

UHF RFID 发射机用高精度可编程增益放大器设计

商 龙¹, 张长春¹, 方玉明¹, 郭宇锋¹, 刘蕾蕾^{1,2}

(1 南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210003;

2 东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 采用标准 $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺, 设计了一种应用于超高频射频识别(UHF RFID)发射机的高精度可编程增益放大器(PGA). 该 PGA 由增益细调级和增益粗调级级联形成. 增益细调级采用闭环电阻反馈技术, 实现了增益的精确控制, 并提高了线性度. 增益粗调级采用开环源极负反馈技术, 实现了增益的粗略控制, 并降低了功耗. 仿真结果表明, 在 $1.8\ \text{V}$ 工作电压下, 整个可编程增益放大器的功耗为 $2.69\ \text{mW}$, 增益动态范围为 $-12\sim 24\ \text{dB}$, 步长为 $1\ \text{dB}$, 增益误差 $< 0.02\ \text{dB}$; $-12\ \text{dB}$ 增益下输入 $1\ \text{dB}$ 压缩点为 $-5.54\ \text{dBm}$.

关键词: 可编程增益放大器; UHF RFID 发射机; 低功耗; 高精度

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)06-0133-04

Design of a Programmable Gain Amplifier with High Accuracy for UHF RFID Transmitters

SHANG Long¹, ZHANG Chang-chun¹, FANG Yu-ming¹, GUO Yu-feng¹, LIU Lei-lei^{1,2}

(1 College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2 State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Utilizing a standard $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS process, a programmable gain amplifier (PGA) with high accuracy is designed for UHF RFID transmitters. This PGA is connected by the fine tuning stage and the coarse tuning stage. A close-loop resistor feedback structure is used in the fine tuning stage, which achieves a fine gain control and improves the linearity. An open-loop source negative feedback structure is adopted in the coarse tuning stage, which realizes a coarse gain control and reduces the power consumption. The simulation results show that from a supply voltage of $1.8\ \text{V}$, the PGA has a power consumption of $2.69\ \text{mW}$, a dynamic range of $-12\sim 24\ \text{dB}$ by $1\ \text{dB}$ step with a gain error less than $0.02\ \text{dB}$, and a input $1\ \text{dB}$ compression of $-5.54\ \text{dBm}$ at the gain of $-12\ \text{dB}$.

Key words: programmable gain amplifier; UHF RFID transmitter; low-power; high accuracy

1 引言

射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术由于其高速发展,已经在许多领域得到应用,例如供应链管理、反欺诈系统和目标跟踪系统等^[1]. 其中超高频(Ultra High Frequency, UHF)射频识别系统由于可读范围广、数据传输稳定、天线尺寸小的优点,具有很大的研究和应用价值^[2]. 在

UHF RFID 阅读器的发射端,信号从数字基带发送,经过数模转换电路和低通滤波器后,为使信号达到射频发送端的功率要求,需要一个可编程增益放大器(Programmable Gain Amplifier, PGA)对发射信号的幅度进行适当的调节. 并且,PGA 还能实现必要的电平转移功能,为后级上变频混频器提供合适的直流偏置.

通常有两种方法来实现 PGA 结构,一种是采

收稿日期: 2013-09-16; **修回日期:** 2013-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(61076073); 中国博士后科学基金(2012M521126); 江苏省自然科学基金(BK20130878, BK2012435); 东南大学毫米波国家重点实验室开放基金(K201223); 南京邮电大学科研启动金(NY211016)

用闭环结构,通过改变电路反馈因子来控制增益,常见的有电阻反馈式^[3]和电容反馈式^[4].这种结构性能稳定,增益主要取决于电阻或电容之比,线性度较好.但是,对于运算放大器(Operational Amplifier, OPAM)的增益、带宽、噪声等要求很高,使得电路设计比较复杂,功耗较高.另一种是采用开环结构,通过改变电路跨导或输出负载电阻来控制增益^[5-6].这种结构运放设计简单,功耗相对较小,但是线性度不如闭环结构好.

针对闭环和开环两种结构各自的优缺点,本文设计一种闭环和开环相结合的 PGA,实现电路线性和功耗较好的折衷.采用闭环电阻反馈式结构作为增益细调级,实现 0~6 dB 增益调节范围,1 dB 步进;采用开环源极负反馈结构作为增益粗调级,实现 -12 dB, -6 dB, 6 dB, 12 dB, 18 dB 五个可调增益点.

2 电路分析与设计

本设计 PGA 将实现 -12~24 dB 的增益调节范围,步长为 1 dB,共 36 dB 的调节范围,通过一级增益调节单元很难满足任务要求,因为这将增加电路的复杂性,并且对开关的非理想因素更敏感.因此,本文采用增益细调级和增益粗调级两级级联的方式实现 PGA 整体结构.图 1 为本文设计的 PGA 结构框图. A1 为第一级增益细调电路, A2 为第二级增益粗调电路,两级电路通过开关控制其通断.

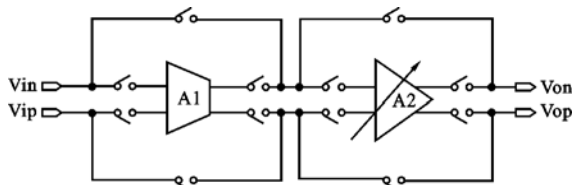


图 1 PGA 结构框图

2.1 增益细调级电路

如图 2 所示,增益细调级电路由运算放大器 A0,电阻 R_1 、 R_2 ,可调电阻 R_3 、 R_4 ,MOS 开关构成.可调电阻 R_3 和 R_4 采用电阻和 MOS 开关构成的电阻阵列形式,通过开关选择不同的电阻调节 R_3 和 R_4 的值.采用 NMOS 和 PMOS 结合的互补开关,可以减小开关导通电阻变化.电路增益表达式为 $A_v = -R_3/R_1$,通过开关调节 R_3 的阻值实现 0~6 dB 的调节范围,步长为 1 dB.

如图 3 所示,运算放大器 A0 采用两级全差分折叠共源共栅结构,可以同时满足闭环结构对于运算放大器高增益和大摆幅的要求.该运放的增益如下^[7]:

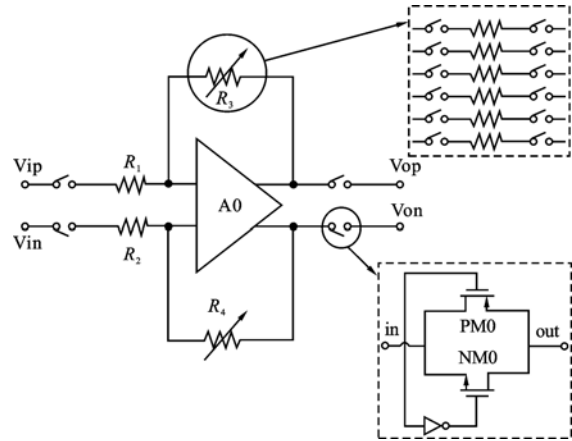


图 2 增益细调级结构图

$$A_v \approx \{g_{m1} \cdot [(g_{m8} r_{o8} r_{o10}) \parallel (g_{m6} r_{o4} r_{o6})]\} \cdot \{g_{m11} \cdot (r_{o11} \parallel r_{o13})\} \quad (1)$$

式中, g_{m1} 、 g_{m6} 、 g_{m8} 、 g_{m11} 分别是 M1、M6、M8、M11 管的跨导, r_{o4} 、 r_{o6} 、 r_{o8} 、 r_{o10} 、 r_{o11} 、 r_{o13} 分别是 M4、M6、M8、M10、M11、M13 管的输出电阻.从式(1)可以看出,调节对应 MOS 管的跨导和输出电阻可以调节运放的增益.调零电阻 R_1 、 R_2 和补偿电容 C_1 、 C_2 用来确保运放的稳定性.共模反馈环路采用电阻分压检测方式,检测到的输出共模电平通过反馈放大器连到两级全差分运放第二级 M13 管的栅极,从而稳定输出共模电平.如图 4 所示,该运放的增益为 57.4 dB,相位裕度为 85.56°,足以满足闭环电阻反馈结构的稳定性要求.

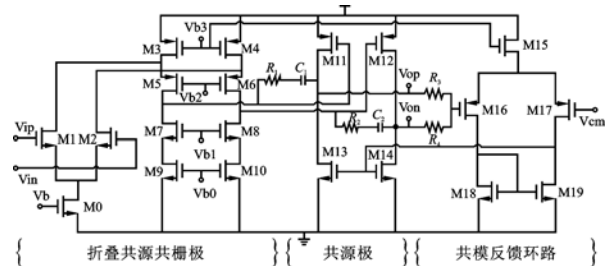


图 3 两级全差分折叠共源共栅运算放大器

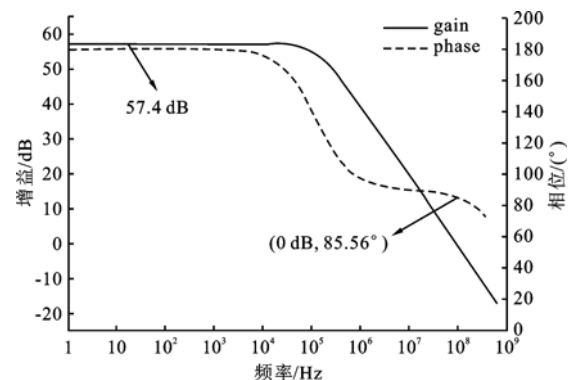


图 4 运放频率响应

2.2 增益粗调级电路

如图5所示,增益粗调级电路采用差分共源放大器结构,并引入源极负反馈电阻,提高电路线性度.电路的增益可以表示为

$$A_v \approx \frac{r_{os} \parallel R_f}{1/g_{m1} + R_6/2} \quad (2)$$

式中, g_{m1} 是 M1 管的跨导, r_{os} 是 M5 管的输出电阻, R_6 是电阻 R_6 的阻值, R_f 表示与 M5 管并联的电阻阻值,由开关控制其大小.通过开关调节 R_f 的阻值,实现 -12 dB, -6 dB, 6 dB, 12 dB, 18 dB 五个可调增益点.图6为增益粗调电路的频率响应曲线图,结果表明,本电路能精确完成五个可调增益点的稳定输出.

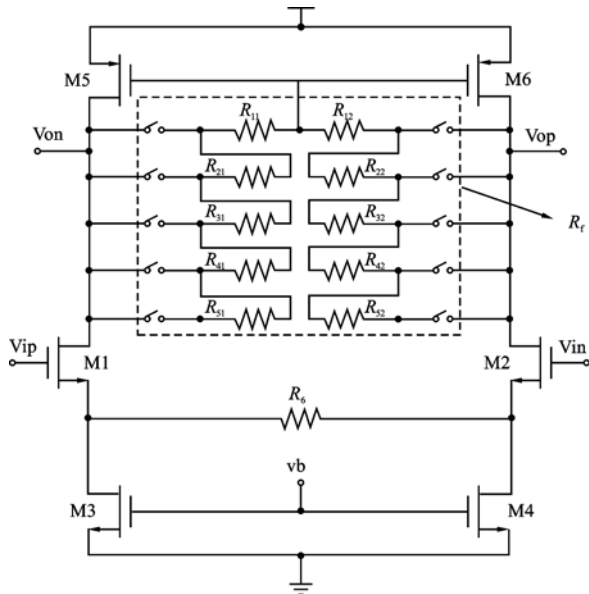


图5 增益粗调电路

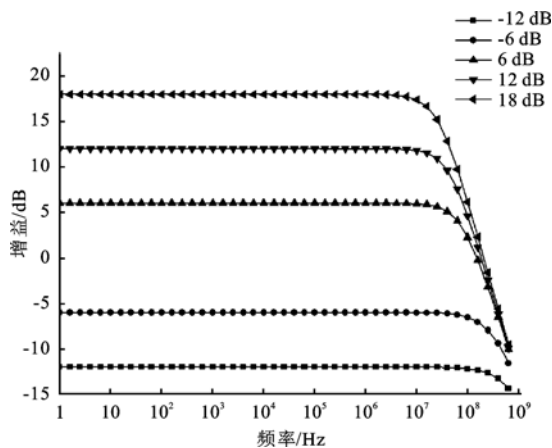


图6 增益粗调级频率响应

3 电路版图设计

图7为采用标准 0.18 μm CMOS 工艺设计的可编程增益放大器芯片版图.芯片整体由增益细调

级版图和增益粗调级版图级联形成,芯片尺寸为 338 $\mu\text{m} \times 163 \mu\text{m}$.版图设计时,充分考虑了整体布局的对称性,尽量减小差分信号因失配产生的失调电压.关键连线的长度也尽量缩短,以降低电路的寄生参数.

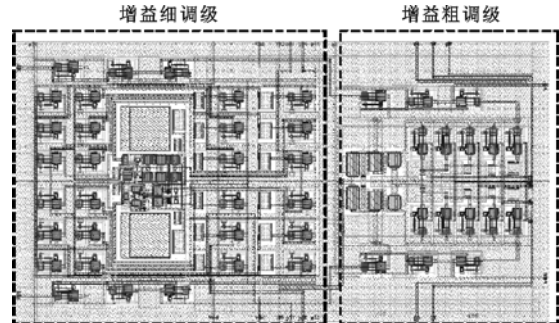


图7 PGA 芯片版图

4 仿真结果

图8中给出了本设计PGA的幅频特性曲线.由图8可见,增益调节范围为 -12~24 dB,步长为 1 dB, -3 dB 带宽约为 40 MHz,满足 UHF RFID 发射机的需求.图9中给出了PGA在所有增益下的增益误差曲线,结果表明,PGA的增益误差小于 0.02 dB,充分体现了PGA的高精度性能.图10为PGA在 -12 dB 时的输入 1 dB 压缩点,结果表明,1 dB 压缩点为 -5.54 dBm,体现出本设计PGA良好的线性度.

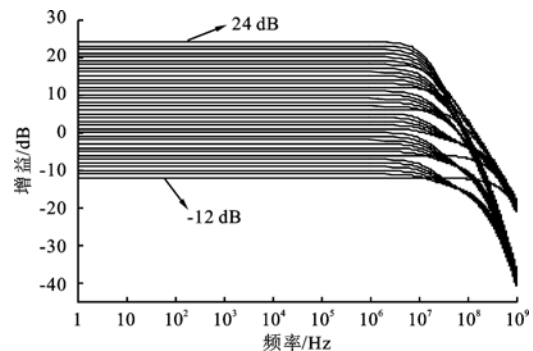


图8 PGA 增益曲线

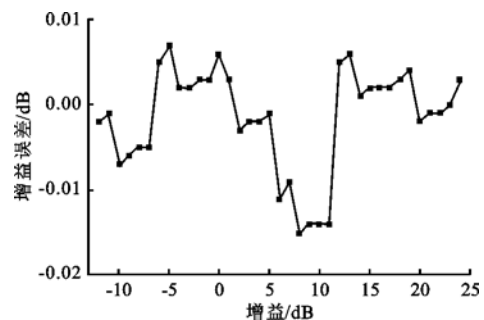


图9 PGA 增益误差曲线

表 1 为本设计 PGA 的相关性能指标与其他文献的比较. 从比较结果可以看出, 本文设计的 PGA 在功

耗、增益误差和芯片面积方面具有一定优势, 线性度良好, 带宽适中, 适合 UHF RFID 发射机的应用.

表 1 本设计与文献中 PGA 性能指标对比

文献	CMOS 工艺/ μm	电源电压/ V	功耗/ mW	带宽/ MHz	增益范围/ dB	增益步进/ dB	增益误差/ dB	IP1dB@ Gmin/dBm	芯片面积/ mm^2
[8]	0.18	1.8	11.85	140~270	-15~60	3	< 0.30	-2.40	0.060
[9]	0.18	1.8	6.50	32~1 050	-52~43	2	1.00	-17.00	0.400
[10]	0.18	1.8	6.30	300	12~108	6	0.03	—	0.097
本文	0.18	1.8	2.69	40	-12~24	1	< 0.02	-5.54	0.055

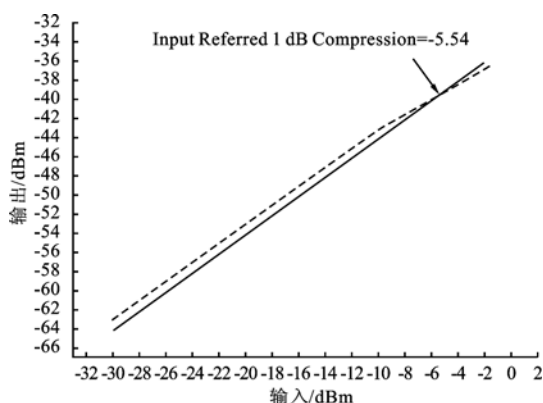


图 10 PGA 输入 1 dB 压缩点

5 结束语

本文设计了一种高精度低功耗的可编程增益放大器电路. 该电路利用开环级联闭环的方式, 实现了开环结构的低功耗和闭环结构的高线性的良好折衷. 仿真结果表明, 本文设计的可编程增益放大器具有 -12~24 dB 的增益调节范围, 1.8 V 电压下的功耗仅为 2.69 mW, 芯片面积为 0.055 mm^2 , 适合 UHF RFID 发射机的应用.

参考文献:

- [1] Jung S-C, Kim M-S, Yang Y. Baseband noise reduction method using captured TX signal for UHF RFID reader applications [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2012, 59(1):592-598.
- [2] Ghanremani A, Rezaei V D, Bakhtiar M S. A UHF RFID transceiver with a blocker-canceller feedback and +30dBm output power [J]. IEEE transactions on circuits and systems, 2013, 60(11):3043-3054.

- [3] Wang C-S, Huang P-C. A CMOS low-IF programmable gain amplifier with speed enhanced DC offset cancellation [C]// IEEE Asia-Pacific conf. Taipei: IEEE, 2002:133-136.
- [4] Fujimoto Y, Tani H, Maruyama M, et al. A low-power switched-capacitor variable gain amplifier [J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2004, 39(7):1213-1216.
- [5] 易青, 杨洪文, 郭桂良, 等. 加速自校正直流飘逸的可编程增益放大器[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(8):92-95.
- [6] 梁栋国, 叶青, 邱聪, 等. 一种用于低中频 GPS 接收机的 CMOS 可编程放大器[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(12):103-105.
- [7] Razavi B. Design of analog CMOS integrated circuits [M]. Xian: McGraw-Hill, 2003:252-254.
- [8] Rahmatian B, Mirabbasi S. A low-power 75dBdigitally programmable CMOS variable gain amplifier [C]// Electrical and computer engineering. Canada: IEEE, 2007:522-525.
- [9] Duong Q-H, Le Q, Kim C-W, et al. A 95dB linear low power variable gain amplifier [J]. IEEE transactions on circuits and systems, 2006, 53(8):1648-1657.
- [10] Liang D-G, Ye Q. A 96dB CMOS programmable gain amplifier for low-IF GPS receiver [C]// IEEE communications, circuits and systems. Fujian: IEEE, 2008:101-104.

作者简介:

商 龙 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计.

张长春 男, (1981-), 讲师, 硕士生导师. 研究方向为超高速、射频及模数混合集成电路设计.