

文章编号:1673-0062(2017)01-0039-05

等离子体圆形反射器天线辐射特性的数值计算

陈文波,冯 军,黄国玉*,廖湘柏,邓贤君

(南华大学 电气工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:采用辅助差分方程时域有限差分(ADE-FDTD)算法对一种具有快速动态重构能力的等离子体圆形反射器天线(PRRA)的归一化辐射方向图及反射系数进行了数值计算.计算结果表明:等离子体圆形反射器天线能够在微秒量级内完成不同辐射波束形状和发射方向的切换,实现天线辐射特性的快速动态重构且具有较宽的工作频带.

关键词:等离子体天线;圆形反射器;可动态重构性;时域有限差分法

中图分类号:TN820 **文献标志码:**A

Number Calculation the Radiation Characteristics of Plasma Round-reflector Antenna

CHENG Wen-bo, FENG Jun, HUANG Guo-yu*, LIAO Xiang-bai, DENG Xian-jun

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

Abstract: The radiation characteristic of a round reflector plasma antenna (PRRA) are calculated by finite-difference time-domain (ADE-FDTD) method. The study result shows that the beam shape and beam direction of the PRRA can be changed within microseconds, and the radiation characteristic of antenna can be rapidly reconstructed with wider bandwidth than others.

key words: plasma antenna; round reflector; reconfigurable; FDTD algorithms

0 引言

等离子体天线是一种由充满惰性气体的介质管构成的新型天线,与传统的金属天线相比,该类

天线的结构简单、体积小、质量轻、天线间互耦小、隐身性能好的特点.因而在微波通信、雷达探测、电子对抗、射电天文和气象等多个领域均有着广阔的应用前景^[1].

收稿日期:2016-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目(11375085);湖南省教育厅项目(15C1174)

作者简介:陈文波(1983-),男,讲师,博士,主要从事电磁场与等离子体物理的研究.E-mail:snipers2004@163.com.

* 通讯作者:黄国玉,E-mail:guoyu162@163.com

此前已有多个研究小组分别从理论和实验方面对等离子体天线的辐射及散射特性进行了分析^[2-6], BORG等详细给出了工作于UHF及VHF频段内等离子体天线的测试结果^[4], 并验证了等离子体元素替代金属材料作为天线辐射单元的可行性. 文献[5]设计了一种工作频率为3 GHz的抛物面等离子体反射器天线, 其实验测试的结果表明这种等离子体反射面天线的电特性与相同尺寸的金属反射面天线接近. 此外, 由于不管采用何种形式的等离子体天线, 都必须要有产生高密度等离子体的激励装置. 同时, 许多科研小组还对等离子体的激励方式进行了研究^[7].

已有的研究工作可以看出, 等离子体天线具备在通信系统中独有的潜在优势, 利用等离子体材料来实现波束赋形和控制是一个非常前景的课题. 目前大多数文献都是将等离子体看作是一种辐射器来加以研究, 而对于利用等离子体来构成反射阵面, 实现天线系统的波束赋形和扫描能力的研究则相对较少. 文献[8]给出了一种工作频率为2.4 GHz的圆形等离子体天线阵辐射方向图的数值计算及实验测试结果, 但对于该类天线的增益、反射系数等一系列关键参数则未做深入的研究.

本文将采用辅助差分方程时域有限差分(ADE-FDTD)算法对一种可重构等离子体圆形反射器天线(PRR)的归一化辐射方向图及反射系数进行计算和分析, 为实用等离子体反射器天线的设计提供理论指导.

1 等离子体的 ADE-FDTD 算法

目前, 用于模拟等离子体这类色散媒质的FDTD算法比较多^[9-10], 本文在综合考虑了各种算法的精度及编程复杂度之后, 将采用ADE-FDTD方法来对等离子体圆形反射器天线的辐射特性进行分析. ADE-FDTD方法的原理简述如下^[10]:

当电磁波在非磁化冷等离子体中传播时, 其满足的Maxwell方程组及相关的联立方程可表示为:

$$\nabla \times H = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + J \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial J}{\partial t} + v_c \cdot J = \varepsilon_0 \cdot \omega_{pe}^2 \cdot E \quad (3)$$

方程(1)~(3)式中的 μ_0 为真空中磁导率; E

为电场强度; H 为磁场强度; J 为等离子体的电流密度. 若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. 利用中心差分近似, 即可将电流密度与电场强度的关系式(3)式离散, 进而得到等离子体电流密度 J 的迭代表达式如下:

$$J^{n+1/2} = 1/(2 + v_m dt) [(2 - v_m dt) J_i^{n-1/2} + 2\varepsilon_0 \Delta t \omega_{pe}^2 E_i^n] \quad (i = x, y, z) \quad (4)$$

非磁化等离子体的磁场迭代式与非色散媒质中磁场迭代式完全相同, 而电场迭代式则只需要加上对应位置的等离子体电流密度项即可. 例如, 同样采用FDTD方法对式(2)采用中心差分离散处理, 得到的 x 方向上的电场迭代表达式可以写为:

$$E_x \Big|_{i+1/2j,k}^{n+1} = E_x \Big|_{i+1/2j,k}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \Delta y} \cdot (H_z \Big|_{ij+1,k}^{n+1/2} - H_z \Big|_{ij,k}^{n-1/2}) - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \Delta z} \cdot (H_y \Big|_{ij,k+1}^{n+1/2} - H_y \Big|_{ij,k}^{n-1/2}) - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0} \cdot J_x \Big|_{i+1/2j,k}^{n+1/2} \quad (5)$$

将等离子体电流密度表达式(4)式、电场迭代方程(5)式及磁场迭代方程联立求解, 即可得到等离子体圆形反射器天线中每根等离子体柱内的电磁场分布. 若要对等离子体外部空间区域的电磁场进行计算, 则只要将(5)式中等离子体电流密度 J 设置为0即可.

2 天线模型的建立

可动态重构等离子体圆形反射器天线的设计模型如图1所示. 将一根长为0.288 m的细金属天线放置在尺寸为0.3 m × 0.3 m的接地金属板的中心位置上, 用作天线系统的辐射单元, 激励信号频率为 $f_0 = 2.5$ GHz(对应的信号波长为 $\lambda = c/f_0 = 0.12$ m). 12根尺寸相同(半径 $R = 0.006$ m, 管长 $H = 0.06$ m), 且内部充满惰性气体的介质管呈圆形排列在金属天线的周围, 每根介质管到金属天线的距离均为 $S = 0.35$, $\lambda = 0.035$ m. 通过激发和关闭相应介质管内的等离子体, 即可形成等离子体圆形反射面. 同时还能快速改变天线系统反射面形状和尺寸, 使等离子体圆形反射器天线具备波束可控的特性.

3 结果及讨论

根据图1所给出的PRR系统模型, 本文将采用自编的FDTD程序来对等离子体圆形反射器天线的辐射特性进行求解. 为了验证该程序的正确性, 本文还给出了长度为 $\lambda/4$ 的单极金属天线的 S 参数计算结果, 并与矩量法的结果进行了对

比(图 2).可以看出,采用不同方法所得到的结果吻合较好.

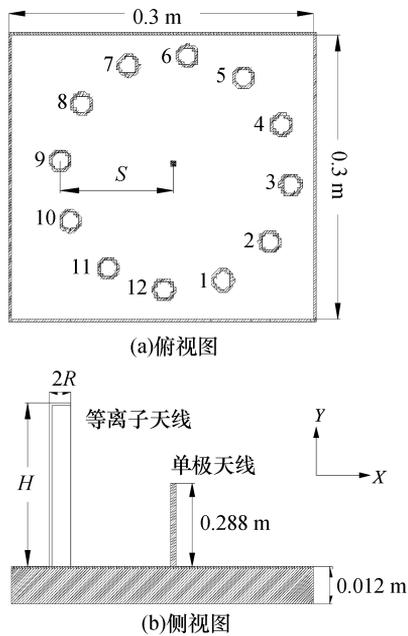


图 1 等离子体圆形反射器天线模型

Fig.1 Model of plasma Round reflector antenna

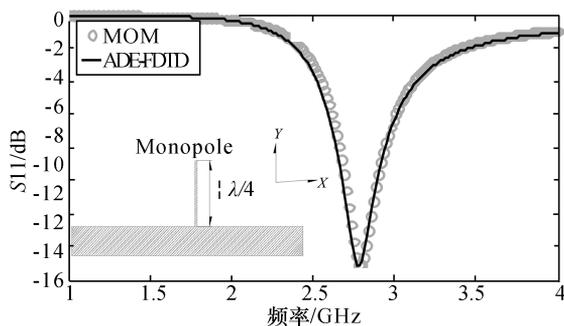


图 2 单极金属天线反射系数的计算结果

Fig.2 Reflection coefficient results of metal monopole Antenna

下面将首先对 PRRA 系统的归一化辐射方向图进行计算,以考察所设计天线系统对辐射波束的控制能力.计算时的空间步长取 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.001 \text{ m}$,整个计算空间区域将被剖分成 $300 \times 300 \times 100$ 个网格,区域四周则设置 10 个网格的完全匹配层(PML)吸收边界来截断 FDTD 计算区域.计算的时间步长为 $\Delta t = \Delta x / 2c_0$,天线处于工作状态时的等离子体电子密度 $n_e = 8 \times 10^{11} / \text{cm}^3$,等离子体碰撞频率为 $\nu_m = 500 \text{ MHz}$.

通过依次关闭 PRRA 系统中的 3 根(图 1 中

2~4 号)、5 根(1~5 号)和 7 根(1~6 号及 12 号)等离子体反射阵元,即可形成不同的等离子体反射面结构.从图 3(a)给出的这三种反射面天线的 H 面辐射方向图的计算结果可以看出,通过等离子体反射阵元的快速开关机制可以在极短的时间(微秒量级,取决于等离子体猝灭的时间)内改变圆形反射器天线的结构,进而迅速改变天线辐射波束的形状.比如,当关闭 PRRA 系统中的 1~6 号及 12 号反射阵元时,系统有着最宽的等离子体窗结构,天线系统辐射波束的主瓣较宽;关闭 2~4 号阵元时,则形成了最窄的等离子体窗结构,天线系统的指向性更高;关闭 1~5 号阵元时天线系统的辐射波束最为集中,后向辐射也最小,这一点对于远距离通讯是十分有利的.

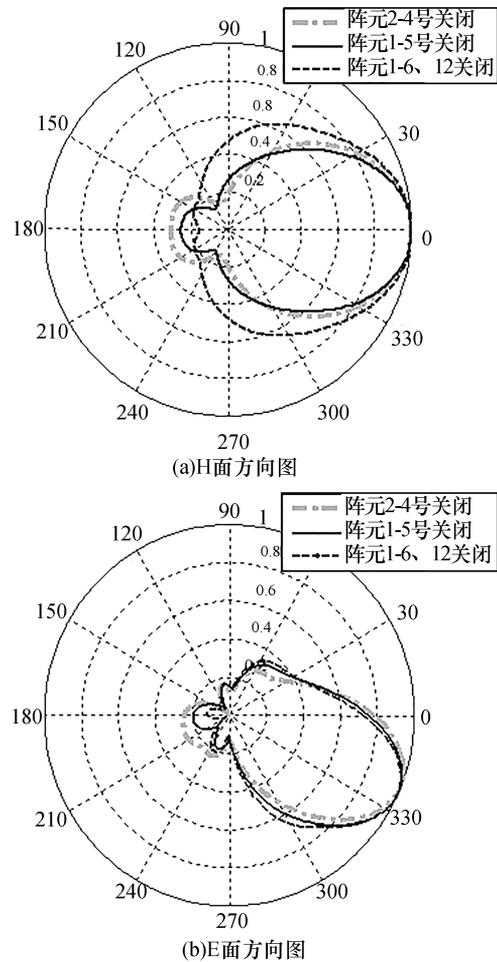


图 3 PRRA 系统的归一化辐射方向图 I

Fig.3 Normalized radiation pattern of PRRA I

此外,通过关闭不同的等离子体反射阵元,可以切换 PRRA 系统波束的辐射方向.图 4 同时给出了依次关闭了其中的 1~3 号、4~6 号、7~9 号、

10~12号反射阵元后,天线系统归一化辐射方向图的结果.计算结果表明,天线系统通过关闭相应的阵元分别在 $\varphi=30^\circ$ 、 120° 、 210° 和 300° 方向上实现了定向辐射的效果.

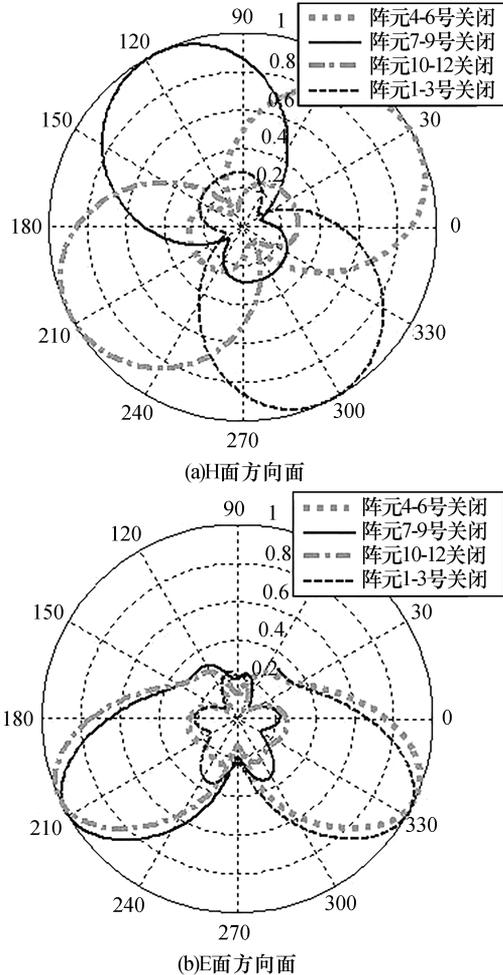


图4 PRRA系统的归一化辐射方向图 II
Fig.4 Normalized radiation pattern of PRRA II

图5为等离子体圆形反射器天线反射系数的模拟结果.模拟结果表明:PRRA所形成的这三种反射面结构均有很宽的带宽.尤其是当天线系统的反射面是由6~12号反射阵元组成时,系统的工作带宽(反射系数小于-10 dB)为2.45~3.85 GHz,超过了1 GHz.另外,任意关闭相同数量的反射阵元并不会对PRRA系统的反射系数造成太大的影响,系统的匹配频点基本都在2.5 GHz处附近.

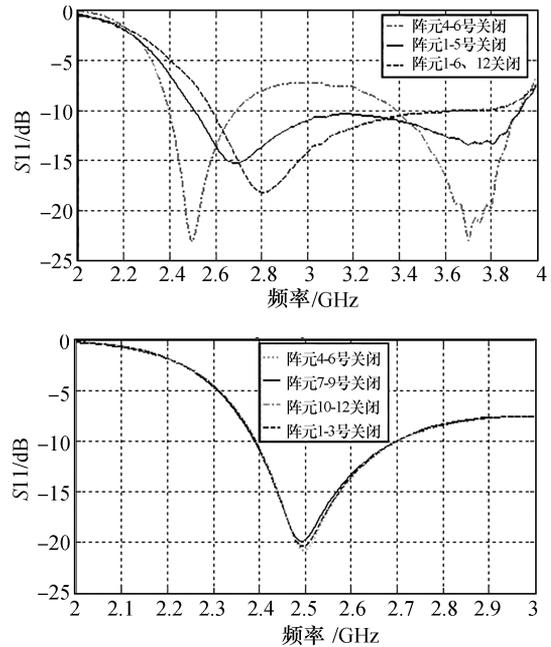


图5 PRRA系统反射系数计算结果
Fig.5 Reflection coefficient results of PRRA

4 结论

本文对一种可动态重构的等离子体圆形反射器天线系统的辐射特性进行了计算和分析.计算结果表明,该天线系统充分利用等离子体电可控的特性,可在微秒量级内切换天线系统的工作波形及改变系统的散射参数,实现等离子体圆形反射器天线辐射特性的快速动态重构.同时该天线系统还有较宽的工作带宽.因而具有传统金属反射器天线所无法比拟的优势.

参考文献:

- [1] ANDERSON T. Plasma Antennas [M]. Norwood: Artech House Publishers, 2011: 1-203.
- [2] SADEGHKIA F, HODJAT-KASHANI F. A two element plasma antenna array [J]. Engineering, Technology and applied science research, 2013, 5(3): 516-521.
- [3] ASMA K, JEROME S. Leaky-wave plasma antenna with tunable radiation angle [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2015, 56(11): 2601-2604.
- [4] 朱安石, 陈自力, 刘晓倩, 等. 等离子天线重构特性数值计算 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(3): 515-522.
- [5] KIRICHENKO Y, LONIN Y, ONISHCHENKO I. Axial-radiation plasma antenna [J]. Journal of Communications Technology and Electronics. 2014, 59(3): 269-274.

(下转第53页)

- measured dynamically based on the relevant low-frequency principal components reconstruction[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(10): 105005.
- [13] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[C]// Advances in Neural Information Processing Systems. 2012: 1097-1105.
- [14] ROSTERN E, PORTER R, DRUMMOND T. Faster and better: a machine learning approach to corner detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(1): 105-119.
- [15] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition [J]. ArXiv Preprint ArXiv, 2014, 1409-1556.
- [16] GUO Y, SOHEL F, BENNAMOUN M, et al. Rotational projection statistics for 3D local surface description and object recognition[J]. International Journal of Computer Vision, 2013, 105(1): 63-86.
- [17] CHOPRA S, HADSELL R, LECUN Y. Learning a similarity metric discriminatively, with application to face verification[C]// Computer Vision and Pattern Recognition, USA: IEEE, 2005: 539-546.
- [18] ZAGORUYKO S, KOMODAKIS N. Learning to compare image patches via convolutional neural networks[C]// Computer Vision and Pattern Recognition, USA: IEEE, 2015: 4353-4361.

(上接第42页)

- [6] ANDERSON T, HALEAKALA R. Theory, measurements, and prototypes of plasma antennas[C]// IEEE antennas and Propagation Society International Symposium (AP-SURSI), 2014: IEEE. IEEE, 2014: 567-568.
- [7] 赵建森, 张芝涛. 40.68 MHz 交流等离子体天线电磁兼容性实验研究[J]. 高压电技术, 2014, 40(6): 1756-1761.
- [8] 黄方意, 时家明, 袁忠才, 等. 基于等离子体的定向天线阵理论与实验研究[J]. 物理学报, 2013, 62(15): 269-276.
- [9] 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: 1-260.
- [10] 陈文波, 龚学余, 邓贤君, 等. THz 电磁波在时变非磁化等离子体中的传播特性研究[J]. 物理学报, 2014, 63(19): 82-87.

(上接第46页)

参考文献:

- [1] 杨卫峰, 曾嵘. DTECS 系统 TCN 协议的设计[J]. 机车电传动, 2009(2): 22-23.
- [2] 宁寿辉, 李常贤, 王杰. TCN 列车网络管理的研究与实现[J]. 机车电传动, 2007(5): 31-32.
- [3] 湛育民, 彭冬良. 基于 OPC 技术的地铁网络控制调试软件的设计与实现[J]. 电力机车与城轨车辆, 2012, 35(1): 40-42.
- [4] LI G, LI W J, SU Q Q, et al. Monitoring and control system of underground coal gasification based on industrial Ethernet and PLC [C] // Switzerland: Trans Tech Publications, 2014: 1376-1380.
- [5] IEC 61375-1, Electric railway equipment-Train bus-Part 1: Train Communication Network[S]. Switzerland: IEC, 2007.
- [6] 刘群欣. TCN 列车网络管理及监视配置软件的研究与实现[J]. 机车电传动, 2013(3): 46-49.
- [7] 赵众, 邹芳云, 徐宁, 等. OPC 客户端程序开发机器在集散控制系统中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2007, 34(3): 42-46.
- [8] 陈江婷, 罗三定. 图形化组态的数字图像处理实验系统的设计[J]. 科技广场, 2010(3): 102-105.
- [9] MA H, XU J B. Design of remote monitoring and control system for mine Water Storehouse based on PLC [C] // Switzerland: Trans Tech Publications, 2012: 1595-1601.
- [10] ZHANG H W. Online Monitoring System of the Mine Main Fan [C] // Switzerland: Trans Tech Publications, 2013: 376-379.