

一种基于 FDTD 算法的局域导波端口激励

游检卫* 张剑锋 崔铁军

(东南大学毫米波国家重点实验室 南京 210096)

摘要:为弥补传统导波端口在处理辐射问题的缺陷,解决导波端口后向泄漏和远场外推面截断而导致的辐射失真等问题。该文深入研究时域有限差分算法中导波端口激励的加载方式,首次提出了一种通用有效的局域导波端口,并对端口中各边界条件的参数配置和实现方法进行了深入论述。此外,利用该算法对不连续性波导、微带贴片天线和波导缝隙天线阵等实际问题进行了模拟仿真,结果表明,在处理波导不连续性问题时,该方法保持很高的计算精度;在处理导波端口的辐射问题时,传统方法存在较大误差,新方法则能取得很好的计算结果。因此该方法不仅适用于模拟导波端口激励的辐射问题,也适用于分析各类波导不连续性问题,具有普适性。

关键词:时域有限差分算法;局域导波端口;不连续性波导;同轴馈电微带贴片天线;波导缝隙天线阵

中图分类号:O441.4

文献标识码:A

文章编号:1009-5896(2013)03-0749-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00915

A Novel Local Waveguide Port (LWP) Excitation Based on FDTD Algorithm

You Jian-wei Zhang Jian-feng Cui Tie-jun

(State Key Laboratory of Millimeter Wave, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to figure out the distortion of radiation pattern, which is caused by backward leakage, second contamination and output boundary truncation, a novel Local Waveguide Port (LWP) technique based on FDTD technique is proposed in this paper. And the detail of boundary conditions and boundary parameters are given for the method. At the end of this paper, this LWP technique is utilized to analyze discontinuous rectangular waveguide, micro-strip antenna and slot antenna array excited by local waveguide port. The calculation results show that the high accuracy can be obtained in the discontinuous problem and the much better result can be achieved in the radiant problem. Consequently, this method can be used in both discontinuous problem and radiant problem.

Key words: Finite-Difference Time-Domain (FDTD); Local Waveguide Port (LWP); Discontinuous waveguide; Microstrip antenna; Slot antenna array

1 引言

Yee^[1]在1966年提出一种在Yee式网格上直接求解时域麦克斯韦微分方程的时域有限差分(Finite Difference Time Domain Method, FDTD)技术,其特有的时域性、稳定性、非线性等优点^[2],使其在近几十年里飞速发展,研究对象也从传统的电磁领域扩展到受控核聚变、生物医学、量子学以及多物理量耦合等诸多科学领域。

FDTD在电磁领域中的应用主要包括电磁散射分析,电磁辐射分析,传输线不连续性分析等。该算法常采用的激励源可以分为平面波激励,线源激励和导波端口激励。对于电磁辐射和传输线不连续

性的分析,最常采用的激励方式是导波端口激励。传统的研究方法^[2,3]认为导波端口仅仅是一层RF/TF(Reflect Field/Total Field Boundary, RF/TF)边界网格。为了防止导波端口的二次反射,传统方法需要将导波端口插入到吸收边界当中。对于传输线不连续性问题,该方法是适用的,但对于天线辐射问题,该方法会引起较大误差。

在过去的十几年里,对于导波端口激励的研究不是很多,而且大部分研究都是基于频域算法,其中以有限元法为主,对于基于FDTD方法的研究很少,这主要是由于时域算法对于模式提取的复杂性引起的。近几年随着等离子体源研究的不断深入^[4,5]以及天线/天线罩一体化时域全波分析的需求,此类问题的解决显得更为急迫和重要,而且随着FDTD与有限元混合算法越来越成熟,基于FDTD方法的

2012-07-16收到,2012-10-22改回

国家973计划项目资助课题

*通信作者:游检卫 jvyou@seu.edu.cn

导波端口激励越来越引起了人们的注意。

针对以上问题,本文基于 FDTD 算法首次提出了一种通用有效的局域导波端口,该导波端口由一层 PEC 边界,多层 UPML 吸收边界和单层 RF/TF 边界构成。这种配置方式可以解决辐射问题中,导波端口后向泄漏,后向二次污染和远场外推面截断导致的辐射方向图失真等问题。

本文首先详细论述局域导波端口的设计方法和端口边界的参数配置,随后再利用此加载方式分别对矩形波导的不连续性问题、角锥喇叭天线,微带贴片天线和波导缝隙天线阵这些实际辐射问题进行了计算仿真,并通过结果比较分析,论证了算法的准确性和通用性,此外算法的稳定性也在大量的实际工程应用中得到了验证。

2 局域导波端口的设计

利用 FDTD 处理辐射问题时,需引入封闭吸收边界包围盒来模拟无限大自由辐射空间,且用封闭的远场外推边界(Output Boundary, OB)来实现近场到远场的转化。

为实现上述边界条件的配置,本文提出一种通用有效的局域端口加载方式(如图 1(b)所示),由图 1 可知,传统导波端口引入一层连接边界(RF/TF)实现导波端口激励,为防止反射波的后向泄漏,将导波端口插入吸收边界,但输出边界会被波导截断,远场外推条件不再精确成立,导致仿真结果存在较大误差。局域导波端口可以很好地解决这个问题。

如图 2 所示,与传统建模方法不同,局域导波端口由 3 部分组成:单层 PEC 边界,多层 UPML 吸收边界和单层 RF/TF 边界。单层 PEC 边界有两个作用,一是将未被吸收边界(UPML)吸收完全的反射波二次反射实现二次衰减吸收,且能防止反射波通过开放端口向外界泄露,影响计算精度;二是能防止前端辐射产生的爬行波从导波端口绕射进入天线的传输通道,影响天线的前端辐射。PEC 边界的实现方法是令边界上的切向电场和法向磁场为零。

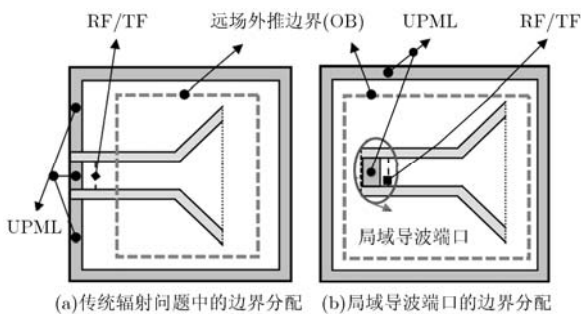


图 1 辐射问题中局域导波端口边界条件的分配

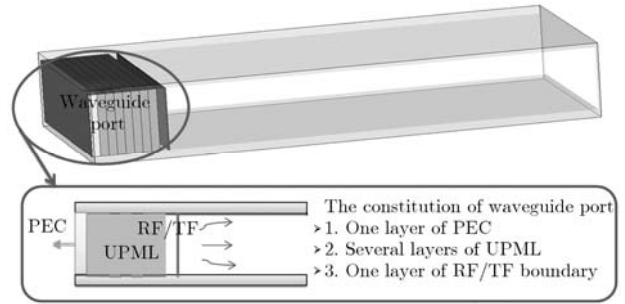


图 2 局域导波端口的结构组成

多层 UPML 的设置是吸收传输线不连续性产生的反射波,而单层 RF/TF 边界目的是将入射信号定向的引入和激励模式的调制。

通过引入上述 3 种边界,远场外推面可完全包裹天线结构,外推条件精确成立,天线辐射方向图可准确计算获得。

2.1 局域导波端口 UPML 参数的配置

为实现文献[6]提出的场分裂数学模型, Sacks 等人^[7]提出了基于单轴各向异性媒质(即 UPML)。其本构关系可以表示为

$$\mathbf{D} = \varepsilon \bar{\mathbf{s}} \cdot \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \bar{\mathbf{s}} \cdot \mathbf{H} \quad (1)$$

其中,参数 $\bar{\mathbf{s}}$ 为一个对角张量:

$$\bar{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} s_x^{-1} s_y s_z & 0 & 0 \\ 0 & s_x s_y^{-1} s_z & 0 \\ 0 & 0 & s_x s_y s_z^{-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

且张量 $\bar{\mathbf{s}}$ 中的各方向乘积分量可以表示为

$$s_\zeta = \kappa_\zeta + \frac{\sigma_\zeta}{j\omega\varepsilon}, \quad \zeta = x, y, z$$

其中参数 σ_ζ , 以及 κ_ζ , 配置是实现 UPML 的关键。对于局域导波端口,由于导波结构内电磁场传播的单向性,不存在棱边和邻角 UPML 的重叠现象,所以能够严格地按照单轴各向异性媒质的参数进行参数配置。

图 3 表示的是电磁波沿坐标轴传播时,各方向上局域导波端口 UPML 的参数配置方案。设电磁波沿 z 轴方向传播,沿 z 轴方向变化的单轴各向异性媒质的参数可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z(z) &= \left[\frac{z - z_0}{d} \right]^m \cdot \sigma_{z,\max} \\ \kappa_z(z) &= 1 + (\kappa_{z,\max} - 1) \cdot \left[\frac{z - z_0}{d} \right]^m \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

对于电导率 $\sigma_z(z)$, 如果取 $m=4$, 且 $\sigma_{z,\max} = \frac{1}{30\pi \cdot \Delta z}$, $d = 5\Delta z$, $\Delta z = 1 \text{ mm}$, 此时 UPML 中电导率的分布曲线^[2]如图 4。

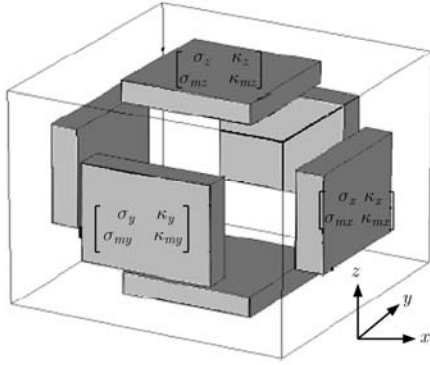


图3 局域导波端口 UPML 参数的配置方案

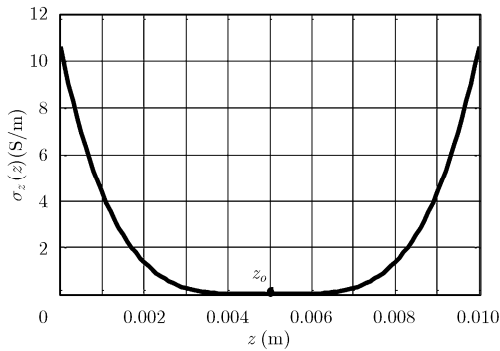


图4 $m = 4, \sigma_{z,max} = 1/(30\pi \cdot \Delta z)$ 时 $\sigma_z(z)$ 的曲线分布

对于其它方向的参数，可配置为 $\sigma_x = \sigma_y = 0, \kappa_x = \kappa_y = 1$ ，这样配置可以保证 $\sigma_z(z_0) = 0$ ，从而减少由于电导率不连续性产生的反射误差^[6-8]。

2.2 局域端口加载中 RF/TF 边界的设置

与 SF/TF(Scatter Field/ Total Field)边界不同，利用导波结构内部电磁传播的定向特性，可以将 SF/TF 边界简化为 RF/TF 边界。

图 5 给出局域端口加载中 RF/TF 边界的实现方法，当电磁波沿 k 轴正向传播时，需将入射磁场 H_{inc} 耦合到 E_u 的迭代，并将入射电场 E_{inc} 耦合到 H_v 的迭代，且 H_v 比 E_u 沿传播方向少半个网格；当电磁波沿 k 轴负向传播时，入射场的耦合方式相同，但此时 H_v 比 E_u 沿传播方向多半个网格。具体的 FDTD 迭代公式可以表示为

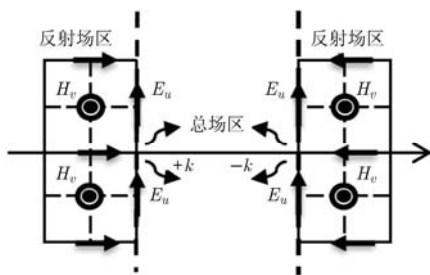


图5 沿 k 轴传播时，RF/TF 边界的设置

$$\left. \begin{aligned} E_u|_{i,j,k}^{n+1} &= \left\{ E_u|_{i,j,k}^n \right\}_{\text{FDTD}} \pm \frac{\Delta t}{\epsilon_{i,j,k} \Delta l} H_{v,inc}|_{i,j,k \pm 1/2}^{n+1/2} \\ H_v|_{i,j,k \pm 1/2}^{n+1/2} &= \left\{ H_v|_{i,j,k \pm 1/2}^{n-1/2} \right\}_{\text{FDTD}} \pm \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k \pm 1/2} \Delta l} E_{u,inc}|_{i,j,k}^n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

上述的迭代过程可以满足场迭代的一致性原理^[2]，可定向无反射地引入激励源。此外，模式激励需对 E_{inc} 和 H_{inc} 在空间上进行位置调制，位置调制的优点在于可以不需要额外的开辟一个虚拟空间迭代计算激励模式，提高计算效率。

3 算法检验

首先利用局域导波端口技术对不连续矩形波导进行激励和仿真，验证该方法对波导传输问题的有效性。此外还对几类实际天线^[8-10]和天线阵^[4,11]进行数值仿真，验证本方法对导波端口激励辐射问题的有效性和准确性。

3.1 不连续矩形波导

如图 6(a)所示，不连续性矩形导波端口尺寸为 $22.86 \text{ mm} \times 10.16 \text{ mm}$ ，中间介质块的尺寸为 $12 \text{ mm} \times 14.05 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ，激励模式为 TE_{10} 模，激励信号为调制高斯脉冲，频率范围为 $8.2 \sim 12.5 \text{ GHz}$ ，基本剖分尺寸为空气波长 $\lambda_0/20$ 。

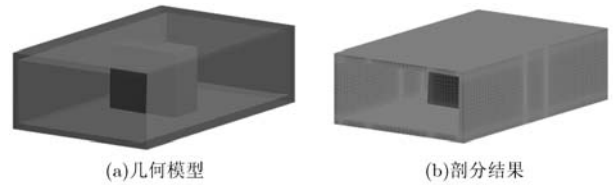


图6 不连续性矩形波导的几何模型和剖分结果

采用局域导波端口进行激励，并将计算结果与基于有限积分方法(FIT)商业软件的仿真结果进行比较。

图 7 中 S 参数的计算采用了模式提取的方法^[5]，与传统导波端口吻合的结果表明局域导波端口技术

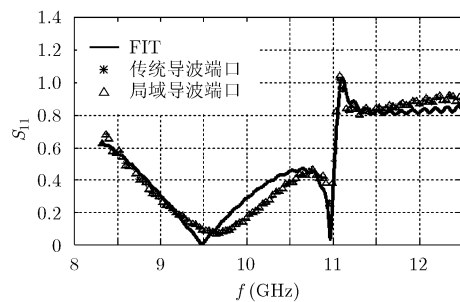


图7 主模激励下不连续波导的 S_{11} 计算结果

保持了传统方法在分析波导不连续性问题中的有效性, 后续的例子将表明本方法还修正了传统方法在辐射问题中的计算误差, 验证了此方法的通用性和准确性。此外, 图中结果与 FIT 结果的误差主要是由于本方法暂未使用共形技术, 因而会有一定的阶梯近似误差。

3.2 角锥喇叭天线

如图 8(a)所示, 角锥喇叭天线的矩形导波端口的尺寸为 $5\text{ mm} \times 2.4\text{ mm}$, 辐射端口的尺寸为 $16.55\text{ mm} \times 14.05\text{ mm}$, 局域导波端口的场型调制为 TE_{10} 模, 采用升余弦调制时谐信号激励, 工作频率为 35 GHz , 基本剖分尺寸为空气波长 $\lambda_0/20$ 。

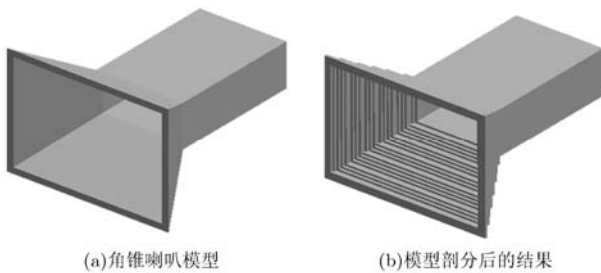


图 8 角锥喇叭天线的物理模型及剖分结果

同样采用本文提出的局域导波端口进行激励模拟, 并与其他方法计算结果进行了对比, 如图 9 所示。图中实线表示的是基于 FIT 的商业软件计算结果, 星线是传统方法计算结果, 上三角是本文方法计算结果。从图中可以看出, 传统方法由于外推面的不合理截断, 导致计算结果存在较大误差, 局域导波端口技术可以妥善解决这一问题, 验证了本文方法的优越性。

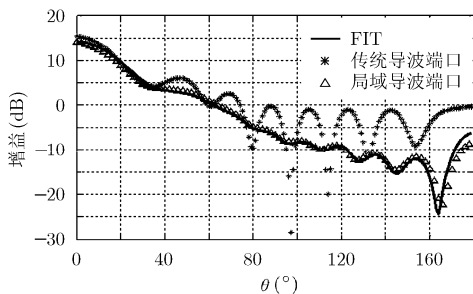


图 9 角锥喇叭天线的局域端口加载及计算结果

3.3 同轴端口微带贴片天线

同轴馈电微带贴片天线的物理模型如图 10(a)所示, 同轴馈线外直径 0.5 mm , 内直径 0.2 mm , 激励模式为 TEM 模, 采用升余弦调制时谐信号激励, 工作频率为 35 GHz , 基本剖分尺寸为 $\lambda_0/20$, 其中 λ 为介质波长。

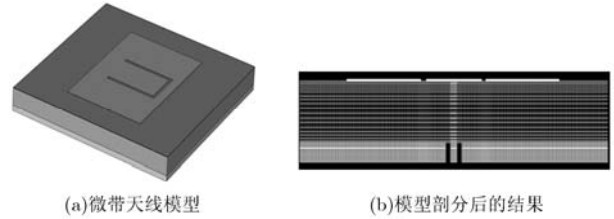


图 10 微带同轴馈电贴片天线物理模型及剖分结果

采用本文提出的局域导波端口进行激励计算, 并与其他方法的计算结果进行了比较, 如图 11 所示。从图 11 可以看出, 局域导波端口在同轴馈电的天线辐射问题中也有很高的计算精度, 进一步验证了该方法的有效性。

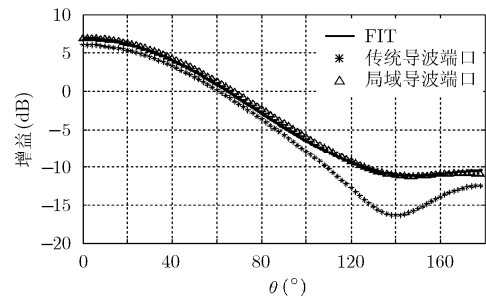


图 11 同轴馈电微带天线的局域导波端口加载及计算结果

3.4 波导缝隙天线阵

如图 12 所示, 波导缝隙阵的单个矩形导波端口的尺寸为 $22.86\text{ mm} \times 10.86\text{ mm}$, 矩形辐射缝隙的尺寸为 $1\text{ mm} \times 16\text{ mm}$, 局域导波端口的场型调制为 TE_{10} , 采用升余弦调制时谐信号激励, 工作频率为 10 GHz , 基本剖分尺寸为空气波长 $\lambda_0/20$ 。

采用局域导波端口进行 FDTD 迭代计算, 并进行如下的远场结果比较。从图中可以看出, 本文方法的结果(上三角)与有限积分方法(FIT)的结果(实线)吻合较好, 验证了本文方法在多端口激励下的正确性, 其中, 本文方法的副瓣误差主要是由非共形剖分下的阶梯近似引起。此外, 由于本例中天线阵的主瓣指向与导波端口面平行, 传统导波端口插入 PML 包围盒的激励方式会比较明显地干扰主瓣, 因而传统导波端口在本例中的失效性更为显著。事实

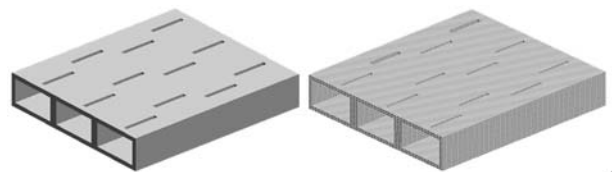


图 12 波导缝隙阵 3×4 的物理模型和剖分结果

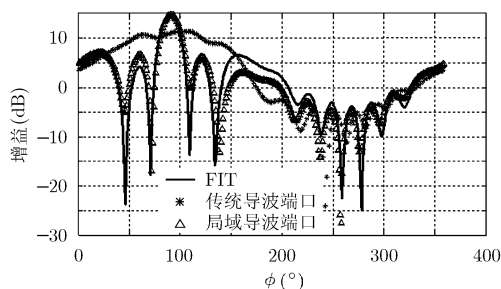


图 13 $\theta = 90^\circ$ 时的远场计算结果比较

上,对于诸如天线阵/天线罩一体化电性能分析等实际工程问题,天线单元或者天线阵需要插入到封闭或者半封闭的天线罩内,此时,传统导波端口的激励方法是无法解决此类问题的,而本文局域导波端口的局域加载特性能很好的解决此类问题,此方法已经被较多的应用到实际工程当中,其稳定性也在实际应用中得到了校验。

4 结束语

为解决传统波导端口激励在处理天线辐射问题时存在的问题,本文提出了一种通用有效的局域端口加载方式。通过对波导不连续性、天线与天线阵端口激励辐射等实际问题的仿真校验,证明了基于 FDTD 算法的局域导波端口加载技术既可以有效地处理波导不连续性问题,又解决了传统方法处理辐射问题时远场外推困难和辐射方向图失真等问题,因而是一种通用有效的波端口加载方式。

参考文献

- [1] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302-307.
- [2] Taflove A and Hagness S C. *Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method*[M]. Third Edition, Norwood, MA, Artech House, 2005: 273-322.
- [3] Van S, Berghe D, Olyslager F, *et al.* Efficient FDTD s-parameter calculation of microwave structures with TEM ports[C]. 1999 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Orlando, July 11-16, 1999, 2:

1078-1081.

- [4] Niknam A R, Menati M, Hashemzadeh M, *et al.* Fundamentals of slot antenna designing for application in surface wave plasma sources[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(2): 470-480.
- [5] Lan C H, Hu X W, Wang W D, *et al.* Three dimensional modeling of argon discharge characteristics of a large-scale rectangular surface wave plasma source[J]. *Plasma Science and Technology*, 2010, 12(2): 129-133.
- [6] Berenger J P. Perfectly matched layer for the FDTD solution of wave-structure interaction problem[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996, 44(1): 110-117.
- [7] Sacks Z S, Kingsland D M, *et al.* Perfectly matched anisotropic absorber for use as an absorbing boundary condition[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 1995, 43(12): 1460-1463.
- [8] Hyun S Y and Kim S Y. 3-D Thin-wire FDTD analysis of coaxial probe fed in asymmetric microwave components[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, 59(11): 2808-2815.
- [9] Attia H, Yousefi L, and Ramahi O M. Analytical model for calculating the radiation field of microstrip antennas with artificial magnetic superstrates: theory and experiment[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(5): 1438-1445.
- [10] Lam K Y, Luk K M, Lee K F, *et al.* Small circularly polarized U-slot wide band patch antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, 10(10): 87-90.
- [11] Keiichi Itoh, Katsumasa Miyata, and Hajime Igarashi. Evolutional design of waveguide slot antenna with dielectric lenses[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(2): 779-782.

游检卫: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为计算电磁学、共形时域有限差分技术、电磁粒子联合仿真技术。

张剑锋: 男, 1979年生, 副教授, 主要研究方向为计算电磁学、快速算法、多层媒质理论等。

崔铁军: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 目前主要研究方向为计算电磁学及其快速算法、新型人工电磁材料的理论、实验及应用研究、目标特性与目标识别、大型军用目标的精确电磁仿真等。