极化		水平极化		垂直极化	
209.14	-0.090672	210.85	0.093093	231.81	0.062709	208.68	0.91029	241.79	-0.43751	222.8	0.38818
-170	5.8533	91.327	2.5601	-1127	12.916	129.35	1.6622	-964.51	14.64	91.4	2.9572
997.91	-19.522	116.74	-10.127	3862	-42.911	321.82	-8.3151	3118.6	-48.613	268.18	-7.485
-1447.9	26.642	-420.26	17.029	-4617.1	52.928	-959.64	12.518	-3557.1	61.354	-768.32	7.9257
670.46	-12.466	259.51	-9.1689	1897.4	-22.357	542.73	-5.9476	1405.3	-26.409	429.87	-2.9462

### 6 结论

将本文提出的天线方向图高频提升反演法用于从测得的水面天线温度反演水面的视在温度,其结果与用半经验公式(理论模型)计算的水面视在温度的结果一致,证明该方法是有效的。该方法中的天线方向图高频提升的幅度可以根据天线温度的测量误差调整,从而可以在保证不出现振荡的条件下得到尽可能好的反演结果。

本文提出了面目标辐射特性实验模型(经验公

式)的建立方法:由测得的目标的天线温度经反演得到目标的视在温度、剔除天空引起的散射辐射温度后得到目标的亮度温度,再对亮度温度数据进行最小二乘拟合得到亮度温度的经验公式。用该方法建立的水面亮度温度的实验模型与水面亮度温度的半经验公式相比较,结果显示在测量所覆盖的水面表面温度范围( $4 - 35^\circ C$ )和测量角度  $20^\circ - 65^\circ$  内,两者很接近。因此可以相信用此方法建立的混凝土路、沥青路、碎石路(和其它目标)的亮度温度的经验公式在测量所覆盖的目标表面温度范围( $6 - 46^\circ C$ )和测量角度  $20^\circ - 65^\circ$  内是有效的。而且可以相信这些

目标的亮度温度经验公式的有效范围比测量角度 $20^{\circ}$ — $65^{\circ}$ 大。因为在恢复目标的亮度温度的过程中,剔除天空引起的散射辐射温度的误差是决定性的;而水面的反射系数比其它的目标都大,其天线温度受天空引起的散射辐射温度的影响也最大,恢复过程中引起的误差也最大;其它目标的反射系数相对较小,其天线温度受天空引起的散射辐射温度的影响相对较小,恢复目标亮度温度的过程中引起的误差也相对较小,因而其亮度温度经验公式的有效范围会宽一些。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Wen Guanghua, Zhang Zuyin, Guo Wei, Li Qingxia. Design of Measurement Field for Microwave Radiometric Characteristics [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1995, **23**(8): 117—120. [文光华, 张祖荫, 郭伟, 李青侠. 微波辐射特性测试场的设计 [J]. 华中理工大学学报, 1995, **23**(8): 117—120.]
- [2] Zhang Zuyin, Lin Shijie. *Microwave Radiometry Techniques and Application* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1994. [张祖荫, 林士杰. 微波辐射测量技术及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1994.]
- [3] Ulaby, F. T. Moore, R. K. Fung, A. K. *Microwave remote sensing*, vol. 1 [M]. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1981.
- [4] Holmes, J. J. Balanis, C. A. Truman, W. M. Application of Fourier transforms for microwave radiometric inversion [J]. *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, 1975, **23**: 797—806.
- [5] Truman, W. M. Balanis, C. A. Holmes, J. J. Three-dimension vector modeling and restoration of finite wave tank radiometric measurements [J]. *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, 1977, **25**: 95—104.
- [6] Li Qingxia. The Error of Brightness Temperature of Sea Water Caused by the Error of Dielectric Constant [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1997, **18**(12): 2369—2373.
- [7] Dong Deyuan *et al.* *Statistic Method of Experimental Research* [M]. Metrological Press of China, 1987. [董得元等. 实验研究的数理统计方法 [M]. 中国计量出版社, 1987.]

# Experimental Models of Microwave Radiometric Characteristics for Extended Targets

LI Qing-xia, ZHANG Zu-ying, GUO Wei, WEN Guang-hua

(*Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Department of Electronics and Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

**Abstract:** A method of establishing experimental models of microwave radiometric characteristics for extended targets is introduced in this paper. Microwave radiometric characteristics are represented by brightness temperature. A large amount of antenna temperature data is obtained through the repeated measurement of the targets under different conditions and at different time. Apparent temperature is obtained from antenna temperature through the inversion of the integral equation. The brightness temperature is obtained from apparent temperature by eliminating the scattered radiometric temperature. The formula of brightness temperature for the targets with respect to incident angle and surface physical temperature are established through two-dimensional curve-fitting of brightness temperature. Comparing the experimental model established by this method with the semi-empirical formula (theoretical model) of water brightness temperature, it is found that they are very close in the range of surface temperature ( $4$ — $35^{\circ}\text{C}$ ) covered by the measurement and measuring angle  $20^{\circ}$ — $65^{\circ}$ . The experimental models established with this method for concrete road, asphalt road, and crushed stone road are also presented.

**Key words:** extended target; microwave radiometric characteristics; brightness temperature; experimental model