Vol.22 No.1 February 2024

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2024.01.015

高功率密度高动态性能毫米波固态发射组件研究

夏 熙,徐小帆,张海兵,陈文俊

(中国船舶集团有限公司第七二四研究所, 江苏南京 211153)

摘 要:随着雷达发射技术的发展,发射组件小型化、高功率密度化、高动态性能化成为研究的热点与难点。为提升发射组件的功率密度,基于氮化镓(GaN)器件与波导空间合成技术提出一种堆叠式发射组件设计方案,实现波导功分合成网络与组件盒体的一体化集成,同时将多路功放模块堆叠至功分合成网络之上实现组件的高功率密度小型化设计;为提升发射组件的效率,优化其脉冲负载条件下的动态性能,供电单元采用分布式结构,以"半桥LLC+双同步Buck"为主功率拓扑,半桥LLC与同步整流技术的应用实现组件成本的降低与效率的提升,创新性引入状态轨迹控制策略(OTC),在负载突变时,通过采集半桥LLC谐振槽电感电流、谐振电容电压与输出电压实现主拓扑的变频控制,从而优化发射组件的动态性能。以Ka波段200 W 固态发射组件为例开展设计,实测结果表明,组件峰值功率达到213 W,平坦度达到±0.2 dB,输出杂散<59 dBc,在某频段组件综合效率最大为19.9%,提升了约2.1%,功率密度相比于同波段组件提升了17.98%,达到1458 W/in³,组件脉冲负载切换动态调整时间提升了19.2%左右,具有明显的优势。

关键词: 高功率密度组件: 动态性能优化; 固态发射技术; 同步整流技术; 状态轨迹控制策略

中图分类号:TN925;TN832

文献标志码:A

文章编号:1672-2337(2024)01-0111-08

引用格式:夏熙,徐小帆,张海兵,等.高功率密度高动态性能毫米波固态发射组件研究[J].雷达科学与技术,2024,22(1):111-118.

XIA Xi, XU Xiaofan, ZHANG Haibing, et al. Research on Millimeter Wave Solid-State Transmitter Modules with High Power Density and High Dynamic Performance [J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(1):111-118.

Research on Millimeter Wave Solid-State Transmitter Modules with High Power Density and High Dynamic Performance

XIA Xi, XU Xiaofan, ZHANG Haibing, CHEN Wenjun (No.724 Research Institute of CSSC, Nanjing 211153, China)

Abstract: With the development of radar transmission technology, the miniaturization, high power density, and high dynamic performance of transmitting modules have become the research focus. To improve the power density of the transmitting module, a stacked transmitting module's design scheme based on gallium nitride(GaN) and waveguide spatial power-combining techniques is proposed, which achieves the integration of waveguide spatial power dividing/combining network and module's box body. At the same time, multiple power amplifier modules are stacked on the top of the waveguide spatial power dividing/combining network to achieve high power density and miniaturization design of the module. In order to improve the efficiency of the transmitting module and optimize its dynamic performance under pulse load conditions, the power supply unit adopts a distributed structure, with "a half-bridge LLC+ dual-synchronous Buck" as the main power topology. The application of the half-bridge LLC and synchronous rectification technology reduces cost and improves efficiency. Innovatively, a state trajectory control strategy (OTC) is introduced to collect the inductance current, the resonant capacitor voltage and output voltage of the half-bridge LLC resonant slot during load mutation to achieve frequency conversion control of the main topology, thereby optimizing the dynamic performance of the transmitting module. Taking the Ka band 200 W solid-state transmitting module as an example, the measured results show that the peak power of the module reaches 213 W, the flatness reaches ±0.2 dB, and the output stray is ≤-59 dBc. In a certain frequency band, the maximum comprehensive efficiency of the module is 19.9%, increasing by about 2.1%. Compared with the modules in the same band, the power density increases by 17.98%, reaching 1 458 W/in³. The dynamic adjustment time of the module pulse load switching increases by about 19.2%, which has obvious advantages.

Key words: high power density module; dynamic performance optimization; solid-state transmission technology; synchronous rectification technology; state trajectory control strategy

0 引 言

现代雷达组件小型化、高功率密度化、高性能化发展趋势明显,大功率发射组件作为雷达发射分系统中的核心部分备受关注[1-2]。以氮化镓等第三代宽禁带半导体材料为基础的固态功放模块因其具有体积小、质量轻及稳定性强的优点,极大地推动了固态发射组件的设计发展,但对于百瓦级发射功率而言,发射组件需要多路固态功放模块进行功分合成,同时考虑供电控制、监测以及散热等因素,传统大功率固态功放组件往往体积较大,功率密度较低[3]。对于脉冲式负载而言,固态发射组件的设计往往忽略其供电单元对组件动态性能的影响而无法进一步优化该指标,因此提升固态发射组件的功率密度及效率,改善其脉冲负载情况下的动态性能,对于固态发射机大功率、小型化的研制具有重要的意义与工程价值[4-5]。

基于以上分析,本文主要以Ka波段200 W 固 态发射组件为例,介绍了一种高功率密度高动态 性能发射组件的优化设计方法,为进一步提升组 件的功率密度提出了一种堆叠式发射组件设计方 案,将空间波导功分合成网络与组件盒体进行一 体化加工集成,并采用空间合成与波导-微带双探 针转换组合方式,同时将多路功放模块堆叠至功 分合成网络之上,充分利用组件空间实现功率密 度的提升;在效率提升与动态优化部分,除了提升 功放模块、功分合成网络的效率之外,组件在供电 单元部分采用"半桥 LLC+双同步 Buck"为主功率 拓扑的供电思路, 半桥 LLC 拓扑[6-8]以及同步整流 技术[9]的应用极大程度上降低了供电损耗,同时创 新性引入"半桥 LLC+双同步 Buck"的状态轨迹控 制[10]策略,在负载突变时,通过采集谐振槽电感电 流、负载电流与输出电压实现主拓扑的变频转换, 从而实现发射组件的动态性能优化。实测本文设 计组件,其外形标准、接口独立,具备完善的监测保 护功能,其峰值功率达到213 W,平坦度≤±0.7 dB, 输出杂散≤-55 dBc,输出包络顶降≤5%,组件综合 效率提升了2.1%左右,功率密度相比于同波段组 件提升了17.98%,达到1458 W/in3,组件负载切换 动态调整时间提升了19.2% 左右, 综合来看, 组件 性能优良。

1 整机设计方案

对固态发射组件各组成的功能进行分区,主 要包含功率放大单元、组件供电单元、检测单元、 控制保护单元、功分合成网络单元以及散热单元, 其中功率放大单元包含驱动放大部分、各类隔离 器、末级氮化镓功放模块等;组件供电单元包含主 功率拓扑部分、环路控制部分、辅助供电部分等; 为了提升组件功率密度,实现组件小型化设计,检 测单元与控制保护单元一般集成在一块电路板, 主控制芯片依据国产化需求采用兆易创新 GD32F407IGH6芯片,基于该芯片完成组件功率、 功放模块电压、功放模块电流、组件温度、湿度等 物理量的检测与处理,同时完成功放模块的开关 控制、故障判断、动作保护与信息上报等功能;功 分合成网络采用空间合成与波导-微带双探针转换 组合方式,同时与组件盒体进行一体化加工,降低 组件尺寸。以 Ka 波段 200 W 固态发射组件为例, 对应的固态功放组件原理框图如图1所示。

组件关键核心单元为功率放大单元、供电单元以及功分合成网络单元。功率放大单元主要采用驱动放大部分对激励进行第一级驱动放大,再经过功分网络进行功分,通过末级氮化镓功放模块进行合成,完成功率放大,获取200 W以上的输出功率,功率放大单元采用氮化镓功放模块,通过合理布局实现效率的提升;供电单元主要采用"半桥 LLC+双同步 Buck"主功率拓扑,利用半桥 LLC电路的宽输入范围特性以及全负载范围内零电压开关特性,同时结合同步 Buck 电路的同步整流技术实现供电单元效率的提升,降低了供电成本,主拓扑状态轨迹控制策略的应用进一步提升了组件脉冲式负载情况下的动态性能;功分合成网络采用空间合成与波导-微带双探针转换组合方式,降低了组件功分合成损耗,提升了组件功率密度。

2 关键技术研究

2.1 小型化高效功率合成技术

功率合成为发射组件的关键技术,其主要难 点在于高功率密度化与高效化,本文所研制的固

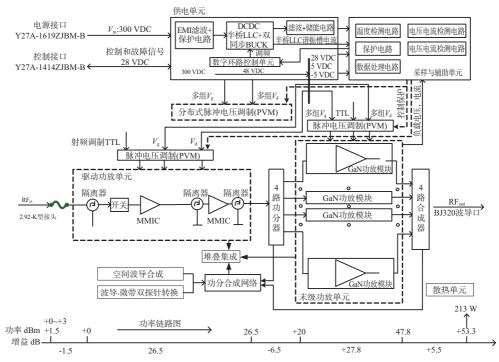


图 1 高功率密度高动态性能固态功放组件原理框图

态发射组件功率合成技术原理框图如图2所示,其 主要包含驱动功放部分、末级氮化镓固态功放部 分以及开槽波导空间功分合成部分。整个功率合 成链路采用"驱动功放单元+末级功放单元"方案。

为了优化输出功率的饱和性和带内平坦度,驱动功放单元采用两级放大,同时为了更好地改善功放输入输出的匹配程度,在两级功放输入输出级间增加隔离器与衰减器,在驱动单元的调制

部分,采用高速射频开关对射频信号的脉冲进行调制,从而优化射频信号检波包络的前沿上升与后沿下降时间。以 Ka 波段 200 W 组件为例,驱动功放单元的输入激励为 0 dBm,拟设计驱动功放单元输出为 26.5 dBm,基于此设计驱动功放单元增益分配表如表 1 所示,所选功率芯片核心参数如表 2 所示,射频开关以及隔离器主要参数如表 3 所示。

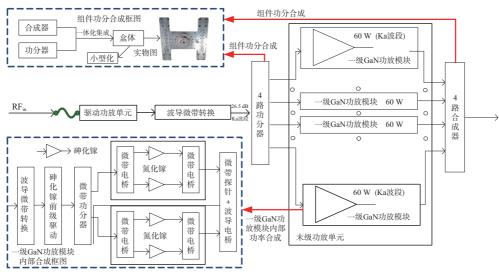


图 2 功率合成技术原理框图

表1 驱动功放单元增益分配表

参数	隔离器	开关	驱放1	衰减器	驱放2	隔离器	整个 单元
输入/dBm	0	-0.5	-1.5	18.5	9	27	0
增益/dB	-0.5	-1	20	-9.5	18	-0.5	26.5
输出/dBm	-0.5	-1.5	18.5	9	27	26.5	26.5

表 2 功率芯片核心参数表

参数		功率增 益/dB				
驱放1	33~37	21	20	6	0.1	16.7
驱放2	33~37	18	27	5	0.3	33.4

表 3 射频开关以及隔离器主要参数表

参数	频率/ GHz	插损/ dB		输入 P ₋₁ /dBm		驻波
射频 开关	30~40	-1	24	24	10	1.3
隔离器	33~37	-0.5	18	33	-	1.35

对于末级氮化镓固态功放单元,其主要由多 个一级氮化镓模块组成,一级氮化镓模块采用两 级放大方案,第一级采用砷化镓芯片,第二级采用 两片氮化镓芯片进行合成,一级模块内功分器与 合成器采用波导桥形式,最大限度减小模块内平 面电路带来的损耗,提高合成效率,同时改善前后 级的相应驻波与功放芯片间的隔离度。一级氮化 镓模块内部合成原理具体实现流程如下:模块内 一级驱动功放输出功率经过两路波导电桥功分器 驱动两级氮化镓功放,两级功放放大后再通过两 路波导电桥合成器实现最终功率的输出。同样以 Ka波段200 W组件为例,经过功分网络之后的末 级氮化镓固态功放单元的输入功率为20 dBm,经 过一级氮化镓模块放大后输出功率为48 dBm,基 于此设计一级氮化镓模块增益分配表如表4所示, 所选功率芯片核心参数如表5所示。

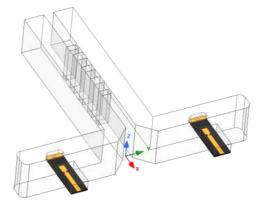
表 4 一级氮化镓模块增益分配表

参数	驱动 功放	微带转波 导电桥	末级 功放	微带转波 导电桥	整个模块
输入功率/dBm	20	34.5	31	45.5	21
增益/dB	14.5	-3.5	14.5	2.5	27
输出功率/dBm	34.5	31	45.5	48	48

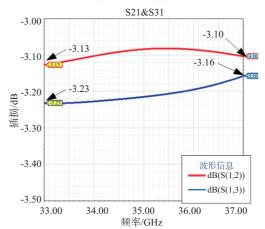
表5 一级氮化镓模块功率芯片核心参数表

参数			输出功 率/dBm	–		
第一级功放	33~37	18	36	6	2.8	23.7
第二级功放	33~37	14.5	45.5	24	6.3	23.4

一级氮化镓模块功分合成网络与整个组件功分合成网络均采用空间合成与波导-微带双探针转换组合技术进行设计,该种方案有利于功放模块与功分合成网络进行堆叠设计,在保证低损耗、高隔离度的同时,还能够承受较大的功率,对应的两路波导合成器仿真模型与插损曲线分别如图3(a)与图3(b)所示,组件部分仿真曲线如图4所示。仿真结果验证了方案的优越性。



(a) 两路波导合成器仿真模型图



(b) 两路波导合成器插损曲线图

图 3 两路波导合成器仿真模型及插损曲线图

2.2 高动态性能控制策略

为了进一步提升组件供电单元的效率,采用 "半桥 LLC+双同步 Buck"主功率拓扑,同时创新性 地引入状态轨迹控制策略实现脉冲式负载的动态性能优化,供电单元主功率拓扑及环路控制原理 图如图5所示。

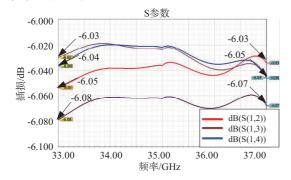


图4 组件功分合成网络仿真插损曲线图

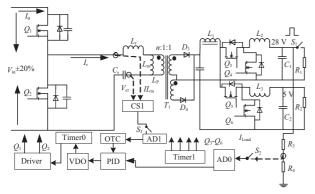


图 5 组件供电单元主功率拓扑

为了提升组件负载切换时控制网络的动态响应速度,优先利用半桥 LLC 谐振槽的谐振电压变化、谐振电流变换进行调频。图6所示为负载变换时谐振槽谐振电流、谐振电压、开关管 Q₁和 Q₂的驱动波形以及状态轨迹图,在一个完整的开关周期内,变换效率设定为100%,利用谐振槽电荷变化量反映谐振网络能量变换的事实,同时考虑谐振

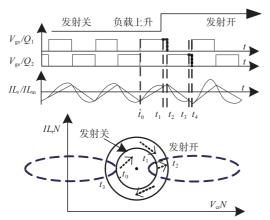


图 6 负载变换时谐振槽物理量波形及状态轨迹图

电容电压的对称性特性,可以求得输入电流与谐振电容电压在负载切换前 t_1 、 t_2 、 t_3 及 t_4 时刻的关系式如式(1)、式(2)、式(3)及式(4)所示,其中 I_0 为输入电流, C_r 为谐振电容容值, $V_{cr}(t_1)$ 、 $V_{cr}(t_2)$ 、 $V_{cr}(t_3)$ 及 $V_{cr}(t_4)$ 分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 以及 t_4 时刻谐振电容电压, V_{in} 为主拓扑输入电压, f_s 为开关频率,n为变压器变比。

$$V_{\rm cr}(t_1) = \frac{V_{\rm in}}{2} - \frac{I_{t_1}}{2C_{\rm c}f_{\rm c}n} \tag{1}$$

$$V_{\rm cr}(t_2) = \frac{V_{\rm in}}{2} + \frac{I_{t_2}}{2C_{\rm r}f_{\rm s}n}$$
 (2)

$$V_{\rm cr}(t_3) = \frac{I_{t_2}V_{\rm in}}{4C_{\rm r}f_{\rm s}n} + V_{\rm in}/2 + \frac{I_{t_4}V_{\rm in}}{4C_{\rm r}f_{\rm s}n}$$
(3)

$$V_{\rm cr}(t_4) = \frac{V_{\rm in}}{2} + \frac{I_{t_4}}{2C_r f_s n} \tag{4}$$

基于谐振电容电压与谐振电流关系,可以得到在负载切换前 t_2 时刻与负载切换后 t_3 时刻对应的时间差 ΔT ,此时间差即为周期差,对应的公式如式(5)所示,对应的 L_m 为谐振槽电流。

$$\Delta T = t_3 - t_2 = \frac{2L_{\text{m}}(I_{t_3} - I_{t_2})}{n} + 4f_{\text{s}}C_{\text{r}}L_{\text{m}}(1 - V_{\text{in}}) (5)$$

此时可以计算出负载切换后的开关频率为式(6)所示,对应f₁为负载调整前初始频率,f₂为负载调整后的目标频率,对于组件脉冲式负载而言其峰值负载是定值,实际计算时将目标负载与原始负载直接带入计算。

$$f_2 = \frac{1}{\frac{1}{f_1} + \triangle T} \tag{6}$$

基于此,拓扑控制策略如下:当组件负载处于脉宽内稳定状态时,此时控制网络采样输出电压值,通过PID进行微调控制,此时控制网络中开关 S_2 闭合,开关 S_3 断开,由于负载处于稳定状态,此时微小的波动常规PID控制可以实现较好的动态调整;当组件负载处于脉冲跳跃阶段时,此时控制网络MCU开始采样负载电流 I_{Load} 、谐振槽电感电流 I_{Load} 、谐振槽电感电流 I_{Load} 、谐振槽电感电流 I_{Load} 、谐振槽电感电流 I_{Coad} 、谐振槽电感电流 I_{Coad} 、谐振槽电感电流 I_{Coad} 、谐振槽电感电流 I_{Coad} 、谐振槽电感电流变制(OTC)模块,此时开关 I_{Coad} 、谐振槽电感电流

频率快速切换时的电压过冲震荡,在计算得出目标频率 f_2 后,将其与原始频率 f_1 进行求差得频率差 Δf ,最后根据实际需求将频率差 Δf 分为n段,此时 PID 进行控制时按照频率分段进行逐步调整,根据实测经验推荐,不同频率下的n推荐值如表 6 所示。

表6 不同频率下的n值推荐表

谐振频率	n	谐振频率	n
250 kHz	2	750 kHz	6
$500 \; \mathrm{kHz}$	4	1 MHz	8

2.3 堆叠式一体化集成技术

采用堆叠式一体化设计,将组件的功分合成 网络与组件盒体一体化加工,同时将驱动功放单 元、末级功放单元以及供电单元堆叠至功分合成 网络上端,驱动功放单元、末级功放单元以及供电 单元实现紧凑型布局设计,相应的各单元布局如 图7所示,其中供电单元紧贴驱动功放单元与末级 功放单元,其主要目的在于降低线路损耗、减小线 路寄生带来的影响。

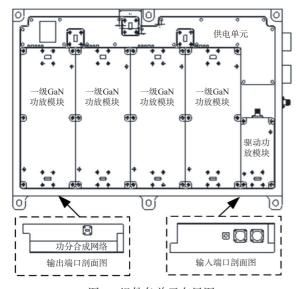


图7 组件各单元布局图

组件采用传导散热方案,为了强化散热效果, 在功放模块与散热板之间垫适量的铟片,用以增加功放模块与散热片的接触面积,同时增加导热效率,设计凸台为供电单元热源芯片、开关管进行散热,同时在凸台与热源之间垫加导热绝缘衬垫,提升导热性能与绝缘性能。以Ka波段200 W 固态 发射组件为例,组件热仿真效果如图8所示,从图中可以看出功放组件中热源部分最高温度在85℃左右,满足组件实际工作不超过100℃需求,散热效果良好。

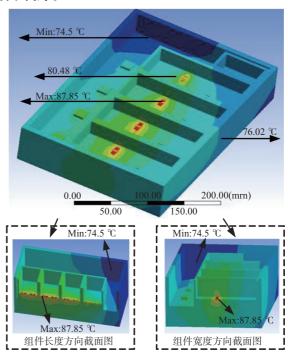


图 8 组件热仿真效果图

3 实测结果与分析

以 Ka 波段 200 W 固态发射组件为例,按照本文设计方案设计,组件主要指标如下:工作频率 33~37 GHz,输出峰值功率>200 W,输出功率平坦度≤±0.7 dB,输入脉冲信号最大占空比 20%,最大脉宽 50 μs,最小脉宽 0.2 μs,输出包络前后沿≤25 ns,输出包络顶降≤5%,输出杂散≤-55 dBc,供电单元输入电压为 DC300 V。设计完成的组件实物与测试条件如图 9 所示,采用四路氮化镓固态功放模块进行功率合成,其中单个模块输出 60 W,供电单元环路控制芯片采用兆易创新 GD32F407IGH6,同步整流部分 MOS 管采用扬杰 YJG95G06B,半桥 LLC 功率开关选用氮化镓 MOS 管 GS66502B,组件最终尺寸为 318 mm×200 mm×65 mm。

本文最终设计 Ka 波段功放组件的峰值输出功率为 213 W(53.3 dBm),尺寸为 318 mm×200 mm×65 mm,对比同波段相关组件常温状态下指标如表7所示。从表中可以看出按照本文设计思路设计

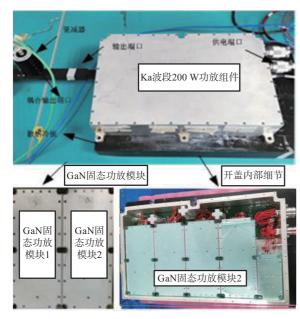


图 9 Ka波段 200 W 固态发射组件实物图

的组件功率密度达到1458 W/in³,相比于功率密度较高的组件1提升了17.98%,虽然同频段峰值功率有所下降,但是在满足设计指标的前提下,组件功率密度达到了最优。

表7 功率密度对比表

组件	(33	.,,,,	出功率 Hz,带	5/W 宽 4 Gl	Hz)	尺寸/mm	功率 密度/		
	\boldsymbol{F}_1	F_2	F_3	F_4	F_5	长×宽×高	$(W \cdot in^{-3})$		
本文组件	211	213	208	210	213	318×200×65	1 458.9		
组件1[11]	206	222	217	230	208	330×200×80	1 236.6		
组件2[12]	213	239	234	251	224	400×200×100	886.9		

在效率指标层面,本文设计的组件与对比的组件1、组件2的效率曲线如图10所示。从图中可以看出,在某频段组件效率最大达到19.9%,提升了2.1%左右。综合来看,本文设计的组件具有良好的效率。

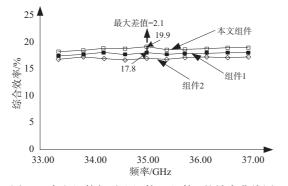


图 10 本文组件与对比组件 1、组件 2 的效率曲线图

在脉冲负载条件下,主功率拓扑开关频率设定为1 MHz,变压器采用平面变压器,频率分段为8,通过这种方式进一步降低供电单元所占空间,提升组件功率密度。组件实测负载从轻载(0.1 A左右)上升到6 A负载时,对应的输出电压动态调整时间约为97 ns,其相比于现有供电单元技术方案调整时间提升了19.2%左右,对应的瞬态调整波形与对应的状态轨迹图如图11 所示。

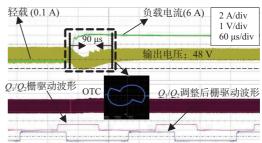


图11 组件脉冲负载条件下瞬态调整波形与对应状态轨迹图

常温下测试本文组件其他指标,对应测试结果如表8所示。从表中可以看出,输出平坦度为±0.2 dB,输出杂散最小为-69.88 dBc,上升沿最大时间为23 ns,下降沿最大为23 ns,脉冲顶降最大为5%,满足设计指标要求。

表8 组件其他指标测试结果表

电特性参数	检验结果(33~37 GHz,带宽4 GHz)							
电付性参数	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5			
平坦度/dB	±0.2							
主副瓣比	-13.0	-13.0	-13.5	-13.4	-13.0			
输出杂散/dBc	-59.70	-69.55	-69.88	-69.87	-69.79			
上升沿/ns	23	22	22	22	20			
下降沿/ns	20	23	22	22	22			
脉冲顶降/%	3.5	3.38	4.94	5	4.95			

综合上述实测结果,本文所设计的 Ka 波段 200 W 固态发射组件,相比于同波段同功率组件而言,在功率密度、综合效率以及动态性能上具有明显的优势。

4 结束语

本文主要介绍了一种高功率密度高动态性能 发射组件优化设计方法,通过堆叠式发射组件设 计方案提升了组件的功率密度,将空间波导功分 合成网络与组件盒体进行一体化加工集成,并采 用空间合成与波导-微带双探针转换组合方式,同 时将多路功放模块堆叠至功分合成网络之上,充 分利用了组件空间;在效率提升与动态优化部分, 本文除了提升功放模块、功分合成网络的效率之外,在供电单元部分采用了"半桥 LLC+双同步Buck"为主功率拓扑的供电思路,半桥 LLC 拓扑以及同步整流技术的应用极大程度上降低了供电损耗,同时创新性引入了"半桥 LLC+双同步 Buck"的状态轨迹控制策略,在负载突变时,通过采集谐振槽电感电流、负载电流与输出电压实现主拓扑的变频转换,从而实现了发射组件的动态性能优化。实测结果体现了本文提出的设计方法的优越性,具有较强的工程实践价值。

参考文献:

- [1] 马云柱,赵迎超,陈福媛.Ku频段2kW氮化镓固态发射机设计[J].计算机仿真,2022,51(2):79-82.
- [2] 韩玉朝,孔令甲,李德才.G波段高输出功率发射组件的设计[J].电子技术与软件工程,2022,11(6):170-173.
- [3] 张鸣一.Ku/Ka波段双频T/R组件关键技术研究[D].北京:中国电子科技集团公司电子科学研究院,2022.
- [4] 孙勇,林松,卢胜利,等.长脉宽模式下雷达供电系统功率波动机理研究[J].电源学报,2021,19(3):134-141.
- [5] 庞宇,黄文焘,吴骏,等.船舶大功率脉冲负载抗冲击供电系统[J].上海交通大学学报,2021,55(10):1197-1209.
- [6] PARK H P, JUNG J H. Modeling and Feedback Control of LLC Resonant Converters at High Switching Frequency
- (上接第110页) Science, 2018:19-35.
- [11] BERTINETTO L, HENRIQUES J F, VALMADRE J, et al. Learning Feed-Forward One-Shot Learners [C]// the 30th International Conference on Neural Information Processing Systems, Barcelona, Spain: NIPS, 2016:523-531.
- [12] PFISTER T, CHARLES J, ZISSERMAN A. Domain Adaptive Discriminative One-Shot Learning of Gestures [C]// European Conference on Computer Vision, Antibes, France: Springer Science, 2014:814-829.
- [13] GUI Liangyan, WANG Yuxiong, DEVA Ramanan, et al. Few-Shot Human Motion Prediction via Meta-Learning [C]// European Conference on Computer Vision, Munich, Germany: Springer Science, 2018:432-450.
- [14] 汪航.基于数据增强和度量学习的小样本图像识别技术研究[D].成都:电子科技大学,2022.
- [15] 王满喜,陆科宇,王佳保,等.基于数据增强与集成学习的小样本识别技术[J].移动通信,2022,46(7):2-9.
- [16] ODENA A, OLAH C, SHLENS J. Conditional Images Synthesis with Auxiliary Classifier GANs [C]// the 34th International Conference on Machine Learning, Sydney NSW Australia: JMLR, 2017:2642-2651.
- [17] 李明, 谭贤四, 曲智国, 等. 基于连通图的动态可重构多机协同干扰方法[J]. 雷达科学与技术, 2023, 21(3): 273-281.

- [J]. Journal of Power Electronics, 2016, 16(3):849-860.
- [7] JUNG J H, KIM H S, KIM J H, et al. High Efficiency Bidirectional LLC Resonant Converter for 380 V DC Power Distribution System Using Digital Control Scheme [C]// Applied Power Electronics Conference and Exposition, Orlando, FL, USA: IEEE, 2012:532-538.
- [8] YU Juzheng, QIAN Qinsong, SUN Weifeng, et al. A High-Efficiency Method to Suppress Transformer Core Imbalance in Digitally Controlled Phase-Shifted Full-Bridge Converter[J]. Journal of Power Electronics, 2016, 16(3):823-831.
- [9] JAIN P, PRODIC A, GERFER A. Wide-Input High Power Density Flexible Converter Topology for dc-dc Applications [C]//2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Long Beach, CA, USA:IEEE, 2016:2553-2562.
- [10] 赵钧,林弘毅,孙晓玮,等.基于简化状态轨迹的半桥 LCC谐振变换器无噪声Burst模式控制策略[J].2021, 36(20):4215-4224.
- [11] 徐建华.Ka 波段固态功率放大器研究与设计[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [12] 朱海帆, 党章, 李凯. Ka 频段 200 W 线性固态功放设计 [J]. 中国新技术新产品, 2012, 28(3):51-55.

作者简介:

夏 熙 男,硕士,工程师,研究方向为大功率发射技术。徐小帆 男,高级工程师,研究方向为大功率发射技术。

- [18] 史润佳, 黄一飞, 蒋忠进. 基于自适应权重 GPSR 算法的 ISAR 成像 [J]. 雷达科学与技术, 2023, 21(1):46-52.
- [19] RADFORD A, METZ L, CHINTALA S. Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks [C]//4th International Conference on Learning Representations, San Juan, Puerto Rico: ICLR, 2016:1-16.
- [20] 周华吉,焦李成,徐杰,等.基于生成对抗网络的数据增强方法及应用[J].太赫兹科学与电子信息学报,2022,20(12):1249-1256.
- [21] 庞伊琼, 许华, 蒋磊, 等. 基于元学习的小样本调制识别算法[J]. 空军工程大学学报, 2022, 23(5):77-82.
- [22] 谢智东,谭信,袁昕旺,等.基于生成对抗数据增强支持向量机的小样本信号调制识别算法[J].电子与信息学报,2023,45(6):2071-2080.

作者简介:

王艺卉 女,硕士研究生,研究方向为信息系统仿真与智能处理。

闫文君 男,博士,副教授,研究方向为信号处理技术。 **段可欣** 女,硕士研究生,研究方向为信息系统仿真 与智能处理。

于楷泽 男,硕士研究生,研究方向为航空兵战术。