

一种基于离散实镜像理论的修正物理光学法 在金属平行板内嵌电大尺寸结构中的应用

高翔^{①②} 李超^{*①} 谷胜明^{①②} 方广有^①

^①(中国科学院电子学研究所电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 传统的物理光学法(PO)能够方便高效地处理开放空间中电大尺寸结构的电磁散射问题, 并且通常能获得较好的精度。然而, 对于电大尺寸结构内嵌在金属平行板之间的这种特殊问题, 传统的 PO 方法不再适用, 而采用全波分析方法来处理往往需要消耗巨大的计算资源。该文在离散实镜像理论的基础上, 提出了一种修正的物理光学法(DRMI-PO), 基本思想是先将金属平行板间的激励电磁流展开为傅里叶级数, 再对级数的每一项分别应用 2 维物理光学法求解场, 最后把所有求得的场解作线性组合。与多层快速多极子(MLFMA)的全波方法相比, DRMI-PO 在解决该类特殊结构的电磁仿真问题时能在保证足够高精度的同时大幅度提高计算效率; 作为应用实例, 对两种不同极化方式的太赫兹波段扇形波束扫描天线分别进行了 DRMI-PO 数值仿真与实验测试, 结果表明仿真和实验得出的天线方向图吻合较好, 从而证实了 DRMI-PO 方法的有效性。

关键词: 电磁散射; 离散实镜像; 修正物理光学法; 金属平行板; 电大尺寸结构; 扇形波束扫描天线

中图分类号: O441

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)04-0969-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00698

A Modified Physical Optics Method Based on Discrete Real Mirror Image Theory for Structures with Electrically Large Dimension and Embedded between Two Parallel Metal Plates

Gao Xiang^{①②} Li Chao^① Gu Sheng-ming^{①②} Fang Guang-you^①

^①(Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Detection Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

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

Abstract: Traditional Physical Optics (PO) is able to efficiently deal with 3D electromagnetic problem involving structures with electrically large dimension in the open space, usually obtaining calculation results with good precision. However, traditional PO appears to be inapposite for special complicated structures with electrically large scattering objects embedded between two parallel metal plates, so does the full wave method because of the large computation resource consumption. In this paper, a modified PO method based on Discrete Real Mirror Image theory (DRMI-PO) is proposed. The basic idea of DRMI-PO is to expand the electromagnetic current between the parallel metal plates into the Fourier series, and then linearly combine the field solution for each term, derived with the 2D PO. In comparison with Multilevel Fast Multipole Algorithm (MLFMA), DRMI-PO is able to keep enough precision and obtain higher efficiency when analyzing specific electromagnetic structures. As an application example, two terahertz fan-beam scanning antennas with different polarization are calculated with DRMI-PO and measured. The measured radiation patterns are in well agreement with the calculated results, which indicates the effectiveness of DRMI-PO.

Key words: Electromagnetic scattering; Discrete Real Mirror Image (DRMI); Modified Physical Optics (PO); Parallel metal plates; Structures with electrically large dimension; Fan-beam scanning antenna

1 引言

一般来说, 求解电磁问题的基本算法主要有解

析法^[1]、全波方法^[2,3]以及高频近似方法^[4-6]。经典的解析方法是从电磁场的波动方程出发, 根据给定的边界条件, 求得场的严格级数解。通常, 解析方法要求散射体是理想导体或均匀电磁介质, 并且其几何形状与某一个可分离的坐标系相吻合, 所以这种方法一般只适合处理外形简单规则的结构。全波方法通常是一种基于电磁场积分方程或差分方程的

2011-07-08 收到, 2011-11-28 改回

中国科学院知识创新工程(YYJ-1123)和国家自然科学基金(11174280)资助课题

*通信作者: 李超 cli@mail.ie.ac.cn

数值计算方法,可处理任意形状导体或介质的电磁散射与辐射问题,但由于受到计算机内存与计算速度的限制,一般较难应用于电大尺寸问题的求解。基于高频场的局部性原理发展起来的高频近似方法能够有效地求解3维电大尺寸目标的电磁散射问题,一般可归为两类:几何光学法^[5]和物理光学法^[6]。高频近似方法通常要求散射体的几何尺寸和面曲率半径都远大于工作波长^[7],满足此条件下求解出的场具有较高的精度,因此非常适合于开放空间中3维电大尺寸目标的电磁散射计算。然而,对于电大尺寸结构被嵌入到两个金属平行板之间的这类特殊问题,传统的高频近似方法难以处理,而全波方法由于计算机内存与速度的限制也是不太合适的。

为了保证足够的精度和较高的计算效率,本文提出了一种基于离散实镜像理论的修正物理光学法(DRMI-PO)。基于实镜像理论,两金属平行板之间的电磁流可等效扩展到无限大空间,根据等效后的电磁流在金属板法线方向上的周期性分布将其沿该方向展开为傅里叶级数,则对于级数每一项作为激励时的场解可退化为2维问题。在高频近似下,对它们应用2维物理光学法求解后再进行线性组合得到原3维问题的解。另一方面,对于如喇叭之类的激励源,口面场模式比较简单,相应的等效电磁流展开的傅里叶级数很快就会收敛,因此大大提高了求解效率。为了验证(DRMI-PO)方法的计算精度及其与全波方法相比在计算效率方面的优势,本文选取了一种pillbox天线作为算例,分别应用多层快速多极子(MLFMA)全波方法和DRMI-PO方法进行仿真分析,比较了两者的计算结果及资源消耗情况。此外,本文还将DRMI-PO方法应用到两种不同极化方式的太赫兹波段扇形波束扫描天线的分析中,仿真与实验测试结果具有较好的一致性,表明DRMI-PO方法在解决该类问题时的有效性。

2 DRMI-PO 方法

图1示意了相距 d 的两个平行金属板之间分布的电流 \mathbf{J} 和磁流 \mathbf{M} ,根据传统的离散实镜像理论^[8],金属板的贡献可等效为实际电磁流 (\mathbf{J}, \mathbf{M}) 关于板的无穷多个镜像的作用之和。这样,扩展到整个无限大空间的等效电流 \mathbf{J}' 和等效磁流 \mathbf{M}' 可分别表示为

$$\mathbf{J}' = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{\kappa,n} \mathbf{J}_{\kappa} [x, y, (-1)^n (z - nd)] \quad (1a)$$

$$\mathbf{M}' = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{\kappa,n} \mathbf{M}_{\kappa} [x, y, (-1)^n (z - nd)] \quad (1b)$$

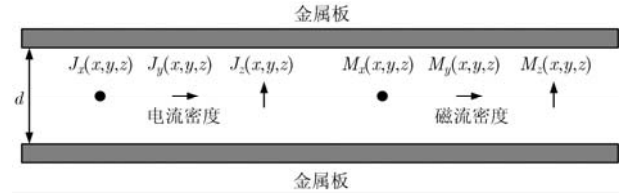


图1 两个平行金属板之间分布的电流与磁流

其中,下标 $\kappa = x, y, z$ 代表矢量沿不同方向的分量;系数 $c_{\kappa,n}$ 和 $d_{\kappa,n}$ 则表明等效电磁流的不同分量沿金属板法向(z 向)表现出不同的对称性,即

$$c_{\kappa,n} = \begin{cases} (-1)^n, & \kappa = x, y \\ 1, & \kappa = z \end{cases}, d_{\kappa,n} = \begin{cases} 1, & \kappa = x, y \\ (-1)^n, & \kappa = z \end{cases} \quad (2)$$

由于板间距 d 与金属板本身的尺寸相比很小,随着实镜像项数的增加,按照式(1)所求得的电磁场解级数会收敛得很慢。本文针对传统离散实镜像理论的这种缺陷,提出了一种改进思路。不难发现,式(1)中的电流 J'_{κ} 和磁流 M'_{κ} 都是关于 z 的周期函数,且周期为 $2d$ 。因此可将 J'_{κ} 和 M'_{κ} 作傅里叶级数展开,

$$J'_{\kappa}(x, y, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J'_{m,\kappa}(x, y) e^{jm\pi z/d} \quad (3a)$$

$$M'_{\kappa}(x, y, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} M'_{m,\kappa}(x, y) e^{jm\pi z/d} \quad (3b)$$

其中系数 $J'_{m,\kappa}$ 和 $M'_{m,\kappa}$ 分别为

$$\begin{aligned} J'_{m,\kappa} &= \frac{1}{2d} \int_{-d}^d J'_{\kappa} e^{-jm\pi z/d} dz \\ &= \frac{1}{2d} \int_{-d/2}^{d/2} [(-1)^m c_{\kappa,1} e^{jm\pi z/d} + e^{-jm\pi z/d}] \\ &\quad \cdot J_{\kappa} [x, y, z] dz \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} M'_{m,\kappa} &= \frac{1}{2d} \int_{-d}^d M'_{\kappa} e^{-jm\pi z/d} dz \\ &= \frac{1}{2d} \int_{-d/2}^{d/2} [(-1)^m d_{\kappa,1} e^{jm\pi z/d} + e^{-jm\pi z/d}] \\ &\quad \cdot M_{\kappa} (x, y, z) dz \end{aligned} \quad (4b)$$

下面求解等效电流源 \mathbf{J} 和磁流源 \mathbf{M} 产生的场,根据电磁对偶原理,只需要推导由电流源 \mathbf{J} 单独作用产生的场,磁流源 \mathbf{M} 产生的场可以直接写出。3维矢量磁位波动方程为

$$\nabla^2 \mathbf{A} + k^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (5)$$

在直角坐标系下将式(5)分解为3个标量方程:

$$\begin{aligned} \nabla^2 A_{\kappa} + k^2 A_{\kappa} &= -\mu J'_{\kappa} = -\mu \sum_{m=-\infty}^{\infty} J'_{m,\kappa} e^{jm\pi z/d}, \\ \kappa &= x, y, z \end{aligned} \quad (6)$$

根据非齐次线性方程的性质,所有源共同作用产生的场等于单个源产生的场的叠加,如果

$$\nabla^2 A_{\kappa}^m + k^2 A_{\kappa}^m = -\mu J'_{m,\kappa} e^{jm\pi z/d} \quad (7)$$

则

$$A_{\kappa} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_{\kappa}^m \quad (8)$$

将式(7)转化为

$$\left(\nabla_{xy}^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) A_{\kappa}^m + k^2 A_{\kappa}^m = -\mu J'_{m,\kappa} e^{jm\pi z/d} \quad (9)$$

令 $A_{\kappa}^m = A_{m,\kappa}(x,y)e^{jm\pi z/d}$ ，代入式(9)，化简并约去 $e^{jm\pi z/d}$ 因子得

$$\nabla_{xy}^2 A_{m,\kappa}(x,y) + k_m^2 A_{m,\kappa}(x,y) = -\mu J'_{m,\kappa}(x,y) \quad (10)$$

其中 $k_m^2 = k^2 - m^2\pi^2/d^2$ ， $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。

式(10)是一个 2 维亥姆霍兹方程，假设金属平行板之间的嵌入结构在金属板法线方向(z 向)具有均匀性，这时式(10)的解可表示为关于 $J'_{m,\kappa}(x',y')$ 的线积分^[9]：

$$A_{m,\kappa}(x,y) = \frac{\mu}{4j} \int_l J'_{m,\kappa}(x',y') H_0^{(2)}(k_m \rho) dl' \quad (11)$$

其中 $\rho = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$ ， l 为 xy 面内的源积分路径。

根据式(8)和式(11)，可求出由电流源 J' 产生的电场 E^J 和磁场 H^J ，结合对偶原理，可求出由磁流源 M' 产生的电场 E^M 和磁场 H^M 。因此，由两种源共同作用产生的总电场 E 和总磁场 H 分别为： $E = E^J + E^M$ ； $H = H^J + H^M$ 。仔细推导会发现，最终的电场和磁场表达式均为无穷级数，而级数每一项都是一个 2 维场解和一个关于 z 的谐函数的乘积，我们可以对级数的每一项应用 2 维物理光学法求解，然后再把求得的场解线性组合。我们将这种适用于金属平行板内嵌电大尺寸结构问题的高频近似方法称作基于离散实镜像理论的修正物理光学法 (DRMI-PO)。

3 DRMI-PO 方法的精度与效率

针对 DRMI-PO 方法，第 2 节已给出了较为详细的介绍，包括严格的数学推导。本节将进一步说明 DRMI-PO 方法的求解精度与求解效率，通过与

全波分析作比较，以论证 DRMI-PO 方法分析处理特定结构问题的优势。

图 2 是一个典型的 200 GHz 的 pillbox 天线，主反射面是一个焦距为 89 mm、口径约 113 mm 的抛物柱面，角锥喇叭馈源置于抛物面的焦点处，喇叭尺寸如图 2(b)所示，馈源和反射面都夹在两块间距为 3 mm 的平行金属板之间。

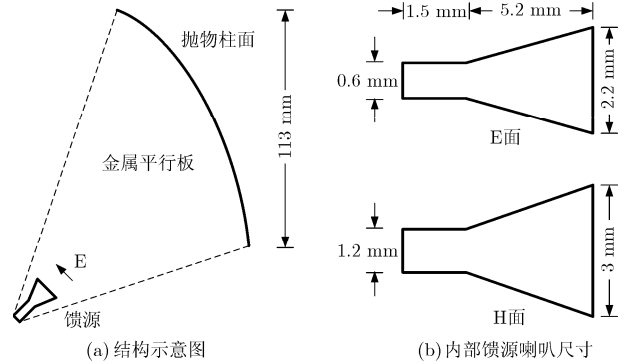


图 2 200 GHz pillbox 天线

针对图 2 所示的 pillbox 天线，分别应用多层快速多极子(MLFMA)全波计算方法与 DRMI-PO 方法进行仿真分析，图 3(a)和图 3(b)分别给出了运用这两种方法计算得到的 E 面和 H 面的天线远场方向图。由图 3 可知，DRMI-PO 与 MLFMA 的计算结果吻合较好，从而验证了 DRMI-PO 方法具有较高的精度。需要指出的是，由于 DRMI-PO 算法中没有考虑边缘绕射效应，导致计算出的 E 面方向图中的旁瓣电平比 MLFMA 的计算结果要低，这可以通过后续的算法改进来进一步提高精度。不过在许多应用场合中，天线的旁瓣电平只要控制在 -20 dB 以下即可较好地满足应用要求。

为了说明 DRMI-PO 方法的计算效率，表 1 分别给出了 MLFMA 和 DRMI-PO 在分析 pillbox 天线问题时的资源使用情况。由表 1 可知，相比于全

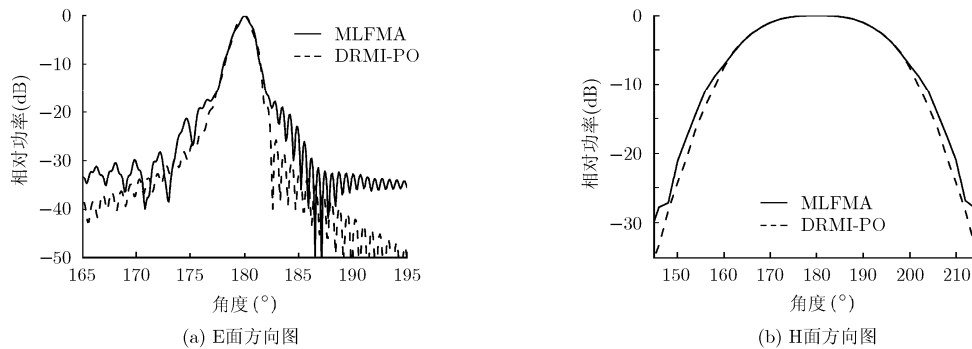


图 3 pillbox 天线的远场辐射方向图

表1 两种方法分析 pillbox 天线的资源使用统计

	MLFMA	DRMI-PO
内存消耗	13.220 GB	100 MB
计算时间	4.102 h	5 min
硬件平台	HP 工作站 Z800, 2CPU 共 12 个核并行, 主频 3.47 GHz, 总内存 96 GB	Lenovo 电脑, 双核, 主频 2.8 GHz, 2 G 内存
软件平台	Windows 7, 64 位 操作系统	Windows XP, 32 位 操作系统

波方法, DRMI-PO 在很大程度上减少了内存消耗量并提高了计算效率, 同时对计算平台的要求也大大降低。

4 DRMI-PO 方法在一种新型太赫兹波束扫描天线设计中的应用

太赫兹 (THz) 波一般是指频率在 $0.1 \sim 10$ THz (波长在 $3 \text{ mm} \sim 30 \text{ }\mu\text{m}$) 之间的电磁波, 其波段位于毫米波与红外光之间。相比于微波, 太赫兹频段的电大尺寸天线能够获得更好的方向性且具有更为合理的物理尺寸, 已被广泛地应用于各种高分辨率成像探测系统^[10-12]中。针对一种快速扫描的成像应用, 我们设计了一种新型的太赫兹扇形波束扫描天线。图 4(a) 示意了扇形波束扫描天线的内部基本结构, 天线主要由馈源角锥喇叭和两个柱面反射体 (主反射体、次反射体) 构成, 而所有的这些结构都嵌入在两个平行于 $x-y$ 面的大金属板之间。对于太赫兹波段的近场成像应用, 主反射体被选为一个固定的椭圆柱面, 用于将来自馈源的发散波束在 x 方向会聚至设定的成像位置, 从而产生图 4(b) 中的水平扇形波束; 而次反射体是一个体积相对较小的四棱柱, 通过电机驱动可控制其高速旋转, 以实现水平扇形波束在 y 方向的快速扫描。

图 4(b) 描述了扇形波束扫描太赫兹成像系统的成像体制, 假定图 4(a) 为发射天线, 则其产生沿 y 方向快速扫描的水平波束。此时再增加一个接收天线, 其内部结构与图 4(a) 基本相同, 但两者场的极化方向相互正交。若将接收天线相对于发射天线垂直摆放, 则接收天线将产生一个沿 z 方向快速扫描的竖直波束, 且在成像平面内与发射天线的场的极化方式相同。因此, 成像系统的接收机能够接收到两个扇形波束的交叉区域的目标回波信号, 通过合理控制好两个次反射面的旋转, 就能够让波束交叉单元在成像平面 ($y-z$ 面) 内快速扫描, 最终实现对一定视场范围内目标的快速扫描成像。

对于扇形波束扫描太赫兹成像系统而言, 扫描

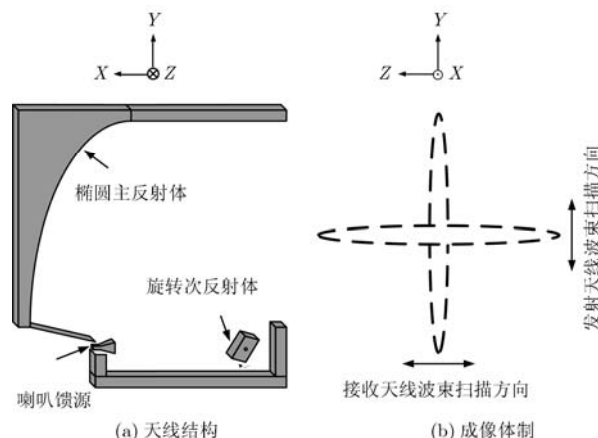
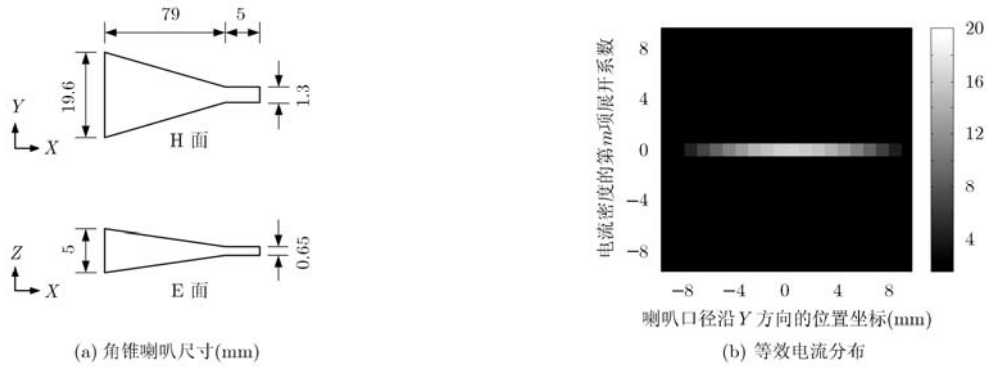
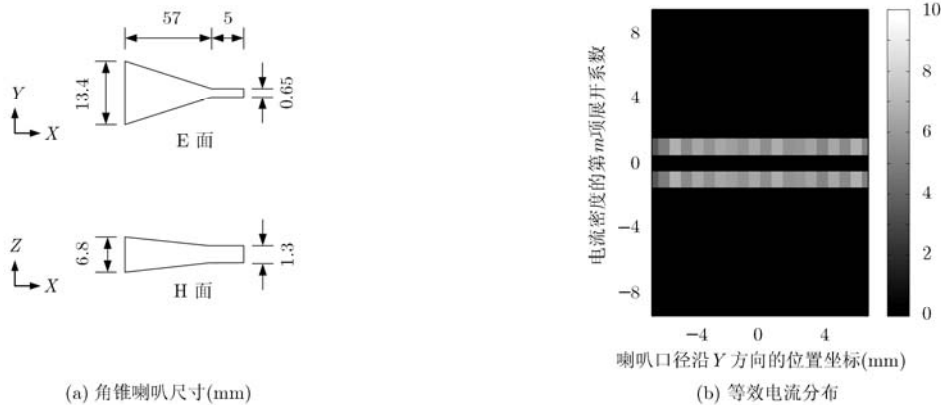


图4 扇形波束扫描太赫兹成像系统

天线的设计与分析显得至关重要。前面指出, 对于这种金属平行板内嵌电大尺寸结构的情形, 传统的 PO 方法是难以处理的; 若使用多层快速多极子算法 (MLFMA) 对设计好的 200 GHz 扇形波束扫描天线进行分析, 需要消耗的计算机内存约 4 TB 。本节将把第 2 节讨论过的 DRMI-PO 方法应用到图 4(a) 所示天线结构的场模拟, 以验证 DRMI-PO 分析处理金属平行板内嵌电大尺寸结构问题的有效性和高效性。对于两种不同极化的情况, 本节都将给出天线辐射方向图的 DRMI-PO 数值仿真与相应的实验测试结果。

由图 4(a) 所示的扇形波束扫描天线的基本结构可知, 除了喇叭馈源, 其它如主反射体和次反射体都沿金属平行板的法线方向 (z 向) 具有均匀的结构。根据电磁场的等效原理, 喇叭的辐射场可近似为由其口径面上两倍的面等效电流或磁流产生的, 而喇叭的口面场可通过 3 维电磁仿真软件计算出。为了有效地应用 DRMI-PO, 我们需要研究喇叭口面的等效流沿 z 向的傅里叶展开级数的收敛性, 从而将场表达式中的无穷级数限制在有限项。图 5 和图 6 分别给出了不同极化角锥喇叭的尺寸及其口面等效电流的傅里叶展开系数, 由图 5 和图 6 可知, 对于电场沿 z 向极化的喇叭, 电流展开系数基本都集中在第 0 项, 而对于电场沿 y 向极化的喇叭, 电流展开系数都基本集中在第 1 和 -1 项。这里, 我们选取 $(-3, -2, \dots, 2, 3)$ 共 7 项作近似计算, 以保证 99% 的喇叭功率被考虑在内。

我们直接使用第 2 节中研究的 DRMI-PO 方法, 对喇叭口径面电流级数的每一项应用 2 维物理光学法, 依次求解出次反射体和主反射体的反射场, 然后进行线性组合, 得到整个扇形波束扫描天线的口径场, 最后基于标准的 3 维口径场辐射公式, 求出

图5 z 向极化角锥喇叭的尺寸参数及其口面等效电流的傅里叶系数分布图6 y 向极化角锥喇叭的尺寸参数及其口面等效电流的傅里叶系数分布

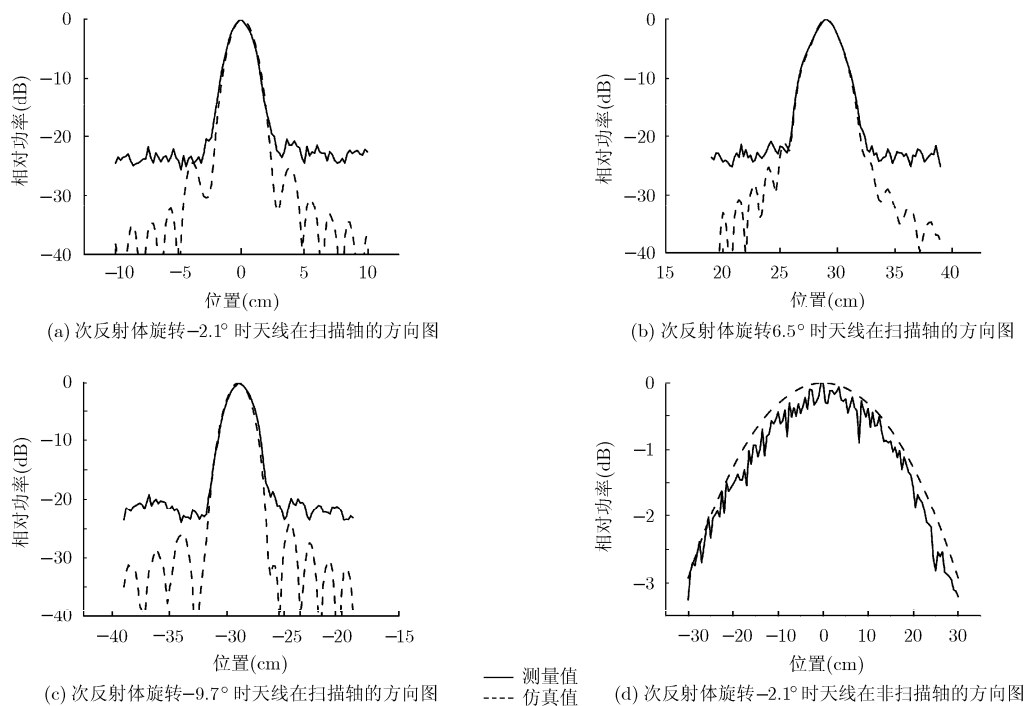
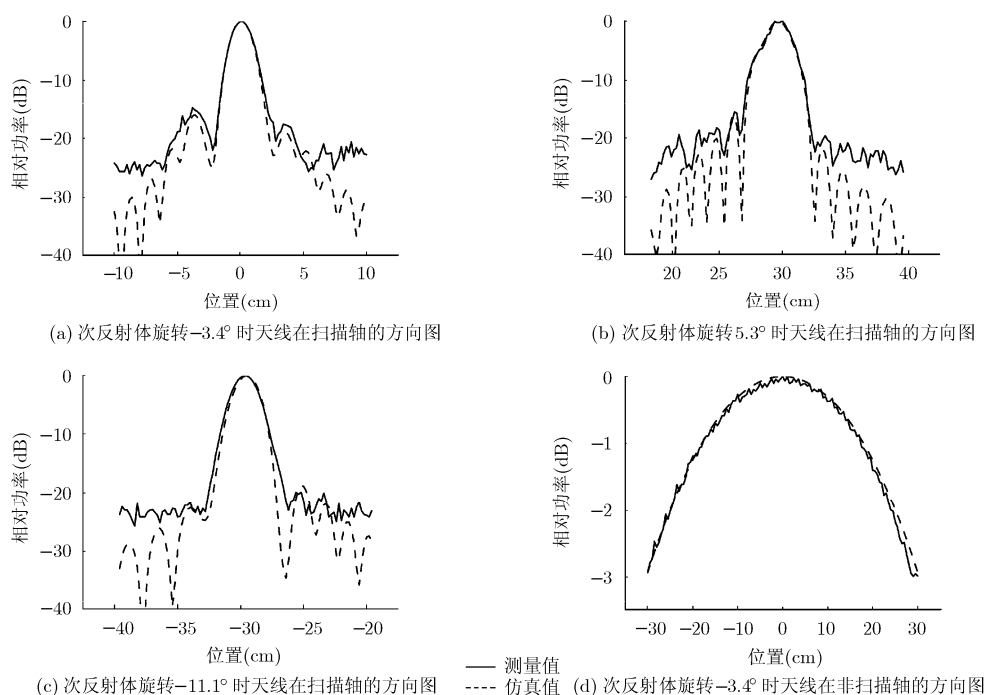
天线在空间成像平面处的辐射场。图7和图8分别给出了电场沿 z 向和 y 向极化的扇形波束扫描天线基于DRMI-PO仿真及实验测试得出的辐射方向图。图7(a)–7(c)是次反射体分别旋转 -2.1° 、 6.5° 和 -9.7° 时 z 向极化天线在扫描轴(图4中的 y 轴)的方向图,可以看出,仿真和实测结果吻合较好,一致表明天线的扫描范围为58 cm ($-29\sim 29$ cm),且半功率波瓣宽度(HPBW)不超过2 cm;图7(d)是次反射体旋转 -2.1° 时(对应于扫描的中心位置), z 向极化天线在非扫描轴(图4中的 z 轴)的方向图,仿真和测试结果表明非扫描轴天线的HPBW大约为60 cm。与图7类似,图8(a)和图8(d)分别是次反射体旋转 -3.4° 时 y 向极化天线在扫描轴和非扫描轴的辐射方向图,图8(b)和图8(c)是次反射体旋转 5.3° 和 -11.1° 时 y 向极化天线在扫描轴的方向图,仿真和实验结果同样一致表明 y 向极化天线的扫描轴HPBW不超过2 cm、非扫描轴HPBW为60 cm,扫描范围也大致58 cm。

从图7和图8中可以看出,实测曲线的噪声电平有些高,从而掩盖了天线的微弱旁瓣,这主要归

因于实验中采用检波器直接探测THz波的缘故,探测灵敏度的提高可以通过相干检测或者采用锁相放大器来实现。不过,对于太赫兹近场成像应用,我们主要关心的还是天线的主瓣宽度以及波束扫描位置,因为它们直接决定了系统分辨率与成像范围,而旁瓣电平只要控制在一定范围内以不影响系统成像即可。

5 结论

针对金属平行板内嵌电大尺寸结构这类特殊问题的电磁计算,本文提出了一种基于离散实镜像理论的修正物理光学法(DRMI-PO)。DRMI-PO方法克服了传统物理光学法(PO)只能处理开放空间中电大结构散射问题的局限性,是对PO方法的一种延伸和拓展。关于DRMI-PO方法,文中给出了详细的理论推导,并针对pillbox天线的仿真分析与MLFMA方法进行比较,结果表明DRMI-PO在分析该类特殊结构问题时,能在保持足够计算精度的同时实现较高的计算效率。最后,本文将DRMI-PO应用于太赫兹扇形波束扫描天线的仿真设计中,体现了DRMI-PO方法在实际应用中的有效性。

图7 z 向极化扇形波束扫描天线的辐射方向图图8 y 向极化扇形波束扫描天线的辐射方向图

参考文献

- [1] 林为干, 符果行, 邬琳若, 等. 电磁场理论[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996: 793-848.
- [2] 倪光正, 杨仕友, 邱捷. 工程电磁场数值计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 57-259.
- [3] Zhu Jian-fang and Jiao Dan. A theoretically rigorous full-wave finite-element-based solution of Maxwell's equations from dc to high frequencies [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2010, 33(4): 1043-1050.
- [4] Kouyoumjian R G. Asymptotic high-frequency methods [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1965, 53(8): 864-876.
- [5] Kaganovsky Y and Heyman E. Wave analysis of airy beams

- [C]. 2010 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS), Berlin, Aug. 2010: 60-63.
- [6] Hasaba R, Ito K, and Ando M. Estimation of radar cross section in multiple reflection ducts by combination of modified-physical optics and Iterative Physical Optics [C]. 2011 IEEE International Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics (ICMTCE), Beijing, May 2011: 380-383.
- [7] Gordon W B. High frequency approximations to the physical optics scattering integral [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(3): 427-432.
- [8] Fang D G, Yang J J, and Delisle G Y. Discrete image theory for horizontal electric dipole in a multilayer medium [J]. *IEEE Proceeding H: Microwaves, Antennas and Propagation*, 1988, 135(5): 297-303.
- [9] Harrington R F, 著, 王尔杰, 译. 计算电磁场的矩量法[M]. 北京:国防工业出版社, 1981: 49-71.
- [10] Sheen D M, McMakin D L, Hall T E, *et al.*. Active millimeter-wave standoff and portal imaging techniques for personnel screening [C]. IEEE Conference on Technologies for Homeland Security, Waltham, May 2009: 440-447.
- [11] Llombart N, Cooper K B, Dengler R J, *et al.*. Confocal ellipsoidal reflector system for a mechanically scanned active terahertz imager [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(6): 1834-1841.
- [12] David Z, Greg F, Chris M, *et al.*. High-speed hand-held wide aperture time-domain terahertz imaging system [C]. 2010 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), Michigan, May 2010: 1-2.
- 高翔: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为太赫兹天线与成像技术.
- 李超: 男, 1978年生, 博士, 研究方向为太赫兹成像技术、电磁场理论与应用、人工电磁材料.
- 方广有: 男, 1963年生, 研究员, 研究方向为超宽带电磁场理论及工程应用、超宽带雷达成像技术、太赫兹成像技术.