

自然辐射的绕射分析以及成像模拟

张 成^{1,2}, 吴 季¹

(1. 中科院空间科学与应用研究中心, 空间微波遥感技术实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘 要: 利用几何绕射理论分析了自然辐射的绕射, 得出了绕射亮温的计算公式, 以墙角为例对自然环境的绕射进行计算, 结果表明, 除了处于太阳的入射角度和反射角度以外, 其他情况下的绕射亮温非常微弱可以忽略. 在不计绕射的情况下利用射线追踪法来进行自然场景微波辐射的成像模拟, 分析了成像模拟过程中的各种关键因素, 并利用真实场景进行了仿真实验.

关键词: 几何绕射; 被动微波成像; 射线追踪; 场景模拟

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)06-1068-06

Diffraction and Image Simulation of Natural Microwave Radiation

ZHANG Cheng^{1,2}, WU Ji¹

(1. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

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

Abstract: The diffraction of natural radiation is analyzed with GTD theory and the brightness temperature formula is deduced to calculate the diffraction effects. The numerical results indicate that the natural environment and the sun out the direct viewing field only generate ignorable diffraction temperatures of more less than 1K. Without considering diffraction effects the ray tracing method was introduced to the image simulation of natural scene radiation, the emitting model and illuminating model of natural surface are established, the polarization rotation in ray transmission process are also considered. Real scene of building is simulated at last and validated by comparing with field measurement, which indicates that this simulation model is completely feasible in practice.

Key words: geometric theory of diffraction (GTD); passive microwave imaging; ray tracing; scene simulation

1 引言

由于微波具有较强的穿透特性以及物体在微波波段表现出的独特性质, 使得微波辐射测量成为一种重要的被动遥感方式^[1]. 随着微波技术的发展, 真实孔径毫米波相机^[2]和综合孔径辐射成像仪^[3]等先进的大视场瞬时成像技术的出现, 促进了被动微波遥感领域的发展, 同时也带动了微波辐射图像的模拟和分析工作的开展. 成像模拟具有很重要的应用价值, 它可以用来帮助对辐射计的系统参数进行设计, 对其性能和应用状况进行方便快捷的评估. 更重要的是通过成像模拟可以帮助我们测量图像进行合理的解译, 寻找出潜在的辐射规律, 进一步认识微波辐射现象学, 并帮助开拓微波辐射成像应用的新领域.

目前高分辨率微波成像探测技术刚起步不久, 近距离成像应用比较少, 因此成像模拟的工作还未广泛开展, 本文借鉴光线领域的射线追踪法来进行微波图像的模拟. 模拟时为了正确反映出场景的主要辐射特征, 必

须要对场景中的辐射、反射、透射甚至绕射等作用过程进行准确描述. 由于微波波长相比红外和可见光大的多, 因此绕射现象也会明显的多, 如何描述自然辐射的绕射, 以及绕射是否会明显表现在辐射图像中, 这是在成像模拟时必须要考虑的问题, 目前还未发现有关这方面的研究报告, Salmon 采用辐射度法进行成像模拟时^[4,5], 也没有对绕射问题进行说明, 因此本文首先对自然辐射的绕射现象进行研究, 推导绕射所形成的天线温度计算公式, 并分析其对成像结果的影响. 然后讨论了亮温追踪过程中的发射模型、照射模型、亮温传输等关键因素, 并通过对真实场景的模拟来验证成像模型的效果.

2 自然辐射的绕射

2.1 直劈绕射温度计算公式

自然辐射的绕射可分为三种情况: 边缘绕射、曲面绕射和尖顶绕射, 本文只考虑影响最大的直劈边缘绕

射情况. 根据 Keller 的 GTD 理论^[6], 在射线基坐标系下绕射场可表示为:

$$\begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix} = A_d \cdot \begin{bmatrix} -D_h & 0 \\ 0 & -D_v \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: D 为绕射系数, h 和 v 分别为水平极化分量和垂直极化分量, E^i 为直劈边缘处的入射场强, E^d 为观测点处的绕射场强, A_d 为描述空间衰减的扩散因子. 绕射系数的计算是绕射理论的关键, 目前应用最广泛的是 Holm 提出的启发式绕射系数公式^[7]:

$$D_{h,v} = D^{(1)} + R_0^h \cdot R_n^h \cdot v D^{(2)} + R_0^h \cdot v D^{(3)} + R_n^h \cdot v D^{(4)} \quad (2)$$

式中 R_0 和 R_n 分别为直劈 0-面和 n -面的菲涅尔反射系数, 绕射系数分量 $D^{(i)}$ 的表达式为:

$$D^{(i)} = \frac{-e^{-j\frac{\pi}{4}}}{\sin(\theta_i) 2n \sqrt{2\pi k}} \text{ctg}(\gamma^{(i)}) F[2kLn^2 \sin^2(\gamma^{(i)})] \quad (3)$$

式中 F 为边界过渡区的修正算子, θ_i 为入射角, k 为波数, L 为距离因子, γ 为角度纠正因子.

自然物体辐射的电磁波为随机非相干波, 类似噪声的形式, 分析时应从功率的角度入手. 假设亮温为 T_B 的物体以球面波的形式向外辐射电磁波, 如图 1 所示, 当天线正对劈边缘观测时, 根据上述绕射理论天线接收到的绕射功率为:

$$P = A_{\text{eff}} \cdot S_d = A_{\text{eff}} \cdot \frac{|E_i \cdot D_p \cdot A_d|^2}{2\eta} \quad (4)$$

式中 A_{eff} 为天线的有效接收面积, S_d 为天线处绕射波的功率密度. E_i 为劈尖处的入射电场强度. 根据坡印廷定理以及亮温的物理定义, 有如下关系式^[8]:

$$T_B = \frac{\lambda^2}{k_B} \cdot \frac{r_1^2}{\Delta A} \cdot \frac{\langle E \cdot E^* \rangle}{2 \cdot \eta} \quad (5)$$

式中 k_B 为波尔兹曼常数, λ 为波长, η 为自由空间波阻抗, E 为观测处的电场强度, r 为观测距离, ΔA 为物体在视线方向上的投影面积. 因此式(4)可表示为:

$$P = A_{\text{eff}} \cdot \frac{D_p^2 \cdot A_d^2 \cdot k_B \cdot T_B \cdot \Delta A}{\lambda^2 \cdot r_1^2} \quad (6)$$

结合天线功率方向图将上式在整个天线照射面积内积分可得天线温度计算公式:

$$\begin{aligned} T_A &= \frac{A_{\text{eff}}}{\lambda^2} \int_{\Omega} T_B \cdot D_p^2 \cdot A_d^2 d\Omega \\ &= \frac{A_{\text{eff}}}{\lambda^2} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} T_B \cdot D_p^2(\theta, \varphi) \cdot A_d^2 \sin\theta d\theta d\varphi \quad (7) \end{aligned}$$

当天线满足远场观测条件时, 可近似认为在 $\Delta\theta$ 范围内

绕射系数不变, 且 $\Delta\theta \approx l/r_2$, l 为天线孔径长度, 因此上式可简化为:

$$T_A = \frac{l}{\Omega_p \cdot r_2} \int_{\Omega} T_B \cdot D_p^2(\varphi) \cdot A_d^2 d\varphi \quad (8)$$

可见自然辐射的绕射形成的天线温度除了与绕射系数有关外, 还与观测距离以及天线口径有关, 因此直劈绕射具有类似理想线源辐射的特点, 这是天线接收绕射与接收直接辐射的主要区别.

2.2 墙角绕射计算实例与分析

根据式(8)对实际情况场中经常遇到的墙角绕射进行计算, 场景如图 2 所示. 墙角周围存在亮温为 300K 的背景辐射, 天线口径为 0.5m, 工作频率为 9GHz, 墙面的电特性为 $\epsilon_r = 3.5 - 1.2i$ ^[9]. 图 3 示出了观测角为 $\varphi = 240^\circ$ 时天线温度与观测距离的关系. 可见天线温度随着观测距离的增大而迅速降低. 天线远场距离范围内的天线温度都在 1K 以下. 图 4 示出了天线温度与观测角度的关系, 垂直极化天线温度随观测角度的变化较平缓, 变化范围小于 0.05K; 水平极化天线温度呈单调上升趋势, 变化范围小于 0.15K. 这说明天线温度受观测角度的影响很小.

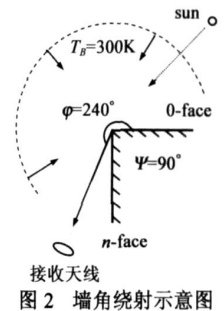


图 2 墙角绕射示意图

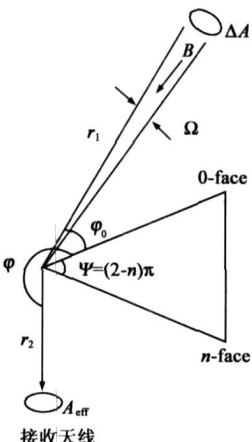


图 1 亮温绕射示意图

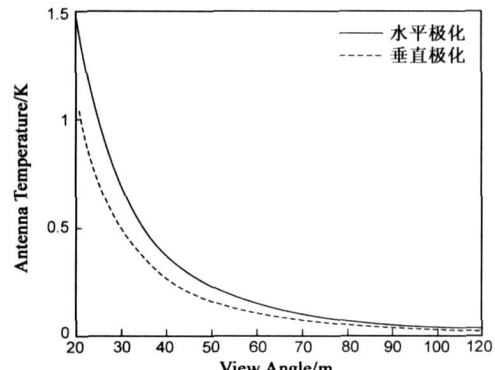


图 3 天线温度与观测距离的关系图观测角度: $\varphi = 240^\circ$

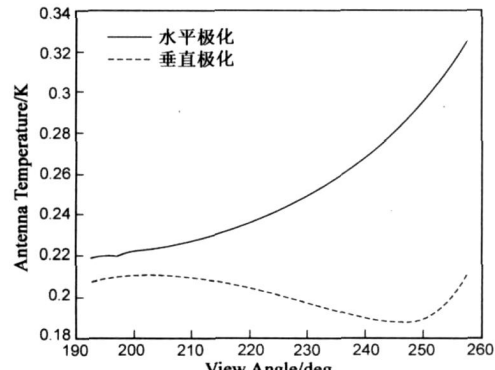


图 4 天线温度与观测角的关系图观测角度: $s = 50\text{m}$

对太阳的绕射进行计算. 太阳在 9GHz 频段的辐射亮温约为 $10^4\text{K}^{[1]}$, 太阳对地球张角为 $32'$. 不失一般性, 当太阳与墙角呈 40° 入射时, 天线温度与观测角度的关系如图 5 所示. 天线温度在 $\varphi = 220^\circ$ 的入射边界位置和 $\varphi = 140^\circ$ 的反射边界位置达到极值, 水平极化和垂直极化在入射边界上分别为 22.78K 和 22.42K, 在反射边界上分别为 7.09K 和 1.44K. 离开这两个边界, 天线温度迅速降低, 在其他大部分角度天线温度都远远低于 1K. 因此, 除非太阳在入射边界和反射边界上, 否则太阳绕射可以忽略不计.

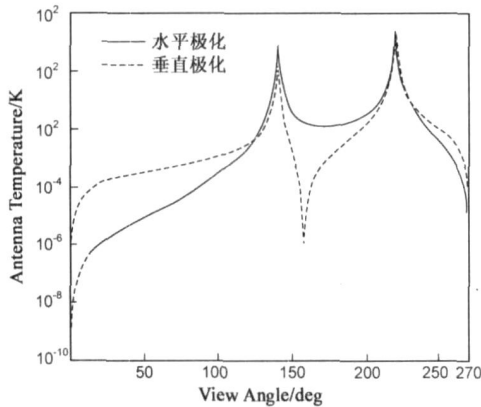


图 5 太阳绕射形成的天线温度太阳角 $\varphi = 40^\circ$ 观测距离 $s = 50\text{m}$

综上所述可得出结论: 场景中周围环境的自然辐射所形成的绕射随着观测距离的增加而迅速衰减, 满足天线观测条件的距离范围内, 绕射形成的天线温度非常小, 甚至达不到辐射计的温度灵敏度. 在实地测量辐射图像中我们也没发现目标边缘或拐角处有亮温增强现象, 因此在辐射成像模拟时可以不考虑绕射影响.

3 微波辐射成像模拟

3.1 亮温追踪

辐射计接受到的辐射信号是以亮温的形式来表征, 在描述亮温传播时可以借鉴光学领域中的射线追踪法, 射线追踪(Ray-tracing)是基于几何光学理论的一种模拟方法, 在光学领域中用来产生具有真实感的图像^[10]. 其在通信领域也有广泛应用, 用来进行无线通信的电波传播预测^[11]. 本文将射线追踪的思想引入到微波辐射领域, 提出了亮温追踪法: 物体的辐射亮温以射线管的形式向外发射, 每条射线管代表着物体在该方向上的辐射亮温, 并各自独立的在空间传播, 亮温射线在场景中经过发射、反射和透射等物理过程, (忽略绕射), 最终被辐射计天线接收到, 因此可以以天线为出发点每条进入的亮温射线进行逆向追踪, 从而确定出各个方向的辐射亮温. 在微波波段, 场景中的任何物体既对亮温射线有反射和透射作用, 同时本身也向外发射亮温, 因此场景中照射源非常复杂, 亮温追踪时需要针对不同的表面状况建立照射模型和发射模型.

场景模拟时首先采用构造实体几何法(CSG)来对场景目标进行三维几何表示, 然后以辐射计为出发点在其视场范围内以一定的角度间隔向外发射射线, 射线分布情况根据具体探测系统而定, 然后针对每一条射线进行可视目标的查找, 检测出所有与射线相交的目标, 然后分别进行线面求交运算, 并对多个交点进行视线遮挡测试, 把距离最近的交点作为可视点, 并以反射方向或透射方向作为新的射线方向重复进行上述步骤, 直到满足射线结束条件时追踪结束, 最后计算此条路径中的辐射亮温的传输情况. 亮温射线结束的条件是: (1) 亮温射线射向天空; (2) 亮温射线射向漫散射表面; (3) 亮温追踪达到追踪深度, 或射线衰减到一定程度.

求交测试是射线追踪的一个主要计算步骤, 目前快速求交测试方法主要是层次包围体法和空间划分法^[10], 他们都是针对复杂场景, 对于较简单的场景效率反而不高, 我们采用投影法来进行求交测试, 将景物投影到一个固定平面, 通过判断发射射线与该平面的交点是否落在投影中来判断射线是否与目标相交, 这样可以三维空间的计算转化到二维平面上来进行, 从而能够很大程度上减少计算量.

3.2 亮温发射模型

在微波波段任何高于绝对零度的物体都属于辐射源, 都向外发射微波射线, 因此在亮温追踪计算时首先需要建立亮温发射模型. 自然界中的物体一般都属于灰体, 其在亮温包括两部分: 自身辐射、对周围环境的反射和透射:

$$T(\theta, \varphi) = T_e + T_s + T_p \\ = e(\theta, \varphi) \cdot T_0 + r(\theta, \varphi) \cdot T_i + \rho(\theta, \varphi) \cdot T_i \quad (9)$$

式中 T_0 为物体的物理温度, T_i 为周围环境的照射亮温, $e(\theta, \varphi)$ 和 $r(\theta, \varphi)$ 分别为物体在 (θ, φ) 方向上的发射率和反射率, 根据基尔霍夫能量守恒定律满足: $e + r + \rho = 1$. 发射率是发射模型的关键, 其除了与物体的介电特性有关外, 还取决于表面粗糙度, 用表面起伏的均方根高度 s 来表征, 可以分四种情况来讨论:

(1) 光滑表面 ($ks < 0.1$), k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, 其表面发射率可由菲涅尔定律得到^[11]:

$$e_h(\theta) = 1 - \left| \frac{\cos\theta - \sqrt{\xi - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\xi - \sin^2\theta}} \right|^2 \\ e_v(\theta) = 1 - \left| \frac{\xi \cos\theta - \sqrt{\xi - \sin^2\theta}}{\xi \cos\theta + \sqrt{\xi - \sin^2\theta}} \right|^2 \quad (10)$$

式中 e_h 为水平极化发射率, e_v 为垂直极化发射率, ξ 为媒质的复相对介电常数.

(2) 微粗糙表面 ($ks < 0.3$), 表面反射主要是相干散射分量, 可以采用 choudhury 的相干散射模型进行近似计算^[12]:

$$e_p(\theta) = 1 - r_p^{ch}(\theta) = 1 - r_p(\theta) \cdot e^{(-4k^2 s^2 \cos^2(\theta))} \quad (11)$$

式中 p 为极化方式, r_p 为镜面菲涅耳反射率, k 为波数, s 为表面高度的标准偏差(均方根高度)。

(3) 中等粗糙表面 ($0.3 < ks < 1$), 表面反射除了相干分量外, 还包括非相干散射分量, 此时可利用表面双向散射系数 σ 来计算表面的发射率^[13]:

$$e_p(\theta) = 1 - r_p^e(\theta) = 1 - r_p^{non}(\theta) - r_p^{ch}(\theta) \quad (12)$$

式中 r_p^e 为有效反射率, r_p^{ch} 为相干反射率如式(11)所示, r_p^{non} 为非相干反射率, 其计算公式为:

$$r_p^{non}(\theta) = \frac{1}{4\pi \cos \theta} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} [\sigma_{pp}(\theta; \theta_s, \phi_s) + \sigma_{pq}(\theta; \theta_s, \phi_s)] \cdot \sin \theta_s d\theta_s d\phi_s \quad (13)$$

(4) 极粗糙表面 ($ks > 1$), 表面反射主要是非相干散射分量, 而且双向散射系数仅取决于 $\sigma_0 \cos \theta_s \cos \theta_s$, σ_0 是后向散射系数, 因此可利用朗伯模型近似处理^[11]:

$$e_p(\theta) = 1 - \frac{1}{4\pi \cos \theta} \int_{\varphi_s=0}^{2\pi} \int_{\theta_s=0}^{\pi/2} \sigma_0 \cos \theta \cos \theta_s \sin \theta_s d\theta_s d\varphi_s = 1 - \frac{\sigma_0}{4} \quad (14)$$

在模拟计算时, 需要根据不同的表面状况采用不同的发射模型, 在微波波段, 很多人造目标如: 车辆、公路、建筑、跑道等目标的表面都属于光滑表面或微粗糙表面; 而对于草地、农田以及裸露土壤等自然目标则属于极粗糙表面物体, 对于一些中等粗糙表面, 如果表面的双向散射系数无法获知, 我们可以用朗伯模型来代替非相干散射分量来近似计算。

3.3 亮温照射模型

微波场景中的任何物体都属于照射源, 因此场景中不存在阴影区。在研究照射模型时首先要对场景中的照射源进行分析。照射源可以近似分为: 点源, 线源, 面源和体源。体源主要是指场景中的物体目标, 其照射亮温取决于本身的辐射特性。线源主要是物体边缘形成的绕射, 根据前文分析可知其影响很微弱可以忽略。面源和点源在微波场景中主要是指为天空辐射和太阳辐射, 下面将针对这两种辐射进行分析。

3.3.1 天空照射

在室外环境中分布于整个 2π 空间的天空背景的辐射是影响图像对比度信息的关键因素。天空的辐射主要来源于大气中的水、二氧化碳和氧气, 这些成分对微波有一定的吸收作用, 因此在造成微波传输的衰减同时, 也致使天空表现出一定的辐射亮温。天空的辐射亮温计算公式在忽略体散射的情况下可表示为^[1]:

$$T_{sky}(\theta) = \sec \theta \int_0^\infty k_a(z) T(z) e^{-\sec \theta \int_0^z k_a(z') dz'} dz \quad (15)$$

其中 $k_a(z)$ 和 $T(z)$ 分别为大气的吸收系数和热力学温度的高程分布。由于大气尤其是对流层下层受地面扰动

影响较大, 这些参数往往是很难作精确测定的。因此在一些场合可以用简化的计算公式来近似计算, 当近似认为 $k_a(z)$ 和 $T(z)$ 随高度变化很小时, 可得到天空亮温计算公式:

$$T_{sky}(\theta) = T_{atm} (1 - e^{\ln(1 - T_0/T_{atm}) \cdot \sec \theta}) \quad (16)$$

式中 T_0 为天顶辐射亮温, T_{atm} 为大气物理温度。从式(16)可以看出天空亮温与观测角度有很大关系, 这主要是由于大气路径不同造成的。由于天空辐射的这种特性, 使得场景中的物体表面因反射不同角度的天空辐射而表现出不同的亮温信息。

3.3.2 太阳照射

在微波波段太阳的辐射亮温变化范围为 $6000K \sim 10^4 K^{[1]}$, 太阳相对于地球所成的立体角非常小, 约为 7×10^{-5} 球面度, 所以类似于点源辐射, 因此相比整个 2π 空间的天空照射来说, 太阳照射的能流密度要小的多。例如对于平均辐射亮温约为 $100K$ 的天空照射, 物体接收太阳照射的功率密度与来自天空照射的功率密度之比为:

$$\frac{S_{solar}}{S_{sky}} = \frac{T_{solar} \Omega_{solar}}{T_{sky} \Omega_{sky}} \approx \frac{10^4 \times 7 \times 10^{-5}}{100 \times 2\pi} \ll 0.0012 \quad (17)$$

可见太阳照射比较微弱, 对于散射波瓣非常宽的粗糙表面来说, 太阳照射可以忽略; 而对于光滑表面或微粗糙表面, 当太阳位于直射方向或镜像方向时, 则必须考虑对辐射计产生的影响。

3.3.3 综合照射模型

亮温追踪过程本身是一个递归过程, 需要针对亮温射线的每个可见点计算其辐射亮温, 下级可见点的辐射亮温将对上级可见点起到照射作用, 因此递归过程的一个主要内容就是要建立综合照射模型, 综合照射模型包括自身的发射亮温和对照射亮温的反射和透射, 它将应用于射线路径中每一个可见点。照射亮温包括: 天空照射、周围物体照射和下级可见点的照射。对于非透明物体, 其综合照射模型可以表示为:

$$T_B = e_p \cdot T_0 + r_p^{ch} \cdot T_m + r_p^{non} \cdot T_i \quad (18)$$

式中 T_0 为物体的物理温度, T_m 为镜像入射亮温, T_i 为天空以及周围物体的照射亮温, 对于光滑表面非相干散射 r_p^{non} 为零, 而对于粗糙表面, 其非相干散射亮温的计算一般是对入射亮温的一个积分过程。

对于透明物体, 则需要考虑物体背面的入射亮温, 实际中经常遇到的透明体是具有一定厚度的介质板, 其综合照射模型包括自身发射、反射和透射三部分:

$$T_B = e_e \cdot T_0 + r_e \cdot T_s + \tau_e \cdot T_i \quad (19)$$

式中 T_s 和 T_i 分别为散射和透射的入射亮温, e_e , r_e 和 τ_e 分别为有效发射率、反射率和透射率, 计算公式为^[1]:

$$\tau_e = \left[\frac{(1-R)^2}{L} \sqrt{1 - \frac{R^2}{L^2}} \right], r_e = R \left[1 + \frac{(1-R)^2}{L^2} \sqrt{1 - \frac{R^2}{L^2}} \right],$$

$$e_e = 1 - r_e - \tau_e \quad (20)$$

式中 R 为介质板表面反射率, L 为介质板内部损耗因子, 对于无损介质 $L = 1$.

3.4 亮温传输计算

根据照射模型计算出每级可见点的视在亮温后, 在描述亮温传输过程时, 还须要考虑亮温的极化信息, 这是亮温传输计算的关键. 辐射亮温的极化状态一般可以由 4 个 Stokes 极化分量来表示^[8], 在传播的过程中 Stokes 极化分量会发生变化, 这种变化与作用物体的表面分布关, 如图 6(a) 所示, 当亮温射线被不同的物体表面反射时, 会形成不同的入射平面, 这些入射平面之间会存在一定的倾斜角度, 这造成了不同入射平面的极化分量之间也形成了一定的旋转角度, 如图 6(b) 所示, 这样在亮温传输计算时就会出现极化分量之间的极化旋转和耦合的问题.

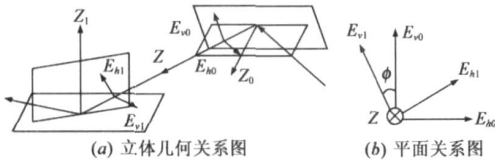


图 6 极化旋转示意图

对于夹角为 φ 的两个入射平面, 如图 6(b) 所示, 各极化分量之间的几何转换关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} E_{h1} \\ E_{v1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{h0} \\ E_{v0} \end{bmatrix} \quad (21)$$

因此根据 Stokes 矢量的定义, 便可以用矩阵的形式来表示的两个极化状态之间的转换关系:

$$\begin{bmatrix} T_{h1} \\ T_{v1} \\ U_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & \sin^2 \varphi & \sin(2\varphi)/2 & 0 \\ \sin^2 \varphi & \cos^2 \varphi & -\sin(2\varphi)/2 & 0 \\ -\sin 2\varphi & \sin 2\varphi & \cos 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{h0} \\ T_{v0} \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

结合亮温综合照射模型, 便可以得到各级可见点之间的亮温传输计算公式:

$$T_{Bi} = T_i \cdot e_{pi} + A_{(i+1)} \cdot T_{B(i+1)} \cdot r_{pi} + A'_{(i+1)} \cdot T'_{B(i+1)} \cdot \tau_{pi} \quad (23)$$

式中 A_i 和 A'_i 为入射面和透射面的极化旋转矩阵, T_{Bi} 、 T_i 、 e_{pi} 、 r_{pi} 分别为可视点的视在亮温、物理温度、发射率、反射率和透射率. 将此计算公式延伸到整条射线路径内, 通过递归计算便可以得到天线最终接收亮温.

4 真实场景成像模拟

为了对成像模型的有效性进行验证, 同时也作为实际应用中的一次实验, 应用此模型对实验楼和重力塔的辐射图像进行模拟. X 波段的天空背景辐射很低, 平均辐射亮温低于 50K, 建筑墙面为近似光滑表面, 窗户玻璃为透明介质板, 室内环境可等效为辐射腔体, 并透过窗户向外辐射能量. 利用空间中心研制的 X 波段 (9.4GHz) 综合孔径辐射计对场景进行观测, 综合孔径辐射计的等角度成像方式会造成图像中景物的扭曲, 为了进行对比, 模拟时也采用同样的成像方式. 测量结果和模拟结果如图 7 所示. 测量图像中出现混叠条纹是由信道耦合形成的相关噪声导致的, 属于仪器测量误差.

从图可以看出模拟图像和实测图像取得了很好的

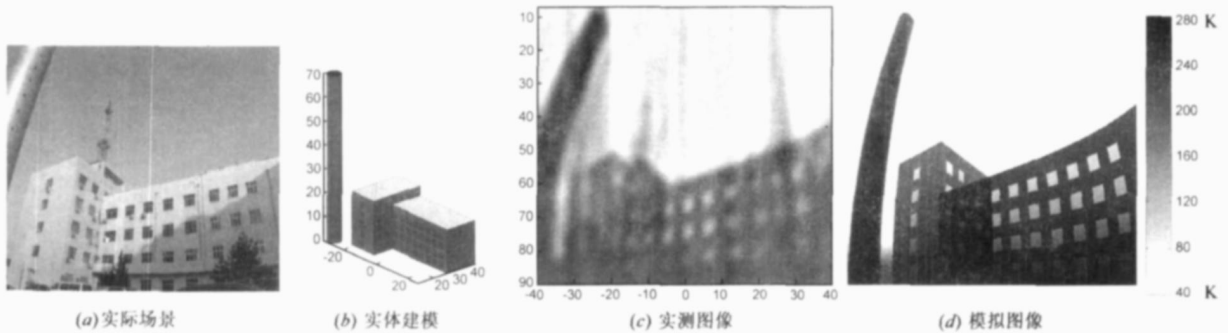


图 7 楼体建筑模拟

一致, 无论从模拟图像还是实测图像都可以看到: 由于天空照射以及观测角度的综合原因, 实验楼主体和窗户的亮温表现出由底部到顶部逐渐降低的趋势. 由于窗户玻璃的有效反射率要大于建筑表面的反射率, 因此由于反射冷空照射的缘故会造成窗户亮温要低于建筑亮温; 同时建筑拐角处由于多次反射作用而导致出现了较高亮温的影像现象.

5 结论

利用射线追踪进行成像模拟关键是要对场景中的

射线传播进行正确的描述, 绕射是其中的一种作用过程, 对绕射进行追踪非常复杂, 而且也无法直接和“亮温”这个物理量联系起来, 因此进行成像模拟时必须首先要解决绕射问题. 本文对自然辐射的绕射现象进行了分析, 通过实例计算表明, 自然环境的绕射对辐射测量图像的影响很微弱, 形成的天线温度一般情况下低于 1K, 而太阳绕射只有在入射方向和反射方向上才会出现较强烈的影响, 其他方向的绕射影响都远远低于 1K, 因此在辐射模拟时可以忽略绕射的影响. 在不考虑绕射的情况下采用亮温追踪的方法来进行成像模拟,

取得了很好的效果. 亮温追踪能够对任意曲面的亮温进行计算, 可以方便的与构造实体几何结合起来, 避免了因为小平面对近似而造成的细节模糊. 而且可以根据天线波束宽度以及场景分布情况来调整射线密度, 并且能够配合采用视图插值技术, 从而灵活而高效的展现场景亮温的细微变化.

参考文献:

- [1] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing, vol. I [M]. Massachusetts: Artech House, 1986.
- [2] Ruf C S, Swift C T, Tanner A B, Levine D M. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the earth[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1988, 26 (5): 597- 611.
- [3] Y ujiri L, Shoucri M, Moffa P. Passive millimeter wave imaging [J]. IEEE Microwave Magazine, 2003, 4(3) : 39- 50.
- [4] Salmon N A. Polarimetric scene simulation in millimeter wave radiometric imaging [A]. James L Passive Millimeter Wave Imaging Technology[C]. Orlando: Proceedings of SPIE, 2004. 5410. 260- 269.
- [5] Salmon N A. Polarimetric passive millimeter wave imaging scene simulation including multiple reflections of subjects and their backgrounds[A]. David H. Passive Millimeter Wave and

- Terahertz Imaging[C]. Orlando: Proceedings of SPIE, 2005. 5989. 354- 358.
- [6] Keller J B. Geometrical theory of diffraction[J]. J Opt Soc Amer, 1962, 52: 116- 130.
- [7] Holm P D. A new heuristic UTD diffraction coefficient for non perfectly conducting wedges[J]. IEEE Trans Antennas Propagation, 2000, 48(8) : 1211- 1219.
- [8] Tsang L, Kong J A, Shin R T. Theory of Microwave Remote Sensing[M]. New York: Wiley, 1999.
- [9] Sagnard F, Vignet C, Montcourtois V, et al. Microwave measurements of the complex permittivity of construction materials using Fresnel reflection coefficients and reflection ellipsometry [A]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium[C]. Boston: IEEE Press, 2001. 1. 626- 629.
- [10] Glassner A S. Space subdivision for fast ray tracing[J]. IEEE Computer Graphics & Application, 1984, 4(10) : 15- 22.
- [11] Rizk K, Wagen J. Two dimensional ray-tracing modeling for propagation prediction in microcellular environments[J]. IEEE Trans Veh Tech, 1997, 46(2) : 508- 517.
- [12] Choudhury B J, Schmugge T J, Newton R W, et al. Effect of surface roughness of the microwave emission from soils[J]. Journal of Geophys Res, 1979, 8(4) : 5699- 5706.
- [13] Fung A K. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications[M]. Norwood, MA: Artech House, 1994.

作者简介:



张 成 男, 1978 年生于河北深泽县, 现为中科院空间中心助理研究员, 中科院博士, 河北工业大学硕士/ 本科, 研究方向为微波辐射机理及综合孔径辐射计设计等.

E mail: zhangcheng_hebut@163.com



吴 季 男, 1958 年生于北京, 现为中科院空间中心主任、研究员、博导, 丹麦技术大学博士/ 博士后, 北京邮电大学硕士/ 本科, 中国空间学会常务理事, 国家航天局战略咨询专家, 国际空间研究中国委员会(CN-COSPAR) 秘书长, 国际月球探测工作委员会(ILEWG) 副主席, 国际电磁科学院院士, 现从事电磁理论、遥感理论与技术、微波天线技术、空间探测技术、卫星工程等

方面的研究工作. E mail: wuji@cssar.ac.cn