

GSM-R 光纤直放站低噪声放大器模块的设计^①

徐 建^{②*} 于金鑫^{*} 曾贤文^{*} 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 对满足铁路专用数字移动通信系统(GSM-R)标准的光纤直放站低噪声放大器模块进行了设计、制造和测试。放大器模块由四级放大电路构成,可提供高的增益和线性度。输入级采用双平衡放大结构,不仅能改善放大器级间匹配性,而且由于具有冗余备份功能,可提高模块的可靠性。采用数模混合自动增益控制技术保证低噪声放大器的输出功率稳定和高动态范围。测试结果表明,该模块最大增益达到 60dB,增益调节范围大于 30dB,互调衰减小于 -60dBc,噪声系数小于 1.0dB,体现了优异的线性度和噪声性能。该模块完全达到 GSM-R 高铁直放站的设计要求,目前已通过南京泰通科技的实际应用测试,并开始应用于铁路系统中。

关键词 GSM-R, 光纤直放站, 低噪声放大器模块, 自动增益控制(AGC)

0 引 言

按国际铁路联盟的技术要求为铁路通信设计的综合专用数字全球移动通信系统(GSM for rail-way, GSM-R),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 885 ~ 889MHz,下行方向为 930 ~ 934MHz^[1,2]。目前,铁路 GSM-R 网络的建设正在展开,为了消除覆盖盲区和扩大基站覆盖范围,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℃,这就对系统的可靠性提出了很高的要求^[3-5]。

在整个光纤直放站系统的核心模块中,低噪声放大器是设计难度较大的模块,其设计的好坏影响着整个系统的性能。低噪声放大器作为接收机的第一级,其噪声性能直接决定了整机的噪声系数,从而很大程度上决定了接收机的灵敏度^[6]。因此噪声系数小、增益高、带内平坦、高线性度是本低噪声放大器模块的设计指标。

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。在整个通信系统中接收终端的低噪声放大器模块决定了接收信号的质量,本文对满足铁路 GSM-R 标准的光纤直放站中的低噪声放大器模块进行了设计、制造和测试。本设计采用双平衡输入级及四级放大电路设计方法以实现低噪声放大器模块的高增益以及高的线性度指标。采用自动增益控制技术保证低噪声放大器的输出功率稳定和高动态范围。测试结果表明,该模块最大增益达到 60dB,增益调节范围大于 30dB,互调衰减小于 -60dBc,噪声系数小于 1.0dB,体现了优异的线性

① 863 计划(2011AA010301)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,讲师;研究方向:深亚微米 RF 集成电路与系统;联系人,E-mail: xujian318@seu.edu.cn
(收稿日期:2014-06-25)

度和噪声性能。该模块完全达到了 GSM-R 高铁直放站的设计要求。目前该设计已通过南京泰通科技的实际应用测试,并开始应用在铁路系统中。

1 GSM-R 低噪声放大器模块设计

图 1 给出了 GSM-R 标准光纤直放站的原理示意图。光纤直放站分为基站侧的近端机和移动终端

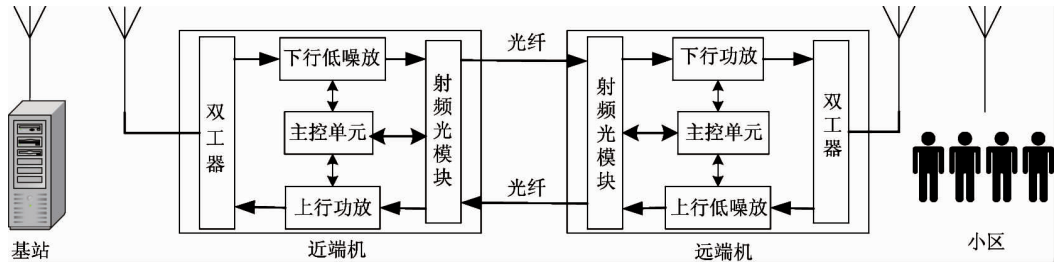


图 1 GSM-R 光纤直放站的原理图

低噪声放大器是直放站远端机接收端的第一级。由于它从天线直接接收信号,因此其噪声性能直接决定了整机的噪声系数,从而在很大程度上决定了接收机的灵敏度。此外,由于移动台和直放站之间远近不同,到达直放站的信号功率存在差异,而直放站要求转发给基站的信号功率(直放站的输出功率)保持稳定。由于接收机的输入信号变化范围很大,因此低噪声放大器应同时具备放大小信号和接收大信号的能力,即应有较大的动态范围,因此模块设计需要有自动增益控制功能。尤其在大信号输入下,如果没有自动增益控制,大的信号很容易使得后级电路饱和,导致模块无法正常工作。严重情况下,大的电流还可能引起器件热损坏。因此必须进行增益衰减以保障模块的可靠性。此外,GSM-R 指标要求低噪放模块的最大输出功率为 1dBm,因此,

侧的远端机两部分。近端机负责将基站的信号接收,经过下行低噪放并转换为光信号传至远端,将远端传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经过上行低噪声放大并转换为光信号传送给近端机。

本设计对线性度也提出了很高的要求。噪声系数小、输入动态范围大及线性度高是本低噪声放大器模块的重要设计指标。

综合以上考虑,为实现增益和线性度的折中,采用四级放大器构成,其功能框图如图 2 示。天线接收信号后通过第一级平衡放大器、第二和第三级驱动级放大器(amplifier, AMP)以及输出级放大器来实现信号的放大。增益控制包含两部分,一部分为数字增益控制,另一部分为模拟增益控制。考虑到低噪声放大器接收到的信号是基站或者移动台直接发射的信号,信号中包含产生干扰的杂散发射,为了减少杂散发射,该模块中插入一个 Q 值较高的带通滤波器,对频带外的无用信号进行滤除,以达到减少带外干扰的效果^[7]。

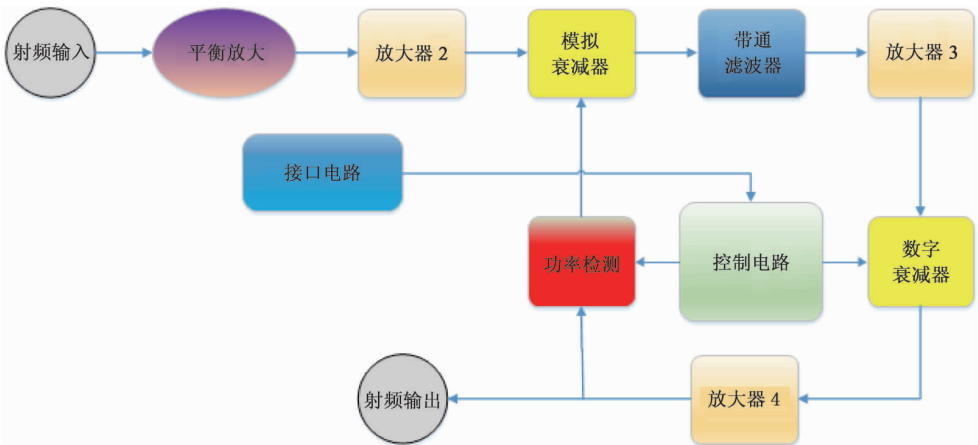


图 2 低噪声放大器模块的结构功能框图

1.1 输入级放大器设计

因为输入级的噪声几乎决定了整个系统的噪声系数,低噪放的第一级放大对于设计来说至关重要。因此,在选用第一级放大器芯片时需要特别考虑。

本设计采用平衡放大器结构,其由两颗低噪放大芯片 AT54143 和两只相同特性的混合耦合器 xc0900A-03S 组成。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。采用平衡放大结构的放大器级间隔离度好,因此级间匹配很容易实现,其调整工作量比较小,输入、输出匹配性能

好,反射小,驻波比小,电路稳定工作^[8]。双平衡放大器还可以实现冗余备份功能,当电路中某一个晶体管损坏时,另一路放大器可正常工作,放大器总增益仅仅下降 6dB,对于带有增益自动控制的系统,这种增益下跌能够通过增益控制将增益大部分调整回到正常水平,从而模块的可靠性大大提高。平衡放大器的增益约为 23dB,噪声约为 0.72dB。电路设计如图 3 所示。其中单路放大器的结构如图 4 所示。

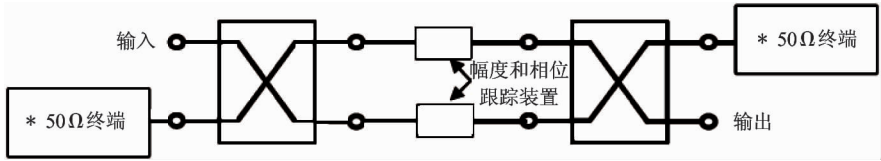


图 3 平衡放大器的结构图

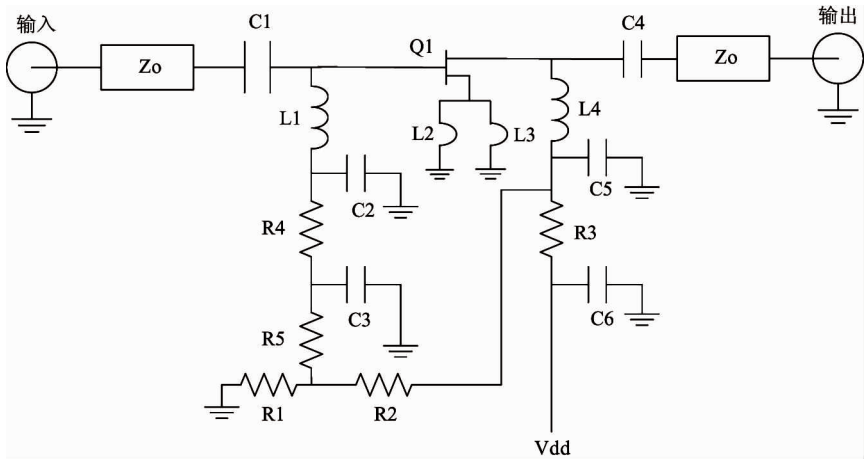


图 4 低噪放 AT54143 的电路结构

1.2 驱动级放大器

驱动级由两级放大器 AMP2 和 AMP3 组成,其位于输入级和输出级之间,因此对噪声和三阶截点的要求相对较小。驱动级一方面对信号进一步放大,提供约 30dB 左右的增益,其为输出级提供足够的信号,从而降低了输出级放大器的增益压力和线性度要求。另一方面,构成驱动级的两级放大器分别与模拟衰减器(attenuator-A, ATT-A)和数字衰减器(attenuator, ATT-D)构成模拟自动增益机制和数字自动增益机制,以实现模块大的动态范围。

基于设计简单和降低成本的考虑,我们选择了 AG402 微波放大芯片设计第二级放大器,在工作频率为 900MHz 时,其典型的增益为15.3dB,输出三阶截点为31.7dBm,噪声系数为3.8dB。驱动级放大器的电路原理图如图 5 所示。

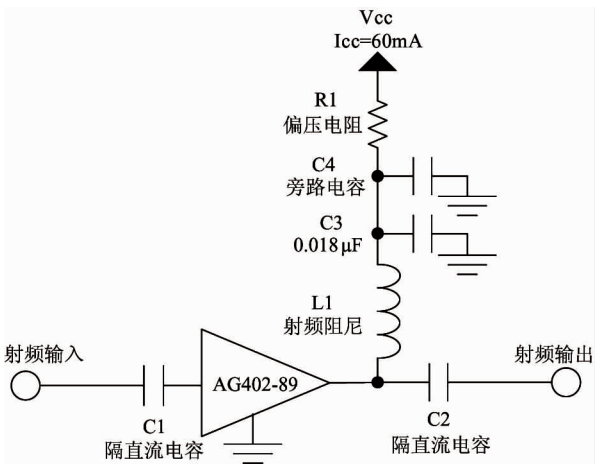


图 5 AG402 的典型应用电路图

1.3 输出级放大器的设计

输出级放大器是低噪放模块的最后一级,信号幅度较大,因此该级最重要的指标就是输出三阶截点,这对互调衰减是很关键的因数。我们选择了 RF3315 芯片来设计输出放大器。RF3315 的主要性能指标如下:工作频段 0.3 ~ 3GHz;典型输出三阶截

点 40dBm,最小输出三阶截点 36dBm;在 2GHz 信号下典型增益 12.5dB;在 2GHz 信号下典型噪声系数 3dB;供电电压范围 0 ~ 6V。RF3315 没有内部匹配到 50Ω,所以需要在外部设计匹配电路。本设计应用电路如图 6 所示。

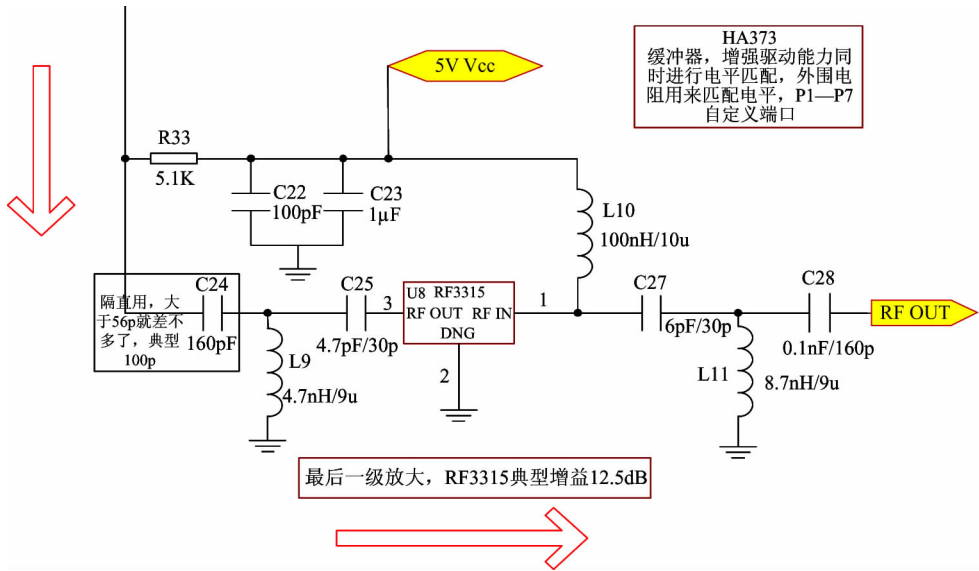


图 6 输出级放大器 RF3315 的电路原理图

1.4 自动增益控制电路

由于低噪放模块需要同时处理小信号和大信号。GSM-R 标准要求有 60dB 的动态范围,所以增益控制由固定增益放大器加上可控衰减器的方式实现。自动增益控制电路由功率检测器,模拟衰减器 (ATT-A),数字衰减器 (ATT-D) 构成。功率检测实现输出功率检测功能,反馈给增益控制。功率检测器由 AD8313 实现。AD8313 是一款 RF 对数检波器与控制器,响应速度快,动态范围大。频率响应范围为 0.1 至 2.5GHz,它可将差分输入处的调制 RF 信号精确地转换为直流输出处的等效 dB 标度值,精度高达 ±1.0dB (65 dB 范围)。

模拟自动增益控制由压控衰减器来实现。根据设计指标的要求,自动增益的调节范围要大于等于 30dB。我们采用 MA-COM 公司的 MA4P274,即 4 PIN 二极管构成的 π 型衰减器。工作频带为 5 ~ 3000MHz,1GHz 信号的输入三阶截点为 43dBm,1GHz 信号的插入损耗为 1 ~ 2dB,1GHz 信号下最大衰减为 30dB。其控制电压与衰减量和频率的关系如图 7 所示。由图中可以看出,在 900MHz 处衰减值和电压的关系式是非线性的,控制电压为 5V 时,衰减约 2.5dB;控制电压 1V 时,衰减约 15dB;控

制电压 0V 时,衰减约 30dB。

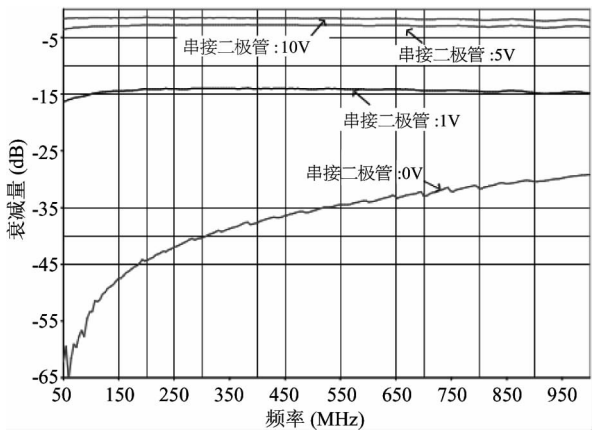


图 7 衰减器控制电压与衰减量和频率的关系

数字衰减器根据设计指标要求,数控增益调节范围大于等于 30dB。据此,我们采用 Hittite 公司的 HMC273 数控衰减器。其数控衰减范围为 1 ~ 31dB,刚好满足我们的要求。工作频段为 0.7 ~ 3GHz,5 个控制位,增益可调范围共 31dB,步进 1dB;插入损耗小,可很好地满足我们的应用。

1.5 电源控制设计

光纤直放站需要面对恶劣的室外环境,电源模

块是保障模块可靠性工作的重要组成部分。低噪放模块中共有两个电压,一个是 5V,另一个是 6V。整个模块的供电电压为 9 ~ 12V,因此,需要模块内部稳压。5V 电压选用最常见的 7805 稳压芯片来提供,而 6V 电压由 17806 稳压芯片提供。

为保证在模块出现异常时,能够切断模块电源,设计引入一个电源开关控制部分,我们选择了 Inter-

national Rectifier 公司的低内阻场效应管 IRF7416 作为开关来控制电源输入。IRF7416 的导通内阻仅为 0.02Ω,可以承受最大 10A 的电流,2.5W 的功耗。其控制端(栅极)通过三极管的集电极驱动;在开关输出端通过并联 0805 的 1/8w 电阻限流,防止电流意外过大。整个电源及其控制部分的电路原理图如图 8 所示。

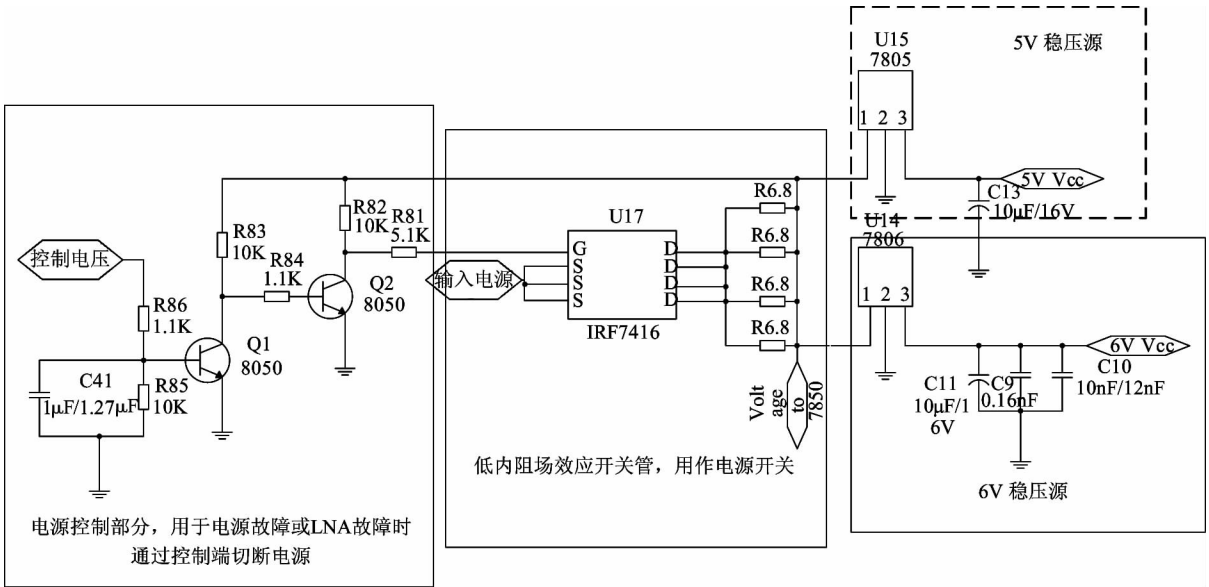


图 8 电源控制电路

2 测试结果

我们根据以上的设计对低噪放模块进行了制作。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为模块内部细节图,图10为模块

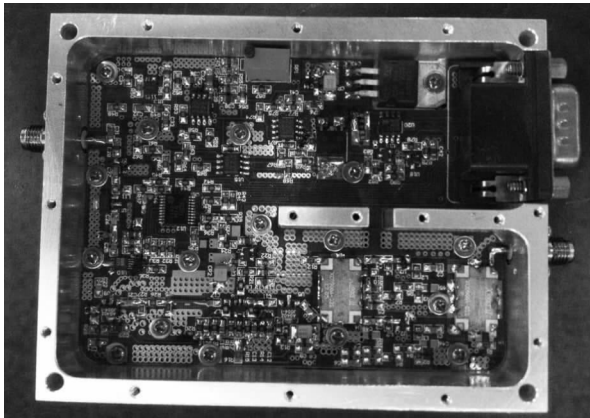


图 9 低噪放模块细节图

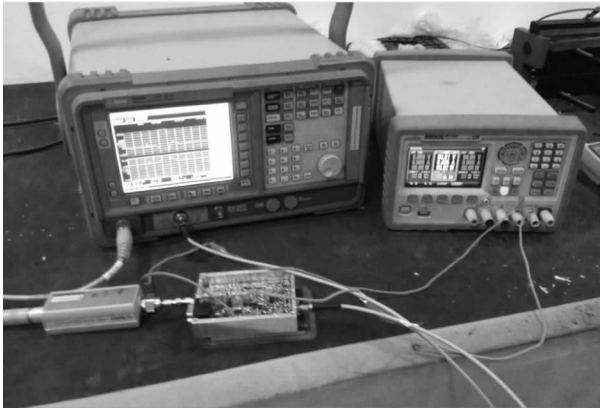


图 10 射频功放模块及测试平台

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,该模块最大增益为 60dB,增益调节范围达到 30dB,互调衰减小于 -60dBc,噪声系数小于 1.0dB,体现了优异的线性度和噪声性能。此外,模块在南京泰通科技的实验室顺利通过了高低温和老化等可靠性测试。测试结果表明该模块完全满足铁路系统中的设计要求。

表 1 低噪声模块测试性能

技术参数	测试结果
频率范围 (MHz)	885 ~ 889
最大输出功率 (dBm)	0 ± 1.0
最大增益 (dB)	60 ± 1.0
噪声系数 (dB)	≤ 1.0
互调衰减 (dBc)	≤ -60
杂散发射 工作带内	$\leq -36\text{dBm}/30\text{kHz}$
(dBm) 工作带外 9kHz ~ 1GHz	$\leq -36\text{dBm}/30\text{kHz}$
输入电压驻波比	≤ 1.30
输出电压驻波比	≤ 1.40
自动增益控制范围 (dB)	≥ 30
供电要求	$+9 \sim +12\text{Vdc}$
工作环境温度	$-25 \sim +55^{\circ}\text{C}$

3 结 论

本研究对满足 GSM-R 标准的光纤直放站中的低噪声放大器模块进行了设计、制造和测试。本设计由四级放大电路构成,可提供高的增益性能和良好的线性度。输入级采用双平衡放大结构,不仅改善了放大器级间匹配性,而且由于具有冗余备份功能,提高了模块的可靠性。采用数模混合自动增益控制技术保证低噪声放大器的输出功率稳定和高动态范围。测试结果表明,该模块最大增益达到 60dB,增益调节范围大于 30dB,互调衰减小于 -60dBc,噪声系数小于 1.0dB,体现了优异的线性度和噪声性能。该模块完全达到 GSM-R 高铁直放站的设计要求,并已逐步在铁路系统光纤直放站中

应用。

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] Kira Kastell, Steffen Bug, Alexey Nazarov, et al. Improvements in railway Communication via GSM-R. In: 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 W. Interference Clearance Process of GSM-R network in China. In: 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] Ismail A, Abidi A. A 3 to 10 GHz LNA using a wideband LC-ladder matching network. In: IEEE International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, USA, 2004. 384-385

[7] Gharpurey R. A broadband low-noise front-end amplifier for ultra wideband in 0.13μm. In: Proceedings of Custom Integrated Circuits Conference, Orlando, USA, 2004. 605-608

[8] Osmani R M. Synthesis of Lange couplers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*,1981, 29(2): 168-170

Design of the module of low noise amplifier
in GSM-R’s fiber optical repeater

Xu Jian*, Yu Jinxin*, Zeng Xianwen*, Wang Zhigong*, Chen Jianping**, Ji Rongxin**
(* Institution of RF- & OE-ICs, Southeast University, Nanjing 210096)
(** Nanjing Ticom Tech Company, Nanjing 210000)

Abstract

A low noise amplifier module meeting the railway GSM-R standard was designed, fabricated and tested for a GSM-R fiber optic repeater. The module used four stages of amplification to provide the high gain and linearity. The input stage adopted a double balanced structure. It not only improved the stage-stage matching performance, but also increased the reliability for its redundant backup function. The digit-analog hybrid auto-gain control technology was used to guarantee the output power stability and high dynamic range. The measurements results showed that the module achieved the maximum gain of up to 60dB, the gain adjustment range of greater than 30dB, the intermodulation attenuation of less than -60dBc, and the noise figure of less than 1.0dB. It exhibited the excellent linearity and noise performance. The module can fully meet the requirements of high-speed railway GSM-R repeaters.

Key words: GSM-R, fiber optic repeater, low noise amplifier module, auto-gain control (AGC)