

天线平面近场测量的扫描面截断误差分析

王化深 李娟

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要:本文基于天线平面近场测量技术的基本理论,利用解析法和数值分析法研究分析了天线平面近场测量中有限扫描面截断误差对天线远场特性结果的影响,给出了有限扫描面截断误差所带来的天线辐射方向性图的误差的数量级,即天线方向性图的不确定度,为天线近场测量技术的误差补偿提供了一定的理论依据,同时也得到了一些对实际测量有一定指导意义的结论。

关键词:天线方向性图, 平面近场测量, 误差分析, 不确定度

Analysis of Scanning Plane Truncation Error for the Antenna Planar Near-Field Measurement

Wang Huashen Li Juan

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper is based on the basic theory of antenna planar near-field measurement technology to study the limited scanning plane truncation error and its effect on the antenna radiated pattern by making use of the numerical method. Through comparing with the theoretic result, the up limit or uncertainty of the antenna radiated pattern is given. This provides some theoretic proofs for the error compensation of the antenna near-field measurement technology, and at the same time, some directive conclusions are drawn for the practical measurement.

Keywords: antenna radiated pattern, planar near-field measurement, error analysis, uncertainty.

最早出现现已发展成熟的是天线的远场测量技术。天线的远场测量要求在自由空间中并且满足远场的条件下进行。但随着卫星通信和雷达天线的发展,天线的孔径越来越大,为了满足在远场区测量的条件,测量距离有时需要达到几十公里,这在实测过程中是难以实现的。因此,近几十年来,天线的近场测量技术得以发展和应用,即利用天线的近场测量结果来计算出天线的远场特性,这就是所谓的天线近场测量技术。但天线的近场测量由于各种原因会带来较大的误差,所以天线的近场测量技术远比远场测量要复杂。本文具体分析了天线平面近场测量中的有限扫描面截断误差,对这个误差源可能带来的测量不确定度进行了仿真分析,为天线平面近场测量的误差补偿提供了一定的理论基础。在所有的近场测量技术中,平面近场测量技术由于计算方法

比较简单而受到了广泛的应用。

1 天线平面近场测量原理

根据亥姆霍兹方程 $\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{H} = 0$ 可得天线的辐射场为^[1]:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{A}(k_x, k_y) \exp(-j\vec{k}(k_x, k_y) \cdot \vec{r}) dk_x dk_y \quad (1)$$

其中 $\vec{k} = k_x \vec{u}_x + k_y \vec{u}_y + k_z \vec{u}_z$ 。由(1)式可见,空间的单频电磁场是其平面波谱 $\vec{A}(k_x, k_y)$ 的二维傅里叶变换。只要知道了平面波谱 $\vec{A}(k_x, k_y)$,便可以求出($z > 0$)区域内任意一点的场。因此,只要能测得天线辐射波的平面波谱,即可推出天线的远区场。

对于平面波谱 $\vec{A}(k_x, k_y)$,我们可以先利用一个

本项目为国家自然基金资助项目(编号:60332020)。

本文于2006年4月收到。王化深:副教授;李娟:硕士研究生。

已知电特性的电小天线(天线的几何尺寸远小于波长)或探头以扫描抽样的方式测量近场区内一个平

面上场的切向分量,然后通过下面的公式来计算求得^[1]:

$$\vec{A}(k_x, k_y) = \frac{1}{4\pi^2} \exp(jk_z d) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_x(x, y, d) \exp(j(k_x x + k_y y)) dx dy \quad (2)$$

2 天线平面近场测量中的主要误差

天线平面近场测量技术中的关键问题是测量误差的分析和补偿。在天线的平面近场测量中,存在的主要误差包括探头校正误差、系统相位误差、扫描面位置误差、扫描面的截断误差,探头与天线间的多次反射误差等。本文主要对其中的有限扫描面截断误差进行了分析。

$$\Delta \vec{E}_1(\vec{p}, d) = \exp(-jk_z d) \cdot \int_{k_1} \Delta \vec{A}(\vec{k}_1) \exp(-j\vec{k}_1 \cdot \vec{p}) d\vec{k}_1 \quad (3)$$

其中,

$$\Delta \vec{A}(\vec{k}_1) = \frac{\exp(jk_z d)}{4\pi^2} \iint_{A_0} \vec{E}_1(\vec{p}, d) \exp(j\vec{k}_1 \cdot \vec{p}) d\vec{p},$$

而 A_0 表示取样面以外的平面面积。

2.1.2 扫描面截断误差导致的远场误差

近场测量的目的是得到天线的远场特性。因此,扫描面(A_0)截断误差同样会导致天线的远场特性误差。如果 A_0 面是变化的,则当 A_0 趋向于无穷大时,令 $\vec{E}(\vec{p}, d)$ 趋向于 0,这时 A_0 边界上的场的分布变化也同样反映了取样面大小变化时所引入的远场误差。任取一个扫描面 A_0 ,令 $A < A_0 < \infty$,即可得远场误差为:

$$\varepsilon(\vec{r}) = \frac{\left| \int_{A_0} \vec{E}_1(\vec{p}, d) \exp(j\vec{k}_1 \cdot \vec{p}) d\vec{p} \right|}{\lambda r |\vec{E}_1(\vec{r})|_{r \rightarrow \infty}} \quad (4)$$

对(4)式进行近似计算可以得到远场误差为:

$$\varepsilon(\vec{r}) \leq \frac{\alpha \lambda L_{\max} 10^{-\frac{5}{20}} g(\vec{r})}{2 \cos \gamma_{\max} A} \quad (5)$$

其中,

λ —波长;

A —待测天线口径面的几何尺寸;

x —扫描面边缘处的电平值(dB);

γ_{\max} —扫描面与口径面连线的夹角;

α —被测天线口径分布锥削因子。

由(5)式可以看出: $\varepsilon(\vec{r}) \propto \lambda, x, \frac{1}{A}, \frac{1}{\cos \gamma_{\max}}$ 。

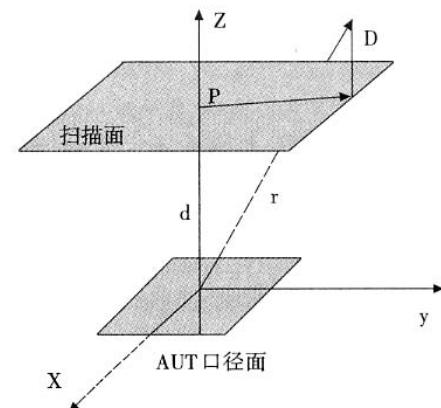


图 1 AUT(被测天线)与扫描面位置坐标关系图

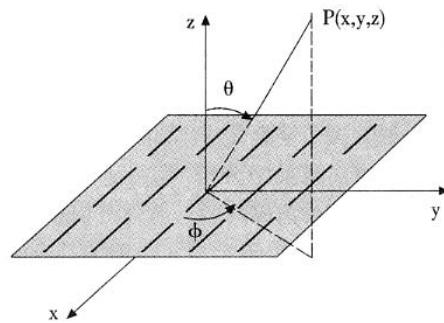


图 2 无穷大理想导体平面上的天线阵及坐标系

3 平面近场测量扫描面截断误差的仿真分析

上面通过分析我们得到了天线平面近场测量中

有限扫描面的截断误差对天线远场方向性图所引入的误差和误差上限(不确定度),下面我们通过建立天线的数学模型并利用计算机进行仿真分析上述近场测量误差对天线方向性图结果产生的不确定度。

$$f(\theta, \phi) = f_0(\theta, \phi) \cdot \sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} I_{mn} \exp(jk(m dx \sin \theta \cos \phi + n dy \sin \theta \sin \phi)) \quad (6)$$

该天线阵在自由空间中任意一点的近场为:

$$E_x(x, y, z) = -j30 \cdot \sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} I_{mn} \left[\frac{\exp(-jkR_{mn1})}{R_{mn1}} + \frac{\exp(-jkR_{mn2})}{R_{mn2}} - \frac{\exp(-jkR'_{mn1})}{R'_{mn1}} - \frac{\exp(-jkR'_{mn2})}{R'_{mn2}} \right] \quad (7)$$

由近远场变换所确定的偶极子阵远场方向性函数(E 面)为:

$$f_E(\theta, \phi) = \frac{\Delta x \Delta y}{4\pi^2} \cdot \left| \sum_{m'=-\frac{M_0-1}{2}}^{\frac{M_0-1}{2}} \sum_{n'=-\frac{N_0-1}{2}}^{\frac{N_0-1}{2}} E_x(m' \Delta x, n' \Delta y, d) \exp(jk_x m' \Delta x + jk_y n' \Delta y) \right| \quad (8)$$

利用上述数学模型可得有限扫描面截断误差的仿真结果如图 3 所示。图 3 是取不同大小的扫描面仿真得到的天线方向性图与理论方向性图的比较。其中,取样间隔为 $\Delta x = \Delta y = 0.4\lambda$; 取样面与天线之间的距离为 $d = 6.5\lambda$; 波长为 $\lambda = 32\text{mm}$ (相对应的频率为 $f = 9375\text{MHz}$); $dx = dy = 0.5\lambda$; $z_0 = 0.25\lambda$ 。

由图 3 我们可以看出:当扫描面大小为 $50\lambda \times 24\lambda$ 时,天线 E 面方向性图的理论计算结果与近场测量变换所得的 E 面方向性图非常吻合,最大误差小于 0.3dB ; 当扫描面大小为 $40\lambda \times 24\lambda$ 时,天线 E 面方向性图的理论计算结果与近场测量变换所得的 E 面方向性图的误差小于 0.7dB ; 当扫描面大小为 $32\lambda \times 24\lambda$ 时,天线 E 面方向性图的理论计算结果与近场测量变换所得的 E 面方向性图的误差变化大于 3dB ; 当扫描面大小为 $24\lambda \times 16\lambda$ 时,天线 E 面方向性图的理论计算结果与近场测量变换所得的 E 面方向性图的误差变化大于 10dB 。

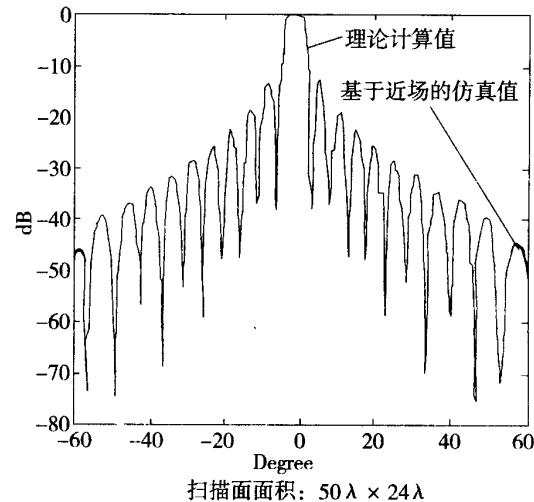
通过对仿真结果的分析,我们还可以发现天线的近场测量存在可信域问题。所谓可信域是指天线前向辐射区域和向两侧扩展大小是 θ_{valid} 的区域所围成的辐射空间。可信域的 θ 值由近场扫描面口径 L,扫描面到天线口径的距离 d,以及天线口径 D 所决定 $\theta_{valid} = \tan^{-1}\left(\frac{L-D}{2d}\right)$,见图 4。由图 3 可见,当扫描面大小为 $50\lambda \times 24\lambda$ 时,可信域为 $-70^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$,最大误差小于 0.3dB ; 当扫描面大小为 $40\lambda \times 24\lambda$ 时,可信域为 $-65^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$,最大误差小于

我们建立的数学模型是一个 $M \times N$ 的偶极子天线阵,如图 2 所示,以此等效一个面天线。根据叠加定理和镜象原理可知,该偶极子天线阵的远场方向性函数为^[4]:

0.7dB ; 当扫描面大小为 $32\lambda \times 24\lambda$ 时,可信域为 $-56^\circ \leq \theta \leq 56^\circ$,可信域内的误差变化小于 1dB ,在 $|\theta| \geq +56^\circ$ 范围的误差大于 3dB ; 当扫描面大小为 $24\lambda \times 16\lambda$ 时,可信域为 $-42^\circ \leq \theta \leq 42^\circ$,可信域内的误差变化小于 3dB ,在 $|\theta| \geq +42^\circ$ 范围的误差大于 10dB 。由此可以得出,天线 E 面方向性图的理论计算结果与近场测量变换所得的 E 面方向性图之间的误差随扫描面的增大而变小,但是对于每一个扫描面而言都存在相应的可信域,在可信域内的误差很小,而可信域外的误差却变化很大。

4 结 论

本文以偶极子天线阵为面天线模型,研究了天线平面近场测量中存在的扫描面截断误差,建立了天线



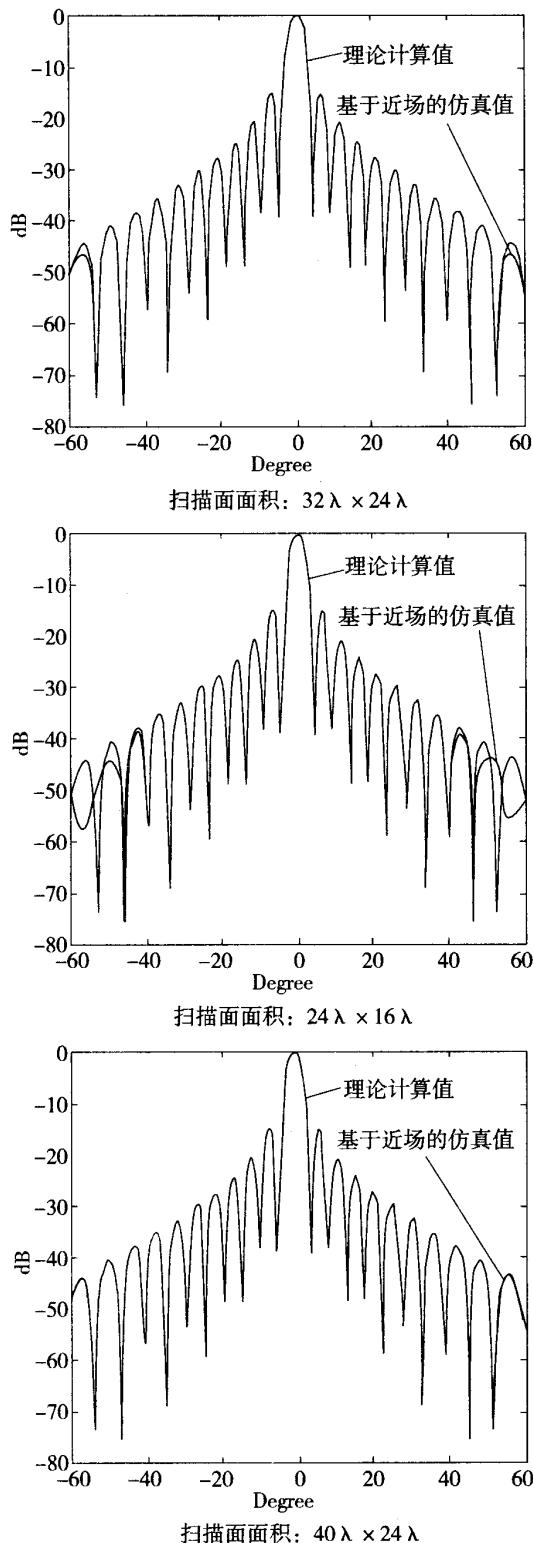


图3 不同大小的扫描面条件下E面方向性图与理论计算结果的比较

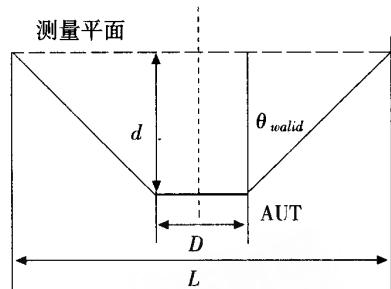


图4 可信域示意图

平面近场测量中扫描面截断误差对天线远场方向性图所造成的误差的数学模型,然后利用该数学模型研究了不同大小的扫描面对天线远场方向性图的影响,并且和理论计算值进行比对,得到关于天线平面近场测量中由扫描面截断所带来的不确定度,为天线近场测量误差的修正或补偿提供了很好的理论基础。此外,在近场算法的研究中,数值的模拟更能反映测量方法自身的问题,它排除了实验中其它多种不可控制的误差源对测试结果的影响,因此,采用数值方法进行误差的理论分析和仿真更具可信度和说服力。

参考文献:

- [1] 张福顺,张进民编著,《天线测量》,西安电子科技大学教材,1995.
- [2] 林昌禄编,《天线测量》,成都电讯工程学院出版社,1988.
- [3] 毛乃宏,俱新德等编著,《天线测量手册》,国防工业出版社,1987.
- [4] 张福顺,“超低副瓣天线平央近场测量误差分析与补偿技术研究”,西安电子科技大学博士学位论文,1999.
- [5] A. C. Newell, “Errors Analysis Techniques for Planar Near Field Measurement”, IEEE Transaction on Antenna and Propagation, June 1988.
- [6] A. C. Newell, “Upper Bound – Errors in Far Field Antenna Parameters Determined from Near Field Measurement, Part2: Analysis and Computer Simulation”, Lecture Notes, National Bureau of Standards, July 1975.

作者简介:



王化深:1957年出生,1985年获工学硕士学位,现为北京交通大学副教授。主要从事电子测量、自动控制和电子电气设备的电磁兼容性研究。承担了多项铁道部项目的研究,发表了多篇学术论文。

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>