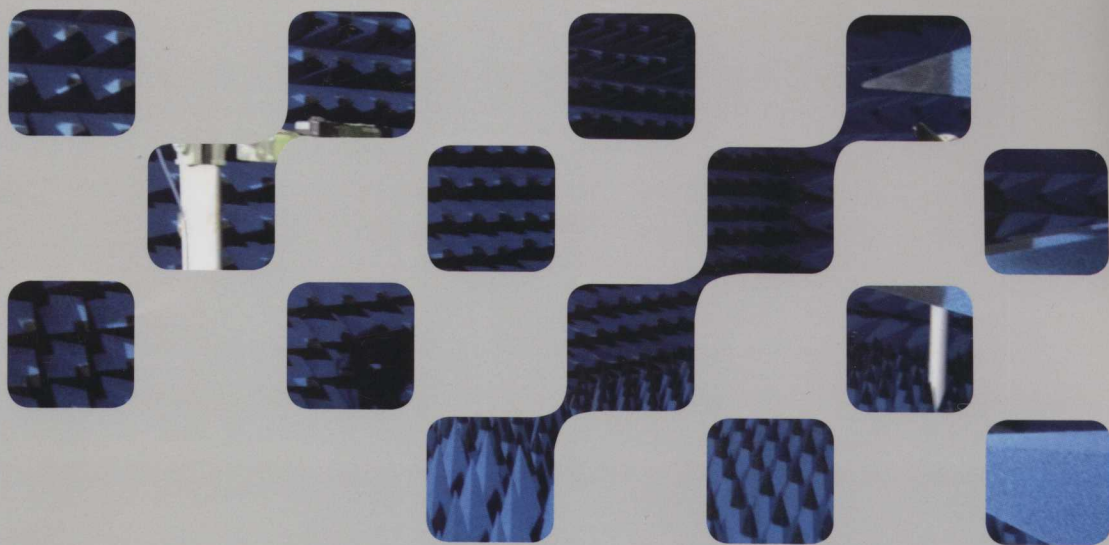


MILLIMETER WAVE AND TERAHERTZ
ANTENNA MEASUREMENT TECHNIQUE

毫米波与太赫兹 天线测量技术

俞俊生 陈晓东 著



科学出版社

毫米波与太赫兹天线 测量技术

俞俊生 陈晓东 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍毫米波及太赫兹频段下天线测量的基本方法及基本原理,特别是对紧缩场测量系统进行了详细的论述。书中涉及的三反镜系统是我国第一套工作于毫米波及太赫兹频段的多反射镜紧缩场系统。

本书适合航空航天、雷达、射电天文探测及电子工程领域从事天线设计及测试的相关研究人员及工程人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

毫米波与太赫兹天线测量技术/俞俊生,陈晓东著. —北京:科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-046026-4

I. ①毫… II. ①俞… ②陈… III. ①微波天线-测量技术 IV. ①TB822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 246805 号

责任编辑:鲁永芳/责任校对:钟 洋

责任印制:徐晓晨/封面设计:耕 者

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 10 月第 一 版 开本:720 × 1000 B5

2015 年 10 月第一次印刷 印张:10 1/2

字数:204 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 毫米波与太赫兹技术的发展与应用	1
1.2 天线远场及近场测量技术	6
1.3 紧缩场天线测量方法	12
1.4 毫米波及太赫兹天线测量	16
参考文献	18
第 2 章 基本理论	20
2.1 坐标系统	20
2.1.1 矢量运算	20
2.1.2 坐标系	22
2.2 天线测量的基本参数	25
2.2.1 辐射功率和辐射电阻	25
2.2.2 天线的效率	27
2.2.3 方向函数	28
2.2.4 方向图	29
2.2.5 方向图参数	31
2.2.6 方向系数	32
2.2.7 增益系数	33
2.2.8 天线极化	34
2.3 天线测量方式	36
2.3.1 天线场区	36
2.3.2 天线远场测量方式	38
2.3.3 天线近场测量方式	39
2.4 平面扫描近场测量基本理论	41
2.4.1 近场测量	41
2.4.2 平面波的展开	41
参考文献	43
第 3 章 紧缩场天线测量方法	44
3.1 紧缩场天线测量方法的理论	44
3.1.1 紧缩场的发展与现状	44

3.1.2	紧缩场指标	45
3.1.3	使用反射镜边缘处理方法减小衍射效应	47
3.1.4	紧缩场测量方法	49
3.2	单反射镜紧缩场天线测量系统	50
3.3	双反射镜紧缩场天线测量系统	51
3.3.1	卡塞格林双反射镜 CATR	51
3.3.2	双抛物柱面反射镜 CATR	52
3.3.3	双赋形反射镜 CATR	53
3.4	单抛物柱面反射镜 CATR	54
3.5	小结	55
	参考文献	55
第 4 章	三反射镜紧缩场测量系统设计原理	57
4.1	三反射镜天线测量系统的结构	57
4.2	三反射镜天线测量系统的设计方法	59
4.2.1	几何光学射线跟踪法	59
4.2.2	三反射镜 CATR 设计步骤	62
4.3	小结	74
	参考文献	75
第 5 章	三反射镜紧缩场测量系统设计实例	76
5.1	三反射镜紧缩场测量系统设计实例	76
5.1.1	卡塞格林-格雷戈里反射形式的紧缩场系统	76
5.1.2	双格雷戈里反射形式的紧缩场系统	81
5.2	三反射镜紧缩场测量系统的参数优化	85
5.2.1	自由量设计	85
5.3	双格雷戈里三反射镜紧缩场天线测量系统的灵敏度分析	88
5.3.1	卡塞格林-格雷戈里紧缩场天线测量系统的灵敏度分析	88
5.3.2	双格雷戈里紧缩场天线测量系统的灵敏度分析	110
第 6 章	微波暗室与射频系统	118
6.1	远场暗室	118
6.2	近场暗室	119
6.3	吸波材料	119
6.4	暗室性能指标参数及其物理含义	122
6.5	暗室设计实例	123
6.5.1	设计原则	123
6.5.2	执行的标准	124

6.5.3	材料选择和布置方案	124
6.5.4	吸波材料的安装方案	124
6.5.5	四侧墙面及顶面	125
6.5.6	地面	125
6.5.7	特殊部位吸波材料的安装	125
6.5.8	通风波导窗	128
6.5.9	接地	129
6.6	毫米波测试仪器	129
6.6.1	目前主流毫米波测试方案介绍	129
6.6.2	紧缩场天线测试系统工作原理	130
6.7	暗室整体	132
第 7 章	三反射紧缩场天线测量系统的性能评估	133
7.1	馈源测试	133
7.2	镜面的加工与测试	134
7.3	静区的测量	136
7.4	对比测量	151
7.5	总结	152
附录一	几何光学法概论	153
	参考文献	159
附录二	物理光学法概论	160

第1章 绪 论

1.1 毫米波与太赫兹技术的发展与应用

毫米波的频率是从 30GHz 开始到 300GHz, 亚毫米波则为 300~3000GHz 的频率区间; 而太赫兹波的分法则不同, 其中一种认为是 0.3~10THz 的频率区间。因此可以认为亚毫米波实际上是太赫兹波段的一部分。从电磁波谱图上可以看到, 如图 1-1 所示, 毫米波与太赫兹波位于微波与红外线之间, 其波长则位于 0.03~10mm。一方面, 这个频段的电磁波波长相对微波来说较短, 其传播特性及系统特性都有不小的差别; 另一方面, 它与更高频段的电磁波相比, 电离能力相对较弱, 因此在一些应用上更有优势, 如成像、生物样品测量。

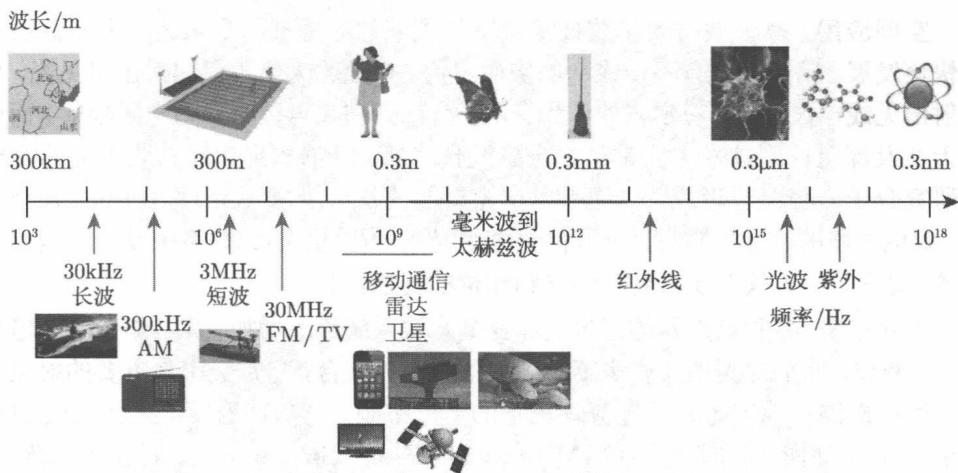


图 1-1 电磁波谱图及其应用

毫米波与太赫兹技术在空间、成像、遥感等领域有着广泛的应用前景, 如图 1-2 所示。

从图 1-2 可以看到, 毫米波与太赫兹技术的应用已经发展到多学科、跨学科的广泛领域。在空间领域, 除了传统的通信系统外, 主要还有射电天文及深空探测; 在遥感领域, 目前的应用主要是地球遥感、气象卫星等; 而毫米波及太赫兹技术应用于成像则可以用于反恐、安检以及雷达探测; 在生物领域, 毫米波与太赫兹技术可以用于生物样品的测量以及生物特征谱线的研究与探测。下面将主要介绍毫米

波与太赫兹技术在这几个领域的应用及其相关的系统，特别是这几种应用中的传输系统及天线系统。



图 1-2 毫米波与太赫兹技术的应用

空间应用。毫米波与太赫兹技术在空间领域的应用推动毫米波与太赫兹技术的快速发展。国际上已有不少成功的应用案例。多数的天体不仅辐射出可见光，也发射出无线电波。我们对宇宙的认识，几乎大部分都来自接收到的电磁辐射。而射电天文及深空探测技术主要是通过电磁波技术研究天体，通过对接收信号的分析来研究分子云与恒星形成等。通常射电窗口的波长可以从 10m 到 0.1mm 甚至更短。射电波段的物理机制与光波段的热辐射是不一样的，因此其系统设计也是不一样的。通常，射电仪器要求处理幅度和相位的问题。

近几年来，各种航天器的毫米波和亚毫米波系统逐渐增加，其工作频率也越来越高。例如，地基观测站有波多黎各岛阿雷西博天文台，它是美国最重要的射电天文、行星探测和地球超高层气流物理学的研究中心，其单面射电天文望远镜的直径达 306m，如图 1-3 所示；ALMA(Atacama large millimeter array) 巨型毫米阵列，如图 1-4 所示；我国紫金山天文台也建有多个毫米波地基观测站。再例如，深空探测器方面，最新的报道有 2009 年欧洲空间局 (ESA) 发射的 Planck 及 Herschel 天文望远镜分别能够工作到 1THz 和红外波，如图 1-5 所示。Planck 主反射镜的直径为 1.5m，而 Herschel 主反射镜的直径为 3.5m^[3,4]。

遥感应用。遥感的一种重要的形式是通过机载辐射计系统探测地球的云层，如探测云层中水气含量、云层温度以及云层分布。这对于掌握地球气象系统的相关数据，如预测降雨量、掌握台风等灾害性天气动向都有着极其重要的应用价值。例如，欧洲空间局 Geophysica Bay 1 号上的 MARSCHALS (millimetre-wave airborne receivers for spectroscopic characterisation in atmospheric limb sounding) 就是毫

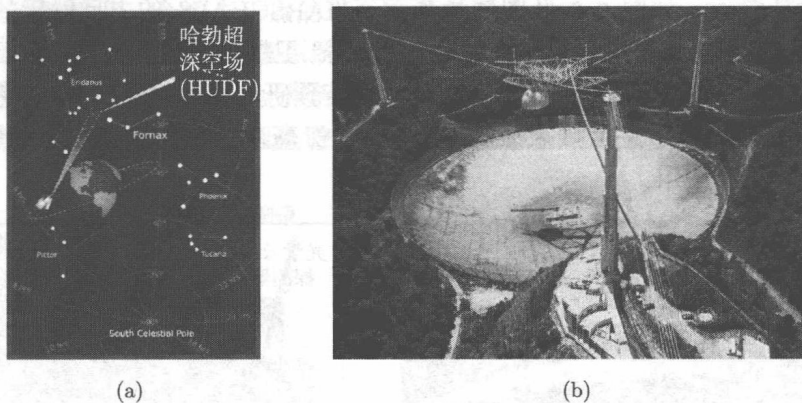


图 1-3 射电天文

(a) 深空探测; (b) 波多黎各岛阿雷西博天文台, 是美国最重要的射电天文、行星探测和地球超高层气流物理学的研究中心, 单面射电天文望远镜直径达 306m^[1]

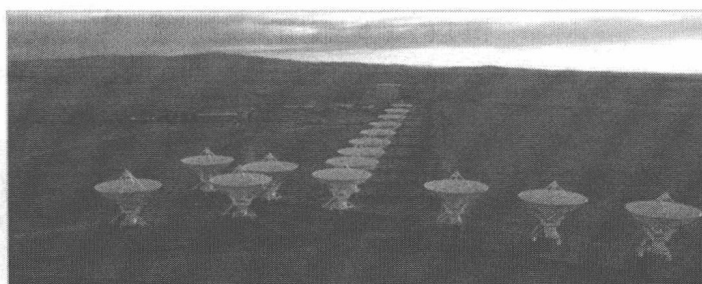
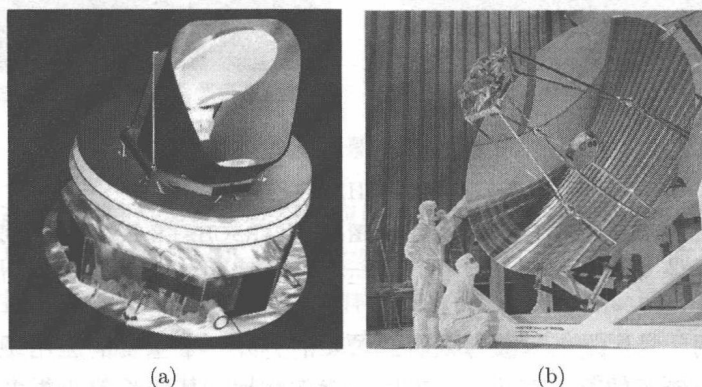
图 1-4 ALMA 巨型毫米阵列^[2]

图 1-5 (a)Planck 号太空船示意图, Planck 号太空船由欧洲空间局建造, 它将停留在地球 100 万英里 (1 英里 = 1.609344km) 之外的太空中, 寻找 140 亿年前宇宙大爆炸时余留的放射物的痕迹^[5]; (b)Herschel 天文望远镜, 其工作频率高达 5.3THz

毫米波辐射计模块,如图 1-6 及图 1-7 所示。MARSCHALS 的主反射镜的尺寸为 250mm;而带有红外与微波遥感器的“风云三号”卫星的毫米波工作频率已经达到 183GHz;“风云四号”卫星毫米波和太赫兹载荷预研已经启动,其中工作频率最高可达 450GHz。可见,在我国未来的民用航天中,毫米波、亚毫米波系统也将得到进一步的发展和应用。

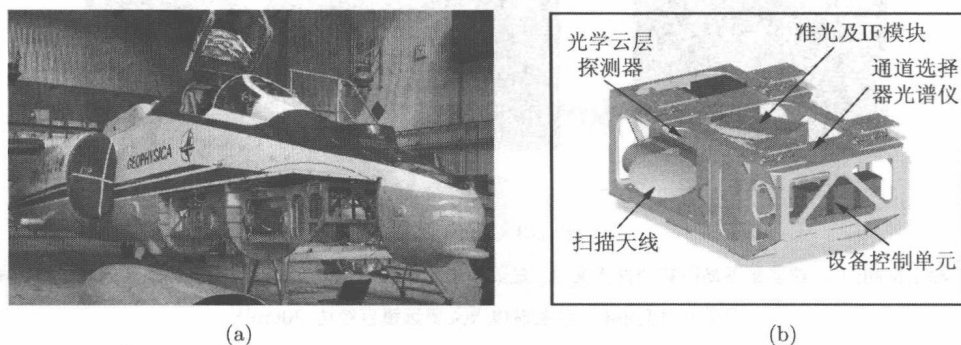


图 1-6 机械辐射计系统

(a) 欧洲空间局 Geophysica Bay 1 号及 MARSCHALS 所处位置^[6]; (b)MARSCHALS 各种探测模块

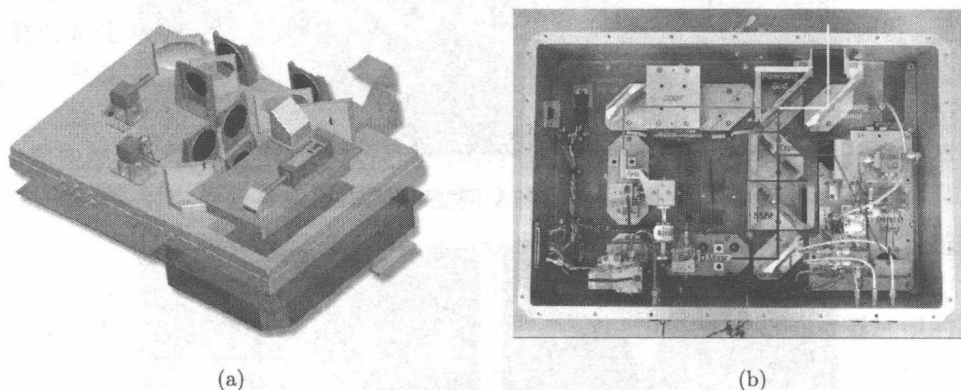


图 1-7 MARSCHALS 准光探测器

(a)MARSCHALS 探测器准光云层探测器模块工程图; (b)MARSCHALS 探测器准光云层探测器模块实物图^[7], 包含 300GHz、325GHz、345GHz 三个通道, 分别对应于 O_3 、 H_2O 、 CO 谐振点

成像应用。成像是毫米波与太赫兹领域的另外一个重要的应用领域。这个毫米波与太赫兹频率的特点在于:一方面与微波相比,其波长要小很多,因此其成像分辨率要高很多;另一方面与X射线相比,其光子能量比较小,不会造成电离伤害。正是由于其本身的优势,毫米波与太赫兹成像系统也在快速地发展之中。图 1-8 是一个工作于 600GHz 的亚毫米波成像系统。成像系统中包含一个直径为

1m 的主反射镜及一个稍小一点的平面副反射镜 (sub-reflector, SR), 其探测成像距离在 4~25m。而图 1-9 是该系统的成像场景及成像质量图, 从图中可以清楚地看到, 隐藏的武器能够清楚地分辨出来。这种系统对于反恐有着重要的应用价值, 而这种主动式成像的工作原理是通过收集物体的散射信号来实现的。

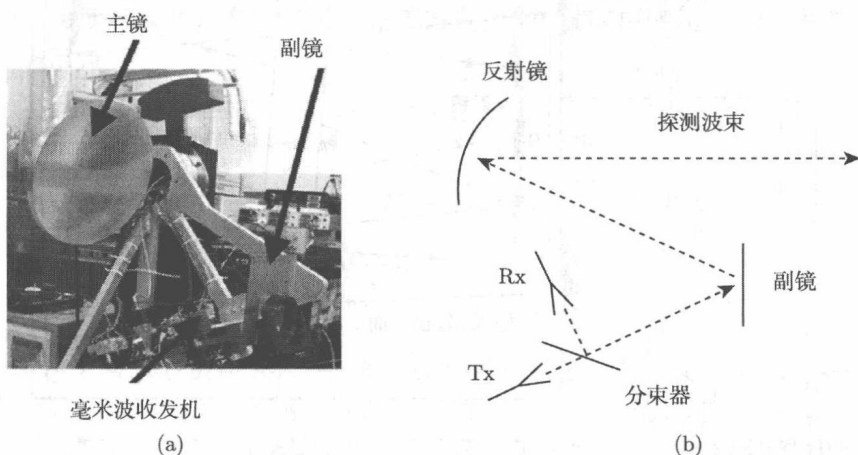


图 1-8 工作于 600GHz 的亚毫米波成像系统及光路图^[8]

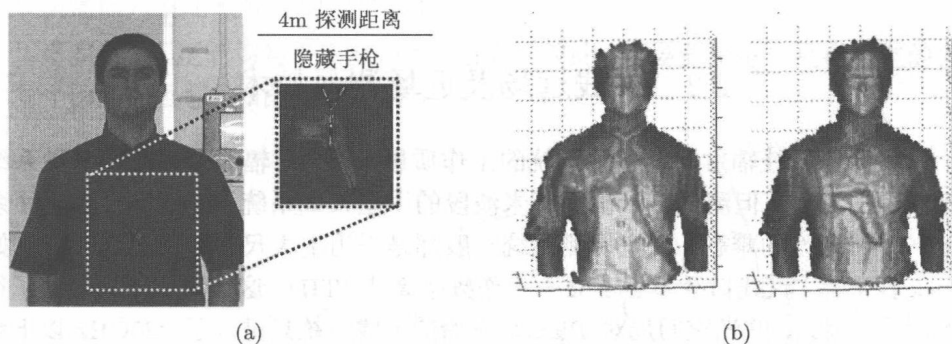
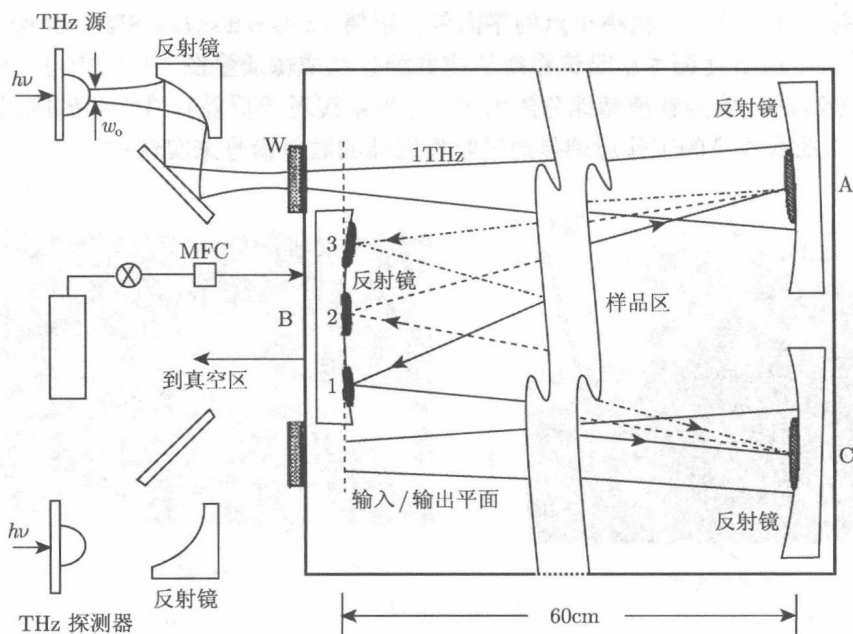


图 1-9 成像场景及成像质量图^[8]

生物探测应用。毫米波在生物探测应用的机制比较复杂。其中一种方法是通过探测生物样品的特征谱线, 另外一种方法是生物样品的电磁散射特性。前一种方法常采用准光传输技术, 如图 1-10 所示的生物样品的特征谱线检测。这种方法利用反射镜面来控制电磁能量的传输, 从而有效地控制电磁能量的分布。还有一种方法就是时域频谱技术 (time domain spectroscopy, TDS)。时域频谱技术的电路结构图与准光技术有一些差别, 但基本还是利用反射镜来控制电磁波的传输。

从前面的应用系统中可以看到, 所有的应用系统基本都包括或者是天线系统, 或者是电磁传输系统。实际上, 电磁传输系统也主要是由反射镜面组成的。

图 1-10 生物样品谱线探测系统内部传输结构^[9]

1.2 天线远场及近场测量技术

为了保证微波辐射计及各种系统的工作质量，必须对辐射计系统及各种系统进行精确的测量。但测量毫米波亚毫米波段的卫星天线系统，特别是电大尺寸系统是一个普遍性的难题。深空探测系统一般都是采用电大尺寸的反射面系统，如 Planck 探测器，天线口径长达 1.5m，工作频率高达 1THz，这给天线测量带来了很大的困难。因此，欧洲空间局对 Planck 飞船的天线系统只进行了 320GHz 以下频率的测量，并且只选用了紧缩场（compact antenna test range, CATR）天线测量系统。在微波辐射计天线测量方面，一般分为三种测试方法：一是直接进行远区场测量；二是通过近场扫描再推导出远场；三是通过紧缩场测量。但在毫米波、亚毫米波段，大口径天线的远场达几百米，甚至几千米。大气的强吸收及背景辐射使得远场测量无法实现。在近场测量中，要进行大量的场点扫描，所耗时间很长，并且在扫描过程中，机械精度会对幅度产生很大的影响。而长时间扫描，会使扫描相位产生难以控制的偏移。因此，近场扫描受到时间与精度的限制。而紧缩场系统能在较小的空间内产生准平面波，不仅没有远场测量的长距离要求，解决了大气吸收的问题；同时，在室内建造紧缩场系统，可以有效地控制背景辐射，并且还能控制温度等一系列的参数，满足不同的工作系统要求，以及克服近场测量耗时长的缺点。另

外，测量精度由于不受机械系统及相位漂移带来的限制，也有很大的提高。所以紧缩场系统是解决气象、海洋、环境、深空探测器的天线测量的合理、有效方法。

天线的特征参数比较多，如增益、方向图、极化等。这些参数的定义基本是在远场条件下，如增益的定义就是在相同的输入功率的条件下，天线在某个方向上的辐射功率密度与点源无方向性天线在该方向上的辐射功率密度之比。用数学表达式可以表示为

$$\begin{aligned} G(\theta, \varphi) &= \frac{\frac{1}{2} \mathbf{E}_{\text{Ant}}(\theta, \varphi) \times \mathbf{H}_{\text{Ant}}^*(\theta, \varphi)}{\frac{1}{2} \mathbf{E}_0 \times \mathbf{H}_0^*} \bigg|_{P_{\text{in_Ant}}=P_{\text{in}_0}} \\ &= \frac{|\mathbf{E}_{\text{Ant}}(\theta, \varphi)|^2}{|\mathbf{E}_0|^2} \bigg|_{P_{\text{in_Ant}}=P_{\text{in}_0}} \end{aligned} \tag{1-1}$$

式中，下标 Ant 代表被研究天线，而下标 0 表示点源无方向性天线。该定义中，其成立条件是远场环境下，也就是此时天线的电场与磁场方向成正交关系并与电磁波的传播方向成右手系。或者更明确地说，此时天线的辐射电磁波是平面波。因此，根据天线的互易性原理，天线测量的理想条件是在远场进行测量，也就是说，测量天线所需的入射场最好是均匀平面波^[10,11]。

事实上，真正的均匀平面波是不存在的，因此，远场测量也只是在一定的程度上对平面波的近似，如图 1-11 所示。

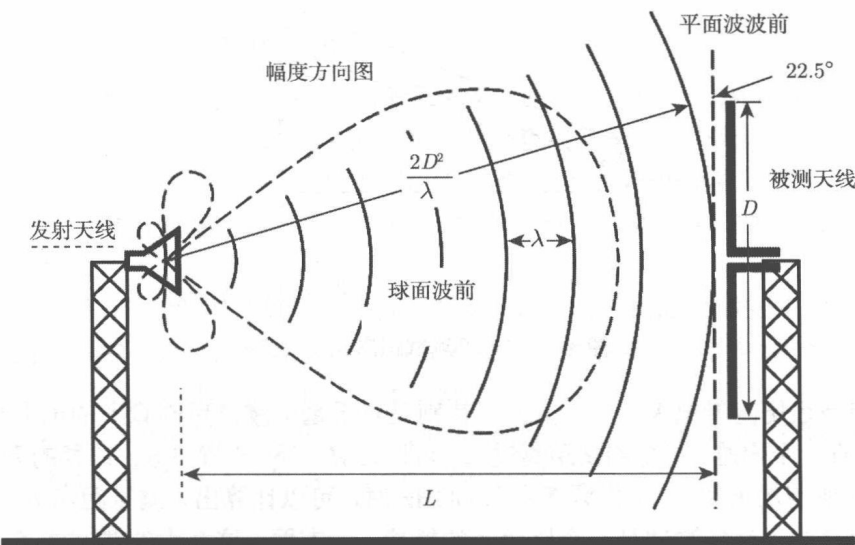


图 1-11 远场测试示意图

被测天线边缘的相位差决定了测试距离 L 。示意图从文献 [11] 中修改而来

如图 1-12 所示, 假设发射天线与被测天线相距 L , 天线口径为 D 。为近似表示平面波条件, 在被测天线边缘电磁波的相位与被测天线中心电磁波的相位之差, 应当小于 22.5° , 也就是路程差相差 $1/16$ 波长, 也即

$$L_p - L < \frac{\lambda}{16} \quad (1-2)$$

或

$$\sqrt{L^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} - L < \frac{\lambda}{16} \quad (1-3)$$

也就可以得到

$$\frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{\sqrt{L^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} + L} < \frac{\lambda}{16} \quad (1-4)$$

在测试距离远大于测试天线尺寸的条件, 可以将式 (1-4) 化简成

$$\begin{cases} L > \frac{2D^2}{\lambda} \\ L \gg \lambda \end{cases} \quad (1-5)$$

在考虑电大尺寸天线远场测量时, 通常只考虑式 (1-5) 中的第一个条件。

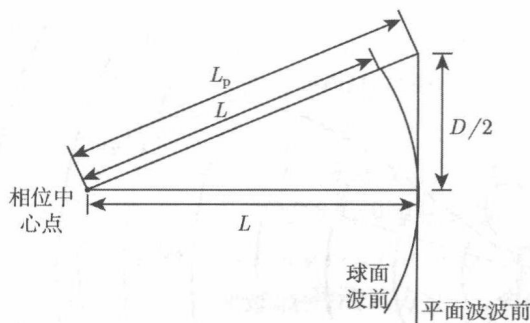


图 1-12 计算测试距离 L 示意图

但是远场测量电大尺寸的天线 (特别是对于毫米波及更高频率的电大尺寸的天线) 有一个困难, 就是测试距离过长。可以估算一下, 一个 1.5m 口径的天线 (如 Planck 所用的天线), 工作频率在 300GHz 时, 可以计算出, 测试距离为 4.5km。这个距离对于远场测试是一个比较大的挑战。一方面, 这么大的测试距离, 对于天线的准直是一个问题。对于电大尺寸天线, 其波束宽度都很小, 通常都是点波束 (pencil beam), 要校准到其最大辐射方向是一项比较难的工作。另一方面, 毫米波

的大气吸收比较严重，如图 1-13 所示，300GHz 时的吸收在每千米几十分贝左右，这对于动态范围受限的毫米波系统是一个严重的挑战。再一方面，户外不稳定的电磁环境对于测试是一个大的干扰因素。综上所述，实际上，远场测量方法很难应用到毫米波以及更高频段的大尺寸天线的测量当中。

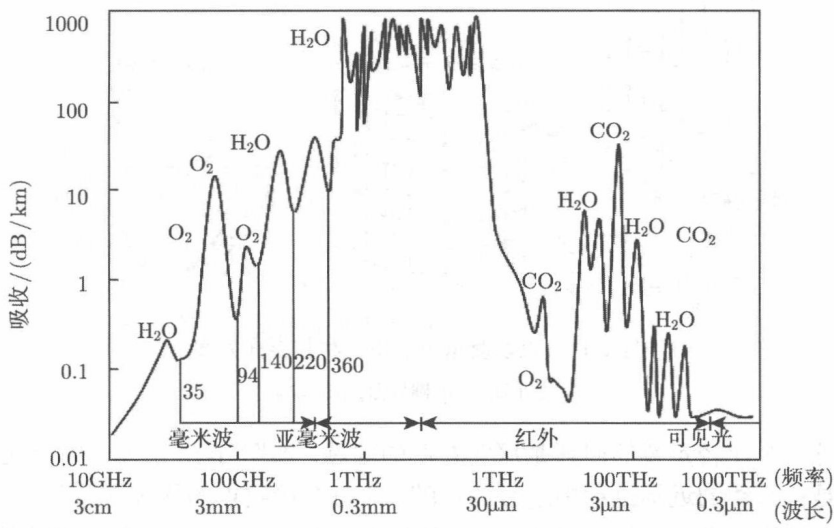


图 1-13 大气窗口

云层中的分子对不同频率的电磁波有不同的吸收效果，可以利用这一点进行大气探测。氧分子的吸收峰在 60GHz, 120GHz 附近。水分子则在 23GHz, 183GHz 附近，亚毫米波有一个在 320GHz 附近。四个大气窗口在 35GHz, 94GHz, 140GHz, 220GHz

天线的另外一种测量方法是近场测量方法，这种方法相对远场测量方法来说，不要求很长的测试距离，可以在室内环境测量（也就是全天候环境），动态范围的要求相对松一点。事实上，近场测试方法应当称为近/远场转换测量方法，首先将天线的近场的电场强度及相位记录下后，进行近/远场（NF/FF）变换，最后得到远场的参数。

近场扫描方法中，主要有三种扫描面方案，即平面扫描面、圆柱扫描面以及球面扫描面，如图 1-14 所示。一般来讲，平面扫描面的测量方法比较适合于高增益天线的测量，因此特别适合于电大尺寸的反射面天线。

平面扫描一般是在两个垂直的方向上进行网格划分，然后在每个网格点进行取样。网格的步进长为 Δx 和 Δy 。步进长的取值范围为

$$\Delta x, \Delta y \leq \frac{\lambda}{2} \tag{1-6}$$

也就是，其最大取值点小于半波长。当然，有一些研究在尽量地增大采样间距，从

而减小采样数据,以提高测量速度。

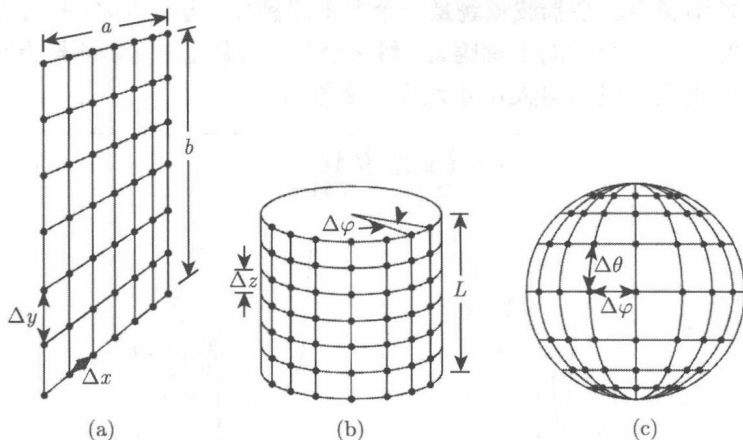


图 1-14 近场测量方法中三种扫描面方案

(a) 平面; (b) 圆柱面; (c) 球面

另外一个比较重要的问题是探头补偿的问题,如图 1-15 所示。因为探针的扫描过程是在天线的近场过程中进行的,有可能每个接收点的接收增益是不一样的,因此有必要进行探头补偿,使得每一点的接收增益一致,保证测量的准确性。

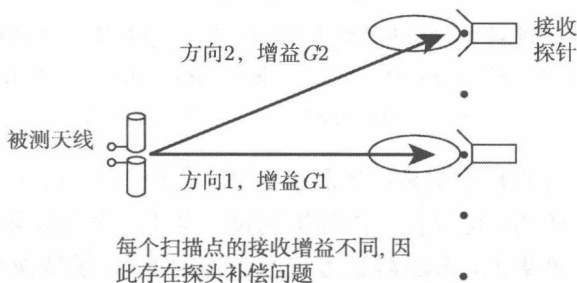


图 1-15 平面扫描机制及探头补偿的问题

测量近场后,要进行近/远场转换。假设已经得到了与扫描面平行的两个方向的近场, $E_{xa}(x, y, z = 0)$ 和 $E_{ya}(x, y, z = 0)$, 则可以将其进行平面波展开

$$\begin{cases} f_x(k_x, k_y) = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} E_{xa}(x', y', z' = 0) dx' dy' \\ f_y(k_x, k_y) = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} E_{ya}(x', y', z' = 0) dx' dy' \end{cases} \quad (1-7)$$

而在远场,一般性的表达式为

$$E(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint f(k_x, k_y) e^{-\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} dk_x dk_y \quad (1-8)$$

其中

$$f(k_x, k_y) = f_x(k_x, k_y) \hat{x} + f_y(k_x, k_y) \hat{y} - \frac{f_x(k_x, k_y) k_x + f_y(k_x, k_y) k_y}{k_z} \hat{z} \tag{1-9}$$

而远场的渐近表达式为

$$\begin{cases} E_\theta(r, \theta, \varphi) \approx j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} (f_x \cos \varphi + f_y \sin \varphi) \\ E_\varphi(r, \theta, \varphi) \approx j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} \cos \theta (-f_x \cos \varphi + f_y \sin \varphi) \end{cases} \tag{1-10}$$

平面扫描方式的一个限制就是其外推角度是有限的。外推角度的计算示意图如图 1-16 所示。这种方法适合于高增益天线的原因是，高增益天线的角度比较小，大部分的能量集中在一个比较窄的波束范围内。如果要测量半个球面的辐射方向图，则扫描平面要无穷大，显然是不现实的。

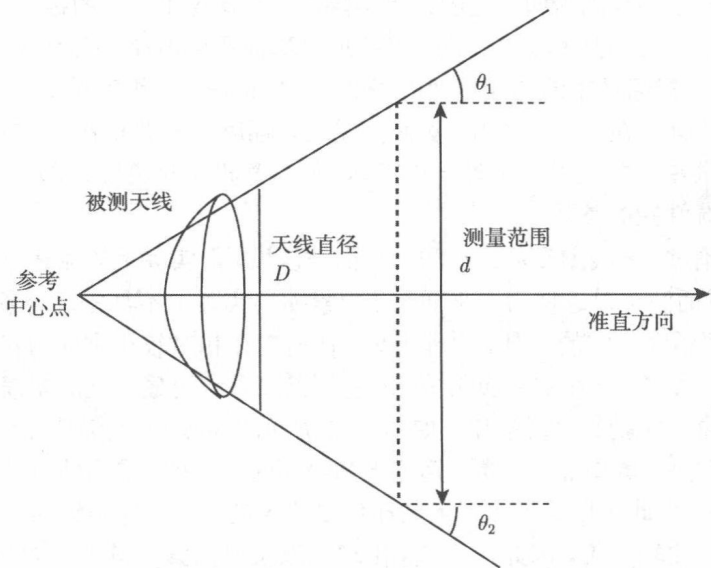


图 1-16 平面扫描方式的外推角度范围^[12]

平面扫描的数据量存储是近场扫描的一个大问题。如果天线的尺寸是 100 倍波长，则采样点最少要 200×200 个点，也就是 40000 个点。如果天线的尺寸等同于前面所提到的 Planck 天线（1000 倍波长），则采样点要达到 400 万个点，此时的存储量就相当可观了。另外，数据量大带来的问题也是值得思考的。采样所需要的时间包括电机的步进时间 t_{step} 和数据采样的时间 t_{sampling} 。假设，采样点为 N ，则总共的采样时间为

$$T = N (t_{\text{step}} + t_{\text{sampling}}) \tag{1-11}$$