

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519133

# 双球面无相位近远场变换方法研究

李建煌 贾云飞

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

**摘要:** 针对高频天线近场测量中相位信息缺失导致的远场重构精度下降问题,提出一种基于双球面采样的无相位近远场变换方法。基于等效磁流近远场变换理论,通过双球面截断幅值流算法实现等效磁流重构与远场反演。首先对测量矩阵实施预处理以保证算法的收敛性;其次在迭代过程中引入 Armijo 线搜索策略优化步长选择,提升等效磁流解的逼近效率;通过双球面交替采样机制有效降低测量矩阵相关性,增强幅值信息的空间采样维度。仿真实验表明:对于不同类型大小的天线,在仅获取双球面近场幅值的条件下,所提方法可实现主瓣 $\pm 60^\circ$ 范围内的精确远场重构,其幅度误差控制在 0.5 dB 以内。在实际近场测量中计算结果吻合良好。该方法为无相位近场测量提供了有效解决方案,具有工程实用价值。

**关键词:** 近远场变换;相位恢复;等效磁流法;截断幅值流算法;双球面采样

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

## Study on phaseless bistatic near-field to far-field transformation methodology

Li Jianhuang Jia Yunfei

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To address the accuracy degradation in far-field reconstruction caused by phase information absence during high-frequency antenna near-field measurements, this paper proposes a phase-less near-field to far-field transformation method based on dual-spherical sampling. Building upon the equivalent magnetic current theory, the proposed method achieves equivalent current reconstruction and far-field retrieval through a dual-spherical truncated amplitude flow algorithm. The implementation features three key innovations: first, row scaling preprocessing of the measurement matrix ensures algorithm convergence; second, Armijo line search optimization enhances iteration step selection efficiency for solution approximation; third, an alternating sampling mechanism between dual spherical surfaces effectively reduces measurement matrix correlation while expanding satial sampling dimensions. Simulation results demonstrate that, for antennas of different types and sizes, using only dual-spherical near-field amplitude data, the proposed method achieves precise far-field reconstruction within  $\pm 60^\circ$  of the main lobe, maintaining amplitude errors below 0.5 dB. The results of the calculations are in good agreement in the actual near-field measurements. This approach provides an effective solution for phase-less near-field measurements and demonstrates practical engineering value.

**Keywords:** near-field to far-field transformation; phase retrieval; equivalent magnetic current method; truncated amplitude flow algorithm; dual-spherical sampling

## 0 引言

随着 5G/6G 通信、卫星互联网和太赫兹技术的快速发展,对高频天线的性能测试有着越来越高的要求。天线测量主要分为近场测量与远场测量,远场测量受场地、气候、仪器等影响,测试条件困难<sup>[1]</sup>。近场测量技术凭借着测试条件低、测量精度高的优势,已经成为了天线测试中的核心

测量方法<sup>[2]</sup>。然而传统的近场测量需要获取待测天线的近场幅度和相位的全信息采集,在实际工程中相位的测量困难<sup>[3]</sup>。一方面,高频段相位测量需要昂贵的矢量网络分析仪和严格的探头校准,这使得系统成本和难度激增;另一方面,相位信息对机械振动、温度和环境噪声极为敏感,实际测量中非常容易出现相位误差累积的问题。这使得无相位近场测量技术成为近年来的研究热点,其核心在于仅利用

近场幅度信息实现远场特性重构,突破传统相位测量限制。

在无相位测量算法研究方面,国内外学者已取得一系列进展。经典的无相位算法是通过采集两个采样面的幅度信息<sup>[4]</sup>,通过初始相位估计、替换测得的电场强度和保留计算相位的步骤,两个采样面能够不断交换信息并迭代收敛<sup>[5-6]</sup>,利用推导的球模系数成功重建了远场。在文献[7]中使用遗传算法进行初始相位寻优,根据初始迭代相位和两个采样球面上的电场幅值,利用基于共轭梯度法的迭代傅里叶算法对扫描点的相位进行精细还原。最后利用球面近远场变换算法,得到待测天线的远场方向图。上述文献都是通过两个采样面之间迭代的方式恢复相位。在文献[8-9]中使用了基于非凸优化的相位恢复算法,该算法只需要单层无相位采样面就可以计算出天线远场,大大减少了采样时间。

然而,上述无相位近远场变换方法存在共同的局限性:它们只能使用平面、球面或柱面等规则采样面,难以适应复杂天线测量环境;同时,大多数方法仍需遵循奈奎斯特采样原则,高频天线采样点数量较多,测量效率不高。

相比之下,源重构等效磁流的近远场变换方法具有明显优势:可通过任意形状的采样面计算天线远场,不必严格遵守奈奎斯特采样原则,能够显著减少采样数量,适用性更广泛。但目前该方法在无相位测量领域的应用研究仍不充分,特别是在算法稳定性和精度方面仍有提升空间。

本文基于等效磁流法的近远场变换方法<sup>[10-11]</sup>,创新性地采用双球面截断幅值流(truncated amplitude flow, TAF)相位恢复算法求解等效磁流<sup>[12]</sup>,通过计算得到的等效磁流反推天线远场。同时在 TAF 当中增加了步长线搜索算法,提高了 TAF 算法的精度,减小了变换远场的误差。在近场采样方面,使用了双球面采样的方法,这使得采样过程能够提供更多的信息来补偿缺少相位的问题,并通过两个采样面进行交替偏移取点来减小数据量。本文方法不仅克服了传统无相位算法对采样面形状的限制,还通过改进的 TAF 算法提高了计算精度,为高频天线测量提供了更加灵活高效的解决方案。

## 1 理论与方法

### 1.1 等效磁流法

基于等效磁流法的变换方法适用于任意形状的近场采样面,本文将使用球面采样面进行计算。基于等效磁流法的球面近场测量示意图如图 1 所示。

待测天线口径面作为等效磁流面,设波导探头与等效磁流面中心的距离为  $r$ ,  $P$  点为近场采样球面上的任意一点,  $r'$  为等效磁流面上磁流的位移矢量,  $\vec{r}$  为  $P$  点在球面扫描面  $S_2$  上的位移矢量,则  $P$  点的电场可以表示为式(1):

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla \times \iint \mathbf{M}(\vec{r}') g(\vec{r}, \vec{r}') ds' \quad (1)$$

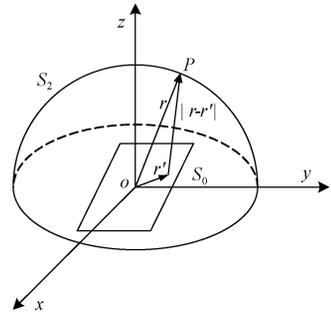


图 1 等效磁流法球面近场测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spherical near-field measurement of the equivalent magnetic flow method

其中,  $\vec{E}(\vec{r})$  表示  $P$  点的电场值,  $\mathbf{M}(\vec{r}')$  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,可表示为式(2):

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

其中,  $k$  为自由空间波数。

式(1)中的  $\vec{E}(\vec{r})$  可由近场测量系统采集得到,为了计算等效磁流  $\mathbf{M}(\vec{r}')$ ,将等效磁流面划分为  $M \times N$  的单元,并采用矩量法(moment methods, MOM)<sup>[13-14]</sup>将积分方程写成矩阵形式如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_{meas,\theta} \\ \vec{E}_{meas,\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} \\ \mathbf{H}_{21} & \mathbf{H}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{M}_x \\ \vec{M}_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $\vec{E}_{meas,\theta}$  和  $\vec{E}_{meas,\varphi}$  为近场采样电场值的  $\theta$  分量和  $\varphi$  分量,  $\vec{M}_x$ 、 $\vec{M}_y$  表示等效面各个单元分别在下  $x$ 、 $y$  方向的磁流矢量<sup>[15]</sup>,  $\mathbf{H}_{11}$ 、 $\mathbf{H}_{12}$ 、 $\mathbf{H}_{21}$ 、 $\mathbf{H}_{22}$  是测量矩阵的 4 个子阵,其具体解析式表达如式(4)所示。

$$\left. \begin{aligned} [\mathbf{H}_{11}] &= \left\{ \begin{aligned} &\cos\theta_k \sin\varphi_k(z_k^f)G(R_{k,l}) \\ &+ \sin\theta_k(y_k^f - y_l^i)G(R_{k,l}) \end{aligned} \right\} \Delta x \Delta y \\ [\mathbf{H}_{12}] &= - \left\{ \begin{aligned} &\cos\theta_k \cos\varphi_k(z_k^f)G(R_{k,l}) \\ &+ \sin\theta_k(x_k^f - x_l^i)G(R_{k,l}) \end{aligned} \right\} \Delta x \Delta y \\ [\mathbf{H}_{21}] &= \{ \cos\varphi_k(z_k^f)G(R_{k,l}) \} \Delta x \Delta y \\ [\mathbf{H}_{22}] &= \{ \sin\varphi_k(z_k^f)G(R_{k,l}) \} \Delta x \Delta y \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中,  $G(R)$  表达式如式(5)所示。

$$G(R_{k,l}) = \frac{e^{-jk_0 R_{k,l}}}{4\pi R_{k,l}^2} \left( jk_0 + \frac{1}{R_{k,l}} \right) \quad (5)$$

式(4)、(5)中,  $\theta_k$  和  $\varphi_k$  分别是第  $k$  个测量场点在球坐标系下的  $\theta$  和  $\varphi$  坐标,  $x_l^i$  和  $y_l^i$  是第  $l$  个源点的  $x$  和  $y$  坐标,  $x_k^f$ 、 $y_k^f$ 、 $z_k^f$  是第  $k$  个测量场点在直角坐标系下的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标,  $\Delta x \Delta y$  为小单元的面积,  $R_{k,l}$  是第  $k$  个测量场点到第  $l$

个源点的距离,表达式为:

$$R_{k,i} = \sqrt{(x_k^f - x_i^f)^2 + (y_k^f - y_i^f)^2 + (z_k^f)^2} \quad (6)$$

将式(3)改写为式(7):

$$\mathbf{A}_{m \times n} \mathbf{X}_n = \mathbf{E}_m \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{A}_{m \times n}$  为测量矩阵,  $\mathbf{X}_n$  为等效磁流矩阵,  $\mathbf{E}_m$  为电场矩阵,  $m$  为近场采样点数量的 2 倍,  $n$  为等效磁流小单元数量的 2 倍。

由矩量法推导出的线性方程组有许多不同的解法,例如 Tikhonov 正则化、截断奇异值分解(TSVD)、最小二乘法等。由于绝大多数的测量矩阵  $\mathbf{A}_{m \times n}$  往往是病态的,因此求解式(7)的方程组选用 Tikhonov 正则化<sup>[16]</sup>。求解公式可以定义为:

$$\mathbf{X}_n = (\mathbf{A}_{m \times n} \mathbf{A}_{m \times n}^H + \alpha^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}_{m \times n}^H \mathbf{E}_m \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{A}_{m \times n}^H$  为  $\mathbf{A}_{m \times n}$  的转置矩阵,  $\alpha$  为正则化参数。

根据式(8)解出方程组,从而得到等效磁流源  $\vec{\mathbf{M}}_x$ 、 $\vec{\mathbf{M}}_y$ , 远场任意位置的电场值便皆可由式(3)计算得到,由此便可计算得到天线远场方向图。

### 1.2 截断振幅流算法

TAF 算法将未知向量的恢复转换为求解式(9)中关于幅度误差最小化的非凸优化问题<sup>[17]</sup>。

$$\min_z f(z) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (|\langle \mathbf{a}_i, \mathbf{z} \rangle| - b_i)^2 \quad (9)$$

其中,  $f(z)$  为代价函数,  $\mathbf{a}_i$  为测量矩阵  $\mathbf{A}_{m \times n}$  的第  $i$  个行向量的共轭转置,  $b_i$  为幅值向量  $|\mathbf{E}_m|$  中第  $i$  个电场幅度测量值,  $\mathbf{z}$  为待求的等效磁流源向量。求解该极小化问题流程如下:

1) 输入: 测量幅值  $\{b_i\}_{i=1}^m$ ; 测量矩阵行向量的共轭转置  $\{\mathbf{a}_i\}_{i=1}^m$ , 最大迭代次数  $T$ , 对于复数模型, 设置迭代步长  $\mu = 1$ ; 截断阈值  $|\bar{I}_0| = \lceil m/6 \rceil$ ;  $\gamma = 0.7$ 。

2) 构造  $\bar{I}_0$ , 其元素为  $\{b_i / \|\mathbf{a}_i\|\}$  中最大的  $|\bar{I}_0|$  个元素对应的标号。

3) 初始化:

$$\mathbf{z}_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \mathbf{a}_i^2}{m}} \hat{\mathbf{z}}_0 \quad (10)$$

其中,  $\hat{\mathbf{z}}_0$  为矩阵  $\mathbf{Y}$  的主特征向量。

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{|\bar{I}_0|} \sum_{i \in \bar{I}_0} \frac{\mathbf{a}_i \mathbf{a}_i^*}{\|\mathbf{a}_i\|^2} \quad (11)$$

4) 循环: 从  $t = 0 \sim T - 1$ , 执行:

$$\mathbf{z}_{t+1} = \mathbf{z}_t - \frac{\mu}{m} \sum_{i \in \bar{I}_{t+1}} (\mathbf{a}_i^* \mathbf{z}_t - b_i \frac{\mathbf{a}_i^* \mathbf{z}_t}{|\mathbf{a}_i^* \mathbf{z}_t|}) \mathbf{a}_i \quad (12)$$

其中, 索引集

$$\bar{I}_{t+1} := \left\{ 1 \leq i \leq m, \|\mathbf{a}_i^* \mathbf{z}_t\| \geq \frac{1}{1 + \gamma} b_i \right\} \quad (13)$$

5) 输出:  $\mathbf{z}_T$ 。

为了保证 TAF 算法能够收敛, 需要对等效磁流法的

式(6)中的测量矩阵  $\mathbf{A}_{m \times n}$  的行向量进行缩放使得方差为 1, 同时需要对近场测量的幅值进行同样的缩放可以等效磁流结果不变, 缩放方法如下:

$$\mathbf{a}_i' = \mathbf{a}_i / \sqrt{v_i} \quad (14)$$

$$b_i = b_i / \sqrt{v_i} \quad (15)$$

其中,  $v_i$  为测量矩阵  $\mathbf{A}_{m \times n}$  第  $i$  行向量的方差。

TAF 算法中的固定步长会导致无法获得最优解, 为了解决该问题并提高精度, 在 TAF 算法中加入 Armijo 线搜索算法, 每次迭代时通过改变迭代步长来保证损失函数能够持续向最优解方向下降。Armijo 条件的数学形式如式(16):

$$f(\mathbf{z}^{(t)} + \mu \mathbf{d}^{(t)}) \leq f(\mathbf{z}^{(t)}) + \sigma \mu \nabla f(\mathbf{z}^{(t)})^T \mathbf{d}^{(t)} \quad (16)$$

其中,  $\mathbf{z}^{(t)}$  为第  $t$  次迭代的等效磁流源向量,  $\mathbf{d}^{(t)} = -\nabla f(\mathbf{z}^{(t)})$  为代价函数的负梯度方向,  $\sigma$  为控制下降幅度的常数, 通常取  $\sigma = 0.1$ ,  $\mu$  为待搜索的步长, Armijo 线搜索算法流程图如图 2 所示。

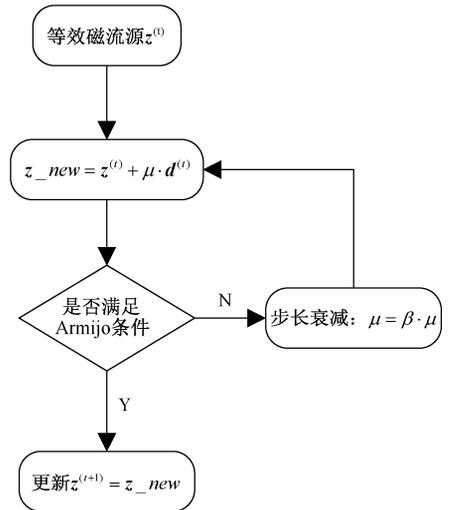


图 2 Armijo 线搜索算法流程图

Fig. 2 Flow chart of Armijo line search algorithm

其中, 衰减因子通常取  $\beta = 0.5$ 。

通过 TAF 无相位算法计算得到等效磁流源  $\mathbf{z}$  后, 便可通过式(3)计算天线远场任意点的电场。

## 2 仿真实验

为了验证上文提出方法的准确性, 利用 Matlab 软件编写算法进行验证。研究中的近场数据和用于比较的理想远场方向图由电磁仿真软件 ANSYS HFSS 提供。

由于在无相位测量中缺少相位信息, 仅在单个采样面上进行过采样将导致测量矩阵中出现线性相关的行。这使得算法无法检索到精确的等效磁流源。此外, 不断增加样品量并不能显著提高等效磁流源的检索精度。为了解决这个问题, 在样本数量相同的情况下, 本文 TAF 算法使用的近场数据为两个同心半球上测量得到, 且两个同心半球面上采样点的分布形式为交替分布<sup>[18]</sup>。

如图 3 所示,待测天线位于坐标原点,扫描采样面位于 Z 轴正半空间,等效源面位于 XOY 面,等效源面尺寸略大于待测天线口径面,且被划分为  $M \times N$  个矩形小单元。

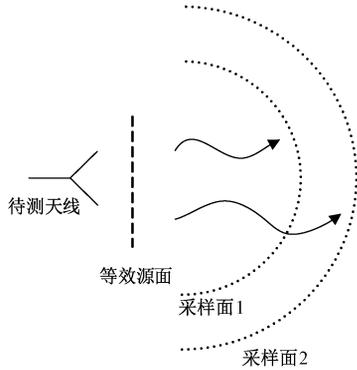


图 3 天线近场测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of antenna near-field measurement

### 2.1 圆锥喇叭天线仿真

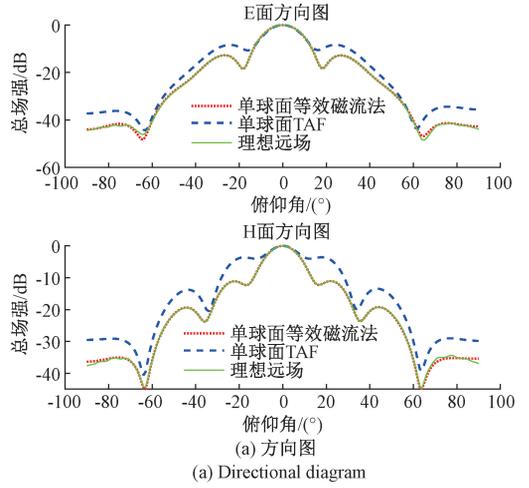
实验使用的圆锥喇叭天线工作频率为 15 GHz,天线的口径面直径为  $4\lambda$ ,  $\lambda$  为波长。天线口径面位于 XOY 平面上,主波束方向沿 z 向,等效口径面设置在天线的真实口径面上,大小为  $4\lambda \times 4\lambda$ ,等效源单位大小为  $0.2\lambda$ ,半球采样面圆心在坐标系原点,球面 1 半径为  $5\lambda$ ,球面 2 半径为  $10\lambda$ ,有相位等效磁流法算法和单球面 TAF 算法使用的近场数据为球面 1,俯仰角和方位角角度差为  $5^\circ$ 。双球面 TAF 算法使用的近场数据为球面 1 和球面 2 交替采样的数据,俯仰角和方位角角度差同样为  $5^\circ$ ,迭代 1 000 次。三者总采样数量均为 1 387。

图 4 为单球面 TAF 算法与等效磁流法计算得到的远场方向图与理想远场方向图的对比结果,其中 TAF 算法使用的是球面 1 的近场幅值数据,等效磁流法使用的是球面 1 的近场幅相数据,误差为绝对误差。由图 4 可知,通过等效磁流法计算得到的远场方向图与理想方向图基本重合,尤其是在中心  $120^\circ$  内误差低于 0.5 dB,而单球面 TAF 算法计算得到的远场方向图与理想方向图误差太大,没有应用价值。

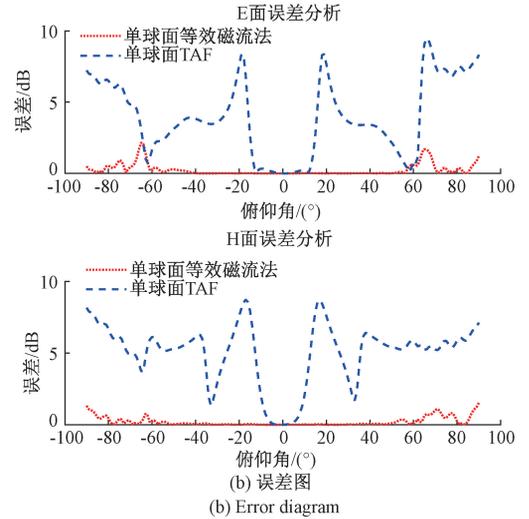
图 5 为双球面 TAF 算法与双球面等效磁流法计算得到的远场方向图与理想远场方向图的对比结果,使用的都是球面 1 和球面 2 的近场交替取样幅值数据。由图 4 可知,通过双球面 TAF 算法计算得到的远场方向图与理想方向图基本重合,尤其是在中心  $120^\circ$  内误差低于 0.5 dB,这验证了本文所提出的双球面无相位算法的正确性。

### 2.2 矩形微带天线仿真

仿真使用的天线为工作频率为 30 GHz 的矩形微带天线,辐射贴片大小为  $4.65 \text{ mm} \times 3.14 \text{ mm}$ ,辐射贴片位于 XOY 平面上,主波束方向沿 z 向,等效面设置在天线的辐射贴片上,大小与辐射贴片大小一致,等效源单位大小为  $0.3\lambda$ ,半球采样面圆心在坐标系原点,球面 1 半径为  $5\lambda$ ,球



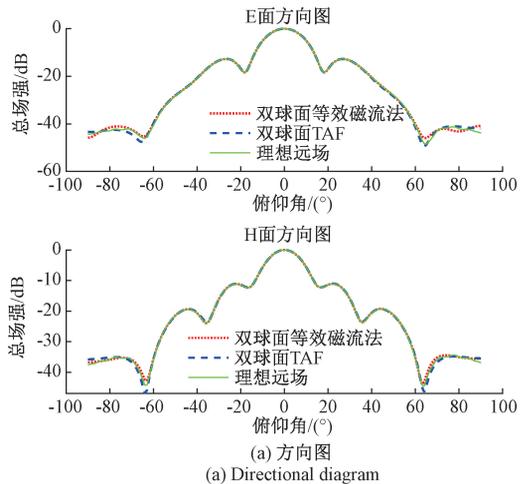
(a) Directional diagram



(b) Error diagram

图 4 圆锥喇叭天线单球面仿真结果

Fig. 4 Simulation results of conical horn antenna with single spherical surface



(a) Directional diagram

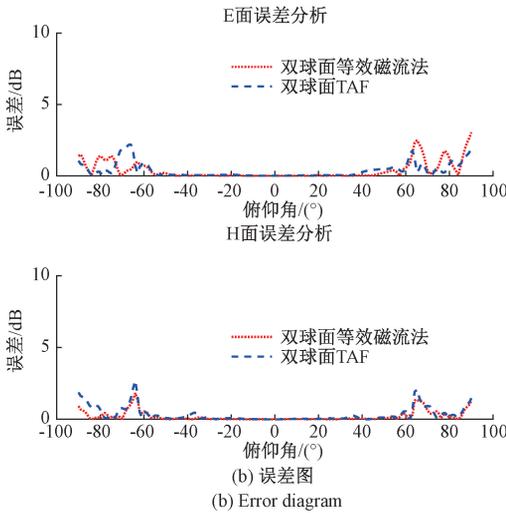


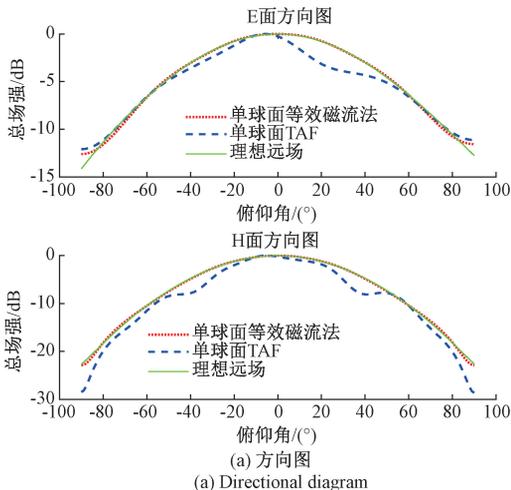
图5 圆锥喇叭天线双球面仿真结果

Fig. 5 Simulation results of double spherical surface of conical horn antenna

面2半径为 $10\lambda$ ,有相位等效磁流法算法和单球面TAF算法使用的近场数据为球面1,俯仰角和方位角角度差为 $5^\circ$ 。双球面TAF算法使用的近场数据为球面1和球面2交替采样的数据,俯仰角和方位角角度差同样为 $5^\circ$ ,迭代1000次。三者总采样数量均为1387。

图6为单球面TAF算法与等效磁流法计算得到的远场方向图与理想远场方向图的对比结果,其中TAF算法使用的是球面1的近场幅值数据,等效磁流法使用的是球面1的近场幅相数据,误差为绝对误差。由图4可知,通过等效磁流法计算得到的远场方向图与理想方向图基本重合,尤其是在中心 $120^\circ$ 内误差低于 $0.5\text{ dB}$ ,而单球面TAF算法计算得到的远场方向图与理想方向图误差太大,没有应用价值。

图7为双球面TAF算法与双球面等效磁流法计算得到的远场方向图与理想远场方向图的对比结果,使用的都是球面1和球面2的近场交替取样幅值数据。由图4可



(a) 方向图  
(a) Directional diagram

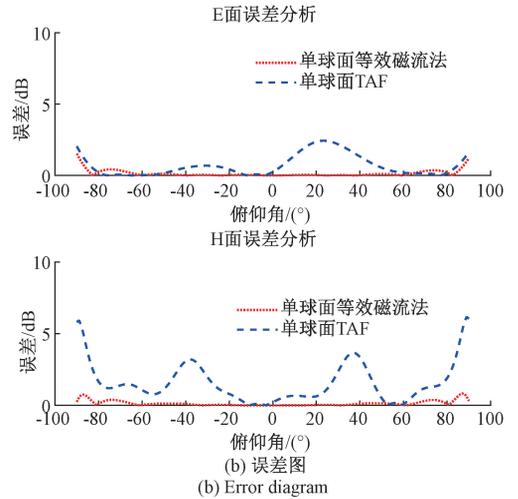
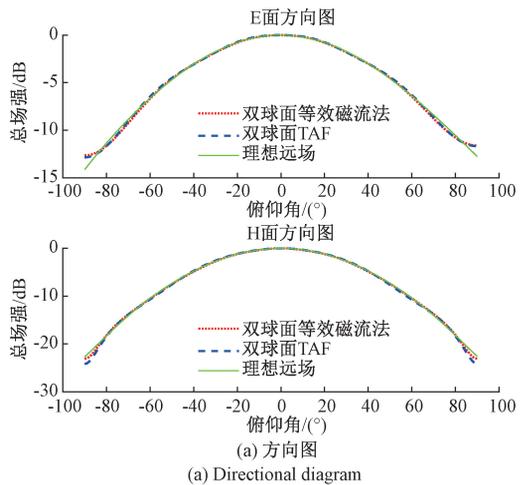
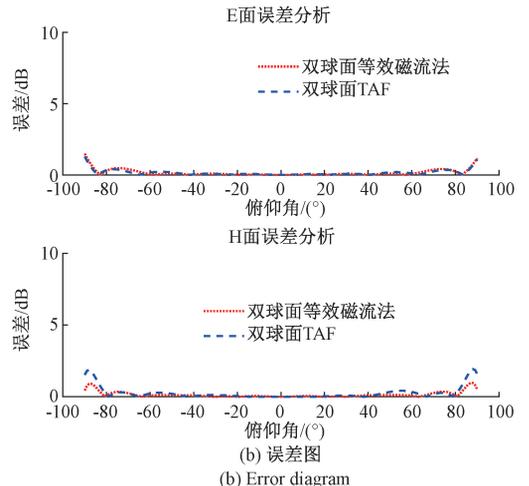


图6 矩形微带天线单球面仿真结果

Fig. 6 Simulation results of rectangular microstrip antenna with single spherical surface



(a) 方向图  
(a) Directional diagram



(b) 误差图  
(b) Error diagram

图7 矩形微带天线双球面仿真结果

Fig. 7 Simulation results of double spherical surface of rectangular microstrip antenna

知,通过双球面 TAF 算法计算得到的远场方向图与理想方向图基本重合,尤其是在中心  $120^\circ$  内误差低于  $0.5\text{ dB}$ ,这再次验证了本文所提出的双球面无相位算法的正确性。

### 2.3 高等效源与采样分辨率影响分析

基于等效磁流法的双球面 TAF 无相位算法的近远场变换方法无需遵循奈奎斯特采样原则,现在对本文所提出的双球面无相位近远场变换方法在不同等效源与采样点分辨率的情况下进行分析。

使用的天线为 2.1 节中的圆锥喇叭天线,工作频率为  $15\text{ GHz}$ ,设置等效源单元大小为  $0.2\lambda$ ,迭代  $1\ 000$  次。对采样点角度为  $5^\circ, 3^\circ, 1.5^\circ$  使用双球面无相位近远场变换方法进行计算,得到远场方向图对比图和误差图如图 8 所示。在不同采样分辨率下本文所提出的变换方法在方向图中心  $120^\circ$  内误差基本都低于  $0.5\text{ dB}$ 。

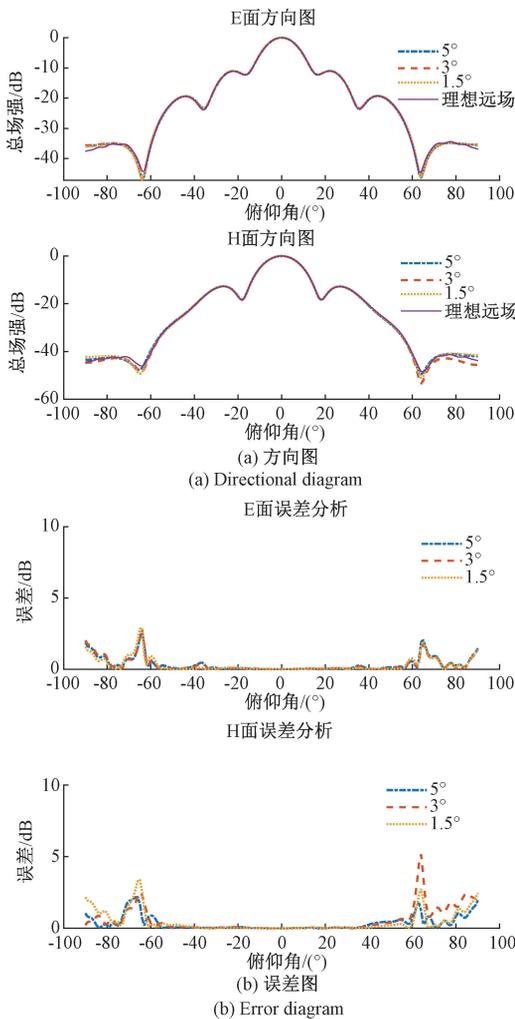


图 8 不同采样分辨率方向图对比图和误差图  
Fig. 8 Comparison and error plots of patterns with different sampling resolutions

在无相位近远场变换中,等效源的分辨率同样影响变换效果。同样使用 2.1 节中的圆锥喇叭天线,工作频率为

$15\text{ GHz}$ ,迭代  $1\ 000$  次。设置采样点角度为  $5^\circ$ ,对等效源单元大小为  $0.3\lambda, 0.2\lambda, 0.1\lambda$  分别进行计算。得到远场方向图对比图和误差图如图 9 所示。在不同等效源分辨率下本文所提出的变换方法在方向图中心  $120^\circ$  内误差基本都低于  $0.5\text{ dB}$ 。

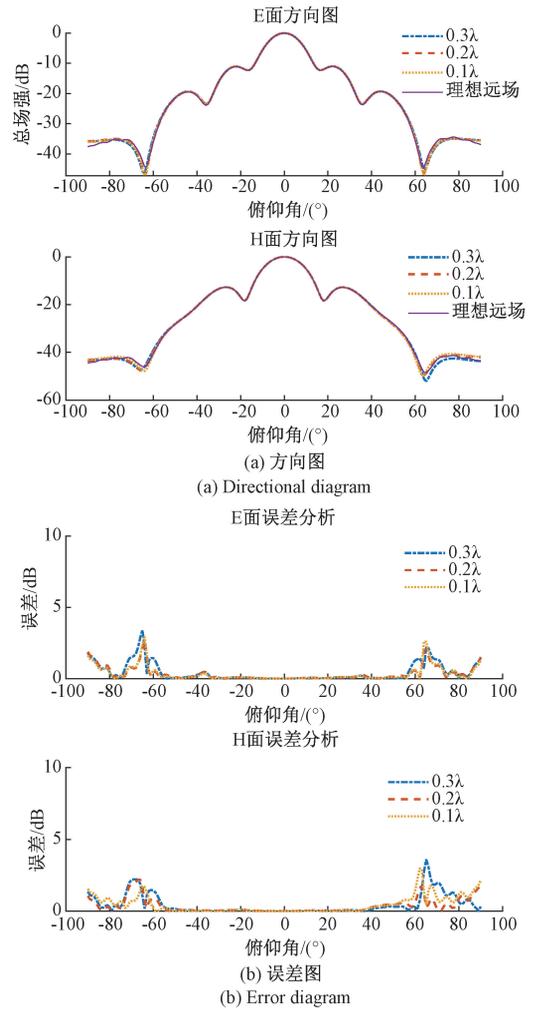


图 9 不同等效源分辨率方向图对比图和误差图  
Fig. 9 Comparison and error plots of different equivalent resolution patterns

使用的计算机 CPU 为 AMD R5600,内存  $32\text{ GB}$ ,在等效源单元大小为  $0.2\lambda$ ,迭代  $1\ 000$  次。对不同采样分辨率及等效源分辨率使用有相位等效磁流法和双球面无相位近远场变换方法进行计算所需要的时间如表 1 和表 2 所示,其中有相位变换方法仅使用球面 1 进行计算。虽然等效磁流法为矩阵运算,但耗时很短。双球面无相位近远场变换方法需要迭代求解等效磁流,增加了计算时间,在不影响精度的情况下,双球面 TAF 无相位算法计算可在  $15\text{ s}$  内完成。

### 2.4 角锥喇叭天线实验验证

为验证本文近远场变换方法在工程上的应用,对工作

表1 不同采样分辨率计算时间

Table 1 Calculation time for different sampling resolutions

模式	5°	3°	1.5°
有相位	0.23	0.45	1.47
无相位	33.10	89.84	360.12

表2 不同等效源分辨率计算时间

Table 2 Calculation time for different equivalent resolutions

模式	0.3λ	0.2λ	0.1λ
有相位	0.08	0.23	1.78
无相位	15.00	34.54	147.12

频率为 33 GHz 的角锥喇叭天线进行近场测量,测量过程如图 10 所示,以天线口径面为 XOY 平面,通过机械臂控制探头采集天线 z>0 的半球近场的幅值和相位,探头在每个采样点旋转 90°测得 theta 分量和 phi 分量的电场,天线口径面大小为 27.4 mm×21.3 mm。采样点角度为 5°,采样球面 1 半径为 5λ,球面 2 半径为 10λ。



图 10 角锥喇叭天线近场球面测量

Fig. 10 Near-field spherical measurement of a horn horn antenna

设置等效源小单元大小为 0.2λ,分别使用等效磁流法与双球面 TAF 无相位算法对近场数据进行处理,等效磁流法使用球面 1 的数据,双球面 TAF 无相位算法迭代 1 000 次,与理想远场方向图对比如图 11 所示。可以看出,计算结果与理想远场结果吻合较好,误差可能来源于近场测量误差。

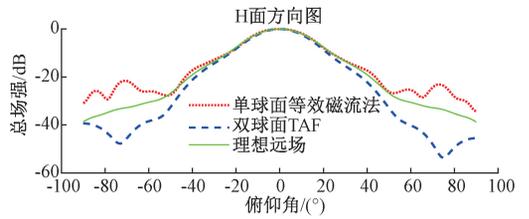
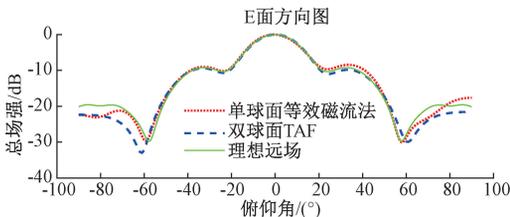


图 11 角锥喇叭天线方向图对比图

Fig. 11 Comparison diagram of angle cone horn antenna pattern

### 3 结 论

本文研究了一种基于等效磁流法的双球面 TAF 无相位算法的近远场变换方法。首先对等效磁流法的原理进行推导,根据测量的近场数据与测量矩阵计算出等效磁流,得到等效磁流后即可重建出任意位置的天线辐射场。随后通过求解式中关于幅度误差最小化的非凸优化问题,仅仅通过近场幅值信息与测量矩阵即可检索出等效磁流,从而重建天线远场方向图。通过对测量矩阵进行行缩放保证该非凸优化问题能够收敛,然后在 TAF 无相位算法中加入 Armijo 线搜索算法,加强了算法的收敛性与检索精度。在近场数据的处理上使用了双球面交替采样的方法,通过双球面的多重信息降低了测量矩阵的相关性,在缺少相位信息的无相位算法中提供了更多近场信息。然后通过对圆锥喇叭天线和矩形微带天线进行仿真实验分析,将等效磁流法和双球面 TAF 无相位算法反演得到的远场方向图与理想方向图进行对比,发现远场方向图能够完全吻合,在中心±60°的方向内误差低于 0.5 dB。同时对更大规模等效源与更高分辨率采样进行分析,计算时间略有增加,但远场方向图变换精度保持不变。最后对圆锥喇叭天线进行实际近场测量,计算结果与理想远场结果吻合较好,证明了本文所提方法的正确性。

### 参考文献

[1] 刘灵鸽,张启涛,万继响.超大型地面天线辐射特性实地测量技术[J].电子测量与仪器学报,2023,37(9):68-74.  
 LIU L G, ZHANG Q T, WAN J X. Field measurement technology for radiation characteristics of ultra-large ground antennas[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 68-74.

[2] 成伟兰,刘坚强,吴小川,等.三角格栅排列相控阵天线近场特性研究[J].电子测量技术,2022,45(3):7-11.  
 CHENG W L, LIU J Q, WU X CH, et al. Research on near-field characteristics of triangular grid array phased array antenna [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(3): 7-11.

[3] 朱凌昆,陈茹萌,谢志祥,等.基于未知源域重构的无相位近场测量技术[J],电波科学学报,2021,36(5):

- 807-814.  
ZHU L K, CHEN R M, XIE ZH X, et al. Phaseless near-field measurement technology based on unknown source domain reconstruction[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(5): 807-814.
- [4] 尚军平,王永泰,左炎春,等. 天线近场无相位测量技术研究[C]. 2023年全国天线年会论文集,2023:668-670.  
SHANG J P, WANG Y T, ZUO Y CH, et al. Research on phaseless near-field antenna measurement technology [C]. 2023 National Conference on Antennas, 2023: 668-670.
- [5] 西安电子科技大学,中国电子科技集团公司第二十九研究所. 基于相位还原的近场天线测量方法: 202211739482. 3[P]. 2023-03-28.  
Xidian University, the 29th Research Institute of CHINA Electronics Technology Group Corporation. A near-field antenna measurement method based on phase retrieval; CN202211739482. 3[P]. 2023-03-28.
- [6] 武琼. 基于柱面无相位法的阵列天线测量与诊断技术[D]. 西安:西安电子科技大学,2023.  
WU Q. Array antenna measurement and diagnosis technology based on cylindrical phaseless method[D]. Xi'an; Xidian University, 2023.
- [7] 马迪. 无相位球面近场天线测量和诊断方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2024.  
MA D. Research on phaseless spherical near-field antenna measurement and diagnosis method[D]. Xi'an; Xidian University, 2024.
- [8] 鲁榄埔. 无相位的近场天线测量研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2022.  
LU L P. Research on phaseless near-field antenna measurement[D]. Xi'an; Xidian University, 2022.
- [9] BANGUN A, CULOTTA-LÓPEZ C, BEHBOODI A, et al. On phaseless spherical near-field antenna measurements [C]. 13th European Conference on Antennas and Propagation, 2019; 1-5.
- [10] 周勇,喻程. 基于等效磁流法的平面近场测量技术研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(21): 169-174.  
ZHOU Y, YU CH. Research on planar near-field measurement technology based on equivalent magnetic current method [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(21): 169-174.
- [11] 梁鑫. 基于等效磁流法的平面天线近场测量系统研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2021.  
LIANG X. Research on planar antenna near-field measurement system based on equivalent magnetic current method[D]. Nanjing; Nanjing University of Information Science and Technology, 2021.
- [12] YUAN H B, LU L P, CHEN X W, et al. Phaseless planar near-field antenna measurement based on truncated amplitude flow algorithm[C]. 2021 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM), 2021; 1-3.
- [13] 曹顺锋,稂华清. 基于等效磁流源方法的相控阵天线近场到近/远场变换[J]. 电子质量, 2019(3): 72-74.  
CAO SH F, LANG H Q. Near-field to near/far-field transformation of phased array antenna based on equivalent magnetic current source method [J]. Electronic Quality, 2019(3): 72-74.
- [14] 尚智宇,唐波,张龙斌,等. 海上风电电机雷达回波及其微多普勒特征[J]. 电子测量技术, 2023, 46(11): 49-56.  
SHANG ZH Y, TANG B, ZHANG L B, et al. Radar echo and micro-Doppler characteristics of offshore wind turbines [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(11): 49-56.
- [15] 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(2): 257-265.  
HUANG L S, XU ZH M, ZHANG ZH F, et al. Fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for sound source identification and its improvement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021(2): 257-265.
- [16] 娄星宇. 综合孔径辐射计近场反演算法研究[D]. 成都:电子科技大学,2024.  
LOU X Y. Research on near-field inversion algorithm for synthetic aperture radiometer [D]. Chengdu; University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [17] 杨立铖,洪涛,杨博光,等. 基于非凸优化方法的无相位天线平面近场测量方法[C]. 2023年全国天线年会论文集,2023:690-692.  
YANG L CH, HONG T, YANG B G, et al. A phaseless antenna planar near-field measurement method based on non-convex optimization[C]. 2023 National Conference on Antennas, 2023: 690-692.
- [18] 王佳琪. 车载及5G基站天线球面近场测量的关键技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2022.  
WANG J Q. Research on key technologies of spherical near-field measurement for vehicle-mounted and 5G base station antennas [D]. Beijing; Beijing Jiaotong University, 2022.

### 作者简介

贾云飞(通信作者),博士,副研究员,主要研究方向为基于嵌入式系统的飞行器控制系统、基于嵌入式系统的弹载存储测试系统。

E-mail:yunfei\_jia@163.com

李建煌,硕士研究生,主要研究方向为天线近场测量。

E-mail:ljh09792023@163.com