



·高功率微波技术专辑·

一种高功率微波宽带紧耦合偶极子阵列天线*

龚鸿州, 张建德, 袁成卫, 张强, 许亮

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

摘要: 提出了一种新型高功率微波宽带紧耦合偶极子阵列天线。在常规的紧耦合偶极子阵列天线的基础上, 该阵列天线通过采用全金属结构设计、天线匹配层和密封层一体化设计以及调节天线结构的手段, 获得了宽带高功率性能。仿真结果显示, 在 0.8~4.0 GHz 的范围内, 天线未扫描时的驻波比小于 2; 在 16 mm×32 mm 单元尺寸内和 1 个大气压的 SF₆ 气体中, 功率容量达到 0.12 MW; 以该单元天线组成 10×10 阵列, 100 个单元总尺寸仅为 160 mm×320 mm, 在 1 个大气压的 SF₆ 气体中, 功率容量可以达到 12 MW, 另外, 该天线可实现 45° 的宽角扫描。该阵列天线的提出为实现高功率微波宽带天线的宽频带、大角度扫描、紧凑化、小型化以及低剖面化提供了参考。

关键词: 高功率微波; 紧耦合; 波束扫描; 功率容量; 紧凑性

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230139

A tightly coupled dipole array antenna with high power and broadband

Gong Hongzhou, Zhang Jiande, Yuan Chengwei, Zhang Qiang, Xu Liang

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A novel tightly coupled dipole array antenna with high power and broadband is proposed in this paper. On the basis of conventional tightly coupled dipole array antennas, and by adopting an all-metal structure design, an integrated design of antenna matching layer and sealing layer, and a method of adjusting the antenna structure, a high-power and broadband performance of such an array antenna is obtained. The simulation results show that the standing wave ratio of the array antenna is less than 2 at the broadside in the range of 0.8-4.0 GHz. And the power capacity of an element antenna reaches 0.12 MW within the size of 16 mm × 32 mm in the space full of SF₆ at one atmospheric pressure. Moreover, the power capacity of the 10×10 array antenna composed of 100 elements can reach 12 MW within the size of 320 mm × 640 mm in the space full of SF₆ at one atmospheric pressure. In addition, the array antenna can achieve a wide-angle scan of 45°. The proposed array antenna provides a solution for high-power microwave broadband antennas to achieve a broadband, large-angle scanning, compact, miniaturized, and low-profile performance.

Key words: high-power microwave, tight coupling, beam scanning, power handling capacity, compactness

宽带高功率微波技术的发展, 对高功率宽带微波天线提出了更高的技术要求^[1]。以近年来快速发展的光导高功率微波技术^[2-3]为例, 光导高功率微波不仅具有高峰值的特点, 同时也具有频率脉宽可调的特点, 需要高功率宽带天线来发射。而传统的宽带高功率微波天线通常采用较为大型的脉冲辐射天线以及 TEM 喇叭天线^[4-6], 这些天线已经难以满足宽带高功率微波技术发展对于功率容量、带宽以及相扫的需求。高功率微波宽带天线朝阵列化方向发展可解决天线功率容量需求的瓶颈, 阵列天线周期化使天线能够通过调整阵面的大小来满足高功率容量需求^[7-8]。紧耦合偶极子阵列天线是一种利用天线之间的电场的强耦合效应来扩展天线的带宽和扫描角的阵列天线形式^[9-10], 通常应用在常规天线领域。该天线所具有的宽带特性以及大角度扫描特性都是宽带高功率微波技术目前亟需的天线特性, 但是其介质板形式的结构、耦合结构间的强电场以及馈电结构与天线间的阻抗不匹配都限制

* 收稿日期: 2023-05-18; 修订日期: 2023-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(62071477, 62101577); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ40660)

联系方式: 龚鸿州, bhghz@163.com。

通信作者: 袁成卫, cwuyuan@nudt.edu.cn。

了其在高功率领域的应用。因此,我们设计了一种新型的高功率紧耦合偶极子阵列天线,通过采用全金属结构、调整天线结构以及设计阻抗变换器,提出了紧耦合偶极子阵列天线在高功率领域的应用方案。

1 高功率微波紧耦合偶极子单元天线设计

由紧耦合偶极子天线的设计原理可知^[11-12],紧耦合偶极子单元天线通常由馈电端、阻抗匹配线、天线以及匹配层构成,其通常采用介质板形式^[13-14]。为了提高天线的功率容量,我们做了如下改进:一个是采用单元天线全金属结构,避免在金属、介质板和空气三结合点处激起较大的场强;二是将匹配介质板上移避免介质板和天线直接接触;三是采用上下耦合以及大面积耦合的方式,在保证耦合结构容抗的同时,也避免耦合结构影响天线的功率容量;四是使用全金属结构的同轴-平板阻抗变换器,实现馈电阻抗与天线阻抗相匹配;五是将介质匹配层与密封层一体化设计,选用密封性能较好的高分子材料实现阻抗匹配和密封一体化设计。

1.1 单元天线设计

改进设计后的高功率紧耦合偶极子单元天线的结构如图1(a)所示,电磁信号由馈电端进入,通过同轴-平板的转换结构将馈电阻抗的 $50\ \Omega$ 转换为天线输出的 $100\ \Omega$,天线的匹配层实现天线的阻抗匹配功能,电磁信号通过天线稳定地辐射出去。偶极子天线的四周设有周期边界,其天线的振子与相邻天线的振子相连。

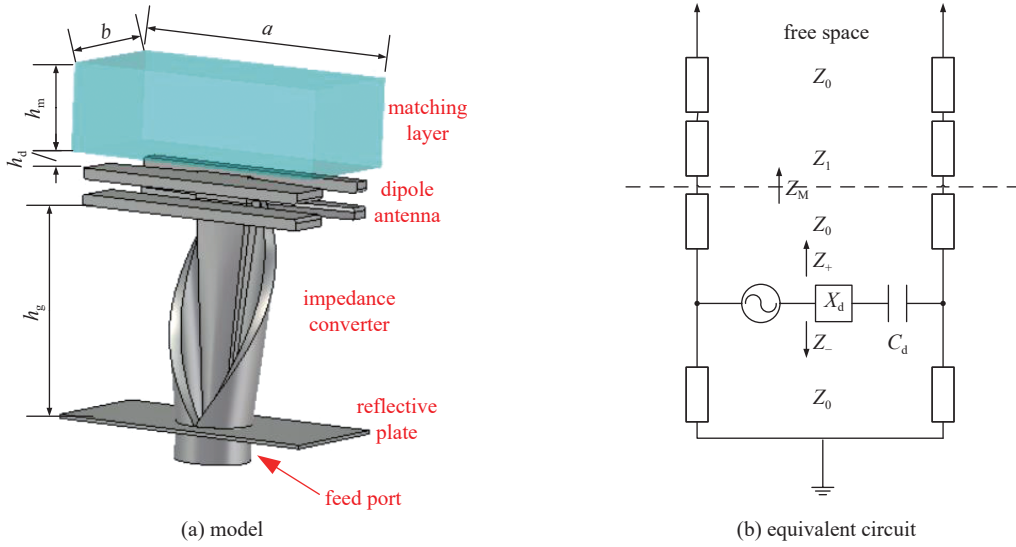


Fig. 1 High power tightly coupled element antenna

图1 高功率紧耦合偶极子单元天线模型图及等效电路图

根据 Wheeler 关于紧耦合偶极子天线的设计原理的论述^[12,15],无限大的紧密排布的紧耦合偶极子天线在空间中构成一个“虚拟波导”,其特征阻抗为

$$Z_0 = \frac{b}{a}\eta \quad (1)$$

式中: a 、 b 是单元天线的长和宽, η 为自由空间的波阻抗, $\eta=377\ \Omega$ 。

根据 Munk 提出的关于紧耦合偶极子天线等效电路模型的相关理论^[11],可以得到改进后的紧耦合偶极子天线等效电路如图1(b)所示,此时天线的等效阻抗为

$$Z_A = Z_+ \parallel Z_- + jX_d + \frac{1}{j\omega C_d} \quad (2)$$

式中: Z_+ 、 Z_- 分别为从天线向自由空间看过去所得到的天线阻抗、从天线向地板看过去所得到的天线阻抗, X_d 为偶极子天线自身的感抗, C_d 为偶极子天线耦合结构中耦合电容。 Z_+ 和 Z_- 分别可由以下公式计算得到

$$Z_1 = Z_0/\varepsilon \quad (3)$$

$$Z_M = Z_1 \frac{Z_0 + jZ_1 \tan(2\pi h_m/\lambda_1)}{Z_1 + jZ_0 \tan(2\pi h_m/\lambda_1)} \quad (4)$$

$$Z_+ = Z_0 \frac{Z_M + jZ_0 \tan(2\pi h_d/\lambda_0)}{Z_0 + jZ_M \tan(2\pi h_d/\lambda_0)} \quad (5)$$

$$Z_L = jZ_0 \tan(2\pi h_g / \lambda_0) \quad (6)$$

式中: Z_0 、 Z_1 分别为天线所构成的空间“虚拟波导”的特征阻抗, ε 为高分子材料的介电常数, 这里取 $\varepsilon=2.3$, h_g 、 h_d 、 h_m 分别为天线距离地板的高度、匹配层与天线的间距以及天线匹配层的厚度, 这里分别取 30 mm、20 mm、2 mm, 如图 1(a) 所示, λ_0 、 λ_1 分别为自由空间的波长和介质匹配层中的波长。

因此天线的阻抗可以由式(2)得到, 在不考虑偶极子天线自身的感抗 X_d 和天线之间的耦合电容 C_d , 令 $a/b=2$, 具体 $a=32$ mm 和 $b=16$ mm, 通过 Matlab 可以计算得到天线的阻抗实部和虚部。天线的阻抗如图 2 所示, 可以看到, 在 1~4 GHz 的频率范围内, 天线的阻抗实部在 100 Ω 附近, 天线阻抗虚部在 0 Ω 附近。这里将 a/b 取 2, 是因为 a/b 过小会导致天线单元阻抗变大, a/b 过大会导致阵列天线的方向图出现栅瓣。而天线的虚部阻抗需要保持在 0 Ω 附近, 这是因为虚部阻抗的存在会导致天线和馈电的失配, 引起反射从而影响天线的辐射性能, 因此需要通过调节耦合结构的耦合电容 C_d 来抵消紧耦合偶极子天线自身的感抗 X_d 。因此, 当天线的实部阻抗在频带范围内保持 100 Ω 附近, 需要设计一个 50 Ω 的同轴到 100 Ω 的平板的阻抗变换段来给天线馈电。

1.2 单元天线馈电结构设计

单元天线的阻抗实部为 100 Ω , 但是馈电端通常采用为 50 Ω 同轴, 因此需要设计一个 50 Ω 到 100 Ω 的转换结构。我们采用同轴转平板结构如图 3 所示, 同轴为标准的 N 型馈电端口, 通过阻抗变换为 100 Ω 的平板给天线馈电。平板阻抗的计算公式近似为^[16]

$$Z_0 = \frac{\eta}{\frac{w}{d_p} + \frac{1}{\pi} \left[1 + \ln \left(\frac{2\pi w}{d_p} + 5.9 \right) \right]} \quad (7)$$

式中: w 为平板的宽度, d_p 为平板的间距, 通过计算可得平板阻抗为 100 Ω 的时候, w/d 为 2.475。因此同轴到平板的结构如图 3 所示, 此时 w 为 7.6 mm, d_p 为 2 mm。

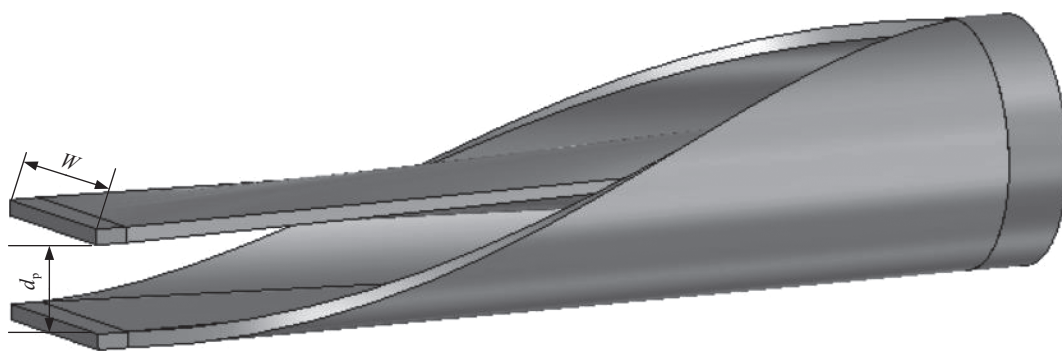


Fig. 3 Coaxial-planar waveguide transition

图 3 同轴-平板阻抗变换结构

2 高功率微波紧耦合偶极子阵列天线设计

2.1 阵列天线耦合结构设计

当偶极子单元天线紧密密布时, 偶极子单元天线自身的阻抗主要呈感性, 因此需要利用紧耦合偶极子相邻单元天线之间的耦合电容 C_d 来抵消天线自身的感抗 X_d , 从而使偶极子单元天线的虚部稳定在 0 附近, 来扩展天线的带宽。在紧耦合偶极子阵列天线中, 耦合结构的容抗是由耦合结构间的强电场所提供的, 常规的紧耦合偶极子天线通常采用极小的间距来实现天线的强耦合效应, 但是过于集中的场强会限制天线的功率容量, 使这种耦合结构难以在高功率领域应用。在耦合结构中, 耦合电容的计算公式为

$$C_d = \frac{\varepsilon S}{4\pi k d_c} \quad (8)$$

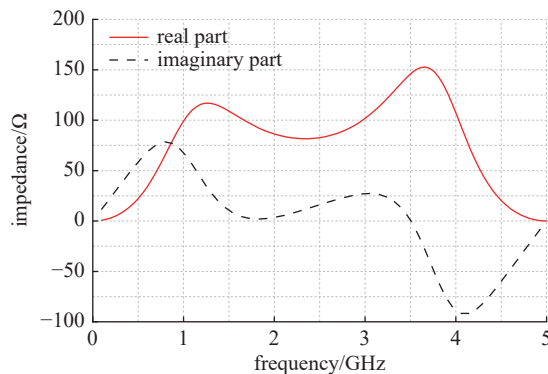


Fig. 2 Theoretical impedance of tightly coupled dipole antenna

图 2 紧耦合偶极子单元天线理论阻抗

式中： ε 为耦合结构中所填充介质的介电常数， S 为耦合面积，即相邻偶极子天线振子重叠的面积， k 为波数， d_c 为相邻天线上下振子之间的间距。在不改变耦合结构中 ε 的时候，为了增加耦合电容，需要增加 S 减少 d_c ；为了降低耦合结构中的场强，需要增加 d_c 。为了平衡两方面需求，可以同时适度扩大 S 和 d_c 。为了保证天线的功率容量，我们采用如图4所示的上下耦合的方式，通过调整耦合结构中的耦合面积 S 和耦合间距 d_c ，使天线阻抗虚部在频带范围保持 $0\ \Omega$ 附近，同时尽量扩大耦合间距 d_c 降低天线的场强。通过优化之后，天线的耦合面积 S 为 $23\ \text{mm}\times 9\ \text{mm}$ ，耦合间距 d_c 为 $2\ \text{mm}$ 。

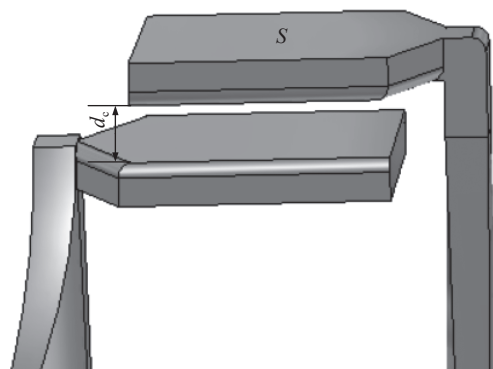


Fig. 4 Coupled structure

图4 耦合结构

2.2 紧耦合偶极子阵列天线结构

在确定单元天线结构之后，将单元天线紧密排布，可以组成周期性的阵列天线。如图5所示的阵列天线为100个单元的紧耦合偶极子单元天线所组成，天线上方的介质匹配层为高分子材料，即用作天线的阻抗匹配，也与添加在四周的高分子材料一体化设计实现天线密封性能，以充1个大气压的 SF_6 气体来提高天线的功率容量。100单元紧耦合偶极子阵列天线加上密封结构，总尺寸为 $400\ \text{mm}\times 220\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$ ，该结构实现了紧耦合偶极子阵列天线的小型化和紧凑化。

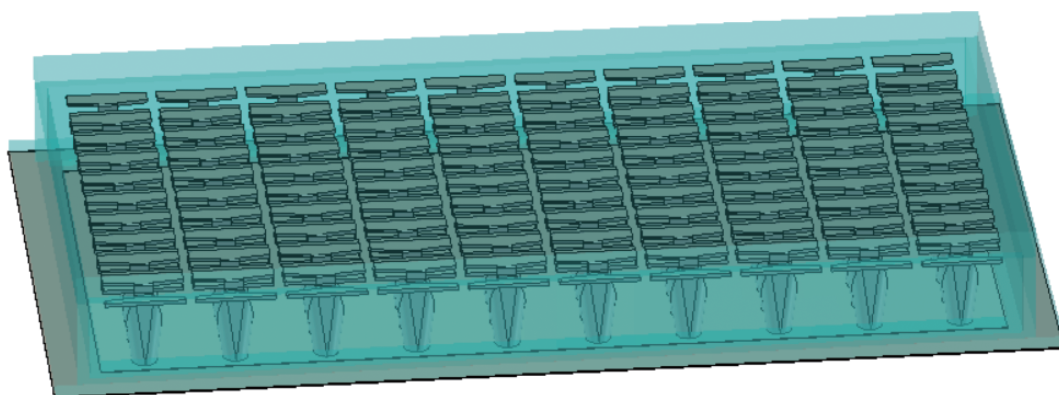


Fig. 5 Tightly coupled dipole array antenna

图5 紧耦合偶极子阵列天线

3 天线仿真结果

利用CST对图1(b)中的紧耦合偶极子天线进行仿真，在单元天线四周添加周期边界，仿真得到的天线驻波比如图6所示，在 $0.8\sim 4.0\ \text{GHz}$ 的频率范围内，天线未扫描时的驻波比小于2，当天线 E 面扫描角为 45° 时，天线驻波比小于2.3，当天线 H 面扫描角为 45° 时，天线驻波比小于3.2。

阵列天线的增益曲线如图7所示，其中天线的口径理想增益的计算公式为

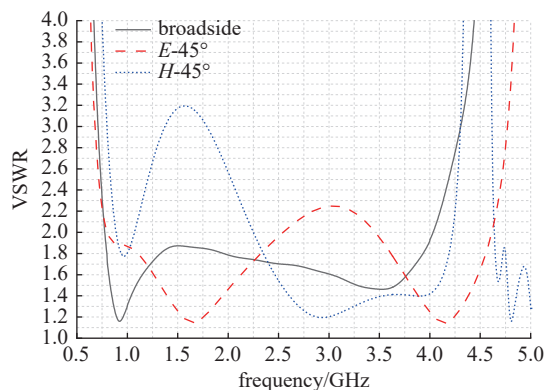


Fig. 6 VSWR of tightly coupled dipole element antenna

图6 紧耦合偶极子单元天线的驻波比

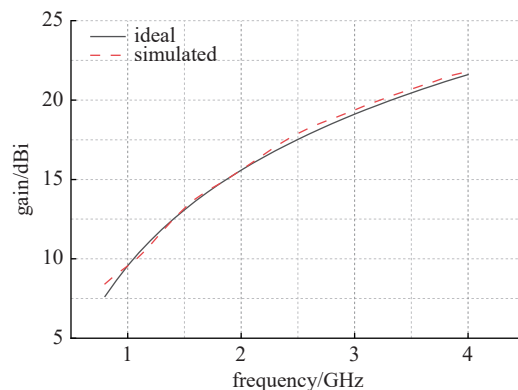


Fig. 7 Gain of tightly coupled dipole array antenna

图7 紧耦合偶极子阵列天线增益

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (9)$$

式中: A 为天线的口径面积, 未包括天线反射板向四周延伸的部分。可以看到阵列天线的仿真增益从 0.8 GHz 的 8.45 dBi 到 4.0 GHz 的 21.8 dBi, 与理想口径增益曲线基本吻合, 这说明该天线的增益特性好。需要注明的是, 部分频段的仿真增益大于口径理想增益, 是由于天线反射板向四周延伸的部分也起到了一定的辐射效果。

阵列天线的三维辐射方向图如图 8 所示, 辐射方向图副瓣电平低、无栅瓣, 满足高功率阵列天线的辐射要求。

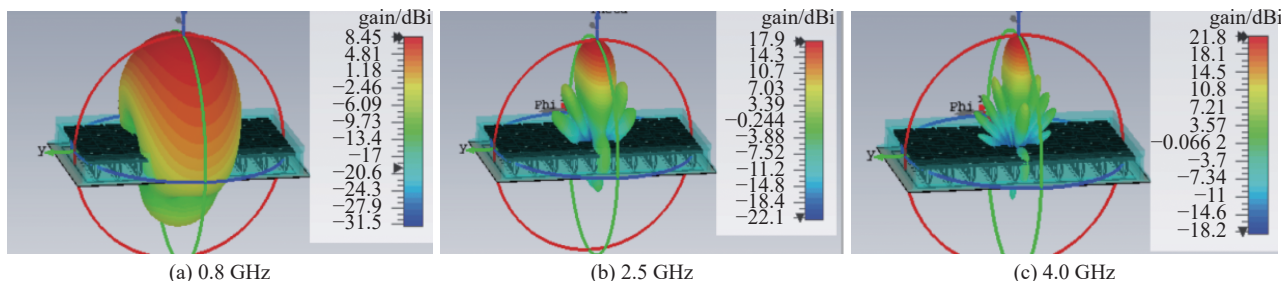


Fig. 8 Three-dimensional radiation pattern of tightly coupled dipole array antenna

图 8 阵列天线三维辐射方向图

紧耦合偶极子阵列天线在 E 面和 H 面 45° 扫描时的二维归一化方向图如图 9 所示, 可以看到天线在 E 面和 H 面扫描到 45° 时, 方向图主瓣覆盖 45° 的扫描角, 天线辐射方向图副瓣电平低, 无栅瓣, 阵列天线满足 45° 扫描要求。

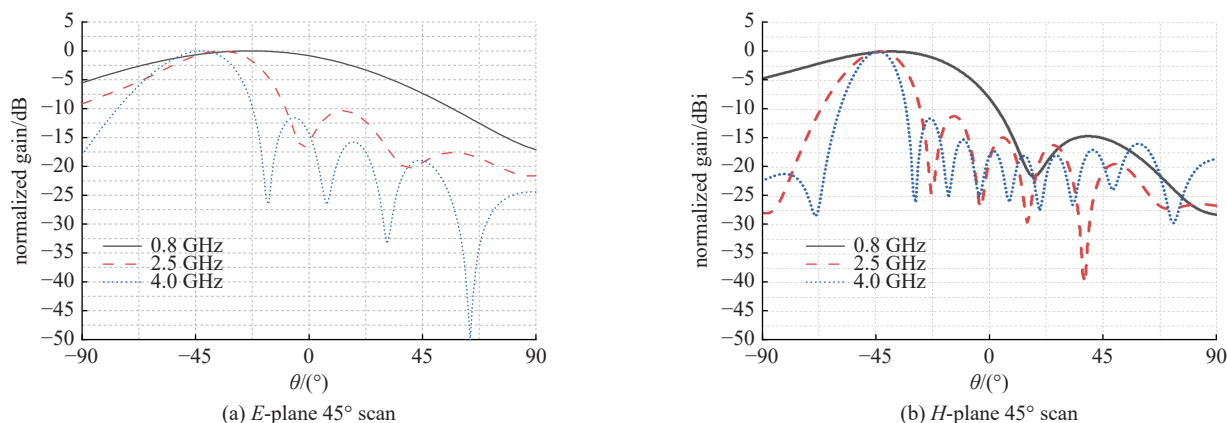


Fig. 9 Beam-scanning performance for E-plane and H-plane of tightly coupled dipole array antenna

图 9 紧耦合偶极子天线的 E 面和 H 面的波束扫描特性

紧耦合偶极子单元天线的电场分布如图 10 所示, 可以看到天线在 0.8 GHz 时出现最大的场强, 最大场强为 14 503 V/m, 在 1 个大气压的 SF_6 气体中, 其击穿场强保守估计取 70 kV/cm, 计算可得尺寸为 16 mm×32 mm 单元天线的功率容量为 0.12 MW。这说明以该单元天线组成一个 10×10 的天线阵列, 此时阵列天线的尺寸为 160 mm×320 mm, 在 1 个大气压的 SF_6 气体中, 天线的功率容量可达到 12 MW。

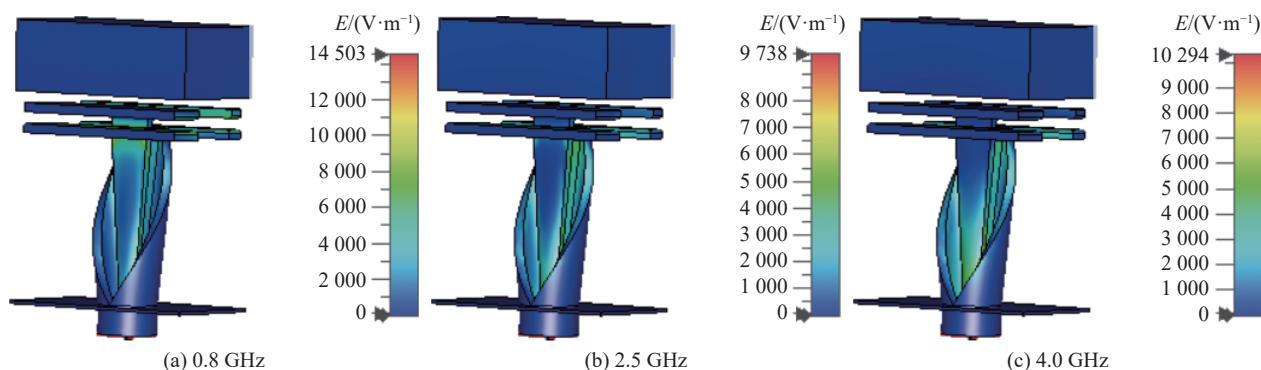


Fig. 10 Electric field distribution of tightly coupled dipole element antenna

图 10 紧耦合偶极子单元天线电场分布图

4 结 论

本文提出和设计了一种新型高功率微波宽带紧耦合偶极子阵列天线,并进行了数值仿真。仿真结果表明,在0.8~4.0 GHz的范围内,阵列天线未扫描时驻波比小于2;尺寸为16 mm×32 mm的单元天线在1个大气压的SF₆气体中,功率容量达到0.12 MW;以该单元天线组成10×10阵列,100个单元组成阵列天线总尺寸仅为160 mm×320 mm,在1个大气压的SF₆气体中,其功率容量可以达到12 MW;阵列天线可实现45°的宽角扫描。该阵列天线的提出为实现高功率微波宽频带的宽频带、大角度扫描、紧凑化、小型化以及低剖面化提供了参考。

参考文献:

- [1] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E. High power microwaves[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [2] 楚旭,王朗宁,朱效庆,等.基于光导半导体的MHz高重频可调谐脉冲产生技术研究[J].*强激光与粒子束*, 2022, 34: 075006. (Chu Xu, Wang Langning, Zhu Xiaoqing, et al. Research on tunable pulse generation with MHz repetition rate based on compensated 4H-SiC photoconductive semiconductor[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 075006)
- [3] Wang Langning, Chu Xu, Wu Qilin, et al. Effects of high-field velocity saturation on the performance of V-doped 6H silicon-carbide photoconductive switches[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(4): 4879-4886.
- [4] Prather W D, Baum C E, Torres R J, et al. Survey of worldwide high-power wideband capabilities[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, 46(3): 335-344.
- [5] Sabath F, Nitsch D, Jung M, et al. Design and setup of a short pulse simulator for susceptibility investigations[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(5): 1722-1727.
- [6] Ryu J, Kim K, Lim T H, et al. Integrated-antenna-source of directive peak electric-field patterns for high-power ultrawideband parabolic reflector system[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(4): 727-731.
- [7] Wang Shaofei, Xie Yanzhao, Qiu Yangxin. A kind of tightly coupled array with nonuniform short-circuited branches for the radiation of UWB pulses[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(3): 2259-2267.
- [8] Yu Longzhou, Yuan Chengwei, He Juntao, et al. Beam steerable array antenna based on rectangular waveguide for high-power microwave applications[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(1): 535-541.
- [9] LI Linfeng, Yan Jiebang, O'Neill C, et al. Coplanar side-fed tightly coupled ultra-wideband array for polar ice sounding[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(6): 4331-4341.
- [10] Tzanidis I, Sertel K, Volakis J L. UWB low-profile tightly coupled dipole array with integrated balun and edge terminations[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(6): 3017-3025.
- [11] Munk B A. Finite antenna arrays and FSS[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
- [12] Wheeler H A. The radiation resistance of an antenna in an infinite array or waveguide[J]. *Proceedings of the IRE*, 1948, 36(4): 478-487.
- [13] Quan Xin, Cao Zhenxin, Zhou Huaimin, et al. Common-mode resonance suppressing surface for tightly coupled array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(12): 12358-12363.
- [14] Zhang Zhechen, Wang Bingjun, Yang Feng, et al. Conical conformal tightly coupled dipole arrays co-designed with low-scattering characteristics[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(12): 12352-12357.
- [15] Wheeler H. Simple relations derived from a phased array made of an infinite current sheet[C]//1964 Antennas and Propagation Society International Symposium. 1964: 157-160.
- [16] 黄志洵,王晓金.微波传输线理论与实用技术[M].北京:科学出版社,1996. (Huang Zhixun, Wang Xiaojin. Theory and practical technology of microwave transmission lines[M]. Beijing: Science Press, 1996)