0254-6124/2011/31(5)-682–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Chen Wenbo, Li Sheng, Gong Xueyu. Calculation on radar cross section of plasma-column antenna using JEC-FDTD method. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5): 682-686

基于 JEC-FDTD 算法的等离子体天线雷达散射截面计算*

陈文波 李 圣 龚学余

(南华大学电气工程学院 衡阳 421001)

摘 要 采用电流密度卷积 FDTD 算法 (JEC-FDTD) 计算了等离子体天线的散射特性, 分析了等离子体天线处于工作状态时等离子体参数 (密度、碰撞频率) 及天线外部约束腔体对天线雷达散射截面 (RCS) 的影响. 数值结果表明, 等离子体天线的 RCS 会随等离子体密度的减小及碰撞频率的增大而减小. 而约束腔体只有在高频段时才会对等离子体天线的 RCS 值产生较大的影响. 因此, 在不影响天线性能的情况下, 可以根据信号频率调节等离子体参数、选取合适的腔体材料以达到增强等离子体天线隐身性能的目的.

关键词 等离子体天线, 电流密度卷积 FDTD 算法, 雷达散射截面

中图法分类号 V 414, TN 820

Calculation on Radar Cross Section of Plasma-column Antenna Using JEC-FDTD Method

CHEN Wenbo LI Sheng GONG Xueyu

(*Institute of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang* 421001)

Abstract The paper has founded the 2D model of plasma antenna and JE convolution Finite-Difference Time-Domain (JEC-FDTD) algorithm is applied to the study on the antenna scattering characteristics based on the model. The effects of plasma density, collision frequency and glass tube on the Radar Cross Section (RCS) of the plasma antenna were analyzed in the paper. Analysis results show that RCS of plasma antenna can greatly decrease with the collision frequency increasing and plasma density decreasing. On the other hand, when the plasma antenna work at high frequency, the glass tube also has impact on the antenna scattering characteristics. Accordingly, increase in thickness of glass tube and enlargement of permittivity of glass will make RCS of the antenna decrease. So the stealth performance of plasma antenna can be improved by choosing the suitable plasma parameter and materials of glass tube based on the work frequency.

Key words Plasma antenna, JEC-FDTD algorithms, RCS (Radar Cross Section)

---

* 国家自然科学基金项目 (10775066) 和湖南省教育基金项目 (07C643) 共同资助

2010-03-16 收到原稿, 2011-04-21 收到修定稿

E-mail: snipers2004@sohu.com

1 引言

等离子体天线是一种利用等离子体元素来取代金属传导元素的射频天线. 这种天线通常由充满低压气体的绝缘管制成, 工作时与普通金属天线一样具有辐射能力, 但在不工作时其雷达散射截面 (RCS) 比金属天线要小, 等同于玻璃管的 RCS. 因此, 等离子体天线的隐身性能良好, 具有广阔的应用前景 [1].

目前, 对于等离子体天线的研究主要集中于等离子体天线激励原理、特性等综述性方面的讨论 [1−4], 以及天线辐射方向图、辐射阻抗和增益等电参数的求解和分析 [5−10], 而对于天线散射特性, 尤其是约束腔体材料及结构对等离子体天线双站散射宽度影响的研究则很少. 等离子体天线的散射特性与天线的隐身性能关系密切. 因此, 进行这方面的研究可以为设计更好隐身性能的等离子体天线提供理论依据.

本文采用 JEC-FDTD 算法对等离子体天线的 RCS 进行了计算, 给出不同等离子体参数 (密度及碰撞频率)、不同腔体厚度及腔体介电系数对天线 RCS 的影响. 并对计算结果进行了分析.

2 基本理论公式

2.1 JEC-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 [11]:

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} + \boldsymbol{J}, \tag{1}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\mu_0 \frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t}, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{J}}{\partial t} + \nu_{\mathrm{c}} \cdot \boldsymbol{J} = \varepsilon_0 \cdot \omega_{\mathrm{pe}}^2 \cdot \boldsymbol{E}. \tag{3}$$

其中, $\boldsymbol{E}$ 为电场强度, $\boldsymbol{H}$ 为磁场强度, $\boldsymbol{J}$ 为电流密度; ν_{c} 为等离子体碰撞频率, $\omega_{\mathrm{pe}} = 2\pi f_{\mathrm{pe}}$ 为等离子体角频率, f_{pe} 为等离子体频率. 在二维 TE 波的情况下, 式 (3) 可以写为

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \boldsymbol{J}_x}{\partial t} + \nu_{\mathrm{c}} \cdot \boldsymbol{J}_x = \varepsilon_0 \cdot \omega_{\mathrm{pe}}^2 \cdot \boldsymbol{E}_x, & \text{(4a)} \\ \dfrac{\partial \boldsymbol{J}_y}{\partial t} + \nu_{\mathrm{c}} \cdot \boldsymbol{J}_y = \varepsilon_0 \cdot \omega_{\mathrm{pe}}^2 \cdot \boldsymbol{E}_y. & \text{(4b)} \end{cases}$$

由于式 (4) 中电流密度的两个分量相互耦合, 因此, 电流密度的两个分量的 FDTD 迭代方程必须同时求解. 由式 (4a), 可以得到 E 和 J 的频域时谐关系, 即

$$\boldsymbol{J}(\omega) = \varepsilon_0 \cdot \frac{\omega_{\mathrm{pe}}^2}{\nu_{\mathrm{c}} + \mathrm{j}\omega} E(\omega). \tag{5}$$

式 (5) 通过 Z 变换可得

$$\boldsymbol{J}_x(z) = \mathrm{e}^{-\nu_{\mathrm{c}}\Delta t} Z^{-1} \boldsymbol{J}_x(z) + \varepsilon_0 \omega_{\mathrm{pe}}^2 \mathrm{e}^{-\nu_{\mathrm{c}}\Delta t} \boldsymbol{J}_x(z) \Delta t. \tag{6}$$

式中, Δt 为时间步长, 将式 (6) 由 Z 域转换到时域则有

$$\boldsymbol{J}_x^{n+1/2} = \mathrm{e}^{-\nu_{\mathrm{c}}\Delta t} \boldsymbol{J}_x^{n-1/2} + \varepsilon_0 \omega_{\mathrm{pe}}^2 \mathrm{e}^{-\nu_{\mathrm{c}}\Delta t/2} \boldsymbol{E}_x^n \Delta t. \tag{7}$$

同理, 由式 (4b) 可得

$$\boldsymbol{J}_y^{n+1/2} = \mathrm{e}^{-\nu_{\mathrm{c}}\Delta t} \boldsymbol{J}_y^{n-1/2} + \varepsilon_0 \omega_{\mathrm{pe}}^2 \mathrm{e}^{-\nu \mathrm{c}\Delta t/2} \boldsymbol{E}_y^n \Delta t. \tag{8}$$

然后取电场的值位于整数时间步, 磁场和电流密度位于半个时间步, 分别对式 (1) 和式 (2) 进行离散可得

$$\begin{aligned} \boldsymbol{E}_x|_{i+1/2,j}^{n+1} =& \boldsymbol{E}_x|_{i+1/2,j}^{n} + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \Delta y} \cdot \\ & \left(\boldsymbol{H}_z|_{i+1,j}^{n+1/2} - \boldsymbol{H}_z|_{i,j}^{n-1/2}\right) - \\ & \frac{\Delta t}{\varepsilon_0} \boldsymbol{J}_x|_{i+1/2,j}^{n+1/2}, \end{aligned} \tag{9a}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{E}_y|_{i,j-1/2}^{n+1} =& \boldsymbol{E}_y|_{i,j-1/2}^{n} + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \Delta y} \cdot \\ & \left(\boldsymbol{H}_z|_{i,j}^{n+1/2} - \boldsymbol{H}_z|_{i,j-1}^{n-1/2}\right) - \\ & \frac{\Delta t}{\varepsilon_0} \boldsymbol{J}_y|_{i,j-1/2}^{n+1/2}, \end{aligned} \tag{9b}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{H}_z|_{i,j}^{n+1/2} =& \boldsymbol{H}_z|_{i,j}^{n-1/2} + \\ & \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta y} \left(\boldsymbol{E}_x|_{i+1/2,j}^{n} - \boldsymbol{E}_x|_{i-1/2,j}^{n}\right) - \\ & \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} \left(\boldsymbol{E}_y|_{i,j+1/2}^{n} - \boldsymbol{E}_y|_{i,j-1/2}^{n}\right). \end{aligned} \tag{10}$$

由式 (5)∼(10) 可以计算等离子体内部的空间电磁场分量. 而对于等离子体外部的约束腔体及自由空间区域的电磁场计算, 则只需将式 (9) 中的电流密度分量 $\boldsymbol{J}$ 设为 0 即可.

2.2 雷达散射截面的计算公式

由上述 FDTD 方法计算得到近场后, 利用近–远场外推公式可得到天线在某一方向的远区散射电场, 设为 $E_{\mathrm{s}}(t)$. 经过傅里叶变换, 可得其对应的频域场, 即

$$E_{\mathrm{s}}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_{\mathrm{s}}(t)\ \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f t} \mathrm{d}t. \tag{11}$$

同样, 对于入射波 $E_{\rm i}(t)$ 也可以经过傅里叶变换得到其频谱 $E_{\rm i}(f)$. 这样由雷达散射截面的定义, 可得到目标在某个方向上的 RCS 随频率的变化. 对波长归一化的 RCS 为

$$\sigma_{\rm RCS}(f)=10\lg\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\left|\frac{E_{\rm s}(f)}{E_{\rm i}(f)}\right|^2\right). \tag{12}$$

其中, $\lambda=c/f$ 为真空中波长.

3 数值计算结果

根据上述迭代方程编写 FDTD 程序对柱形等离子体天线的双站 RCS 进行计算. 建立的柱形等离子体天线的二维模型如图 1 所示. 天线内部为高密度的等离子体柱, 柱半径 $a=1.0\,{\rm cm}$. 不同频率的平面波 (TM 波) 从右侧垂直入射到等离子体天线上.

首先分别研究等离子体参数 (密度、碰撞频率) 及不同入射波频率对等离子体天线雷达散射截面的影响. 在计算中, 天线约束腔体参数固定如下: 腔体管壁厚度为 1 mm, 腔体介电系数为 2.7. 计算结果如图 2~4 所示.

图 2 给出的是等离子体天线在激发前后与金属天线双站 RCS 的比较. 结果表明, 等离子体天线处于工作状态 (电子密度 $n_{\rm e}=5\times10^{11}\,{\rm cm}^{-3}$, 碰撞频率 $\nu_{\rm c}=500\,{\rm MHz}$) 时的 RCS 与金属天线相当; 而当等离子体天线停止工作 (腔体内等离子体密度为 0) 时, 其双站 RCS 值要比金属天线低几十 dB. 这表明等离子体天线具有很好的隐身效果.

图 3 所示为碰撞频率固定为 $\nu_{\rm c}=500\,{\rm MHz}$, 入射波频率为 600 MHz 时天线双站 RCS 随等离子体密度变化的情况. 计算结果表明, 若等离子体电子密度高于 $n_{\rm e}=5.0\times10^9\,{\rm cm}^{-3}$ (对应的等离子体频率为 $f_{\rm pe}=636\,{\rm MHz}$), 此时由于等离子体频率大于入射波

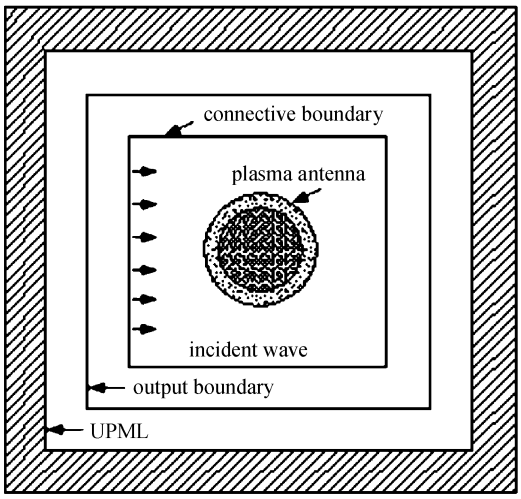


图 1 FDTD 区域和边界分布以及等离子体天线所处的空间位置

Fig. 1 FDTD regional distrbution and spatial position of plasma antenna

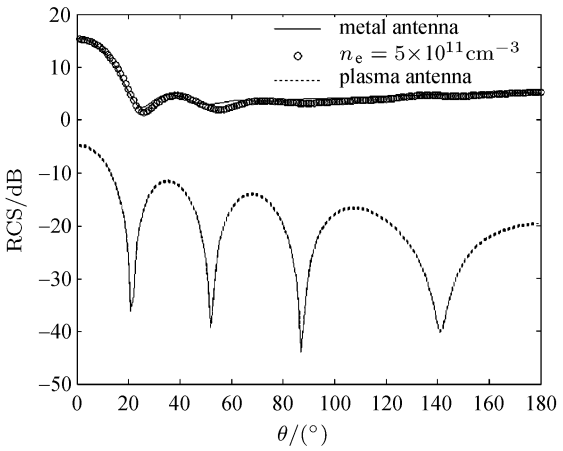


图 2 金属天线及不同工作状态下的等离子体天线双站 RCS

Fig. 2 Bi-static RCS of metal antenna and plasma antenna under various working conditions

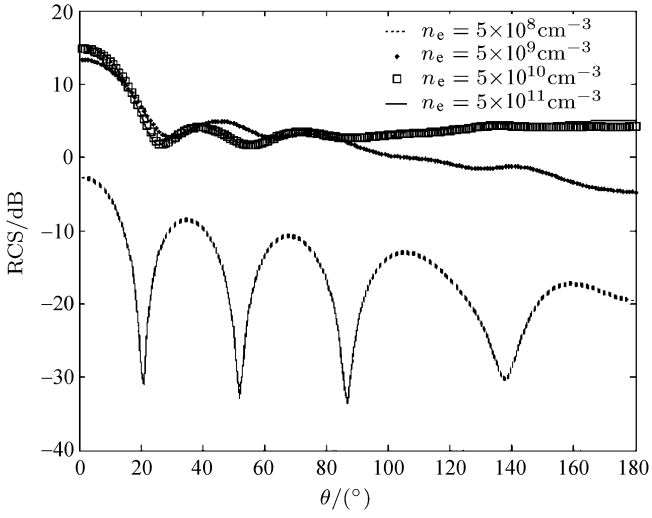


图 3 等离子体电子密度不同时天线的双站 RCS

Fig. 3 Bi-static RCS of plasma antenna for different plasma density

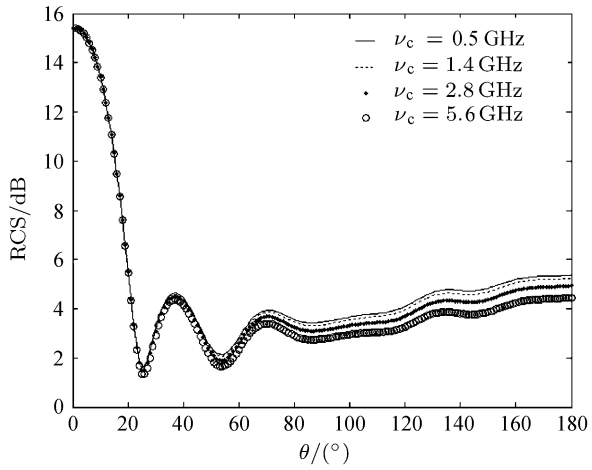


图 4 等离子体碰撞频率不同时天线的双站 RCS

Fig. 4 Bi-static RCS of plasma antenna for various collision frequencies

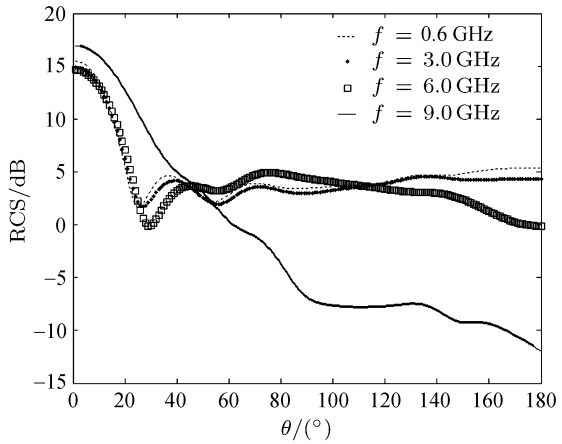


图 5 入射波频率对等离子体天线 RCS 的影响

Fig. 5 Effect of input wave frequency on RCS of the plasma antenna

频率, 等离子体天线与金属天线的性质相似, 因此两者的 RCS 基本相当. 而当等离子体电子密度低于 $n_e = 5.0 \times 10^8\,\mathrm{cm}^{-3}$ 时, 则由于等离子体频率远小于入射波频率, 电磁波基本透射过等离子体而使得天线的 RCS 与其处于非工作状态时的值基本相同.

图 4 所示为等离子体天线中电子密度固定时 ($n_e = 5 \times 10^{11}\,\mathrm{cm}^{-3}$), 等离子体碰撞频率的改变 ($\nu_c$ 为 0.5~5.6 GHz) 对天线双站散射特性的影响. 从图 4 中可以看出, 等离子体天线的 RCS 将随着等离子体碰撞频率的增大而缩减. 这是因为等离子体的碰撞频率对应着损耗, 因此, 碰撞频率的提高会使得反射的电磁波减弱, 最终使得等离子体天线的雷达反射截面减小.

图 5 为等离子体天线在不同工作频率下的双站 RCS. 结果显示, 随着工作频率的升高, 天线的双站散射宽度将随双站角的增加而增大.

当等离子体天线工作于不同频率时 (600 MHz, 8.5 GHz), 改变约束腔体壁厚度 (r 为 2.0~5.0 mm)、腔体的相对介电系数 (ε_g 为 2.7~6.0), 分别计算天线双站 RCS, 并通过分析计算结果研究约束腔体结构及材料对等离子体天线双站散射宽度的影响. 其计算结果如图 6 和图 7 所示.

从图 6 和图 7 中可知, 当等离子体天线工作于低频段时, 天线的双站散射宽度与金属天线基本相同. 而当等离子体天线工作于高频段时, 约束腔体的存在会对天线的散射宽度产生较大影响, 即天线约束腔体

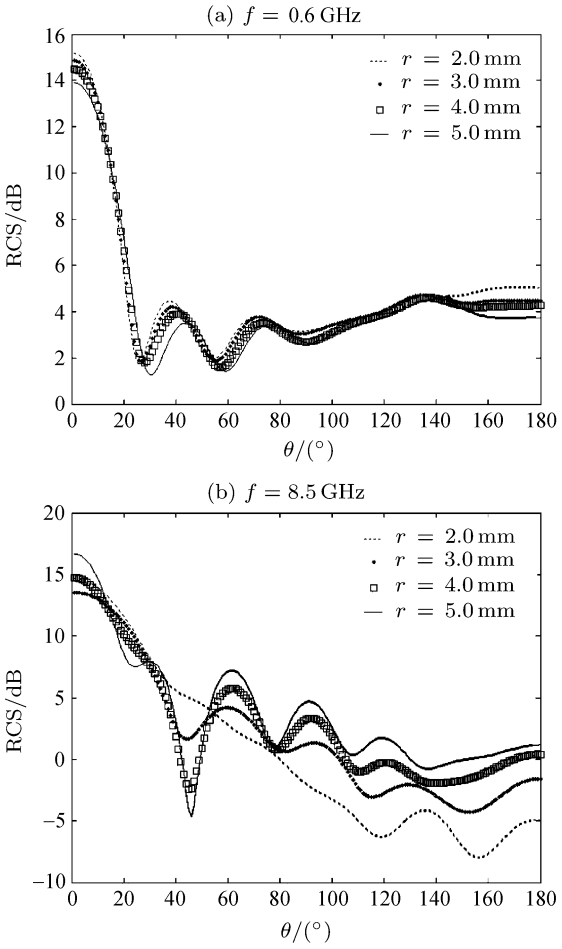


图 6 约束腔体厚度不同时等离子体天线的双站 RCS

Fig. 6 Bi-static RCS of plasma antenna for various depth of cavity body

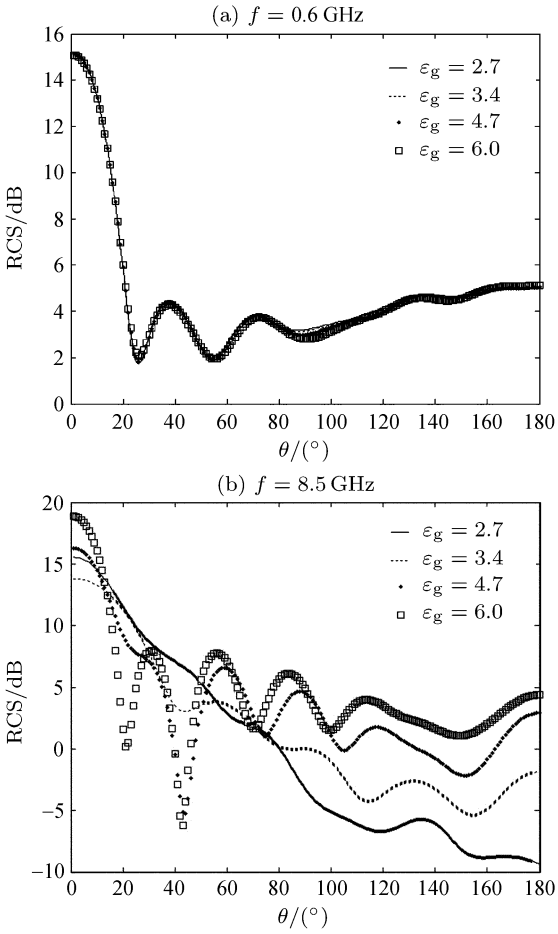


图 7 约束腔体介电常数与等离子体天线双站 RCS 的关系

Fig. 7 Bi-static RCS of plasma antenna for various permittivity of cavity body

厚度的增加及腔体材料介电系数的增大会加大入射电磁波的损耗, 从而使等离子体天线的雷达散射截面减小.

4 结论

通过数值计算可以得出如下结论.

(1) 等离子体天线在未被激励时仅相当于一根介质管, 其 RCS 比同型金属天线平均低约几十 dB, 具有良好的隐身效果.

(2) 天线 RCS 会随着等离子体天线中等离子体电子密度的减小及碰撞频率的增加而减少. 这就需要在不影响天线自身性能的前提条件下, 通过控制所加功率和气压来使等离子体密度相对较小而碰撞频率尽可能大.

(3) 等离子体天线的约束腔体在一定频率内也会对天线的散射特性产生影响. 因此不仅要考虑到等离子体参数, 而且要根据信号频段, 确定腔体的壁厚度、材料的介电系数等, 从而进一步提高等离子体天线的隐身性能.

参考文献

[1] Rayner J P, Whichello A P. Physical characteristics of Plasma antennas [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2004, **32**(1):269-281

[2] Alexeff Igor, Anderson Ted, Farshi Esmaeil. Recent results for plasma antenna [J]. *Phys. Plasmas*, 2008, **15**:2-4

[3] Cerri G, De Leo R, V Mariani Primiani, Russo P. Measurement of the properties of a plasma column used as a radiating element [J]. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, 2008, **29**:242-247

[4] Rajneesh Kumar, Dhiraj Bora. A reconfigurable plasma antenna [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **107**:1-9

[5] Shi Lei, Ding Jun, *et al.* Unipole plasma antenna based on excitation of surface-wave [J]. *Comput. Simul.*, 2009, **26**(11):126-129. In Chinese (石磊, 丁君, 等. 基于表面波激励的等离子体单极天线的研究 [J]. 计算机仿真, 2009, **26**(11):126-129)

[6] Lee Y, Ganguly S. Analysis of a plasma-column antenna using FDTD method [J]. *Microw. Opt. Tech. Lett.*, 2005, **46**:252-259

[7] Zhao Guowei, Chen Cheng, Xu Yuemin. Numerical computation and analysis on radiation field of the plasma column [J]. *Space Sci.*, 2005, **25**(2):93-97. In Chinese (赵国伟, 陈诚, 徐跃民. 柱形等离子体辐射场的数值计算和分析 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(2):93-97)

[8] Wang Z J, Zhao G W, Xu Y M, *et al.* Propagation of surface wave along a thin plasma column and its radiation pattern [J]. *Plasma Sci. Tech.*, 2007, **9**(5):526-529

[9] Dartora C A, Heilmann A, Nobrega K Z, Montagner V F, *et al.* Radiation pattern from a cold magnetoplasma antenna [J]. *Phys. Plasmas*, 2009, **16**:1-6

[10] Li Xueshi, Luo Fan, Hu Binjie. FDTD analysis of radiation performance of a cylinder plasma antenna [J]. *Ant. Wir. Prop.*, 2009, **8**:756-758

[11] Ge Debiao, Yan Yubo. Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetic Waves [M]. Xi'an: Press of Xidian University, 2002. In Chinese (葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分法 [M], 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002)