

边界层风廓线雷达发射机放大链路设计与实现

刘宁波¹ 段士军¹ 刘强¹ 李翠娜² 杜广涛³ 张翠卿⁴

(1 北京敏视达雷达有限公司, 北京 100094; 2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081;

3 中国电子科技集团第38研究所, 合肥 230088; 4 北京旭亚威科技发展有限公司, 北京 102200)

摘要: 依据中国气象局《风廓线仪功能规格需求书》要求, 参考国内外固态发射机先进技术, 研制了一台工作在L波段的边界层风廓线雷达发射机。本发射机具有不间断连续运行、即插即用性和高可靠性, 波形和带通响应优化以占用频谱宽度小的特点。基于发射机的模块化架构、主要技术指标和功能, 重点介绍发射链路的设计思想和原理、各级功率放大器的指标分配、芯片选型、功放电路设计、ADS仿真与稳定性优化。经过近3年在不同雷达站点的不间断运行, 发射链路性能较稳定, 符合设计要求。为今后其他型号雷达固态发射机的自研设计提供了技术参考。

关键词: 边界层风廓线雷达, 发射机, 功率放大器, 模块化架构

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.06.012

Design and Implementation of Amplified Link of Radar Transmitter in Boundary Layer Wind Profiler

Liu Ningbo¹, Duan Shijun¹, Liu Qiang¹, Li Cuina², Du Guangtao³, Zhang Cuiqing⁴

(1 Beijing Metstar Radar Co., Ltd, Beijing 100094 2 Meteorological Observation Centre of China Meteorological

Administration, Beijing 100081 3 No. 38 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation,

Hefei 230088 4 Beijing Xuyawei Technology Development Co., Ltd, Beijing 102200)

Abstract: According to the requirements of China Meteorological Administration (wind profiler functional specification requirements book), reference advanced solid-state transmitter technology, a boundary layer wind profile radar transmitter operating in the L-band has been developed. The transmitter has uninterrupted continuous operation, plug and play and high reliability, waveform and bandpass response optimization to occupy a small spectrum width characteristics. This article is based on the modular structure of the transmitter, the main technical indicators and functions, and focuses on the design principles and principles of the transmission link, index distribution of power amplifiers at various levels, chip selection, power amplifier circuit design, ADS simulation and stability optimization. After nearly three years of uninterrupted operation at different radar sites, the transmission link performance is relatively stable and meets the design requirements. It provides a technical reference for the future self-study design of other types of radar solid-state transmitters.

Keywords: boundary layer wind profile radar, transmitter, power amplifier, modular architecture

0 引言

边界层风廓线雷达是探测高空三维风场数据的重要设备, 具有分辨率高、实时探测、连续不间断工作、远程和本地遥控的特点, 为天气预报提供高空大气风场数据^[1-2]。风廓线雷达发射机作为雷达的重要组成部分, 对雷达的整体性能起决定性作用^[3-4]。为准确掌握边界层风场数据, 按照中国气象局《风廓线仪功能规格需求书》要求, 设计了一款雷达发射机, 其工作在L波段, 采用脉冲发射信号, 其峰值功率 ≥ 2 kW, 脉冲宽度 $0.3\sim 16$ μ s, 占空比最大为10%, 使用C类功率放大器的发射机。本发射机的设计寿命

为20年, 为不间断连续运行, 无人值守, 分本地和远程监控两种工作方式。考虑到同类大功率发射机各级功放烧毁的常见问题, 本发射机在设计上, 充分考虑了各级功放的最优工作状态, 划分了合理功率增益区间, 尽量筛选了同一品牌的射频功放芯片, 对末级大功率功放模块, 采用了主动散热的合成方式, 最大程度地解决了大功率发射机功放链路的烧毁问题。此外本发射机采用模块化设计, 各主要模块设计了独立的检测报警保护功能, 以便于随时发现问题, 及时解决。

发射机的射频输入特性如下:

输入频率: 1290 MHz;

输入峰值电平: 8.5~11 dBm;

输入阻抗: 50 Ω ;

收稿日期: 2018年5月4日; 修回日期: 2018年10月12日

第一作者: 刘宁波(1982—), E-mail: ningbo_liu@126.com

输入驻波比: $\leq 1.5 : 1$
 发射机的射频输出特性如下:
 输出频率: 1290 MHz;
 峰值输出功率: ≥ 2 kW;
 峰值输出功率变化: ≤ 0.5 dB (设备稳定30 min后);
 1 dB通带宽度: 13.5 MHz;
 负载阻抗: 50 Ω ;
 正常工作VSWR: $\leq 2 : 1$ (所有相位角);
 不损坏设备VSWR: $> 2 : 1$ (所有相位角);
 脉间寄生噪声: < -110 dBm/MHz (射频脉冲终结后1 μ s);
 脉间稳定性: 相位变化 $\leq 10^\circ$ rms, 幅度变化 ≤ 0.2 dB;
 脉内稳定性: 相位变化 $\leq 10^\circ$ rms, 幅度变化 ≤ 0.5 dB;
 对消比: ≥ 57 dB (输入信号应大于63 dB)。
 发射机的脉冲模式与参考条件见表1。

表1 脉冲模式
Table 1 Pulse mode

参数	低模式		高级模式	
	垂直波束	斜波束	垂直波束	斜波束
脉冲宽度/ μ s	0.356	0.356	2.85	2.85
PRF/kHz	42.5	40	22.6	21.3
占空比/%	1.5	1.4	6.5	6.1
平均功率/W	30	28	130	120

1 发射机架构及工作原理

1.1 发射机组成

2 kW 风廓线雷达发射机^[5]由驱动器、带通滤波器、衰减器、1:4分配器、4×650 W放大器、4:1合成器、定向耦合器、主控单元、+5 V/+12 V AC/DC组合电源、+50 V/+28 V/+12 V AC/DC组合电源、风冷装置等主要单元组成。图1为发射机框图。

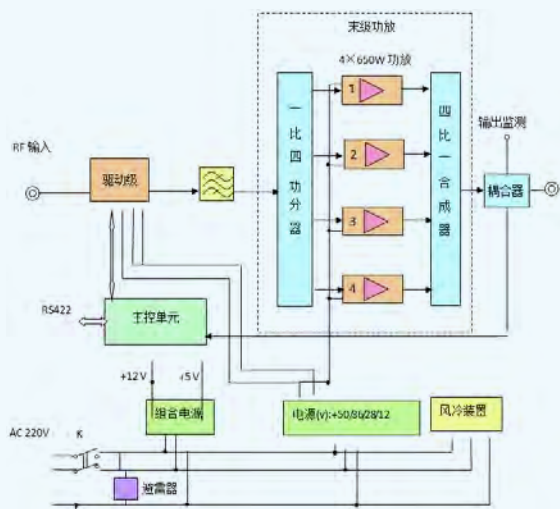


图1 发射机框图

Fig. 1 Transmitter block diagram

1.2 工作原理

来自雷达信号源的射频脉冲信号接发射机射频输入端, 经各驱动级放大器逐级放大后输入带通滤波器滤波。经频谱限制后的射频信号由1:4功分器等分为4路, 各路分别去驱动对应的650 W功放模块, 4个650 W功放模块的输出由4:1合成器进行功率合成, 最后经定向耦合器输出。主监控单元负责各功能组件的控制及工作状态的采集、处理和监视, 并接收和响应系统的控制和RS422指令。

驱动级由输入耦合器、前级放大器、中间级放大器、输出开关、末级放大器、衰减器、输出耦合器以及信号检测电路组成。耦合器负责对输入和驱动器输出射频脉冲信号的取样; 信号检测电路完成信号检波、放大, 并送主控单元; 主控单元读取射频输入信号的电平、脉宽和占空比以及输出信号峰值功率, 与系统预设值做对比。如果出现输入脉冲参数超标, 发射机故障, 发射机关断信号, 由主控单元控制输出开关断开输入信号, 使发射机停止工作。衰减器用于控制驱动级各级输出功率, 在发射机出厂前调整完毕。滤波器目的是完成信号频谱整形, 使输出信号频谱符合设计要求和国家相关规定。

2 放大链路设计

在发射机的放大链路设计中, 除要考虑功率、增益分配外, 最重要的设计难点是大功率脉冲功放及末级功放芯片的选择和电路设计^[6], 整个放大链路的饱和和设计、脉间噪声控制和射频芯片保护。鉴于发射机设计的难点和重点, 本发射机采用从后往前倒序的设计方法, 根据发射机的总体指标要求, 发射机的输出功率 ≥ 2 kW, 结合模块化设计原则, 雷达发射机末级功放采用四合一的模块化结构, 每个功放的设计功率是650 W左右。

2.1 末级功放芯片的选择与电路设计

设计初期, 选取了三种L波段脉冲功率芯片系列^[6], 即microsemi公司的1214系列, M/C-COM公司的PH1214系列, Philips公司的BLL1214系列, 根据本发射机的指标要求, 对芯片的几项主要指标进行了比较(表2)。比较结果是microsemi公司的1214系列总体最优。

表2 脉冲芯片比较
Table 2 Pulse chip comparison

	输出功率	功率增益	工作效率	响应时间	抗失配能力	噪声隔离度
1214	大	中	高	中	中	好
PH1214	中	中	中	差	中	好
BLL1214	小	高	低	好	好	差

根据对比结果, 选用microsemi公司的双极性

射频脉冲晶体管1214-370M作为末级功放芯片。单芯片的驱动功率是50 W，增益9 dB，输出功率是370~460 W。因此需要采用双芯片合成的设计方式，实现单模块输出功率650 W左右，达到设计目的。

根据1214-370M芯片的阻抗数据，设计了优化输入微带线匹配电路（图2）。应用ADS仿真软件，得

到输入匹配电路仿真结果（图3）。根据其数据，设计了优化输出匹配电路（图4）。再应用ADS仿真软件，输出匹配电路仿真结果（图5）。经过优化后的微带匹配电路，其输入输出阻抗匹配良好，插损很小，微带线布局合理，易于设计、焊接。

因为末级功放^[7]要实现单模块输出功率650 W

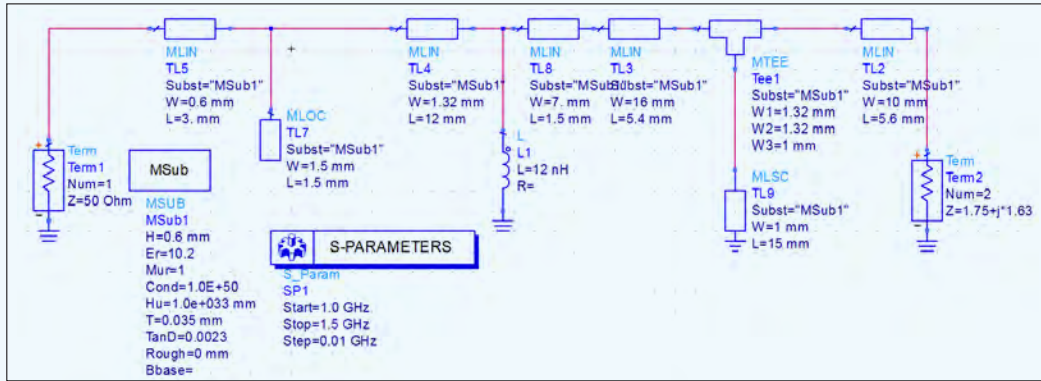


图2 输入匹配微带电路
Fig. 2 Input matching microstrip circuit

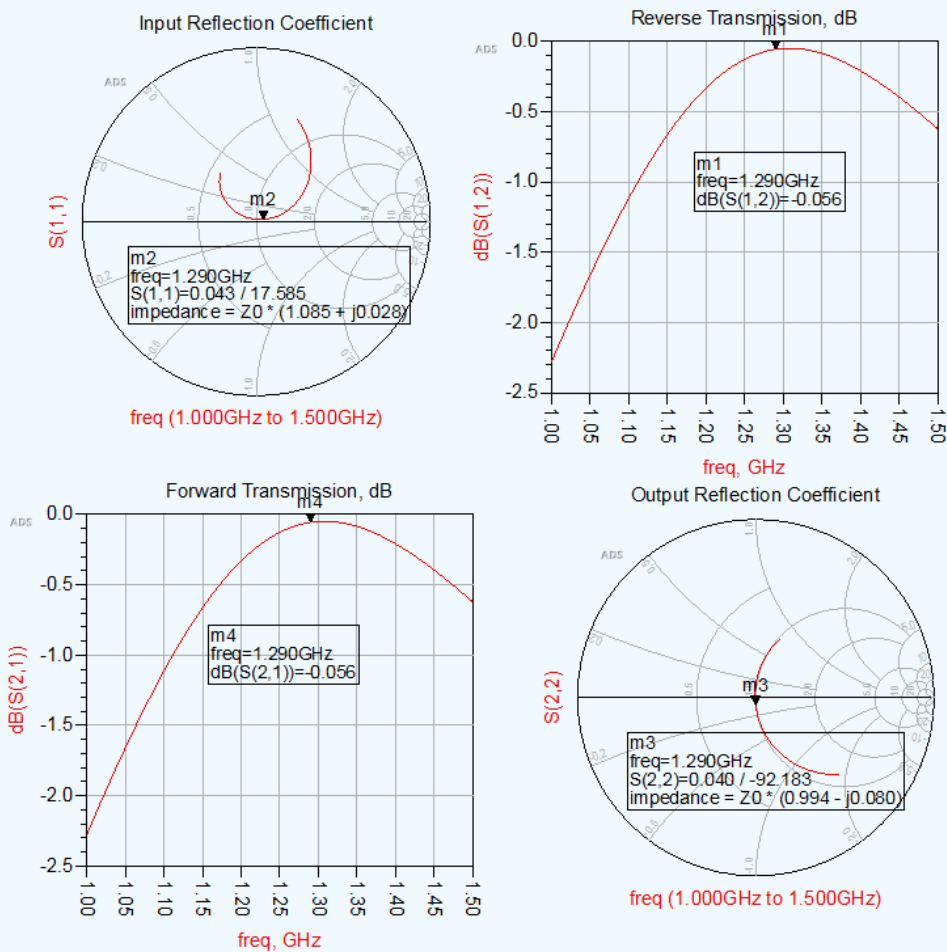


图3 输入电路ADS仿真结果
Fig. 3 Input circuit ADS simulation result

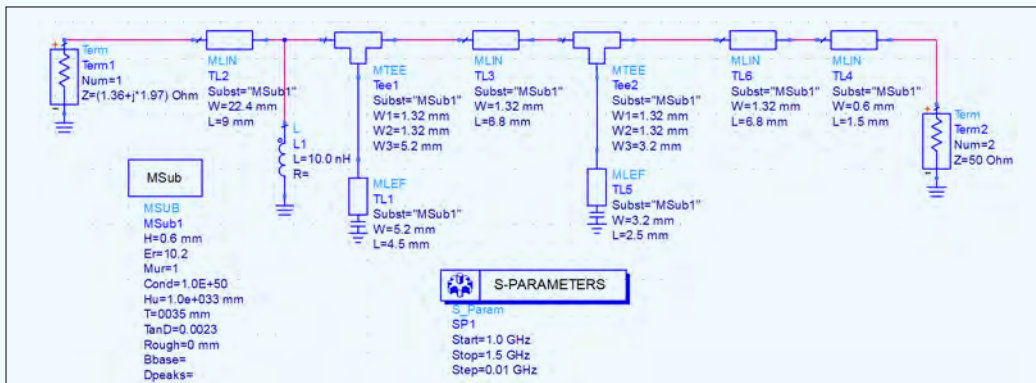


图4 输出匹配微带电路
Fig. 4 Output matching microstrip circuit

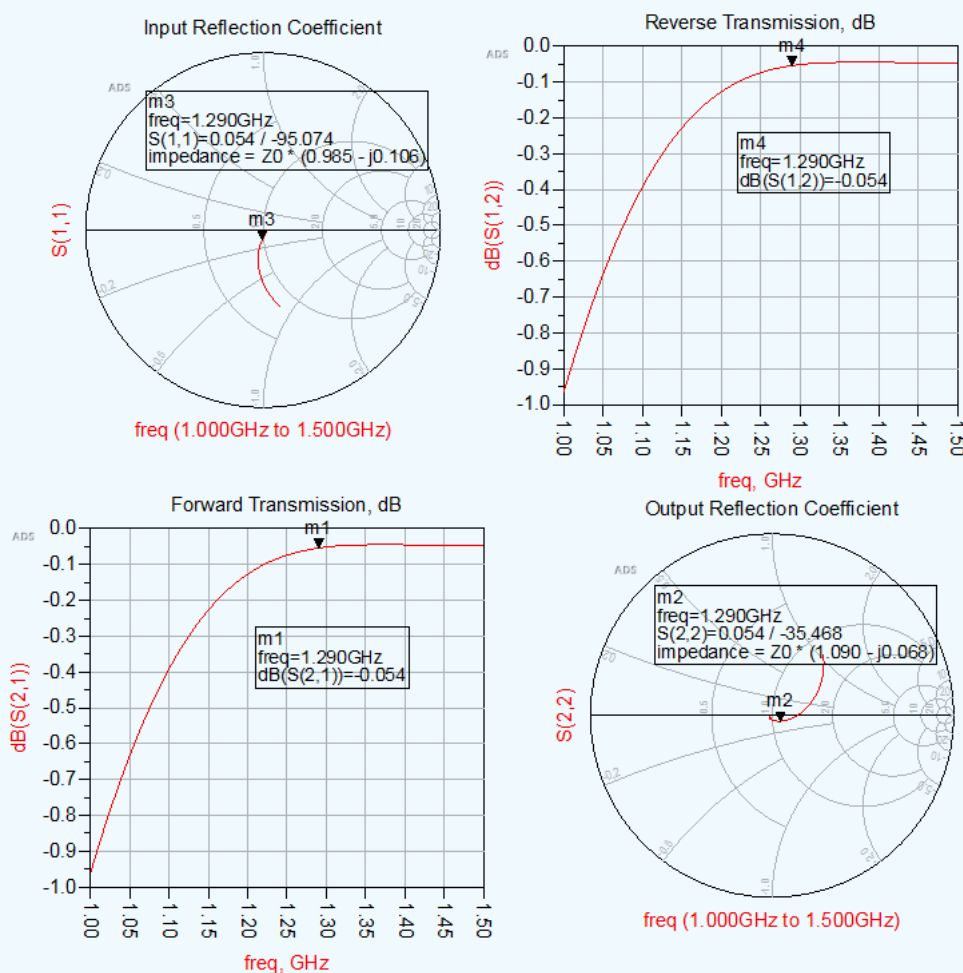


图5 输出电路ADS仿真结果
Fig. 5 Output circuit ADS simulation results

左右，所以需要采用两支脉冲功率管合成的方式实现^[8]。功率分配/合成器采用3 dB正交分配/合成方式，原理见图6。

功率正交分配合成方式可以采用微带线、集成式3 dB耦合器、3 dB耦合电缆线^[9]等来实现此功能。

微带线的优点是损耗小、正交角度准确，缺点是输出端合成650 W的功率，微带线（线宽0.6 mm）的功率承受能力、散热能力都不足，容易烧毁。集成式3 dB耦合器同样具有散热不足、容易烧毁的问题。3 dB耦合电缆线的缺点是正交不易掌控，也就是长度不好

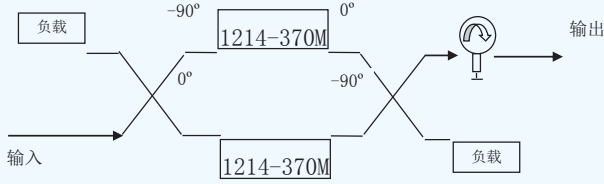


图6 功率合成图

Fig. 6 Power synthesis diagram

控制，需要在理论的基础上进行实验，然后对1/4波长进行适当的优化，优点是散热好、承受功率高。650 W功放模块长期稳定工作，散热是需要重点考虑的。所以本模块设计采用了3 dB耦合电缆线来实现2芯片的功率分配/合成功能（图7）。

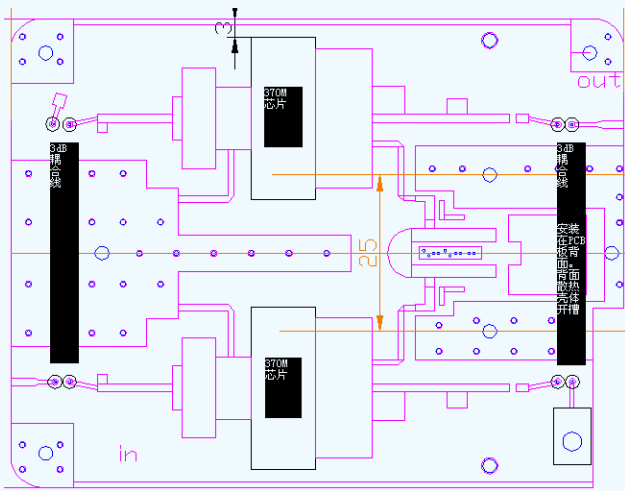


图7 650 W功放模块PCB图

Fig. 7 650 W power amplifier module PCB diagram

2.2 驱动级增益分配及芯片选型和电路设计

根据发射机的末级功放输入指标要求^[10]和信号源的输出功率，对驱动级电路功率和增益进行了分级，并根据增益功率分配图，进行了初步的芯片选型，然后再返回修改分配图，最后结合各方因素，划分的增益与电平分配见图8。

因为末级功放采用370M芯片合成模块，四合一的形式组成，所以其输入功率需要400 W以上，才能保证末级功放模块稳定工作在饱和区。第五级功放输出端接1:4功分器，考虑到1:4功分器功率损耗和电路稳定简单因素，第五级功放模块同样采用650 W模块。设计图见末级功放设计。第四级采用microsemi公司的1214-110W芯片。据其阻抗数据，参考1300 MHz数据设计微带匹配电路，测试其指标即可。第三级采用microsemi公司的1214-32L芯片。参考末级功放的设计经验，根据该芯片的手册上给出的详细阻抗数据，测试微带电路，设计微带匹配电路，

测试其性能达到设计要求即可。第二级采用microsemi公司的1014-6A芯片，根据其阻抗数值，应用ADS设计优化。最后测试6 W功放性能，调整优化，使其达到设计要求。第一级采用中国电子科技集团公司第13所的4 W集成功率放大器HE161D，功率平坦度小于0.5 dB。驻波比小于1.6。芯片外围电路简单，容易实现。

2.3 饱和设计

设计规范对输出峰值功率^[11-12]稳定度、脉间稳定度和脉内稳定度都提出了要求，要达到这些要求，射频脉冲功率管应该工作在饱和状态。根据厂家给出的1214-370M数据手册以及本研究摸底试验所得到的数据，1214-370M射频脉冲功率管在50 V供电条件下、40 W以上的激励功率就能保证射频脉冲功率管工作在饱和状态。方案中功放链路增益的分配充分考虑了各射频功放芯片的输入驱动功率，保证了各级射频脉冲功率管工作在饱和状态。

2.4 脉冲管保护

脉冲管的损坏主要有两个原因，包括输出反射过大和脉宽过大。1214系列功放芯片的抗失配能力较差，负载驻波超过2:1就可能導致芯片损坏，因此，必须保证脉冲管的输出匹配良好。第一，此次设计在输入输出微带匹配电路的设计中进行了优化；第二，在650 W功放模块的输出端设计了隔离器^[13]，功放模块的输出反射功率被隔离器吸收，保证了脉冲管的匹配，杜绝了脉冲管因反射过大导致损坏。造成脉冲管宽度过大的原因有：错误的输入信号、驱动器前级和中间级放大器振荡、加电和关电过程造成驱动器前级和中间级放大器出现短时的不规则连续波信号。本方案测量脉宽和占空比是从驱动器输出耦合器提取脉冲信号，通过CPLD硬件电路判断脉宽和占空比是否超标，CPLD硬件电路的反应时间为纳秒级，可以杜绝因输出反射过大和脉宽过大造成的脉冲管损坏。本方案的发射机通断PIN开关置于驱动器前级和中间级放大器之后，PIN开关的控制是高电平通、低电平断，其开关响应时间为纳秒级，并受主控单元控制。在加电过程中，主控单元在判断设备正常后，延迟一段时间再接通PIN开关；在关电过程中，主控单元对PIN开关的控制确保处于低电平。通过对PIN开关的控制，可以杜绝在加电和关电过程出现的连续波信号对脉冲管的损坏。

2.5 脉间噪声抑制

C类放大器，由于其没有静态电流，它的静态噪声非常低，而且对放大器输入的噪声有隔离作用。

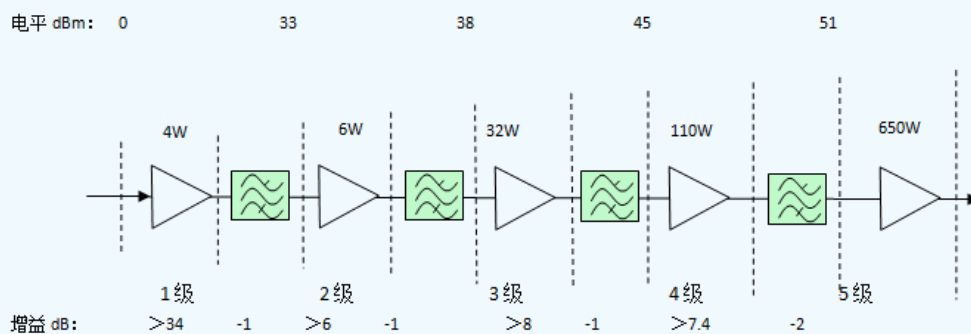


图8 驱动级增益与电平分配图
Fig. 8 Driver stage gain and level assignment diagram

根据对400和1200 MHz脉冲管测试，其隔离度大于35 dB。因此，放大链路中C类放大器使用越多，其脉间噪声^[14]抑制越明显。放大链路第一级噪声加上后四级的噪声隔离，发射机的脉间噪声小于-110 dBm/MHz，满足设计规范要求。

3 结论

根据天气预报需求，设计了一种应用在边界层风廓线雷达的发射机放大链路，此放大链路设计采用倒序设计思路，易于根据发射机输出功率指标选择合适的末级功放芯片；模块化结构，使功放链路中各模块得到实时监控，随时维护，易于做饱和和控制，最大程度上保证雷达的不间断工作。通过芯片的选型和电路设计，保证各级驱动功放工作在饱和区，输出功率稳定，进而使发射机整体输出达到设计要求，末级功放模块在设计中加入了大功率功放芯片散热设计，使模块在连续工作时，散热良好，维持合理温度区间，延长了芯片寿命。整体发射机性能指标达到中国气象局验收标准。

2015年底在吉林省的TWP8-L风廓线雷达上，使用了此放大链路的发射机和后端650 W功放模块，2016年陆续在重庆酉阳站风廓线雷达，上海、广州等站点3 km风廓线雷达上安装使用了此放大链路的发射机。经过近3年的运行观测，雷达探测高度达标，风廓线数据准确，雷达工作稳定，发射机的故障率处在合理区间，达到设计要求^[15]。其中，重庆酉阳TWP3和吉林TWP8-L风廓线雷达站在2015年12月安装了此设计的发射机，至今，雷达发射机连续正常工作，上

海、广州等几个站点，发射机故障率也在合理区间。此放大链路的设计和使用，提高了边界层风廓线雷达的品质，为天气预报提供了强有力的保障。

此外，此设计思路和设计方法，可以在后续SA/SB/CA/X等雷达固态发射机的升级改造过程中提供设计参考和借鉴。

参考文献

- 万蓉. 我国暴雨研究中新型探测资料反演技术及其应用. 气象科技进展, 2014, 4(2): 24-35.
- 钱恺, 刘锦丽, 毕永恒, 等. 高时空分辨率观测资料对两次夏季北京暴雨的特征分析. 气象科技进展, 2015, 5(5): 24-32.
- 刘淑媛, 郑永光, 陶祖钰. 利用风廓线雷达资料分析低空急流与暴雨的关系. 热带气象学报, 2003, 19(3): 285-290.
- 何平, 马颖, 阮征, 等. 晴空热对流泡的风廓线雷达探测研究. 气象学报, 2010, 68(2): 264-269.
- 武小坡, 赵海洋, 奚松涛. 星载高功率固态功放关键技术研究与实验. 雷达学报, 2014, 3(3): 288-294.
- 王卫华, 江元俊, 郑新. L波段大功率小型化固态功放设计与实现. 微波学报, 2012, 28(2): 66-70.
- 邢靖, 刘永宁. C波段固态功放设计和实验研究. 现代雷达, 2005(6): 59-62.
- 马传辉, 潘文生, 邵士海, 等. 基于功放管最优负载阻抗的Doherty功率放大器效率提升方法. 电子学报, 2016, 44(7): 1728-1733.
- 王磊, 文耀普. 固态发射机热设计与飞行验证. 雷达学报, 2014, 3(3): 301-306.
- 冷永清, 张立军, 曾云, 等. 基于GaN HEMT的1.5~3.5GHz宽带平衡功率放大器设计. 电子学报, 2013, 41(4): 815-820.
- 纠博, 刘宏伟, 李丽亚, 等. 基于相位调制的宽带雷达波形优化方法. 电子与信息学报. 2008, 30(9): 2038-2041.
- 吴少峰, 胡东明, 胡胜, 等. 一次CINRAD/SA雷达发射机功率偏低故障的分析及处理. 气象, 2009, 35(10): 108-112.
- 夏瑜. 固态功放组件端接隔离器上的反射功率计算. 现代雷达, 1993(2): 76-80.
- 何平, 李柏, 吴蕾, 等. 确定风廓线雷达功率谱噪声功率方法. 应用气象学报, 2013, 24(3): 297-303.
- 刘梦娟, 刘舜. 上海组网风廓线雷达数据质量评估. 气象, 2016, 42(8): 962-970.