

## GSM-R 光纤直放站中射频功放模块的设计<sup>①</sup>

徐 建<sup>②\*</sup> 姚子龙\* 曾贤文\* 王 蓉\* 王志功\* 陈建平\*\* 吉荣新\*\*

(\* 东南大学射频与光电集成电路研究所 南京 210096)

(\*\* 南京泰通科技有限公司 南京 210000)

**摘 要** 对满足铁路 GSM-R 标准的光纤直放站中的射频功放模块进行了设计、制造和测试。设计采用功率回退与预失真及双平衡输出级相结合的方法以实现射频功放模块的高线性度指标。采用自动增益控制、自动电平控制技术保证功放的增益稳定以及输出功率稳定。设计中增加了驻波比检测、控制电路等数控模块以保证功放模块的高可靠性。测试结果表明,该模块输出功率为 16W,三阶交调失真(IMD3)达到 -63dBc,表现出了优异的线性度,完全达到铁路 GSM-R 高铁直放站的设计要求。

**关键词** GSM-R, 光纤直放站, 射频功放模块, 自动增益控制(AGC), 自动电平控制(ALC), 预失真, 功率回退

### 0 引 言

GSM-R(GSM for rail-way)是基于全球移动通信系统(global system for mobile communications, GSM)技术专门为铁路通信设计的综合专用数字移动通信系统。该系统能满足国际铁路联盟提出的铁路专用调度通信要求,在 GSM Phase2 + 规范协议的高级语音呼叫功能如组呼、广播呼叫、多优先级抢占和强拆业务的基础上,加入了基于位置寻址和功能寻址等功能,适用于铁路通信特别是铁路专用调度通信的需要。该系统主要提供无线列调,编组调车通信,区段养护维修作业通信,应急通信,隧道通信等语音通信功能,可为列车自动控制与检测信息提供数据传输通道,并可提供列车自动寻址和旅客服务。GSM-R 在中国铁路的频段为上行 885MHz - 889MHz,下行方向为 930MHz - 934MHz<sup>[1,2]</sup>。目前,铁路 GSM-R 网络的建设正在展开,为了消除覆盖盲区,扩大基站覆盖范围,根据铁路沿线光纤资源丰富的有利条件,工程中采用了大量的光纤直放站。光纤直放站有利于 GSM-R 网络的顺利开通,而且能够节省工程建设的投资。光纤直放站在 GSM-R 工程中不仅需要考虑覆盖范围、覆盖电平等,还要考虑下行信号失

真、干扰等。此外,铁路专用通信由于环境的特殊要求,例如温度需要满足 -40 ~ 80℃,这样对系统的可靠性也提出了很高的要求<sup>[3-5]</sup>。

在整个光纤直放站系统的核心模块中,射频功放是设计难度最大的模块,其设计的好坏影响着整个系统的性能<sup>[6]</sup>。射频功率放大器是发射机的末级,它将已调制的频带信号放大到所需要的功率,保证在覆盖区域内的接收机可以收到满意的信号电平,但不能过于干扰相邻信道的通信,同时又要尽量地保持放大后的大功率信号不失真畸变<sup>[7]</sup>。尤其对下行功放,其需要小区覆盖移动台,而移动台的移动速度较快,不仅要求高的发射功率,还需要高的线性度,以保证通信质量。这些不同方面的要求使得功率放大器的设计者要面面俱到地考虑很多指标的平衡。随着高铁在我国的发展,GSM-R 已经成为我国铁路移动通信的发展方向。在高速铁路对地面信号依赖逐渐减少的情况下,列车安全运行更需要高质量的通信设施。在整个通信系统中发射终端的功放模块决定发射信号的质量,最大速度为 500km/h 的高速列车运行中的通信和列车控制发射机功放模块需要满足 -60dBc 的三级交调失真(IMD3),这给设计带来了挑战性。本设计采用功率回退与预失真及双平衡输出级相结合的设计方法以实现射频功放

① 国家青年科学基金(61306069)和江苏省科技成果转化专项资金(BA2011009)资助项目。

② 男,1972年生,博士;研究方向:纳米级射频集成电路与系统研究;联系人,E-mail: xujian318@seu.edu.cn  
(收稿日期:2013-12-15)

模块的高线性度指标。同时采用自动增益控制、自动电平控制技术保证功放的输出功率稳定以及末级功放的增益稳定,采用增加驻波比检测、控制电路以保证功放模块的高可靠性。测试结果表明,该模块输出功率为 16W,交调失真 IMD3 达到  $-63\text{dBc}$ ,表现出了具有优异的线性度与稳定性,完全达到铁路 GSM-R 高铁直放站的设计要求。

## 1 GSM-R 射频功放模块设计

图 1 给出了射频功放模块在 GSM-R 标准光纤直放站中的示意图。光纤直放站分为基站侧的近端机和移动终端侧的远端机两部分。近端机负责将基站的信号接收并转换为光信号传至远端,将远端传

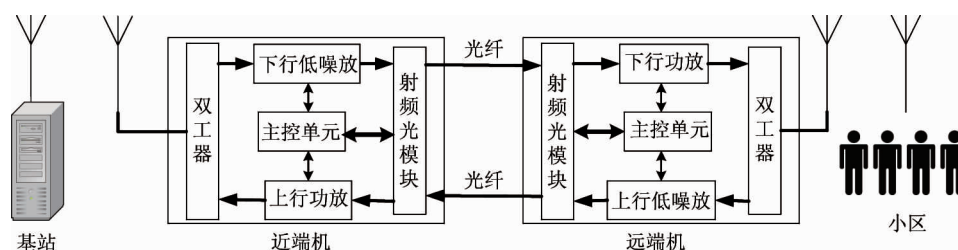


图 1 GSM-R 光纤直放站的原理图

来的光信号还原为射频信号,经过上行功放功率放大后发送给基站。远端机负责将近端机传送过来的光信号还原为射频信号通过下行功放以较大功率发射,以覆盖目标区域,同时,接收目标区域的移动台信号并转换为光信号传送给近端机。

功率放大器模块的主要功能是将微弱的小信号放大到特定电平上以驱动某一负载如天线等,其功能框图如图 2 示。为了实现大功率输出,末前级需要有足够高的激励功率水平,本设计采用低噪声放大器、驱动级、主功放级三级级联以实现大功率输出。功放由于输出功率大,是系统中很容易出问题的模块,一旦出现故障就可能造成永久损坏,因此本

设计采用自动电平控制及数控衰减以确保模块输出功率的平稳,同时增加常见故障的检测电路以保证其高可靠性。为了实现满足 GSM-R 标准的严格线性度要求,设计采用功率回退与预失真技术及双平衡输出级相结合的设计方法以实现射频功放模块的高线性度指标。主功放采用双平衡结构,以很好地与驱动级及环形隔离器级联,方便主功放级的调试。该技术同时比对应的单端功放输出功率增加 3dB 且更加稳定。为了提高线性度,功放设计使用功率回退技术,同时在主功放级和驱动级之间加入预失真器。输出中增加环形隔离器,可以有效地隔离负载变化对功放的影响。

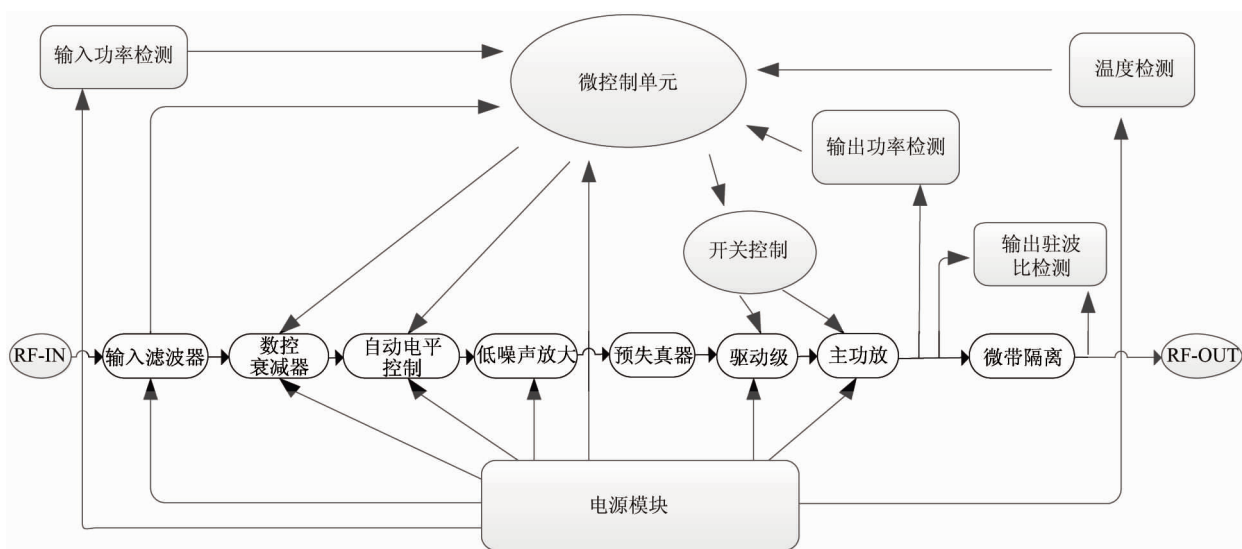


图 2 射频功放模块的功能实现框图

### 1.1 功放级设计

为保障高速列车通信的准确性,GSM-R对发射机的性能提出了极高的要求,既需要保证稳定的功率输出,同时又需要保证高的线性度。在大的功率输出条件下实现-60dBc的三阶互调则是设计的难点。为实现所需大功率,设计采用多级级联,该电路由三级放大组成,前两级为单管串联放大,末级为平衡功率放大。按各级功能和所处位置也可称作低噪声放大级、驱动级、功放级。

低噪声放大级是直放站发射机中输入级,是模块热噪声的主要来源,它需要有足够高的增益和极小噪声系数。本设计采用了WJ通讯公司的AG604,它在900MHz提供21dB的增益,噪声系数为3.5dB,满足系统设计要求。

驱动级是为了将低噪声放大级输出的微弱信号放大到功放级所需要的信号电平上,其包括偏置电路和放大电路两部分。由于二极管的温度系数与LD-MOS管的温度系数几乎接近,偏置电路采用二极管温度补偿电路给驱动级提供偏置,其在很大程度上决定了电路性能。驱动放大管选择MHVIC915NR2,它在GSM频段的增益可达30dB,功率附加效率(PAE)达56%,输入回波损耗为-16dB,交调失真为-30dBc。设计完成的电路原理图如图3所示。

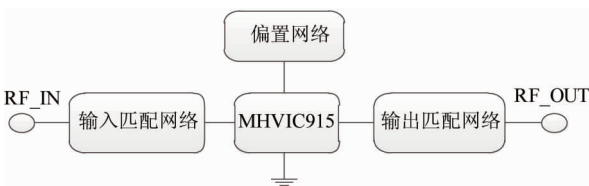


图3 驱动级放大电路原理图

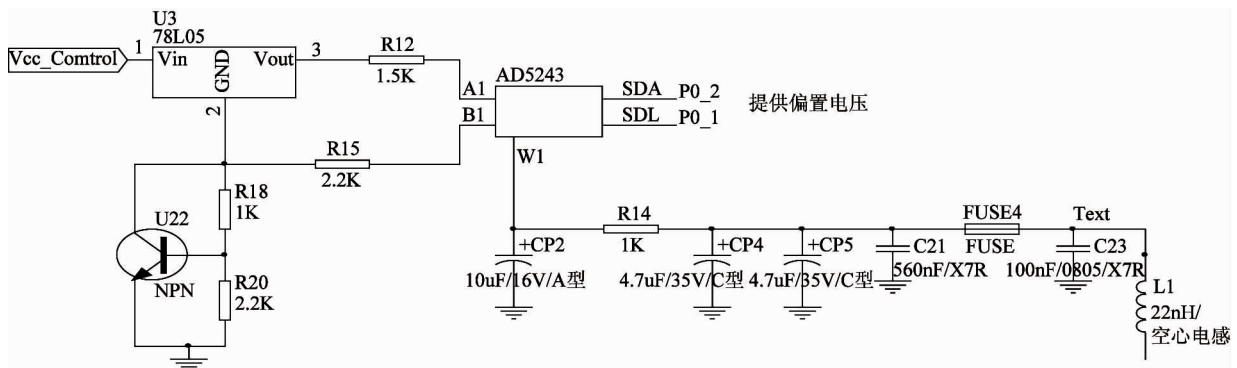


图5 主功放的偏置电路

输入输出匹配首先参考应用手册进行初步设计,然后通过模型进行仿真设计,最后通过测试数

据,结合仿真器进行改进。图6为MRF5S9100应用电路图。主功放是功放电路设计的关键,是整个功放电路的输出级。设计采用二只相同特性的单片微波集成电路(MMIC)功率放大块和二只相同特性的正交耦合器组成平衡功率放大器。为取得良好性能,上、下二支路在工作频段保持幅度、相位特性相同。采用这种结构的功放输出功率较单管线性最大输出功率提高3dB,同时利用输入端正交耦合器相位正交特性,使上、下二支路放大管输入端反射波在正交耦合器入口抵消,有效地改善了末级与末前级之间匹配。此外,通过采用正交平衡级联功放,有助于进一步改善功放的线性度<sup>[8]</sup>。主功放级采用MRF5S9100,其正交平衡原理框图如图4所示。

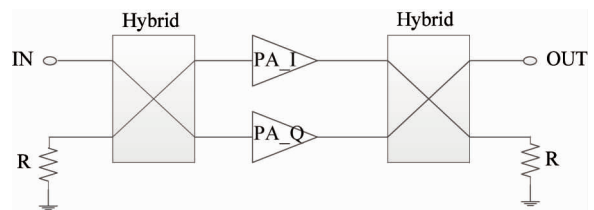


图4 正交平衡电路原理框图

主功放级的偏置电路和输入输出匹配电路是功放设计的重点和难点,它们对功放的线性度和功耗都有影响。因此,设计时应该特别注意。功率放大的偏置电路如图5所示,该电路考虑了稳定性和温度补偿。稳定性由稳压芯片实现,温度补偿通过三极管来跟踪功放芯片的温度变化,提供反馈以调整偏置电压,稳定偏置电流。同时,通过软件调节数字电阻来调整电路的偏置电压,进而调整功放芯片的工作状态。利用这种方式,可通过程序实现功放效率的自动调整。

据,结合仿真器进行改进。图6为MRF5S9100应用电路图。

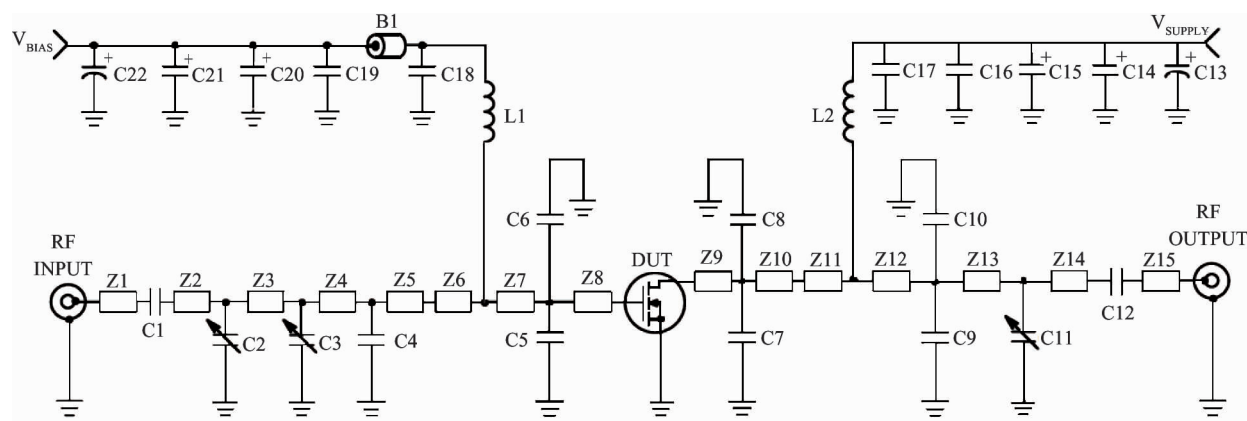


图6 MRF5S9100NR1 应用电路图

## 1.2 高线性度设计

在大的功率输出条件下实现高线性度是功放设计的难点和重点,尤其在高铁直放站中,对线性度的要求达到 $-60\text{dBc}$ ,这给设计带来了挑战性。因此,采用低成本的方式实现高性能的线性度成为设计的瓶颈。本设计为了实现高的线性度,采用功率回退与预失真技术及双平衡功放输出相结合。

在功放的设计中,大的输出功率和高的线性度是相互矛盾的,在设计中需要很好地折中。为了提高线性度,我们采用了功率回退技术。对于理想的A类放大器,当放大器的输出功率从 $1\text{dB}$ 压缩点回退,如果输出功率回退 $1\text{dB}$ ,则三阶交调回退

$2\text{dB}^{[9]}$ 。然而功率回退后会导致效率降低,带来散热设备成本高等一系列困难,因此,我们进一步结合了预失真技术来改善线性度。由于预失真技术不能应用于工作于饱和状态的功率放大器,通常结合适当的功率回退可以获得很好的线性度 $^{[10]}$ 。使用两路信号矢量相加产生预失真信号的预失真器如图7所示。输入射频信号通过Hybrid耦合器输出两路等功率的信号,一路通过可变衰减器和可变移相器的线性路径,另一路通过二极管预失真器和可变传输线的非线性路径,最后耦合器把线性通路和非线性通路的信号矢量合成输出送给主功放的输入端,完成预失真调整。

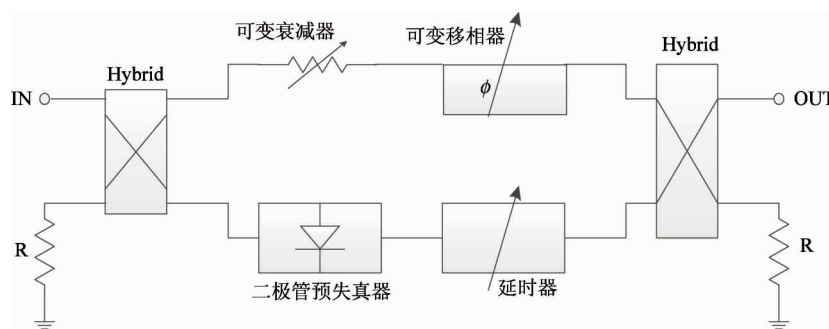


图7 模拟预失真原理图

通过采用功率回退与预失真技术级双平衡功放输出相结合,输出功率可达 $16\text{W}$ ,线性度可达 $-63\text{dBc}$ 。

## 1.3 高稳定度与可靠性

功放模块的稳定输出是发射机的重要指标。高铁沿线环境复杂,温度等环境变化会导致发射功率的变化,直接影响发射信号的质量。本设计采用自动电平控制技术、输入输出功率检测、数控衰减技术、输出微带隔离技术确保模块输出功率的稳定,隔离负载变化对功放输出的影响。设计中增加输出驻

波比检测,驻波比失调会通过微控制单元关断主功放级,避免损坏主功放级。本模块采用铝合金进行散热,模块工作时温度稳定,同时设计中增加温度检测电路和过温报警并关断模块,进一步增加模块的可靠性。

此外,功放是整个直放站系统中射频功率、工作电流最大,工作温度最高的部分。工作电流直接决定了功放模块的工作状态,一旦电流过大,很可能导致模块损坏;工作温度也是工作状态的重要参数,如



果散热不好,长时间的工作会导致温度过高从而导致功放管 PN 结烧坏,其他芯片也可能因温度过高而不能正常工作。输入输出驻波比反映了射频信号的传输效率,这对功放是非常重要的,尤其是输出驻波比,射频功率一旦不能正常发射出去,就会将功率消耗在功放模块上,从而损坏整个模块,甚至是整个系统。功放一旦出现故障会导致发射机的损坏,同时对直放站电源系统也会造成损坏,因此保证功放

模块的高可靠性对直放站系统至关重要。由于智能化控制是高性能功放的发展趋势,因此本设计中引入智能化控制模块,其主要功能是对功放模块的工作电流、工作温度、输入输出驻波比或输入输出回波损耗进行检测与监控,查询并控制本模块的状态,并根据需要调整功放效率。同时增加告警功能,保证模块的高可靠性。软件控制流程如图 8 所示。

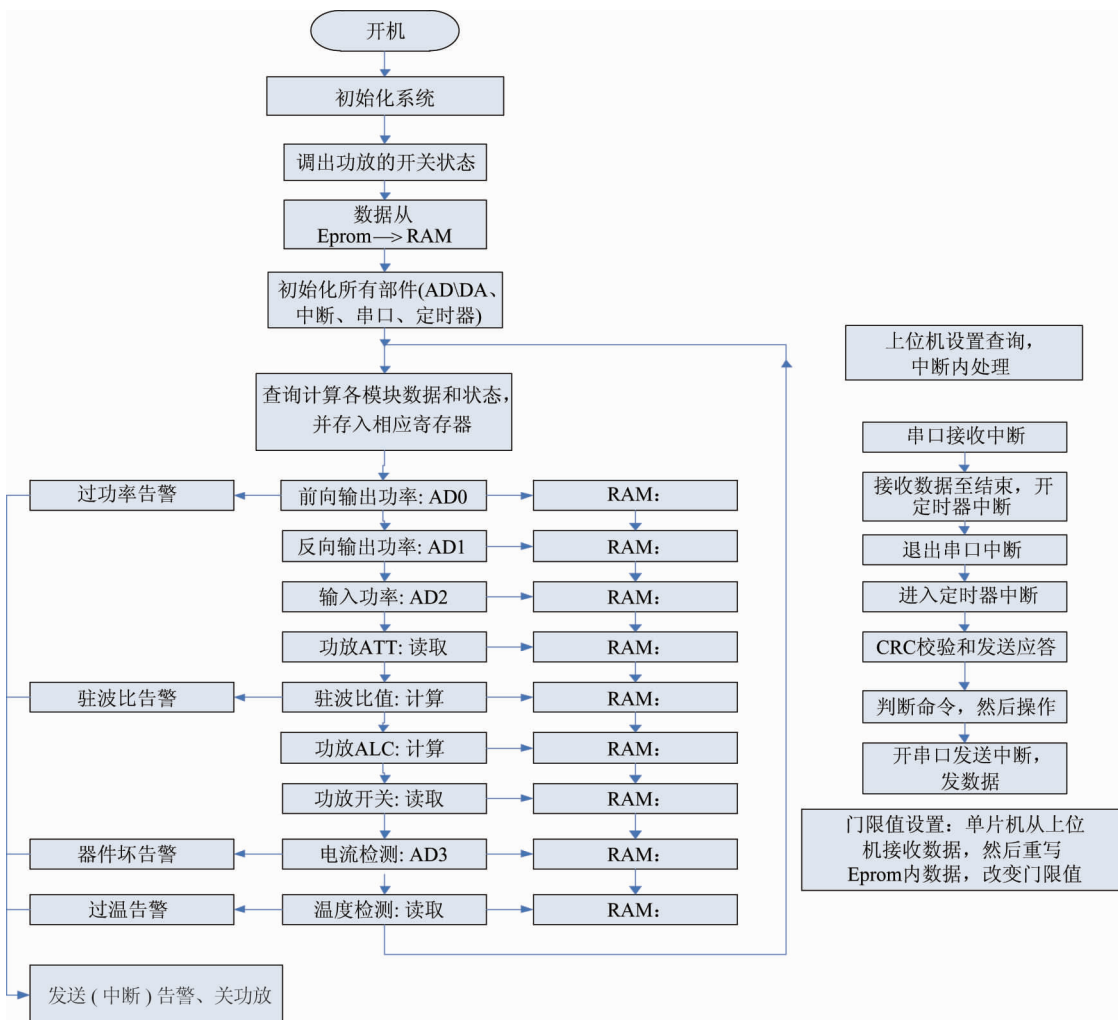


图 8 软件部分流程图

## 2 测试结果

我们根据以上的设计对射频功放模块进行了制作。模块采用双层电路板,铝盒外壳由泉州雷克公司制作。测试在东南大学射频与光电研究所的高频测试室进行。图 9 为三阶交调失真( IMD3)的测试结果图,图 10 给出了模块内部细节图,图 11 给出了

模块及测试平台图。射频功放模块的总体测试性能见表 1。测试结果表明,该模块输出功率可达 16W, IMD3 稳定在 -63dBc,体现了优异的线性度。带外抑制和带内波动分别达到 36dB 以上和 1dB 以内。射频输出增益调节范围高达 30dB 以上。从测试结果我们还可以看出,模块提供了很好的告警和检测等功能。测试结果表明该模块完全满足铁路系统中的设计要求。

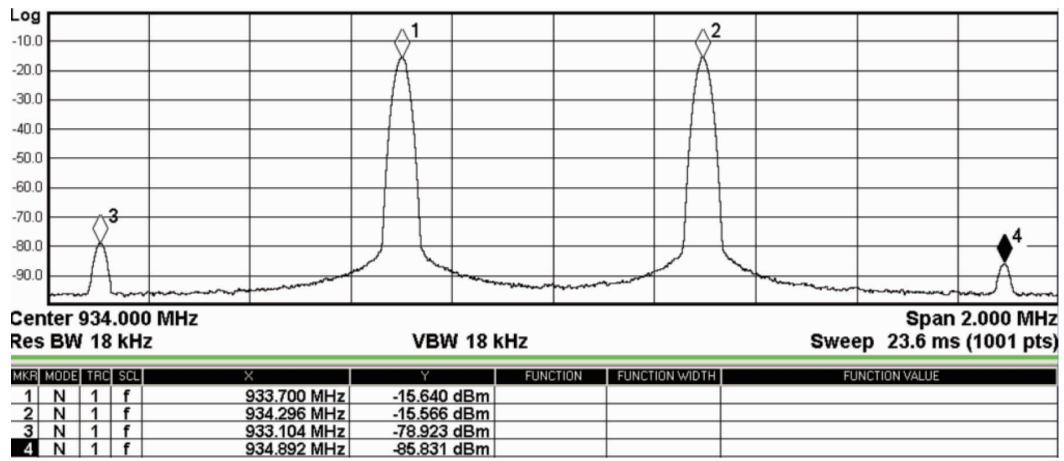


图 9 IMD3 测试指标图

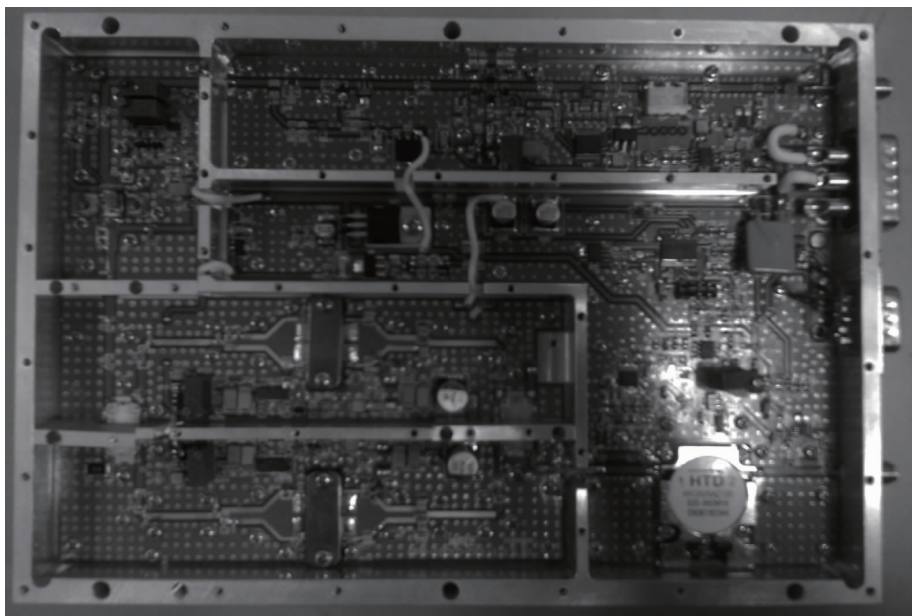


图 10 功放模块细节图

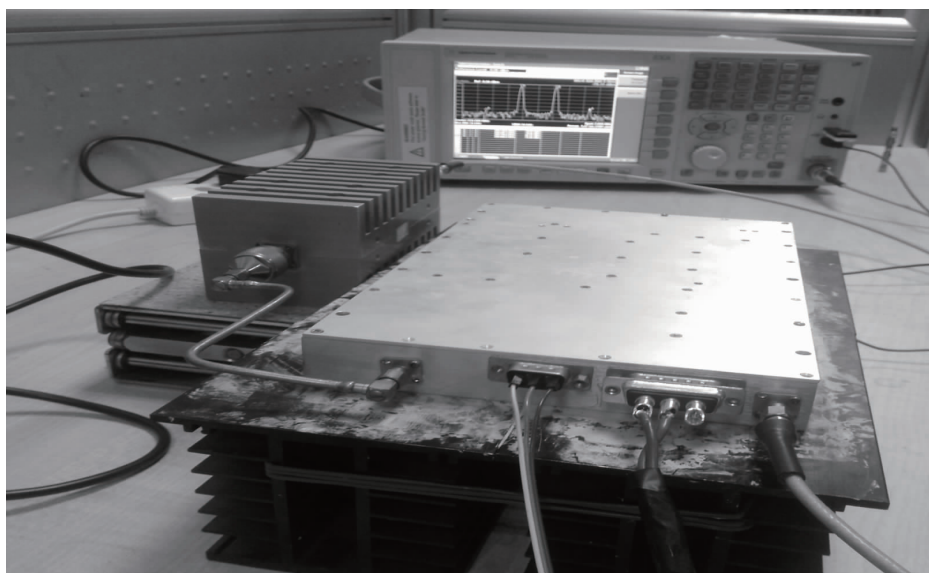


图 11 射频功放模块及测试平台

表1 射频功放模块测试性能

频率范围(MHz)	930 ~ 934
最大输出功率(dBm)	42
功率调节范围(dBm)	≥10
增益(dB)	55
增益调节步长(dB)	1.0
数控调节误差(dB)	1 ~ 20dB ≤1.0 20 ~ 30dB ≤1.5
带内波动(dB)	≤1.0
互调衰减(dBc)	Ⅲ ≤ -63dBc
输出电压驻波比	≤1.40
输出功率检测	检测误差: ≤ ±1.0dB 检测范围: ≥25dB

参考文献

[ 1 ] 杨锐. GSM-R 技术在中国铁路通信系统中的应用. 科技情报开发与经济, 2010, 20(10):102-103

[ 2 ] Kastell K, Bug S, Nazarov A, et al. Improvements in Railway Communication via GSM-R. In: Proceedings of the IEEE 64th Vehicular Technology Conference Montreal, Canada, 2006. Vol. 6, 3026-3030

[ 3 ] 向志华. GSM-R 光纤直放站应用简要分析. 铁道工程学报, 2007, 2(101):78-83

[ 4 ] Zhao L J, Chen X, Ding J N. Interference clearance process of GSM-R network in China. In: Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering, Kyoto, Japan, 2010. Vol. 1, 424-428

[ 5 ] 黄秋元, 王斌, 付雷. 3G 光纤直放站智能光模块设计与研究. 武汉理工大学学报·信息与管理工程版, 2008, 30(3):343-347

[ 6 ] 何松柏, 徐宁, 朱君范等. CDMA 射频线性功率放大器. 电子与信息学报, 2002, 24(8):1139-1142

[ 7 ] 曹程铭. GSM-R 数字光纤直放站射频单元设计. 大众科技, 2011, 12(148):40-42

[ 8 ] 费劲峰, 丁天文. 正交平衡阶联功放线性分析. 移动通信, 2004, 28(10):112-114

[ 9 ] 聂朝辉. 射频功率放大器线性化技术研究:[硕士学位论文]. 成都:电子科技大学, 2010

[ 10 ] 方小虎. 模拟预失真射频高功率放大器的设计:[硕士学位论文]. 武汉:华中科技大学, 2011

### 3 结论

本文给出了满足铁路 GSM-R 标准的光纤直放站中射频功放模块的设计, 并进行了制造和测试。设计中采用自动增益控制、自动电平控制技术, 使得功放获得稳定的输出功率及增益。采用功率回退与预失真技术及正交平衡输出相结合的设计方法实现了射频功放模块的高线性度, 其三阶交调指标高达 -63dBc。同时, 设计中采用驻波比检测、控制电路等智能控制的方式保证了光纤直放站系统的高可靠性。测试结果表明, 该模块具有优异的线性度与稳定性, 完全达到铁路设计要求。

## Design of the RF power amplifier module in GSM-R fiber optical repeater

Xu Jian\*, Yao Zilong\*, Zeng Xianwen\*, Wang Rong\*, Wang Zhigong\*, Chen Jianping\*\*, Ji Rongxin\*\*

(\* Institution of RF- & OE-ICs, Southeast University, Nanjing 210096)

(\*\* Nanjing Ticom Tech Company, Nanjing 210000)

### Abstract

The design, fabrication and test of a RF power amplifier module for the fiber repeater meeting the GSM-R (GSM for rail-way) standard were conducted. The technique of the power back-off combined with the technique of the pre-distortion and double-balanced output stage was applied to the design to achieve the high linearity. The automatic gain control (AGC) and the automatic level control (ALC) were used to ensure the stable output power and final gain of the amplifier. By adding the VSWR (voltage standing wave ratio) detection, control circuitry, etc., the reliability of the power amplifier module was guaranteed. The measurement results showed that the module achieved the output power of 16W, while the third-order intermodulation distortion (IMD3) was up to -63dBc. It showed the excellent linearity and stability, showing that it fully meets the requirements of high-speed rail railway GSM-R repeaters.

**Key words:** GSM-R, fiber optical repeater, RF power amplifier module, auto-gain control (AGC), automatic level control (ALC), pre-distortion, power back-off