

## 等离子体振子天线输入阻抗的数值模拟

李 圣, 陈文波, 龚学余\*

(南华大学 电气工程学院, 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, 参照传统金属天线积分方程的求解方法, 代入等离子体特征参数对等离子体柱天线的输入阻抗进行了模拟, 并分析了等离子体参数变化时对应输入阻抗的变化规律. 数值模拟及 XFDTD 软件仿真的结果表明: 等离子体天线阻抗会随着等离子体密度, 碰撞频率等参数的变化而改变. 利用该特性可建造动态配置的天线.

**关键词:**等离子体; 振子天线; 积分方程法; 输入阻抗

**中图分类号:** TN820

**文献标识码:** A

## Numerical Calculation of the Input Impedance of Plasma Dipole Antennas

LI Sheng, CHEN Wen-bo, GONG Xue-yu\*

(School of Electric Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

**Abstract:** The feasibility of replacing metal antenna by plasma column which is formed a fundamental antenna vibrator is analyzed first. Then according to the approach of integral equation which is appropriate to metal antenna, the input impedance of plasma antenna is calculated and imitated. Furthermore, the evolution of input impedance is studied with varying plasma parameters. The results of numerical analysis and simulation with XFDTD (a software) show that the input impedance of plasma can be varied with the plasma parameters such as plasma electric density and collision frequency. With the advantages of the property, reconfigurable antenna vibrator can be made from such plasma column.

**Key words:** plasma; dipole antennas; method of integral equation; input impedance

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, 研究等离子体天线具有很好的科学和军事价值<sup>[1]</sup>.

一般来说, 研究等离子体天线的方法主要有物

收稿日期: 2010-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10775066); 湖南省教育厅基金资助项目(07C643)

作者简介: 李 圣(1972-), 男, 湖南祁东人, 南华大学电气工程学院讲师, 博士研究生. 主要研究方向: 等离子体天线. \* 通信作者.

理实验及数值模拟计算两种. 其中数值模拟所需成本, 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, 在此基础上计算了天线的输入阻抗并采用 XFDTD 软件进行了仿真. 计算及仿真结果表明: 等离子体参数的变化会对天线的输入阻抗产生影响.

## 1 理论分析与推导

### 1.1 等离子体柱天线的可行性分析

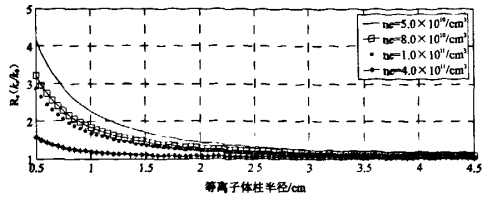
对均匀等离子体柱, 沿等离子体柱轴向的表面波的波矢  $\beta$  可由下式得到<sup>[2]</sup>:

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

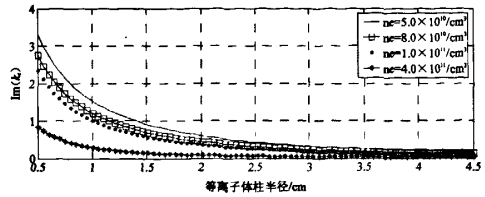
其中  $T_p^2 = k_z^2 - \varepsilon_r k_0^2$ ,  $T_0^2 = k_z^2 - k_0^2 \cdot I_n$ ,  $k_n$  分别为第一、二类修正 Bessel 函数( $n$  为阶数).  $a$  为天线半径,  $k_0 = \omega/c$  为自由空间中波矢.  $\varepsilon_r = 1 - \omega_{pe}^2 / (\omega(\omega - i\nu_m))$  为等离子体的相对介电常数,  $\omega_{pe}$  为等离子体圆频率,  $\nu_m$  为等离子体碰撞频率,  $\omega$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

利用式(1)我们首先计算了等离子体柱半径  $a$  在  $0.5 \text{ cm} \sim 4.5 \text{ cm}$  范围内变化时, 不同等离子体密度对波数  $k_z$  的影响, 得到的结果如图 1 所示. 其中等离子体碰撞频率设为  $\nu = 500 \text{ MHz}$ , 信号频率  $f = 150 \text{ MHz}$ . 从图 2.2 中的曲线可以观察到一个与金属天线表面电流分布相似的现象: 表面波波矢的衰减系数及相位系数都随柱体半径的增大而减小. 此外由该图还能看出: 当电子碰撞频率一定时, 等离子体频率越高, 对应表面波的相位系数  $\text{Re}(k_z)$  越接近于自由空间中的相位系数  $\text{Re}(k_0)$  ( $k_0 = \omega/c$ ), 衰减系数  $\text{Im}(k_z)$  则逐渐减小接近于 0. 这说明等离子体密度越高, 电导率越高, 电流趋肤深度越小, 其表面波的传播特性与金属越相似.

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.



(a) 等离子体与自由空间中波矢传播相位系数比



(b) 波矢传播衰减系数

图 1 表面波在等离子体中的色散关系

Fig. 1 The dispersion relation of surface wave in plasma

### 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.

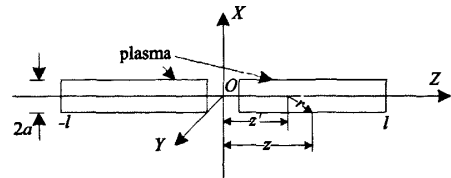


图 2 等离子体天线模型

Fig. 2 The model of plasma antenna

由天线理论<sup>[3]</sup>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<sup>[3]</sup>:

$$-E_z = \frac{1}{4\pi j\omega\varepsilon_0} \int_{-L}^L I(z') \left( 1 + \frac{\partial^2}{\beta^2 \partial z'^2} \right) G(r) dz' + Z(z) I(z) \quad (2)$$

上式中  $G(r) = -e^{-jkr} / 4\pi r$  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 ( $z', z$  的相对位置可参见上图 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, 表示为:<sup>[4]</sup>

$$\begin{cases} Z(z) = \frac{dR}{dz} = \frac{1}{\pi a^2 \sigma} & (\delta > a) \\ Z(z) = \frac{dR}{dz} = \frac{1}{2\pi a \delta \sigma} & (\delta \leq a) \end{cases} \quad (3)$$

上式中  $\delta = (2/\omega\mu_0\sigma)^{1/2}$  为等离子体的趋肤深度,  $\sigma$  为等离子体电导率, 其表达式为:

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0 \cdot \omega_{pe}}{j \cdot \omega + \nu_m} \quad (4)$$

将求得等离子体天线的等效内阻抗代入电流的积分方程式(2)中, 就可以通过矩量法求解出天线的表面电流. 由于天线输入阻抗定义为天线输入端电压与输入端电流的比值<sup>[5-6]</sup>, 即:

$$Z_{in} = R_{in} + iX_{in} = U_{in}/I_{in} \quad (5)$$

因此, 求得等离子体天线电流分布后就可以很容易地求解天线的输入阻抗.

## 2 数值模拟结果

本文将利用式(3)求解振子天线的输入阻抗, 进而研究等离子体参数对天线输入阻抗的影响. 设图2所示的等离子体天线长度为  $L = 1.5$  m, 半径为  $a = 0.0125$  m, 馈电点处的电压  $V = 1$  V, 信号频率  $f = 150$  MHz. 计算时的等离子体参数设置如下: (I) 等离子体频率  $f_{pe} = 2.5$  GHz ~ 9.5 GHz (对应的等离子体密度  $n_e = 8 \times 10^{10}/\text{cm}^3 - 1 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ ), 碰撞频率  $\nu_m = 80$  MHz; (II) 碰撞频

率  $\nu_m = 80$  MHz ~ 1.0 GHz, 等离子体频率  $f_{pe} = 5.5$  GHz. 作为对比, 本文同样给出了相同几何尺寸金属天线输入阻抗的计算值. 所得结果如图3~图5所示.

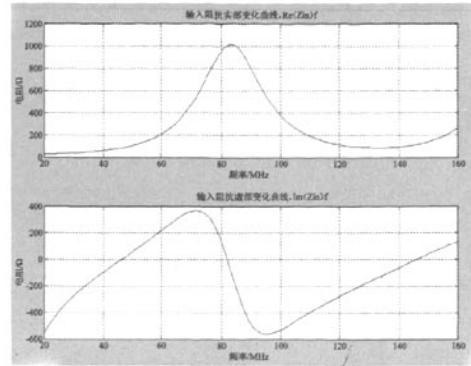
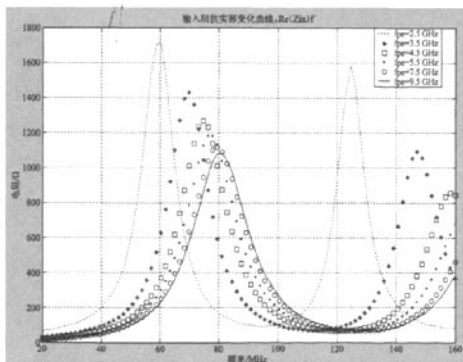


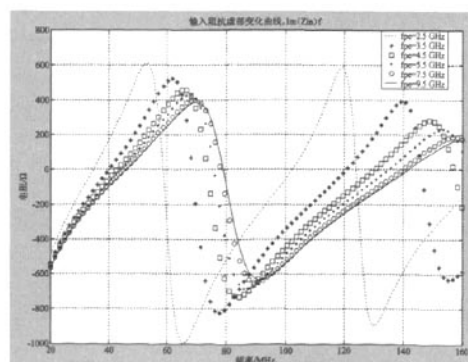
图3 金属天线的输入阻抗

Fig.3 The input impedance of metal antenna

图3为金属天线的输入阻抗随频率的变化曲线. 图4为该仿真天线等离子体频率不同时的输入阻抗变化曲线. 可以看出等离子体频率对天线谐振频率的偏移及输入阻抗的幅值均有较大影响: 随着等离子体频率的增加, 等离子体天线的谐振频率增加, 输入阻抗幅值减小, 阻抗特性与金属天线逐步接近. 当等离子体频率足够高时, 它就会呈现出与金属天线基本相似的谐振特性.



(a) 天线输入阻抗实部变化曲线



(b) 天线输入阻抗虚部变化曲线

图4 天线输入阻抗随等离子体频率的变化

Fig.4 The input impedance of plasma antenna with varying plasma frequency

输入阻抗随碰撞频率的变化曲线如图5所示. 由图可知, 与等离子体频率对谐振点的影响明

显不同, 碰撞频率在很大程度上只影响输入阻抗的幅值(幅值随碰撞频率的增大而减小), 对谐振

频率的偏移则几乎不产生什么影响.这主要是由于等离子体频率和碰撞频率在相同的信号频率下会对等离子体电导率表现出相反的影响所致.

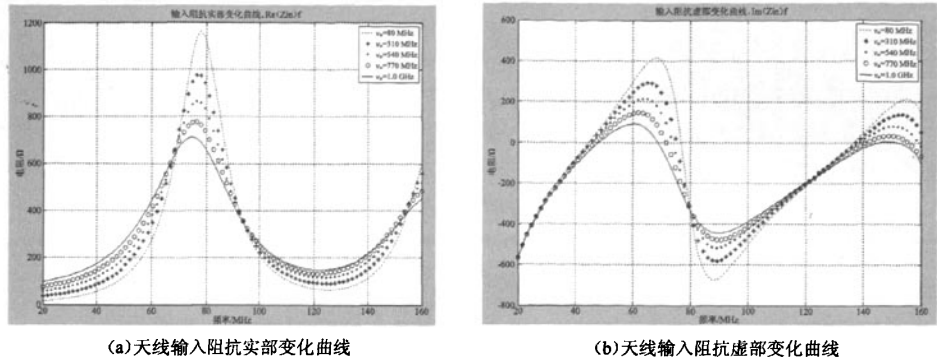


图 5 天线输入阻抗随碰撞频率的变化  
Fig. 5 The input impedance of plasma antenna with varying collision frequency

3 等离子体天线振子的 XFDTD 仿真

XFDTD 软件是一种基于时域有限差分方法 (FDTD) 分析微波工程问题的三维电磁仿真软件. 目前, 该软件已广泛应用于高频设计的各个领域. 图 6 为所建立等离子体天线的 XFDTD 模型.

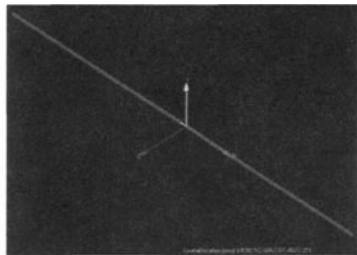


图 6 等离子体天线的 XFDTD 建模  
Fig. 6 The modeling plasma antenna with XFDTD

将图 3 模型中的等离子体参数设置为:  $f_{pe} = 5.5$  GHz,  $V_m = 1.0$  GHz, 仿真结果如图 7 所示. 从图 7 可以看出, XFDTD 仿真所得的结果与前面数值分析所得到的结果基本一致, 这也验证了前面计算方法的正确性.

4 结论

计算及仿真的结果表明: 等离子体天线的输入阻抗主要随等离子体频率的变化而变化. 利用该特性可建造动态配置的天线, 使工作频率随等离子体参数即气压和应用到等离子体上的 RF 功率而变化. 此外, 等离子体的碰撞损耗会增加天线损耗, 导致发射功率降低, 从而抑止输入阻抗的变化.

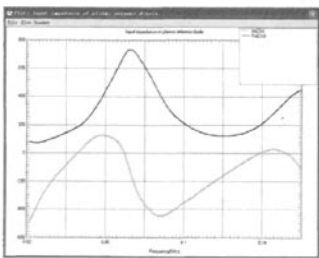


图 7 等离子体天线的 XFDTD 仿真结果  
Fig. 7 The simulation result of plasma antenna with XFDTD

这是另一个有用的属性, 可用于调整天线的 Q 因子而动态控制天线的带宽.

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(22): 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, 15(2): 169 – 173.
- [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.
- [5] 叶齐政, 孙 敏. 电磁场[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2008.
- [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.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训：

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>