

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210168

## 基于等效磁流法的平面近场测量技术研究\*

周勇<sup>1,2</sup> 喻程<sup>1,2</sup>(1.南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044; 2.南京信息工程大学大气环境与  
装备技术协同创新中心 南京 210044)

**摘要:** 为了进一步论证等效磁流法的近场-远场变换算法在平面近场测量中的实用性与准确性,本文首先根据矩量法(MOM)建立了平面天线口径面上等效磁流的辐射电场方程,利用波导探头采集待测天线平面近场的电场分布,通过共轭梯度法求解矩阵方程,得到天线口径面上的等效磁流分布,之后由格林函数计算出天线远场方向图。最后,通过两种喇叭天线进行实验测试验证。同时将等效磁流法计算出的远场方向图以及由传统的平面波展开法计算出的远场方向图与紧缩场天线测试暗室的测量结果进行对比,结果发现本文算法反演出的远场方向图比平面波展开法在相同测试数据下反演出的远场方向图与紧缩场测量结果相比一致性更好,其中线性角锥喇叭天线的E面和H面方向图吻合度均达到 $140^\circ$ ,双脊喇叭天线的E面方向图吻合度达到 $140^\circ$ ,H面方向图吻合度达到 $100^\circ$ ,验证了等效磁流法算法在平面近场测量中的准确性。

**关键词:** 等效磁流法;共轭梯度法;近场测量;喇叭天线

**中图分类号:** TN820 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Research on planar near field measurement algorithm based on  
equivalent magnetic current methodZhou Yong<sup>1,2</sup> Yu Cheng<sup>1,2</sup>(1. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology,  
Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology,  
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In order to further demonstrate the practicability and accuracy of the near-field to far-field transformation algorithm of equivalent magnetic current method in plane near-field measurement. According to the method of moments (MOM), the radiated electric field equation of the equivalent magnetic current on the aperture surface of the planar antenna is established. The waveguide probe is used to collect the electric field distribution of the planar near-field of the antenna to be measured, and then the conjugate gradient method is used to solve the matrix equation to obtain the equivalent magnetic current distribution on the aperture surface of the antenna, and then the far-field pattern of the antenna is calculated with Green's function. Finally, two types of horn antennas are tested. At the same time, the far-field pattern calculated by the equivalent magnetic current method and the far-field pattern calculated by the traditional plane wave expansion method are compared with the measurement results of the compact field antenna test chamber. The results show that the far-field pattern inversed by this algorithm is more consistent with the compact field measurement results than that inversed by the plane wave expansion method under the same test data. For the pyramidal horn antenna, the radiation pattern shows perfect agreement over  $\pm 70^\circ$  of  $\theta = 0^\circ$  for both E-plane and H-plane. For double ridged pyramidal horn antenna, the radiation pattern has excellent agreement up to  $\pm 70^\circ$  for E-plane, and  $\pm 50^\circ$  for H-plane, which shows acceptable results for the test. The accuracy of the planar near-field measurement using equivalent magnetic current method is verified.

**Keywords:** equivalent magnetic current method; conjugate gradient method; near field measurement; horn antenna

## 0 引言

随着天线技术的不断发展,对天线的测量方法的精确

度也越来越高。平面近场天线测量技术,由于其在较低的测量环境和建造成本情况下,仍然能够保持着较高的安全可靠性和精确度而备受关注。

收稿日期:2022-05-31

\* 基金项目:国家自然科学基金(61601231)项目资助

文献[1-3]中由于平面波理论的成熟性,国内外学者均是基于电磁场的平面波展开理论,利用一个已知特性的采样探头在离待测天线几个波长的辐射近场区中的一个平面上采集近场数据,即天线表面的电流分布,通过表面所有电流分布对远场某个角度的辐射,再应用严格的模态展开理论反演待测天线的远场特性。该方法把平面波带宽限制在了一个范围之内,从而丢失了平面波谱中衰减波的影响因素,这种方法在测量天线大角度范围方向图时会严重影响到口径场的精度。

文献[4-6]同时提出了一种基于等效磁流法的近场测量远场变换算法,通过天线近场口径面上的电场分布计算口径面上的等效磁流分布,进而获取空间中任意位置的天线辐射分布情况。两篇文献中对求解电场积分方程给出了推导过程,并在 MATLAB 中通过仿真数据来验证理论的准确性,由于仿真的近场数据较为理想,理论的准确性在仿真中不能完全体现,不够严谨。

对此,本文在基于等效磁流法平面近场-远场变换算法的研究基础上,利用自主研发的天线近场测量系统,通过两种喇叭天线的实际应用测量实验验证等效磁流法在实际近场测量过程中的准确性。

### 1 等效磁流法

基于等效磁流法的平面近场测量示意图如图 1 所示。

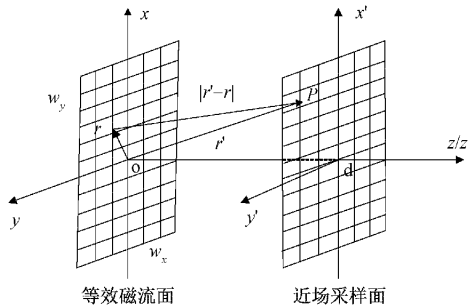


图 1 等效磁流平面近场测量示意图

待测天线口径面作为等效磁流面,设波导探头口径面为近场采样面与等效磁流面距离为  $d$ ,  $P$  点为近场采样面中任意一点,  $\vec{r}$  为等效磁流面上磁流的位移矢量,  $\vec{r}'$  为  $P$  点在近场采样面上的位移矢量,则  $P$  点的电场则可表示为<sup>[7]</sup>:

$$\vec{E}_m = - \int_S \vec{M}(\vec{r}) \times \nabla g'(|\vec{r} - \vec{r}'|) ds \quad (1)$$

其中,  $\vec{E}_m$  表示  $P$  点的电场值,  $\vec{M}(\vec{r})$  为等效磁流,  $S$  为等效磁流面,  $\nabla$  为梯度运算符,  $g(\vec{r}, \vec{r}')$  为自由空间中的格林函数,可表示为:

$$g(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{e^{-jk_0 |\vec{r} - \vec{r}'|}}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (2)$$

其中,  $k_0$  为自由空间波数。

式(2)中,  $\vec{E}_m$  是有近场测量系统采集得到,为了计算

$\vec{M}(\vec{r})$ , 将近场采样面和等效磁流面划分为  $M \times N$  的单元,并采用矩量法(MOM)<sup>[8-9]</sup>将积分方程写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_{m,x}(\vec{r}') \\ \vec{E}_{m,y}(\vec{r}') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -G \\ G & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{M}_x \\ \vec{M}_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $\vec{M}_x, \vec{M}_y$  表示等效面各个单元分别在  $x, y$  方向的磁流矢量<sup>[10]</sup>,  $G$  是维数为  $MN \times MN$  的 Toeplitz 矩阵<sup>[11]</sup>, 矩阵  $G$  表达式如下:

$$G_{k,l} = \iint_{\Omega_l} \frac{e^{-jk_0 |\vec{r}' - \vec{r}|}}{4\pi |\vec{r}' - \vec{r}|^2} d[jk_0 + \frac{1}{|\vec{r}' - \vec{r}|}] ds \quad (4)$$

其中,  $k, l$  分别表示近场点和等效面点,  $|\vec{r}' - \vec{r}|$  表示两个面之间的距离,  $\Omega_l$  表示第  $l$  个单元格的面积。为了求解矩阵方程式(4),引入共轭梯度法(CG)<sup>[12-13]</sup>。

对于类似线性方程  $\vec{Y} = A\vec{X}$ , 为求解  $\vec{X}$ , 构建如下迭代计算:

首先,根据矩阵方程构造向量:

$$\vec{R}_1 = \vec{Y}_1 - A\vec{X}_1 \quad (5)$$

$$\vec{P}_1 = A^* \vec{R}_1 \quad (6)$$

其中,  $A^*$  为  $A$  的共轭转置矩阵, 向量  $\vec{P}_1$  用来跨越有限维空间, 在空间中寻求近似解。令  $i = 1, 2, 3 \dots n$ , 则进行以下公式迭代:

$$a_i = \frac{\|A^* \vec{R}_i\|^2}{\|A\vec{P}_i\|^2} \quad (7)$$

$$\vec{X}_{i+1} = \vec{X}_i + a_i \vec{P}_i \quad (8)$$

$$\vec{R}_{i+1} = \vec{R}_i - a_i A\vec{P}_i \quad (9)$$

$$b_i = \frac{\|A^* \vec{R}_{i+1}\|^2}{\|A^* \vec{P}_i\|^2} \quad (10)$$

$$\vec{P}_{i+1} = A^* \vec{R}_{i+1} + b_i \vec{P}_i \quad (11)$$

其中,  $a_i$  为梯度修正算子, 用于控制收敛速度;  $b_i$  为方向修正算子, 用于确保迭代的收敛。在上述迭代算法中, 最耗时的是计算  $A\vec{P}_i$  和  $A^* \vec{R}_{i+1}$ , 为了减小计算量, 提高算法的运算速度和速率, 利用矩阵  $A$  的 Toeplitz 块特点, 可将矩阵运算转变成卷积运算, 从而可以用快速傅里叶变换(FFT)来求解, 极大地减少了计算量, 进而  $A\vec{P}_i$  和  $A^* \vec{R}_{i+1}$  可表示为:

$$A\vec{P}_i = FFT^{-1}\{FFT(A^c)FFT(\vec{P}_i)\} \quad (12)$$

$$A^* \vec{R}_{i+1} = f_i FFT^{-1}\{FFT(A^c)FFT(\vec{R}_c *_{i+1})\}^* \quad (13)$$

其中,  $FFT$  和  $FFT^{-1}$  分别表示快速傅里叶变换和快速傅里叶逆变换<sup>[14]</sup>。  $A^c$  是原矩阵  $A$  的卷积变换,  $\vec{P}_c, \vec{R}_c$  则分别是  $\vec{P}_i, \vec{R}_{i+1}$  的卷积变换, “\*”表示共轭。通过上述转换能够将矩阵  $A$  的维度从  $[MN, MN]$  降至  $[(2M - 1)(2N - 1), 1]$  的向量, 并通过  $FFT$  运算代替了矩阵运算, 极大的减小了所需的数据存储空间和计算量, 提高了计算速率和效率。

## 2 实验研究

为了验证上文中等效磁流算法在实际近场测量中运用的准确性,用两种喇叭天线在平面天线近场测量暗室<sup>[15]</sup>进行了测量实验,并将等效磁流法反演出的远场方向图与平面波展算法以及江苏北斗卫星导航产品检测认证中心-信大中心紧缩场天线测试暗室测量结果进行对比。

该平面近场测量暗室如图 2 所示,暗室测量范围 1~18 GHz,近场扫描支架可在 X、Y 向自动扫描,扫描精度 0.05 mm,近场测试探头采用矩形波导探头,使用矢量网络分析仪<sup>[16]</sup>对数据进行采集。待测天线置于扫描加正前方,调节待测天线口径面与波导探头中心对准<sup>[17]</sup>并保证垂直距离为 3 倍波长。

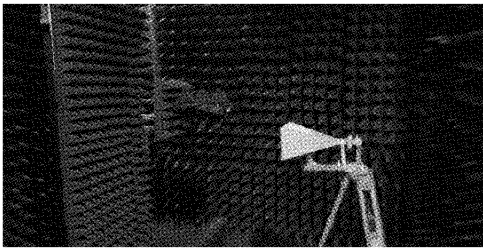


图 2 平面近场实验室暗室

### 2.1 角锥喇叭实验

首先选用角锥喇叭天线为待测天线进行实验,如图 3 所示。实验中,设置工作频率为  $f = 6$  GHz,波长  $\lambda = 50$  mm,待测天线口径面尺寸为  $200$  mm $\times$  $150$  mm,波导探头与待测天线的距离  $d = 3\lambda$ 。根据等效磁流法,待测天线口径面为等效磁流面,波导探头口径面所在平面为采样面,设置近场采样面尺寸为  $12\lambda \times 12\lambda$ ,近场采样间隔为  $1/10\lambda$ ,因此采样点数为  $M \times N = 121 \times 121$ ,利用采集的近场数据进行等效磁流法近远场变换,计算喇叭天线的远场辐射方向图。

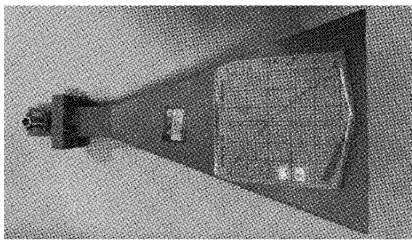


图 3 喇叭天线实物图

使用平面近场测量系统测量的喇叭天线近场电场  $|\vec{E}_x|$  和  $|\vec{E}_y|$ ,通过 MATLAB 绘制出分布结果如图 4 所示。图中横纵坐标为近场采样点数,将测量到的电场值作为输入值通过本文的等效磁流算法计算得出待测天线口径面等效磁流分布如图 5 所示。由图可见,喇叭天线的等效磁流分布与近场电场分布相对应,且表面等效磁流集中在天线口径面上,与实际相吻合。

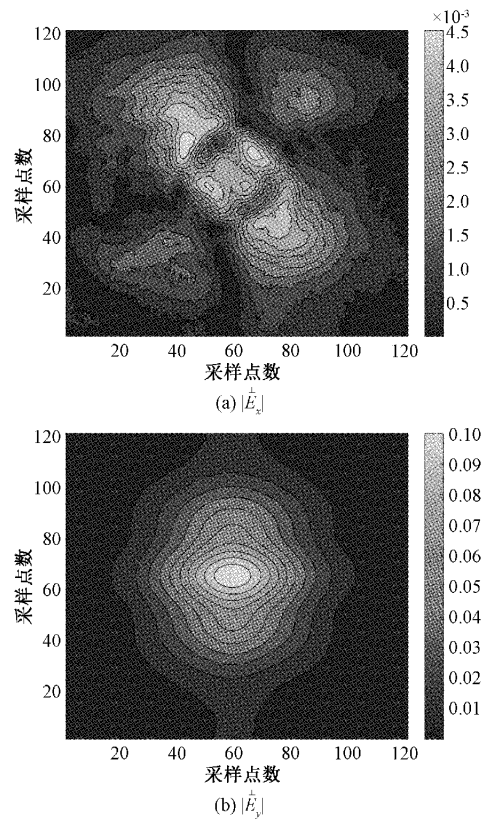


图 4 角锥喇叭近场电场分布图

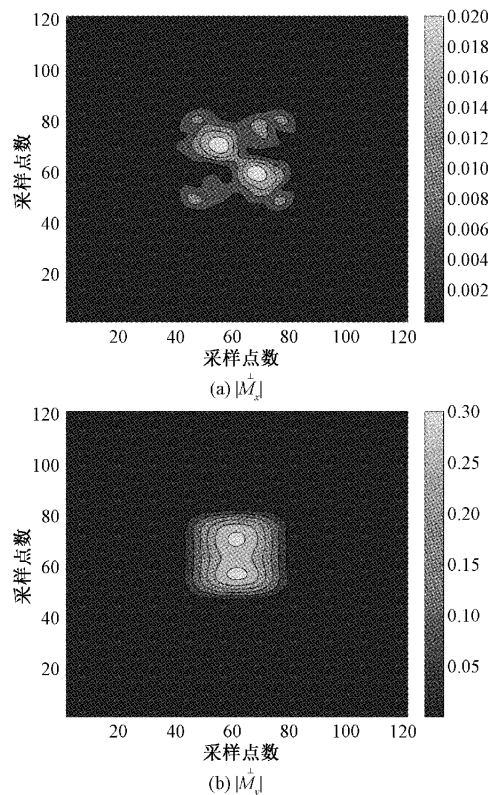


图 5 等效磁流分布图

利用计算得到的等效磁流计算天线的远场方向图,并将其 E 面和 H 面方向图与紧缩场测量的方向图进行比较,结果如图 6 所示。

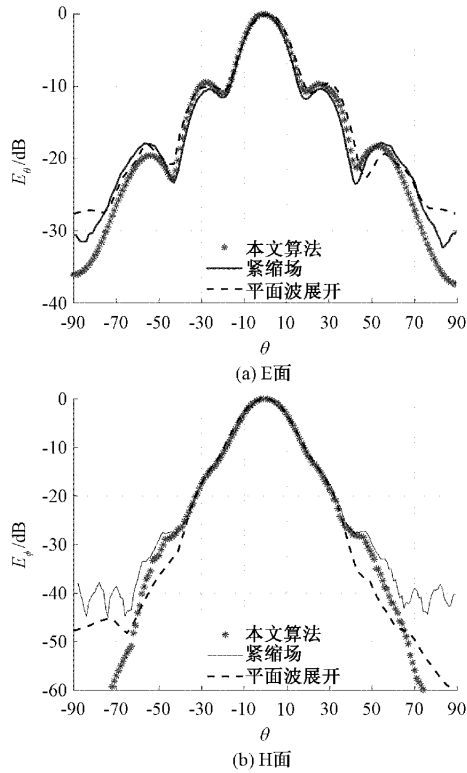


图 6 角锥喇叭天线远近场变换方向图

从图中可以看出,E 面方向图本文算法与平面波展开法在  $-70^{\circ}\sim 70^{\circ}$  范围内与紧缩场基本吻合,主波束、第一旁瓣和第二旁瓣都完全吻合。H 面平面波展开法与紧缩场仅在  $-40^{\circ}\sim 40^{\circ}$  范围内吻合,而本文算法 H 面在  $-70^{\circ}\sim 70^{\circ}$  范围内与紧缩场相比基本吻合,即主波束以及旁瓣基本吻合,满足测量需要。

### 2.2 双脊喇叭天线

再次采用双脊喇叭天线进行实验,其口径面尺寸为  $245\text{ mm}\times 145\text{ mm}$ ,工作频率范围为  $1\sim 18\text{ GHz}$ ,如图 7 所示。在实验中保持测量使用的矩形波导探头不变,同样设置工作频率为  $6\text{ GHz}$ ,波长  $\lambda=50\text{ mm}$ ,波导探头与待测天线的距离为  $d=3\lambda$ 。近场采样面尺寸为  $8\lambda\times 8\lambda$ ,近场采样间隔为  $1/5\lambda$ ,因此采样点数为  $M\times N=41\times 41$ 。

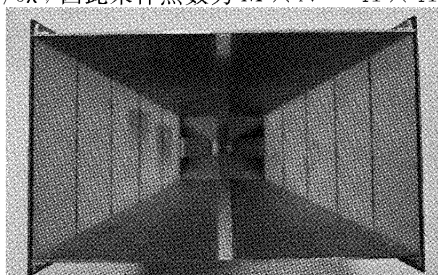


图 7 双脊喇叭天线实物图

利用同样的方法测量双脊喇叭天线的近场电场分布以及通过等效磁流法计算得出的等效磁流分布如图 8、9 所

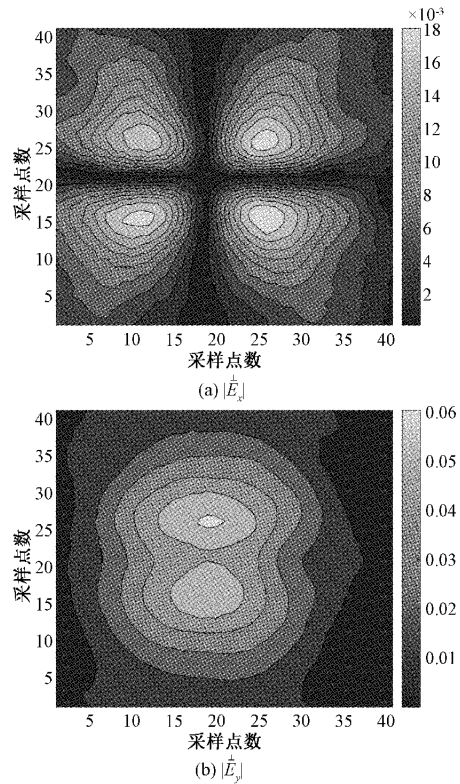


图 8 双脊喇叭近场电场分布图

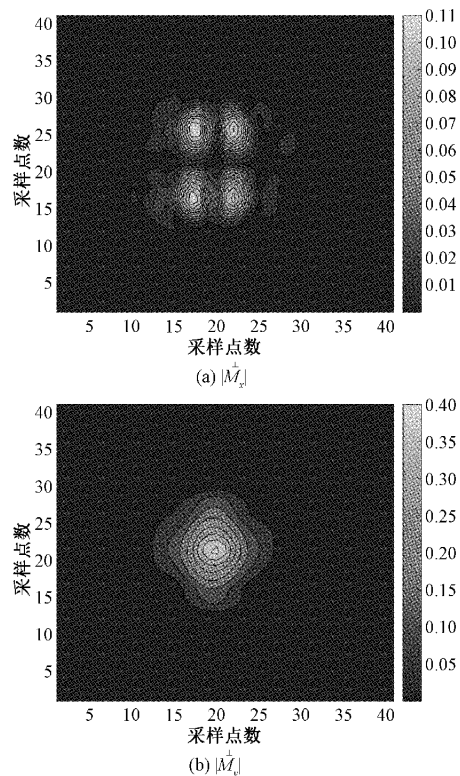


图 9 等效磁流分布图

示,由图可知,由算法求解电场积分方程得到双脊喇叭天线口径面上的等效磁流分布完全符合其口径面上的真实电场分布。

利用计算得到的等效磁流计算出的双脊喇叭天线的远场方向图,并将其 E 面和 H 面方向图与紧缩场测量的结果进行比较,结果如图 10 所示。

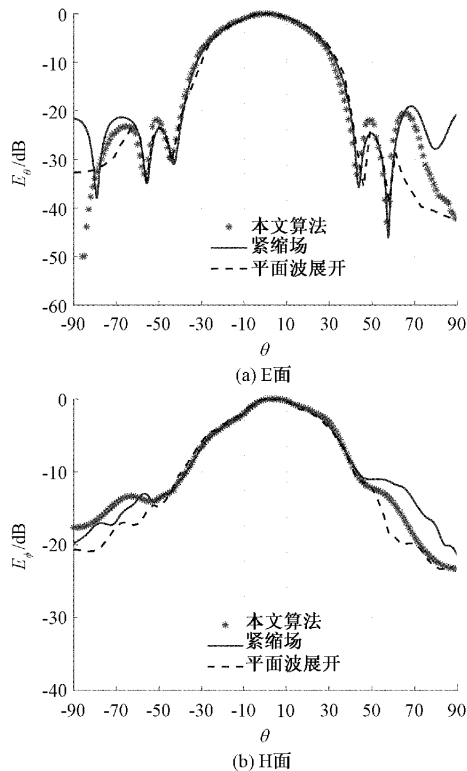


图 10 双脊喇叭天线远近场变换方向图

由图可知,通过等效磁流计算出的双脊喇叭天线的 E 面方向图与平面波展开法计算出的 E 面方向图相比,本文算法与紧缩场结果更加吻合。两种算法 H 面方向图在  $-50^\circ \sim 50^\circ$  范围内与紧缩场重合度相近,本文算法更能够体现天线特征,能够更好的满足实际测量需求。

### 3 结 论

本文详细研究了等效磁流法天线近场-远场变换算法,并通过平面近场暗室,对两种喇叭天线进行了实际测量实验,将测量数据分别通过等效磁流法近场-远场变换和平面波展开法计算出天线远场方向图,并与紧缩场测量结果比较,对比分析表明等效磁流法反演的标准角锥喇叭天线方向图在 E 面和 H 面的准确度达到  $140^\circ$ ,双脊喇叭天线在方向图 E 面准确度为  $140^\circ$ ,H 面准确度为  $100^\circ$ ,待测天线的 E 面、H 面方向图中主瓣和第一旁瓣均与实际相吻合,两种天线的实验对比均比平面波展开法所反演的远场方向图具有更高的准确度,实验证明基于等效磁流法的天线近场测量算法可以满足天线实际测量需求。

### 参考文献

- [1] BO X, HELANDER J, ERICSSON A. Investigation of planar near-field measurement of millimeter-wave antenna for 5G application [C]. 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), IEEE, 2016.
- [2] 桂客. 平面近场天线测量中的探头补偿技术研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2018.
- [3] 高忠雄. 天线近场测量系统关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2021.
- [4] 郁佳婧. 平面天线近场测量系统的研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2020.
- [5] 辛彪,周俊萍,周勇,等. 天线平面近场测量算法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2017,40(11):1507-1510,1551.
- [6] 周勇,郁佳婧,陈挺. 基于 CGFFT 和等效磁流法的天线近场测量方法研究[J]. 中国测试,2020,46(1):18-23.
- [7] WANG X, PENG J H, DUAN X H. Preparation of modified semi-coke by microwave heating and adsorption kinetics of methylene blue[J]. The Journal of microwave power and electromagnetic energy: a publication of the International Microwave Power Institute, 2013,47(2):110-125.
- [8] 王镇雷. 中低频的电场积分方程矩量法研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- [9] DAULT D, SHANKER B. A mixed potential MLFMA for higher order moment methods with application to the generalized method of moments[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2016,64(2):650-662.
- [10] 黄琳森,徐中明,张志飞,等. 快速迭代收缩阈值声源识别算法及其改进[J]. 仪器仪表学报,2021,42(2):257-265.
- [11] CHEN H, SARKAR T K. Using planar probe array near field measurement to obtain accurate far field antenna pattern efficiently [C]. 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics(ICCEM), IEEE, 2019.
- [12] SHIROKOV E. Computations of the input impedance of antennas in cold magnetoplasmas in nongyrotropic and quasi-stationary cases using the method of moments [J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 2015,63(12):5846-5849.
- [13] ZHANG M, ZHANG A, YANG Q. Robust adaptive beamforming based on conjugate gradient algorithms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016,64(22):6046-6057.
- [14] 高知明,胡宁,周勇,辛彪. 基于电流探测的平面近远场

- 变换方法[J]. 现代雷达, 2018, 40(3): 58-62.
- [15] 柳锐锋, 甘连仓, 梁婷, 等. 仿真暗室天线近场测试研究[J]. 电子测量技术, 2012, 35(12): 38-40, 45.
- [16] 李秀娟, 刘永信, 黄平平, 等. 矢量网络分析仪极化特征参数测量校准方法研究[J/OL]. 电子测量与仪器学报: 1-7 [2022-12-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2488.TN.20220526.1719.022.html>.
- [17] 王世民, 罗海, 林洪彬, 等. 一种二次雷达相控阵系统的自动校准方法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(8): 117-120.

#### 作者简介

周勇, 研究生导师, 博士, 主要研究方向为天线测量技术、电磁波传播技术。

E-mail: 841753482@qq.com