

等离子体覆盖立方散射体目标雷达散射截面的时域有限差分法分析*

刘少斌¹⁾²⁾ 张光甫¹⁾ 袁乃昌¹⁾

¹⁾ 国防科技大学电子科学与工程学院,长沙 410073)

²⁾ 南昌大学物理系,南昌 330047)

(2003 年 6 月 30 日收到,2003 年 8 月 18 日收到修改稿)

采用分段线性电流密度递归卷积时域有限差分(PLJERC-FDTD)算法计算了均匀非磁化等离子体覆盖三维立方体目标的散射特性.分析了等离子体厚度、密度和碰撞频率对雷达散射截面(RCS)的影响.计算结果表明,等离子体包层能有效地减小雷达目标的 RCS,当等离子体频率比入射电磁波频率小得多时,主要靠增大等离子体的厚度使立方散射体目标的 RCS 值减小,增大等离子体碰撞频率对立方散射体目标的 RCS 值影响不大;当等离子体频率约为入射电磁波频率的一半时,增大等离子体厚度和碰撞频率都对立方散射体目标的 RCS 值减小有影响;当等离子体频率接近电磁波频率时,等离子体的厚度和碰撞频率对立方散射体目标的 RCS 值影响都不大.

关键词: FDTD 算法, 电磁波, 等离子体隐身, 雷达散射截面

PACC: 5225, 5240, 5265

1. 引言

等离子体隐身技术是一种新概念、新原理的隐身技术.同时也是一门新兴的交叉学科,涉及到等离子体物理学、磁流体力学、电子学、材料学、电磁场理论、现代雷达等多门学科^[1-14].近几年,由于等离子体隐身技术在军事领域的应用前景,而使其成为国内外广泛关注的一个研究课题.

等离子体隐身技术的机理很多,常见的有两种.一是通过非均匀等离子体对入射电磁波的折射使电磁波传播轨迹发生弯曲,雷达回波偏离对方雷达的接收方向,使目标难以被对方雷达发现,从而达到隐身的目的.二是等离子体能以电磁波反射体的形式对雷达进行电子干扰,同时对入射到等离子体内部的电磁波通过碰撞吸收其大部分的能量.等离子体具有高滤波器的性质,当雷达频率低于等离子体频率时,雷达波不能在等离子体中传播,雷达波将被完全反射,等离子体以电磁波反射体的形式向对方雷达实施电子干扰^[1].此外,等离子体中带电粒子在漂移过程中必然会遇到各种形式的碰撞,当频率大于等离子体频率的电磁波入射到等离子体内部时,

等离子体通过碰撞吸收大部分入射波的能量.其作用机理是:电磁波的电场对自由电子做功,把一部分能量传给电子,而自身能量被衰减,电子再通过与其他粒子的有效碰撞,把能量转化为无规则运动的能量,并按自由度均分.

文献 1 对等离子体隐身的可行性进行了分析,对我国开展等离子体隐身研究的意义和当前要解决的问题进行了陈述.在文献 2,3 中,作者对等离子体隐身进行了试验研究,并用 WKB 理论方法对等离子体隐身的试验结果进行了比较,结果基本相符.其实验表明,应用等离子体隐身技术,可使一个直径 7 cm、高 18 cm 的陶瓷罩内(充满气体发电产生的等离子体)的微波反射器的雷达散射截面(RCS)在 4—14 GHz 范围内降低 20—25 dB.该试验也证明了电磁波进入等离子体球造成的衰减高达 100 dB.1996 年的美国国防报告显示,等离子体隐身技术的研究已由非磁化等离子体深入到磁化等离子体^[4].1998 年,美国的等离子体隐身技术已进入实用阶段,美国海军委托田纳西大学等研究单位开发出了等离子体隐身天线^[5,6].文献 7 分析了不均匀非磁化等离子体球的折射隐身机制,用费马原理和变分法给出了不同折射率时等离子体球中电波轨迹.文献 8,9 用分

* 国家高技术研究发展计划(批准号 2002AA731181)和国防科技重点实验室基金(批准号 51483010301KG0102)资助的课题.

段线性递归卷积(PLRC)时域有限差分(FDTD)方法分别计算了一维和二维情况下非磁化等离子体对电磁波的吸收.文献[13]分析了时变等离子体的碰撞隐身机制.文献[10,11,14]给出了各向异性磁等离子体对电磁波的吸收.

由于FDTD较为简单、适应性强、易于实现,用这种方法对等离子体隐身技术进行电磁仿真也是人们研究的热点之一[8,9,13,14].最近,文献[12]给出了一种新的具有较高计算精度和计算效率的色散介质FDTD算法,称之为PLJERC-FDTD算法.本文将采用该算法对三维目标的等离子体隐身进行仿真.

本文对三维目标的RCS进行了研究.将色散介质PLJERC-FDTD算法与等离子体隐身计算相结合,计算了立方散射体的RCS,给出了不同等离子体密度、不同碰撞频率和不同等离子体厚度对目标RCS的影响.数值结果表明,适当选取等离子体参数,可以使等离子体包层能有效地减小目标的雷达回波.同时指出双站RCS的大小与等离子体厚度、密度和碰撞频率等有关.

2. PLJERC-FDTD 算法

在碰撞冷等离子体中,Maxwell方程组和相关的联立方程为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} + \nu \mathbf{J} = \varepsilon_0 \omega_p^2 \mathbf{E}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{E} 是电场强度, \mathbf{H} 是磁场强度, \mathbf{J} 是极化电流密度, ε_0 和 μ_0 分别为真空中的介电常数和磁导率, ν 是等离子体碰撞频率, ω_p 是等离子体角频率.

将方程(3)变换到频域可得

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(\omega) &= \varepsilon_0 \frac{\omega_p^2}{j\omega + \nu} \mathbf{E}(\omega) \\ &= \alpha(\omega) \mathbf{E}(\omega), \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\alpha(\omega) = \varepsilon_0 \frac{\omega_p^2}{j\omega + \nu}$$

为频域电导率.对方程(4)取逆Fourier变换,变换到时域可得

$$\mathbf{J}(t) = \int_0^t \mathbf{E}(t-\tau) \alpha(\tau) d\tau, \quad (5)$$

式中

$$\alpha(\tau) = \varepsilon_0 \omega_p^2 \exp(-\nu\tau) U(\tau)$$

为时域电导率,其中 $U(\tau)$ 为单位阶跃函数.

采用Yee氏方法,并使用如下分段线性近似:

$$\begin{aligned} E_i(n\Delta t - \tau) &= E_i^{n-m} + \frac{E_i^{n-m-1} - E_i^{n-m}}{\Delta t} \\ &\quad \times (\tau - m\Delta t). \end{aligned} \quad (6)$$

这里, $i = x, y, z$.将(6)式代入(5)式,可得 n 时间步的电流密度为

$$J_i^n = \sum_{m=0}^{n-1} [E_i^{n-m} \sigma^m + (E_i^{n-m-1} - E_i^{n-m}) \xi^m], \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} \sigma^m &= \int_{m\Delta t}^{(m+1)\Delta t} \alpha(\tau) d\tau \\ &= \frac{\varepsilon_0 \omega_p^2}{\nu} [1 - \exp(-\nu\Delta t)] \exp(-m\nu\Delta t), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \xi^m &= \frac{1}{\Delta t} \int_{m\Delta t}^{(m+1)\Delta t} (\tau - m\Delta t) \alpha(\tau) d\tau \\ &= \frac{\varepsilon_0 \omega_p^2}{\nu^2 \Delta t} [1 - (1 + \nu\Delta t) \\ &\quad \times \exp(-\nu\Delta t)] \exp(-m\nu\Delta t). \end{aligned} \quad (9)$$

由(8)(9)式,我们注意到

$$\sigma^m = \exp(-\nu\Delta t) \sigma^{m-1}, \quad (10)$$

$$\xi^m = \exp(-\nu\Delta t) \xi^{m-1}. \quad (11)$$

定义如下的递归卷积:

$$\begin{aligned} \Psi_i^n &= \sum_{m=0}^{n-1} [E_i^{n-m} (\sigma^m + \sigma^{m+1}) \\ &\quad + (E_i^{n-m-1} - E_i^{n-m}) (\xi^m + \xi^{m+1})]. \end{aligned} \quad (12)$$

将(7)式代入(1)式并化简得三维非磁化等离子体PLJERC-FDTD算法的电场和卷积的迭代方程为

$$\begin{aligned} E_i^{n+1} &= \frac{1}{1 + \frac{\Delta t}{2\varepsilon_0} (\sigma^0 - \xi^0)} [(1 - \frac{\Delta t}{2\varepsilon_0} \xi^0) E_i^n \\ &\quad + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0} (\nabla \times \mathbf{H})_i^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{2\varepsilon_0} \Psi_i^n], \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Psi_i^n &= (\sigma^0 + \sigma^1 - \xi^0 - \xi^1) E_i^n \\ &\quad + (\xi^0 + \xi^1) E_i^{n-1} + \exp(-\nu\Delta t) \Psi_i^{n-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

磁场的迭代公式与常规的FDTD公式相同.

3. 等离子体覆盖立方散射体的RCS

下面,我们以双基地雷达为例,分析均匀等离子体覆盖立方体目标的双站散射特性.

为了便于与已有的文献比较,取立方散射体的尺寸和入射波的设置条件与文献[15]一致(参见文

觚 15]图 5). 计算空间为 $60 \times 60 \times 60$, 立方体为 $20 \times 20 \times 20$, 置于计算空间的中心, 边界设置 5 个网格的完全匹配层(PML)吸收边界^[16]. 并使用 Kirchhoff 近远场变换技术^[17].

入射平面波为

$$E^{\text{int}} = \sin(2\pi f t). \quad (15)$$

我们取入射电磁波的频率 $f = 2 \text{ GHz}$. 立方体的边长 $s = 20\Delta$, Δ 为均匀网格长度; 入射电磁波波数 k_0 和边长 s 满足 $k_0 s = 2$.

考虑到等离子体的高通滤波器特性, 等离子体频率取值应小于入射电磁波的频率, 以保证入射电磁波能进入等离子体内部. 在低空大气中能实现的电子密度一般为 $10^{16} \sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$ (等离子体频率 ν_p 对

应为 $0.9 \sim 9 \text{ GHz}$). 对应的冷等离子体的有效电子碰撞频率为^[18]

$$\nu = 2.3 \times 10^{-14} \omega_p^2 T, \quad (16)$$

式中 ω_p 为等离子体角频率, 单位为 rad/s , T 为等离子体温度. 常温下等离子体碰撞频率的数量级约为 $0.3 \sim 30 \text{ GHz}$ (取等离子体温度为 300 K). 为便于下一步进行实验测量研究, 我们分别对三个较小的等离子体频率进行了仿真, 这三个等离子体频率分别为 0.5 , 1.0 和 1.8 GHz . 同时, 为了给出等离子体厚度和碰撞频率对 RCS 的影响, 我们也分别对不同厚度(等离子体分别占据 1, 3, 5 个网格), 不同碰撞频率(3 和 10 GHz)等离子体覆盖的立方散射体进行了仿真. 结果如图 1—图 3 所示.

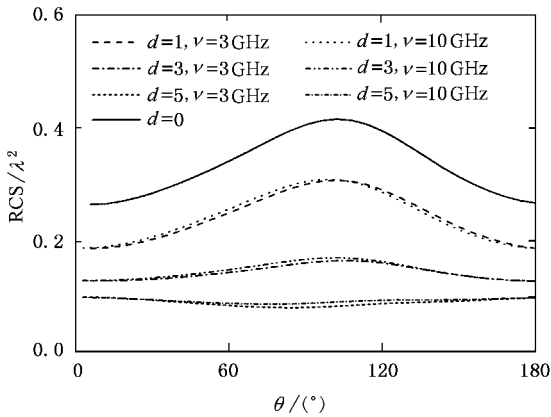


图 1 均匀等离子体覆盖立方散射体的双站散射特性 等离子体频率为 0.5 GHz

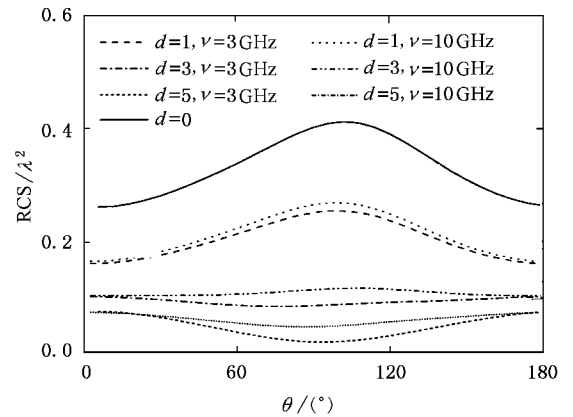


图 2 均匀等离子体覆盖立方散射体的双站散射特性 等离子体频率为 1.0 GHz

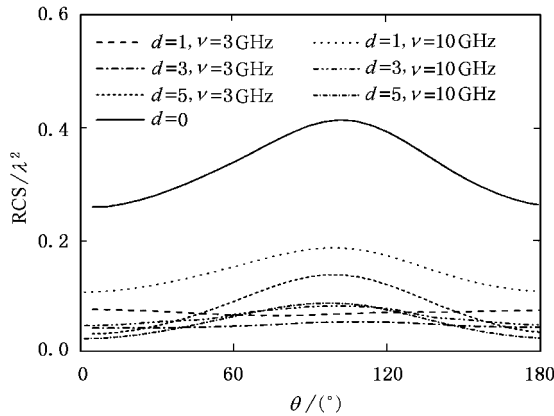


图 3 均匀等离子体覆盖立方散射体的双站散射特性 等离子体频率为 1.8 GHz

图 1、图 2 和图 3 分别给出等离子体频率为 0.5 , 1.0 和 1.8 GHz 时, 均匀等离子体覆盖立方散射体的双站散射特性. 图中 $d = 0$ 的曲线表示无等离子体覆盖时目标的 RCS, 与文献[15]的图 8 基本

相同.

从图 1—图 3 可以发现, 一定碰撞频率、一定密度的等离子体包层能有效地减小立方散射体目标的 RCS.

图 1 显示,当等离子体密度较低时(等离子体频率为 0.5 GHz),立方散射体目标的 RCS 与等离子体的厚度有较大的关系.等离子体越厚,立方散射体目标的 RCS 越小.而等离子体碰撞频率的大小对立方散射体目标 RCS 的影响不大.总而言之,立方散射体目标的 RCS 随着等离子体密度增大而减小.这与已有的结论是相符的.

从图 2 可以看出,与等离子体密度较低时不同,此时,等离子体碰撞频率和等离子体厚度都对立方散射体目标的 RCS 有影响.增大等离子体碰撞频率将有利于目标的 RCS 缩减.这一点可从等离子体碰撞吸收的机理得到解释.

图 3 显示,当等离子体密度和碰撞频率均较大时,立方散射体目标的 RCS 值相对最小.此时,等离子体的厚度对目标 RCS 的影响越来越小.有些 RCS 曲线出现交叉.在 $\theta = 90^\circ$ 的方向上,等离子体较厚时再次出现 RCS 峰值.此时,等离子体厚度和碰撞频率对 RCS 的影响(相对于图 1、图 2 而言)不大.

从图 1—图 3 我们可以得到以下结论:当等离子体的密度较小(等离子体频率比入射电磁波频率低得多)时,主要靠增大等离子体的厚度使立方散射体目标的 RCS 值减小,增大等离子体碰撞频率对立方散射体目标的 RCS 值影响不大.当等离子体密度居中(等离子体频率约为入射电磁波频率的一半)时,增大等离子体厚度和碰撞频率都对立方散射体目标的 RCS 值减小有影响.当等离子体的密度较大(等离子体频率接近电磁波频率)时,由于等离子体的共振吸收,入射电磁波被强烈衰减,此时,等离子

体的厚度和碰撞频率对立方散射体目标的 RCS 值影响都不大.

此外, FDTD 仿真时我们还发现,当等离子体频率大于入射电磁波的频率时,等离子体覆盖的立方散射体目标的 RCS 远大于无覆盖时的 RCS,而且随着等离子体厚度的增加 RCS 也越大.这是因为等离子体的高通性质使电磁波不能进入等离子体的内部,而被完全反射.但值得指出的是,这里的雷达回波是被等离子体反射,而不是被目标所反射,因此回波并不包含目标表面的信息,使目标不能被识别.这也是文献 [1] 所描述的假目标的概念.

4. 结 论

本文对三维目标的 RCS 进行了研究.

采用了较高精度和计算效率的 PLJERC-FDTD 算法计算了均匀非磁化等离子体覆盖三维立方体目标的双站散射特性.分析了等离子体厚度、密度和碰撞频率对 RCS 的影响.计算结果表明:等离子体包层能有效地减小雷达目标的 RCS.同时我们发现:当等离子体频率比入射电磁波频率低得多时,主要靠增大等离子体的厚度使立方散射体目标的 RCS 值减小.增大等离子体碰撞频率对立方散射体目标的 RCS 值影响不大.当等离子体频率约为入射电磁波频率的一半时,增大等离子体厚度和碰撞频率都对立方散射体目标的 RCS 值的减小有影响.当等离子体频率接近电磁波频率时,等离子体的厚度和碰撞频率对立方散射体目标的 RCS 值影响都不大.

- [1] Lin Y S 2000 *J. Air Force Engin. Univ.* **1** [in Chinese] 凌永顺 2000 空军工程大学学报 **1** [1]
- [2] Vidmar R J 1988 *Annual Report AFOSR Contract No. F49620-85-K-0013*
- [3] Gregoire D J, Santoru J, Schumacher R W 1992 *AD A250710*
- [4] Roth J R 1996 *AD A285496*
- [5] Kang W L, Rader M, Alexeff I 1996 *Proceedings of the 1996 IEEE Int. Conference on Plasma Sci. (Piscataway IEEE)* p261
- [6] Alexeff I, Kang W L, Rader M *et al* 1998 *Proceedings of the 1998 IEEE Int. Conference on Plasma Sci. (Piscataway IEEE)* p277
- [7] Liu S B, Mo J J, Yuan N C 2002 *Chin. J. Radio Sci.* **17** 134 (in Chinese) [刘少斌、莫锦军、袁乃昌 2002 电波科学学报 **17** 134]
- [8] Mo J J, Liu S B, Yuan N C 2002 *Chin. J. Radio Sci.* **17** 69 (in Chinese) [莫锦军、刘少斌、袁乃昌 2002 电波科学学报 **17** 69]
- [9] Mo J J, Liu S B, Yuan N C 2003 *J. Microw.* **19** 20 (in Chinese)

- [莫锦军、刘少斌、袁乃昌 2003 微波学报 **19** 20]
- [10] Liu S B, Mo J J, Yuan N C 2002 *Chin. J. Radio Sci.* **17** 258 (in Chinese) [刘少斌、莫锦军、袁乃昌 2002 电波科学学报 **17** 258]
- [11] Liu S B, Mo J J, Yuan N C 2003 *Acta Elect. Sin.* **31** 372 (in Chinese) [刘少斌、莫锦军、袁乃昌 2003 电子学报 **31** 372]
- [12] Liu S B, Yuan N C, Mo J J 2003 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **13** 187
- [13] Liu S B, Mo J J, Yuan N C 2002 *Int. J. Inf. MM Waves* **23** 1179
- [14] Liu S B, Mo J J, Yuan N C 2002 *Int. J. Inf. MM Waves* **23** 1803
- [15] Taflove A 1983 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **EMC-25** 433
- [16] Berenger J P 1994 *J. Comput. Phys.* **114** 185
- [17] Omar M R 1997 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **45** 753
- [18] Raizer U P 1987 *Physics of Gas Discharge* (in Russian) (Moscow: Nauka) p595

Finite-difference time-domain analysis on radar cross section of conducting cube scatterer covered with plasmas^{*}

Liu Shao-Bin^{1,2)} Zhang Guang-Fu¹⁾ Yuan Nai-Chang¹⁾

¹⁾ *School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*

²⁾ *Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330047, China*

(Received 30 June 2003 ; revised manuscript received 18 August 2003)

Abstract

A PLJERC-FDTD algorithm is applied to the study of the scattering of perfectly conducting cube covered with homogeneous isotropic plasmas. The effects of plasma thickness, density and collision frequency on the radar cross section (RCS) of the conducting cube scatterer have been obtained. The results illustrate that the plasma cloaking can greatly reduce the RCS of radar targets, and the RCS of the perfectly conducting cube scatterer decreases with increasing plasma thickness when the plasma frequency is greatly less than the electromagnetic (EM) wave frequency; the RCS of the perfectly conducting cube scatterer decreases with increasing plasma thickness and plasma collision frequency when the plasma frequency is almost half as much as the EM wave frequency; the effects of plasma thickness and collision frequency on the RCS of the perfectly conducting cube scatterer is small when the plasma frequency is close to the EM wave frequency.

Keywords : FDTD methods, electromagnetic waves, plasma stealth, radar cross section

PACC : 5225, 5240, 5265

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2002AA731181) and the Key Laboratory Foundation of National Defense Science and Technology of China (Grant No. 51483010301KG0102).