

等离子体覆盖金属目标的电磁散射特性

王卫民<sup>1</sup>, 张艺瀚<sup>2</sup>, 贾敏<sup>1</sup>, 宋慧敏<sup>1</sup>, 苒磊<sup>1</sup>, 吴云<sup>1</sup>  
(1. 空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 西安 710038;  
2. 空军工程大学航空航天工程学院二部, 西安 710038)

**摘 要:** 研究复杂等离子体目标电磁散射特性, 需要采用高效的数值计算方法。为此, 提出了一种分段线性递归卷积时域有限差分(PLRC-FDTD)算法及其在 MPI+openMP 并行计算模型中的高效实现方法, 对不同等离子体参数和入射电磁波参数条件下等离子体覆盖金属目标的电磁散射特性进行了仿真计算。结果表明: 当等离子体频率与入射波频率相近时, 共振吸收占主导, 反射率最低; 等离子体层越厚, 对电磁波的吸收越明显; 对于特定参数的入射电磁波, 可通过改变等离子体参数的方法来实现对电磁波的有效吸收, 从而实现目标的主动隐身。  
**关键词:** PLRC-FDTD 算法; MPI+openMP 并行计算模型; 电磁散射特性; 反射率; 等离子体隐身; 共振吸收

Electromagnetic Scattering Characteristics of Plasma-covered Metallic Targets

WANG Weimin<sup>1</sup>, ZHANG Yihan<sup>2</sup>, JIA Min<sup>1</sup>, SONG Huimin<sup>1</sup>, CHANG Lei<sup>1</sup>, WU Yun<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2. 2nd Department, Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** An efficient calculation method is required in studying the electromagnetic scattering characteristics of complex plasma objects. Hence, we adopted the PLRC-FDTD algorithm and its application in a parallel computing model based on MPI and openMP to calculate the electromagnetic scattering characteristics of a plasma-covered metal under the conditions of various plasma features and incident electromagnetic (EM) waves. The simulation results show that when the frequency of incident EM wave is close to the plasma's frequency, the plasma's reflectivity is the lowest and resonance absorption is the main mechanism of EM absorption. Moreover, the EM absorption gets stronger with thickening plasma layer. For the incident wave with specific parameters, it is possible to control the absorption of EM wave by changing the plasma parameters so as to realize the active stealth of certain targets.  
**Key words:** PLRC-FDTD algorithm; parallel computing model based on MPI and openMP; electromagnetic scattering characteristics; reflectivity; plasma stealth; resonance absorption

0 引言

等离子体作为物质的第 4 态, 主要由电子、离子和中性分子组成, 它与电磁波之间会产生折射、反射、吸收等一系列相互作用<sup>[1]</sup>。研究等离子体与电磁波相互作用的机理是分析等离子体隐身原理<sup>[2]</sup>、飞行器再入“黑障”现象<sup>[3]</sup>、高功率微波传输<sup>[4]</sup>等问题的基础, 目前主要采用数值计算与实验测试 2 种方法开展研究。在研究等离子体与电磁波相互作用的数值方法中, 时域有限差分(FDTD)算法<sup>[5-6]</sup>是使用最广泛、也最成熟的数值方法。对于复杂等离子体目标的电磁散射特性的数值计算<sup>[7]</sup>, 其运算

量和内存占用量非常大, 因此, 研究高效的 FDTD 算法并采用并行计算模型具有重要的现实意义, 这仍然是目前的研究热点。

消息传递接口(MPI)是集群计算中广为流行的编程平台<sup>[8]</sup>, 也是目前最重要的并行编程工具, 它具有移植性好、功能强大、效率高等多种优点, 几乎所有的并行计算机厂商都提供对它的支持, 这是其他所有的并行编程环境都无法比拟的。但是在很多情况下, 采用纯的 MPI 消息传递编程模式并不能在这种多处理器构成的集群上取得理想的性能。为了结合分布式内存结构和共享式内存结构这 2 者的优势, 人们提出了分布式/共享式内存层次结构<sup>[8]</sup>。openMP 是共享存储编程的实际工业标准, 分布式/共享式内存层次结构用 MPI+openMP 实现, 应用更为广泛。MPI+openMP 这种混合编程模式提供结点

基金资助项目: 中国博士后科学基金(20110491498; 2012T50880)。  
Project supported by China Postdoctoral Science Foundation (20110491498, 2012T50880).

内和结点间的两级并行, 能充分利用共享存储模型和消息传递模型的优点, 有效地改善系统的性能。

为了深入研究复杂等离子体目标的电磁散射特性, 本文提出一种分段线性递归卷积时域有限差分(PLRC-FDTD)算法<sup>[9]</sup>在 MPI+openMP 混合编程模式中的并行编程方法, 实现较低内存占用和较高计算精度的 PLRC-FDTD 算法与结点内和结点间两级并行的 MPI+openMP 混合编程模式之间的有机结合, 大大提升算法的计算效率。从国内外来看, 虽然文献 [10-16] 对不同应用背景下的 PLRC-FDTD 算法开展了较为深入的研究, 但基于 MPI+openMP 混合编程模式的 PLRC-FDTD 算法并行实现方法的相关文献较少, 因此本文提出的并行算法对于研究复杂等离子体目标的电磁散射特性仍具有一定实用性与创新性。

1 PLRC-FDTD 算法

等离子体是一种色散型介质, 在数值计算时应采用适合于色散型介质的 FDTD 算法<sup>[17]</sup>, 如递归卷积(RC)法<sup>[18]</sup>、辅助方程(ADE)法<sup>[19]</sup>、Z 变换法<sup>[20]</sup>、电流密度卷积(JEC)法<sup>[21]</sup>、Young 氏直接积分法<sup>[22]</sup>、分段线性递归卷积(PLRC)法等。在这些算法中, PLRC 算法具有较低的内存占用和较高的计算精度。它的基本思想是假定离散卷积积分在每一时间步长  $\Delta t$  内电场强度与磁场强度是线性变化的。

PLRC-FDTD 算法的 3 维计算坐标如图 1 所示。对于非磁化等离子体, 其频域复介电常数为

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0(1 + \frac{\omega_p^2}{\omega(j\nu - \omega)}) \triangleq \varepsilon_0(1 + \chi(\omega)) \tag{1}$$

式中:  $\omega_p$  为等离子体角频率;  $\omega$  为入射波角频率;  $\nu$  为电子碰撞角频率;  $\varepsilon_0$  为真空介电常数;  $\chi(\omega)$  为电极化率;  $j$  为虚数单位。下面介绍非磁化等离子体的 3 维 PLRC-FDTD 算法的迭代方法。

1) 初始化计算式为:

$$\varepsilon_\infty(i, j, k) = 1 \tag{2}$$

$$\chi_0(i, j, k) = \omega_p^2 \Delta t / \nu - (\omega_p / \nu)^2 (1 - \exp(-\nu \Delta t)) \tag{3}$$

$$\Delta \chi_0(i, j, k) = -(\omega_p / \nu)^2 (1 - \exp(-\nu \Delta t))^2 \tag{4}$$

$$\xi_0(i, j, k) = \omega_p^2 \Delta t / 2\nu + \omega_p^2 (1 - (1 + \nu \Delta t) \cdot \exp(-\nu \Delta t)) / (\nu^3 \Delta t) \tag{5}$$

$$\Delta \xi_0(i, j, k) = \omega_p^2 (1 - (1 + \nu \Delta t) \exp(-\nu \Delta t)) \cdot (1 - \exp(-\nu \Delta t)) / (\nu^3 \Delta t) \tag{6}$$

2) x 轴方向上的迭代计算式为:

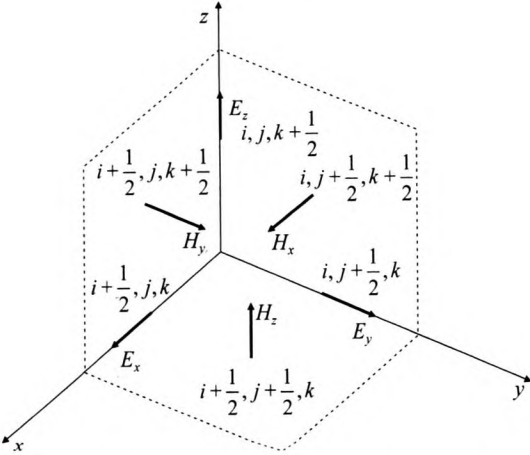


图 1 PLRC-FDTD 算法的 3 维计算坐标

Fig.1 3D computational coordinate for PLRC-FDTD algorithm

$$\psi_x^n(i, j, k) = (\Delta \chi_0(i, j, k) - \Delta \xi_0(i, j, k)) E_x|_{i+1/2, j, k}^n + E_x|_{i+1/2, j, k}^{n-1} \Delta \xi_0(i, j, k) + \psi_x^{n-1}(i, j, k) \exp(-\nu \Delta t) \tag{7}$$

$$E_x|_{i+1/2, j, k}^{n+1} = (\frac{\varepsilon_\infty(i, j, k) - \xi_0(i, j, k)}{\varepsilon_\infty(i, j, k) + \chi_0(i, j, k) - \xi_0(i, j, k)}) \cdot E_x|_{i+1/2, j, k}^n + \frac{1}{\varepsilon_\infty(i, j, k) + \chi_0(i, j, k) - \xi_0(i, j, k)} \cdot (\psi_x^n(i, j, k)) + \frac{1}{\varepsilon_0(\varepsilon_\infty(i, j, k) + \chi_0(i, j, k) - \xi_0(i, j, k))} \cdot (\frac{H_z|_{i+1/2, j+1/2, k}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2, j-1/2, k}^{n+1/2}}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i+1/2, j, k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i+1/2, j, k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z}) \tag{8}$$

式中:  $\varepsilon_\infty$  为  $\omega \rightarrow \infty$  时的相对介电常数;  $\psi^n$  为递归卷积项;  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  分别为 x、y、z 轴方向上的步长;  $E_x$  为 x 轴方向上的电场强度分量;  $H_y$ 、 $H_z$  分别为 y、z 轴方向上的磁场强度分量;  $\chi_0$ 、 $\Delta \chi_0$  皆为中间变量;  $\xi_0$ 、 $\Delta \xi_0$  皆为迭代过程中的系数;  $i$ 、 $j$ 、 $k$  分别为网格在 x、y、z 轴方向上的序号。

y 轴方向和 z 轴方向上的迭代计算式依此类推。磁场方程与传统的 FDTD 算法相同。

2 PLRC-FDTD 算法的 MPI+openMP 并行实现

对于空间电磁场数值计算的 FDTD 算法, 求解空间某一点处的电场(或磁场)值时, 只需知道该点上一时刻的电场(或磁场)值及其相邻网格点上的磁场(或电场)值, 以及该点的电磁参数, 而与其他时刻和位置的场值无关, 这种局域性对于并行计算是非常有利的。因此, 可以将计算区域分割成若干的

子区域，分配给每个计算节点来进行独立的计算，只需在每步的计算过程中交换子区域边界面上的场值，而在每个子区域的内部通过自身迭代就可完成计算。每个子区域在计算节点内部的迭代计算过程和串行 FDTD 的原理是一样的，并行 FDTD 主要解决的问题是子区域分界面上，即各个计算节点间的数据传递问题，这将直接影响到并行 FDTD 计算的正确性和效率。目前比较常用的是消息传递、共享地址空间和数据并行编程模式。本文将采用 MPI 消息传递模式和 openMP 共享地址空间模式来实现并行 FDTD，以实现等离子体目标的电磁散射计算。

基于 MPI+openMP 并行计算模型的 PLRC-FDTD 算法单个节点上的流程图如图 2 所示。首先进行 MPI 和 openMP 的初始化，然后进行 FDTD 算法的初始化，包括时间空间步长、计算空间参数及并行计算区域划分、激励源参数、吸收边界参数、内存分配等，再读取计算网格及材料参数，然后开始 FDTD 算法的迭代，依次计算电场强度与磁场强度，每个电场强度或磁场强度分量计算结束后各个节点之间交换子空间边界上的电磁场数据；各个节点在计算电场强度或磁场强度分量时分成多个线程并行计算。

3 等离子体目标散射特性数值计算与结果分析

根据上面基于 MPI+openMP 并行计算模型的 PLRC-FDTD 算法，本文对金属平板表面覆盖等离子体层的电磁散射特性进行了数值计算，在不同的等离子体频率、电子碰撞频率、入射波频率、电磁波入射角度和等离子体层厚度等条件下对雷达电磁波的表面反射率进行了仿真分析。参数设置如下：采用 PLRC-FDTD 算法，入射电磁波为横向磁场(TM)波，频率为 1~18 GHz(覆盖 X、Ku、C、S、L 波段)，入射脉冲为 Gauss 脉冲，其电场强度为  $E(t) = E_m \exp(-(t - t_0)^2 / t_w^2)$ ，其中  $E_m = 100 \text{ V/m}$  为电场强度最大值， $t_0 = 4\Delta t$ ， $t_w = 60\Delta t$ ，时间步长  $\Delta t = 0.125 \text{ ps}$ ，计算空间步长即计算网格大小  $\delta = 75 \text{ }\mu\text{m}$ ，共 9 000 时间步，吸收边界采用 10 层各向异性完全匹配层(UPML)边界；计算平台采用 8 个节点，每个节点有 4 个线程。在算法设计与参数选取时首先要考虑以下问题：

1) 算法的稳定性问题。根据 FDTD 算法的 Courant-Friedrichs-Lewy 判据，可以推导出等离子

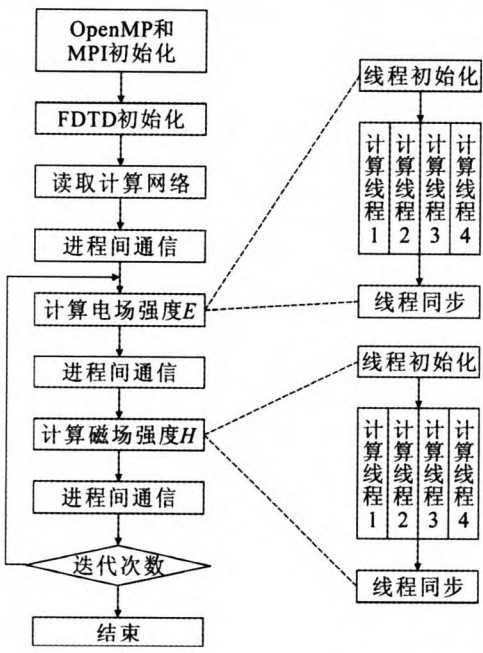


图2 基于 MPI+openMP 并行计算模型的 PLRC-FDTD 算法流程图

Fig.2 Flow diagram of PLRC-FDTD algorithm based on MPI and openMP parallel computing model

体 FDTD 算法的稳定性条件<sup>[2]</sup>

$$\sqrt{3}k_{\text{CFL}} < 1 \tag{9}$$

式中  $k_{\text{CFL}} = c\Delta t / \delta$  为 Courant-Friedrichs-Lewy 系数，其中  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  为真空中的光速。对于以上的 FDTD 参数， $\Delta t = 0.125 \text{ ps}$ ， $\delta = 75 \text{ }\mu\text{m}$ ，则  $\sqrt{3}k_{\text{CFL}} = 0.866 < 1$ ，故 FDTD 算法稳定收敛。

2) 算法的有效性验证。为了对基于 MPI+openMP 并行计算模型的 PLRC-FDTD 算法的有效性进行验证，首先将本文算法的仿真结果与文献 [18] 的解析结果进行比较，以确保算法的有效性。本文仿真对象为电磁波通过非磁化等离子体平板时的反射率，与文献 [18] 的条件相同，其中等离子体频率为 28.7 GHz，电子碰撞频率为 20 GHz，等离子体平板厚度为 1.5 cm，计算空间步长  $\delta = 75 \text{ }\mu\text{m}$ ，整个计算空间为 800 个网格，等离子体平板位于网格中间，时间步长  $\Delta t = 0.125 \text{ ps}$ ，计算进行 9 600 时间步。可以推导出解析结果的计算式<sup>[23]</sup>

$$R = \frac{(1 - n)(1 + n) + (1 + n)(n - 1)\exp(-j2\omega d n / c)}{(1 + n)^2 - (n - 1)^2 \exp(-j2\omega d n / c)} \tag{10}$$

式中： $R$  为反射率； $d$  为等离子体平板的厚度即等离子体层厚度； $n$  为等离子体的折射率，且有

$$n = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} - j \frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}} \tag{11}$$



仿真结果如图 3、图 4 所示。由图 3、图 4 可以看出: 算法仿真结果与解析结果基本符合, 算法是正确有效的。

3.1 不同厚度的等离子体对电磁波的表面反射率特性仿真

仿真条件如下: 入射波频率为 1~18 GHz, 垂直入射(即入射角度为 0°), 等离子体频率为 7 GHz, 电子碰撞频率为 12 GHz, 等离子体层厚度分别 1.5、3.0、4.5、6.0、7.5、9.0 cm。仿真结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出: 金属平板表面覆盖的等离子体层越厚, 其反射率幅值越小, 即对电磁波的吸收越多, 隐身效果也就越明显; 当入射波频率低于等离子体频率时, 增加等离子体层厚度对电磁波吸收效果的改善不明显, 此时等离子体层对电磁波的作用主要是反射, 大部分的能量都经过表面反射回来, 能被等离子体层吸收的能量很少, 因此其表面反射率较大; 当入射波频率与等离子体频率接近时, 增加等离子体层厚度对电磁波吸收效果的改善非常明显, 此时等离子体层对电磁波的作用主要表现为共振吸收, 电磁波能进入等离子体层, 而且等离子体层越厚, 对电磁波的衰减也就越大; 当入射波频率高于等离子体频率时, 增加等离子体层厚度对电磁波吸收效果的改善也较好, 但效果没有入射波频率与等离子体频率接近时明显, 此时等离子体层对电磁波的作用主要表现为进入等离子体层的电磁波与等离子体的碰撞吸收, 由于碰撞吸收的效果没有共振吸收的作用明显, 因此效果要差一些。

3.2 不同入射角度的等离子体对电磁波的表面反射率特性仿真

仿真条件如下: 入射波频率为 1~18 GHz, 等离子体频率为 7 GHz, 电子碰撞频率为 12 GHz, 等离子体层厚度为 1.5 cm。入射角度为电磁波矢量与等离子体平面法向之间的夹角, 其中垂直入射时入射角度为 0°。仿真结果如图 6 所示。入射角度越大, 等离子体覆盖的金属平板的表面反射率就越大, 隐身效果也就越不明显。这是因为入射角度越大, 等离子体对电磁波的反射就越大, 如果入射角度大于 Brewster 角就会出现全反射。

3.3 不同电子碰撞频率的等离子体对电磁波的表面反射率特性仿真

仿真条件如下: 入射波频率为 1~18 GHz, 垂直入射, 等离子体电子碰撞频率分别为 2、4、6、8、10、12、14、16 GHz, 等离子体频率为 7 GHz, 等

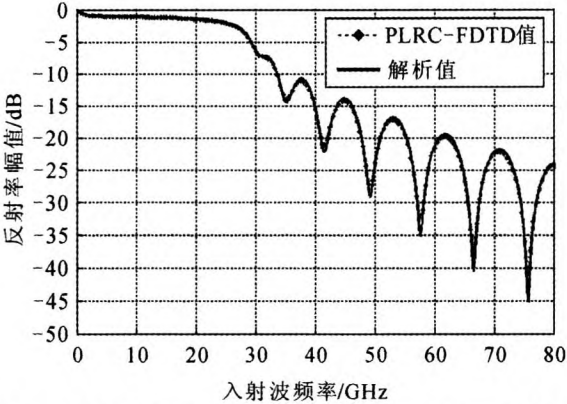


图 3 PLRC-FDTD 并行算法反射率幅值与解析值的比较

Fig.3 Comparison between numerical amplitude of reflectivity from PLRC-FDTD parallel algorithm and its analytical values

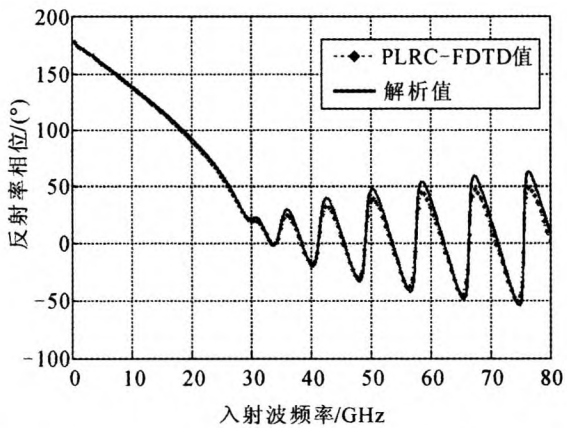


图 4 PLRC-FDTD 并行算法反射率相位与解析值的比较

Fig.4 Comparison between numerical phase of reflectivity from PLRC-FDTD parallel algorithm and its analytical values

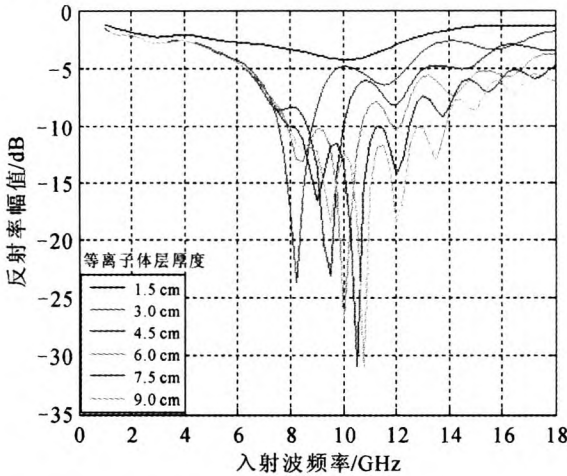


图 5 不同等离子体层厚度的反射率随入射波频率变化曲线

Fig.5 Variation curves of reflectivity vs incident wave frequency for various thickness of plasma layers

离子体层厚度为 3.0 cm。仿真结果如图 7 所示。当等离子体频率一定时, 若入射波频率远离等离子体

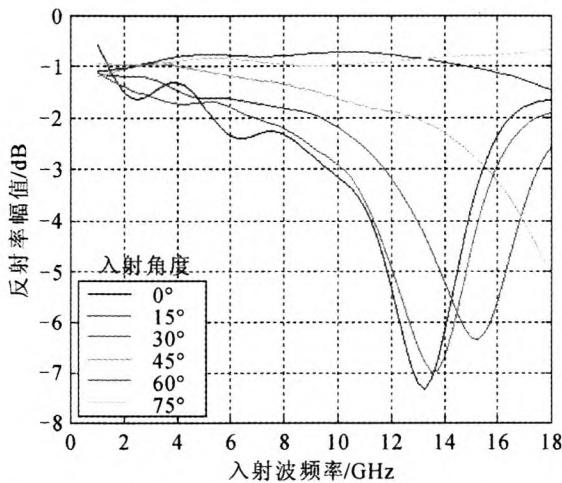


图6 不同入射角度的反射率随入射波频率变化曲线  
Fig.6 Variation curves of reflectivity vs incident wave frequency for various incident angles

频率, 则电子碰撞频率越大, 等离子体覆盖的金属平板的表面反射率就越小, 隐身效果也就越明显。当入射波频率接近等离子体频率时, 对电磁波有较大的衰减, 电子碰撞频率接近且稍高于入射波频率时衰减最大。这是因为此时电磁波与等离子体相互作用的机理是共振吸收和碰撞吸收同时相互作用, 这样对电磁波的吸收效果最好。

3.4 不同等离子体频率的等离子体对电磁波的表面反射率特性仿真

仿真条件如下: 入射波频率为 1~18 GHz, 垂直入射, 等离子体频率分别为 1、3、5、7、9、11、13、15 GHz, 电子碰撞频率为 7 GHz, 等离子体层厚度为 3.0 cm。仿真结果如图 8 所示。当等离子体电子碰撞频率一定时, 若入射波频率接近等离子体频率, 则等离子体覆盖的金属平板的表面反射率越小, 隐身效果就越明显。而且等离子体频率越大, 对电磁波衰减的峰值就越大, 同时也可以验证共振吸收的效果要优于碰撞吸收。这是因为当入射波频率接近电子碰撞频率 7 GHz 时, 碰撞吸收的作用最强, 但图 8 中曲线的谷底却随着等离子体频率的升高而逐渐右移, 这就说明了共振吸收的作用效果要强于碰撞吸收, 而且等离子体频率越高, 表面反射率的谷值就越低, 这说明等离子体频率和入射波频率越高, 共振吸收的效果就越好。

4 结论

1) 对于复杂等离子体目标散射特性的数值计算, 为了降低运算量和内存占用量的需求, 提出了

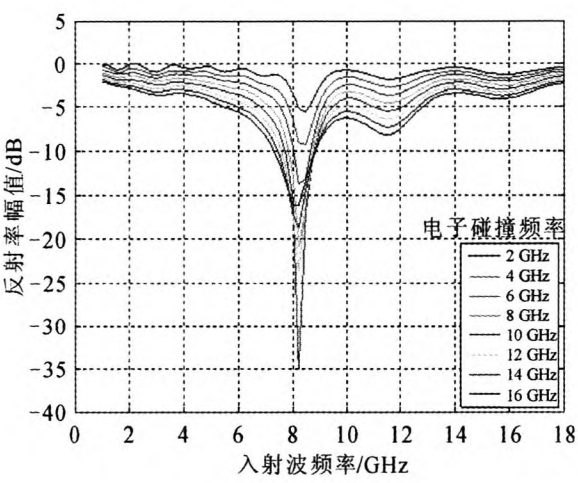


图7 不同电子碰撞频率的反射率随入射波频率变化曲线  
Fig.7 Variation curves of reflectivity vs incident wave frequency for various collision frequencies

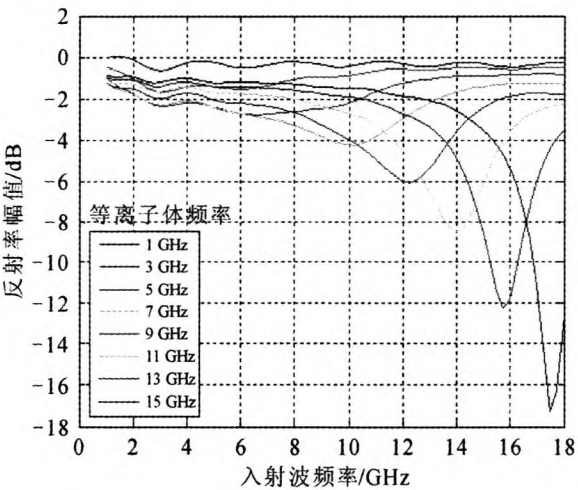


图8 不同等离子体频率的反射率随入射波频率变化曲线  
Fig.8 Variation curves of reflectivity vs incident wave frequency for various plasma frequencies

一种基于 PLRC-FDTD 算法和 MPI+openMP 并行计算模型中非常有效的解决方法, 具有高精度、高效率、低内存占用等特点, 可用于飞行器等离子体隐身、高功率微波放电等复杂等离子体目标的电磁散射特性研究。

2) 对于特定参数的入射电磁波, 可以通过主动调节覆盖目标外部的等离子体的参数, 来实现有效的共振和碰撞吸收, 从而实现对雷达的主动隐身。

3) 当等离子体频率与入射波频率相近时, 共振吸收占主导, 反射率最低; 共振吸收的效率要高于碰撞吸收的效率, 且等离子体层越厚, 对电磁波的吸收效果越好。

参考文献 References

[1] Vidmar R J. Electromagnetic-wave propagation in unmagnetized plasma: AD-A250710[R]. Virginia, USA: DTIC, 1992.

[2] 庄钊文, 袁乃昌, 刘少斌, 等. 等离子体隐身技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 44-47.

ZHUANG Zhaowen, YUAN Naichang, LIU Shaobin, *et al.* Plasma stealth technology[M]. Beijing, China: Science Press, 2005: 44-47.

[3] 袁忠才. 等离子体鞘套对飞行器再入过程信号传播特性的影响分析[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(1): 79-82.

YUAN Zhongcai. Analysis of characteristics of reentry sheath and its effects on communication[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(1): 79-82.

[4] 廖 成, 赵朋程, 林文斌, 等. 国内高功率微波大气传播研究的若干进展[J]. 微波学报, 2013, 29(5): 120-128.

LIAO Cheng, ZHAO Pengcheng, LIN Wenbin, *et al.* Recent progress on the study of high-power microwave propagation in the atmosphere in China[J]. Journal of Microwaves, 2013, 29(5): 120-128.

[5] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell equations in isotropic media[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(3): 302-307.

[6] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 3 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011: 1-10.

GE Debiao, YAN Yubo. Finite difference time domain method for electromagnetic waves[M]. 3rd ed. Xi'an, China: Xidian University Press, 2011: 1-10.

[7] 周 超, 张小宽, 赵 辉. 介质涂覆目标电磁散射特性计算与仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(10): 120-123.

ZHOU Chao, ZHANG Xiaokuan, ZHAO Hui. Calculation and simulation of electromagnetic scattering characteristics of targets coated with dielectric medium[J]. Computer Simulation, 2013, 30(10): 120-123.

[8] Smith L, Bull M. Development of mixed mode MPI/OpenMP applications[J]. Scientific Programming, 2001, 9(2): 83-98.

[9] Kelley D F, Luebbers R J. Piecewise linear recursive convolution for dispersive media using FDTD[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(6): 792-797.

[10] Liang F, Wang G, Wang R, *et al.* A novel PLRC-WCS FDTD method for dispersive materials[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2013, 27(4): 464-472.

[11] Ai X, Han Y, Li C Y, *et al.* Analysis of dispersion relation of piecewise linear recursive convolution FDTD method for space-varying plasma[J]. Progress in Electromagnetic Research Letters, 2011, 22(3): 83-93.

[12] Jung B H, Mei Z, Sarkar T K, *et al.* Analysis of transient wave propagation in an arbitrary frequency-dispersive media using the associated Laguerre functions in the FDTD-MOD method[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2012, 54(4): 925-930.

[13] Atteia G E, Hussein K F A. Realistic model of dispersive soils using PLRC-FDTD with applications to GPR systems[J]. Progress in Electromagnetic Research B, 2010, 26(8): 335-359.

[14] Sandeep S, Gasiewski A J. Electromagnetic analysis of radiometer calibration targets using dispersive 3D FDTD[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(6): 2821-2828.

[15] 吴 莹, 倪晓武, 陈建平. 用 PLRC-FDTD 法计算微波在激光等离子体中的反射和透射系数[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2010, 34(2): 257-261.

WU Ying, NI Xiaowu, CHEN Jianping. PLRC-FDTD simulation of microwave reflection and transmission coefficients in laser-induced plasma[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology:

Natural Science, 2010, 34(2): 257-261.

[16] 杨利霞, 马 辉, 施卫东, 等. 基于表面阻抗边界条件的等离子体薄涂层电磁散射的时域有限差分分析[J]. 物理学报, 2013, 62(3): 128-136.

YANG Lixia, MA Hui, SHI Weidong, *et al.* Finite difference time domain analysis on electromagnetic scattering characteristic of plasma thin layer based on surface impedance boundary condition method[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(3): 128-136.

[17] Taflove A. Computational electrodynamics: the finite difference time domain method[M]. 2nd ed. Norwood, USA: Artech House, 2000: 373-410.

[18] Luebbers R J, Hunsberger F, Kunz K S. A frequency dependent finite difference time domain formulation for transient propagation in plasma[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991, 39(1): 29-34.

[19] Gandhi O P, Gao B Q, Chen J Y. A frequency dependent finite difference time domain formulation for general dispersive media[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(4): 658-665.

[20] Sullivan D M. Frequency dependent FDTD methods using Z transforms[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1992, 40(10): 1223-1230.

[21] Chen Q, Katsurai M, Aoyagi P H. An FDTD formulation for dispersive media using a current density[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(11): 1739-1746.

[22] Young J L. Propagation in linear dispersive media: finite difference time domain methodologies[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 43(4): 422 - 426.

[23] Ginzburg V L. The propagation of electromagnetic waves in plasmas[M]. 2nd ed. Oxford, UK: Pergamon, 1970: 125-139.



WANG Weimin

Post-doctorate



ZHANG Yihan



JIA Min

王卫民  
1976—，男，博士(后)，助理研究员  
主要从事空天等离子体技术方面的研究工作  
E-mail: wangweimin76@163.com

张艺瀚  
1977—，女，硕士，讲师  
主要从事导弹制导与控制方面的研究工作  
E-mail: zhangyihan\_77@163.com

贾 敏  
1981—，女，硕士，讲师  
主要从事等离子体流动控制技术方面的研究工作  
E-mail: JiaMin@126.com

收稿日期 2014-01-06 修回日期 2014-06-30 编辑 李 东

等离子体覆盖金属目标的电磁散射特性

作者：[王卫民](#)，[张艺瀚](#)，[贾敏](#)，[宋慧敏](#)，[苒磊](#)，[吴云](#)，[WANG Weimin](#)，[ZHANG Yihan](#)，[JIA Min](#)，[SONG Huimin](#)，[CHANG Lei](#)，[WU Yun](#)

作者单位：[王卫民, 贾敏, 宋慧敏, 苒磊, 吴云, WANG Weimin, JIA Min, SONG Huimin, CHANG Lei, WU Yun\(空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 西安, 710038\)](#)，[张艺瀚, ZHANG Yihan\(空军工程大学航空航天工程学院二部, 西安, 710038\)](#)

刊名：[高电压技术](#)[ISTIC](#)[EI](#)[PKU](#)

英文刊名：[High Voltage Engineering](#)

年，卷(期)：2014, 40(7)

本文链接：[http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_gdyjs201407023.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_gdyjs201407023.aspx)