

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2024.02.012

一种 L 波段国产 GaN 固态雷达发射机

姚 黄, 毛荣鑫

(四创电子股份有限公司, 合肥 230000)

摘要:为了应对国产雷达所有元器件均国产化需求,设计了一款工作频点在 1.2 GHz ~ 1.4 GHz 的国产氮化镓(gallium nitride, GaN)固态雷达发射机。使用国产 GaN 功率模块对发射系统最大限度地进行小型化设计,降低组件的重量,加强设备的高可靠性及维护方便性设计,进一步完善 GaN 功率模块在线测试功能,使产品具有高可靠性和完善的雷达故障诊断功能。增加系统的监控、检测及显示功能,并将各种工作状态信号都传输到主监控上,使系统的各种工作状态都能够在终端上显示,使操作人员通过终端界面便可以检查发射系统的各种工作参数,判断发射机的工作状态。在电磁兼容方面通过谐波滤波器对二次谐波的抑制,测试结果表明,发射系统输出信号的二次谐波小于等于 -66 dB。

关键词:L 波段; 国产 GaN 功率管; 固态雷达发射机

中图分类号:V443; TN957.3

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2024)02-0082-07

The invention relates to a domestic L-band GaN solid-state radar transmitter

YAO Huang, MAO Rongxin

(Sun Create Electronics Co., LTD, Hefei 230000, China)

Abstract:In order to cope with the demand of foreign chip ban and domestic radar, a domestic gallium nitride (GaN) solid state radar transmitter is designed at 1.2 GHz ~ 1.4 GHz. The domestic GaN power module is used to minimize the transmission system and reduce the weight of the components. Strengthen the high reliability and maintenance convenience design of the equipment, further improve the online test function of GaN power module, so that the product has high reliability and perfect radar fault diagnosis function. The monitoring, detection and display functions of the system are added, and all the working state signals are transmitted to the main monitoring, so that all the working states of the system can be displayed on the terminal, so that the operators can check the various working parameters of the transmitting system and judge the working state of the transmitter through the terminal interface. In terms of suppressing the second harmonic suppression by the harmonic filter, the test results show that the second harmonic of the output signal of the transmitting system is less than or equal to -66 dB.

Key words:L-band; domestic GaN power tube; solid-state radar transmitter

0 引言

基于氮化镓(gallium nitride, GaN)功率器件的优异性能,国际上各功率管生产厂家已经逐步停止了新硅(silicon, Si)功率管产品的研发投入,甚至已经开始逐步停止部分在售 Si 功率管的生产线,都在将主要资源投放在 GaN 功率管的研制上,新的 GaN 功率管产品在不断的推向市场。在技术发展前景

方面, GaN 半导体仍将是全球一些主要国家的科技攻关重点方向。2020—2021 年期间,全球一些国家已经开展了 GaN 等第三代半导体材料研发和生产项目,例如英国政府正支持化合物半导体中心(compound semiconductor centre, CSC)和新港晶圆厂(newport wafer fab, NWF)开发一种 200 mm 氮化镓功率晶体管代工工艺,因此预计未来全球氮化镓行业将迎来

收稿日期:2023-12-15; 修回日期:2024-01-16

基金项目:国家重点实验室项目(编号:6142411193202)

引用格式:姚黄, 毛荣鑫. 一种 L 波段国产 GaN 固态雷达发射机[J]. 空间电子技术, 2024, 21(2): 82-88. YAO H, MAO R X. The invention relates to a domestic L-band GaN solid-state radar transmitter[J]. Space Electronic Technology, 2024, 21(2): 82-88.

一段技术快速发展期。国内的中国电子科技集团第十三研究所(简称中电科集团十三所)、中国电子科技集团第五十五研究所(简称中电科集团五十五所)等近年来竞相角逐该领域,虽然 GaN 功率管的成本比 Si、SiC 的成本较大,但得益于 GaN 材料在其他领域的应用,使得其成本下降非常快,且 GaN 功率管的单管输出功率比较大,目前国内的 GaN 功率管的单位功率量级的价格已经低于国外的 Si 功率管^[1-4]。

由于受到国外的制裁及国产化需求的影响,本文的雷达发射机内部器件均采用国产化器件,文中的 GaN 功率管选用了中电科集团十三所的功率模块^[5-6]。在 42 V 工作电压下,320 μ s, 8% 占空比工作下,在 1.0 GHz ~ 21.4 GHz 频段内,输出 40 kW 峰值功率。

1 研究设计

功率放大器是发射系统的核心,发射系统的设计都是围绕着功率放大器进行设计,前期准备阶段主要是围绕国产 GaN 功率管测试进行。通过对中电科集团十三所及中电科集团五十五所 GaN 功率模块样件进行测试,发现两个厂家的功率管都能够满足使用要求,同时模块样件也存在着以下问题。

中电科集团五十五所功率模块:

- 1) 1% ~ 5% 工作比时,调制器工作异常,脉冲调制电压无输出,经更改后,已无此现象;
- 2) 脉冲电源供电电感过大,射频下降沿处,电压冲击较高;
- 3) 一只功率管输出功率增大时,输出信号波形变形,经调试时,问题已经解决;
- 4) 功率增益比中电科集团十三所功率管稍低,但饱和输出功率比中电科集团十三所功率管稍高;
- 5) 晶体管晶体管逻辑电路(transistor-transistor logic, TTL) 端口加 +5 V 电压时,调制器无法输出 50 V 直流电压。

中电科集团十三所功率模块:

- 1) 管芯热了之后,功率模块的输出功率下降较多;
- 2) 因调制器原因,2 μ s 之前的波形有振荡;
- 3) 45 V 条件下,功率管的饱和输出功率较小,在 600 W 左右,更改后,输出功率变大;
- 4) 在 1.25 GHz ~ 1.35 GHz 内,功率管的输出功率较高,在此频带之外,功率管的输出功率有所下降。

中电科集团十三所和中电科集团五十五所的 GaN 功率模块主要技术指标对比如表 1 所列。从表 1 可以看出,对比中电科集团五十五所功率管,中电科集团十

三所功率管技术指标较好,可靠性较高。综合考虑各种因素,选取中电科集团十三所的 GaN 功率管 NC5488M-1214P600 和 NC5489M-1214P200 作为前级,末级输出管。

表 1 功率管主要技术指标对比

Tab. 1 Comparison of main technical indicators of power tube

序号	参数	中电科集团十三所	中电科集团五十五所
1	最小输出功率	650 W	650 W
2	最大脉冲宽度	350 μ s	350 μ s
3	最大占空比	30%	12%
4	功率增益	≥ 16.5 dB	≥ 15.5 dB
5	工作效率	$\geq 65\%$	$\geq 65\%$
6	上升沿	≤ 200 nS	≤ 200 nS
7	顶降	≤ 0.3 dB	≤ 0.5 dB
8	驻波比(稳定工作)	3:1	3:1
9	驻波比(不损坏)	5:1	5:1
10	相位一致性	$\pm 10^\circ$	$\pm 10^\circ$
11	二次谐波	≥ 25 dBc	≥ 25 dBc
12	热阻	≤ 0.14 $^\circ\text{C}/\text{W}$	≤ 0.20 $^\circ\text{C}/\text{W}$

2 发射系统原理

发射系统的工作原理^[7]如图 1、图 2 所示, A/B 两路接收来自接收机送过来的 16 dBm 的射频激励信号,先分别送给 A/B 两个前级组件,经前级组件进行前级功率放大后输出两路前级输出功率,这两路前级输出功率再分别送至两个可调衰减器的输入端口,该可调衰减器位于选通单元。这两路功率经过可调衰减器调节后,再分别送至两个 30 dB 同轴耦合器, A/B 两路功率信号通过同轴耦合器后再分别送至选通开关上的两个输入端口。选通开关的工作通道由发射监控控制,当发射监控向选通开关的 A 路工作通道控制端发送一个脉冲高电平时,选通开关的工作通道切换到 A 路,此时,选通开关选择将 A 路的前级功率输出至 1:2 分配器,同时选通开关将 B 路的前级功率输出至 200 W 负载, B 路的前级功率被 200 W 负载吸收;当发射监控向选通开关的 B 路工作通道控制端口发送一个脉冲高电平时,选通开关的工作通道切换到 B 路,此时,选通开关选择将 B 路的前级功率输出至 1:2 分配器,并将 A 路的前级功率输出至 200 W 负载, A 路的前级功率被 200 W 负载吸收。送至 1:2 分配器的前级功率经 1:2 分配器分成两路,两路功率分别送至两个射频机柜的 1:8 分配器,每路射频信号再经 1:8 分配器分成 8 路,分别送至两个射频机柜中的 16 个末级组

件,由16个末级组件将射频输入功率进行末级功率放大,放大后的16路末级组件输出功率分别送至两个射频机柜中的两只8:1合成器的射频输入端,经2只8:1合成器进行功率合成后形成的两路射频功率分别送至2:1波导合成器的两个输入端,由2:1波导

合成器的总输出端口输出发射系统的总输出功率,发射系统的总输出功率经双向耦合器^[8]后输出至天线馈源系统。本文所设计的发射系统采取小型化设计,发射机采用3个1800 mm × 600 mm × 1000 mm(高 × 宽 × 深)机柜。发射机柜布局图如图3所示。

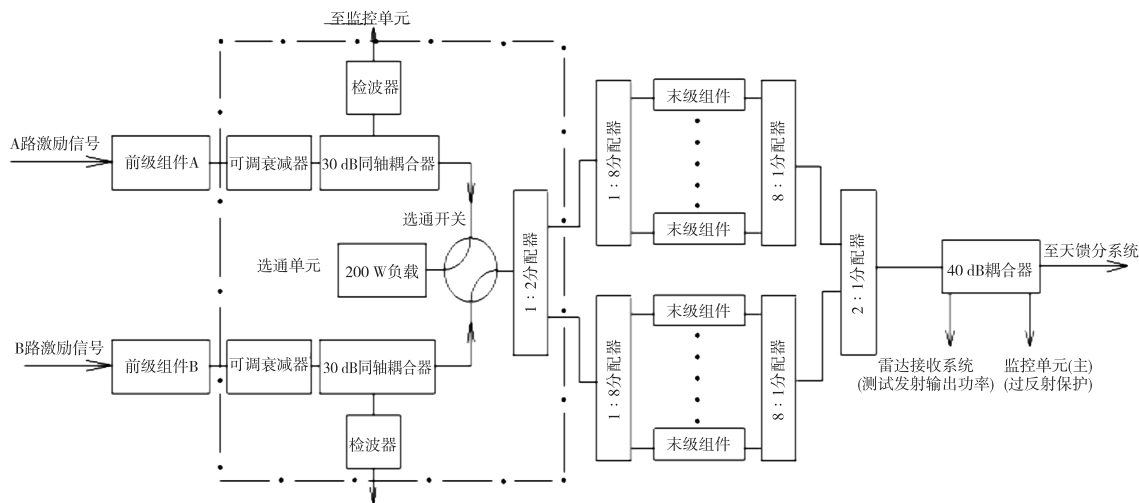


图1 发射系统射频放大器 (radio-frequency amplifier, RF amplifier) 电路原理框图

Fig.1 Transmitting system RF amplifier circuit principle block diagram

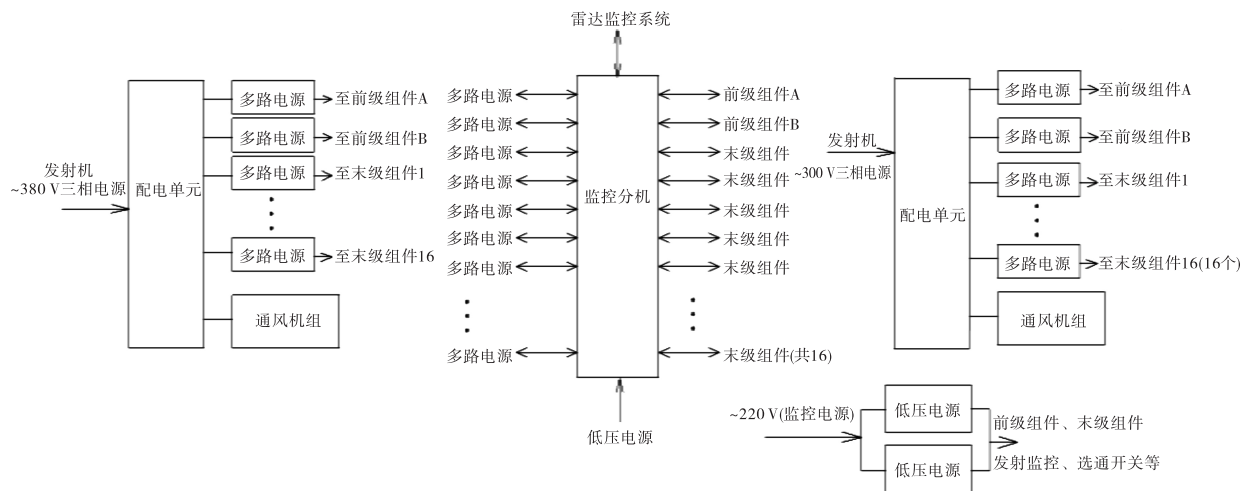


图2 发射系统供电及监控原理框图

Fig.2 Transmission system power supply and monitoring principle block diagram

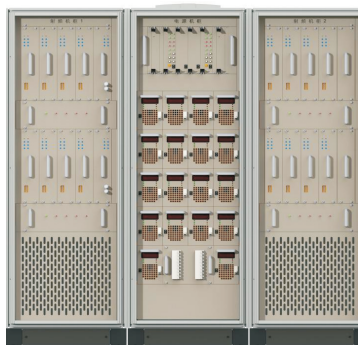


图3 发射机柜结构布局

Fig.3 Launch cabinet structure layout

选通单元中的2只30 dB同轴耦合器分别将A/B两路的前级功率信号耦合出一个小功率信号,由检波器将射频小功率信号检波为低频信号送至监控分机,由监控分机中的发射监控进行发射系统的过宽、过工作比检测及保护。双向耦合器有两个耦合端口,两个耦合端口分别耦合发射总输出功率信号及反射功率信号,发射输出耦合信号送至雷达接收系统,在接收系统中检测发射机的总输出功率^[9];反射耦合信号送至发射监控分机,由发射监控检测反射功率的大小,当发射功率过大时,发射

系统紧急关机,进而保护发射机。

在室温条件下(25℃),发射系统热分析结果如图4所示。在25℃环境温度条件下,射频机柜中器件的最高温度大约为48℃,远低于85℃(GaN功率管的最高工作温度),出现在600W模块的安装位置,上层末级组件的前面板温度为42℃左右,下层末级组件的前面板温度为37℃左右,温度与原系统的实际温度大致相同。

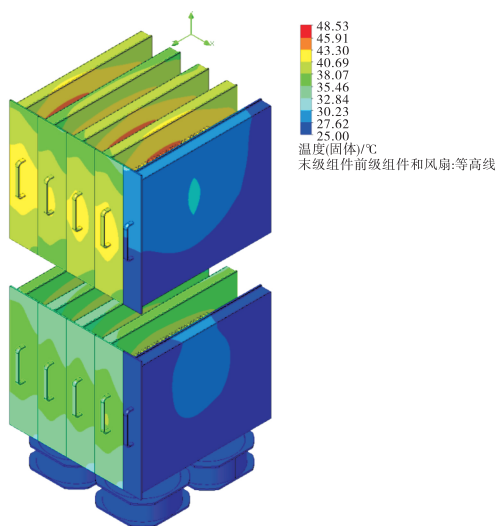


图4 射频机柜表面云图

Fig. 4 Cloud image of the RF cabinet surface

3 前级组件

3.1 前级组件原理

前级组件的布局图如图5所示,前级组件的输入端设置有一个1:2分配器,分配器的输入端设置有一个隔离器,由于接收激励到前级组件之间的电缆长度较长,电缆驻波较大,导致进入前级组件第一级功放的输入功率起伏较大,隔离器的作用是消除驻波的影响,降低进入前级组件第一级功放的功率起伏。1:2分配器将射频激励信号分成两路,第一路经1dB衰减器进行功率调节后送至前级组件的第一级18W功放,由18W功放将激励信号放大至18W,18W的射频功率信号经0.5dB衰减器进行功率调节后送至600W放大器的输入端,由600W放大器进行功率放大,600W放大器的输出功率经隔离器、均衡器、30dB耦合器后经前级组件的输出端输出前级组件的总输出功率。隔离器具有单向导通特性,600W放大器的输出功率能够正常通过隔离器,只有一个0.3dB左右的直通损耗,系统的反射功率经过隔离器后将被隔离器完全吸

收,从而保护600W放大器不受反射功率的损害。600W放大器的低频端输出功率大,高频端输出功率小的特性,带内起伏比较大,输出功率经均衡器进行功率调节后,将会降低前级组件输出功率的带内起伏。

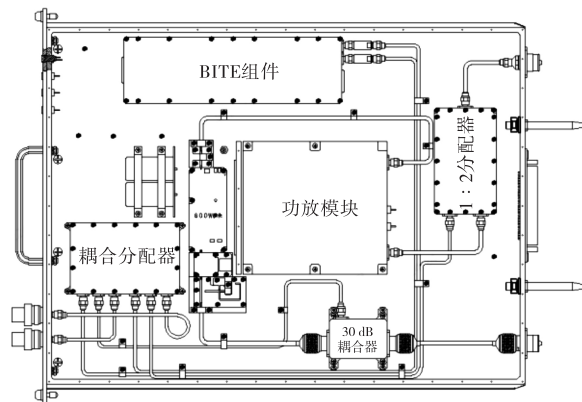


图5 前级组件布局图

Fig. 5 Previous component layout diagram

1:2分配器的另一个输出端口的输出功率经电缆送入输入检波分配器的输入端口,检波分配器的一路射频输出信号从其中一个射频输出端口输出,经射频电缆送至前级组件面板上的输入耦合检测端口进行检测。另一路射频信号经检波分配器上的检波器将射频信号检波为低频信号送至组件内BITE^[10]进行前级输入功率检测。

3.2 前级组件检测

前级组件输出端的30dB耦合器将前级组件输出功率耦合出一个600mW左右的射频耦合信号,射频耦合信号经电缆输出至输出检波分配器的输入端口,先由输出检波分配器总口的10dB衰减器衰减10dB后经1:2分配器后分成两路,一路经1dB衰减器进行功率调节后送至前级组件面板上的输出耦合检测端口进行检测,另一路经1dB衰减器进行功率调节后由检波器将射频信号检波为低频信号送至组件内机内测试设备(built-in test equipment, BITE)进行前级组件输出功率检测。

前级组件内的600W功率放大器的漏极电源由1只供电板供电,供电板上安装有两只额定电压63V,容量为6800μF的供电电容。在供电板向放大器供电的输出端串接有一个电流检测芯片,当放大器工作时,电流检测芯片中会通过一个脉冲电流,此时,电流检测芯片会产生一个与电流大小成正比的感应脉冲电压,感应电压送至组件内BITE中,用于进行放大器的工作电流检测^[11]。

组件内 BITE 内设计有 +50 V 电源的过/欠压保护及 -5 V 电源故障保护功能,当 50 V 电源超过 52 V,低于 40 V 时,报 50 V 电源过压/欠压故障,并将故障信号通过串口报发射监控,同时关闭 18 W 功放和 600 W 放大器的可编程可积负 (programmable integrable negative, PIN) 控制信号。当 -5 V 电压故障时,组件内 BITE 关闭 18 W 功放和 600 W 放大器的 PIN 控制信号,同时通过串口向发射监控报 -5 V 电源故障。

4 末级组件

4.1 末级组件原理

末级组件的布局图如图 6 所示,在末级组件的输入端设置有一个 30 dB 耦合器,末级组件 10 W 左右的输入功率先经过 30 dB 耦合器后进入一只 1 dB 衰减器,1 dB 衰减器可以根据实际输入功率的大小换成 0.5 dB 或 1.5 dB 衰减器。射频输入功率经 1 dB 衰减器进行功率调节后,进入末级组件输入端的均衡器,经均衡器对末级组件输入功率的带内平坦度进行调节后,进入末级组件输入端的隔离器,隔离器的作用是消除末级组件的输入功率经长距离线路传输后引起的过大的驻波比,防止进入 200 W 放大器的输入功率因驻波比过大而引起输入功率带内平坦度过大。

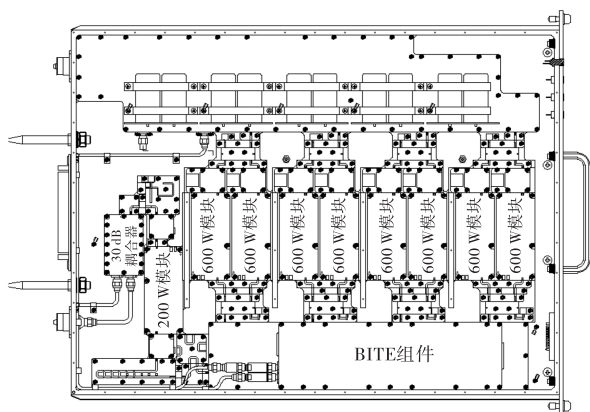


图 6 末级组件布局图

Fig. 6 Final component layout diagram

末级组件 10 W 的输入功率经耦合器、衰减器、均衡器、隔离器后最终进入 200 W 放大器的输入功率约为 8 W,8 W 的输入功率经 200 W 放大器进行功率放大,放大器后输出 200 W 左右的射频驱动功率,200 W 放大器后设置有一个隔离器用于吸收系统的反射功率,防止过大的反射功率引起 200 W 放大器

损坏。200 W 左右的射频输出功率经隔离器后进入均衡器,经均衡器进行带内平坦度调节后的驱动功率再经过一只 1 dB 衰减器进行功率大小调节。1 dB 衰减器可以根据实际输出功率的大小换成 0.5 dB 或 1.5 dB 衰减器。经调节后的驱动功率经 1:4 分配器分成 4 路,每一路射频功率再经过一个 1:2 电桥^[12]分配器分成 2 路,共形成 8 路射频信号,8 路射频信号分别送至 8 只 600 W 放大器的输入端,600 W 放大器的最小输出功率为 650 W,经 600 W 放大器进行功率放大后形成 8 路大于 650 W 的射频输出功率,每 2 路射频输出功率分别经 4 只 2:1 电桥合成器进行功率合成后形成 4 路输出功率,电桥合成器后设置有一个隔离器用于吸收系统的反射功率,防止过大的反射功率引起 600 W 放大器损坏。4 路输出功率经过后送至 1 只 4:1 合成器的 4 个输入端口,末级组件的总输出功率可以通过 4:1 合成器合成后输出。末级 600 W 模块放大器的各参数的工作电特性参数如表 2 所列。

表 2 高频电特性参数

Tab. 2 High-frequency electrical characteristic parameters

序号	指标	指标要求
1	饱和输出功率	≥ 600 W
2	功率增益	≥ 15 dB
3	功率增益平坦度	≤ 0.5 dB
4	功率附加效率	$\geq 65\%$
5	输入回波损耗	≤ -9 dB
6	二次谐波抑制比	≥ 25 dBc
7	脉冲上升沿	≤ 200 nS
8	脉冲下降沿	≤ 200 nS
9	脉冲顶降	≤ 0.3 dB
10	带外杂波抑制比	≥ 70 dBc
11	相位一致性	$\pm 10^\circ$
12	射频热阻	≤ 0.14 $^\circ\text{C}/\text{W}$

4.2 末级组件检测

系统工作时,末级组件输入端口的 30 dB 耦合器的耦合输出端口输出有一个的 10 mW 的耦合信号,耦合信号由检波器将射频信号检波为低频信号后送至组件内 BITE,通过组件内的 BITE 可以检测末级组件的输入信号功率大小是否正常。末级组件合成器的输出端有一个 30 dB 耦合器,30 dB 耦合器将末级组件输出功率耦合出一个 4 W 左右的小功率信号,4 W 左右的功率信号先由 20 dB 衰减器衰减为 40 mW 左右的小功率信号,再由检波器将 40 mW 左右的射频信号检波为低频信号送至组件内 BITE,由组件内

BITE对末级组件输出功率信号进行功率检测。

末级组件内的功率放大器的漏极电源由5只供电板供电,每只供电板上安装有2只额定电压63 V、容量为6800 μF 的供电电容,其中1只供电板为1只200 W放大器供电,另外4只供电板采用每只供电板为2只600 W放大器供电的方式。

功率放大器工作时需要一个栅极-5 V电源,当栅极电源为零,而功率放大器的漏极仍然有漏极电源时,放大器会瞬间被击穿损坏,如果末级组件中的所有放大器的-5 V电源都直接连在一起接在-5 V电源上,当某一个放大器的栅极被击穿,对地短路时,其余所有放大器的栅极电压都将为零,将会导致所有放大器有被击穿损坏的风险。为降低某一路功率管栅极电压对地短路对其余放大器的影响,-5 V电源的供电方式设计为:末级组件的-5 V电源先送至组件内BITE,组件内BITE将-5 V电源分成9路输出,每一路-5 V电源的输出端上接一个0.3 A以内的可恢复保险丝管,当某一路功率放大器的栅极对地短路时,这一路上的保险丝管将进行保护性断开,从而防止对其余放大器的-5 V电源产生影响。

当GaN功率放大器的栅极电源和漏极电源都正常时,放大器会产生一个比较大的漏极静态电流,导致末级组件的热耗散增加,为降低末级组件的热耗散,在放大器上设计有漏极脉冲电源调制电路,漏极脉冲电源由PIN信号控制,PIN信号是由组件内BITE产生,与门套信号基本相同、比射频信号稍宽的TTL信号,在射频信号工作期间,由PIN信号控制脉冲电源调制电路输出脉冲电源为放大器的漏极供电,在射频信号间歇期,由PIN信号控制脉冲电源调制电路截止,放大器的漏极没有漏极电源,放大器上不会产生漏极静态电流,从而减小放大器的静态功耗。

5 电磁兼容性

针对电磁兼容性^[13-15]而言,本设计的任务主要在于降低发射组件内部高频信号和低频信号之间的相互干扰,减少外部设备受系统所产生的干扰并抑制发射的二次谐波。

5.1 降低组件内部、外部信号干扰

前级组件的输入功率和输出功率分别为10 mW和630 W,组件功率增益高达48 dB,小信号电路会受到大信号电路产生的干扰。针对电磁兼容性设

计,本设计采取的措施是:600 W放大器及放大器后的均衡器和30 dB耦合器采用敞开式设计;将高增益、低输出功率的18 W放大器作为独立器件,其外壳采用全金属封装,用以屏蔽信号干扰。

末级组件内部的200 W放大器和8只600 W放大器并排平铺在组件的壳体上,200 W放大器与600 W放大器之间采用隔墙隔开,每两个600 W放大器之间采用隔墙进行隔开,减小功率放大器之间的相互干扰。同时,隔墙上靠近功率管的位置及组件面板上都贴有吸波材料,用吸波材料吸收组件内的电磁辐射信号。

组件内BITE电路采用全金属封装的外壳进行屏蔽,组件内BITE安装在功率信号较小的1:4功分器上,以降低组件内的大功率信号对组件内BITE的干扰,输入输出检波信号采用射频电缆送至组件内BITE以减小干扰。

增加组件盖板上的螺钉孔的密度,使组件形成一个密闭的空间,减少组件对外部空间的微波辐射。

5.2 抑制二次谐波

对于谐波抑制的要求,采用通过波导谐波滤波器对二次谐波进行抑制,通过其仿真优化,仿真结果如下图7所示,二次谐波抑制度大于80 dB。

发射系统的二次谐波实测如图8所示。

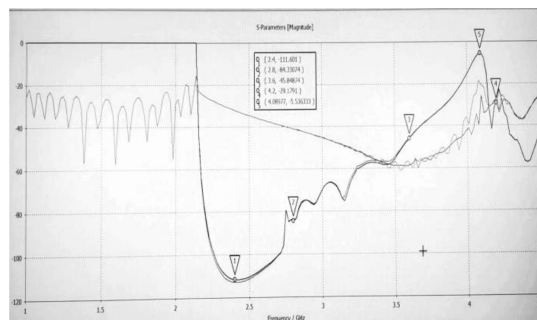


图7 谐波滤波器仿真图

Fig.7 Harmonic filter simulation diagram

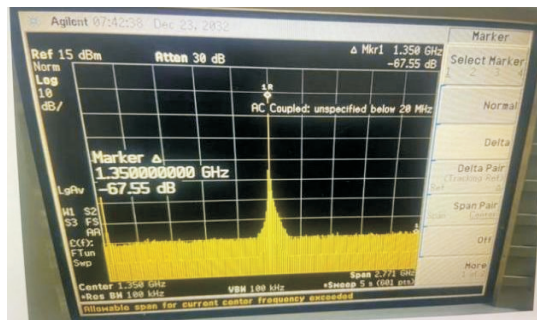


图8 二次谐波测试图

Fig.8 Second harmonic test diagram

最后,基于本文所设计的 L 波段国产化固态雷达发射机整机测试结果(系统工作频率为 1.3 GHz)如表 3 所列。

表 3 整机测试结果
Tab.3 Overall test results

序号	测试项目	测试结果
1	工作频率	1.3 GHz
2	输出功率	50.6 kW
3	带内平坦度	0.79 dB
4	上升沿	122 ns(短脉冲)/145 ns(长脉冲)
	下降沿	42 ns(短脉冲)/38 ns(长脉冲)
5	改善因子	80 dB
6	带外杂散	-68.09 dB
7	谐波输出	-66.97 dB(经谐波滤波器抑制 40 dB)
8	功耗	9.4 kW
9	发射机效率	44.4%

6 结论

本文设计了一款工作频点在 1.2 GHz ~ 1.4 GHz 的国产 GaN 固态雷达发射机。通过选用中电科集团十三所的 GaN 功率管模块,使其在 1.2 GHz ~ 1.4 GHz 频段内,占空比为 8%,工作电压为 42 V,脉宽为 320 μ s 的工作状态下,通过前级驱动后面 16 个末级组件,最终能够输出 40 kW 的峰值功率。再通过波导谐波滤波器对发射信号的二次谐波进行抑制,使得发射系统输出信号的二次谐波也满足小于等于 -66 dB 的指标要求。

参考文献:

[1] 郑新,李文辉,潘厚忠,等.雷达发射机技术[M].北京:电子工业出版社,2006.

- [2] 丁鹭飞,耿富录.雷达原理[M].2版.西安:西安电子科技大学出版社,1995.
- [3] 刘传洋,蓝永海. L 频段高效功率放大器设计[J]. 无线电工程,2014,44(4):47-49+61.
- [4] 唐林江,陈滔,张宝林,等. GaN 基半导体技术的空间应用研究与展望[J]. 空间电子技术,2018,15(2):60-67.
- [5] 崔浩,罗维玲,龚利鸣,等. 一种 S 频段 GaN 功率放大器的研制[J]. 空间电子技术,2013,10(3):28-32.
- [6] 吕玲,林志宇,张进成,等. GaN 基高电子迁移率晶体管的质子辐照效应研究[J]. 空间电子技术,2013,10(3):33-38.
- [7] 朱霖,查倩,曹砚瑜,等. 一种空管一次雷达发射机:CN214954050U[P]. 2021-11-30.
- [8] 田耕,郑光华. 固态雷达发射机的关键技术研究[J]. 数字通信世界,2019(5):63-64.
- [9] 胡恒艳. 雷达固态发射机功率管失效故障分析[J]. 科技资讯,2015,13(1):32+34.
- [10] 黄俊. 一种固态发射机的工程实现探讨[J]. 电子世界,2017(7):92-93.
- [11] 罗嘉,张人天. 基于 GaN 的大功率高线性固态发射机研制[J]. 电子信息对抗技术,2016,31(2):61-65.
- [12] 龙晓云. 固态雷达发射机的心脏——微波功率管[J]. 电子世界,2013(23):65.
- [13] 邱成悌,赵惇爻,蒋全兴. 电子设备结构设计原理[M]. 南京:东南大学出版社,2005.
- [14] 白同云,吕晓德. 电磁兼容理论与应用技术[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2001.
- [15] 姚黄. 一种 L 波段测风固态发射机[J]. 环球市场,2018(17):361.

作者简介:姚黄(1990—),安徽合肥人,硕士研究生。主要研究方向为雷达发射机技术。E-mail:784473007@qq.com