

毫米波天线近场测量中截断误差的定量分析

任 立^{1,2}, 董晓龙¹, 张 琮^{1,2}

(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:系统分析了毫米波天线测量系统中的各种误差的分布及对测量结果可能产生的影响,并选择了截断误差进行详细分析研究。首先讨论了扫描平面位置的选择对测量结果的影响以及同其相关因素之间的制约关系;然后对截断误差进行了定量分析,得到了截断边界处电场水平与截断引起测量误差水平之间的定量关系,讨论了截断误差对主、旁瓣误差的影响;对微波及更高频率的天线测量工作过程中截断误差的特点、估计与控制进行了总结;最后进行计算机仿真与模拟。

关 键 词:平面近场测量;毫米波;天线;截断误差;定量分析;上限误差理论

中图分类号:TN 956 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-0323(2007)02-0255-05

1 引言

根据微波毫米波波长较短的特点,我们可以设计出有较强方向性的天线,而且在给定的方向性要求下,毫米波天线往往小于等效的长波天线。这一点增加了这类天线的应用潜力,同时也使天线系统的复杂性大大增加。虽然毫米波天线可以通过微波天线尺寸按比例缩小实现,但在应用中又被提出了许多特殊的要求,使得对天线的复杂度、精度等的要求也更高了。因此,需要开展对毫米波天线测量系统的选型、天线测量精度的控制、测量误差的分析等工作研究。

对平面近场测量而言,其主要误差源有 18 项,这些误差源大致分为 4 类:即探头误差、测试仪表误差、环境误差以及计算误差。这些误差源在不同的天线测量条件下对测量结果会有不同的影响,这一方面的研究国内外都已开展,并取得了一定的成果。其中美国 NSI 公司已建立一套比较详细的误差分析方法与计算模拟软件,但国内对于这一方面的研究却仍很少或者不够系统^[1]。

要系统地对天线测量误差进行分析,从平面近场测量的基本理论出发,首先要对系统依据功能分为几个部分;然后分别进行建模分析,计算各个误差对测量结果的影响。针对不同的误差研究对象,我们还可以选定不同的部分建模,最后以网络分析方法

完成误差合成。本文中主要研究了截断效应对测量引入的误差,以天线在近场内垂直于 AUT 瞄准线方向的某一平面上电场分布作为输入,先通过数据截断,再由近远场变换得到的天线远场特性作为输出。将这一输出与由经典方法计算得到的远场方向图进行比较求误差,分析截断对测量结果的影响,并分别讨论主瓣与旁瓣的误差变化情况,误差范围。最后总结在毫米波天线测量中研究这一误差的意义^[2]。

为了研究截断误差对测量结果的影响,本文通过将截断后天线远场计算值与理论计算值比较后,求全空间、主瓣和旁瓣内的误差,观察误差变化情况。再以包含截断的远场与理论远场的比值作为误差影响因子,求出截断误差引起天线测量误差的定量关系。讨论内在联系,用计算机仿真验证结论。

2 理论分析与公式

2.1 误差的系统分析

天线平面近场测量的系统可以分为:天线测量场(测量室、测量设备);机械定位与位置测量系统;RF 发射/接收系统;AUT 天线部分(安装定位);计算机的数据处理与系统伺服控制。系统结构如图 1:

根据天线测量的近远场理论,可以由理论推导中的近似方法与公式相关参数发现一些可能对测量结果产生影响的误差源:

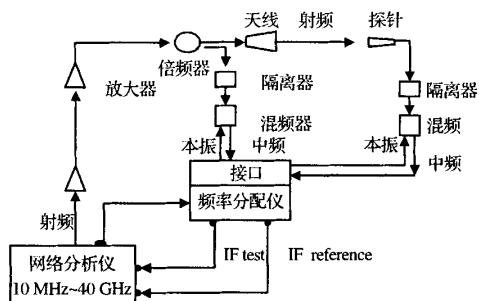


图 1 系统结构图

Fig. 1 Structure of the Near-Field Measurement system

- (1) 探针方向图的不确定性;
- (2) 探针极化误差;
- (3) 探针增益测量的不确定性;
- (4) 探针、AUT 的校准误差;
- (5) 归一化常数;
- (6) 阻抗失配因子;
- (7) 数据点采样引起的混淆;
- (8) 测量域的截断误差。

从测量设备角度考虑,RF 系统指标局限性,探针定位与测量装配及测量现场环境都将引起误差:

- (1) 接收机的幅度相位的非线性;
- (2) 接收机动态范围;
- (3) 系统中随机误差对幅相特性的影响;
- (4) 泄漏与交调的现象;
- (5) 多重反射;
- (6) 暗室散射;
- (7) 温湿度等环境因素。

针对不同的误差进行研究时,为了尽量减少其它误差的影响,要独立建模。其中不仅要屏蔽掉与之无相关的误差,还要考虑误差传递的方式,从而得到最后的误差方程。在毫米波系统中,测量结果对射频系统和测量环境都更加敏感,其中接收机的灵敏度,动态范围,非线性特性以及测量中电缆运动对信号相位的影响都要充分考虑。而在扫描平面的选择与截断误差的控制中也有新的内容^[3]。

2.2 截断误差的分析

在平面近场测量中,扫描平面在方位与仰角两个轴向均有限是区别于柱面和球面测量法的一大特点,也是使得这一方法在数据处理运算时远小于后两者的一个重要原因。因此,对截断误差的分析与修正可以大大提高平面近场测量法的应用潜力。

2.2.1 截断面的选择

平面近场测量中,在前半空间($z>0$)建立的场

可表示成平面波的迭加,其波数谱 $F(k_x, k_y)$ 的带宽原则上讲是无限的。但应当注意到,当 $k_x^2 + k_y^2 > k_m^2$ 时,相应频率的波沿 z 轴正向指数衰减,其衰减因子为:

$$\exp[-z_0 \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k_m^2}]$$

在 $z=N\lambda$ 平面内,当 $k_x^2 + k_y^2 > k_m^2 > k^2$, N 和 k_m 已经为正实数,则符合这些条件的平面波的衰减最小值可由:

$$\begin{aligned} \alpha_{\min} &= 20 \log_{10} \exp[N\lambda(k_m^2 - k_0^2)^{1/2}] \\ &\cong 8.7N\lambda(k_m^2 - k_0^2)^{1/2} \text{ dB} \end{aligned} \quad (1)$$

得出。例如,当 $k_x^2 + k_y^2 > k_m^2 = 1.5k^2$ 时,若 $z_0 = 3\lambda$,则衰减量大于 183 dB;选择 N 更大,则衰减更大。可见,只要离开天线口面几个波长的距离,高波数谱 ($k_x^2 + k_y^2 > k_m^2 > k^2$) 所对应的场就几乎为 0。因此在这一距离以外,我们可以认为天线建立的场的波数谱带宽是有限的。即可以取 $F(k_x, k_y) = 0$, ($k_x^2 + k_y^2 > k_m^2 > k^2$)。为了得到较高的精度,我们认为当衰减达到 180 dB 时 $Z = N\lambda$ 对应了可能采样到的频谱的边界。但 N 不仅仅与采样率有关,还与截断平面上的采样效果,多重反射等有关。而这里由于建模的限制,多重反射的作用可忽略,那么对于同一采样率,距离天线越远,则保持置信角相同的前提下,截断面积变大,使得数据处理中的分辨率变大,使误差变小。当考虑多重反射的影响时,由于天线与探针很近,最短传播距离的一次反射与最长距离天线辐射能量可比拟,因此多重反射就会对旁瓣影响很大;但 d 太大时,由于高频波在空间的衰减很快,空间的多重反射与暗室散射的影响就会加大,这对旁瓣影响尤其明显。本文将在仿真中说明这一特点^[4]。

2.2.2 截断误差方程

由探针测量扫描平面时,探针的输出为:

$$B_0(x, y, d) = a_0 \int D(k_x, k_y) e^{jk_x d} e^{j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (2)$$

其中: $D(k_x, k_y) = t_{AUT}(k_x, k_y) \cdot s_{probe}(k_x, k_y)$ 。

在研究截断引入的误差时,我们首先把探针理想化为均匀的全向性天线,则有:

$$D(k_x, k_y) = C_0 t_{AUT}(k_x, k_y) = C_0 A_T(k_x, k_y) \quad (3)$$

将其代入探针的输出公式得到(文中 C_0 表示某一常数,无特定数值):

$$B_0(P, d) = a_0 \int C_0 A_T(K) e^{jk_x d} e^{j(K \cdot P)} dK \quad (4)$$

$$B_0(P, d) \sim a_0 C_0 E_T(P, d) \quad (5)$$

由于计算结果为归化方向图,所以我们可以认为探针输出即是 AUT 在扫描面上该点的电场值。

无截断时,横向波谱可由无限平面积分得到:

$$A_t(K) = \frac{1}{4\pi^2} \exp(jk_z d) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_t(x, y, d) \cdot \exp(jk \cdot r) dx dy \quad (6)$$

而实际测量值对应的横向波谱为:

$$\tilde{A}_t(K) = \frac{1}{4\pi^2} \exp(jk_z d) \int_{-a}^{+a} \int_{-b}^{+b} E_t(x, y, d) \cdot \exp(jk \cdot r) dx dy \quad (7)$$

则可以得到:

$$\Delta A_T = C_0 \left(\int_{-\infty}^{-a} \int_{-\infty}^{-b} E_t(x, y, d) \exp(jk \cdot r) dx dy + \int_a^{+\infty} \int_b^{+\infty} E_t(x, y, d) \exp(jk \cdot r) dx dy \right) \quad (8)$$

从理论上直接计算误差是无法得到的,但对于强方向性天线,我们可以认为 $-40 \sim -60$ dB 以外的近场横向电场对远场无贡献,则积分式变为:

$$\Delta A_T = C_0 \left(\int_{-x_0}^{-a} \int_{-y_0}^{-b} E_t(x, y, d) \exp(jk \cdot r) dx dy + \int_a^{x_0} \int_b^{y_0} E_t(x, y, d) \exp(jk \cdot r) dx dy \right) \quad (9)$$

由于 $\Delta A_T / A_T = \Delta A / A$, 而又有远场电场与波谱的关系为 $E_r \sim C_0 A(K) \exp(-jk r)$, 则有误差关系 $\Delta A_T / A_T = \Delta E_r / E_r$ 。这就是在方向图误差研究中截断误差与测量误差的关系^[5]。

3 仿真分析与结果

仿真先选择最佳扫描平面距离再进行截断的模拟、分析与求解^[6]。

3.1 扫描平面位置优化

以 4×4 的半波长偶极子天线阵为例进行仿真,由于毫米波天线特性可以由微波天线按比例缩小得到,因此,频率选为 60 GHz。天线阵结构为 $dx = 0.0025$ m, $dy = 0.0028$ m, 坐标原点为阵列中心。

首先在满足上限误差理论的前提下,对扫描平面位置进行模拟:在 $d = 3\lambda \sim 70\lambda$ 范围内,扫描平面内采样率固定为 $\delta x = 0.002$, 截断有效信息以置信角域对应范围为有效面积。求出不同位置对天线测量误差引起的变化,及对 3 dB、10 dB 和主瓣对应频带内引起的误差大小。

图 2 中在距离天线 10 个波长的扫描平面上仿真得到的误差出现明显的收敛,对于 10 dB 带宽内

误差之后几乎保持稳定。在主瓣频带内,收敛趋势也变小,这样综合考虑波的衰减与环境等因素,扫描平面选在 $d = 10\lambda$ 为最佳选择。

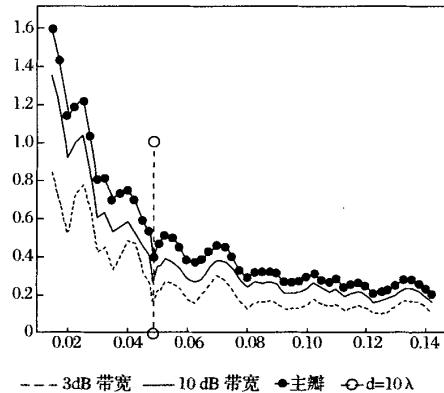


图 2 随着扫描平面的外移,在不同带宽范围内误差的变化

Fig. 2 The change of the error in different bandwidth as the plane moving away

3.2 截断误差的定量分析

由前面的优化拟合得理想的扫描平面位置为 $d = 10\lambda$, 扫描平面采样率仍取 $\delta x = 0.002$, x 、 y 轴向采样点数均为 $N = [8, 12, 16 \dots 128]$, 仿真求误差曲线与主、旁瓣误差水平, 观察截断对天线测量结果的影响。

以下的不同截断面积得到对应的 H 面误差。图 3 是在全频段、主瓣、10 dB 以及 3 dB 的误差和的变化曲线与比较,图 4 是主、旁瓣误差的变化曲线比较:

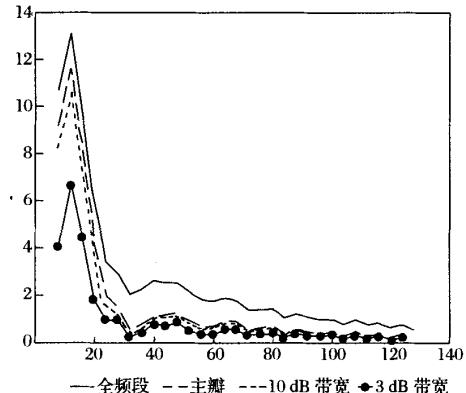


图 3 d 确定时,随着 N 增大,各带宽范围内误差的曲线变化比较图

Fig. 3 As the distance is fixed, the comparison among the change of the errors in different bandwidths as the N increasing

我们再来看一下平均相对误差(dB)的大小

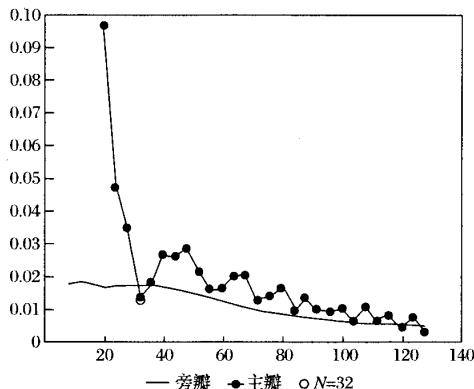


图 4 截断对主、旁瓣平均绝对误差影响的曲线变化比较图

Fig. 4 The comparison of the change of the
absoluteness errors due to the truncation
between main lobe and side lobe

变化范围：可以发现虽然旁瓣的绝对误差小，但相对误差仍很大。我们在分析中主要关注的是相对估计的大小。由图 5 中旁瓣误差曲线的变化可知，随着截断面的增大，旁瓣误差也可以得到很好的修正。

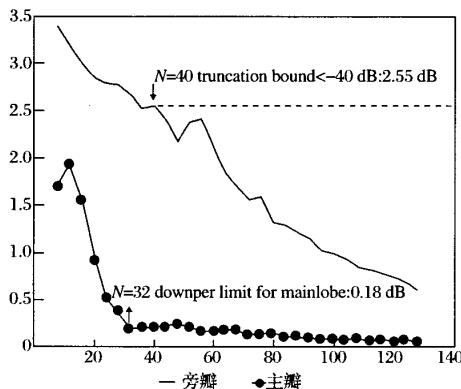


图 5 截断对主、旁瓣平均相对误差(dB)影响的
曲线变化比较图

Fig. 5 The comparison of the change of the
relative errors due to the truncation between
main lobe and side lobe

由两图的比较可以发现截断误差对旁瓣的影响要大于主瓣峰值的影响，当截断面点数大于 48 以后，旁瓣的误差水平下降明显从 -2.7 dB 一直下降到 -0.6 dB 以内，主瓣误差水平稳定在 -0.2 dB 以内，当恰当地选择截断面大小时，将截断位置选在在横向平面电场低于峰值 -40 dB 以下，使得旁瓣误差水平小于 -0.3 dB，峰值小于 0.1 dB。

4 结语

基于前面的分析，我们可以得出以下几点结论：

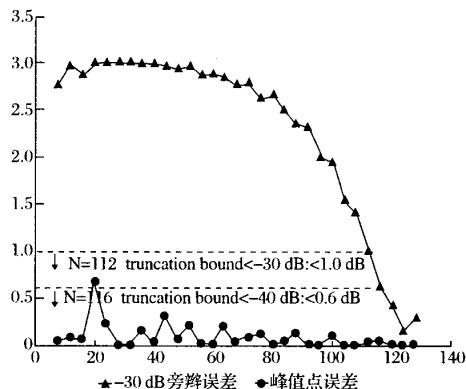


图 6 截断在峰值与 -30 dB 旁瓣处引入的
相对误差(dB)定量关系图

Fig. 6 The comparison of the change of the relative
errors due to the truncation between peak and
-30 dB side-lobe points

(1) 截断位置在满足一定距离后，对分辨率影响不大，只是在误差上限理论中要考虑到距离项。

(2) 截断对旁瓣的影响要大于比对主瓣。在截断小于置信角域时，主旁瓣的误差都很明显；当大于置信角域时，主瓣峰值的误差水平基本稳定在 0.2 dB 以下，在 -40 dB 处截断时旁瓣的误差也可以控制到 0.6 dB 以下。

(3) 对于毫米、亚毫米波天线，由于天线往往是有方向性的，因此，一般只关心截断对主瓣的影响，这就降低了对采样的要求，同时也减小了对数据计算量和射频系统动态范围的要求。这样当截断边缘电场水平在峰值的 -40 dB 以上时，主瓣误差可以有效地控制在 0.1 dB 以内。

参考文献：

- [1] Newell A C. Error Analysis Techniques for Planar Near-field Measurements [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988, 36(6): 754-768.
- [2] Newell A C, Crawford M L. Planar Near-field Measurements on High Performance Array Antennas [Z]. Nat Bur Stand (U. S.) Int Rep, 1974.
- [3] Joy E B. Near-Field Range Qualification Methodology [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988, 36(6): 836-840.
- [4] Repjar A G, Kremer D P. Accurate Evaluation of A Millimeter Wave Compact Range Using Planar Near-field Scanning [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, AP-30(3): 421-424.
- [5] 毛乃宏,俱新德.天线测量手册[M].北京:国防工业出版社, 1984.
- [6] D E 达吉恩, R M 默赛里奥.多维数字信号处理[M].北京:科学出版社, 1991.

Truncation Errors Quantitative Analysis For Planar Near-Field Measurement of the Millimeter Wave Antenna

REN Li^{1,2}, DONG Xaio-long⁻¹, ZHAGN Cong^{1,2}

(1. Center for Space Science and Applied Research Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The error analyses on planar near-field measurement system of millimeter wave antenna are described. The effect of the position, shape and area of the truncation planar on the measured errors is proposed, and the error equation of the truncation error is deduced to provide a quantitative analysis. Finally, the related computer simulations are carried out.

Key words: Planar near-field measurement, Millimeter wave, Antenna, Truncation errors, Quantitative analysis

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>