

地物微波辐射亮温的图像模拟方法

张成^{①②} 吴季^①

^①(中国科学院空间科学与应用研究中心国家 863 计划微波遥感实验室 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 微波辐射亮温图像的模拟在被动遥感领域具有重要意义。该文根据射线追踪的思想提出了一种三维场景微波辐射图像的模拟方法: 亮温追踪法。分析了模拟时必须考虑的天空背景辐射、多次反射造成的极化旋转以及天线平滑作用等影响因素, 最终建立了微波辐射亮温图像的模拟方法。应用此方法对典型目标进行了试验模拟, 并对模拟结果所表现出的微波辐射现象进行了分析。为验证模拟方法的可靠性, 该文对楼层建筑以及飞机跑道等实际场景进行模拟, 模拟结果与实地测量图像取得了很好的一致, 表明此方法完全可行。

关键词: 被动微波成像; 亮温追踪; 多次散射; 极化旋转

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)11-2725-04

Image Simulation for Ground Objects Microwave Radiation

Zhang Cheng^{①②} Wu Ji^①

^①(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The simulation of brightness temperature image is a necessary work in the passive microwave remote sensing. This paper introduces the brightness temperature tracing method for 3-D scene microwave radiometric image simulation, and describes the general requirements and considerations such as sky radiation, antenna smoothing and polarization rotation caused by multiple-reflection. Then a simulation model is established which can create more realistic imagery and reproduce the radiation phenomenology. Using this model the microwave radiometric phenomenology which is greatly different from optical and infrared ones is analyzed. Finally, the Lab building and airstrip are simulated in order to validate this model. The comparisons with field measurements indicate that this model is completely feasible in practice.

Key words: Passive microwave imaging; Brightness temperature tracing; Multiple-reflection; Polarization rotation

1 引言

图像模拟对于研究各种目标的被动微波辐射现象具有重要价值。通过模拟可以帮助我们认识目标的辐射特性, 解释某些辐射现象, 寻找特定的辐射规律, 判断实际测量结果的好坏。此外在进行辐射计系统设计时, 要根据辐射计系统的任务和工作环境, 对其工作频率、天线尺寸、观测距离以及相应的图像处理算法等进行合理的设计, 开展图像模拟工作是对这些因素进行细致分析的有效手段, 可以在各种环境条件下有效地模拟这些因素对成像结果的影响。因此图像模拟可以对辐射计性能和应用状况进行方便快捷的评估, 在一定程度上成为实地测量实验的有效补充和替代, 既可以节省宝贵的时间, 又可以节省昂贵的实验费用, 避免了大量人力和物力的消耗。

目前国内外在这方面开展的工作相对比较少, 这主要是由于微波辐射计的近距离成像探测应用还不够广泛, 高分辨

率成像技术还不够成熟。进入 21 世纪后, 随着毫米波集成电路和多通道集成数字相关器技术的迅速发展, 先进的大视场瞬时成像技术逐渐成熟, 尤其是毫米波相机和综合孔径辐射计系统等技术的发展^[1,2], 使得越来越多的高分辨率辐射图像可以使用, 正是这种新型成像辐射计系统的出现, 促进了被动微波遥感的迅速发展, 同时也带动了图像模拟工作的逐渐开展。目前出现的模拟微波辐射图像的方法主要是辐射度法^[3,4], 此方法首先对目标物体进行小平面近似处理, 将物体表面分割成若干个小平面, 然后建立场景中的各小平面之间的相互作用关系, 计算出每个小平面的辐射度, 进而得出场景的辐射图像, 此方法的计算量取决于小平面的数量。为了使处理后的几何体尽量接近原来物体, 小平面的面积要尽量小, 尤其是对于比较复杂的目标, 如果要细腻地表现出物体的几何特征并精确计算出多次反射作用, 其计算量是非常惊人的。

本文根据射线追踪的思想, 提出了亮温追踪的方法, 亮温追踪可以对任意曲面的辐射亮温进行计算, 不需要对目标

进行小平面近似处理,可以精确地根据物体的几何特征再现场景中的多次反射的细节信息。而且亮温追踪还可以根据天线系统的波束宽度和分辨率来调整亮温的追踪间隔,具有很强的灵活性和较高的计算效率。

2 成像模型

2.1 辐射成像基本原理

辐射计系统是用来测量物体微波辐射的高灵敏度传感器。其中成像辐射计的应用最广泛,因为成像辐射计把天线接收到的物体辐射信号以图像的形式表现出来,更有利于人们进行分析和解读。自然界中任何高于绝对零度的物体都向外辐射电磁波,其辐射能量的大小可以由辐射亮温来度量,辐射计接收到的信号便是辐射亮温信息。辐射亮温与物体的物理温度和发射率有关,在 (θ, φ) 方向上物体表现出的亮温包括两部分:

$$T(\theta, \varphi) = \epsilon(\theta, \varphi)T_0 + \gamma(\theta, \varphi)T_s \quad (1)$$

式中 T_0 为物体的物理温度; T_s 为周围环境的辐射亮温; $\epsilon(\theta, \varphi)$ 和 $\gamma(\theta, \varphi)$ 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: $\epsilon + \gamma = 1$ 。对于光滑表面,其发射率满足菲涅尔定律;对于粗糙表面,Peake利用双向散射系数 σ_{pq} 导出了其发射率计算公式^[5]:

$$e_p(\theta, \varphi) = 1 - \frac{1}{4\pi} \iint_{2\pi} [\sigma_{pp}(\theta, \varphi; \theta_s, \varphi_s) + \sigma_{pq}(\theta, \varphi; \theta_s, \varphi_s)] d\Omega \quad (2)$$

实际情况中,通常根据表面起伏高程波形的均方值(即均方根高度 δ)来判断其粗糙程度。根据夫琅和费(Fraunhofer)判据,当 $\delta < \lambda / (32 \cos \theta)$ 时,可以认为是光滑表面。在微波波段,很多人造目标,如车辆、公路、建筑、跑道等目标的表面为光滑表面或近似光滑表面;而对于草地、农田以及裸露土壤等自然目标则属于粗糙表面物体。

2.2 温追踪法

对场景的微波辐射图像进行模拟,必须要结合场景中目标的形状、大小、结构以及周围环境等方面来考虑。本文根据射线追踪的思想,提出了亮温追踪的方法。射线追踪是基于几何光学理论的一种模拟方法,目前已被广泛应用于通信领域^[6,7]。根据此思想可以认为物体的亮温以射线管的形式向外发射,能量在各自独立的射线管内传输,每条发射射线代表着物体在此方向上的辐射亮温。场景中目标发射出的亮温射线经过多次碰撞、反射或穿透等作用过程,最终进入辐射计天线。由于场景中物体表面上的任一点都是辐射源点,因此只能以辐射计为出发点,沿射线的反方向进行追踪,即把辐射计天线假想为辐射源点,在天线视场范围内对发射出的亮温射线(等同于接收亮温射线)逐个进行追踪。

亮温追踪的基本过程为:首先建立场景的几何分布模型,并确定辐射计的观测位置,然后在辐射计的视场范围内以一定的角度间隔向外发射亮温射线。针对每一条射线,进

行可视目标的查找,检测出所有可能与射线相交的目标,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新的辐射源点,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,直到没有新的源点产生时或达到所要求的层数限度时追踪结束,最后计算此条路径中的辐射亮温的传输情况。需要注意的是亮温追踪射线所代表的物理量是亮度温度,它不同于传统射线追踪所代表的场强或功率密度。亮温不会随着传播距离而衰减,因此追踪时不需要根据射线路径引入扩散因子。

大量射线与目标物体的求交测试是导致计算量大的主要原因。目前主要的快速求交测试方法有两种:一种是层次包围体法^[8],将环境中的各景物用形状简单的包围体包起来,然后判断射线与包围体是否相交,从而快速排除那些与射线不相交的目标。另一种是空间划分法,将景物空间均匀地或适应性分割成若干子空间,如均匀网格剖分法^[9]和八叉树法^[10],只对跟踪射线所穿过的子空间内所包含的物体进行相交判断,其它区域的物体可以迅速排除。这两种方法都是针对复杂场景,而对于较简单的场景其效率并不高,主要是因为包围体计算以及空间划分本身具有一定的计算量,当场景目标较少时会得不偿失。由于受仪器分辨率的限制,微小目标在辐射图像中几乎表现不出来,因此模拟时针对的多是较简单场景中的大目标。本文采用投影法来对大目标进行求交测试,将场景中的目标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目标的投影中来判断射线是否与目标相交,这样可以把三维空间相交判断转化到二维平面上的相交判断,计算表面,此方法对简单场景具有很高的效率。

2.3 关键影响因素

2.3.1 辐射亮温的极化旋转 在进行亮温追踪计算时,必须要考虑亮温的极化信息,这是计算辐射计接收亮温的关键。辐射亮温的极化信息与目标物体的空间分布有关,在研究物体的微波辐射和反射时,入射电场一般要根据入射平面来分解为两个极化分量 E_h 和 E_v ,根据Rayleigh-Jeans近似以及Stokes矢量的定义^[11],亮温的极化信息可表示为

$$\begin{bmatrix} T_h \\ T_v \\ U \\ V \end{bmatrix} = \frac{\lambda^2}{k_B \eta} \frac{\pi r^2}{A} \begin{bmatrix} \langle |E_h|^2 \rangle \\ \langle |E_v|^2 \rangle \\ 2 \cdot \text{Re} \langle E_v \cdot E_h^* \rangle \\ 2 \cdot \text{Im} \langle E_v \cdot E_h^* \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 T_h, T_v, U 和 V 分别为亮温的水平极化分量、垂直极化分量和第三、第四分量; λ, η 和 k_B 分别为波长、波阻抗和波尔兹曼常数。亮温在传播的过程中,其Stokes极化分量会发生变化,这种变化与作用物体的表面分布有关,如何描述这种变化是亮温追踪计算的一个重要内容。

在三维场景中,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, 这些入射平面之间存在一定的倾斜角度, 这样亮温射线要根据在反射面分解成不同的极化分量, 如图 1(a)所示。因此在亮温计算时必须考虑两个反射面之间的极化旋转和耦合的问题。对于两个夹角为 φ 的入射平面, 如图 1(b)所示, 各极化分量之间的旋转关系可以用极化旋转矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} T_{h1} \\ T_{v1} \\ U_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & \sin^2 \varphi & \sin(2\varphi)/2 & 0 \\ \sin^2 \varphi & \cos^2 \varphi & -\sin(2\varphi)/2 & 0 \\ -\sin 2\varphi & \sin 2\varphi & \cos 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{h0} \\ T_{v0} \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

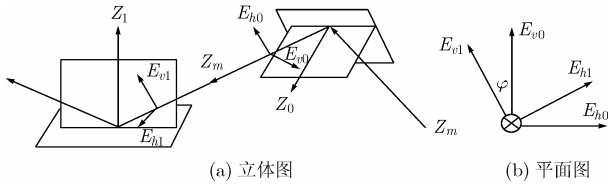


图 1 极化旋转示意图

将这种旋转关系延伸到整条射线路径内, 并且忽略物体的透射时, 亮温追踪的计算公式可表示为

$$\mathbf{T}_A = \mathbf{A}_1(\mathbf{T}_1 e_1 + \gamma_1 \mathbf{A}_2(\mathbf{T}_2 e_2 + \gamma_2 \mathbf{A}_3 \cdots (\cdots + \gamma_{n-1} \mathbf{A}_n(\mathbf{T}_n e_n + \mathbf{T}_s \gamma_n) \cdots)) \cdots) \quad (5)$$

式中 \mathbf{T}_A 为天线接收亮温; \mathbf{A}_i 为第 i 级亮温旋转矩阵; \mathbf{T}_i , e_i , γ_i 分别为第 i 级物体的物理温度、发射率和反射率; \mathbf{T}_s 为环境辐射亮温。成像辐射计主要应用于室外环境, 因此环境辐射一般情况下是指天空背景的辐射。

2.3.2 天空辐射 天空背景辐射是影响辐射图像对比度的关键因素, 模拟时必须仔细分析。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, 致使天空表现出一定的辐射亮温, 其计算公式为^[5]

$$T_{\text{sky}}(\theta) = \sec \theta \int_0^\infty k_a(z) T(z) e^{-\sec \theta \cdot \int_0^z k_a(z') dz'} dz \quad (6)$$

式中 $k_a(z)$ 和 $T(z)$ 分别为大气的吸收系数和热力学温度随高度的变化函数。由于大气尤其是对流层下层受地面扰动影响较大, 大气参数不容易获知, 很难做到精确计算天空辐射亮温。因此在一些场合可以用简化的计算公式来近似计算。当 $k_a(z)$ 和 $T(z)$ 简化为一常数时, 可得到天空亮温公式:

$$T_{\text{sky}}(\theta) = T_{\text{atm}} (1 - e^{\ln(1 - T_0 / T_{\text{atm}}) \sec \theta}) \quad (7)$$

式中 T_0 为天顶辐射亮温; T_{atm} 为大气物理温度。图 2 画出了部分波段的天空亮温曲线, 与文献[2]中的结果一致。从图中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。天顶角度的大气路径最短, 大气吸收最少, 因而其辐射亮温也最低。随着天顶角的增加, 大气路径增大, 亮温逐渐增高。由于天空辐射的这种特性, 使得场景中物体表面因反射不同角度的天空辐射而在辐射图像中表现出不同的亮温信息。

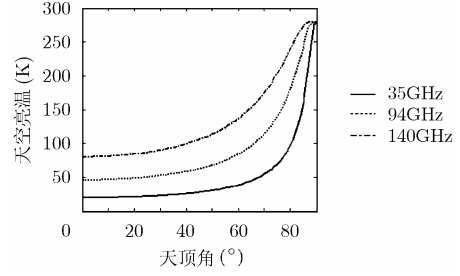


图 2 天空辐射亮温曲线

2.3.3 天线影响 模拟辐射计的最终输出图像, 还必须考虑天线的影响。首先考虑天线的响应公式, 当天线对准 (θ', ϕ') 方向观测时, 天线的输出亮温与入射亮温的关系可表示为:

$$T(\theta', \phi') = \frac{A_p}{\lambda^2} \iint_{4\pi} T_{Ap}(\theta, \phi) \cdot F_n(\theta - \theta', \phi - \phi') \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (8)$$

式中 λ 为辐射计工作波长; A_p 为天线有效面积; F_n 为天线的功率方向图。上式表明: 天线输出亮温是天线功率方向图对输入亮温分布的一种加权平均的结果, 可见辐射计的测量图像并不能如实地反映场景的真实亮温分布, 而是受到天线平滑作用后的一种失真图像。从式(8)可知, 考虑天线的影响应当从天线方向图入手, 对于直径为 D 的均匀分布的圆形口径天线, 其理想归一化功率方向图为:

$$F_n(\theta, \varphi) = \left[\frac{2J_1(\pi D \sin \theta / \lambda)}{\pi D \sin \theta / \lambda} \right]^2 \quad (9)$$

式中 J_1 为一阶一类贝塞尔函数, 其半功率波瓣宽度为 $\theta_{3dB} \approx \lambda / D$ 。天线的功率方向图决定着系统的空间分辨率, 同时还影响到成像系统的采样率。根据奈奎斯特采样定理, 采样频率应满足 $f \geq 2f_{\text{max}}$, 而根据瑞利准则, 天线的衍射极限由方向图的半功率波瓣宽度来决定, 因此空间采样间隔应满足 $\theta \leq \theta_{3dB} / 2$, 即一个波束宽度内必须有两个以上的采样点, 才能保证将天线方向图所限定的空间频率范围内的信号特征完全采集到。在图像模拟时, 为了尽量少丢失信息, 亮温射线的角度间隔应当远小于 $\theta_{3dB} / 2$ 。在模拟天线平滑作用时, 根据亮温射线密度将式(8)离散化, 然后根据式(9), 将离散化的天线方向图与原始模拟图进行卷积处理, 从而得出经过天线平滑后的模拟图像。

3 模型验证

3.1 建筑场景模拟

为了对模拟方法的有效性和可靠性进行验证, 首先对实际建筑场景进行模拟, 楼房主体为水泥建筑材料, 相对复介电常数约为 $3.5-1.2i$, 窗户玻璃板的相对介电常数为 5。室内环境可等效为辐射腔体, 并透过窗户向外辐射能量。利用角度分辨率约为 2° 的 X 波段(9.4GHz)综合孔径成像辐射计进行观测, 测量结果和模拟结果如图 3 所示(灰度图像中黑色代表高亮温, 白色代表低亮温)。

测量图像中出现的混叠条纹是由非理想信道的误差所引起的。由于综合孔径成像辐射计的等角度采样方式会造成测量景物的扭曲, 为了进行对比, 模拟时也采用同样的采样

方式。从图3中可以看出模拟图像和实测图像取得了很好的一致,无论从模拟图像还是实测图像中都可以看到:由于天空照射以及观测角度的综合原因,实验楼亮温由底部到顶部逐渐降低,窗户亮温也表现出相同的趋势。由于窗户玻璃的有效反射率要大于建筑的反射率,因此反射冷空照射时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而表现出较高的亮温。

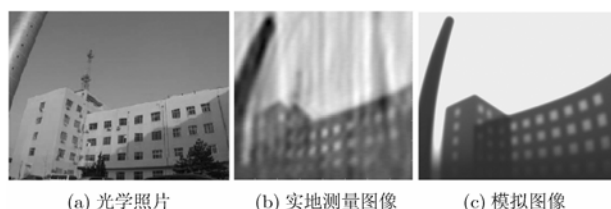


图3 实验楼实测图像与模拟结果

3.2 飞机跑道模拟

为了进一步验证模型,本文对飞机跑道的毫米波辐射图像进行模拟。在94GHz波段飞机跑道仍可以近似为光滑平面,其介电常数近似为 $6-0.1i$,周围裸土为极粗糙表面,可利用朗伯模型来近似处理,其有效发射率约为0.85,模拟时不考虑远处的树林和山脉以及其它细微物体,因为在测量图像中几乎分辨不出这些物体。利用工作在94GHz波段的1.2m孔径和0.3m孔径的卡塞格伦碟形天线辐射计系统对飞机跑道进行扫描观测^[1],观测结果以及相应的模拟图像如图4所示(灰度图像中黑色代表低亮温,白色代表高亮温,与图3相反)。

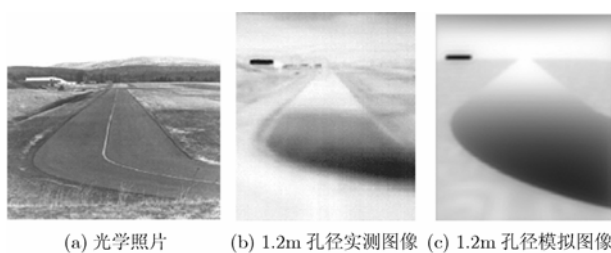


图4 飞机跑道实测图像与模拟结果

从图中可以看到模拟图像很好地再现了实际场景的辐射现象:天空亮温随观测角度的增大而逐渐降低,同时由于观测角度以及天空照射的综合原因,飞机跑道也表现出亮温逐渐变化的趋势。而裸土和草地由于属于极粗糙表面,其辐射亮温随观测角度没有明显变化。值得注意的是,远处修理仓库可以从辐射图像中明显的分辨出来,这是由于其倾斜的金属屋顶正好反射天顶处的冷空辐射,因此在辐射图像中表现出很低的亮温,出现较大的对比度。

4 结束语

本文根据射线追踪的思想,提出了利用亮温追踪的方法

来进行微波辐射图像的模拟,建立了微波辐射图像的生成模型,通过实测图像来进行验证,表明此模型具有很好的应用效果,完全可以再现出各种微波辐射现象,模拟出目标之间的多次反射的细节信息,而且亮温追踪法可以根据实际情况适当调整射线密度,具有很强的灵活性。此外本文重点对图像模拟时必须要考虑的天空背景辐射、亮温极化旋转以及天线平滑作用等关键影响因素进行了细致分析,这些因素将直接影响到模型的输出结果,模拟时必须仔细考虑。本文得出的微波辐射图像生成模型仍有不足之处,对于微粗糙表面的辐射和反射作用的模拟还需要深入分析,一些细节因素还需要进一步完善。

参考文献

- [1] Yujiri L, Shoucri M, and Moffa P. Passive millimeter wave imaging. *IEEE Microwave Magazine*, 2003, 4(3): 39-50.
- [2] Yujiri L and Fornaca S, et al. 140GHz passive millimeter wave video camera. *Passive millimeter wave imaging technology*, Proceedings of SPIE, 1999, Vol.3703: 20-27.
- [3] Salmon N A. Polarimetric scene simulation in millimeter wave radiometric imaging. *Proceedings of SPIE*, 2004, Vol.5410: 260-269.
- [4] Salmon N A. Polarimetric passive millimeter-wave imaging scene simulation including multiple reflections of subjects and their backgrounds. *Proceedings of SPIE*, 2005, Vol. 5989: 354-358.
- [5] Ulaby F T, Moore R K, and Fung A K. *Microwave Remote Sensing I*. Massachusetts: Artech House, 1986, chap.5.
- [6] McKown J W and Hamilton R L. Ray-tracing as a design tool for radio networks. *IEEE Network Magazine*, 1991, 5(11): 27-30.
- [7] Rizk K and Wagen J. Two-dimensional ray-tracing modeling for propagation prediction in microcellular environments. *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, 1997, 46(2): 508-517.
- [8] Rubin S M, and Whitted T. A three-dimensional representation for fast rendering of complex scenes. *Computer Graphics*, 1980, 14(3): 110-116.
- [9] Fujimoto A, Tanaka T, and Iwata K. ARTS: Accelerated Ray-Tracing System. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 1986, 6(4): 16-26.
- [10] Glassner A S. Space subdivision for fast ray tracing. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 1984, 4(10):15-22.
- [11] Tsang L, Kong J A, and Shin R T. *Theory of Microwave Remote Sensing*. New York: Wiley, 1999, chap.2.

张成: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为微波辐射机理及综合孔径辐射计成像算法。

吴季: 男, 1958年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波遥感机理、电磁场理论、微波天线技术、空间探测技术与卫星工程和综合孔径微波辐射计等。