

# 一种小型化高功率微波辐射场功率密度测试系统\*

张翠翠, 王 益, 王建忠, 何 斌, 于明媚

(中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 为解决现有高功率微波辐射场功率密度测量系统测量环节多、系统复杂以及长电缆无法适应复杂电磁环境测量等问题, 研制了一款小型化、一体化辐射场功率密度测量系统。系统采用天线-耦合器-转换器作为接收前端, 后端采用同轴信号处理单元, 在屏蔽箱内完成信号衰减、功率探测及光电转换, 可实现系统远程测量与监控, 可用于连续波、单次脉冲、连续脉冲辐射场功率密度测量。同时, 系统采用模块化校准, 可有效降低测量系统不确定度。该系统具备 30 dB 动态, 最小可测脉宽 50 ns, 可测辐射场功率密度 100 MW/m<sup>2</sup>, 系统结构紧凑, 简便易携, 采用光纤传输, 抗电磁辐射, 可实现 X 波段 GW 级高功率微波辐射场功率密度快速测量。

**关键词:** 辐射场; 功率密度; 高功率微波; 小型化; 一体化

中图分类号: TN98 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB201931.190351

## A miniaturized power density measurement system for high-power microwave radiation field

Zhang Cuicui, Wang Yi, Wang Jianzhong, He Bin, Yu Mingmei

(Metrology and Testing Center, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** To solve the problems of the existing HPM radiation field power density measurement system, such as many measurement links, system complexity and long cable which can't adapt to complex electromagnetic environment measurement, a miniaturized and integrated power density measurement system of high-power microwave radiation field is developed. An antenna-coupler-adapter is used as the front receiver, the back end of the system is a coaxial signal processing unit, where the attenuation, power detection and electro-optical conversion are achieved in the shield box, hence, the system can be measured and monitored remotely. Meanwhile, modular calibration is applied in the system, which can effectively reduce the measurement uncertainty. The system has 30 dB dynamics, a minimum measurable pulse width of 50 ns and a measurable radiation field power density of 100 MW/m<sup>2</sup>. It is compact, easy to carry, anti-electromagnetic radiation, and capable of quick power density measurement of GW high-power microwave radiation field in X-band.

**Key words:** radiation field; power density; high-power microwave; miniaturization; integration

辐射场功率是直接表征高功率微波源的关键参数, 是评价和检验各类 HPM 系统作用效果和能力最直观和有效的技术手段和方法。目前, 国内高功率微波功率测量主要有远场阵列积分法和腔内耦合法两种<sup>[1]</sup>。远场阵列积分法基本按照 GJB 8221-2014《窄脉冲高功率微波外场功率测量方法》中规定的功率密度测量方法进行测量, 以辐射源为圆心水平布置一排天线阵, 测得各相应点上微波功率密度, 得到微波源空间辐射场积分功率, 美、俄等国家也基本都基于该方法开展辐射场功率密度测量。

辐射场功率密度测量方法有传统测量方法以及新型电光晶体探测等方法<sup>[2-3]</sup>, 新型测量技术未得到广泛应用。典型辐射场功率密度测量系统常用器件有接收天线、功率衰减组件、微波长电缆、检波器和示波器等。文献 [4-5] 采用传统测量方法<sup>[4-5]</sup>, 信号接收检波后经长电缆达到示波器测试; 文献 [6] 中, 测量系统将同轴衰减、检波置于屏蔽箱内, 再通过长电缆传输到远端, 可一定程度降低高功率微波对信号干扰, 但无法避免空间电磁辐射对长电缆的干扰; 文献 [7] 中, 该测量系统在上述基础上进一步改进, 采用一体化式辐射场功率密度测量系统, 屏蔽箱内采用单板电脑控制衰减器以及采样模块, 通过光纤转换后传输到远端, 但该系统尺寸较大, 未实现小型化。上述测量系

\* 收稿日期: 2019-09-12; 修订日期: 2019-11-05

基金项目: 装备技术基础课题

作者简介: 张翠翠 (1984—), 女, 硕士研究生, 从事高功率微波器件测试及研制; cuicui\_zhang@163.com。

统均采用检波-数据采集模式实现辐射场测量,随着测量频率升高以及空间电磁场增强,系统抗电磁干扰以及高速数据采集将会成为系统瓶颈,无法满足更高频率更高功率的辐射场测量需求。为满足更高频率更高功率的辐射场测量需求,本文提出一种一体化辐射场功率密度测试技术,系统采用光纤传输方案使其具备较强抗电磁辐射能力,小型化后系统尺寸约为  $22\text{ cm} \times 22\text{ cm} \times 44\text{ cm}$ ,质量约为  $7\text{ kg}$ ,实现辐射场功率密度测试系统的小型化和一体化。系统能够满足 X 波  $100\text{ MW/m}^2$  高功率微波辐射场功率密度测量需求,同时具有较好的扩展性,为高功率微波辐射场测量提供一种快速、有效、准确的测量方法。

## 1 辐射场功率密度测试系统总体设计

一体化测试系统设计要解决现有测试系统的存在问题,同时综合考虑系统宽动态范围、通用性强、稳定可靠等诸多方面要求。受接收天线以及波导传输线自身频率上限所限,本项目技术路线是采用专用与通用相结合方式,即前端接收单元采用专用设计;同轴信号处理单元采用通用同轴接口,更换前端接收单元不同波段可实现通用。系统总体结构如图 1 所示。

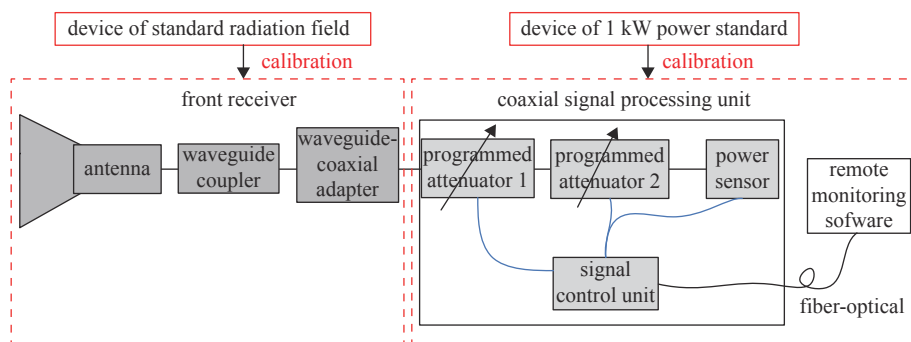


Fig. 1 Structure diagram of high-power microwave radiation field measurement system

图 1 高功率微波辐射场功率密度测试系统框图

系统包括两大部分:一是前端接收天线将空间电磁波转换为电信号,后续经波导耦合环节完成信号衰减,经波导-同轴转换器输出;二是屏蔽箱内同轴信号处理单元,在屏蔽箱内对电信号进一步衰减,而后通过信号处理模块对信号进行处理分析后经光纤连接远程控制及显示部分。系统具备以下优点,系统结构简单,两模块独立校准,提高了系统测试结果准确度;系统主要信号衰减、采集处理单元在金属屏蔽箱内完成,具有较强电磁防护能力;系统采用独立电源供电,光纤传输,有效提高系统稳定性和可靠性;远程直接控制和调节可直接输出接收天线处功率密度;两级程控衰减可实现  $0\sim 30\text{ dB}$  动态调节,有效扩展系统动态范围。

## 2 系统结构设计与实现

### 2.1 系统功率容量设计

以空气填充的 X 波段矩形波导功率容量为  $86.8\text{ dBm}$ 。测量系统设计接收空间电磁场最大功率密度不小于  $100\text{ MW/m}^2$ ,为保证测量系统满足小于波导器件击穿功率要求,严格控制天线增益。为保证屏蔽箱内各同轴器件(峰值功率均为  $50\text{ dBm}$ )不发生击穿破坏,根据被测频率、天线增益、波导耦合器之间关系进行评价与预估,设计天线增益小于  $19.5\text{ dB}$ ,耦合器耦合量设计值为  $40\text{ dB}$ ,预估系统功率如表 1 所示。

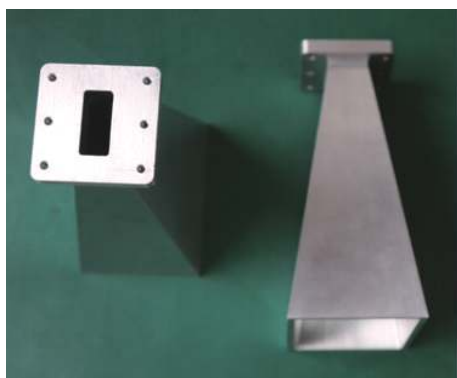
表 1 系统功率预估

Table 1 Estimation of system power

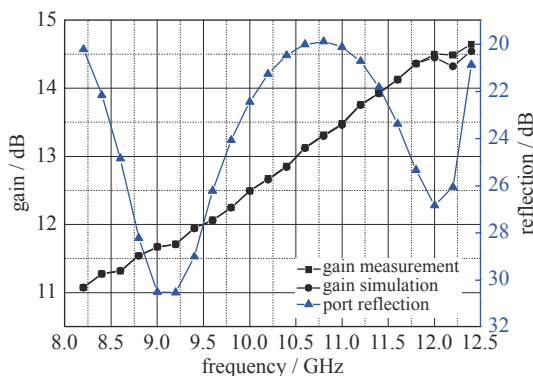
frequency/ GHz	power density/ ( $\text{MW/m}^2$ )	gain of antenna/dB	effective area of antenna / $\text{cm}^2$	output power of antenna/dBm	coupling factor of coupler /dB	output power of coupler/dBm
8.2	100	15.7	39.8	86.0	40	46.0
10	100	17.4	39.8	86.0	40	46.0
12.4	100	19.4	40.5	86.1	40	46.1

### 2.2 前端接收单元

喇叭天线具有方向性强、反射小和频带宽等特性,常作为接收和发射单元。本文设计小张角喇叭天线,其端口尺寸可控制在  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  以内,优化口面获取最优端口反射系统和最小增益,优化后天线增益小于  $15\text{ dB}$ ,端口反射系数优于  $-20\text{ dB}$ ,其增益仿真及端口反射系数与实测结果如图 2 所示,天线增益随频率增大,线性度较好。



(a) antenna



(b) measurements of antenna's gain and port reflection

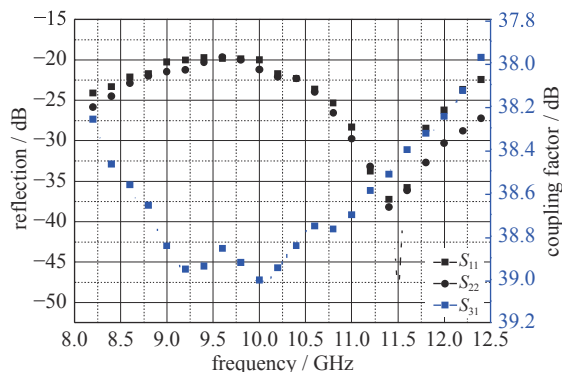
Fig. 2 Antenna and it's measurements

图2 天线实物图及测量结果

耦合器采用多孔耦合方式,可保证其平坦度和方向性<sup>[8-12]</sup>,耦合孔分布规律根据契比雪夫函数确定<sup>[13-14]</sup>。采用波导宽边耦合,四级八孔耦合方式,八孔居中对称分布,公共臂厚度为2 mm,耦合孔距窄边距离为 $0.25a$ ( $a$ 为耦合器宽度长度),优化后四孔径半径分别为2.58,2.4,2.18,1.48 mm,孔间距为5.5 mm,耦合器加工实物及测量结果如图3所示,实测耦合器方向性系数优于30 dB,全频段8.2~12.4 GHz耦合系数为-40.6 dB~-39.6 dB,耦合系数波动 $\pm 0.6$  dB。根据仿真结果,耦合器输入端馈入功率1 MW(90 dBm)时其电场最大为30 kV/cm,可满足天线输出端86 dBm功率要求。



(a) coupler



(b) measurement of coupler's reflection and coupling factor

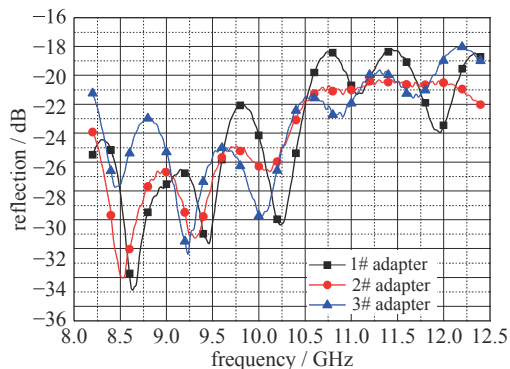
Fig. 3 Coupler and it's measurements

图3 耦合器实物及测量结果

波导同轴转接器基于切比雪夫多节阻抗变换理论,将波导阻抗到标准同轴线 $50\ \Omega$ 阻抗进行渐变,以保证信号在波导内良好地传输<sup>[15-18]</sup>。为达到宽带匹配效果,需采用多节阶梯变换,将波导作为 $\lambda/4$ 阻抗变换器,实现矩形波导到同轴阻抗匹配。经过仿真优化后得到波导同轴转接器最优端口反射系数小于-20 dB。网络分析仪实测转接



(a) adapter



(b) measurements of adapter's reflection

Fig. 4 Adapter and it's measurement

图4 转接头实物及测量结果

头反射系数测量如图 4(b) 所示, 端口电压反射系数小于  $-18$  dB, 端口反射能量小于 1.55%。

### 2.3 同轴信号处理单元

高功率微波测试环境电磁干扰严重, 同轴信号处理单元置于屏蔽箱内, 防止各种电磁干扰对测试系统影响, 保证测试系统稳定性与准确性。屏蔽箱采用低碳钢薄钢板, 选用 1.2 mm 厚冷轧钢板作为箱体主要壳体材料。屏蔽箱、耦合器以及波导同轴转换器通过法兰连接, 法兰与屏蔽箱紧密电接触; 屏蔽箱门通过弹簧压片压紧, 保证屏蔽箱门与箱体良好接触, 从而保证屏蔽箱电磁屏蔽效能。

波导同轴转接器输出信号经两级衰减器衰减后小于 20 dBm, 后续可进行功率探测。可调衰减单元通过两级衰减联调实现, 第一级为 1 dB 步进衰减可调, 第二级 10 dB 步进衰减可调, 两级衰减联动调节上可实现 0~30 dB 动态衰减调节。

经衰减后信号基于 USB 峰值功率探头实现功率检测, 峰值功率探头应可实现 50 MHz~18 GHz 峰值功率测量, 最小可测脉宽达 50 ns, 最大可测平均功率 23 dBm, 最大可测峰值功率 30 dBm, 其 USB 连接端口与控制单元连接实现功率探测器控制与信号传输。

屏蔽箱内单元均由控制单元进行控制和通信, 控制单元主要相关接口和模块有: 两组衰减器程控接口、USB 控制接口、两组光纤收发模块、电源模块等, 如图 5 所示。控制单元采取 5 V 独立电源供电, 通过 TTL 电平信号控制可调衰减器衰减量, 对 USB 接口对功率探头信号进行采集, 经 Tx 模块转换为光信号后传输至远程控制软件; 通过 Rx 组件接收远端控制指令实现系统调节。

### 2.4 远程控制软件

远程控制软件对程控衰减器衰减量动态调节, 控制功率探头触发电平、频率以及迹线存储等, 可实现连续功率测量以及单次脉冲与重复脉冲迹线读取, 获取迹线内峰值功率平均值, 动态调节迹线范围, 可实现辐射场功率密度实时测量(图 6)。

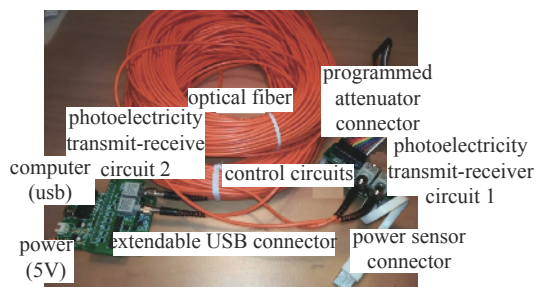


Fig. 5 Signal control unit

图 5 控制单元

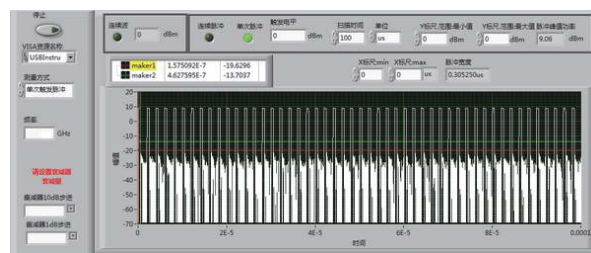


Fig. 6 Software of remote monitoring

图 6 远程控制软件

## 3 系统模块化校准方法

功率密度测试系统校准拟采用模块校准方式, 校准装置结构框图如图 1 所示。前端接收单元包含天线、波导耦合器和波同转接器总增益约为  $-20$  dB, 可通过建立标准辐射场对其校准。校准系统实物如图 7(a) 所示, 经过校准的标准天线、信号源、功率放大器以及耦合器和功率监视器等组成标准辐射场, 分别开展脉冲宽度为 50 ns, 500 ns 以及 10  $\mu$ s 三种状态下校准, 不同脉冲宽度下 3 次测量最大差值为 0.27 dB, 如图 7(b) 所示, 考虑主要是由收发天线对不准引入的误差。

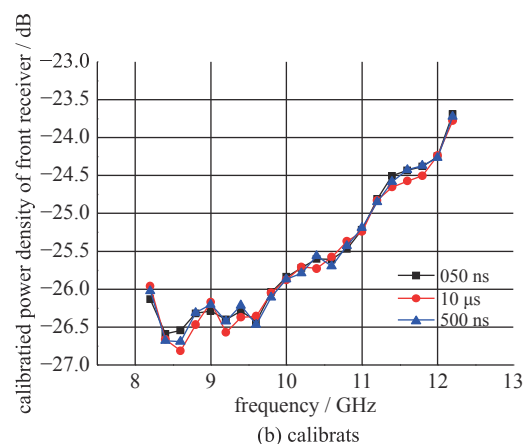
同轴信号处理单元最大衰减量约为 30 dB, 采用 X 波段 kW 级脉冲功率标准对该模块校准, 可实现衰减、功率探头、光纤传输、远程监控软件整体校准。采用模块化校准方式能够解决测试环节多、不确定因素多等问题, 有效减小各单元间失配引入的不确定度分量, 使得校准工作能够标准化、单元化、规范化。

## 4 GW 级实验

基于中国工程物理研究院应用电子学研究所高功率微波源开展辐射场功率密度测量系统 GW 级实验, 高功率微波源传输内功率为 0.86~1.88 GW, 通过带有密封窗天线辐射出去, 辐射场功率密度测试系统测布点在该发射天线远场区, 距离天线辐射口面距离为 5.5 m, 辐射场功率密度测试系统测得 8 组(N1~N8)测量曲线, 测试现场及测量结果如图 8 所示, 测得最大辐射场为 55.6 MW/m<sup>2</sup>, 综合评价系统抗电磁辐射能力、系统功率容量及系统综合测试能力可开展 100 W/m<sup>2</sup> 辐射场测试, 本文研制的高功率微波一体化辐射场功率密度测试系统能够开展 GW 级高



(a) calibration system



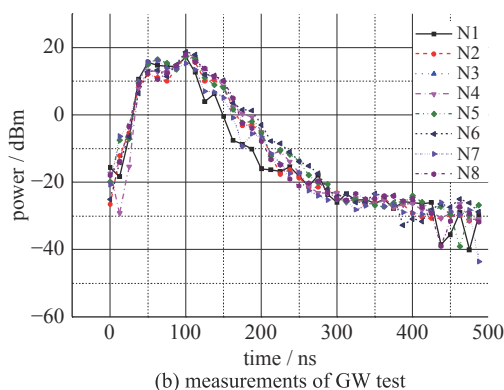
(b) calibrats

Fig. 7 Calibration of front receiver

图7 前端接收单元校准及结果



(a) system of GW test



(b) measurements of GW test

Fig. 8 System and measurements of GW high power microwave test

图8 GW级高功率微波测试现场及测量曲线

功率微波源辐射场功率密度测试工作。

## 5 结论

为满足高功率微波辐射场功率密度测量需求,本文研制一款紧凑型、一体化高功率微波辐射场功率密度测量系统,系统结构简单,测量及校准环节少,系统采用独立电源供电可工作10 h,并且采用远端光纤输出。上述特点使系统具备良好的抗电磁辐射能力和较高测量准确度,同时切实实现系统的小型化和便携式,为高功率微波辐射场积分总功率测量提供良好的技术手段。该系统具有较强技术通用性,可推广应用于远端功率测量、复杂电磁环境等领域的电脉冲、调制脉冲、连续波等不同电场测试。

## 参考文献:

- [1] 闫军凯, 刘小龙, 叶虎, 等. X波段高功率微波馈源辐射总功率阵列法测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(11): 3149-3153. (Yan Junkai, Liu Xiaolong, Ye Hu, et al. X-band HPM feed total radiation power measurement using array method[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(11): 3149-3153)
- [2] 宋莉莉. 基于电光晶体测量高功率微波的技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013. (Song Lili. Electro-optic sensors high power microwave. Changsha: National University of Defense Technology, 2013)
- [3] 李义民, 邢建泉, 王兰. 基于微波光子学的高功率微波测量[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 033028. (LiYimin, Xing Jianquan, Wang Lan. High power microwave measurement based on microwave photonics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 033028)
- [4] 屈劲, 刘庆想, 胡进光, 等. 高功率微波辐射场功率密度测量系统[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(1): 77-80. (Qu Jin, Liu Qingxiang, Hu Jinguang, et al. Measurement system on power density of high power microwave radiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(1): 77-80)
- [5] 张治强, 王宏军, 张黎军, 等. 高功率微波辐射场功率阵列测量装置研制[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4): 883-886. (Zhang Zhiqiang, Wang Hongjun, Zhang Lijun, et al. Development of array device for power measurement of high power microwave radiation field[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(4): 883-886)
- [6] 张黎军, 陈昌华, 滕雁, 等. 高功率微波辐射场远场测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 053002. (Zhang Lijun, Chen Changhua, Teng Yan, et al. Farfield measurement method of high power microwave in radiation field[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 053002)

- [7] 史鹏飞, 蒋廷勇, 刘小龙, 等. X波段高功率微波一体化辐射场测量系统: 103995187[P]. 2014-08-20. (Shi Pengfei, Jiang Tingyong, Liu Xiaolong, et al. X-band high power microwave integrated radiation field measurement system: 103995187. 2014-08-20)
- [8] Sun D, Xu J. Rectangular waveguide coupler with adjustable coupling coefficient using gap waveguide technology[J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(3): 167-169.
- [9] Wu T, Wang Q, Jin Z, et al. Simulation and design of ridge waveguide coupler[C]//IEEE International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology. 2012: 1-3.
- [10] Chen Z L, Tong L, Tian Y, et al. Directional coupler using multi-stage coupled structure theory[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, 45: 113-123.
- [11] 刘海旭. 一种高功率超宽带波导耦合器的设计方法[J]. 电光系统, 2016(4): 30-32. (Liu Haixu. Design method of high power ultra wideband waveguide coupler[J]. *Electronic and Electro-optical Systems*, 2016(4): 30-32)
- [12] 马重阳. 基于S波段新型宽带高功率波导定向耦合器的设计与研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016. (Ma Chongyang. Research and design of the novel broadband high power waveguide directional coupler based on S-band. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016)
- [13] Karimabadi S S, Attari A R. X-band multi-hole directional coupler with folded substrate-integrated waveguide[J]. *Electromagnetics*, 2015, 35(6): 404-414.
- [14] 孙玉洁, 段俊萍, 王雄师, 等. 多孔耦合型太赫兹波导定向耦合器的设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 255-261. (Sun Yujie, Duan Junping, Wang Xiongshi, et al. Design of multi-hole terahertz waveguide directional couplers[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2017, 46(1): 255-261)
- [15] 魏振华, 田立松, 冯旭东, 等. 8-18 GHz同轴-波导转换器的分析与设计[J]. 微波学报, 2008, 24(S1): 125-128. (Wei Zhenhua, Tian Lisong, Feng Xudong, et al. Analysis and design on 8-18 GHz coaxial-waveguide transition[J]. *Journal of Microwaves*, 2008, 24(S1): 125-128)
- [16] 汤一铭, 薄亚明. 6~20 GHz同轴-矩形波导转换器的设计[J]. 微波学报, 2012, 28(2): 32-35. (Tang Yiming, Bo Yaming. Design of a coaxial to rect-waveguide transition with enhanced bandwidth of 6~20 GHz[J]. *Journal of Microwaves*, 2012, 28(2): 32-35)
- [17] Sun G Q. Design of the broadband coaxial to waveguide adapter[J]. *Science & Technology Information*, 2010(19): 164-165.
- [18] Lin F M, Guan T H. Doorknob type little reflection transition of coaxial TEM mode to rectangular TE<sub>10</sub> mode[J]. *Vacuum Electronics*, 2008(2): 22-25.