

文章编号: 1673 - 0062 (2009) 04 - 0005 - 04

等离子体振子天线辐射场的数值模拟

陈文波, 李 圣, 龚学余 *

(南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要: 对使用等离子体代替金属用来构成最基本的天线振子的可行性进行了分析, 得出了在一定条件下等离子体天线可以取代金属天线的结论, 参照传统金属天线辐射场的求解方法, 代入等离子体特征参数对等离子体柱天线的电场辐射方向图进行了模拟, 并分析了等离子体参数变化时对应辐射方向图的变化规律. 模拟结果表明: 等离子体天线辐射方向图会随着等离子体密度、碰撞频率等参数的变化而改变. 等离子体天线因此具有辐射方向可控的特点.

关键词: 等离子体; 振子天线; 积分方程法; 辐射方向图

中图分类号: TN820

文献标识码: A

Numerical Calculation of the Radiation Pattern of Plasma Dipole Antennas

CHENG Wen-bo, LI Sheng, GONG Xue-yu *

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: This paper analyzed the feasibility of replacing metal by plasma column in making the fundamental antenna vibrator in and come to the conclusion that Plasma antenna can replace metallic antenna on certain conditions. Then according to approach to radiation pattern of metal, the radiation patterns of plasma antenna is calculated. Furthermore, the variation law of radiation patterns for plasma parameters being changed is analyzed. The result shows that the radiation pattern of plasma can be varied by varying the plasma parameters including plasma electric density and collision frequency. The plasma can be used as antenna vibrator with the advantages of reconfigurability.

Key words: plasma; dipole antennas; method of integral equation; radiation patterns

0 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. 相对于传统的金属天线, 等离子体天线具有隐形性好, 可动态重构, 天线之间互耦效应小等诸多优势. 因此, 研究等离

收稿日期: 2009 - 08 - 04

基金项目: 湖南省教育厅科研基金资助项目 (07C643)

作者简介: 陈文波 (1983 -), 男, 湖南衡阳人, 南华大学核科学技术学院硕士研究生. 主要研究方向: 电磁场与等离子体物理. *通讯作者

子体天线具有很好的科学和军事价值^[1].

一般来说,研究等离子体天线的方法主要有物理实验及数值模拟计算两种.其中数值模拟所需成本低,且能根据需要灵活地选择各种天线模型来估算等离子体天线的参数.这使得数值方法在分析不同等离子体参数(如等离子体密度、碰撞频率等)下的天线性质时比实验方法更有优势.

本文首先建立了等离子体振子天线的理论模型,然后通过 POCKLINGTON 积分方程对等离子体天线表面电流分布进行了求解,并在此基础上计算了天线的远场辐射方向图.

计算结果表明:等离子体参数的变化会对天线的辐射特性产生影响.

1 理论分析与推导

1.1 等离子体柱天线的可行性分析

对均匀等离子体柱,沿等离子体柱的表面波的波矢 β 由式 (1) 得到^[2]:

$$\varepsilon_r T_0 I_1(T_p a) K_0(T_0 a) + T_0 K_1(T_0 a) I_0(T_p a) = 0 \quad (1)$$

其中 $T_p^2 = \beta^2 - \varepsilon_r / k_0^2$, $T_0^2 = \beta^2 - k_0^2$. I_n 、 K_n 分别为第一、二类修正 Bessel 函数 (n 为阶数). a 为天线半径, $k_0 = \omega / c$ 为自由空间中波矢. $\varepsilon_r = 1 - \omega_{pe}^2 / \omega(\omega - \nu_m)$ 为等离子体的相对介电常数, ω_{pe} 为等离子体圆频率, ν_m 为等离子体碰撞频率, ω 为入射波的频率.

图 1 为 BING 等利用式 (1) 得出的 β 的实部和虚部 (在图中以波数为单位) 随 ω / ω_{pe} 的变化曲线^[2], 对应的表面波频率为 30 MHz, 柱半径 $a = 0.0125$ m, 等离子体碰撞频率为 $\nu_m = 1$ GHz. 从图 1 可以看出: 当等离子体密度时较高纵轴 ω / ω_{pe} 较小, β 的实部接近于自由空间的波数 k_0 , 而虚部表征的衰减率较小. 等离子体的性质如同金属, 电磁波不能在等离子体内传播. 当等离子体密度较低时 ω / ω_{pe} 较大, 表面波在等离子体中的衰减增强. 等离子体的性质如同介质.

由以上分析可知: 在等离子体频率远大于天线工作频率时, 表面波的波数接近于自由空间电磁波的波数, 等离子体对表面波的衰减也较小, 等离子体柱上表面波的传播特性与金属天线振子相类似, 此时的等离子体柱即可作为天线振子. 因此用金属天线的理论模型来分析等离子体天线是可行的.

1.2 天线模型

建立的等离子体振子天线模型如图 2 所示,

假设天线振子由长为 L , 半径为 a , 密度分布均匀的等离子体柱构成. 天线中心位于坐标原点, 天线轴和 z 轴重合.

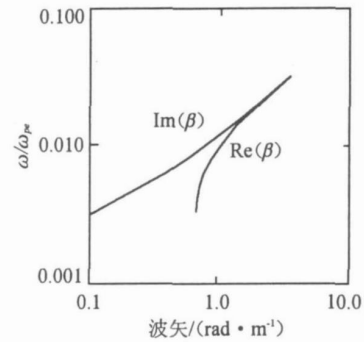


图 1 表面波在等离子体中的色散关系

Fig 1 The dispersion relation of the plasma surface wave

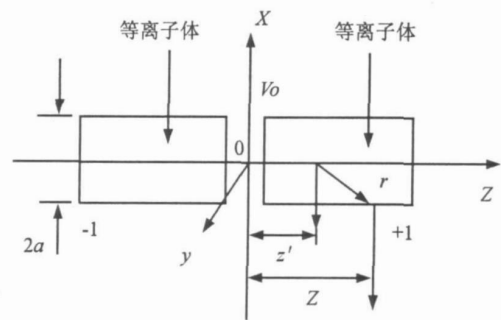


图 2 等离子体天线模型

Fig 2 The module of plasma antenna

由天线理论可知, 要得到天线的辐射场就必须先求解沿天线的表面电流分布. 传统金属天线的表面电流则是通过积分方程法来进行求解. 同样, 对于密度均匀分布的等离子体振子天线, 由于其传播特性与金属振子相同, 天线表面的电流分布 $I(z)$ 也应当满足以下 Pocklington 积分方程^[3]:

$$\begin{aligned} & \int_{-L}^L (z') \left(1 + \frac{\partial^2}{k_0^2 \partial z'^2} \right) G(r) dz' + \frac{1}{j\omega\mu_0} Z(z) I(z) \\ &= \frac{E_{iz}}{j\omega\mu_0} \end{aligned} \quad (2)$$

上式中 $G(r) = e^{-jk_0 r} / 4\pi r$ 为格林函数. z 在轴线上, 为源点的坐标; z' 为振子表面上的场点 (z, z' 的相对位置可参见图 2) $r = \sqrt{(z - z')^2 + a^2}$ 是场点和源点间的距离. a 为等离子体天线半径. $k = k_0$ 为自由空间中的波数. $Z(z)$ 为等离子体天线单位内阻抗, 它与等离子体电导率 $\sigma = \frac{\varepsilon_0 \cdot \omega_{pe}}{j \cdot \omega + \nu_m}$ 及

趋肤深度^[4] $\delta = (2/\omega\mu_0\sigma)^{1/2}$ 有着密切的关系. 当 $\delta > a$ 时, 等离子体天线单位内阻抗为^[5]:

$$Z(z) = \frac{dR}{dz} = \frac{1}{\pi a^2 \sigma}$$

(3)

当 $\delta \leq a$ 时, 单位长度的阻抗则为:

$$Z(z) = \frac{dR}{dz} = \frac{1}{2\pi a \delta \sigma}$$

(4)

所以, 通过用矩量法对式 (2) 进行求解, 我们就能够求得沿等离子体天线的电流分布, 并在此基础上求出天线辐射场. 对于 z 方向的电流源辐射场, 电场分量表示为^[6]:

$$E(\theta) = \eta \frac{k e^{-jk_0 r_0}}{4\pi r_0} \sin\theta \int_{-l/2}^{l/2} I(z) e^{jk_z \cdot \cos\theta} dz$$

(5)

上式中 $\eta = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 为自由空间波阻抗. 因此场的归一化方向图 f_θ 可表示为:

$$f(\theta) = |E(\theta)/E_{\max}(\theta)|$$

(6)

2 数值模拟结果

研究中心馈电, 长度可与波长相比拟的等离子体对称振子天线的辐射特性. 设图 2 的等离子体天线长度为 $L = 1.4\text{ m}$, 半径为 $a = 0.0125\text{ m}$,

馈电点处的电压 $V = 1\text{ V}$. 对取不同等离子体参数时天线的辐射特性进行了计算. 这些参数主要包括等离子体密度 (由于在实验条件下, 表面波产生等离子体的密度最大可以达到 $1.0 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ ^[7], 因此模拟时密度的取值范围为 $n_e = 3 \times 10^8/\text{cm}^3 \sim 3 \times 10^{11}/\text{cm}^3$) 和等离子体碰撞频率 ($\nu_m = 50\text{ MHz} \sim 5.0\text{ GHz}$). 信号频率则在 $55\text{ MHz} \sim 180\text{ MHz}$ 范围内取值. 从上一节的理论分析可知等离子体参数的改变会使等离子体柱的电导率及趋肤深度发生变化, 并最终导致终天线的阻抗、表面电流分布以及辐射方向图发生改变.

首先研究信号频率不同时, 等离子体碰撞频率对天线辐射特性的影响. 图 3(a)、(b) 给出了信号频率分别为 56 MHz 、 175 MHz , 等离子体密度固定为 $n_e = 3 \times 10^{11}/\text{cm}^3$, 而改变碰撞频率 (分别取 50 MHz 、 550 MHz 、 2.5 GHz 、 5.0 GHz) 时等离子体天线的辐射方向图. 从图中可以看出: 工作信号频率较小时, 碰撞频率的大小对辐射方向图几乎没有影响. 而当工作频率较大时, 等离子体天线的辐射方向图则会随着碰撞频率的增大而发生畸变.

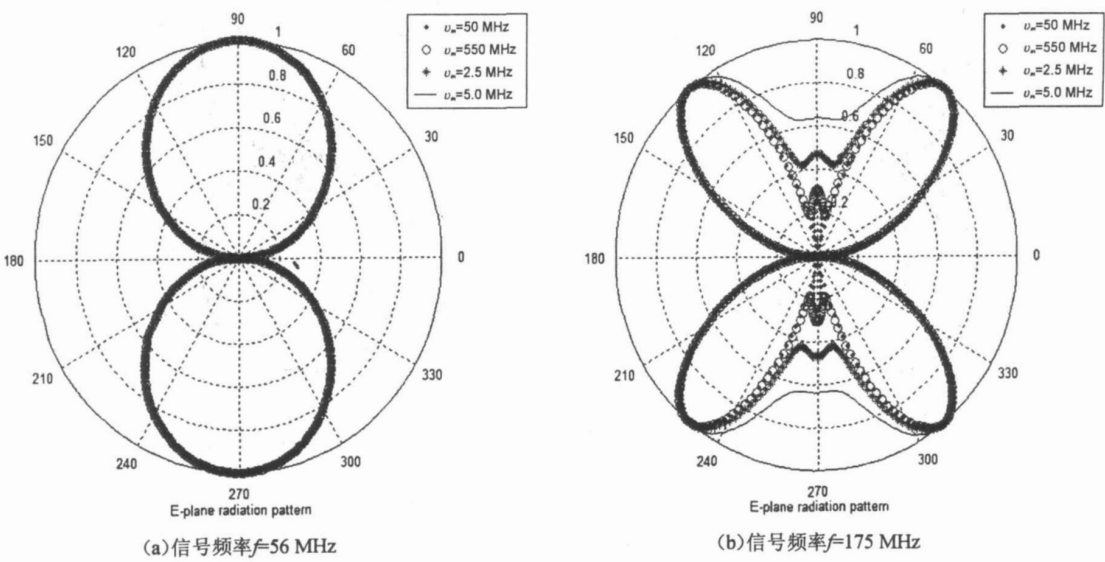


图 3 碰撞频率不同时 E 面归一化方向图

Fig 3 The E - plane radiation pattern at various collision frequencies

研究当等离子体碰撞频率固定为 $\nu_m = 50\text{ MHz}$, 等离子体密度的改变 (取 $n_e = 3 \times 10^8/\text{cm}^3$ 、 $n_e = 3 \times 10^9/\text{cm}^3$ 、 $n_e = 3 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 、 $n_e = 3 \times 10^{11}/\text{cm}^3$) 对等离子体天线辐射特性的影响, 图 4(a)、(b)、(c)、(d) 给出了信号频率分别为 55 MHz 、 110 MHz 、 145 MHz 、 180 MHz 时等离子体天线的辐射方向图, 并计算相同尺寸金属天线的辐射特

性以便与上述结果进行比较.

从图 4 中可以看出当信号频率较低时, 等离子体天线的辐射特性几乎不受等离子体密度的影响, 与金属天线一致. 而信号频率较高时, 密度参数对等离子体天线辐射特性的影响就非常明显了: 碰撞频率不变时, 天线的辐射方向图将随着等离子体密度的增加而与金属天线逐渐接近. 这是

由于信号频率较大且等离子体密度相对较小时,波矢的虚部较大,波的衰减也比较大,所以天线振子的主瓣较宽且无旁瓣产生,最大的电场辐射方向在 $\pm 90^\circ$ 方向.而随着等离子体密度的逐步增大,所对应表面波波矢的虚部会随之减小,实部则

越来越接近真空中的波矢.当等离子体的密度升至 $3 \times 10^{11} / \text{cm}^3$ 时,波矢虚部已接近于零,此时的等离子体天线就具有了同金属振子基本相似的辐射方向图.

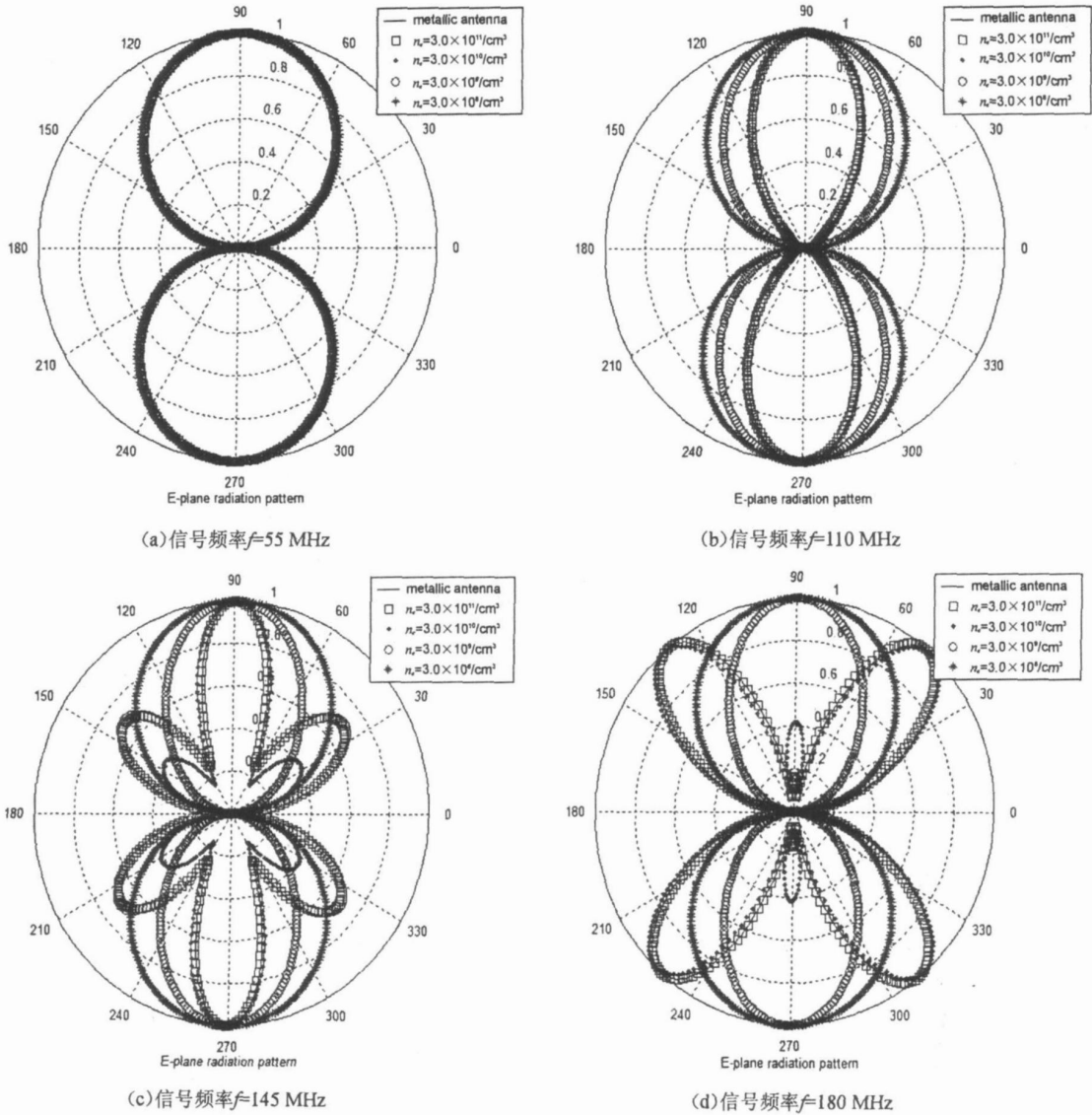


图 4 等离子体密度不同时 E 面归一化方向图
Fig 4 The E - plane radiation pattern at various plasma densities

3 结论

通过计算和仿真可以看出:等离子体振子天线工作在低频段时,等离子体参数(密度、碰撞频率)变化对天线辐射特性的影响并不明显;而当等离子体天线工作信号频率较高时,其辐射特性受等离子体参数的影响较大,此时通过调节等离子体某些参数可以控制等离子体柱天线的辐射方向图,实现天线的动态重构.

参考文献:

[1] Rayner J P, Whichello A P. Physical characteristics of Plasma antennas[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32 (1): 269 - 281.
[2] Borg G G, Harris J H, Milak D G, et al The application of plasma columns to radio frequency antennas[J]. Applied Physics Letters, 1999, 74: 3272 - 3274.
[3] 延晓荣,金元松,罗翠梅. 阻容加载偶极天线的宽带性能及效率分析[J]. 电波科学学报, 2000 (2): 169 - 173
(下转第 13页)

了合理的模拟,得出了小样本条件下岩体力学参数的先验分布,结合试验得到的岩体力学数据,利用 Bayes 统计方法,对岩体力学参数进行了估计.仿真算例表明,这种方法能较好地解决小样本条件下经典方法估计精度不高的问题.

参考文献:

- [1] 张广文,刘令瑶.确定随机变量概率分布参数的推广 Bayes 法 [J]. 岩土工程学报, 1995, 17(3): 91 - 94
- [2] 姜树海,范子武.应用 Bayes 方法对土石坝安全等级的动态概率评定 [J]. 水利学报, 2008, 39(8): 922 - 926
- [3] 李珍玉,王永和,丁加明,等.基于最大熵原理的地基变形分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(2): 46 - 51
- [4] 毕忠伟,丁德馨,饶 龙,等.岩石力学参数 Bayes 推断的验前信息可信度研究 [J]. 水利学报, 2006, 37(8): 1000 - 1004
- [5] 毕忠伟.岩体力学参数推断的 bayes 方法及截尾可靠度的研究与应用 [D]. 长沙:中南大学, 2008
- [6] 郑桂兰,王 媛,王 飞.广义 Bayes 法在裂隙岩体渗透系数随机反演中的应用 [J]. 水利学报, 2008, 39(4): 419 - 425
- [7] 郑忠国.随机加权法 [J]. 应用数学学报, 1987, 10(2): 247 - 253
- [8] 张守玉,封伟书.基于随机加权法的装备平均维修时间验证研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20(3): 100 - 103
- (上接第 8 页)
- [4] 管井秀郎.等离子体电子工程学 [M]. 张海波,张丹,译.北京:科学出版社, 2002: 119 - 121
- [5] 叶齐政,孙 敏.电磁场 [M]. 武汉:华中理工大学出版社, 2008: 229 - 232
- [6] 李宗谦,余京兆,高葆新.微波工程基础 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 411 - 412
- [7] Ganachev I, Sugai S Advanced large - area microwave plasmas for materials processing [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 174 - 175: 15 - 20.