

文章编号 1005-0388(2005)02-0185-04

基于二维天线增益函数的 面目标视在温度反演^{*}

桂良启 黄全亮 郭伟 张祖荫

(华中科技大学电子与信息工程系, 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室,
guilq_yxh@sina.com, 湖北 武汉 430074)

摘要 根据微波辐射测量的基本原理导出了二维天线增益函数的表达式, 指出了基于一维天线增益函数的傅立叶变换递推反演面目标视在温度方法的不足, 提出了一种基于二维天线增益函数的迭代反演法, 并用该方法反演了水面视在温度。结果显示这种反演是必要的, 方法是准确的。

关键词 微波辐射, 视在温度, 二维迭代反演

中图分类号 TP722 **文献标识码** A

Inversion of apparent temperature of extended target using two-dimensional antenna gain function

GUI Liang-qi HUANG Quan-liang GUO Wei ZANG Zu-yin

(Key Laboratory of State Education Ministry for Image
Processing and Intelligent Control, Department of Electronics and
Information, HUST, guilq_yxh@sina.com, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract A mathematical expression of two-dimensional antenna gain function is worked out from the basic principle of microwave radiometry. The deficiency of Fourier transform recursion method for the inversion of extended targets apparent temperature (T_{AP}), which is based on one-dimensional antenna gain function, is analyzed. Then, an iteration inversion method is presented by using two-dimensional antenna gain function. The inversion results of T_{AP} of water surface show the availability of the presented method.

Key words microwave radiation, apparent temperature, two-dimensional iteration inversion

1 引言

微波辐射特性的研究是被动微波遥感应用的基础。它对微波辐射计工作频率、极化方式和观察角的选择, 对反馈目标特征参数算法的建立, 以及对微波辐射图像的解释都是十分重要的^[1]。

目标的微波辐射特性用亮度温度表征。通常用实验的方法来研究目标微波辐射特性, 但微波辐射

计获得的是目标的天线温度, 要得到其亮度温度必须先经过反演得到视在温度, 再从视在温度中剔除天空的辐射。从天线温度反演视在温度的方法有多种^{[2][3]}, 其中最经典的是 Holms 提出的基于傅立叶变换的视在温度一维递推反演法^[4]。但该方法将天线增益函数简化为一维函数来处理, 这样虽然简单, 但难免引入较大误差。

* 收稿日期: 2004-02-05.

基金项目: 中国航天科技集团科技创新基金(2001-2003)

由此,文中提出了一种基于二维天线增益函数的迭代反演方法。为说明二维反演的必要性和二维迭代反演法的准确性,进行了如下的模拟实验:先通过理论模型建立了水面的视在温度分布,并由天线增益函数计算出天线温度分布,再分别利用一维和二维迭代法反演出视在温度分布。

2 面目标的辐射特性测量原理

面目标是指其尺寸远大于测量波长的平面目标。假定:微波辐射计天线具有圆锥形波束,且主波束效率很高,旁瓣影响可以忽略;场景为平坦的匀质表面;大气向上辐射的影响可以忽略。如图 1 所示,图中点 O 为天线中心在面目标表面(地面)的投影,O₁ 为天线中心,O₂ 为天线主瓣的中心线 O₁O₂ 与地面的交点,椭圆形 M 为天线主瓣所观测的区域,辐

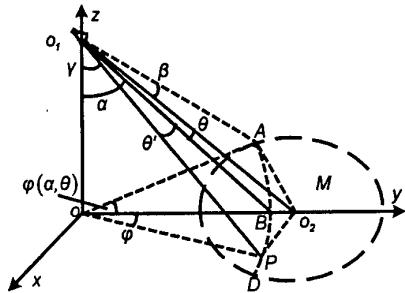


图 1 面目标辐射特性测量的几何关系图

射计在 yz 平面内扫描。这时天线温度 $T_A(\alpha)$ 为主波束范围 M 内视在温度 $T_{AP}(\gamma)$ 按天线增益函数 $G(\theta)$ 加权积分的归一化值^[5],即:

$$T_A(\alpha) = \int_M T_{AP}(\gamma) G(\theta) d\Omega \quad (1)$$

本文采用近似公式 $G(\theta) = G_0 e^{-b\theta^2}$, b 值对应不同的天线, G_0 为归一化常数。由于目的是从天线的温度反演出目标视在温度,因此在计算式(1)中积分的时候,可采用如下形式的立体单元:

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2)$$

于是对式(1)进行积分变换可得:

$$T_A(\alpha) = \int_{-\beta}^{\beta} T_{AP}(\alpha + \theta) G'(\alpha, \theta) d\theta \quad (3)$$

其中

$$G'(\alpha, \theta) = \begin{cases} \int_0^{\pi/\alpha, \theta} 2\sin(\alpha + \theta) G(\theta') d\varphi & \alpha + \theta > 0 \\ 0 & \alpha + \theta \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\theta' = \arccos(\cos\alpha\cos(\alpha + \theta) + \sin\alpha\sin(\alpha + \theta)\cos\varphi) \quad (5)$$

$$\varphi(\alpha, \theta) = \begin{cases} \arccos \frac{\cos\beta - \cos\alpha\cos(\alpha + \theta)}{\sin\alpha\sin(\alpha + \theta)} & 2\alpha + \theta > \beta \\ \pi & 2\alpha + \theta \leq \beta \end{cases} \quad (6)$$

式中: α 为天线主瓣的中心线与地面法线(地垂线)的夹角; β 为第一零点天线波束宽度的一半; P 为区域 M 内任意一点; θ' 为 O_1P 与 O_1O_2 的夹角; O_1P 代表 P 点向天线辐射的方向; φ 为 OP 与 y 轴的夹角;弧 APD 为以 O 为圆心以 OP 为半径的圆与 M 所交的圆弧,该圆弧上的点向天线辐射的方向与地垂线的夹角和 P 点的相同,并都在主波束范围内; B 为弧 APD 与 y 轴的交点; θ 为 O_1B 与 O_1O_2 的夹角; $\varphi(\alpha, \theta)$ 为圆弧 APD 对 O 点所张的角的一半。

3 迭代法反演视在温度

文献[6]中用傅立叶变换递推法来反演视在温度时,直接将 $G'(\alpha, \theta)$ 近似为 $G(\theta)$,这样势必引入误差。如果不作近似直接由(3)式反演目标的视在温度势必提高反演精度,但 $G'(\alpha, \theta)$ 与 α 有关, $G'(\alpha, \theta)$ 与 $T_{AP}(\alpha + \theta)$ 乘积的积分不能描述为卷积关系,傅立叶变换递推法就不再适用了,为此提出如下二维迭代反演目标视在温度的方法。

首先将角度离散化, $\alpha = i\beta/N$, $\theta = j\beta/N$, 代入(3)式有:

$$T_A(i) = \frac{\beta}{N} \sum_{j=-N}^N T_{AP}(i+j) G'(i, j) \quad (7)$$

以天线温度 T_A 为视在温度 T_{AP} 的初值,并用如下迭代式

$$T_{Ak}(i) = \frac{\beta}{N} \sum_{j=-N}^N T_{APk}(i+j) G'(i, j) \quad (8)$$

$$\Delta T_{Ak}(i) = T_{Ak}(i) - T_A(i) \quad (9)$$

$$\Delta T_{APk}(i) = \frac{\beta}{N} \sum_{j=-N}^N \Delta T_{Ak}(i+j) T_{APk(j)} G'(i+j, i) / T_{Ak}(i+j) \quad (10)$$

$$T_{APk+1}(i) = T_{APk}(i) + \Delta T_{APk}(i) \quad (11)$$

在迭代的停止条件得到满足时停止迭代。文中采用了如下的停止判据:视在温度的最大相对误差小于 0.01,即

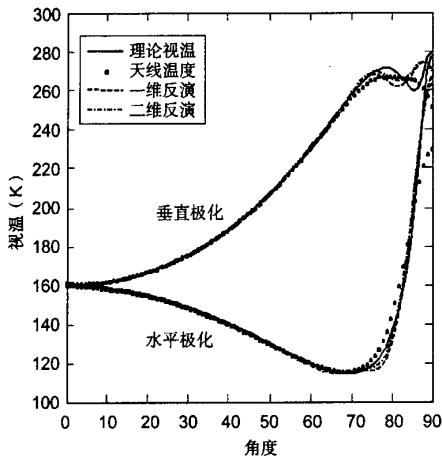
$$\max\{|\Delta T_{Ak}(i)/T_{Ak}(i)|\} < 0.01 \quad (12)$$

同时,一维的迭代反演方法与二维的迭代反演方法基本相同,只需将(7)至(11)式中的 $G'(i, j)$ 换

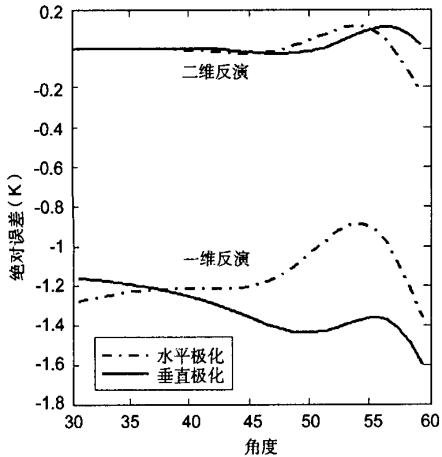
为 $G(j)$ 即可。

4 模拟计算和结果分析

同其它目标相比,水面亮度温度的理论模型更为准确,因此它经常被用来验证视在温度反演方法的准确性。为避免对迭代反演进行边缘修正,假设有一理想场景:下面全是水面,上面全是天空,选垂直向下为 0° 方向,则 $0^\circ\sim 90^\circ$ 和 $270^\circ\sim 360^\circ$ 为水面, $90^\circ\sim 270^\circ$ 为天空。然后用理论模型^[7,8]计算水面和天空的视在温度得到 360° 范围内的理论视在温度分布。则其天线温度可由(7)式计算得到。然后再用(8)~(11)式迭代计算得到反演后的视在温度。



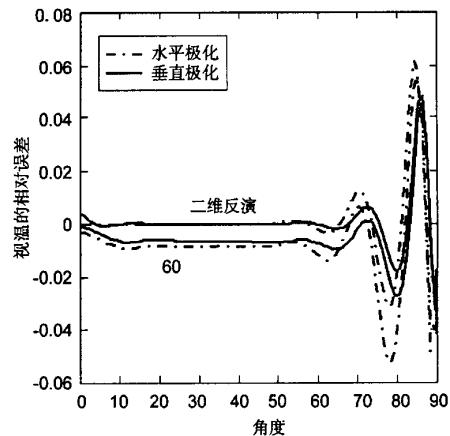
(a) 理论视温、天线温度和反演后的视温



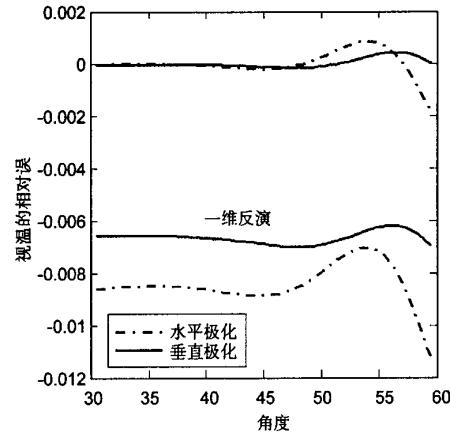
(c) 实用范围内视温的绝对误差

为说明二维反演的必要性和准确性,同时给出了一维迭代反演的结果。这里没有用傅立叶变换递推法比较一维和二维的差别,主要是考虑到尽量减少不同反演方法带来的影响。需要指出的是,在一维迭代反演中所用天线温度与二维迭代反演的相同,即都是由(7)式计算得到的,而不是由简化了一维模型计算得到的,这样更准确。

图2给出了一维和二维迭代法反演水面视在温度的比较。模拟计算中用到的一些参数如下:水面和天空温度均假设为 20°C ,测量频率为 35GHz ,天线的第一零点波束宽度为 20° ,天空的垂直亮温为 25K ,水的含盐度为0,迭代次数为15次。



(b) 反演后的视在温度的相对误差



(d) 实用范围内视温的相对误差

图2 一维和二维迭代法反演水面视在温度的比较

从图中可以看到:一维和二维迭代法反演出的视在温度与由理论计算出来的原始视在温度在 $0^{\circ}\sim75^{\circ}$ 范围内很接近,均相对误差 δ 小于2%,在 $75^{\circ}\sim90^{\circ}$ 范围内(约在布儒斯特角附近),即原始视在温度变化最大的区间,反演的相对误差较大,这是因为用于模拟计算的天线的波束宽度较宽,它对水面原始视在温度随角度的分布有平滑作用^[8],这样天线温度中反映视在温度快速变化的高频信息被滤掉了,因而再由它来反演视在温度必然带来较大误差。

因此,把一维和二维反演方法的比较放在视在温度变化相对平稳的实用范围 $30^{\circ}\sim60^{\circ}$ 内,可以发现:一维反演的相对误差小于1.1%大于0.6%,绝对误差 ΔT_{AP} 小于1.6K大于0.8K,已大于辐射计的灵敏度0.5K,这显然是由于模型的简化引起的;而二维反演的相对误差小于0.2%,绝对误差小于0.2K,几乎比一维反演的误差小一个数量级。由此可以看出,二维反演变换比一维反演变换更准确。

5 结论

经过模拟计算和结果分析,可以得出以下结论:

1. 一维和二维反演方法的比较应放在视在温度变化较平稳的范围内进行;

2. 一维反演对天线增益函数做的简化引入了较大系统误差,大于由辐射计灵敏度引起的误差,故不能达到精确反演的要求;

3. 二维反演考虑了天线增益函数的二维性,因此误差较小。在视在温度变化较平稳的地方其相对误差远小于由辐射计灵敏度引起的误差,能胜任精确反演任务。

参考文献

- [1] 金亚秋,颜锋华,梁子长. 微波辐射计对月面特征参数的遥感理论模拟[J]. 电波科学学报,2003,18(5):477~486.
Y Q Jin, F H Yan, Z C Liang. Simulation for remote sensing of the lunar soil and rock by using multi-channels microwave radiometers[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(5): 477~486.
- [2] 黄全亮,张祖荫,郭伟,等. 微波辐射特性研究概览[J]. 遥测遥控,2001, 22(5):59~63.
- [3] 袁苇,李宗谦,刘宁,等. 基于双谱模型的被动微波遥感土壤湿度反演[J]. 电波科学学报, 2004, 19(1):1~6.

W Yuan, Z Q Li, N Liu, et al.. Passive microwave remote sensing for soil moisture retrieval based on bi-spectrum scattering model[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(1):1~6.

- [4] J J Holmes, C A Balanis, W M Truman. Application of Fourier transformFs for microwave radiometric inversion[J]. IEEE Trans. 1975, AP-23 (11): 797~806.
- [5] F T Ulaby, R K Moore, A K Fung. Microwave remote sensing , Vol. 1[M]. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1981, 203~208.
- [6] Li Qingxia, Guo Wei, Zhang Zuyin. Models for the brightness temperature of extended targets at mm wave frequency[J]. Int. J. Infrared & Millimeter Wave, 1998, 19(9): 1247~1253.
- [7] Li Qing-Xia. The error of brightness temperature of sea water caused by the error of dielectric constant[J]. Int. J. Infrared & Millimeter Wave, 1997, 19(12): 2369~2373.
- [8] 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.



桂良启 (1975—),男,安徽人,华中科技大学电子与信息工程系博士生,主要研究方向为微波遥感器件的研制、微波遥感信息和图像处理。



黄全亮 (1973—),男,湖北人,华中科技大学电子与信息工程系博士,主要从事微波遥感信息和图像处理方面的研究。



郭伟 (1960—),男,湖北人,华中科技大学电子与信息工程系教授。主要从事微波技术、微波遥感、成像技术、移动通信等方面的研究工作。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>