

文章编号: 2095-4980(2013)02-0184-05

## 太赫兹高增益天线测量技术的可行性分析

张领飞, 秦顺友

(中国电子科技集团公司 第54研究所, 河北 石家庄 050081)

**摘要:** 对于高增益天线, 当频率达到太赫兹频段时, 传统的天线测量技术均面临巨大挑战。针对太赫兹高增益天线的测量问题, 论述了各种天线测量技术, 如远场法、近场法和紧缩场法的可行性, 分析了其各自的特点及其应用在太赫兹频段的局限性, 基于全息技术的紧缩场测量技术在太赫兹高增益天线测量中, 具有广阔的应用前景。

**关键词:** 太赫兹高增益天线; 天线测量; 远场法; 近场法; 紧缩场法

**中图分类号:** TN820

**文献标识码:** A

## Feasibility analysis of high-gain antenna measurement techniques at THz band

ZHANG Ling-fei, QIN Shun-you

(The 54th Research Institute of CETE, Shijiazhuang Hebei 050081, China)

**Abstract:** Measurements of high-gain antennas at THz frequencies present challenges for traditional antenna measurement techniques. Aiming at the measurement problems of high-gain antennas at THz, the feasibility of various antenna measurement techniques including far-field, near-field and Compact Antenna Test Range(CATR), are discussed; features of each method and the limitations of these methods applied to THz bands are presented. And the result indicates that the CATR based on hologram has a broad application prospect in high-gain antenna measurement at THz band.

**Key words:** THz high gain antenna; antenna measurements; far-field method; near-field method; Compact Antenna Test Range

近年来, 随着科学技术的发展, 毫米波、亚毫米波和太赫兹频段的理论技术研究不断深入, 其应用日益广泛, 太赫兹频段的空间遥感辐射计、亚毫米波天文望远镜等已获得实际应用<sup>[1]</sup>。天线作为设备发射或接收电磁波的重要部件, 起着非常重要的作用。当频率达到太赫兹频段时, 天线常被设计成高分辨率和低传输功率的高增益天线<sup>[2-3]</sup>。如, 2009年, 欧洲航天局发射的 Planck 和 Herschel 两颗卫星, 分别挂载直径为 3.5 m 和 1.5 m 的天线, 频率分别覆盖 30 GHz~857 GHz 和 448 GHz~5 THz<sup>[4]</sup>。这种高频率的电大尺寸天线设计极其困难, 其挑战性不仅仅存在于制造技术中, 还存在于测量技术中<sup>[5]</sup>。

传统天线测量技术有远场测量技术、近场测量技术和紧缩场测量技术, 在天线测量领域中都得到广泛应用。但当频率达到太赫兹范围时, 不同的测量技术都遇到困难。本文系统总结了常规的天线测量技术, 论述了其各自特点和局限性, 并针对太赫兹高增益天线测量技术进行了可行性分析。

### 1 远场测量技术

远场法是最传统的天线测量技术, 是天线测量时首要考虑的方法。远场法中源天线与待测天线之间的距离  $R$  应满足远场测试距离条件:

$$R \geq 2D^2/\lambda \quad (1)$$

式中:  $D$  为天线的最大尺寸;  $\lambda$  为波长。

远场法测量广泛用于微波频段。然而当频率增加到太赫兹时, 对于电大尺寸天线, 其所要求的远场测量距离

很轻易就达到数千米,如,直径1 m的天线,频率为1 THz时所要求的远场距离 $R=6.7$  km。在室外远场测量中,太赫兹波段的传输信号受大气影响,会引起巨大的衰减和失真<sup>[6]</sup>:一方面,在太赫兹波段,不同原子谐振引起的信号衰减,每千米可达到几十到几百分贝,而太赫兹频段的可用信号功率又非常小;另一方面,时间空间上温度和湿度的变化可导致信号幅度和相位的失真。

由于大气的影 响,测量距离成为远场法测量的主要限制。如果是低副瓣天线,所要求的测量距离会更大。鉴于以上原因,远场测量技术对于测量太赫兹天线几乎是不可行的。

## 2 近场测量技术

近场天线测量是用一个特性已知的探头,测量天线附近某一表面上场的幅、相分布,然后对测量的近场数据进行傅里叶变换得到天线的远场。近场测量可分为平面近场测量、球面近场测量和柱面近场测量。对于高增益天线,平面扫描是很好的选择<sup>[7]</sup>,近场天线测量可以在暗室中进行,空气中温度和湿度可以得到很好的控制,大气的影 响相对较小。

采样时,为保证采样区域可以涵盖待测天线发射的绝大部分功率,近场测量采样区域必须比天线口径大。另外,近场采样必须足够密集,以满足 Nyquist 采样定理,也就是相邻采样点间距必须小于二分之一波长。当频率达到太赫兹时,采样点定位精准度要求很高,且近场采样数据量会变得十分庞大。如,1 THz、直径为1 m的高增益天线,假定采样区域为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ ,平面近场扫描则需要6 400万个采样点。如果扫描仪每秒采样100点,那么需要7天才能得到近场数据,这对测量系统的精准度和稳定性要求都非常高。

平面近场测量中,扫描时射频电缆的弯曲会引起相位误差,必须采用相应的相位校正技术来消除,如,使用基于导频信号相位校正系统<sup>[8]</sup>。另还有一种无相位近场天线测量法,利用相位恢复算法从测量的幅度数据中恢复出近场相位,它可以克服相位测量中遇到的困难,但这些方法至今并没有实际应用到太赫兹频段天线测量中。

通过改进同轴电缆技术,同时对扫描时的弯曲电缆进行适当处理,也可以将相位误差降低到可接受的范围。1994年,美国航空航天局构建了550 GHz近场天线测量系统<sup>[9]</sup>,采用一种由内部连接射频旋转接头的刚性同轴电缆组成关节臂,有效解决电缆弯曲问题,但是其制造费用较高,并且很难调节和操作。另外一种有效的解决方法是引入一种三电缆技术<sup>[10]</sup>,它可以完全校正电缆的影 响,但其实现费用更高。

总体来讲,当频率达到太赫兹时,对平面近场测量的要求是非常苛刻的,会遇到诸如扫描不精确、扫描时间长、相位误差以及热结构变化等一系列问题。但如果只关心主瓣和相邻副瓣区域,近场测量在太赫兹频段还是可行的,并且平面近场测量应用频率已达到950 GHz。如,2007年,Atacama Large Millimeter Array(ALMA)工程中使用的频率为950 GHz的平面近场扫描仪<sup>[11]</sup>,扫描区域为 $0.9\text{ m} \times 0.9\text{ m}$ ,扫描平整度为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。

## 3 紧缩场测量技术

紧缩场测量(CATR)系统一般用来测量用于深空遥感和射电天文上的电大尺寸口径天线,利用一种准直器来调制馈源喇叭辐射的球面波,使其在很近的距离上形成准平面波,此区域中的平面波称为静区。典型的静区要求是:静区场幅度起伏度小于1 dB,相位起伏度小于 $10^\circ$ 。由于准直器的聚焦作用,天线测量可以在较短的距离内实现,因此紧缩场测量同样可以在暗室中进行。

待测天线放置在静区中,通过旋转待测天线,测得天线的辐射方向图。横向移动CATR的馈源,可以改变平面波的传播角度,通过这种方式来测量高增益天线的主波束。紧缩场测量方法比较直接,相对速度较快,适用于太赫兹波段天线测量。

紧缩场测量中的校正单元可以是反射面、透镜、射频全息栅或者其中几类结合使用,如,利用双反射面馈源系统来照射全息图,可以产生高质量的静区场。

### 3.1 基于反射面的紧缩场测量技术

反射面紧缩场测量出现于20世纪60年代,图1为传统的基于单偏置抛物反射面的CATR,馈源辐射球面波经过抛物反射面聚焦形成平面波。单反射面紧缩场的静区

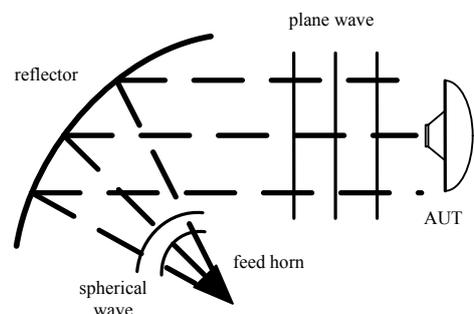


Fig.1 Measurement arrangement for an off-set reflector CATR  
图1 单反射面紧缩场测试原理方框图

利用率非常低,只有反射面直径的 30%左右,这是它的一个缺点。另外,这种单偏置结构会增加交叉极化。单反射面紧缩场交叉极化约为 $-30$  dB,采用合适的副反射面可以补偿由主反射面产生的交叉极化。双反射面 CATR 的交叉极化水平可达到 $-40$  dB 或更低,且静区场大小和平整度都会显著增加。三反射面紧缩场采用赋形双反射面馈源系统(Dual Reflector Feed System, DRFS)来照射主反射面<sup>[12]</sup>,其静区范围大约可达到主反射面直径的 70%~75%。

反射面紧缩场系统中,如果边缘照射电平很高,反射面边缘衍射会造成静区很大的失真。在双反射面和三反射面紧缩场中,可以通过波束赋形来降低边缘照射电平,从而减少绕射。也可以通过对反射面边缘处理来减少绕射,如采用锯齿状边缘或卷曲边缘等<sup>[13]</sup>。

反射面紧缩场测量的工作频带很宽,其最高和最低工作频率分别由反射面表面精确度和反射面尺寸决定。反射面紧缩场广泛用于毫米波段,对于更高的频率,其性能受较高的表面精确度要求的限制。反射面典型的表面均方根精确度要求为 $\lambda/100$ ,如,频率为 1 THz 时,反射面精确度要求为  $3\ \mu\text{m}$ 。反射面上  $3\ \mu\text{m}$  的误差相当于相位误差  $7.2^\circ$ ,这使得反射面的制造十分困难,且高精度要求必然需要高昂的制造费用。由此看出,反射面对于表面和赋形精确度要求十分苛刻,使得反射面紧缩场测量的应用受到限制。理论研究显示,反射面紧缩场应用频率可达到 500 GHz<sup>[14]</sup>。

### 3.2 基于透镜的紧缩场测量技术

20 世纪 70 年代引入介质透镜作为紧缩场的校正单元,其静区直径可达到透镜直径的 70%~75%。透镜紧缩场框图如图 2 所示。透镜属于透射型元件,其表面精确度要求没有反射面要求那样苛刻,与透镜的介电常数  $\epsilon_r$  有关,最大表面均方根误差为反射面的  $\sqrt{2}/(\sqrt{\epsilon_r}-1)$  倍<sup>[15]</sup>。

当透镜使用介电常数  $\epsilon_r$  小于 1.2 的材料来制造时,透镜表面精确度要求可以适度降低。但介电常数降低时,透镜的厚度则会大大增加,如,介电常数  $\epsilon_r=1.1$ ,透镜焦距比  $F/D=3$  时,透镜厚度接近于直径,从而难以操作<sup>[16]</sup>。介电常数同样影响透镜表面反射场,介电常数越大,透镜表面反射的馈源功率越大。

实际上,透镜紧缩场最大的问题是合适的透镜材料,介电常数很小的材料通常不均匀,在高频率时,情况尤为严重,很难找到介电常数低且具有高各向同性的材料。

由于反射面紧缩场在微波频率应用性能很好,所以透镜紧缩场并未得到广泛应用。透镜紧缩场应用的较高频率为 94 GHz 和 110 GHz。

### 3.3 基于全息图的紧缩场测量技术

基于全息图的紧缩场天线测量技术,是芬兰赫尔辛基大学 1992 年提出的一种紧缩场天线测试方法。全息紧缩场框图如图 3 所示,使用全息光栅作为紧缩场的准直器。全息光栅为平面结构,易于制造,已成功应用于 40 GHz~650 GHz 频率范围。

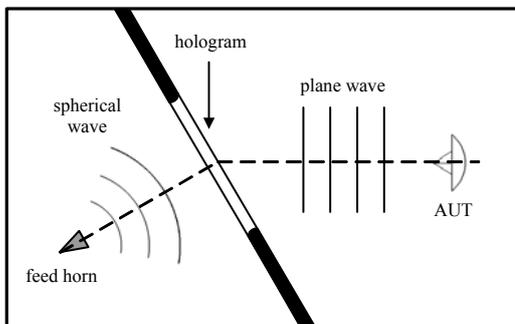


Fig.3 Measurement arrangement for a hologram CATR  
图 3 全息紧缩场测试原理方框图

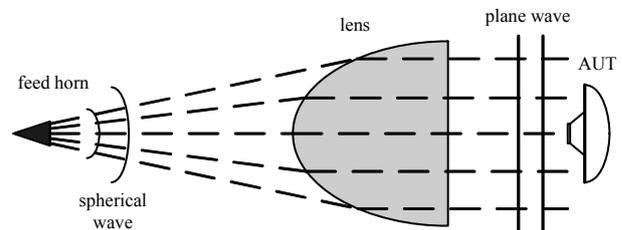


Fig.2 Measurement arrangement for a lens CATR  
图 2 透镜紧缩场测试原理方框图

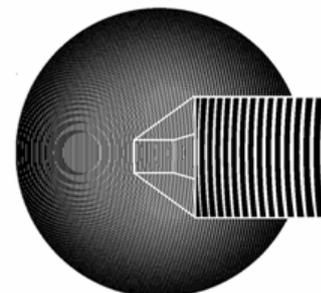


Fig.4 Binary amplitude hologram pattern  
图 4 二元幅度全息图

全息紧缩场测试系统的核心部件是一个透射类型的二元幅度全息光栅,其全息图案如图4所示。它可以对馈源喇叭照射的球面波进行调制,在静区上生成需要的平面波。全息光栅的图案是由已知入射球面波和静区平面波综合生成。采用离轴形式全息光栅,使平面波传播方向偏离全息光栅法向一定角度,这样可以分离平面波和其他衍射波,防止干扰影响静区<sup>[17]</sup>。

幅度全息板利用蚀刻工艺将金属微带赋形到介质薄膜上,类似于印制电路板工艺,其制造费用不高,仅为反射面的百分之几。全息光栅为透射型器件,其表面精确度要求远不像反射面那样苛刻<sup>[18]</sup>。全息栅可以固定在刚性框架内,确保全息表面的平整度。根据仿真,全息板的表面制造精确度要求大约为 $0.01\lambda\sim 0.02\lambda$ ,与反射面的精确度要求为同一量级。但是二维全息板的制造比三维的反射面制造容易的多,其造价也相应减少。

由于全息光栅较小的表面精确度要求和较低的制造成本,它成为一种有效的太赫兹频率下电大尺寸天线测量方法,显示出了在构建太赫兹波段紧缩场方面的巨大潜力。对于未来空间科学研究来讲,尤其是当工作频率超过1 000 GHz时,具有很大的优势。

基于全息的全息紧缩场测量法受频率和交叉极化等限制,采用双反射面馈源来照射全息光栅可降低交叉极化<sup>[19]</sup>。

#### 4 结论

不同的天线测量方法各有优缺点,必须根据频率、待测天线大小、以及测量目的来选择合适的方法进行测量。在太赫兹频段,受大气衰减的影响,远场测量法已不再适用。目前近场测量技术实现了太赫兹频段最高的测试频率,但其实现技术复杂,对测量系统设备的精准度和稳定性要求都特别高,成本十分昂贵。紧缩场方法利用准直器实现准平面波,可以直接用于测试,目前也已应用于较高的频段。其中,反射面紧缩场的反射面表面制造精确度要求和透镜紧缩场的透镜材料要求分别成为制约其向更高测试频段发展的技术瓶颈,而全息紧缩场中全息光栅比较容易制造,且制造成本很低,显示出了在太赫兹波段构建高性价比紧缩场测试系统方面的巨大潜力。

当频率达到太赫兹频段时,考虑到技术复杂程度和测量系统搭建费用等因素,相比较而言,基于全息的全息紧缩场最为简单易行,具有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] Zmuidzinas J. Technology for Submillimeter Astronomy[C]// 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu, HI:[s.n.], 2007:1861-1864.
- [2] 陈琦,何晓阳,杨阳,等. 基于 FDTD 的太赫兹光导天线三维辐射特性计算方法[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):330-335. (CHEN Qi, HE Xiaoyang, YANG Yang, et al. 3-D radiation characteristics calculation for terahertz photoconductive antenna using FDTD method[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):330-335.)
- [3] 刘娟,张照云,李寅鑫,等. 大间隙 GaAs 光导天线的太赫兹辐射频谱特性[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):277-279. (LIU Juan, ZHANG Zhaoyun, LI Yinxin, et al. Terahertz radiation frequency spectrum of large-aperture GaAs photoconductor antennas[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):277-279.)
- [4] Doyle D, Pilbratt G, Tauber J. The Herschel and Planck Space Telescopes[J]. Proceedings of The IEEE, 2009,97(8):1403-1411.
- [5] Räsänen A V. Challenges of Terahertz[C]// The second European conference on Antenna and Propagation. Edinburgh:[s.n.], 2007:1-4.
- [6] Rec. ITU-R P.676-6. Attenuation by atmospheric gases[S]. 2007.
- [7] Tuovinen J. Methods for Testing Reflector Antennas at THz Frequencies[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1993,35(6):7-13.
- [8] Säily J, Eskelinen P, Räsänen A V. Pilot Signal-Based Real-Time Measurement and Correction of Phase Errors Caused by Microwave Cable Flexing in Planar Near-Field Tests[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2003,51(2):195-200.
- [9] Slater D. A 550 GHz near-field antenna measurement system for the NASA sub-millimeter wave astronomy satellite[C]// AMTA 1994. Long Beach:[s.n.], 1994:267-272.
- [10] Hess D W. Principles of the three-cable method for compensation of cable variations[C]// AMTA 1992. Columbus:[s.n.], 1992:1026-1031.
- [11] Bond P, Ediss G. Design, alignment, and calibration requirements for a sub-millimeter wave frequency tiltable lightweight scanner[C]// AMTA 2007. St. Louis:[s.n.], 2007:343-348.
- [12] LIU Xiaoming, MAI Yuan, SU Hansheng, et al. Design of tri-reflector Compact Antenna Test Range for millimetre/sub-millimetre wave and THz antenna measurement[C]// International Workshop on Antenna Technology. HongKong:[s.n.],

2011:144-147.

- [13] Lee T H, Burnside W D. Performance trade-off between serrated edge and blended rolled edge compact range reflectors[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1996,44(1):87-96.
- [14] Hartmann J, Habersack J, Steiner H J, et al. Calibration and verification measurements in compensated compact ranges up to 500 GHz[C]// AMTA 2001. Denver:[s.n.], 2001:377-382.
- [15] Olver A D, Saleeb A A. Lens-type compact antenna range[J]. Electronics Letters, 1979,15(14):409-410.
- [16] Hirvonen T, Tuovinen J, Räisänen A. Lens-type compact antenna test range at mm-waves[C]// Proceedings of the 21st European Microwave Conference. Stuttgart, Germany:[s.n.], 1991:1079-1083.
- [17] 张领飞, 秦顺友. 基于全息的太赫兹紧缩场测量技术[J]. 无线电工程, 2012,42(11):37-39. (ZHANG Lingfei, QIN Shunyou. THz Band Hologram-based Compact Antenna Test Range[J]. Radio Engineering, 2012,42(11):37-39.)
- [18] Lönnqvist A, Koskinen T, Häkli J, et al. Hologram-Based Compact Range for Submillimeter-Wave Antenna Testing[J]. IEEE Transaction on Antenna and Propagation, 2005,53(10):3151-3159.
- [19] Karttunen A, Häkli J, Räisänen A V. Design of a 650 GHz Dual Reflector Feed System for a Hologram-based CATR[C]// Antennas and Propagation, 2006. Nice, France:[s.n.], 2006:1-5.

#### 作者简介:



张领飞(1986-), 男, 河北省邯郸市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为天线测量技术.  
email:zhanglingfei86823@163.com.

秦顺友(1964-), 男, 河南省光山县人, 研究员, 硕士生导师, 主要研究领域为微波与天线测量技术.