

高功率微波径向线连续横向枝节阵列天线设计*

孙云飞, 贺军涛, 袁成卫, 张强, 张泽海
(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 为了实现 Ku 波段高功率微波的定向发射, 研究并设计了新型高功率径向线连续横向枝节阵列天线。该天线采用圆极化同轴 TE_{11} 模式进行馈电, 经双层径向线波导传输后, 通过连续横向枝节单元向外辐射。天线工作在驻波模式, 相邻两圈缝隙的径向间距为一个波导波长, 在上层径向线末端放置短路金属杆, 金属杆表面到最内侧缝隙的径向间距为半个波导波长, 整个天线具有较高的增益和功率容量。仿真研究了一个工作在 14.25 GHz 的天线, 天线的高度为 80 mm, 半径为 285 mm。仿真结果表明: 该天线具有 35.3 dBi 的增益和 47% 的口径效率, 反射系数小于 -25 dB, 辐射效率超过 99.0%, 同时具有吉瓦级的功率容量。

关键词: 连续横向枝节; 径向线波导; 高功率微波; Ku 波段

中图分类号: TN82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2020)05-085-05

Design of radial line continuous transverse stub antenna for high-power microwave applications

SUN Yunfei, HE Juntao, YUAN Chengwei, ZHANG Qiang, ZHANG Zehai

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

Abstract: In order to realize the directed radiating of Ku-band HPM (high-power microwave), a RL-CTSA (radial line continuous transverse stub antenna) was proposed. The antenna was fed by circularly polarized coaxial TE_{11} mode and radiated by a concentric CTS (continuous transverse stub) array after the wave propagation through a double-layered radial line waveguide. The interspace between adjacent stubs along radial direction was equal to one guide wavelength, a shorting pin was located at the end of the upper radial line waveguide and the space between the pin's surface and the innermost CTS radiator's center was half a guide wavelength. As a result, the HPM-RL-CTSA works on standing wave. An antenna prototype with a height of 80 mm and an aperture radius of 285 mm operating at 14.25 GHz has been designed, which has a gain of 35.3 dBi, reaching an aperture efficiency of 47%. The reflectance of this antenna is less than -25 dB and the radiation efficiency is more than 99.0%. The simulated results indicate that this antenna has a power handling capacity of more than 1 GW.

Keywords: continuous transverse stub; radial line waveguide; high-power microwave; Ku-band

天线作为高功率微波系统的辐射装置, 其特性直接决定了高功率微波系统的性能^[1]。由于高功率微波的特殊性, 高功率微波天线需要满足一些特殊的要求, 例如高功率容量、高辐射效率、高增益等^[2-8]。多数高功率微波源的输出模式为旋转轴对称模式, 如同轴 TEM 模式、圆波导 TM_{01} 模式等, 如果这些模式直接由传统的喇叭天线辐射, 会产生轴向为零的环状方向图, 不利于高功率微波能量的汇聚。近年来, 研究人员设计了多种适用于高功率微波的辐射系统, 包括模式转换天线^[2]、模式转换器 + 喇叭天线^[3-4]、径向线螺旋阵子天线^[5]、矩形波导窄边裂缝天线^[6]、高功率径向线缝隙阵列天线^[7-8]等。但是这些天线都只适

用于较低的工作频段, 如 L、S 和 X 波段。高频率是高功率微波技术发展的一个重要方向^[9-10], 目前在 Ku 波段已取得了 GW 量级的微波输出, 现有高功率微波天线难以满足其应用需求。连续横向枝节 (Continuous Transverse Stub, CTS) 天线被广泛应用于高频段卫星和手机通信中^[11-12], 它具有低剖面、低损耗、对加工精度要求不高等优点, 但是由于其内部通常填充了介质材料, 造成了其功率容量较低, 不能直接应用于高功率微波领域。基于此, 本文提出并研究了一种全金属的径向线 CTS 阵列天线, 该天线具有较高的功率容量和较高的辐射效率, 同时具有紧凑的结构, 可以用于 Ku 波段高功率微波的发射。

* 收稿日期: 2019-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51706242)

作者简介: 孙云飞 (1992-), 男, 河南舞阳人, 博士研究生, E-mail: sunyunfei_gfkd@163.com;

袁成卫 (通信作者), 男, 研究员, 博士, 硕士生导师, E-mail: cwuyuan@nudt.edu.cn

1 天线结构

高功率微波 CTS 阵列天线的具体结构如图 1 所示。天线采用双层径向线波导馈电,在上层径向线波导的外侧,同心排布着若干圈 CTS 辐射单元,相邻辐射单元的径向间距为一个波导波长。在上层径向线波导的末端有一个短路金属杆,金属杆表面到最里圈缝隙中心的径向距离为半个波导波长,因此该天线工作在驻波状态。天线由同轴波导圆极化 TE_{11} 模式注入,并通过 CTS 单元向外辐射,最终可以产生圆极化的实心方向图。

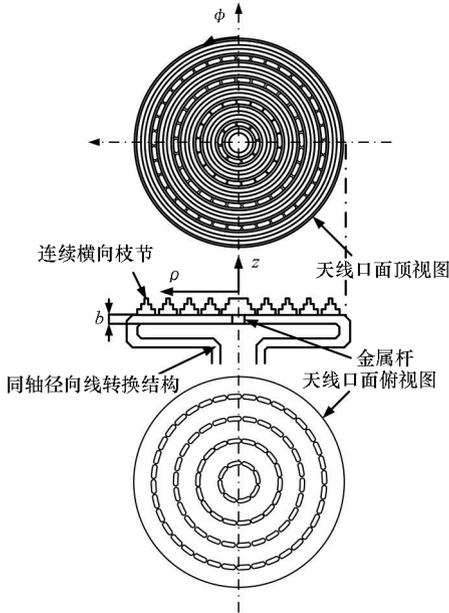


图 1 天线结构视图

Fig. 1 Sketch of the antenna

2 天线设计

2.1 辐射单元设计

CTS 辐射单元是天线的关键部件,它的结构如图 2 所示。该单元由三层台阶构成,枝节的总高度为 h ,单层台阶的高度为 $h/3$,各层台阶的宽度如图 2 所示。为了将相邻两圈枝节连在一起,在最底层的圆环状缝隙内加入了一些小的金属片,因此圆环状缝隙被分割成若干个胶囊状缝隙,分割后胶囊状缝隙的宽度为 w ,长度为 l 。为了降低天线旁瓣,胶囊状缝隙的长度需要小于一个波导波长,同时为了降低台阶处的表面电场,将台阶边缘进行倒角处理,倒角半径为 r 。另外,为了保证径向线波导内 TEM 模单模传输,径向线波导的高度 b 需要小于半个波导波长^[13]。

经过前面的分析,以 Ku 波段 14.25 GHz 为例,采用 CST 软件对 CTS 单元进行仿真优化,同

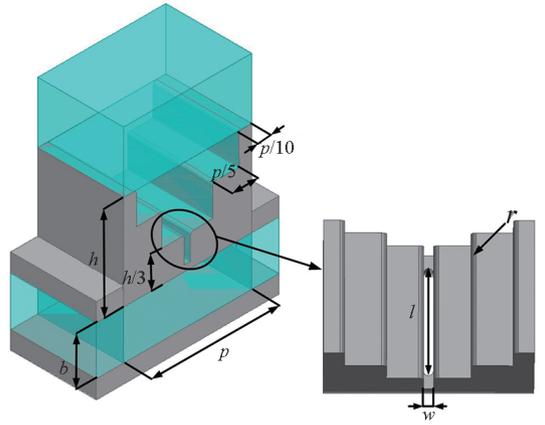
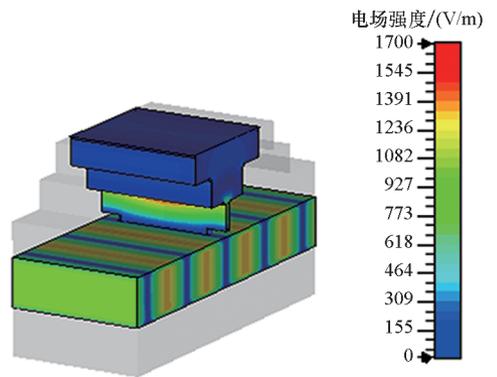


图 2 辐射单元结构视图

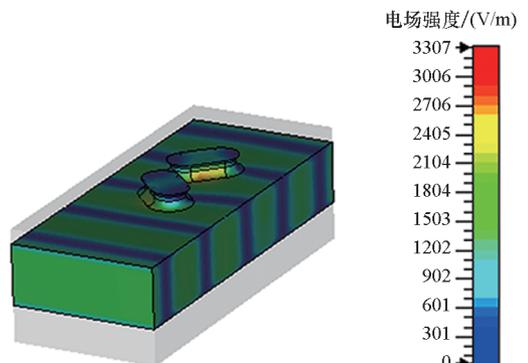
Fig. 2 Structure of the radiator unit

时与传统的缝隙结构进行对比。在仿真中,用平行平板波导加磁边界来替代一定角度的扇形径向线波导。优化后 CTS 单元的主要尺寸为相邻枝节径向间距 $p = 21 \text{ mm}$,枝节高度 $h = 15.6 \text{ mm}$,平行平板波导高度 $b = 8 \text{ mm}$,台阶倒角半径 $r = 0.5 \text{ mm}$ 。在耦合系数相同的情况下,仿真得到两个单元的内部电场分布及方向图,如图 3 所示。其中:CTS 单元内的最大电场强度为 1700 V/m ,最大电场强度出现在平行平板内,在缝隙处未发现电场集中现象。而传统缝隙辐射单元内的最大



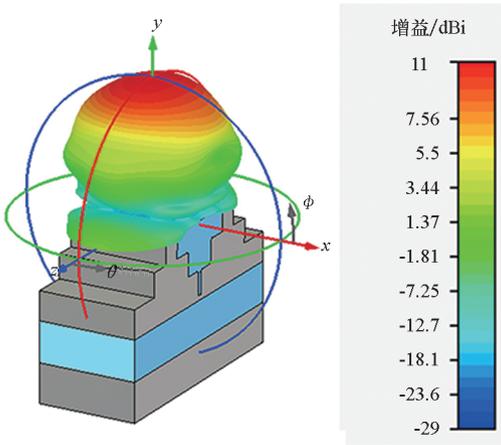
(a) CTS 辐射单元内部电场分布

(a) Electric field of the CTS radiator unit



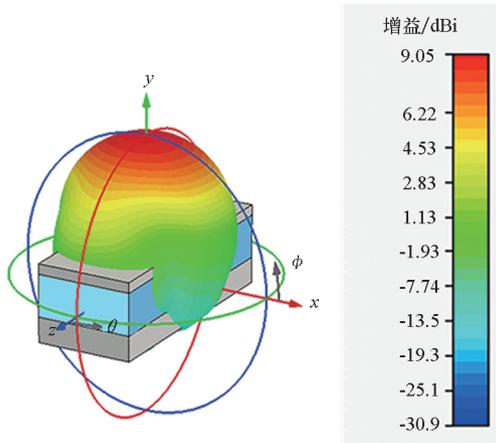
(b) 传统缝隙单元内部电场分布

(b) Electric field of the traditional slot unit



(c) CTS 辐射单元方向图

(c) Far-field radiation pattern of the CTS radiator unit



(d) 传统缝隙单元方向图

(d) Far-field radiation pattern of the traditional slot unit

图 3 CTS 辐射单元和传统缝隙单元的电场和方向图

Fig. 3 Electric field and far-field radiation pattern of the CTS radiator unit and traditional slot unit

电场强度为 3307 V/m, 因此 CTS 单元具有更高的功率容量。同时 CTS 单元的增益比传统缝隙单元高 1.95 dB。在仿真的过程中还发现, 当缝隙宽度在 0.1 ~ 3.5 mm 内变化时, CTS 单元的反射系数始终小于 -25 dB, 因此该天线不需要额外的抵消反射结构。

2.2 天线口面设计

为了得到一个均匀的口面电场分布, 各圈缝隙的归一化等效电阻需要满足特定的关系。首先建立如图 4 所示的圆柱坐标系, 在圆柱坐标系内, 柱面 TEM 模可以表示为^[13]:

$$E_z = k^2 [U_- H_0^{(1)}(k\rho) + U_+ H_0^{(2)}(k\rho)] \quad (1)$$

$$H_\phi = jk^2 [U_- H_1^{(1)}(k\rho) + U_+ H_1^{(2)}(k\rho)] / \eta \quad (2)$$

$$\begin{cases} E_\rho = 0 \\ E_\phi = 0 \\ H_\rho = 0 \\ H_z = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: $H_n^{(1)}(k\rho)$ 为第一阶 Hankel 函数, 代表内行柱面波; $H_n^{(2)}(k\rho)$ 为第二阶 Hankel 函数, 代表外行柱面波。

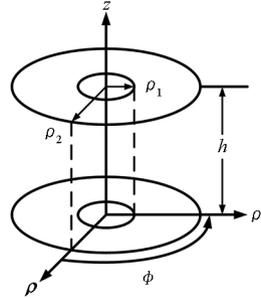


图 4 圆柱坐标系

Fig. 4 Cylindrical-coordinate system

当天线工作在驻波状态时, 由于经过不同柱面的能量相同, 因此有:

$$-\oint_{s_1} \mathbf{S}_1 \cdot d\mathbf{s} = -\oint_{s_2} \mathbf{S}_2 \cdot d\mathbf{s} \quad (4)$$

在上述表达式中, Poynting 矢量 \mathbf{S}_1 和 \mathbf{S}_2 分别为 ρ_1 和 ρ_2 处的能量流密度, 记为:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (5)$$

式(4)可以重写为:

$$|\mathbf{E}_{z1} \times \mathbf{H}_{\phi1}| \times 2\pi\rho_1 h = |\mathbf{E}_{z2} \times \mathbf{H}_{\phi2}| \times 2\pi\rho_2 h \quad (6)$$

在真空中, 波阻抗为 $\eta = \eta_0 \approx 377 \Omega$ 。所以式(6)可以简化为:

$$|\mathbf{E}_{z1}|^2 \times \rho_1 = |\mathbf{E}_{z2}|^2 \times \rho_2 \quad (7)$$

为了得到均匀的口面电场分布, 辐射单元的归一化等效电阻需要满足:

$$\frac{r_i}{r_j} = \frac{|\mathbf{E}_j|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} = \frac{\rho_i}{\rho_j} \quad (8)$$

为了使能量完全辐射, 等效电阻还需满足:

$$\sum_{i=1}^N r_i = 1 \quad (9)$$

结合式(7) ~ (9), 最终有:

$$\begin{cases} r_i = \frac{\rho_i}{\sum_{i=1}^N \rho_i} \\ \rho_{i+1} = \rho_i + \lambda_g \end{cases} \quad (10)$$

其中: N 为总的圈数; λ_g 为波导波长, 这里与自由空间波长相等。当给定辐射单元的中心位置时, 对应的归一化等效电阻可由式(10)计算得到。

当我们选择胶囊状缝隙长度 $l = 10 \text{ mm}$ 时, 仿

真得到缝隙的归一化等效电阻与缝隙宽度的关系如图 5 所示。经过数值拟合后,得到:

$$r = (-0.86 + 6.82w + 19.03w^2 - 1.35w^3 + 1.06w^4 - 0.2w^5) \times 10^{-3} \quad (11)$$

拟合公式与仿真结果的误差在 0.02% 以内,可以用于后续的设计。

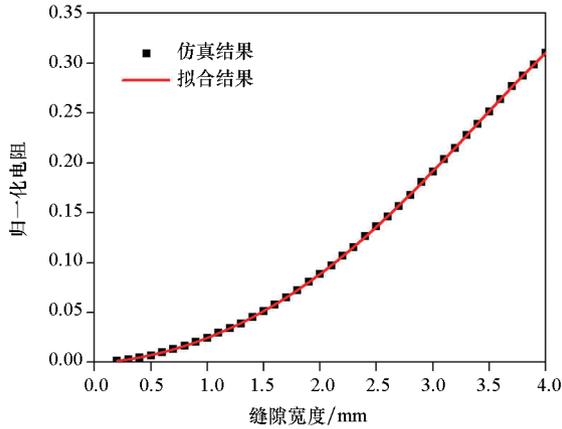


图 5 归一化电阻随缝隙宽度变化关系

Fig. 5 Normalized resistance versus the slot width

当总的缝隙圈数为 13、圆柱杆的半径为 8.7 mm 时,天线辐射单元的主要参数见表 1。

表 1 天线辐射单元主要参数

Tab. 1 Parameters of the CTS radiator unit

位置/mm	归一化电阻	缝隙宽度/mm
18.0	0.009 6	0.74
39.0	0.020 8	0.98
60.0	0.032 1	1.15
81.0	0.043 3	1.37
102.0	0.054 5	1.52
123.0	0.065 7	1.71
144.0	0.076 9	1.85
165.0	0.088 1	1.98
186.0	0.099 3	2.11
207.0	0.110 6	2.24
228.0	0.121 8	2.35
249.0	0.133 0	2.46
270.0	0.144 2	2.58

3 天线仿真

当天线辐射单元和天线口面设计完成后,整个天线的最终结构如图 6 所示。为了提高天线功率容量,天线内部需要保持高真空状态,因此在天

线上面加入介质天线罩,天线罩的厚度为 20.6 mm,介质介电常数为 2.343。

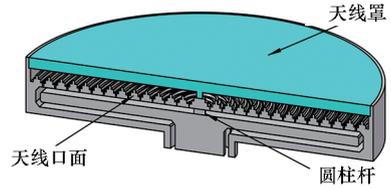


图 6 天线最终结构

Fig. 6 Structure of the antenna

用 CST 软件对该天线进行仿真,为了分析加工误差对天线性能的影响,假设缝隙宽度在理论值的基础上有 $-0.05 \text{ mm} \leq \Delta \leq 0.05 \text{ mm}$ 的误差,则在每个误差值下天线的反射系数如图 7 所示。由于注入的模式为两个极化方向垂直的 TE_{11} 模式,两个模式的反射系数相同,因此图中只给出了其中一个分量的反射系数。从图 7 中可以看出,在 14.13 ~ 14.37 GHz 的频带范围内,天线的反射系数小于 -10 dB,天线的带宽超过 240 MHz。在中心频点附近,不同加工误差下,天线的反射系数始终小于 -17 dB,在不考虑欧姆损耗的条件下,超过 98.3% 的能量被辐射出去,说明此范围内的误差对于天线的工作性能影响不大。

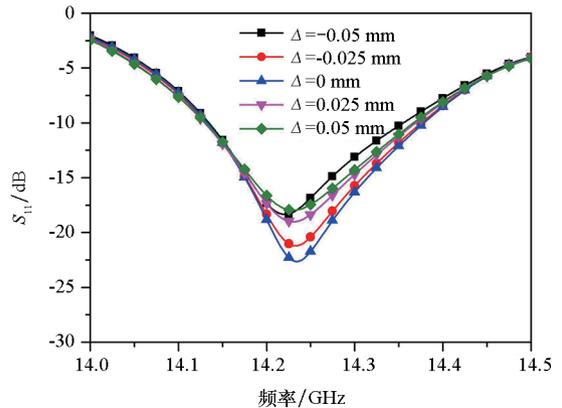


图 7 天线的反射系数

Fig. 7 Reflection coefficient of the antenna

图 8 给出了不同频点处天线的方向图,从图中可以看出,在中心频点 14.25 GHz 处,天线的增益为 35.3 dBi,计算得到天线的口径效率为 47%,仿真得到天线的辐射效率超过 99%,天线的轴比小于 0.1 dB。为了提高天线的口径效率,可以在径向线上层波导中加入慢波结构,减小径向线波导内的波导波长,增加天线口面上缝隙的圈数,从而提高天线的增益。

为了估算天线的功率容量,对天线内部的电场进行了监测,结果如图 9、图 10 所示。当注入功率为 1 W 时,天线内部的最大电场强度为

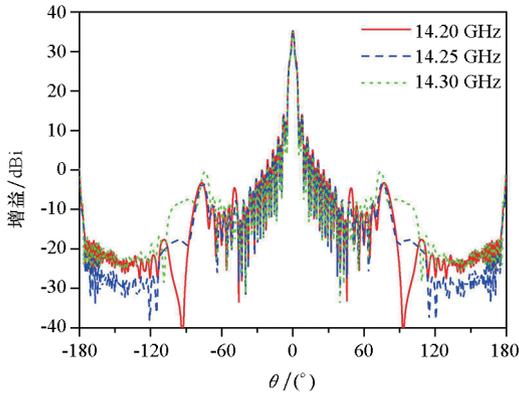


图8 天线的仿真方向图

Fig. 8 Simulated far-field patterns of the antenna

1604 V/m,在缝隙处并未发现明显的电场集中现象。当天线在高真空状态下工作时,金属的表面击穿电场为100 MV/m^[14],保守计算时取60 MV/m,估计该天线的功率容量可达到GW量级,能够满足目前多数Ku波段高功率微波源的应用需求。

$$\left(\frac{60 \text{ MV/m}}{1604 \text{ V/m}}\right)^2 = 1.4 \text{ GW}$$

为了保证天线在实验中依然具有GW量级功率容量,需要对天线表面进行抛光处理,同时可以在天线口面加一个SF₆气袋,降低介质天线罩的击穿风险。

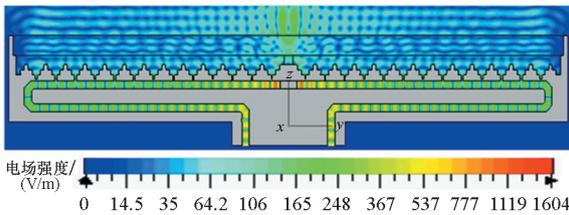


图9 天线的切面电场

Fig. 9 Electric field distribution in the longitudinal section of the antenna

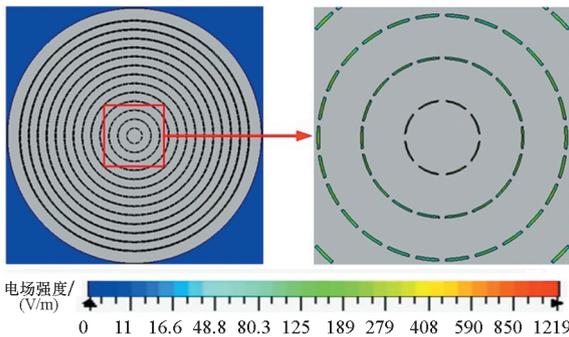


图10 缝隙处电场

Fig. 10 Electric field distribution in the slots

4 结论

本文提出并设计了一种可以应用于高频段高功率微波的辐射天线,通过理论分析和仿真计算相结合的方法对该天线进行了验证。结果表明:该天线具有较高的功率容量和增益,同时结构紧凑、易于加工,可以作为Ku频段高功率微波的发射天线。

参考文献 (References)

- [1] Swegle J, Schamiloglu E, Benford J, et al. High power microwaves [M]. 2nd ed. USA: Taylor & Francis, 2007.
- [2] Courtney C C, Baum C E. The coaxial beam-rotating antenna (COBRA): theory of operation and measures performance[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2000, 48(2): 299-309.
- [3] Lee B M, Lee W S, Yoon Y J, et al. X-band TM₀₁-TE₁₁ mode converter with short length for high power [J]. Electronics Letters, 2004, 40(18): 1126-1127.
- [4] Yuan C W, Liu Q X, Zhong H H, et al. A novel TEM-TE₁₁ mode converter [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(8): 513-515.
- [5] Li X Q, Liu Q X, Wu X J, et al. A GW level high-power radial line helical array antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(9): 2943-2948.
- [6] Yang Y M, Yuan C W, Qian B L. A beam steering antenna for X-band high power applications [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2014, 68(8): 763-766.
- [7] Yuan C W, Peng S R, Shu T, et al. Designs and experiments of a novel radial line slot antenna for high-power microwave application [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(10): 4940-4946.
- [8] Peng S R, Yuan C W, Shu T. Analysis of a high power microwave radial line slot antenna [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(7): 074701.
- [9] Zhang H, Shu T, Ju J C, et al. Gigawatt-class radiation of TM₀₁ mode from a Ku-band overmoded Cerenkov-type high power microwave generator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(6): 1567-1572.
- [10] Dang F C, Zhang X P, Zhang J, et al. Experimental demonstration of a Ku-band radial-line relativistic klystron oscillator based on transition radiation [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(12): 123305.
- [11] Milroy W W. Continuous transverse stub element devices and methods of making same: 5266961 [P]. 1993-11-30.
- [12] Milroy W W. The continuous transverse stub (CTS) array: basic theory experiment and application [C] // Proceedings of Antenna Applications Symposium, 1991: 253-283.
- [13] Zhang K, Li D. Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics [M]. Germany: Springer Press, 1998.
- [14] Xiao R Z, Chen C H, Sun J, et al. A high-power high-efficiency klystronlike relativistic backward wave oscillator with a dual-cavity extractor [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(10): 101502.