



·高功率微波技术专辑·

T/R 双模微波功率模块技术及其应用*

李建兵¹, 邱立², 王斌³, 郭静坤¹, 董雪雨¹

(1. 战略支援部队信息工程大学 信息系统工程学院, 郑州 450001; 2. 中国电子科技集团公司第十二研究所, 北京 100015;
3. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610036)

摘要: 微波功率模块(MPM)是真空电子器件和固态电子器件组合而成的一种新型微波功率器件,具有频率高、频带宽、功率大、体积重量小等特点,它使常规行波管的应用变得更加便利和广泛。现代战争向雷达、电子战综合一体化方向发展,这就要求功放既能工作在高峰值功率、低占空比的高模工作方式,也能工作在低峰值功率、准连续波的低模工作方式,针对这一需求,结合电子系统收发共孔径的要求,提出了T/R双模MPM技术。T/R双模MPM技术的核心是T/R双模行波管,基于三端口双向T/R行波管,通过在慢波系统的衰减器附近设置一个耦合口,实现行波管的信号反向接收功能;通过T/R双模行波管设计、双模放大均衡组件、双调制栅极电源等技术实现MPM的双模双向功能。T/R双模MPM应用前景广阔,特别是在基于无人机平台的作战应用中的具有明显优势。

关键词: 微波功率模块; T/R行波管; 收发共孔径; 功放; 均衡器

中图分类号: TN83

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202436.230184

Technology and applications of T/R dual-mode microwave power module

Li Jianbing¹, Qiu Li², Wang Bin³, Guo Jingkun¹, Dong Xueyu¹

(1. College of Infomation System Engineering, PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;
2. Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China;
3. The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group, Chengdu 610036, China)

Abstract: Microwave power module (MPM) is a new type of microwave power device which is a combination of vacuum electronic devices and solid-state electronic devices. It has the characteristics of high frequency, wide bandwidth, large power and small volume and weight, which makes the application of conventional traveling wave tubes more convenient and extensive. Modern warfare is developing towards the integration of radar and electronic warfare, which requires that the power amplifier can work in both high-mode with high peak power and low duty cycle and low-mode with low peak power and quasi-continuous wave. To meet this demand, combined with the requirements of common aperture of electronic system, this paper presents the T/R dual-mode MPM technology. The core of the T/R dual-mode MPM technology is a T/R dual-mode traveling wave tube. Based on the three-port bidirectional T/R traveling wave tube, the signal reverse receiving function is realized by setting a coupling port near the attenuator of the slow wave system. The dual-mode bidirectional function of MPM is realized through the design of T/R dual-mode traveling wave tube, dual-mode amplifier and equalizer, and dual-modulation grid power supply. T/R dual-mode MPM has broad application prospects, especially in combat applications based on Unmanned Aerial Vehicle platform.

Key words: microwave power module, T/R traveling wave tube, common aperture oftransceiver, power amplifier, equalizer

现代战争向雷达、电子战综合一体化方向发展,对装备系统的软硬件提出了新的要求。在信息处理部分,主要体现在算法和软件的变化,硬件的体系架构基本不变。但在射频部分的功率放大器环节,则需要有新的器件技

* 收稿日期:2023-06-18; 修订日期:2023-10-26

基金项目:军队预先研究项目

联系方式:李建兵, 49286894@qq.com。

术作为支撑。功放电路的核心器件大体可以分为固态类和真空类两种,它们各有优缺点。近年来, GaN、SiC 等新材料的应用,使固态器件的竞争力大幅提高。但在高频和大功率系统中,以及某些特殊应用场合,以小型化行波管为核心的微波功率模块(MPM)展现出了极大的技术和应用优势^[1]。基于传统 MPM 的进一步改进设计,可满足雷达和电子战的一体化发展要求。本文研究的 T/R 双模 MPM 就是为了支撑雷达、电子战一体化的功率放大器环节而提出的。针对现实系统装备的收发共孔径、脉冲和连续波一体化的技术发展要求,提出了 T/R 双模 MPM 的应用需求,并介绍了其技术实现途径,最后分析了其作战应用前景。

1 T/R 双模 MPM 的提出

1.1 MPM 技术使真空器件的应用更加便利

行波管是非常重要的真空电子器件,在微波功率放大器领域得到广泛应用。当前,氮化镓、碳化硅等新型材料的出现在一定程度上使固态器件在某些领域的应用优势得到大幅度提高,但在大功率、高频率和宽频带的应用领域,真空器件仍然具有较大优势。特别是其效率远远高于固态器件,减少了因热损耗所需的散热系统的体积,并提高了可靠性。

与固态器件相比,真空器件在应用上的不足就是需要配备多路复杂的高压电源,而这些电源往往难以实现标准化的量产。以应用最多的行波管为例,用户单位在使用行波管的时候,还需要一个专业的高压电源团队才能完成基于真空器件体制的放大器的研制。因为使用不便,用户宁可牺牲一定的指标,也更愿意使用供电问题非常简单的固态器件^[2]。这也是近年来行波管等真空器件市场占有率下降的主要原因之一。

不过,这一问题可以通过 MPM 技术得到有效解决。MPM 是真空电子器件和固态电子器件组合而成的一种新型微波功率器件,主要由小型化行波管、固态放大器和集成电源等部分组成。能够同时实现真空电子器件高效率、大功率以及固态电子器件小体积、低噪声的优点,克服两种电子器件单独工作时的缺点,使其具有频率高、频带宽、功率大、体积重量小等特点^[1, 3-4]。更重要的是,MPM 将复杂的高压电源集成在模块内部,用户无需额外研制配套的集成电源就可方便使用了^[5-6]。

1.2 脉冲和连续波双模体制

从近期俄乌冲突可以看到,无人机在现代战争中发挥着日益重要的作用。而现代电子战是无人机生存和进攻的重要手段。在现代战争中,无人机要应对各种模式雷达:有高峰值功率、低重频模式的雷达,也有低峰值功率、高重频模式的雷达。这需要电子战发射机有高峰值功率、低占空比的发射模式,也需要有传统的低峰值功率、高占空比的干扰体制。而传统行波管只有单模工作模式,决定了武器装备只能单功能作战^[7]。

目前,中国电子科技集团公司第十二研究所在传统单模行波管基础上研制出可双模式工作的行波管,通过调节栅极控制发射两种电子注,可得到两种放大功率,实现一管两用,再结合双调制集成电源系统和双模放大均衡组件,形成双模式工作的 MPM(双模 MPM):高模工作模式下,高峰值功率,低占空比;低模工作模式下,低峰值功率,准连续波。

我们同时也可以看到,高模脉冲体制模式,实际也是雷达的主要工作方式,而低模低峰值功率准连续波工作模式,实际也是电子战的主要工作方式。而未来战争要求雷达、电子战综合一体化,实际上由于处理接收方法不同,其综合一体化主要表现在雷达和电子战共用发射机,如图 1 所示。可见双模 MPM 是未来实现雷达、电子战综合一体化的基础。

1.3 电子系统的收发共孔径问题

在电子系统中,为了减少天线数量,往往需要收发共孔径,通常需要在天线后端使用收发开关或环形器,如图 2 所示。对于单体功率较小的固态功放,容易通过开关切换实现收发一体功能。但在一些大功率场合,要实现天线共孔径场合,只能使用环形器。环形器在宽带下使用时,有如下缺点:(1)插损较大,降低了发射机输出功率,还使环形器发热而降低可靠性;(2)环形器体积较大,不利于系统的小型化;(3)环形器不容易实现宽频宽,这样大大限制了系统带宽^[8]。

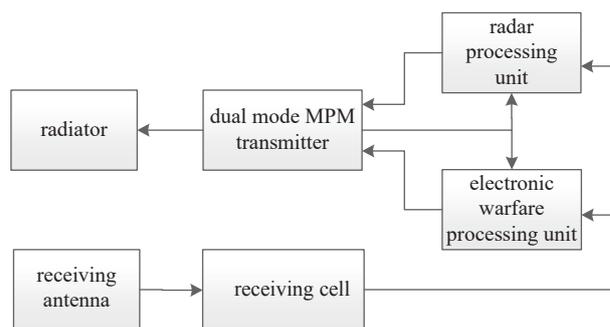


Fig. 1 Integrated integration of radar and electronic warfare based on dual-mode MPM

图 1 基于双模 MPM 的雷达、电子战综合一体化

基于上述问题,电子战大功率使用时,很多时候被迫采用 T/R(发射和接收)分开方式,需要发射和接收两套天线。在现代战争中,无人机、吊舱、导弹等载体,其可以安装的孔径(天线)有限,共孔径变得非常重要。此外,一些新的干扰方式,如交叉眼干扰,也希望 T/R 共孔径。

传统的行波管作为大功率放大器,只能发射信号,是无法接收信号的。如果行波管本身就具有收发一体的功能,那么这个问题就迎刃而解。在发射信号时,行波管的射频输出端子 RFout 直接接天线输出;在接收信号时,在 EPC 配合下,信号通过天线从行波管的 RFout 输入,再从行波管中间的一个端子输出到接收单元,这样就实现了 T/R 功能。通过这种方式,去掉了环行器,解决了环行器带来的损耗大、发热大、可靠性低和体积大等问题,也突破了环行器的带宽限制。这种工作模式下,行波管的输出功率没有损失;但接收通道会有几 dB 的损耗,但只要符合接收灵敏度就没有问题。通过这种方式,颠覆了传统行波管的使用方法,实现了大功率下的 T/R 功能,将使未来电子战注入新的活力。

1.4 T/R 双模 MPM 技术的雷达电子战系统

综合以上技术,将 MPM 技术、T/R 行波管技术、双模行波管技术相结合,可以实现 T/R 型双模 MPM。T/R 型双模 MPM 是一种新型微波功率放大器模块,不但具有一般 MPM 宽频带、大功率和小型化的特点,还可同时工作在准连续波和脉冲两种工作模式,具有收发一体的功能。将其用于干扰机载荷的末级功放,可实现干扰机载荷的准连续波和脉冲两种工作模式,实现新型的双模干扰体制。同时,可实现雷达、电子战综合一体化,满足侦干一体化的作战需求。此外,还解决了网电对抗的天线共孔径问题,实现系统小型化^[9]。

在图 1 基础上,将双模 MPM 发射机改为 T/R 双模 MPM 发射机,实现收发共孔径,就形成了基于 T/R 双模 MPM 的雷达电子战系统,如图 3 所示。

2 T/R 双模 MPM 技术的实现

T/R 双模 MPM 技术的核心是 T/R 双模行波管。要使传统的行波管同时具有 T/R 特性和双模功能,存在较大技术难度。本文将 T/R 双模 MPM 技术拆解为三大部分:T/R 技术、双模技术、T/R 双模 MPM 技术。下面将分别介绍。

2.1 T/R 技术

在三端口 T/R 行波管结构中,通过在慢波系统的衰减器附近设置一个耦合口,可与行波管的输出端口形成回路,将由天线馈入的回波信号传输至接收处理系统,形成接收功能。

行波管在发射状态时,电源控制电子枪的工作状态,切换至工作状态,形成高能电子注。行波管激励信号由输入口馈入,经过螺旋慢波结构的波注相互作用后,放大的微波信号由输出端的输能结构输出至外接天线,形成发射。耦合口处由于接近衰减器,功率量级非常小,仅有 mW 级功率输出,在实际应用中可忽略。发射状态下行波管微波信号流向如图 4 所示。

在接收状态时,电源控制电子枪的工作状态,切换至截止状态,不产生电子注。回波信号经过外部天线接收,经过行波管的输能结构反向进入慢波系统,由耦合口馈入“接收系统”。这样就实现了行波管的信号接收功能。截止状态下行波管微波信号流向如图 5 所示。

另外,在三端口设计时,由于输出端口与第三耦合端口之间没有衰减器,两者之间会互相影响,因此应将两个端口联合仿真。而且在 T/R 模块中接收通道的信号灵敏度非常高,为了保证系统安全,只能接收小信号,而 T/R 型行波管组件在处于正向发射状态时,第三端口(即接收端口)也会耦合输出被放大的信号,因此,第三端口的位置选择极为重要,我们还需要对第三端口的位置进行优化设计。

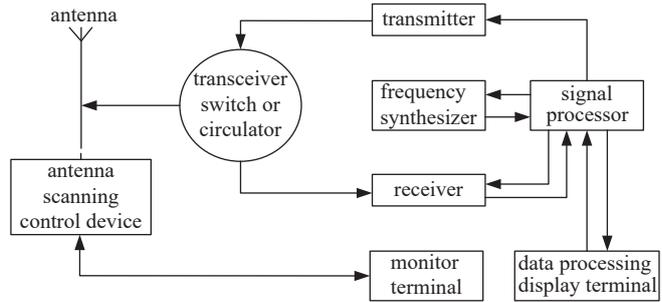


Fig. 2 Typical radar system

图 2 典型雷达系统

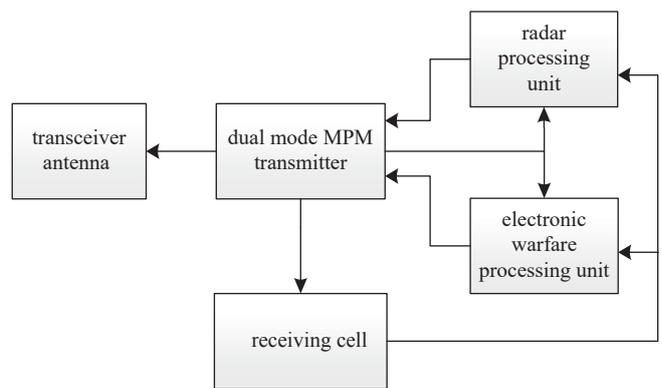


Fig. 3 Integrated integration of radar and electronic warfare based on T/R dual-mode MPM

图 3 基于 T/R 双模 MPM 的雷达、电子战综合一体化

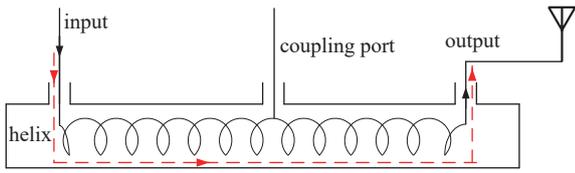


Fig. 4 Direction of microwave signal of TWT in emission state
图 4 发射状态下行波管微波信号流向

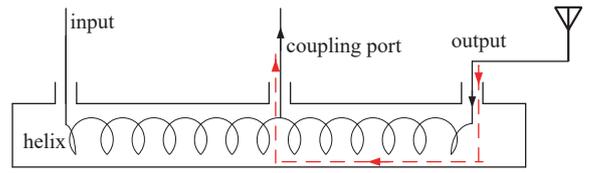


Fig. 5 Direction of microwave signal of TWT in cut-off state
图 5 截止状态下行波管微波信号流向

通过仿真软件 CST2015 建立三端口模型,如图 6 所示,得到联合仿真结果如图 7 所示,达到频带内反向插损小于 8 dB 的设计要求,通过 MTSS2020 行波管仿真软件计算得到耦合口的漏功率结果如图 8 所示。计算结果可以看出,第三端口在行波管正向工作时,最大输出功率仅有 0.5 W,同时第三端口处连接的外部“接收系统”处于断开状态,第三口泄露的功率由匹配负载吸收,不会烧毁接收端的器件,设计满足使用要求。

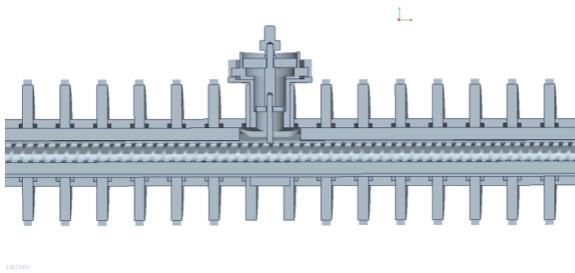


Fig. 6 Reverse channel structure mode
图 6 反向通道结构模型

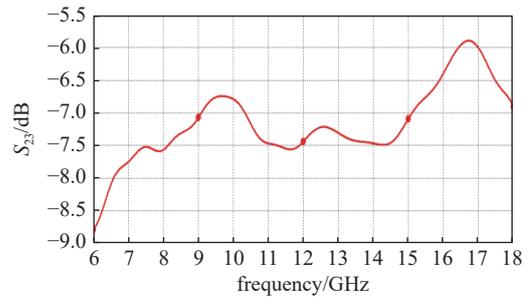


Fig. 7 Results of insertion loss
图 7 插入损耗计算结果

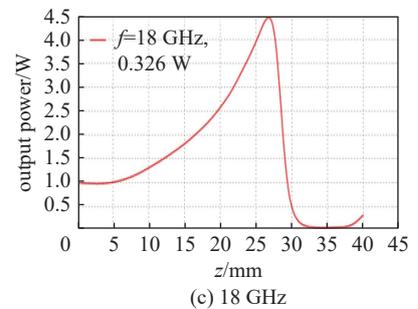
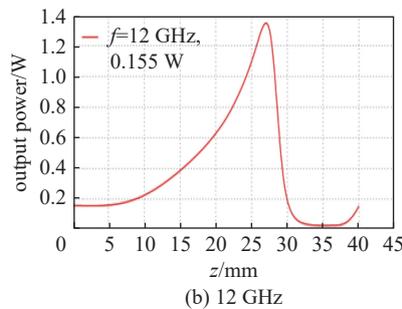
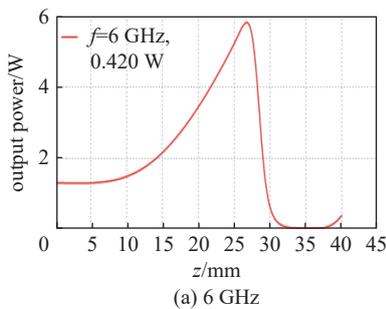


Fig. 8 Coupling power of the third port during the forward operation of the TWT
图 8 行波管正向工作时第三端口耦合功率计算结果

2.2 双模技术

双模行波管的设计重点在于双模高流通率电子光学系统设计,使行波管在高低模两种模式下均能正常工作^[10]。我们在皮尔斯电子枪的基础上,添加栅网,通过调整栅网的位置、几何形状以及电压,来实现相同电子枪结构下,电子注功率可调,并使电流密度近似。即将两把高性能电子枪的功能融合到一把双模电子枪中。由于电子注的电流密度相近,保证电子注能够在电子枪及慢波系统中的稳定传输,避免电子注轰击通道。在双模高流通磁聚焦系统中采用的磁系统是适用于聚束两种工作模式下的电子注的 PPM 结构,实现电子注的良好聚束,降低双模工作下磁聚焦系统的设计难度,最终实现双模高流通率电子光学系统综合设计,达到双模行波管设计目标^[11-12]。

在双模行波管仿真设计时,控制高低模电子注填充比均在 0.5 以内,高低模电子注射程相同,即认为满足设计要求。本文例举了一款典型单控制栅双模电子枪结构,其结构和两种工作模式下电子枪内部电子轨迹仿真结果如图 9 和图 10 所示,高低模层流性效果良好。

2.3 T/R 双模 MPM

T/R 双模 MPM 由 T/R 双模行波管、双模放大均衡组

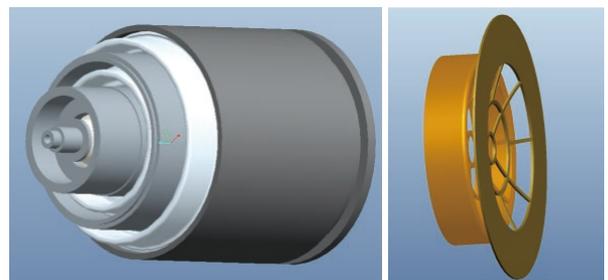


Fig. 9 Single control grid dual mode electron gun structure
图 9 单控制栅双模电子枪结构示意图

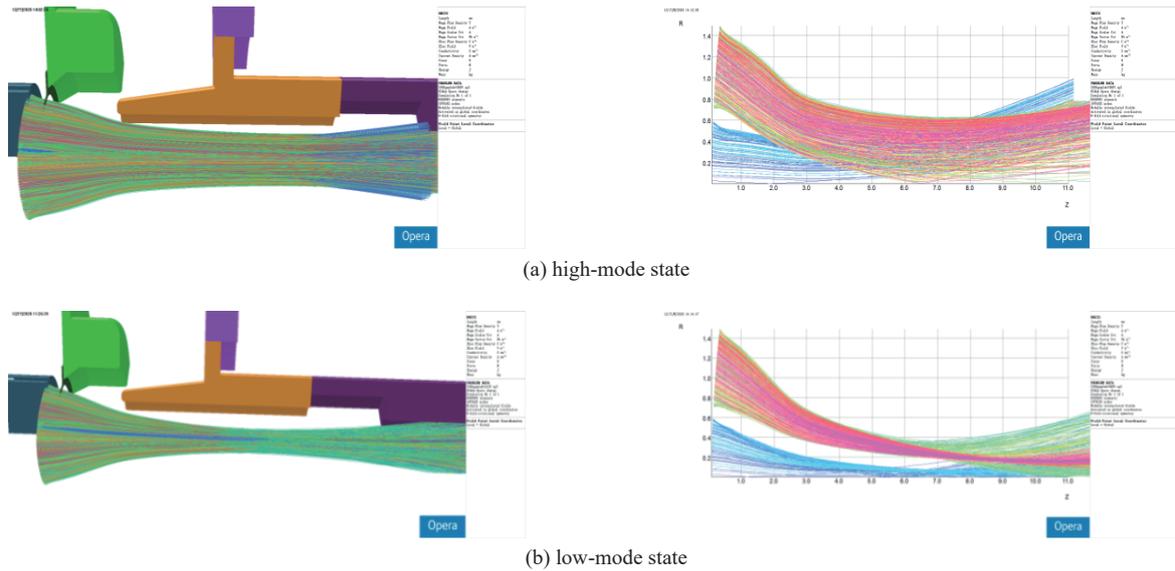


Fig. 10 Electron trajectory in electron gun under two working modes

图 10 两种工作模式下电子枪内部电子轨迹

件、高压电源模块和控制电路等组成。高压电源模块(EPC)给行波管和双模放大均衡组件提供各路不同电压等级的供电电压。

双模 T/R MPM 双模工作方式的切换是通过双调制栅极电源来实现的。如图 11 所示,输入两路 TTL 信号,一路 TTL 信号切换改变 EPC 栅极电压占空比,另一路 TTL 信号切换改变 EPC 栅极电压及切换双模放大均衡组件通道,以提供两种驱动信号,经过双模行波管以实现两种信号不同功率量级的放大。图 12 所示为中国电子科技集团公司第十二研究所某型号 MPM 高低模切换测试结果,目前技术水平可达到切换时间小于 500 ns。

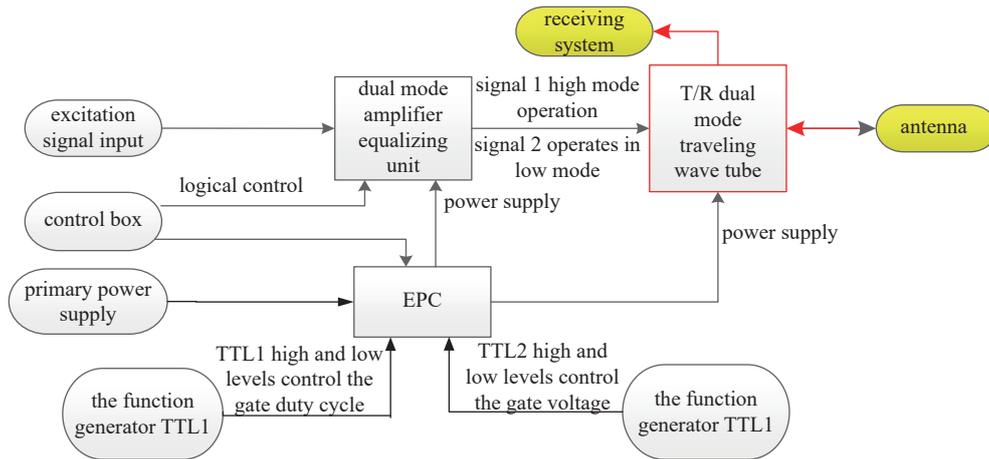


Fig. 11 Realization of T/R dual-mode MPM

图 11 T/R 双模 MPM 实现思路

3 T/R 双模 MPM 的应用前景

成都国光电气股份有限公司在专利“双向射频信号放大行波管”(公告号: CN107610992A)中也提出过双向行波管的概念,采用双电子枪的形式实现行波管双向工作,目前还没有产品级样管的报道。当前,国内中国电子科技集团公司第十二研究所已经研制出双模 MPM 产品和 T/R 行波管产品。目前,战略支援部队信息工程大学正联合中中国电子科技集团公司第二十九研究所和中国电子科技集团公司第十二研究所,开展 T/R 双模 MPM 干扰机的研制^[13-14]。国外目前尚无 T/R 和双模 MPM 的报道,因此我们在此项技术上是走在

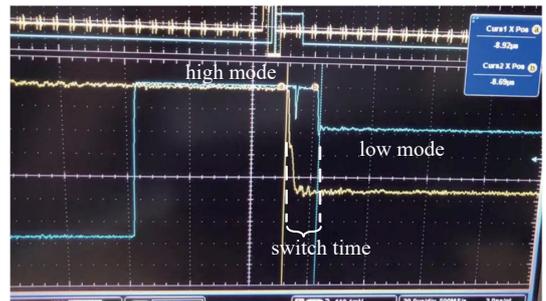


Fig. 12 High and low mode switching test results

图 12 高低模切换测试结果

世界前列的。

当前,无人机在现代战争中发挥着越来越重要的作用。T/R 双模 MPM 是无人机平台应用的最佳产品模式。比如基于 T/R 双模 MPM 研制出侦察干扰一体的载荷,在进行侦察的同时还具有干扰功能,避免无人机被敌方发现、诱骗或者夺控。

MPM 干扰机的突出优势是在小型化要求较高的无人机平台上有广泛而重要的应用。对侦察、诱骗、干扰、夺控、毁伤一体化干扰机技术的发展具有重大意义和推广价值。

(1)海上维权时,对敌侦察预警机、战斗机、轰炸机以及电子战飞机的机载多功能雷达实施远距离大功率压制干扰或灵巧欺骗干扰,实现海上防区外拒止能力。

(2)反雷达作战时,直接飞临敌方雷达上空,对敌预警探测雷达、警戒引导雷达和防空武器控制系统雷达,实施逼近时穿越干扰或狼群式饱和压制干扰,掩护战斗机群或战术导弹突防,赢得战场主动权。

(3)作战训练演练时,可用于实战化复杂电磁环境的构建,让信息化装备在模拟受到模拟敌方强干扰条件下,开展贴近实战状态的训练;同时可用于模拟演练蓝军无人靶机,检验和评估信息化装备的作战效能。

(4)MPM 干扰机还可即插即用、嵌入式应用于无人船、无人潜航器、临近空间平台等各种无人和有人作战平台。

4 结 论

现代战争正向雷达、电子战综合一体化方向发展,要求系统的射频功放环节既能工作在高峰值功率、低占空比的高模工作方式,也能工作在低峰值功率、准连续波的低模工作方式,针对这一需求,结合电子系统收发共孔径的要求,提出了 T/R 双模 MPM 技术。基于三端口双向 T/R 行波管,通过在慢波系统的衰减器附近设置一个耦合口,实现行波管的信号反向接收功能;通过 T/R 双模行波管设计、双模放大均衡组件、双调制栅极电源等技术实现 MPM 的双模双向功能。从仿真和测试结果看,T/R 双模 MPM 技术的实现是可行的。T/R 双模 MPM 可实现干扰机载荷的准连续波和脉冲两种工作模式,实现新型的双模干扰体制,满足侦干一体化的作战需求。同时可使干扰机同时实现大功率、宽频带条件下收发共孔径功能,避免了常规 T/R 组件中的环形器带来的损耗、体积和带宽方面的不足,使系统小型化水平大幅提高。因此,具有非常广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 李建兵,林鹏飞,郝保良,等.微波功率放大器发展概述[J].强激光与粒子束,2020,32:073001.(Li Jianbing, Lin Pengfei, Hao Baoliang, et al. Overview of development of microwave power amplifiers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 073001)
- [2] 郝保良,邱立,邵淑伟,等.电子战用功率行波管[J].电子信息对抗技术,2018,33(1):64-68.(Hao Baoliang, Qiu Li, Shao Shuwei, et al. Traveling-wave tubes for electronic warfare[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2018, 33(1): 64-68)
- [3] 王斌,王凤岩,周旭,等.微波功率行波管及模块的应用发展趋势[J].真空电子技术,2019(2):1-7.(Wang Bin, Wang Fengyan, Zhou Xu, et al. Application and development trend of TWTs and MPMs[J]. Vacuum Electronics, 2019(2): 1-7)
- [4] 廖复疆.超小型器件和微波功率模块的发展—真空电子和微波光子技术的融合[J].真空电子技术,2018(1):1-9.(Liao Fujiang. The development of micro-device and microwave power module—vacuum electronics mixed with microwave photonics[J]. Vacuum Electronics, 2018(1): 1-9)
- [5] 张志伟,王斌,王凤岩.浅谈 MPM 发展趋势[J].电子信息对抗技术,2018,33(1):69-72.(Zhang Zhiwei, Wang Bin, Wang Fengyan. A brief introduction to development trend of the MPM[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2018, 33(1): 69-72)
- [6] 柏光东,徐晓荣,陈永浩.一种超宽带中功率 MPM 的设计[J].雷达科学与技术,2009,7(5):397-400.(Bai Guangdong, Xu Xiaorong, Chen Yonghao. Design of an ultra-wide band microwave power module[J]. Radar Science and Technology, 2009, 7(5): 397-400)
- [7] 韩家瑞.双模行波管概述[J].电子管技术,1979(4):4-7.(Han Jiarui. Overview of dual mode traveling wave tubes[J]. Electronic Tube Technology, 1979(4): 4-7)
- [8] ZhaoChangjiang, Wang Yanmei, Qiu Li. The wideband mini-TWT for T/R module applications[C]//Proceedings of the 22nd International Vacuum Electronics Conference. 2021: 1-2.
- [9] 张志伟,李强斌,费娜,等.收发型 MPM 的实现和应用[J].真空电子技术,2023(5):81-84.(Zhang Zhiwei, Li Qiangbin, Fei Na, et al. Implementation and application of T/R MPMs[J]. Vacuum Electronics, 2023(5): 81-84)
- [10] 董坤.回旋行波管电子光学系统及高频结构研究[D].成都:电子科技大学,2017.(Dong Kun. Research on electron optical system and high frequency structure of gyrotron travelling wave tubes[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017)
- [11] 张磊,邱立,王严梅,等.大功率快启双模行波管研制[J].真空电子技术,2021(2):67-72.(Zhang Lei, Qiu Li, Wang Yanmei, et al. Development of a high-power fast warming-up dual-mode TWT[J]. Vacuum Electronics, 2021(2): 67-72)
- [12] 焦江娜,邱立,王严梅,等.7.5~18GHz 宽带大功率脉冲行波管关键技术研究[J].真空电子技术,2019(3):13-15.(Jiao Jiang'na, Qiu Li, Wang Yanmei, et al. Research on key technologies of 7.5~18GHz broadband high power pulsed TWTs[J]. Vacuum Electronics, 2019(3): 13-15)
- [13] 林鹏飞,李建兵,郝保良,等.MPM 干扰机设计与实现[J].信息工程大学学报,2021,22(3):294-298.(Lin Pengfei, Li Jianbing, Hao Baoliang, et al. Design and implementation of MPM jammer[J]. Journal of Information Engineering University, 2021, 22(3): 294-298)
- [14] 李建兵,郭盼盼,王永康,等.小型化行波管放大器热仿真分析及优化设计[J].强激光与粒子束,2019,31:113004.(Li Jianbing, Guo Panpan, Wang Yongkang, et al. Thermal simulation analysis and optimization design of miniaturized traveling wave tube amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 113004)