

运动导体平面电磁散射的FDTD仿真

张向前, 聂在平

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】提出了一种用于运动导体平面目标电磁散射问题的新方法。该方法基于时域有限差分方法,在分界面处利用相对边界条件进行处理。和其他方法相比,该方法不需要进行坐标系的变换,也不需要分界面处对入射场进行插值和确定总场的存放位置,因此更节省计算量和计算时间。用该方法对高速运动的无限大金属导体表面的电磁散射进行了仿真,数值计算结果表明了该方法的精确性与高效性。

关键词 电磁散射; 时域有限差分; 运动目标; 相对边界条件

中图分类号 TN011

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.02.005

FDTD Simulation for Electromagnetic Scattering of Moving Perfectly Conducting Planes

ZHANG Xiang-qian and NIE Zai-ping

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract A new method for modeling moving and perfectly conducting objects is proposed using a numerical technique based on the finite-difference time domain (FD-TD) method. Contrary to any other method, the numerical technique used does not require a coordinate transformation, the linear interpolation for the value of the incident field at the interface between the two different materials, and the determining of the position of the total field. This leads to saving calculation amount and CPU time. The electromagnetic wave scattering properties of a moving and perfectly conducting surface are analyzed using the numerical technique. Results obtained are given to show the high accuracy and efficiency of this new technique.

Key words electromagnetic scattering; FDTD; moving objects; relativistic boundary conditions

运动目标电磁散射研究在运动目标特征提取和识别等方面有重要应用。高速运动会目标的电磁散射信号产生调制作用,不同的运动状态也会产生不同的调制效果^[1-2],运动还会使目标的姿态随时间不断变化。因此运动目标电磁散射特性的模拟远比静止目标电磁散射特性的模拟复杂。

在以往为数不多的研究工作中,文献[3]是先给出运动目标在不同时刻的运动姿态,然后求出目标静止时不同姿态下的雷达散射截面,再通过运动姿态随时间的变化将目标的运动和雷达散射截面的变化联系起来,构成一个雷达散射截面的时间序列。该方法对低速运动是适用的,但对高速运动,由于没有考虑相对论效应,并不适用。另外,该方法要想得到某一散射特征量随时间的变化,必须在很多时刻分别对不同的姿态进行计算,这样就需要花费大量的计算时间。所以用这种方法很难研究高速运

动过程中目标散射特征量随时间变化的物理本质。文献[4-8]从理论上对运动分界面的相对边界条件和运动导体平面电磁散射的“双多谱勒效应”进行了深入的研究。文献[9]用特征基方法结合相对边界条件计算了运动金属导体平面的电磁散射场,但该方法相对比较烦琐。时域有限差分(FDTD)是一种简单方便的时域计算方法,它在研究各种相关物理量随时间同步变化的问题上特有的优势。FDTD结合相对边界条件可以有效地解决运动导体平面的电磁散射问题^[10],其优点是不需要坐标变换,可以直接在相对运动的坐标系下得到目标散射场等特征量的实时变化,还可以得到目标散射场的幅值和频率等重要信息。但它有两个缺点,一是当目标表面与网格节点不重合时,需要在运动目标表面处对入射场进行线性插值,同时还需要在分界面两边确定离分界面最近的节点以便在该点存放分界面处的总场,这

收稿日期: 2008-09-27; 修回日期: 2008-11-05

基金项目: 国家973项目(6136001); 国家自然科学基金重点项目(60431010); 高等学校学科创新引智计划(B07046)

作者简介: 张向前(1976-),男,博士生,主要从事计算电磁学及运动目标电磁散射方面的研究。

不仅使计算变得烦琐,而且增加了计算量和计算时间;二是由于该方法用分界面两边距离分界面最近的节点存放分界面处的总场,使得入射场与总场不在同一个位置,只是对相对边界条件的近似,因此降低了计算结果的精度。为了克服这两个缺点,本文在分界面处不用插值,而是直接用空气媒质中紧邻分界面的入射场代替分界面处的入射场,这样不仅简单方便,而且使入射场和总场在同一位置,完全符合相对边界条件的要求,通过数值算例验证了该方法的有效性。本文还把该方法用于高速运动的无限大金属导体平面目标中,研究了高速运动对电磁散射信号的调制效应,通过数值仿真验证了高速运动导体平面目标电磁散射的“双多谱勒效应”。

1 运动目标的“双多谱勒效应”

目标运动会使电磁波的回波信号产生调制,不同的运动方式和运动状态产生不同的调制。对于高速运动的金属导体表面,这种调制主要表现在回波的幅度和频率上,当入射波为时谐平面波时,经调制的散射电场为:

$$E_z^s(y,t) = - \left[\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}} \right] \exp j \left[\left(\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}} \right) (\omega_0 t - ky) + \left[2jk \left(\frac{r_0 - vt_0}{1-\frac{v}{c}} \right) \right] \right] \quad (1)$$

式中 导体表面位置为 $y_0 = v(t-t_0) + r_0$; r_0 和 t_0 是空间和时间的起始参考点^[1]。由式(1)可知,散射场的幅度和频率相对入射场的幅度和频率都被乘以一个因子,该因子的大小与目标运动速度的大小有关,这种调制现象称为“双多谱勒效应”。所乘的因子为 $\alpha = (1-\beta)/(1+\beta)$, 其中 $\beta = v/c$, c 为自由空间中的光速, v 为目标的运动速度。

2 运动目标的数值仿真算法

静止目标的电磁散射问题可以方便地用FDTD方法来求解^[11-18],无论入射场是瞬态场还是时谐场,都可以通过FDTD求出静止目标散射场随时间的变化关系。但高速运动目标的电磁散射问题不能直接用传统FDTD计算,因为高速运动目标分界面的边界条件与静止目标分界面的边界条件不同。

2.1 相对边界条件

当媒质分界面运动时,分界面上的场矢量 \mathbf{E} 、

\mathbf{B} 、 \mathbf{D} 和 \mathbf{H} 满足如下的相对边界条件^[5]:

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0 \quad (2a)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0 \quad (2b)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = \rho_s \quad (2c)$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})(\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = \mathbf{J}_s \quad (2d)$$

式中 \mathbf{E}_1 、 \mathbf{D}_1 、 \mathbf{H}_1 、 \mathbf{B}_1 以及 \mathbf{E}_2 、 \mathbf{D}_2 、 \mathbf{H}_2 和 \mathbf{B}_2 分别是分界面两边媒质1和媒质2中的电场强度、电通量密度、磁场强度和磁通量密度; ρ_s 和 \mathbf{J}_s 分别是分界面上的面电荷密度和面电流密度; \mathbf{v} 是分界面的运动速度; \mathbf{n} 是分界面的单位法向矢量。式(2b)和式(2c)与静止分界面的边界条件相同,而式(2a)和式(2d)与静止分界面的边界条件不同。当 $\mathbf{v}=0$ 或 $(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})=0$, 即速度为零或运动方向与分界面平行时,式(2a)和式(2d)退化为静止分界面的边界条件,此时的相对边界条件就和静止分界面的边界条件相同。

式(2)相对边界条件表示同一时刻分界面上同一点的场矢量所满足的关系,但在FDTD中电场矢量和磁场矢量在时间上相差半个时间步,在空间上相差半个空间步,因此式(2)在FDTD中不能直接使用。为此,经过推导可得到相对边界条件在金属与空气媒质分界面处的等价形式,即金属与空气媒质分界面的相对边界条件为^[10]:

$$\mathbf{E} = 2 \frac{-\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}}{c - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}} \mathbf{E}^i \quad (3a)$$

$$\mathbf{B} = \frac{2c}{c - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}} \mathbf{B}^i \quad (3b)$$

式中 \mathbf{E} 和 \mathbf{E}^i 分别表示分界面处电场的切向总场和电场的切向入射场; \mathbf{B} 和 \mathbf{B}^i 分别表示分界面处磁场的切向总场和磁场的切向入射场; c 为自由空间中的光速; \mathbf{v} 为分界面的运动速度; \mathbf{n} 为分界面的单位法向矢量。式(3a)表示两种媒质运动分界面处电场的总场切向分量与电场的入射场切向分量和分界面运动速度之间的关系,可见,在分界面处电场的总场切向分量可以由分界面处电场的入射场切向分量表示。同理,式(3b)表示两种媒质运动分界面处磁场的总场切向分量与磁场的入射场切向分量和分界面运动速度之间的关系,在分界面处磁场的总场切向分量可以由分界面处磁场的入射场切向分量表示。而电场总场的切向分量和电场入射场的切向分量的同时刻同位置的要求及磁场总场的切向分量和磁场入射场的切向分量的同时刻同位置的要求在FDTD方法中可以满足,因此式(3)表示的相对边界条件可以在FDTD中方便地执行。

2.2 相对边界条件时域有限差分(RBC-FDTD)算法

用相对边界条件结合传统FDTD方法可方便高

效地计算运动目标电磁散射。具体算法和步骤如下:

(1) 将计算区域划分为总场区和散射场区,在总场区确定目标运动所能达到的区域。

(2) 求出计算区域各电场节点的入射电场和磁场节点的入射磁场,并在总场边界引入入射波。

(3) 确定运动过程中任一时间步和半时间步目标与空气媒质各分界面的位置。

(4) 求出运动过程中与运动方向不平行的分界面处入射电场的切向分量和入射磁场的切向分量,在这些分界面处执行式(3)相对边界条件。若这些分界面与空间节点不重合,则用空气中与分界面紧邻的电场节点处入射电场切向分量代替分界面处入射电场的切向分量,用空气中与分界面紧邻的磁场节点处入射磁场切向分量代替分界面处入射磁场的切向分量,并把这些分界面处的总场值存放于空气中与分界面紧邻的节点处。

(5) 在与运动方向平行的分界面上,边界条件在FDTD中是自动满足的,不需要特殊处理,只在与运动方向不平行的分界面上应用相对边界条件,其他的计算区域用传统FDTD方法计算。

(6) 随着计算时间的推进,可以求出目标运动过程中散射场区任一点的散射场。

相对边界条件式(2)是在目标运动速度为匀速的假设下得到的,但在加速度很小的情况下也近似适用^[10]。相对边界条件式(3)是在相对边界条件式(2)的基础上针对金属目标推导得到的,所以该算法适用于目标速度为匀速或加速度很小,且目标为金属导体的运动目标电磁散射问题。对于目标为介质的情况,可以由式(2)推导出适合介质目标的相对边界条件,并结合传统的FDTD方法便可研究运动介质目标的电磁散射问题。

3 数值算例及分析

3.1 数值算例

下面用两个数值算例验证RBC-FDTD算法求解运动金属导体平面目标电磁散射问题的有效性。

算例1:平面波沿y方向垂直入射到一个静止的无限大金属导体表面上。入射波的激励源为 $E = 2\sin(2\pi ft)$, $f = 30\text{ GHz}$ 。

图1是分别用传统FDTD方法和RBC-FDTD方法计算散射场区距离左边界10个空间步处散射场随时间变化的波形图,两种方法的计算结果吻合很好。

图2是用传统FDTD方法和RBC-FDTD方法计算的时间步为3500时散射场区各点散射场幅值的大小,

两种方法的计算结果也吻合得很好。

算例2:平面波沿y方向垂直入射到一个高速运动的无限大金属导体表面上。入射波的激励源为 $E = 2\sin(2\pi ft)$, $f = 30\text{ GHz}$ 。

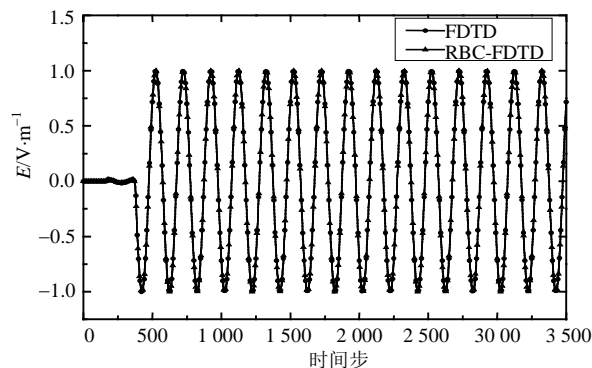


图1 距离左边界10个空间步处散射场随时间的变化

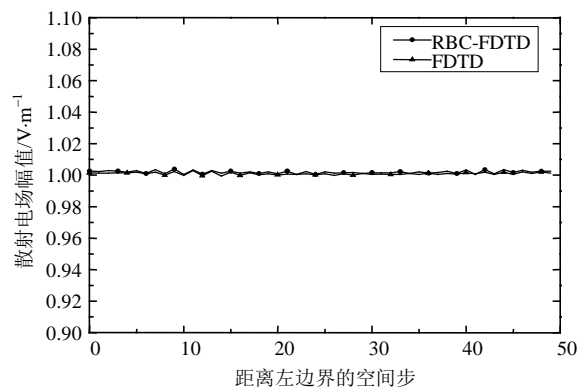


图2 时间步为3500时散射场区各点的散射场

下面分别对运动速度为 $v = -c/3$ 和 $v = c/3$ 两种情况进行仿真和讨论。

(1) 当 $v = -c/3$ 时,表示目标运动方向与入射波的方向相反,因子 $\alpha = 2$ 。

图3是用本文提出的RBC-FDTD方法计算的入射场与散射场随时间变化的波形图,由图可见,散射场的幅度和频率是入射场幅度和频率的两倍,这个结论和“双多谱勒效应”的理论结果完全相同。图3中3.5 ns之前的散射场为零,是因为入射波到达金属导体表面和散射波到达考察点需要一定的时间,所以这段时间内的散射场为零。

图4是时间步为3500时散射场区各点入射场与散射场幅值的仿真结果和理论结果的比较。无论是从仿真结果还是理论结果都可得到散射场的幅值是入射场幅值的两倍,且仿真结果和“双多谱勒效应”的理论结果完全相同。

图5是距左边界10个空间步处散射电场的频谱,由图可见,散射场的频率为60 GHz,是入射场频率的两倍,该结果与“双多谱勒效应”理论结果相同。

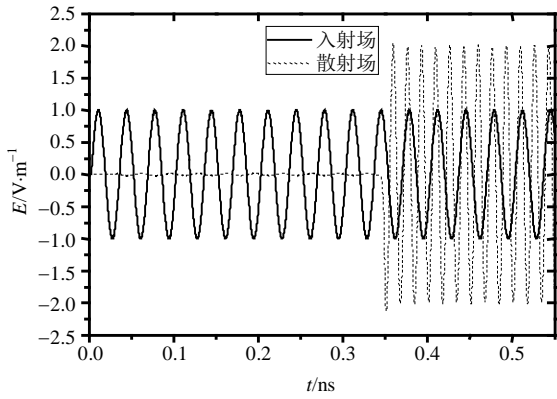


图3 距左边界10个空间步处入射场与散射场的波形

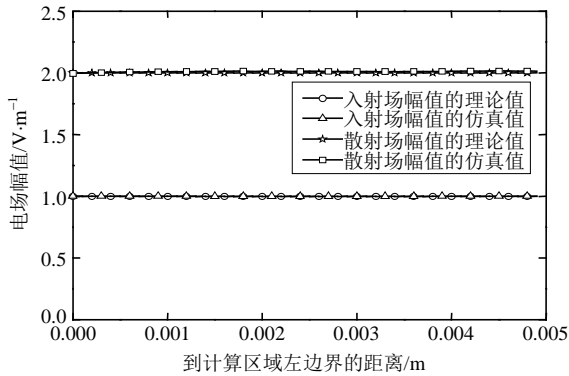


图4 时间步为3 500时散射场区入射场与散射场的幅值

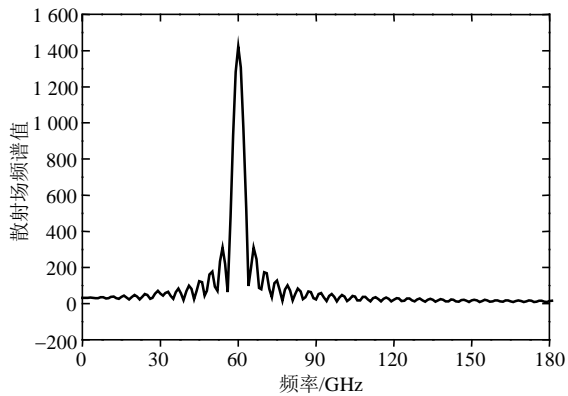


图5 距左边界10个空间步处散射场的频谱

(2) 当 $v = c/3$ 时, 表示目标运动方向与入射波的方向相同, 因子 $\alpha = 1/2$ 。

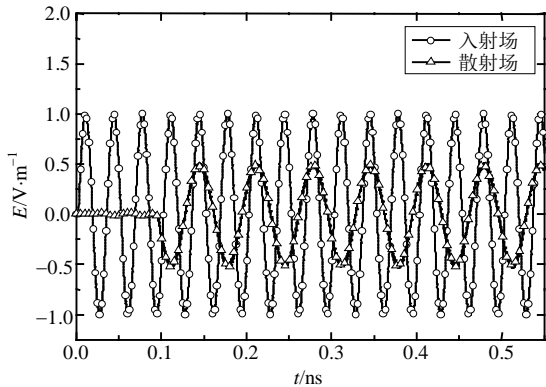


图6 距左边界10个空间步处入射场与散射场的波形

图6是用本文提出的RBC-FDTD方法计算的入射场与散射场随时间变化的波形图, 由图可见散射场的幅度和频率是入射场幅度和频率的1/2, 这与“双多谱勒效应”的理论结果完全相同。图6中大约0.1 ns之前的散射场为零, 是因为入射波到达金属表面和散射波到达考察点需要一定的时间, 所以这段时间内的散射场为零。

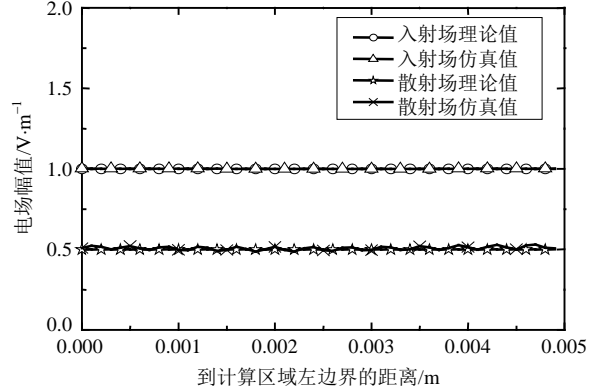


图7 时间步为3 500时散射场区各点入射场与散射场的幅值

图7是时间步为3 500时散射场区各点入射场与散射场幅值的仿真结果和理论结果的比较。无论是从仿真结果还是理论结果都可得到散射场的幅值是入射场幅值的1/2, 且仿真结果和“双多谱勒效应”的理论结果完全相同。

图8是距左边界10个空间步处散射场的频谱, 由图可见散射场的频率为15 GHz, 是入射场频率的1/2, 该结果与“双多谱勒效应”的理论结果相同。

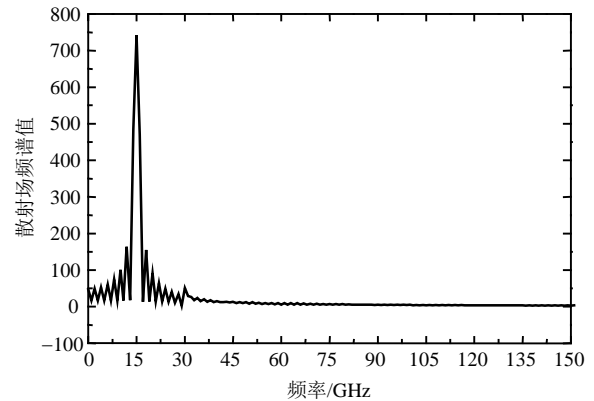


图8 距左边界10个空间步处散射场的频谱

算例1将静止目标作为运动目标的特例, 分别用传统FDTD方法和RBC-FDTD方法计算了静止无限大金属导体平面目标的电磁散射, 两种方法的仿真结果吻合很好。算例2用RBC-FDTD方法计算了高速运动无限大金属导体平面目标的电磁散射, 仿真结果与“双多谱勒效应”的理论结果完全相同。这两个算例不仅验证了RBC-FDTD方法求解无限大运动金属导体平面目标的有效性, 还从数值仿真的角度

验证了运动金属导体平面目标电磁散射的“双多谱勒效应”。

3.2 RBC-FDTD算法的精度分析

下面分别用本文提出的RBC-FDTD方法和文献[10]给出的RBC-FDTD方法对算例2的问题进行仿真,并对两种方法计算结果的误差做比较。

图9为散射场区各点散射场的幅值。两条曲线分别是用文献[10]给出的RBC-FDTD方法和本文提出的RBC-FDTD方法计算的,由图可见,本文提出的方法比文献[10]给出方法的结果更接近理论值0.5。

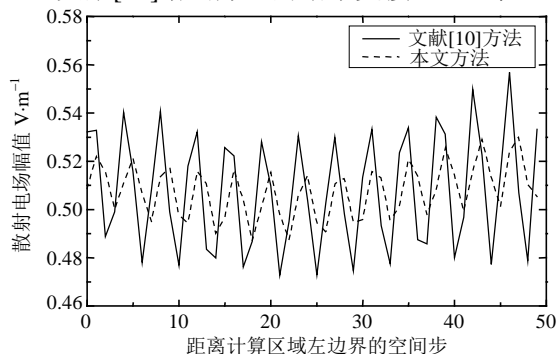


图9 两种方法计算的散射电场幅值结果的比较

图10为用两种方法计算的散射电场幅值的相对误差。相对误差定义为:相对误差=(计算值-理论值)/理论值。由图可见文献[10]给出方法的最大计算误差约为11.5%,而本文提出方法的最大计算误差约为6%,可见文献[10]给出方法的最大计算误差约为本文提出方法的最大计算误差的2倍。

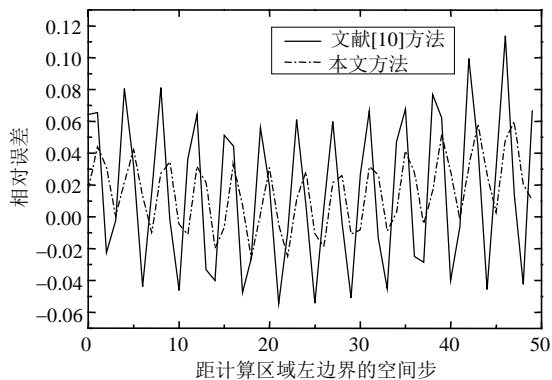


图10 两种方法计算的散射电场幅值相对误差的比较

4 结论

本文研究了相对边界条件及金属导体目标分界面上相对边界条件的等价形式,提出了不需要插值的简化RBC-FDTD方法,并用该方法对静止及高速运动的无限大金属导体表面的电磁散射特性进行了研究。分别用RBC-FDTD方法和传统FDTD方法对静止无限大金属导体表面的散射场进行了计算,二者

吻合很好。用本文提出的RBC-FDTD方法计算了高速运动的无限大金属导体表面的散射场,数值仿真结果与“双多谱勒效应”理论分析结果相同,用数值方法证明了高速运动目标电磁散射的“双多谱勒效应”,并对该方法的计算精度做了分析。该方法不仅简单方便,而且计算精度高,是解决运动目标电磁散射问题的一种有效方法,将会用于解决更复杂的运动目标电磁散射问题。

参考文献

- [1] COOPER J. Scattering of electromagnetic fields by a moving boundary: the one-dimensional case[J]. IEEE Transactions on AP, 1980, 28(6): 791-795.
- [2] BLADEL J V, ZUTTER D D. Reflections from linearly vibrating objects: Plane mirror at normal incidence[J]. IEEE Transactions on AP, 1981, 29(4): 629-637.
- [3] 何健雄. 空间运动目标RCS仿真计算软件设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
HE Jian-xiong. Design of simulation software for space moving object RCS calculation[D]. Xi'an: Xidian University, 2005.
- [4] ABDELAZEEZ M K, PEACH L C, BORKAR S R. Scattering of electromagnetic waves from moving surfaces[J]. IEEE Transactions on AP, 1979, 27(5): 679-684.
- [5] COSTEN R C, ADAMSON D. Three-dimensional derivation of the electrodynamic jump conditions and momentum-energy laws at a moving boundary[J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(9): 1181-1196.
- [6] ZUTTER D D. Reflections from linearly vibrating objects: plane mirror at oblique incidence[J]. IEEE Transactions on AP, 1982, 30(5): 898-903.
- [7] SHIOZAWA T. Phenomenological and electro theoretical study of the electrodynamics of rotating systems[J]. Proceedings of the IEEE, 1973, 61(12): 1694-1702.
- [8] BLADEL J V. Electromagnetic fields in the presence of rotating bodies[J]. Proceedings of the IEEE, 1976, 64(3): 301-308.
- [9] HO M. Numerical simulation of scattering of electromagnetic waves from traveling and/or vibrating perfect conducting planes[J]. IEEE Transactions on AP, 2006, 54(1): 152-156.
- [10] HARFOUSH F, TAFLOVE A, KRIEGSMANN G A. A numerical technique for analyzing electromagnetic wave scattering from moving surfaces in one and two dimensions[J]. IEEE Transactions on AP, 1989, 37(1): 55-63.
- [11] YEE K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media[J]. IEEE Transactions on AP, 1966, 14(3): 302-307.
- [12] MUR G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations[J]. IEEE Transactions on

- EMC, 1981, 23(4): 377-382.
- [13] TAFLOVE A, HAGNESS S C. Computational electrodynamic: the finite-difference time-domain method [M]. Boston: Artech House, 2000.
- [14] WANG Ying-jun, WANG Bing-zhong, SHAO Wei. Theoretical proof of unconditional stability of the 3-D ADI-FDTD method[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2003, 1(1): 1-5.
- [15] 汤 炜, 李清亮, 焦培南, 等. 无时间约束FDTD方法在三维散射中的应用[J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1499-1503.
- TANG Wei, LI Qing-liang, JIAO Pei-nan, et al. Three-dimensional scattering analysis using ADI-FDTD method[J]. Acta Eletronica Sinica, 2004, 32(9): 1499-1503.
- [16] 闫淑辉, 王秉中, 易 春, 等. 基于时域有限差分法的电磁仿真软件研制[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(4): 353-356.
- YAN Shu-hui, WANG Bing-zhong, YI Chun, et al. Development of an EM simulation software based on the FDTD[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2004, 33(4): 353-356.
- [17] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- WANG Bing-zhong. Computational electromagnetics[M]. Beijing: Science Publishing House, 2005.
- [18] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- GE De-biao, YAN Yu-bo. Finite-difference time-domain fethod for electromagnetic waves[M]. Xi'an: Xidian University Publishing House, 2005.

编辑 漆 蓉

(上接第175页)

参 考 文 献

- [1] TAM W, LAU F C M. Analysis of power control and its imperfection in CDMA cellular system[J]. IEEE Trans Veh Technol, 1999, 48(5): 1706-1777.
- [2] KRIM H, VIBERG M. Two decades of array signal processing research[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4): 67-94.
- [3] TEPEDELENLIOGLU C, SIDIROPOLOS N, GIANNAKIS G B. Median filtering for power estimation in mobile communication systems[C]//Third IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Taoyuan, Taiwan: IEEE, 2001.
- [4] MCCLOUD M L. A new subspace identification algorithm for high-resolution DOA estimation[J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1999, 50(10): 1382-1390.
- [5] MESTER X, JOHNSON B A, ABRAMOVICH Y I. Source power estimation for array processing applications under lower sample size constraints[C]//IEEE 2007 ICASSP. Hawaii, USA: IEEE, 2007.
- [6] ZHANG Xiao-fei, LÜ Wen, SHI Ying, et al. A novel DOA estimation algorithm based on eigen space. microwave, antenna, propagation and EMC technologies for wireless communications[C]//2007 International Symposium. [S.l.]: [s.n.], 2007.
- [7] JIANG Tao, SIDIROPOLOS D. Kalman filtering for power estimation in mobile communications[J]. IEEE Trans on Wireless Comm, 2003, 2(1): 151-161.
- [8] ZISKIND I, WAX M. Maximum likelihood localization of multiple source by alternating projection[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4): 67-94.
- [9] 吴勃英, 王德明, 丁效华, 等. 数值分析原理[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- WU Bo-ying, WANG De-ming, DING Xiao-hua, et al. Principle of numerical analysis[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [10] BURDEN R L, FAIRES J D. 数值分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- BURDEN R L, FAIRES J D. Numerical analysis[M]. Beijing: Advanced Education Press, 2005.

编辑 税 红