

微波辐射测量技术及应用

微波辐射测量技术 及应用

张祖荫 林士杰 著

.4598

586

出版社



电子工业出版社

7-100/10
506

微波辐射测量技术及应用

张祖荫 林士杰 著

电子工业出版社

(京)新登字 055 号

内 容 简 介

本书主要论述微波辐射测量学的基本原理和应用情况。

全书共分五章。第一章是引论,介绍微波辐射测量学的特点及发展情况。第二章论述微波辐射测量学的基本理论。第三章分别叙述各种微波辐射计的工作原理、特点、分析和设计方法。第四章讨论主要探测对象的微波辐射特性以及由微波辐射测量数据反演被测对象的视在温度的方法。第五章综述微波辐射测量技术在遥感、制导、医疗诊断和噪声测量等方面的应用。

本书可供从事微波遥感、毫米波制导、医用微波温度记录仪和微波噪声测量的科技人员以及高等院校有关专业的教师和高年级学生阅读参考。

D014/12

微波辐射测量技术及应用

张祖荫 林士杰 著

特约编辑:张成全

*

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路 173 信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

电子工业出版社计算机排版室 排版

北京科技印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:13.25 字数:339 千字

1995 年 2 月第一版 1995 年 2 月第一次印刷

印数: 1000 册 定价:16.00 元

ISBN7-5053-2778-X/TN·806

前 言

从 1979 年开始,我们陆续承担了一些无源微波遥感、主动被动微波制导、地物及目标的微波辐射特性、微波医疗和诊断以及微波噪声测量等方面的科研课题。根据科学研究工作的体会和当前人才需求的状况,我们在大学本科生和硕士研究生中分别开设了“微波遥感概论”选修课程和“微波遥感原理”专业课程。十多年的科研和教学工作的实践,使我们认识到微波辐射测量作为一门综合性的科学技术,近几十年来取得了飞速的发展,由于它具有一系列独特的优点,因而具有广阔的应用前景。

但是,微波辐射测量需要论述的基本内容,目前大都分散在有关的专著和浩瀚的文献之中,这对于全面了解和深入研究微波辐射测量中的有关问题,都是很方便的。为了给从事微波辐射测量技术工作的读者提供学习和参考的方便,我们在科研和教学实践的基础上编写成本书。主要论述以下四个方面的内容:

1. 微波辐射测量的基本原理

包括各种辐射量的定义和表述形式;天线在辐射测量中的作用;微波辐射的机理,辐射传递理论,一些典型媒质的发射率或视在温度等。

2. 微波辐射计

包括各种程式微波辐射计的工作原理,特点,设计方法及主要技术指标的分析、计算和测量等。

3. 地物和大地的微波辐射特性

包括大气、海洋、土壤、植被层和冰雪的微波辐射特性;从微波辐射特性的测量数据中反演被测物质视在温度的方法等。

4. 微波辐射测量技术的应用

介绍微波辐射测量技术在遥感、制导、医疗诊断和噪声测量等领域中的应用现状和发展趋势。

射电天文学本来是微波辐射测量学最早的应用领域,但因为已形成独立的学科,有很多专著进行了详细的论述,故本书中不涉及这方面的内容。

本书第二章、第四章、3.12节和 5.1节由林士杰编写,其它部分由张祖荫编写。

微波辐射测量学还在继续向前发展,应用的领域将会越来越广泛,从事这一方面研究工作的人员将会日益增多。我们希望这本书能为推动微波辐射测量学的继续发展,尽微薄之力。但由于我们能力有限,本书的缺点和错误亦在所难免,诚请读者予以指正。

编者

1994年8月

目 录

第一章 引论	(1)
1.1 微波辐射测量学的研究内容	(1)
1.2 微波辐射测量学的特点	(2)
一、微波波段的特征	(2)
二、微波辐射信号的特征	(5)
三、物体的微波辐射特性	(7)
四、微波辐射计	(7)
1.3 微波辐射测量学的应用简介	(8)
第二章 微波辐射测量的基本原理	(10)
2.1 辐射量	(10)
2.2 物质电磁辐射的基本概念	(12)
2.3 热辐射的基本定律	(14)
2.4 天线的基本参数	(16)
一、天线的辐射方向图	(17)
二、立体角和波束效率	(18)
三、波束宽度	(19)
四、方向性系数	(20)
五、有效面积	(20)
六、增益	(20)
2.5 功率与温度的对应关系	(21)
2.6 非黑体的辐射	(23)
一、亮度温度	(23)
二、视在温度	(24)
三、天线温度	(25)
2.7 天线效率对微波辐射测量的影响	(26)
2.8 辐射传递方程	(28)
2.9 吸收和散射媒质的视在温度	(31)
一、源函数的表达式	(31)
二、辐射传递方程的通解	(32)
2.10 大气和地面的视在温度	(33)
一、大气的辐射	(33)
二、地物的视在温度	(34)
三、复杂地物的视在温度	(35)
2.11 地面的发射和散射	(36)
一、镜面的反射和透射	(37)
二、均质等温媒质表面的亮温	(40)

2.12 媒质介电常数垂直分布不均匀的地物表面亮度温度	(42)
一、相干法	(42)
二、非相干法	(45)
2.13 粗糙表面的发射率	(50)
一、微分散射系数	(50)
二、发射率与微分散射系数的关系	(51)
三、表面的视在温度	(53)
第三章 微波辐射计	(55)
3.1 接收机的等效噪声温度	(55)
一、等效噪声温度	(55)
二、噪声系数和等效输入噪声温度	(56)
三、级联系统的噪声系数	(56)
四、衰减器的噪声特性	(58)
五、辐射计的等效系统噪声功率和噪声温度	(59)
3.2 全功率辐射计	(60)
3.3 狄克辐射计	(62)
3.4 微波辐射计灵敏度的分析	(64)
一、等效电路	(65)
二、各级电压和功率谱	(65)
三、 \bar{V}_r 的计算方法	(67)
四、 σ_r^2 的计算方法	(69)
五、狄克辐射计的灵敏度	(71)
六、 B 和 τ 的物理意义	(73)
3.5 零平衡反馈辐射计	(74)
一、连续噪声注入法	(74)
二、脉冲噪声注入法	(75)
3.6 脉冲噪声注入零平衡辐射计的分析	(77)
一、系统的传递函数	(77)
二、系统响应	(80)
三、等效噪声带宽和等效积分时间	(80)
3.7 双参考温度辐射计	(81)
3.8 周期定标全功率辐射计	(85)
3.9 微波辐射计设计中的基本问题	(89)
一、工作频率和带宽	(89)
二、狄克输入开关、噪声源和参考负载	(90)
三、接收机的前端	(91)
3.10 微波辐射计的定标技术	(93)
一、接收机与其天线分别定标的方法	(93)
二、利用已知天线温度的定标方法	(100)
3.11 微波辐射成像的一般问题	(101)
一、空间分辨率	(101)
二、扫描方式	(102)
三、数据率	(103)

3.12 干涉测量法综合孔径微波成像辐射计	(106)
第四章 地物和大气微波辐射特性	(113)
4.1 海洋的微波辐射特性	(113)
一、平静海面的亮度温度	(113)
二、风浪海面的亮度温度	(117)
三、海面油膜对海面亮温的影响	(121)
4.2 冰雪的微波辐射特性	(124)
一、海冰	(124)
二、雪堆	(126)
4.3 土壤和植被层的微波辐射特性	(130)
一、土壤介电常数与湿度的关系	(130)
二、潮湿土地的亮度温度	(135)
三、植被土地的亮度温度	(138)
4.4 大气的微波辐射特性	(141)
一、大气的物理性质	(141)
二、晴空大气的微波吸收和发射	(144)
三、云和雨的消光系数	(152)
4.5 从微波辐射测量数据中反演地物的视在温度	(157)
一、天线辐射方向图对亮温分布的平滑作用	(157)
二、应用傅里叶变换法反演地物亮温	(159)
三、应用 Backus-Gilbert 理论的反演方法	(161)
第五章 微波辐射测量技术的应用	(166)
5.1 微波辐射测量技术在地球环境遥感中的应用	(166)
一、概述	(166)
二、海洋无源微波遥感	(168)
三、陆地无源微波遥感	(172)
四、大气无源微波遥感	(174)
5.2 微波辐射测量技术在军事上的应用	(176)
一、概述	(176)
二、金属目标天线温度对比度的理论分析	(178)
三、目标天线温度对比度的缩比模拟测量法	(183)
四、立体目标的等效辐射截面和等效辐射截面系数	(185)
5.3 微波辐射测量技术在医学上的应用	(187)
一、概述	(187)
二、人体组织的介电特性	(189)
三、医用微波辐射计的特点	(193)
5.4 微波噪声测量	(195)
一、概述	(195)
二、标准噪声源	(197)
三、比较网络对噪声测量的影响	(200)
四、噪声温度的计算及精度	(203)
参考文献	(205)

第一章 引 论

1.1 微波辐射测量学的研究内容

“辐射测量学”(Radiometry)是指非相干辐射电磁能量的测量。因此,微波辐射测量学(Microwave radiometry)是关于微波频段内非相干辐射电磁能量测量的一门科学和技术。

从本质上讲,电磁辐射是由于电场或磁场的大小或方向随时间的变化而产生的。根据这一观点,自然界的任何物体,均可在一定的条件下产生电磁辐射。例如,一根磁棒在围绕着某一轴线旋转的条件下,就会产生频率等于旋转频率的电磁辐射;金属导体在馈送交流电源的条件下,就会产生与交流电源频率相同的电磁辐射,而且这就是制造各种微波天线的基础;各种气体、液体、固体、等离子体,在受到热、光、电等激发时,由于其微观结构中基本带电粒子的振动、转动情况发生变化或电子能级跃迁的作用,亦会产生各种性质不同的电磁辐射。

任何一个辐射体,如果辐射出的电磁波的波分量振幅和相位对时间是常数,可以写成如下的向量形式

$$E(z) = \hat{x}E_{x0}e^{-j\beta z} + \hat{y}E_{y0}e^{-j\beta z + j\theta} \quad (1.1)$$

则称之为相关波或完全极化平面波。如果物体发射的电磁辐射是由许多不同极化并统计独立的电磁波叠加组成的,且覆盖宽的频带。我们称它为非相干的或无极化的电磁波。在这两种极端情况之间,还存在部分相干波或部分极化波。

为了鉴别平面波的极化状态和相干程度,可引入用向量表示的 x 和 y 分量间的归一化互相关值作为判据。归一化互相关值定义为

$$\rho_{xy} = \left| \frac{\langle E_x E_y^* \rangle}{(\langle |E_x|^2 \rangle \langle |E_y|^2 \rangle)^{1/2}} \right| \quad (1.2)$$

其中 $\langle \dots \rangle$ 是平均算子。当场分量的幅度和相位是时间的函数时,则需作以下的平均计算

$$\langle \dots \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \dots dt$$

当 $\rho_{xy} = 1$, 这种波是相关的; $\rho_{xy} = 0$, 则是非相干波, 如果 $0 < \rho_{xy} < 1$, 这种波是部分相干波。

对于式(1.1)所示的相干波,波分量的幅值和相位不是时间的函数,而是一个常数

$$\begin{aligned} E_x &= E_{x0}e^{-j\beta z} \\ E_y &= E_{y0}e^{-j\beta z + j\theta} \end{aligned}$$

将波分量代入式(1.2)得出

$$\rho_{xy} = \frac{|E_{x0}E_{y0}e^{-j\theta}|}{|E_{x0}||E_{y0}|} = 1$$

因此,这是相干波,单频或多频发射计发射的信号属于这种类型。

为了用式(1.2)来判断自然辐射的相干程度,必须先作某些限定。工作频率为 ω 的天线在窄带 $\Delta\omega$ 内接收自然辐射时,由于带宽相对于工作频率 ω 很窄,被接收信号的频谱分量处于 ω 的邻近处。因而可以将它看作一个准单色的平面波。这就是说,可以把接收到的信号当作幅度和相位随时间缓慢变化的单频平面波处理,在此条件下,可以用向量形式表述这样的电磁波,

即

$$\begin{aligned} E(z) &= \hat{x}E_{x0}(t)e^{-j\beta z + j\theta_x(t)} + \hat{y}E_{y0}(t)e^{-j\beta z + j\theta_y(t)} \quad (1.3) \\ E_x &= E_{x0}(t)e^{-j\beta z + j\theta_x(t)} \\ E_y &= E_{y0}(t)e^{-j\beta z + j\theta_y(t)} \end{aligned}$$

将波分量代入式(1.2)得出

$$\langle E_x E_y^* \rangle = \langle E_{x0}(t) E_{y0}(t) e^{j\theta_x(t)} e^{-j\theta_y(t)} \rangle$$

对于物体的自然辐射而言, $E_{x0}(t)$, $E_{y0}(t)$, $\theta_x(t)$ 和 $\theta_y(t)$ 是统计独立的随机时间函数, 从而有

$$\langle E_x E_y^* \rangle = \langle E_{x0}(t) \rangle \langle E_{y0}(t) \rangle \langle e^{j\theta_x(t)} \rangle \langle e^{-j\theta_y(t)} \rangle$$

自然辐射的随机幅度函数的均值为零, 相位函数随机分布在 $(0 \sim 2\pi)$ 内, 因而有 $\rho_{xy} = 0$ 。这表明, 物体发射的自然辐射是非相干的。

宇宙间各种物体发射的这种非相干辐射, 由于它是自然发生的, 其频率扩展到整个电磁波谱, 具有“似噪”的特性, 类似于接收机各部件产生的噪声功率。因此深入研究这种辐射的辐射机理, 数学模型、传输特性, 接收测量设备以及信号的处理和判读方法, 具有非常重要的实用价值。微波辐射测量学的基本内容, 也就是要在微波波段的范围内, 逐步地解决这些问题, 并进而将研究的成果, 应用到射电天文学, 遥感技术, 生物电磁学、噪声测量和军事科学等领域之中。

从微观上研究各种物体发射的自然辐射机理, 显然是一个十分复杂的问题。但是在宏观上可以通过“热辐射”理论, 解释各种物体中呈现的最基本的自然辐射现象。所有的物体可以吸收或反射, 或者同时吸收和反射投射到其上的电磁能量, 例如“黑体”全部吸收投射来的能量, 理想的光滑金属体则是全反射体, 大量的实际物体均属“灰体”, 它们同时存在着吸收和反射现象。根据热力学的基本观点, 物体吸收了投射到其上的电磁能, 将转化为热能使物体的温度上升。当它们的温度上升到某一个与周围的环境处于热力学平衡的温度时, 由于温度不再继续上升, 则势必将其吸收的能量全部以“热辐射”的形式发射出来。由此可以得出如下结论: 所有温度处于绝对零度以上的物体, 均存在电磁辐射; 在热平衡条件下, 其吸收和辐射能量的速率相同。黑体是一个理想的吸收体, 当然也是一个理想的发射体。1901年, 普朗克在物质量子理论的基础上提出了定量描述黑体辐射特性的普朗克定律, 从而为我们研究物体的辐射特性提供了一个标准。相对于这一标准, 可以表述各种物体的辐射。理想的光滑金属导体虽然本身不吸收也不发射电磁能量, 但仍然存在全部反射来自其它物体的辐射。大量的“灰体”——实际物体, 由于其表面和内部的结构及介电常数和温度的空间分布不同, 因而其发射, 吸收和散射的电磁波谱, 极化情况及随观测角的变化规律均不一样。研究这些特性及其应用, 是微波辐射测量学的重点。

1.2 微波辐射测量学的特点

一、微波波段的特征

如上所述, 各种物体发射的自然辐射, 其频率遍布整个电磁波谱。通常将频率为 $0.3 \sim 300\text{GHz}$, 波长为 $1\text{m} \sim 1\text{mm}$ 的这一段很窄的范围定义为微波波段, 如图 1.1 所示。

在微波波段内, 还存在着多种用不同英文字母分别表示的更窄的波段划分方案。方案之一也列于图 1.1 中, 更详细的波段频率数据如表 1.1 所示。这一段频率范围内的电磁波, 具有以下特点:

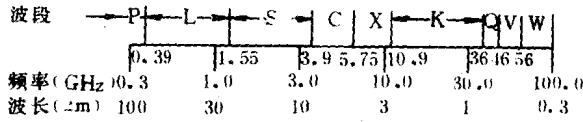


图 1.1 微波谱

表 1.1 波段名称(GHz)

P	0.225-0.390	K	10.90-36.0
L	0.390-1.550	Q	36.0-46.0
S	1.550-4.20	V	46.0-56.0
C	4.20-5.75	W	56.0-100
X	5.75-10.90		

1. 晴空大气层的透射率

在 1~300GHz 的频率范围内,晴空大气层的透射率如图 1.2 所示,存在着一些窗口频率和吸收带。因此,微波辐射测量必须根据不同的用途,选择不同的工作频率。例如,为了测量大气中水蒸汽的特性,必须选择 22GHz 的中心工作频率。为了从地面上测量大气层外的各种辐射现象或者相反,则必须选择各窗口频率作为中心工作频率。另外,在整个微波波段,各种形式的微波辐射测量、雷达、通信设备和军用制导系统均可使用这一频率资源。而且,微波辐射

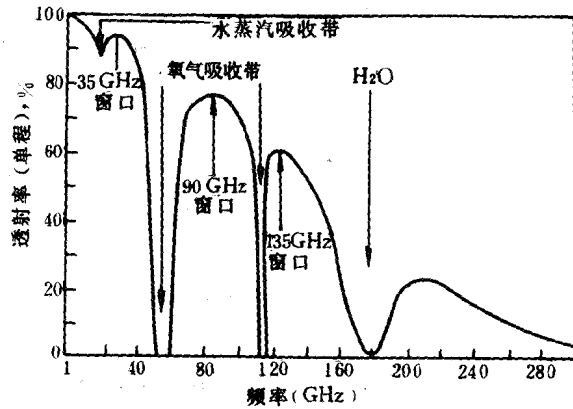


图 1.2 晴空条件下,沿垂直方向穿过地球大气层的透射率

测量设备是无发射机的,其它大都是有发射机的,为了防止干扰,人们进行了频率分配,在其中的某些频率范围内禁用发射机,保护微波辐射测量,特别是射电天文观测的正常工作。具体的频率分配方案列于表 1.2。在确定微波辐射测量工作频率时,必须注意这些规定。

表 1.2 微波辐射测量的频率范围

0.404 ~ 0.406a	10.68 ~ 10.70a	50.2 ~ 50.4p	164 ~ 168a
1.370 ~ 1.400s	15.20 ~ 15.35s	51.4 ~ 54.25a	174.5 ~ 176.5p
1.400 ~ 1.427a	15.35 ~ 15.40a	54.25 ~ 58.2p	182 ~ 185a
1.6605 ~ 1.6684p	18.6 ~ 18.8s	58.2 ~ 59.0a	200 ~ 202p
2.640 ~ 2.690s	21.2 ~ 21.4p	64 ~ 65a	217 ~ 231a
2.690 ~ 2.700a	22.21 ~ 22.5s	86 ~ 92a	235 ~ 238p
4.2 ~ 4.4s	23.6 ~ 24.0a	100 ~ 102p	250 ~ 252a
4.80 ~ 4.99s	31.3 ~ 31.5a	105 ~ 116a	
6.425 ~ 7.250s	31.5 ~ 31.8p	116 ~ 128p	
10.60 ~ 10.68p	36 ~ 37p	150 ~ 151p	

- a 为射电天文学提供保护—禁用发射机；
- p 共享，主要服务于有发射机的情况；
- s 共享，主要服务于无发射机的情况。

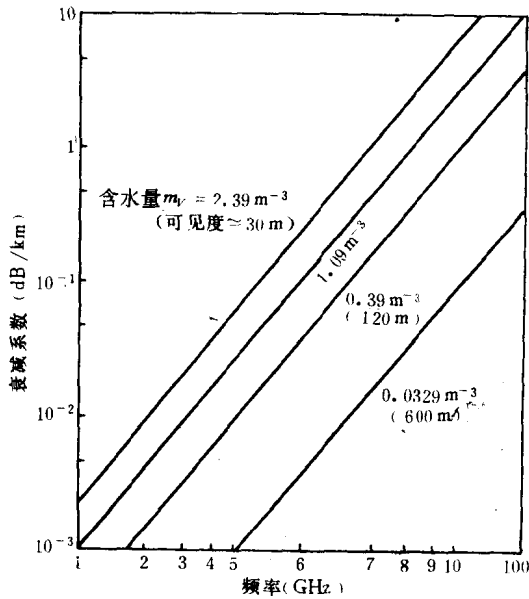


图 1.3 云或雾对微波的衰减

2. 微波穿透云层、雾和小雨的能力

微波具有穿透云层、雾和小雨的能力，而且太阳辐射对辐射测量没有多大的影响。因此微波辐射测量既可在恶劣的气候条件下，也可以在白天和黑夜发挥作用，具有较强的全天候、全天时的工作能力。这一特性优于可见光和红外波段的探测系统。表 1.3 中给出了可见光、红外和微波三个波段，由云和雾引起的衰减。可以看出，毫米波的衰减比红外和可见光小得多。在厘米波段，云和雾引起的衰减更小。这一点可以从图 1.3 看出来。据统计，地球上经常有 40~60% 的地区被云层复盖着，尤其是占地球面积五分之三的海洋上，气候条件变化更大，经常被云层遮蔽。如果在空中采用可见光和红外探测地球则经常得不到地面的信息，而采用微波探测，基本上不受云和雾的影响。雨对电磁波的衰减比云和雾都大，但如图 1.4 所示，在大部分微波频率范围内，雨引起的衰减也比红外和可见光要小。

烟雾和尘埃对微波的衰减比较复杂，目前尚无定量的系统资料，但从烟雾和尘埃对红外波段的衰减特性变化趋势可得出，波长越长，衰减越小。因而可以断言，到微波波段，烟雾和尘埃的衰减亦比红外和可见光小，微波的这一特性，对环境遥感和军事应用，都是十分有利的。

表 1.3 不同能见度下，云和雾在海平面水平路径的衰减率

能见度 (m)	可见光 (0.4~0.7 μ m) (dB/Km)	红外 (8~12 μ m) (dB/Km)	微波	
			(94GHz) (dB/Km)	(37GHz) (dB/Km)
152	120	24	0.88	0.19
305	60	12	0.32	0.062
610	30	6	0.13	0.022
1219	10	3	0.044	0.009

3. 微波穿透被测物体的能力

微波具有一定的穿透被测物体的能力，其穿透植被层的深度，取决于植物的含水量，密度，波长和入射角。如果波长足够长而入射角又接近天底角，则微波可穿透植被区而到达地面。反之则被植被区吸收和反射，而不能达到地面。因此，微波频率的高端(波长较短)只能获得植被层顶部的信息，而微波频率的低端(波长较长)，则可以获得植被区底层甚至地表以下的信息。微波穿透土壤的深度与土壤湿度、类型及工作频率有关，图 1.5 给出了三种频率下不同类型的

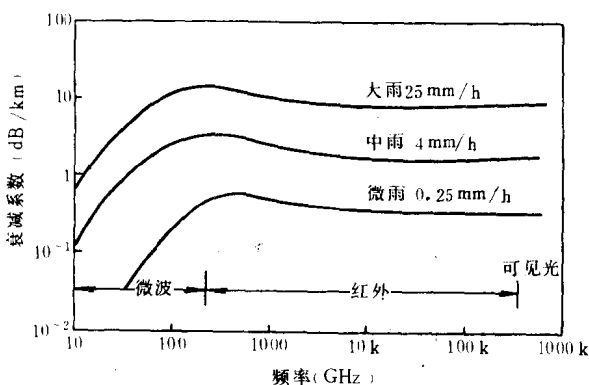


图 1.4 雨的衰减系数与频率的关系

4. 用微波测得的信息与在红外和可见光所测信息的区别

利用微波得到的信息与在红外和可见光波段测得的信息是不同的。例如在可见光近红外波段所观测到的颜色基本上取决于植被和土壤表层分子的谐振特性，而微波波段内观察到的“颜色”则取决于研究对象面或体的几何特性以及体介电特性。因此联合使用这三个波段的信息，其结果可以互相补充，更全面地了解被测物体的特性。另外，微波还可以提供某些附加的特性，这使其在某些应用方面具有独到之处。例如，根据不同类型冰的介电常数不同可以探测海冰的结构和分布；根据含盐度对水的介电常数的影响可以探测海水的含盐量等等。

土壤，其趋肤深度与土壤湿度的关系。图中表明：在土壤从干燥状态开始变潮湿时，趋肤深度急剧变小，而且低频段比高频段更严重；当土壤湿度达到 0.2~0.3 克/立方厘米时，其趋肤深度接近为定值；在微波的低频段，干燥土壤的趋肤深度可达几十米，而在高频端则只有几厘米或更小；当土壤的湿度增加，微波低频段土壤的趋肤深度仍在 10 厘米以上。利用这一特性，使微波辐射探测器可以观测出很多其它的探测器（红外与可见光探测器）不能观测到的现象。例如地质勘探，侦察地下及掩盖层以下的军事目标，人体深部温度的测量等。

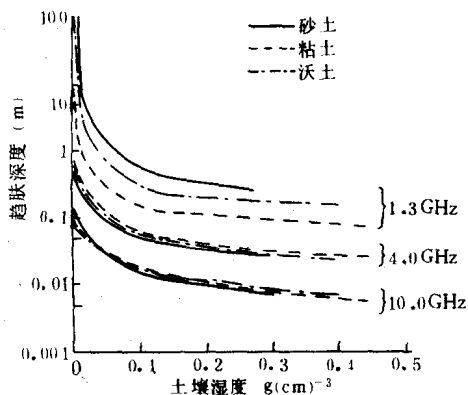


图 1.5 不同类型土壤的趋肤深度与土壤湿度的关系

二、微波辐射信号的特征

1. 物体发射的信号是非相干辐射信号

如上所述，微波辐射测量学研究的是非相干辐射的电磁信号，例如不同物体发射的自然辐射信号，特别是热辐射信号；不同物体发射的热辐射及同一物体不同部位或不同时间发射的热辐射信号，都是不相干的，像噪声一样。因此，在描述这种信号时，不去表述其电磁场强度，而只表述其辐射的平均功率（瓦），功率密度（瓦/米²），辐射强度（瓦/单位立体角）或亮度（瓦/单位立体角·米²）。如果测得的平均功率来自两个辐射源，设其中一个源辐射波的振幅随时间的关系为 $E_1(t)$ ，另一个为 $E_2(t)$ ，则这两个波传递的瞬时功率分别为

$$P_1(t) = ZE_1^2(t)$$

$$P_2(t) = ZE_2^2(t)$$

式中 Z 为传递功率与振幅平方之间的比例常数。在取平均功率读数时，必须取每一段测量时间内所传递的瞬时功率的时间平均值，即

$$P_1 = Z \overline{E_1^2(t)}$$

$$P_2 = Z \overline{E_2^2(t)}$$

式中的横线表示这两个量在测量时间间隔 τ 内的平均值, 现假设这两个波同时投射到探测器上, 其合成波将以振幅 $E_1(t) + E_2(t)$ 作用于探测器, 传递的功率为

$$P(t) = Z[E_1(t) + E_2(t)]^2$$

经过 τ 时间后, 其平均功率为

$$\begin{aligned} P &= Z [\overline{E_1^2(t)} + 2\overline{E_1(t)E_2(t)} + \overline{E_2^2(t)}] \\ &= P_1 + P_2 + 2Z \overline{E_1(t)E_2(t)} \end{aligned} \quad (1.4)$$

由于 $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 是非相干的, 则式(1.4)中第三项将趋于零或可以忽略不计, 故有

$$P = P_1 + P_2$$

这表明, 两个非相干辐射波的合成波, 其平均功率等于这两个波的平均功率之和。

2. 物体的辐射信号都很微弱

各种物体的热辐射信号, 都是十分微弱的。如上所述, 黑体的辐射最强, 根据普朗克黑体辐射定律在微波波段的瑞利-金斯近似表达式, 黑体的光谱亮度 B_f 为

$$B_f = \frac{2kT}{\lambda^2} \quad (1.5)$$

式中, B_f ——黑体的光谱亮度 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \text{Hz}$)

k ——波尔兹曼常数 $= 1.38 \times 10^{-23} (\text{J}/\text{K})$

λ ——波长 (m)

T ——绝对温度 (K)

当黑体温度 $T = 300\text{K}$ 时, 在整个微波波段, B_f 均是一个很小的数值。由于黑体的光谱亮度 B_f 与 T 成正比, 所以为了描述方便, 通常用黑体的热力学温度 T 表征黑体辐射的强度, 不再计算其光谱亮度, 并称黑体的热力学温度即为黑体的亮度温度。对于灰体, 不仅其辐射强度比黑体更小, 而且其 B_f 难以用数学模型计算。但是, 我们仍然可用亮度温度表征灰体的辐射强度, 不过灰体的亮度温度不是其热力学温度, 而是与灰体具有相同辐射强度的黑体的热力学温度, 它总是小于灰体本身的热力学温度。

3. 视在温度

物体本身的微波辐射信号, 取决于物体的几何特性和介电特性。在微波辐射测量学中, 我们主要是通过微波辐射计的天线, 接收不同物体的微波辐射信号。然而在这一过程中, 被测物体本身的辐射信号, 其它物体辐射到被测物体并被散射的信号, 被测物体与辐射计天线之间的传播媒质的辐射信号和衰减作用, 均会对天线接收到的信号产生影响。为了描述这一特性, 引入了视在温度的概念, 其定义方法与物体的亮度温度相同。天线口面的视在温度, 是产生与实际入射到天线口面亮度相同的黑体的热力学温度。

当采用微波辐射计测量物体的微波辐射特性时, 虽然可以尽可能地缩短测量距离而忽略被测物体与辐射计天线之间传输媒质 (主要是大气) 的辐射和衰减, 但却无法避免被测物体散射来自其它物体 (主要也是大气) 的辐射信号。为表述这一特性, 引入了物体的视在温度的概念, 当一个黑体产生的亮度与一个物体自身的辐射和散射来自其它物体的辐射所形成的总亮度相等时, 则黑体的热力学温度就是该物体的视在温度。很明显, 物体的视在温度不仅与物体的几何特性和介电特性有关, 还和环境、天气情况和季节等因素有联系。在实际应用中, 它比描述物体自身辐射特性的亮度温度更有价值。

4. 天线温度

辐射到微波辐射计天线口面的视在温度分布,被天线的方向图加权并在 4π 空间积分后形成天线的输出功率而进入辐射计接收机。可以证明,在微波辐射测量的情况下,无耗天线输出的功率与热力学温度的 T_0 的电阻器产生的有用噪声功率具有相同的形式。因此我们可以用电阻器的热力学温度 T_0 来描述无耗天线的输出功率的大小,并称为天线温度。它与入射到天线口面的视在温度的分布和天线的辐射方向图有关。

亮度温度,视在温度和天线温度,都是表征微波辐射信号特征的度量,它们既有联系又有区别,使用中必须十分注意,其严格的理论分析和表述形式,将在下一章详细介绍。

三、物体的微波辐射特性

微波辐射测量学的基本研究方法是:在掌握不同物体的微波辐射特性的基础上,根据实测的数据来分析被测物体的性质。很明显,掌握不同物体的辐射特性,是一项十分重要的基础研究工作。

如上所述,不同物体辐射的亮度温度,与物体的几何特性和介电特性有关,因此可以用物体的亮度温度作为描述物体自身辐射特性的参量。原则上我们可以根据分层媒质的理论,按照各种物体的几何和介电特性,计算其反射率、发射率,然后由物体的热力学温度、亮度温度和发射率之间的关系,求得物体的亮度温度或视在温度。但在实际上,除了对理想的光滑水面和粗糙表面得出了与实验结果比较一致的半经验计算公式之外,对实际中存在的大量物体,这种方法还有很多困难,正在深入研究之中,本书的第二章和第四章将深入论述这方面的有关问题。另一种获取物体辐射特性的方法是采用微波辐射计进行测量,根据测得的不同物体的天线温度,反演计算出被测物体的亮度温度。由于测得的天线温度不仅和被测物体的性质有关,还和气象、季节、天线等因素有联系,具有很明显的随机性,再加上物体的辐射和辐射计内部的噪声本来就是随机信号,因此测得的天线温度是不确定的,必须进行大量的反复的测量,找出不同条件下天线温度的统计变化规律,然后再进行反演计算,求得物体的亮度温度或视在温度。有关反演计算的方法,将在第四章的第五节中作简要的介绍。

四、微波辐射计

用于测量物体微波辐射能量的仪器,称为微波辐射计。由于它本身不发射信号,只是被动地接收各种物体发射的自然辐射信号,因而既不容易被发现,具有良好的保密性,又能做到体积小,功耗省,成本低。因此具有广泛的应用前景。

如上所述,物体的微波辐射信号是非相干的极其微弱信号,因此与传统的接收相干信号且信噪比总是大于 1 的接收机不同,微波辐射计接收的是比本身噪声功率小得多的各种物体辐射的噪声功率,其实质是一台微波波段的高灵敏度的接收机。它由天线、宽带接收机和数据记录或储存装置等部分组成,能够高度精密地测量出很小的输入噪声功率的变化。

灵敏度又称温度分辨率,它是微波辐射计的主要技术指标。其定义为能够被检测出的最小的天线温度的变化量,它表征了能够被检测出的输入噪声功率的最小变化量。提高灵敏度,主要应该降低辐射计的系统噪声,在条件允许的情况下,也可以增加接收机的高频带宽和整机的积分时间以达到提高灵敏度的目的。

绝对精度是微波辐射计的又一个重要的技术指标,如上所述,微波辐射特性的测量是通过测得的天线温度去反演被测物体的亮度温度或视在温度,因此天线温度的准确与否是非常重

要的。对于绝大多数的线性辐射计系统,均采用两点定标的方法以决定天线温度的绝对数值。因此微波辐射计的绝对精度,主要取决于定标方法的科学性和定标设备的精确程度。关于微波辐射计的其它技术指标和各种结构形式,将在第三章中详细讨论。

1.3 微波辐射测量学的应用简介

微波辐射测量技术最先被用于观测外层空间辐射源的电磁辐射能量。1931年,Jansky 采用定向天线,首先在 14.6 米的波长上,观察到了来自银河方向的噪声电波。从此诞生了射电天文学。1937年,Reber 建造了一架直径为 31 英尺并可转动的抛物面天线,这便是世界上第一台射电望远镜,并且利用这台设备,终于在 1.9 米的波长上也观察到了宇宙辐射现象。此后的五十多年来,射电天文学取得了飞速的发展。其研究方法,观察的内容,射电望远镜的结构等均发生了惊人的变化,促使人类对宇宙的认识,发生了一次新的飞跃。近代天文学有十多项重大发现,其中有许多均是属于射电天文学方面的。例如,1960年发现了类星体,1963年发现了星际分子,1964年发现了宇宙间的微波背景辐射,1967年发现了脉冲星,1972年发现了射电超新星等。可见射电天文学在天文学的研究中起了多么重要的作用。

相对于微波辐射测量学而言,射电天文学已发展成为一门独立的学科,四十年代以来,已出版了不少专著。因此本书不再涉及这方面的内容。只是在论述微波辐射测量学的发展过程时,必须认识射电天文工作者所作的历史贡献。射电天文学中的很多技术,例如孔径合成技术,信号处理技术等,对微波辐射测量学的其它一些应用领域,都是十分有用的。

五十年代末,开始了大地微波辐射测量的研究工作,德克萨斯大学的 Straiton 研究组利用波长为 4.3 毫米用于观测太阳温度和大气衰减的辐射计对地面上的水,树木,草和沥青等进行测量。从此,微波辐射计的天线波束开始“向下”已不再仅仅是“向上”。

过去三十多年间,微波辐射测量学已成为环境遥感总领域的一个组成部分,并称为“被动微波遥感”。对气象,海洋,水文和陆地考查等方面做了大量的研究工作。1962年,人类第一次从飞船高度获取微波辐射测量资料,这一年的 2 月 14 日,水手二号飞船上的工作于 1.35 厘米和 1.9 厘米波长的双通道辐射计,为人类提供了靠近金星的观察资料。1968年,在原苏联发射的宇宙 243 号卫星上,配置了 4 个微波辐射计,首次对地面进行了被动式观察。在此之后,各种形式的星载、机载和地面的微波辐射计,开始在环境遥感的各个方面,行进探索和试验,一些主要的应用列于表 1.4。

被动微波遥感的主要缺点是空间分辨率不高,通过增大天线尺寸或缩短工作波长的方法来提高空间分辨率,在实际上存在很多困难,从而限制了微波辐射计的应用。八十年代末报导的相干合成孔径微波辐射计,将有助于克服这一缺点。

近二十多年来,毫米波辐射计的应用研究已延伸到武器制导领域,这些武器包括导弹、普通炸弹和炮弹。由于微波辐射探测器能够在恶劣的气候条件下和烟尘弥漫的战地环境中昼夜工作,而且结构简单,隐蔽性能好,因而与红外武器及雷达探测器相比较具有特定的优势,其缺点是作用距离较短,信息量较少。在毫米波段,典型的探测距离为几百米到几公里,故主要用于武器的末制导或作为末敏弹。为了增加作用距离和获得的信息量,各种型式复合制导武器也正在研制之中或已投入运用。美国 1987 年装备部队的“黄蜂”导弹,是一个成功的应用毫米波主动与被动复合制导的例证。它是一种小型空地反坦克导弹,采用主动式毫米波雷达导引头自动导引并转接毫米波被动式寻的自动导引,以及高速数字信号处理机,使导弹或以较高的精度直

接命中目标。

表 1.4 微波遥感辐射计的一些应用

水文:	表面油溢的监测
土壤湿度分布用于预报水位和洪水	猛烈风暴:
流域表面的排水特性	热带气旋监测
洪水测绘	(雨图、温度、湿度剖面分布、海水温度和风)
水面识别	猛烈局部风暴
雪盖范围、雪水当量和雪的湿度	(温度和湿度剖面分布,土壤湿度和雨)
农业:	气象学和气候学(主要在海洋上):
土壤湿度分布用于农作物估产和	温度剖面分布
灌溉的调度	集结的水蒸汽
冻融边界的描绘	水蒸汽的剖面分布
极区:	液态水(雨)
海冰类型的监测	海洋温度和表面风速
大陆冰块测绘	平流层、中间层和热成层下层
海洋	大气温度剖面分布
表面风速监测	磁场剖面分布
表面温度监测	大气中气体的相对分布量
表面含盐度监测	

将微波辐射测量技术应用于探测人体电磁辐射,以期获得人体的生物医学的信息,是当前生物电磁学中一个非常活跃的研究领域。虽然很多现象和问题目前尚无明确的答案,还需要经过一段艰苦的研究过程,但是采用不同型式的微波辐射计探测人体深部的温度分布,以期确定肿瘤部位;或者作为人体热疗中的温度监控设备,则已经取得了一些积极的结果。

无论是抑制噪声或者是利用噪声,都会遇到噪声源和噪声测量等有关问题。微波噪声源虽然有很多类型,但标准噪声源都是由高温或低温匹配负载构成,它实际上是一个黑体,其输出的噪声温度等于它的热力学温度。微波噪声测量的主要任务是采用微波辐射计同时测量作为黑体的匹配负载和其它各种待测噪声源输出的噪声温度并进行比较,由于匹配负载输出的噪声温度等于其热力学温度并可以精确测定,从而各待测噪声源输出的噪声温度就可以通过比较而计算出来。另外,微波辐射计的定标,也都是利用噪声温度精确已知的匹配负载进行的。因此微波噪声测量是与微波辐射测量密切有关的。虽然经过五十和六十年代许多学者的精心研究,这项技术已相当成熟,但这些资料分散发表在各种文献中。本书把它作为微波辐射测量学的一个应用方面,在第五章中作了比较系统的介绍。

第二章 微波辐射测量的基本原理

由于物质内部电子能级,振动和转动能级的跃迁,它们能在很宽的频带内发射电磁辐射,或者吸收相应频率的电磁辐射。不同物体发射、吸收和散射电磁辐射的能力是不同的,既与物体表面和其内部的几何结构有关,又与物体内部媒质的介电常数和温度的空间分布状况有关。对于微波无源遥感而言,适当选择微波辐射计的工作波长,极化方式和入射角,接收物体发射和散射的微波辐射,可以从接收辐射信号中分析出被观测物体(目标)的某些特征信息,从而识别被测目标。电磁辐射在媒质中传播与媒质相互作用,呈现出消光过程和发射过程。电磁辐射入射到两种媒质分界面上,将产生散射和透射。本章主要讨论微波辐射测量的重要概念和原理,其中包括物质的微波辐射,辐射传递理论及应用,以及地物的微波发射和散射。

2.1 辐 射 量

在微波辐射测量中,表示辐射量的术语、符号和单位是从微波工程的观点选取的,某些术语和符号与光学和红外辐射测量所采用的有所不同。例如,在微波辐射测量中用功率表示辐射能量通过某一空间位置的时变率,但在光学和红外辐射测量中则用辐射通量。表 2.1 给出基本辐射量的术语、符号、定义方程和单位,也给出了相应的光学和红外辐射所用的术语。某些辐射量的概念、符号和单位是早已熟悉的,如能量 \mathcal{E} (焦耳)和能量密度 \mathcal{E}_v (焦耳每立方米),功率 P (瓦)和功率密度 S (瓦每平方米)等,本节只讨论辐射强度和亮度两个辐射量。

表 2.1 基本辐射量的术语、符号、定义方程和单位

辐 射 量		符号	定义方程	单位名称	单位符号
微波术语	光学术语				
能量	辐射能	\mathcal{E}		焦耳	J
能量密度	辐射能密度	\mathcal{E}_v	$\mathcal{E}_v = \partial \mathcal{E} / \partial v$	焦耳每立方米	J/m ³
功率	辐射通量	P	$P = \partial \mathcal{E} / \partial t$	瓦	W
功率密度	辐射通量密度	S	$S = \partial P / \partial A$	瓦每平方米	W/m ²
辐射强度	辐射强度	F	$F = \partial P / \partial \Omega$	瓦每球面度	W/Sr
亮度	辐射率	B	$B = \partial P / \partial \Omega \partial A$	瓦每平方米每球面度	W/Sr · m ²
发射率	发射率	e	$e = B / B_{bb}$		
反射率	反射比	Γ	$\Gamma = P_r / P_i$		
吸收率	吸收比	α	$\alpha = P_a / P_i$		
透射率	透射比	γ	$\gamma = P_t / P_i$		

在辐射测量中,通常按照辐射源对观测点所张的立体角与接收天线的主波束立体角的相对大小,将辐射源分为点源和面源。当辐射源所张立体角小于天线主波束立体角,则称此辐射源为点源,反之则称此辐射源为面源。

如图 2.1 所示,在坐标原点 O 有一点源,它在 Q 点产生的辐射场的功率密度为 S_r ,在 Q