

等离子体涂覆导弹的电磁散射特性分析

师 颖, 李 刚, 安 兴, 徐林伟

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘 要:研究了涂覆导弹的隐身特性,分析了等离子参数选取对隐身特性的影响。利用媒质参数 $\tilde{\epsilon}(\omega)$ 的 Debye 方程与时域场量间的关系式,将移位算子法应用到色散媒质中的 FDTD 计算当中,对麦克斯韦方程作了修改,并给出了色散媒质中与频率有关的 FDTD 表达式。通过仿真并与其它方法结果相比较,验证了该算法计算色散媒质散射特性的有效性,表明等离子体对减小目标 RCS 具有显著效果。

关键词:等离子体;色散媒质;时域有限差分法;隐身目标

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.05.011

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)05-0048-05

目标电磁散射特性^[1-2]是雷达系统探测、跟踪、识别目标的基础,随着航空航天技术的发展和现代局部战争的升级,隐身目标电磁散射特性研究在电子对抗中显得越来越重要。

雷达截面减缩就是控制和降低目标的雷达特征,迫使敌方电子探测系统降低探测能力和武器平台降低其效能,是提高目标突防能力、生存能力,尤其是纵身打击能力的有效手段,一直受到高度重视。等离子体隐身技术^[3]作为一种全新的隐身手段,相比目前已广泛应用的隐身技术具有许多优势:一是隐身效率高,等离子体可以达到 99% 的隐身和折射效果,远高于现有的吸波材料;二是具有宽频段,基本可以对所有波段的雷达进行吸收和干扰;三是不改变装备的外形,适应范围广。等离子体隐身技术可以在几乎不影响飞行器气动和强度性能的情况下减缩其 RCS,特别是用于一些无法或难以采取外形措施的部件,例如弹翼、机翼前缘部位等,而且依靠材料的吸收性能降低了目标总的回波强度,在所有方向上都达到了减小 RCS 的隐身效果。

本文利用 Debye 媒质^[4-12]的时频关系,利用移位算子法^[1-2]推导了适用于色散媒质的时域有限差分法,研究了等离子体涂覆导弹的隐身特性,分析了等离子体参数选取对隐身特性的影响。

1 色散媒质的 FDTD 算法

1.1 色散介质中的 FDTD 迭代步骤

同普通介质中的 FDTD 迭代公式推导过程一样,色散介质中 FDTD 的迭代公式也可由麦克斯韦方程导出。设色散介质导磁系数与频率无关,因此色散介质中的磁场 \mathbf{H} 可由普通的 FDTD 迭代公式求取。对于电场 \mathbf{E} 的迭代公式,由无源空间色散介质中麦克斯韦方程有:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

根据 FDTD 方法的离散原理,应用 Yee 元胞离散计算空间,则 \mathbf{D} 各分量随时间推进迭代公式为:

$$\mathbf{D}^{n+1} = \mathbf{D}^n + \Delta t (\nabla \times \mathbf{H})^{n+1/2} \quad (2)$$

* 收稿日期:2010-06-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60971118)

作者简介:师颖(1986-),女,北京人,硕士生,主要从事飞行器控制理论与应用、电磁散射研究;

E-mail:she_sy@126.com

李刚(1963-),男,安徽凤台人,教授,主要从事飞行器控制理论与应用、复杂系统建模、控制与仿真研究。

在此基础上,进一步由介质的本构关系,由 \mathbf{D} 求出各时刻的 \mathbf{E} 值。色散介质中的 FDTD 迭代步骤如下:

1) 根据通用的 FDTD 公式,由已知的 n 时刻的电场 \mathbf{E}^n 计算 $(n+1/2)$ 时刻的磁场 $\mathbf{H}^{n+1/2}$ 。

2) 由式 $\mathbf{D}^{n+1} = \mathbf{D}^n + \Delta t (\nabla \times \mathbf{H})^{n+1/2}$, 通过 $(n+1/2)$ 时刻的磁场 $\mathbf{H}^{n+1/2}$ 可以迭代求出 $(n+1)$ 时刻的电通量 \mathbf{D}^{n+1} 。

3) 根据色散介质中本构关系:

$$\mathbf{D}(\omega) = \tilde{\varepsilon}(\omega) \mathbf{E}(\omega) \quad (3)$$

由 $(n+1)$ 时刻的电通量 \mathbf{D}^{n+1} 可得出 $(n+1)$ 时刻的电场 \mathbf{E}^{n+1} 。

4) 回到步骤 1), 进入下一个迭代时间步。

由上面的分析可以得出,色散媒质 FDTD 算法的推导过程中,第 3) 步由媒质的本构关系导出电场 \mathbf{E}^{n+1} 的迭代公式是整个过程的关键。

1.2 电场迭代公式的推导

色散介质中 FDTD 迭代公式的推导,最终是为了得出本构关系式(1)在时域递推算式。设色散介质的介电常数为:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \frac{\sum_{n=0}^N p_n(j\omega)^n}{\sum_{n=0}^N q_n(j\omega)^n} \quad (4)$$

由时域到频域转换的傅里叶变换关系式可以得出时域到频域的算子转换关系 $j\omega \rightarrow \partial/\partial t$, 将式(4)代入式(3),得到本构关系式在时域的表达形式:

$$\mathbf{D}(t) = \varepsilon_0 \varepsilon_r(\partial/\partial t) \mathbf{E}(t) \quad (5)$$

式中 $\varepsilon_r(\partial/\partial t)$ 为介电常数的时域算子形式。

根据色散介质的介电常数的时域表达式:

$$\varepsilon_r\left(\frac{\partial}{\partial t}\right) = \frac{\sum_{n=0}^N p_n(\partial/\partial t)^n}{\sum_{n=0}^N q_n(\partial/\partial t)^n} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),整理可得:

$$\left[\sum_{n=0}^N q_n(\partial/\partial t)^n \right] \mathbf{D}(t) = \varepsilon_0 \left[\sum_{n=0}^N p_n(\partial/\partial t)^n \right] \mathbf{E}(t) \quad (7)$$

1.3 移位算子法

应用时间导数算子和移位算子之间的对应关系

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \left(\frac{2k_t - 1}{\Delta t k_t + 1} \right) \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)整理得到离散时域的本构关系式,在第 $n\Delta t$ 时刻可表示为:

$$\left[\sum_{l=0}^N q_l \left(\frac{2k_t - 1}{\Delta t k_t + 1} \right)^l \right] \mathbf{D}^n = \varepsilon_0 \left[\sum_{l=0}^N p_l \left(\frac{2k_t - 1}{\Delta t k_t + 1} \right)^l \right] \mathbf{E}^n \quad (9)$$

即两边同乘 $(k_t + 1)^N$, 整理后得到:

$$\left[\sum_{l=0}^N q_l \left(\frac{2}{\Delta t} \right)^l (k_t + 1)^{N-l} (k_t - 1)^l \right] \mathbf{D}^n = \varepsilon_0 \left[\sum_{l=0}^N p_l \left(\frac{2}{\Delta t} \right)^l (k_t + 1)^{N-l} (k_t - 1)^l \right] \mathbf{E}^n \quad (10)$$

上式为含离散时域移位算子的本构关系。

为了验证算法的有效性,计算所采用的非磁性色散介质球模型的半径为 0.25 m, 其介电常数模型为:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega t_0} + \frac{\sigma}{j\omega \varepsilon_0} \quad (11)$$

模型中各参数的取值分别为: $\varepsilon_s = 1.16$, $\varepsilon_z = 1.01$, $t_0 = 4.497 \times 10^{-10}$ s, $\sigma = 2.95 \times 10^{-4}$ S/m。入射波采用高斯波脉冲,其中脉冲宽度 $\tau = 0.4$ ns。图1给出了色散介质球的后向 RCS,与文献[1]给出的 Mie 级数解相比可以看出,两者吻合较好。

2 等离子体涂覆导弹的隐身特性分析

等离子体色散模型为:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \left[1 + \frac{w_p^2}{w(j\nu_c - w)} \right] \quad (12)$$

式中: ν_c 为碰撞频率; ω_p 为等离子体角频率。等离子体参数为: $\omega_p = 28.7$ GHz, $\nu_c = 2 \times 10^{10}$ 。为了应用针对有理分式模型的色散介质 FDTD 程序,需对上式进行变换,等离子体模型可改写为:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \frac{(jw)^2 + jw\nu_c + \omega_p^2}{(jw)^2 + jw\nu_c} \quad (13)$$

对照式(4)可知该模型对应于二阶的有理分式模型,且有:

$$p_0 = \omega_p^2, p_1 = \nu_c, p_2 = 1, q_0 = 0, q_1 = \nu_c, q_2 = 1 \quad (14)$$

某导弹模型见图2,整个模型由一个半球,一个锥台,一个圆柱和3个互成 120° 的弹翼组成。半球半径为 50 mm;锥台下底半径 200 mm,上底半径 50 mm,高为 1 000 mm;圆柱半径为 200 mm,高 2 000 mm;3个弹翼尺寸如图中所示。导弹轴线与 z 轴重合,弹头指向正 z 方向, x 轴正方向与两弹翼的夹角均为 60° 。

考虑非磁化等离子体涂敷金属导弹情况。导弹弹轴方向与 z 轴重合,弹头指向正 z 方向。入射脉冲采用高斯脉冲,计算的时间步长 $\Delta t = 1.582$ ps,脉冲宽度 $\tau = 0.133$ ns,入射波方向正对导弹模型的鼻锥,为 $-z$ 轴方向。空间网格数量为 $60 \times 60 \times 120$,导弹上涂敷了一层厚度为 1.65 mm 的非磁化等离子体,等离子体参数由式(12)给出。其中 ω_p 也可由等离子体的自由电子密度 n_e 给出:

$$\omega_p = \left(\frac{n_e e^2}{m_e \varepsilon_0} \right)^2 \quad (15)$$

式中: $e = -1.6 \times 10^{-19}$ C,为电子的电量; $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg,为电子质量; ε 为真空中的介电常数。

图3给出了当等离子体 $\nu_c = 5 \times 10^{10}$ Hz 不变时,不同自由电子密度 n_e 情况下导弹的后向 RCS 值,图中同时给出了没有等离子体涂敷金属导弹的后向 RCS 值,由图可以看出,等离子体在 3 - 15 GHz 的频率范围内都使得金属导弹的后向 RCS 得到了缩减,而且在碰撞频率不变的情况下,等离子体电子密度越大时对电磁波的吸收效果越好。

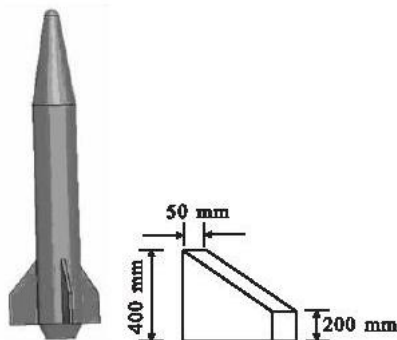


图2 导弹模型图

Fig.2 The model of missile

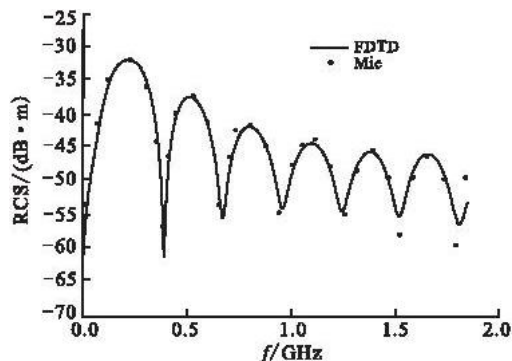


图1 色散介质球后向 RCS

Fig.1 The monostatic RCS of dispersive sphere

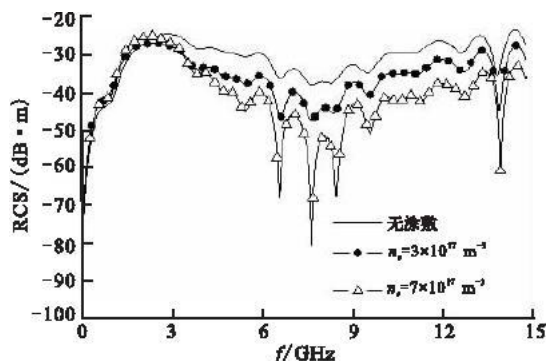


图3 碰撞频率不变时导弹后向 RCS

Fig.3 The monostatic of missile when the collision frequency dont change

图4给出了当等离子体自由电子密度 $n_e = 5 \times 10^{17}$ m^{-3} 不变时,不同碰撞频率下等离子体涂敷导弹的后向 RCS 值,图中同时给出了无涂敷导弹的后向 RCS 值,由图可知,自由电子密度不变的情况下,等离子体的碰撞频率越高,吸收电磁波的效果越差。

图 5 给出的是无等离子体涂敷金属导弹的后向远场值与涂敷一层参数为 $n_e = 5.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $\nu_e = 5.0 \times 10^{10} \text{ Hz}$ 的等离子体时金属导弹的后向远场值的对比情况,由图可见,时域持续时间基本维持不变,但是 2 种情况下的幅度差异却较为明显。

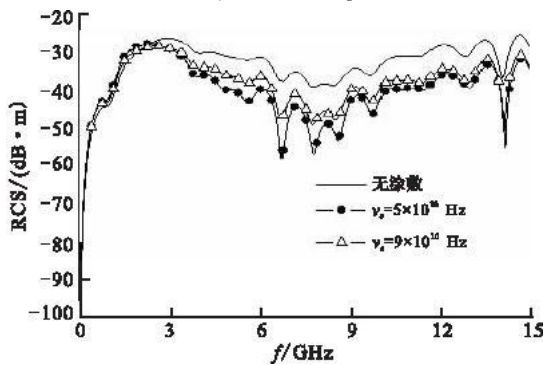


图 4 自由电子密度不变时导弹后向 RCS

Fig. 4 The monostatic RCS of missile when the free electron density don't change

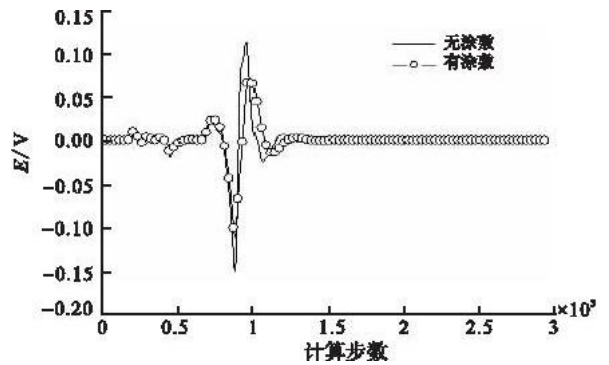


图 5 导弹后向远区场

Fig. 5 The back far field of missile

3 结束语

本文利用 Dybye 媒质的时频关系,利用移位算子法推导了适用于色散媒质的时域有限差分法,研究了等离子体涂覆导弹的隐身特性,分析了等离子体参数选取对隐身特性的影响。通过 2 个实例的计算,验证了本文方法的有效性,且从图中明显看出金属目标表面涂敷等离子体后达到了减小 RCS 的隐身效果。

参考文献:

- [1] 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, 2005:274 - 297.
GE Debiao, YAN Yubo. Finite - difference Time - domain Method for Electromagnetic Waves[M]. Xi'an: The Press of Xidian University, 2005:274 - 297. (in Chinese)
- [2] Yee K S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell Equations in Isotropic Media [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1966, AP - 14(3): 302 - 307.
- [3] Neal Gregory Skinner. FDTD Studies of Frequency Selective Surfaces[D]. Texas: The University of Texas, 2006.
- [4] Elena Semouchkina. FDTD Analysis of Microwave Resonant Structures with Dielectric Substrates [D]. Pennsylvania: the Pennsylvania State University Doctor Dissertaion, 2001.
- [5] Yee K S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell Equations in Isotropic media[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1966, AP - 14(3): 302 - 307.
- [6] Shlager K L, Schneider J B. Aselective Surver of the Finite - difference Time - domain Literature [J]. IEEE Antennas Propagat Magazine, 1995, 37(4): 39 - 57.
- [7] Taylor C D, Lam D H, Shumpert T H. EM Pulse Scattering in Time Varying Inhomogeneous Media [J]. IEEE Trans Antenna Propagat, 1969, AP - 17(5): 585 - 589.
- [8] Taflove A, Brodwin M E. Numerical Solution of Steady - state EM Scattering Problems Using the Time - dependent Maxwell's Equations[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1975, MTT - 23(5): 623 - 630.
- [9] Umashankar K P, Taflove A. A Novel Method of Analyzing Electromagnetic Scattering of Complex Objects[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compat, 1982, EMC - 24(4): 397 - 405.
- [10] Mur G. Absorbing Boundary Conditions for the Finite - difference Approximation of the Time Domain Electromagnetic Field Equations [J]. IEEE Trans Electromagnetic Compat, 1981, EMC - 23(4): 377 - 382.
- [11] 刘波. 利用多种变换实现磁化等离子体的时域数值仿真[J]. 微波学报, 2008, 24(6): 16 - 20.
LIU Bo. A Multi - transform Technique for Numerical Simulation of Magnetized Plasma Using Time Domain Algorithm[J]. Journal of Microwaves, 2008, 24(6): 16 - 20. (in Chinese)
- [12] 钟双英, 刘崧. 一种高效计算各项异性磁化等离子体的时域有限差分算法[J]. 计算物理, 2009, 26(3): 415 - 421.

ZHONG Shuangying, LIU Song. Efficient FDTD Algorithm for Anisotropic Magnetized Plasma[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(3): 415 - 421. (in Chinese)

(编辑:田新华)

A Study of the Stealthy Characteristics of Missile Coated with Plasma

SHI Ying, LI Gang, AN Xing, XU Lin - wei

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

Abstract: In this paper, the stealth characteristics of the coated missile are studied. Through analyzing the relationship between Debye equation of and filed variable in time - domain, the shifting operator is applied to deriving the formulas of finite - difference time domain for dispersive medium, and the Maxwell's equations are modified to make the FDTD expression independent of the dispersive medium. The frequency - dependent expressions of FDTD in the dispersive medium are given. The comparison of the simulating results of this method to the results of literatures shows that the method adopted in this paper is effective in calculating the scattering characteristics of dispersive medium and that plasma plays a distinct role in decreasing RCS. The simulation results of missile coated with plasma are given. The effect of parameters selecting on stealthy characteristics is analyzed.

Key words: plasma; dispersive medium; FDTD; stealthy targets

(上接第 47 页)

[10] 阳琳赟,王文渊. 聚类融合方法综述[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(12): 8 - 10.

YANG Linyun, WANG Wenyuan. Clustering Ensemble Approaches: An Overview[J]. Application Research of Computers, 2005, 22(12): 8 - 10. (in Chinese)

(编辑:田新华)

A Novel Clustering Algorithm Based on Electrostatic Field Concepts

LI Xiao - xi¹, XIN Yong - ping¹, CHEN Jiang - ping¹, ZHANG Ming - xue²

(1 Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2 Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In this paper, a new method is presented for finding data clusters centroids. This method is proposed based on the concept of electrostatic field in which the centroids are positioned at locations where an electrostatic equilibrium or balance can be achieved. After determining the centroids locations, criteria such as the minimum distance to centroid can be used for clustering data points. The performance of the proposed method is compared with that of the k - means algorithm through simulation experiments. The experimental results show that the proposed algorithm does not suffer from the problems associated with k - means, such as sensitivity to noise and initial selection of centroids, and tendency to converge to poor local optimum.

Key words: electrostatic field; electrostatic equilibrium; k - means algorithm; clusters centroids