

# 天线在近场测量中的卷积外推算法研究

张麟兮<sup>1</sup>, 鲁新建<sup>2</sup>, 李南京<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学无人机特种技术国家级重点实验室, 陕西 西安 710065;

2. 西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710129)

**摘要:** 针对暗室难以满足大尺寸高频率天线测量的远场条件, 为提高精度, 加强保密特性, 提出了一种由天线近场卷积外推到远场的算法。大尺寸高频率天线的纵向尺寸较小时, 可将其辐射的球面波可近似成柱面波, 对其进行柱面波基函数展开, 经过严格的理论推导最终建立起近场与远场的卷积外推关系, 从而实现利用天线近场的测量数据快速获得远场方向图特性。利用 MATLAB 软件对算法进行数学仿真分析并证明其有效的基础上, 对导航天线在近场进行了实际测量。最终对所测数据进行卷积外推, 得到的方向图与天线远场方向图基本吻合, 从而验证了该算法的可靠性, 具有一定的实用价值。

**关键词:** 天线; 卷积外推; 近场; 远场

中图分类号: TN98 文献标识码: A

## Study on Convolution Extrapolation Algorithm of Antenna In Near Field Measurement

ZHANG Lin - xi<sup>1</sup>, LU Xin - jian<sup>2</sup>, LI Nan - jing<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of UAV Specialty Technique, Northwestern Polytechnical University,  
Shanxi Xi'an 710065, China

2. Electronic Information Department, Northwestern Polytechnical University, Shanxi Xi'an 710072, China)

**ABSTRACT:** In order to meet the far - field condition of electrically large antenna measurement in anechoic chamber, a convolution algorithm about extrapolating near - field to far - field was proposed. If an electrically large antenna is short in vertical plane, its irradiating field in horizontal plane can be considered as cylinder wave distribution. With expanding the base function of cylinder wave and establishing the convolution extrapolating relationship, the near - field data can be used to gain the far - field pattern quickly. By theoretical model and simulation for a simple long antenna in MATLAB, the pattern extrapolated can be obtained correctly. Experimental results of a navigation antenna show that this new technique makes experiment agree to theory precisely and can be applied in antenna measurement.

**KEYWORDS:** Antenna; Convolution extrapolation; Near field; Far field

## 1 引言

天线近场测量是指在距离被测天线 3~5 个波长的范围内, 用一个电特性已知的探头在被测天线近区某一平面或曲面上扫描抽样(按照取样定理进行抽样)电磁场的幅度和相位数据, 再经过严格的数学变换计算出被测天线远场的电特性<sup>[1]</sup>。近场测量与传统的远场测量相比, 其优点主要有: 1) 测量成本低、精度高。2) 消除了远场尺寸的限制, 克服了建造大型测试场的困难。3) 因在微波暗室内进行, 排除了天气

的因素, 可以全天候工作。4) 整个测量过程都是在计算机控制下自动完成的, 具有较高的保密性。因此, 近场测量技术在军用、民用中都显示出了它独特的优越性。

在天线近场测量中, 在辐射源近区构造一个包围所有辐射源的简单且容易计算的虚拟假设面, 根据等效原理, 该辐射源的远场电特性可由此虚拟假设面上的等效源获得。在实际测量中用探头沿着该虚拟面采样, 通过获取该面上电磁场的相位和幅度信息, 然后得到等效源, 最终计算出辐射源的远场特性。但是所有的理论公式都是在忽略探头和被测天线多次散射耦合条件下而得出的, 这些公式对常规天线的测量有一定的精度, 但对低副瓣或超低副瓣天线测量就必须

考虑这些因素。所以必须修正探头以降低探头对精度的影响,另外还需要建立严格的耦合方程,而且算法的时间复杂度也较高<sup>[2-5]</sup>。

与传统方法相比,本文提出的卷积外推算法在建模中由于采用一个标准接收天线,无需使用探头,所以避免了对探头的修正;而且近远场的联系公式是通过对被测天线的转角建立起来的,无需建立严格的耦合方程,所以该算法简单可靠,而且精度高。

## 2 卷积外推算法原理

卷积外推法主要是针对微波暗室内天线测量不满足远场条件提出的,其核心是当天线辐射的球面波可以近似为柱面波时,对柱面波加以修正得到平面波,从而获得天线远场方向图特性。

按照基本电磁理论,远区辐射场  $E$  可以由矢量磁位  $A$  表示为:

$$E = j\omega(\hat{k} \times \hat{k} \times A) \quad (1)$$

对于距天线  $R$  远的观察点处的矢量磁位  $A$  与天线上电流分布  $J$  的关系为:

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int J \cdot \frac{e^{-jkR}}{R} dR \quad (2)$$

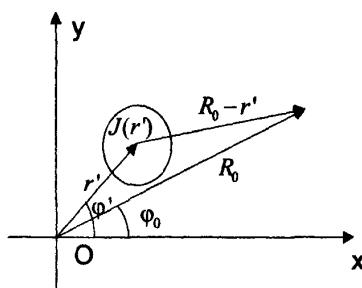


图1 辐射场的几何关系示意图

其中  $k$  为波数,上式可整理成为如图 1 所示的二维自由空间格林函数的形式,

$$A^N(k, R_0) = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{\sqrt{k} \cdot J(r')}{\sqrt{|R_0 - r'|}} \cdot \frac{e^{-jk|R_0 - r'|}}{\sqrt{k|R_0 - r'|}} dr' \quad (3)$$

式中  $A^N(k, R_0)$  为电流源  $J(r')$  在向量  $R_0$  点的矢量磁位,  $r'$  为源点向量。对于大的  $k|R_0 - r'|$ , Hankel 函数能用下面的渐近式表示(Hankel 的大宗近似):

$$H_0^{(2)}(k|R_0 - r'|) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi k|R_0 - r'|}} \exp[j(-k|R_0 - r'| + \frac{\pi}{4})] \quad (4)$$

结合(3)式可以得到如下表达式:

$$A^N(k, R_0) \approx \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{\sqrt{k} \cdot J(r')}{\sqrt{|R_0 - r'|^{1/2}}} \cdot \sqrt{\pi/2} \cdot e^{-jk\pi/4} \cdot$$

$$H_0^{(2)}(k|R_0 - r'|) dr' \quad (5)$$

$H_0^{(2)}(k|R_0 - r'|)$  为第二类 Hankel 函数,它代表向外的行波,根据叠加原理,对其进行柱面波基函数展开:

$$H_0^{(2)}(k|R_0 - r'|) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_n^{(2)}(kR_0) Besselj_n(kr') e^{jn(\varphi_0 - \varphi')} \quad (6)$$

其中  $Besselj_n(kr')$  是第一类 Bessel 函数;当  $R_0 > > r'_{\max}$  时,(5)式中的分母  $|R_0 - r'|^{1/2}$  可以近似为  $|R_0|^{1/2}$ , 记为  $R_0^{1/2}$ 。将式(6)代入(5)中并忽略其中的常数项,可以得到:

$$A^N(k, R_0) \approx \sqrt{\frac{k}{R_0}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_n^{(2)}(kR_0) e^{jn\varphi_0} \int J(r') Besselj_n(kr') e^{-jn\varphi'} dr' \quad (7)$$

令  $\int J(r') Besselj_n(kr') e^{-jn\varphi'} dr' = S_n^k$ , 而这是目标体的归一化傅立叶级数,属于物体固有的特性,与测量距离无关,所以可以将(7)式记为:

$$A^N(k, R_0) = \sqrt{\frac{k}{R_0}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n^k H_n^{(2)}(kR_0) e^{jn\varphi_0} \quad (8)$$

当  $R_0$  足够大,即处在天线辐射的远场的条件下(将  $R_0$  记为  $R$ ,  $\varphi_0$  记为  $\varphi$ ),根据 Hankel 函数的大宗近似,(8)式可以转换成:

$$A^F(k, R) \approx \frac{1}{R} \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{j(-kR + \frac{\pi}{4})} \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n^k e^{jn(\varphi + \frac{\pi}{2})} \quad (9)$$

式中  $A^F(k, R)$  为距天线  $R$  远处的远场矢量磁位,将式(8)和(9)联立并忽略常数项得出:

$$A^F(k, R) \approx A^N(k, R_0) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{j^n e^{jn(\varphi - \varphi_0)}}{H_n^{(2)}(kR_0)} d\varphi_0$$

$$= A^N(k, \varphi_0) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{j^n e^{jn(\varphi_0)}}{H_n^{(2)}(kR_0)} \quad (10)$$

(10)式中“\*”表示卷积运算,通过以上推导,建立起了近场与远场矢量磁位的卷积关系。将(10)式带入到(1)式中即可以得到远场的场强值。根据以上原理可以对天线进行近场测量,利用近场所测数据外推到远场,从而获得天线远场方向图特性。

## 3 理论仿真分析

为了对以上推导进行仿真验证,建立了一个仿真模型,如图 2 所示。

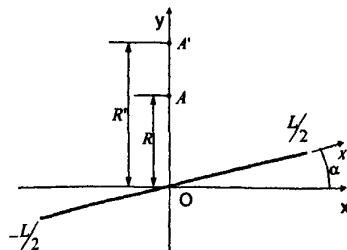


图2 仿真模型图

设理想的线天线模型长度为  $L=1\text{m}$ , 该天线模型纵向尺寸忽略不计。仿真模型图中  $\alpha$  为该线天线围绕其中心 0 点旋转的角度, 在仿真模型中取值范围为  $-30^\circ \sim 30^\circ$ , 假定沿线天线表面的电流幅度和相位都均匀分布, 设天线工作频率为  $10\text{GHz}$ 。要满足远场测量条件, 在本仿真中对应的最小距离为:

$$R_{\min} = 2L^2/\lambda = 2 \times 1^2/0.032248 \approx 67\text{m} \quad (11)$$

所以,  $R$  在仿真中的取值满足  $R < 67\text{m}$  时, 对应图 2 中的 A 点可以近似成线天线的近场点, 在本仿真中取  $R = 10\text{m}$ ; 而当  $R > 67\text{m}$  时, 对应图 2 中的 A' 点则可以近似成远场点, 在本仿真中取  $R' = 1000\text{m}$ 。

当  $R = 10\text{m}$  时, 利用微元法将天线分成无数个微小的点源, 而且每一个点源满足  $kR \gg 1$  的条件。根据电磁场理论, 对每一个点源来说其远场区辐射电场公式<sup>[6]</sup>为:

$$dE = j \frac{Idl}{2\lambda R} \eta \sin \theta e^{-jkR} \quad (12)$$

利用 MATLAB 软件, 对线天线进行积分, 积分区间为  $[-L/2, L/2]$ , 当线天线围绕其中心 0 点从  $-30^\circ$  旋转到  $30^\circ$  时, 取步进角度为  $0.2^\circ$ , 此时在 A 点一共得到 301 个场强值, 每一组值都对应一个旋转角度。根据收发天线的互易性可知, 这 301 组数据即为发射天线(线天线)的近场数据。在图 3 中对应“ $R = 10\text{m}$ ”曲线。

然后根据(1)式中的关系式分别求得以上数据的矢量磁位  $A^N(k, R)$ , 利用卷积关系式(10), 外推得到远场矢量磁位  $A^F(k, R)$ , 最后再由场强与矢量磁位的关系求得远场的场强, 在图 3 中对应“外推远场”曲线, 这些过程利用 MATLAB 编程可以方便的实现。

当  $R' = 1000\text{m}$  时, 对线天线模型上的点源来说显然满足  $kR \gg 1$  的条件。仍然取  $\alpha = -30^\circ \sim 30^\circ$ , 步进角度为  $0.2^\circ$ , 并利用(12)式对线天线进行积分, 得到另一组数据, 由收发天线的互易性可知, 这组数据为线天线的远场场强, 在图 3 中对应“理想远场”曲线。按照仿真条件的设定, 该天线在  $R' = 1000\text{m}$  的远场方向图分布应当为标准的  $\sin c$  函数形式。

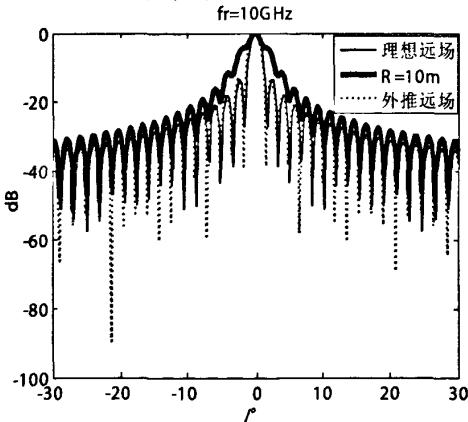


图 3 线天线仿真归一化方向图

在图 3 中, 分别对理想的远场方向图( $R' = 1000\text{m}$ )、 $R = 10\text{m}$  处的近场方向图以及卷积外推  $R = 10\text{m}$  处得到的远场方向图进行比较。从图中可以看到, 在  $R' = 1000\text{m}$  处的理想远场方向图为标准的  $\sin c$  函数形式, 如果所取的步进角度越小, 图 3 中的曲线越光滑, 但这里所取的  $0.2^\circ$  步进角度足够验证卷积外推算法的有效性。在  $R = 10\text{m}$  处的方向图主瓣比理想的远场方向图宽, 副瓣电平也较高, 与理想的远场方向图( $\sin c$  函数形式)相比有较大的误差。然而根据卷积外推算法对  $R = 10\text{m}$  处的仿真数据进行卷积外推后, 得到的外推远场方向图更加接近于理想的远场方向图, 从而通过仿真证明了该卷积外推算法的有效性。

#### 4 实验论证

前面的理论分析和仿真结果表明, 在天线测量中, 当电大天线的纵向尺寸较小时, 用近场区数据进行卷积外推, 能够修正因为不满足远场条件而带来的误差, 从而获得较准确的远场方向图特性。

为了进一步验证该算法的可靠性, 结合实际工程项目, 对如图 4 中的某型导航天线(该天线的远场方向图已知)进行了近场测量。该导航天线长度约为  $L = 2.4\text{m}$ , 直径  $D = 0.1\text{m}$ , 测试频率为  $f_t = 800\text{MHz}$ 。按照天线测量的远场条件, 该导航天线需要的测试距离至少为:

$$R_{\min} = 2L^2/\lambda = 2 \times 2.4^2/0.375 = 30.72\text{m} \quad (13)$$

这在微波暗室内不易满足该远场测试条件, 所以一般进行近场测量, 然后利用本文提出的算法外推出远场特性。

导航天线围绕转台中心旋转, 旋转角度范围为  $-60^\circ \sim 60^\circ$ , 在实际操作中控制转台, 取步进角度为  $0.2^\circ$ 。在离导航天线距离为  $R = 16\text{m}$  的地方放置一个标准喇叭天线作为接收天线(这相当于前面仿真中的 A 点)。根据收发天线的互易性可知, 喇叭天线接收到的数据为导航天线的近场数据, 然后由此数据卷积外推出远场的方向图特性。图 5 分别给出了卷积外推  $R = 16\text{m}$  处的方向图、 $R = 16\text{m}$  处实测方向图和该导航天线已知的远场方向图。

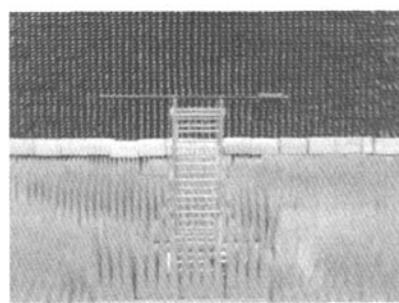


图 4 暗室内架设状态下的待测导航天线

可以看到, 图 5 中 A 和 B 处出现了两个不重合的零深, 分别为导航天线已知的远场方向图的零深和近场测量所得

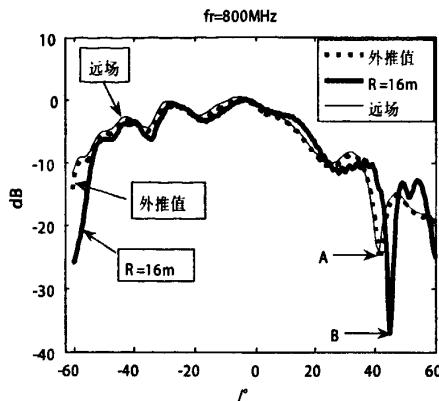


图5 导航天线归一化方向图

方向图的零深,这是由于实际测量中天线转台的中心与天线的相位中心不重合所导致的。经过 MATLAB 编程对转台中心的相位加以修正,使之不影响利用该导航天线进行验证卷积外推算法的可靠性。

最后对近场数据(喇叭天线在  $R = 16m$  处所接收到的)进行卷积外推,外推出的远场方向图与导航天线实际的远场方向图基本吻合;而且由于修正了转台中心相位误差,使得外推方向图与远场方向图的零深也有较好的重合。从图 5 中可以进一步看到,外推出的远场方向图也比在天线近场区 ( $R = 16m$ ) 测得的方向图更平滑,尤其是转角在  $20^\circ \sim 40^\circ$  这一范围更明显。

通过以上分析表明,该算法在实际的天线方向图测试中具有可行性和可靠性,而且精度也较高。

## 5 结论

本文首先对卷积外推算法进行了理论推导,电大天线的横向尺寸较大而纵向尺寸较小时,可将此天线在近场辐射的球面波近似成柱面波,然后通过卷积外推,可以获得电大天线远场的方向图特性。根据该算法建立了一个线天线的仿真模型,利用 MATLAB 软件对该模型进行仿真,仿真结果较好地逼近于理论值,这说明本文提出的方法是有效的。然后结合实际工程项目,在微波暗室内对某导航天线在近场进行

(上接第 358 页)

- [4] Engin Avci, Zuhru Hakan Akpolat. Speech recognition using a wavelet packet adaptive network based fuzzy inference system[J]. *Expert Systems with Applications*, 2006, 31(3):495 - 503.
- [5] 王旭, 韩志艳, 王健, 薛丽芳. 基于动静态组合特征参数的语音识别[J]. *计算机科学*, 2008, 35(7).
- [6] Khurran Waheed, Kim Weaver, Fathi M Salan. A Robust Algorithm for Detecting Speech Segments Using an Entropic Contrast [C]. In: 45th IEEE international Midwest symposium on circuit and systems, Tulsa, Oklahoma, 2002 - 8. 328 - 331.

了测量,利用该算法对所测得的近场数据进行了卷积外推,外推出的方向图与该导航天线实际的远场方向图有较好的吻合,表明该算法应用于实际的天线测量中时也能保证较高的精度。采用该算法,最大的优点是可以有效的解决暗室内很难测量大尺寸高频率天线的问题,而且该算法简单可靠,具有一定的实用价值。

## 参考文献:

- [1] 张福顺,焦永昌,马金平,刘其中,张进民,毛乃宏. 辐射、散射近场测量及近场成像技术的研究进展[J]. 西安电子科技大学学报, 1999, (5).
- [2] A Yaghjian. An overview of near - field antenna measurements [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag*, Jan. 1986, 34(1):30 - 45.
- [3] T Laitinen and O Breinbjerg. A first/third - order probe correction technique for spherical near - field antenna measurements using three probe orientations[J]. *IEEE Trans. Antennas Propag*, May 2008, 56(5):1259 - 1268.
- [4] T Sarkar and A Taaghob. Near - field to near/far - field transformation for arbitrary near - field geometry utilizing an equivalent current and MoM[J]. *IEEE Trans. Antennas Propag*, 1999, 47(3):566 - 573.
- [5] K Persson and M Gustafsson. Reconstruction of equivalent currents using a near - field data transformation with radome application [J]. *Progr. Electromagn. Res.*, PIER, 2005, 54: 179 - 198.
- [6] 丁君. 工程电磁场与电磁波[M]. 北京:高等教育出版社, 2005 - 7.

## 【作者简介】



张麟児(1964.2 - ),男(汉族),四川省江津市人,博士,研究员,中国计算机用户协会仿真应用分会理事,主要研究方向是电磁散射特性二维、三维成像与飞行器隐身特性诊断、天线测试、通信链路半物理仿真、互动式电子战模拟与评估。

鲁新建(1983.1 - ),男(汉族),四川省眉山市人,硕士研究生,主要研究方向是射频微波通信与天线测量。

李南京(1976.5 - ),男(汉族),江西省赣州人,博士,高级工程师,主要研究方向是天线与散射测试技术、系统仿真。

## 【作者简介】



张君昌(1969 - ),男(汉族),陕西省西安市人,副教授,硕士研究生导师,主要研究领域为信号处理、无线通信。

李艳艳(1984 - ),女(汉族),陕西省西安市人,硕士研究生,主要研究领域为语音信号处理与识别。

## 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](http://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](http://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](http://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>