

# 等离子鞭天线仿真分析

邱景辉 韩雪 林澍 李高飞

(哈尔滨工业大学 341 信箱, 哈尔滨 150001)

1211hanxue@163.com

**摘要:**等离子体天线具有隐身特性和可重构性,受到了极大关注。为研究等离子体鞭天线的性能,对同轴线馈电的等离子鞭天线进行了CST软件仿真研究,分析了等离子参数及天线各结构尺寸对回波损耗、增益及方向图的影响。仿真结果表明,等离子体鞭天线同金属鞭天线相比,两者有着类似的设计方法和辐射特性。

**关键词:**等离子体天线, 鞭天线, 同轴馈电

## Simulation Analysis of the Plasma Whip Antenna

Qiu Jinghui, Han Xue, Lin Shu, Li Gaofei

( Harbin Institute of Technology, Harbin 150001 )

**Abstract:** Plasma antenna with many advantages such as stealth and reconfigurability has been of great concern. The coaxial line-fed plasma whip antenna has been studied by the CST simulation. Plasma parameters and the size of antenna structure impact of the radiation characteristic of plasma antenna. The simulation results show that the plasma whip antenna and metal whip antenna, both have similar design and radiation characteristics.

**Keywords:** plasma antenna; whip antenna; coaxial feed

### 1 引言

等离子体天线是一种将等离子体作为电磁辐射导向媒质的射频天线<sup>[1]</sup>。传统金属天线,尤其是天线阵列,重量和体积都相对较大,设计制作不灵活,天线的尺寸与其辐射效率密切相关,自重构性和适应性较差。等离子密度可调,等离子体天线长度可调,可以对天线性能进行较为灵活的控制。另外,等离子体天线在没有激发的状态下,雷达散射截面可以忽略不计,而天线仅在通信发送或接收的短时间内激发,提高了天线的隐蔽性<sup>[2]</sup>;利用改变离子密度来改变天线的瞬时带宽,且具有大的动态范围;等离子体谐振、阻抗以及电子密度均可重新调整,电离气体天线单元可以构造并组合成一个频率、波束宽度、功率、增益和方向性动态可调的序列<sup>[3]</sup>,这些性质可广泛的应用于军事领域。因此,等离子体天线有着重要意义。

文献[4]和[5]说明了金属天线与等离子体天线的相似性。本文通过CST仿真研究等离子体天线的结构参数,等离子体特性参数与天线电性的关系,仿真结果可为设计等离子体天线提供有益的参

考。

### 2 等离子天线的基本原理

等离子体是由大量的正离子与自由电子组成的集合体,宏观上近似呈电中性,且电离离子密度颇高,其运动主要受电磁力强弱的支配,并呈现出显著的群体行为。在普通的气体中,电离度达到0.1%,就已具有较为明显的等离子体特性。电离度达到1%时,就能达到与良导体类似的电导率<sup>[6]</sup>。

等离子体的产生方式可分为:直流放电,高频放电和微波放电<sup>[6]</sup>。实验表明,只用直流偏压就可在管内快速地实现等离子体的形成和猝灭,从而实现天线的开关。当等离子体猝灭、天线关闭时,管内气体不具有传导性,从而对其他天线的方向图不会产生影响;当等离子体形成天线工作时,等离子体是电的良导体,可以用来传递无线电信号<sup>[3]</sup>。

非磁化等离子体的特性参数可用如下几个式子来表达<sup>[4][7][8]</sup>:

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu)} \quad (1)$$

$$\sigma = \varepsilon_0 \omega_{pe}^2 / \nu \quad (2)$$

$$f_{pe} = \frac{\omega}{2\pi} \approx 9000\sqrt{n_e} \quad (3)$$

$$v_{en} = 1.52 \times 10^7 P \sqrt{T_e} \quad (4)$$

式中  $P$ —工作气压:  $P = nkT$ ,  $k$ —玻耳兹曼常数。;  $\omega$ —传输频率;  $\omega_p$ —等离子体特征频率;  $v$ —等离子体碰撞频率;  $n_e$ —等离子体密度 ( $\text{cm}^{-3}$ );  $f_{pe}$ —等离子体频率。由上述表达式中可看出, 等离子体电特性主要由等离子体频率  $f_{pe}$  和等离子体碰撞频率  $v$  决定。

### 3 等离子体参数对天线特性的影响

图1为同轴线馈电等离子体天线的模型, 天线主要结构为被一层玻璃管罩住的等离子体柱。玻璃管厚度  $d=2\text{mm}$ , 等离子体半径  $a=5\text{mm}$ , 等离子体长度  $L=160\text{mm}$ 。仿真中设定等离子体在管内均匀。

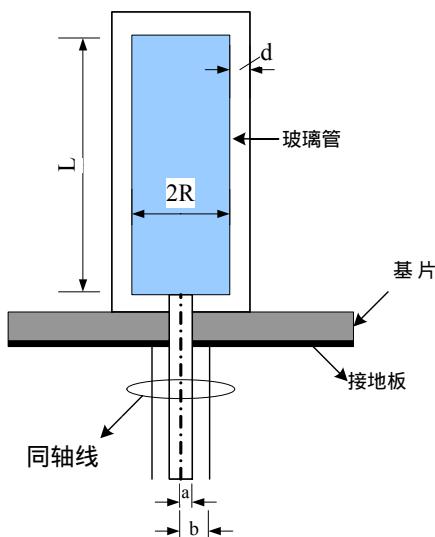


图1 同轴线馈电的等离子体鞭天线模型

#### 3.1 等离子体碰撞频率对天线性能的影响

维持等离子体频率  $f_p=900\text{GHz}$  不变, 等离子体碰撞频率  $v$  取  $5\text{MHz}$ 、 $5\text{GHz}$ 、 $10\text{GHz}$ 。

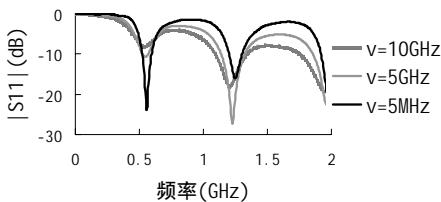


图2 碰撞频率  $v=10\text{GHz}$ 、 $5\text{GHz}$ 、 $5\text{MHz}$  的  $|\mathcal{S}_{11}|$  图

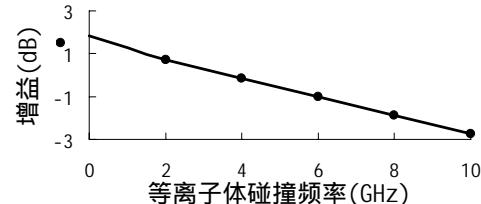


图3 碰撞频率  $v$  对天线增益的影响

$|\mathcal{S}_{11}|$  结果列于图2中, 第一谐振频率  $f_0=0.56\text{GHz}$ , 碰撞频率  $v$  变化对谐振频率取值没有影响, 但随着碰撞频率  $v$  减小, 谐振

深度增大。这说明碰撞频率  $v$  越大, 损耗越大。 $f_p=900\text{GHz}$ , 碰撞频率  $v$  取  $5\text{MHz}$ 、 $2\text{GHz}$ 、 $4\text{GHz}$ 、 $6\text{GHz}$ 、 $8\text{GHz}$ 、 $10\text{GHz}$ 。在第一谐振频率下的天线增益结果列于图3, 碰撞频率  $v$  增大, 等离子体鞭天线增益减小, 辐射特性下降。说明等离子体碰撞频率越小, 损耗越小, 天线辐射性能越好。

#### 3.2 等离子体角频率对天线性能的影响

维持等离子体碰撞频率  $v=5\text{MHz}$  不变, 取等离子体频率  $f_p=900\text{GHz}$ 、 $600\text{GHz}$ 、 $300\text{GHz}$ ,  $|\mathcal{S}_{11}|$  结果列于图4中, 第一谐振频率分别为  $0.56\text{GHz}$ 、 $0.50\text{GHz}$ 、 $0.39\text{GHz}$ 。等离子体频率  $f_p$  越大, 第一谐振频率越大, 谐振深度略微减小。这说明等离子体频率  $f_p$  减小, 导致天线电长度减小, 从而第一谐振频率增大。

等离子体频率  $f_p=900\text{GHz}$ 、 $700\text{GHz}$ 、 $500\text{GHz}$ 、 $300\text{GHz}$ 、 $100\text{GHz}$ 。在第一谐振频率下的天线增益结果列于图5, 等离子体频率  $f_p$  增大, 等离子体鞭天线增益也增大。天线辐射特性增强。

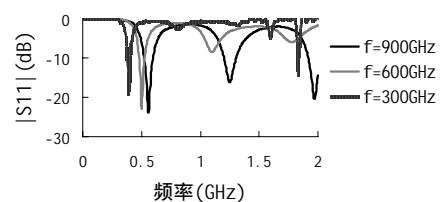


图4  $f_p=900\text{GHz}$ 、 $600\text{GHz}$ 、 $300\text{GHz}$  对应的  $|\mathcal{S}_{11}|$  图

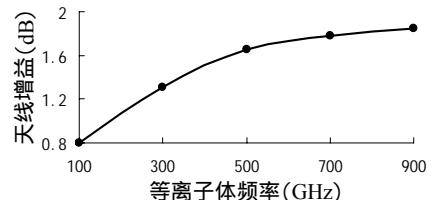


图5 等离子体角频率对天线增益的影响

#### 4 同轴线馈电等离子体天线与金属天线辐射特性对比

相同结构尺寸，把同轴线馈电等离子体天线模型中的等离子体材料换成有耗金属，即可得到相同模型的等离子体天线与金属天线的辐射特性对比结果。这里等离子体的参数取值为：等离子体频率 $f_p=900\text{GHz}$ ，等离子体碰撞频率 $\nu=5\text{MHz}$ 。有耗金属电导率取 $10^6\text{S/m}$ 。

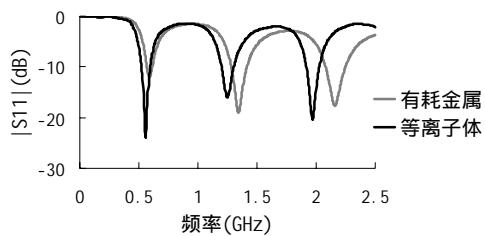


图6 等离子体和有耗金属对应的 $|S_{11}|$ 图

两种天线的 $|S_{11}|$ 结果列于图6中，对于各个谐振频点总体来说，等离子体天线比金属天线谐振频率小。说明物理长度相同的情况下，等离子体天线的电长度更大。它们的第一谐振频率近似相同，分别为 $0.56\text{GHz}$ ， $0.59\text{GHz}$ 。等离子体鞭天线的第一谐振频率深度更大。由第一谐振频率下两天线的辐射方向图知，两种天线的E面，H面辐射图完全重合。且在第一谐振频率处，金属鞭天线效率93.7%，增益为 $1.99\text{dB}$ ；等离子体鞭天线效率96.1%，增益为 $1.86\text{dB}$ 。说明等离子体天线完全可以达到与金属天线相似的辐射特性，可以替代金属天线。考虑到等离子体天线独有的隐身特性，可重构性等显著特征，等离子体天线将大有可为。

#### 5 等离子体长度对天线辐射特性的影响

等离子体频率取值 $f_p=900\text{GHz}$ ，等离子体碰撞频率取值 $\nu=5\text{MHz}$ 。如图7所示，第一谐振频率 $f$ 与等离子体长度倒数 $1/L(1/\text{mm})$ 之间有着近似的线性关系，可得斜率 $k$ 近似值为84，得到关系式 $f=84/L(\text{GHz})$ 。

若金属天线的长度 $L=\lambda/4$ ，则第一谐振频率 $f=c/4L$ 。可见，等离子体天线和金属天线都存在这种线性关系。

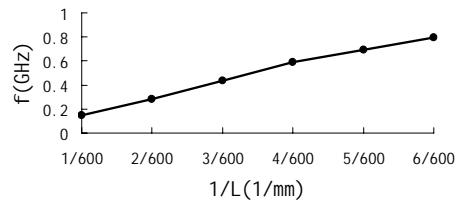


图7 第一谐振频率 $f$ 与等离子体长度倒数 $1/L$ 的关系

仿真结果表明，在等离子体半径 $r$ 范围是 $2\text{mm}\sim 6\text{mm}$ ，天线增益随半径增大而增大，当等离子体半径 $r$ 变化范围为 $1\text{mm}\sim 9\text{mm}$ ，玻璃管厚度 $d$ 变化范围为 $1\text{mm}\sim 5\text{mm}$ ，第一谐振频率几乎不变。

#### 6 结论

本文首先讨论了等离子体参数——等离子体频率和等离子体碰撞频率对天线辐射特性的影响，结论为天线增益随等离子体频率的增大而增大，随碰撞频率增大而减小。等离子体频率和碰撞频率变化对天线第一谐振频率和方向性都没有太大影响。在等离子体频率较大( $900\text{GHz}$ )和等离子体碰撞频率取值较小( $5\text{MHz}$ )时，等离子体天线与金属天线辐射特性相似。接下来讨论了等离子体长度与天线第一谐振频率的关系，并给出了第一谐振频率 $f$ 与等离子体长度表达式，这种性质与金属天线类似。

#### 参考文献

- [1] 孙杰,袁斌等.等离子天线及其在复杂电磁环境中的应用.信息技术.2007,31(7):34-35
- [2] 李红波,刘国强等.等离子体天线的基本特性研究.信息工程大学学报.2006, 7(3):241-242
- [3] 袁忠才,时家明等.表面波激励等离子体天线的原理与实现.电子信息对抗技术.2006,21(04):40-41
- [4] Max Chung, Wen-Shan Chen. Capacitive Coupling Return Loss of a New Pre-ionized Monopole Plasma Antenna. TENCON 2007. IEEE Region 10. 2007,1-4
- [5] Ma Liang Guo Qinggong . FDTD Analysis of a Plasma Helix Antenna.ICMMT2008. Nanjing,China.2008, 4:1854-1857
- [6] 菅井秀郎.等离子体电子工程学.科学出版社.北京 .2002 , 88-100
- [7] 刘良涛,祝大军等.等离子体天线的原理与设计.雷达与对抗.2004 ( 4 ) : 27-28
- [8] 陈林松,马红星.等离子体技术在天线隐身中的应用.雷达科学与技术.2005 , 3 ( 3 ) : 140-142

## 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,一直致力于专注于微波、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>