

高线性度 CMOS 射频 AB 类功率放大器设计

陈晓飞¹, 沈 军¹, 张 力¹, 林双喜²

(1 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074; 2 武汉工程大学 电气信息学院, 湖北 武汉 430073)

摘 要: CMOS 射频 AB 类功率放大器广泛应用于单片集成无线芯片内. 采用恒定最大电流的方法对其效率进行分析, 采用归一化输入电压的方法对其线性度进行分析. 利用 AB 类功率放大器系统增益的非线性与 CMOS 跨导非线性相互补偿, 提高了 CMOS 射频 AB 类放大器的线性度. 基于 TSMC 0.18 μm CMOS 混合信号工艺, 设计了一款两级射频 AB 类功率放大器. 该射频功率放大器差动输入, 单端输出, 工作频段为 804~940 MHz, 工作电压为 3 V. 仿真指标为: 增益为 11 dB, 输出 1 dB 压缩点为 17.2 dBm, OIP3 为 18.2 dBm, 附加效率为 37%.

关键词: AB 类; 射频功率放大器; CMOS; 线性度; 效率

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)06-0145-04

CMOS RF Class AB Amplifier Design with High Linearity

CHEN Xiao-fei¹, SHEN Jun¹, ZHANG Li¹, LIN Shuang-xi²

(1 School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2 School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China)

Abstract: CMOS radio frequency class AB power amplifiers are widely used in single chip wireless solutions. Efficiency is analyzed under constant maximum current and linearity analysis by using normalization method of input voltage. High linearity is achieved with the compensation between system gain and MOS transconductance, both are nonlinear. A two stage RF class AB power amplifier is designed based on TSMC 0.18 μm CMOS mixed-signal process. With a differential input and a signal-end output, this RF power amplifier works in the frequency band of 804~940 MHz under operating voltage of 3 V. Simulation shows: the gain is 11 dB, the P1 dB is 17.2 dBm, the OIP3 is 18.2 dBm and the PAE is 37%.

Key words: Class AB; RF power amplifier; CMOS; linearity; efficiency

1 引言

在低成本、低功耗、多功能、体积小的市场驱动下, 射频集成电路最终会选择 CMOS 技术, 以实现无线通信系统的单片集成^[1-3]. 射频功率放大器处于无线发送器的末端, 为天线提供射频功率, 是发送链路中耗能较多的模块, 也是非线性最强的模块, 提高其效率可延长电池寿命, 提高其线性度可以提高数据速率^[4]. AB 类射频功率放大器是线性度和效率的较好折中, 应用广泛. 同属于线性射频功率放大器的还有 A 类、B 类、C 类, 传统的分析方法为了对这几种结构

形成一个统一理论, 采用的是降低导通角的方法, 因为这几种放大器之间的唯一区别即导通角不同. 这种分析方法得出的结论是 A 类放大器的线性度高于 AB 类放大器^[5]. 然而在实践中, 通过合理的参数设计, AB 类放大器具有更高的效率与线性度^[6-7].

本文使用归一化输入电压的方法, 对恒定偏压下的 AB 类放大器进行分析, 利用 CMOS 跨导非线性, 提高其线性度, 设计一款可用于窄带短距离无线通信芯片的 AB 类射频功率放大器.

2 效率与线性度分析

射频功率放大器设计需要在效率与线性度方面

收稿日期: 2013-08-31; 修回日期: 2013-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61076030)

进行折衷. 具有较高效率的 E 类放大器具有低的线性度, 要通过复杂的极化调制结构来实现调幅调相. 然而, 具有较高线性度的 A 类放大器通常效率很低. 图 1 所示为通用功率放大器结构, MOS 管将输入信号转换为脉冲电流, 在由 L 和 C 构成的高 Q 值谐振器的作用下, 输出失真较小的射频信号. 本文使用恒定最大电流分析法对功率放大器的效率进行分析, 采用归一化输入电压分析法对线性度进行分析.

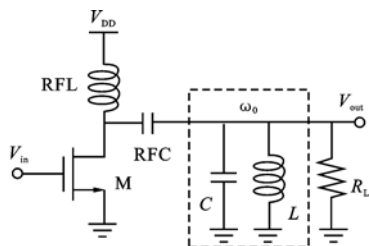


图 1 通用功率放大器^[7]

2.1 效率分析

恒定最大电流而改变导通角, 可以对 A 类、AB 类、B 类、C 类放大器建立统一的研究方法. 如图 2 所示, 晶体管偏置在一个静态电压 V_q 上, 当输入信号幅度小于 MOS 管过驱动电压时, 放大器工作在 A 类. 随着输入信号的增大, 为了保证最大电流不变, 偏置电压要降低, 晶体管只在部分时间内导通, 根据导通时间的大小, 也就是导通角 α 的大小, 就将功率放大器分成了 AB 类、B 类、C 类^[5].

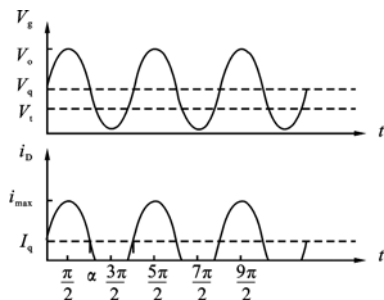


图 2 导通角与输入电压的关系

根据参考文献[5]中的分析, 功率放大器的效率与导通角 α 有着紧密的关系. 通过对图 2 中电流波形做傅里叶变换, 其中的直流分量为功率放大器消耗的能量, 基波为输出信号能量, 则效率与放大器的导通角的关系可以表示为

$$E_f = \frac{P_{out}}{P_{DC}} = \frac{V_{out}}{V_{DC}} \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{4(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)} \quad (1)$$

最大效率发生在 $V_{out} = V_{DC}$ 时, 使用 MATLAB 对最大效率分析, 绘出了效率与导通角的关系, 如图 3 所示. 导通角越小, 效率越高. 射频 AB 类放大器的

导通角介于 $\pi/2 \sim \pi$ 之间, 所以理论效率在 50% ~ 78.5% 之间.

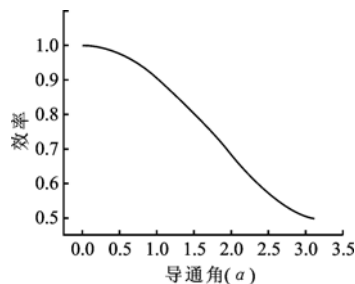


图 3 效率与导通角的关系

选择较小的导通角, 可以使放大器具有较高的效率, 但是线性度较差. 窄带短距离无线通信芯片一般工作在 ISM 频段, 需要有较高的线性度以降低杂散发射. 使用电池供电, 需要有较高的效率以延长寿命, 所以需要仔细地选择导通角以满足窄带短距离无线通信芯片的要求.

2.2 线性度分析

两种相反的非线性叠加可以得到线性的结果. 在 CMOS 射频 AB 类功率放大器中, 主要有系统非线性、跨导非线性、输入电容的非线性等. 本文使用归一化输入电压的方法对恒定偏置电压的 AB 类放大器系统增益进行分析, 使用仿真对 MOS 器件跨导的实际特性分析, 利用这两种非线性相互补偿达到提高线性度的目的.

射频 AB 类功率放大器的偏置电压比晶体管阈值电压高, 在输入信号较小时, 工作在 A 类状态, 而输入信号较大时, 处于 AB 类状态. 在输入信号由小变大的过程中, 偏置电压是不变的, 而导通角减小, 逐渐趋于 B 类状态, 晶体管漏极电流逐渐增大. 定义归一化输入电压: $v_{in1} = v_{in} / (V_q - V_{TH})$, 则有

$$\cos \alpha = -1 / v_{in1},$$

式中, v_{in} 为输入信号幅度, V_{TH} 为 MOS 晶体管的阈值电压.

定义系统增益为 $G_m = i_{1rd} / v_{in}$, 其中 i_{1rd} 为晶体管漏极电流中的基波分量, 也就是有效信号分量, 其与输入信号幅度 v_{in} 和导通角 α 的关系如式(2)所示.

$$i_{1rd} = g_m v_{in} \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{2\pi} \quad \frac{\pi}{2} < \alpha < \pi \quad (2)$$

归一化增益 $G_{nor} = G_m / g_m$ 可以表示为

$$G_{nor} = \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{2\pi} \quad \frac{\pi}{2} < \alpha < \pi \quad (3)$$

将归一化输入电压 v_{in1} 与导通角 α 的关系代入到式(3)中, 可以得到 AB 类放大器在恒定偏置电

压下随着输入信号增大,增益的变化情况.如图4所示,随着归一化输入电压的增大,AB类放大器由A类向B类转化.工作在A类时,归一化增益为1,当归一化输入电压为3时,归一化增益下降3 dB.

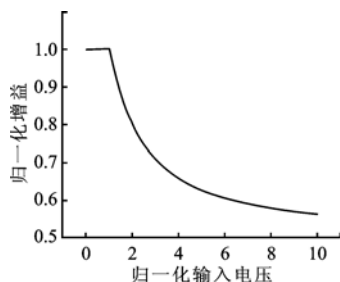


图4 归一化增益与输入电压的关系

AB类放大器的增益随输入信号的增大是单调下降的,而理想的MOS器件传输特性为平方率特性,在阈值电压处突然导通,具有恒定的跨导,这对于A类放大器是有利的,而对于AB类放大器不利.对于深亚微米MOS器件,由于短沟道效应,传输特性偏离了平方率特性,跨导随着栅极电压的增加而表现出先增加后减小的特性,可利用这种非线性补偿系统增益对输入电压的非线性.

本文基于TSMC 0.18 μm CMOS混合信号工艺,研究MOS管的跨导非线性.图5中MOS跨导 g_m 为使用HSPICE仿真得到的宽长比为595 $\mu\text{m}/0.35 \mu\text{m}$ 的NMOS的跨导与输入电压的关系,该MOS管的阈值电压为0.75 V.在阈值电压以下,MOS跨导不为零,阈值以上直到1.5 V,MOS跨导一直在增加,大于1.8 V以后,MOS跨导开始下降.选择 $V_q - V_{TH} = 0.15 \text{ V}$,则可以得出图5所示系统归一化增益 G_{nor} 与栅极电压的关系.通过MATLAB可以计算出图5中系统跨导 $G_m = G_{nor} \times g_m$ 的曲线,经过AB类放大器的系统增益非线性的补偿,系统跨导更加线性了.栅极电压在0.9~3.3 V之间,系统跨导 G_m 最小为0.086 S,最大为0.12 S,而对应的MOS跨导 g_m 最小为0.086 S,最大为0.163 S.AB类系统线性度提高了,增益下降了.

由以上的分析,系统非线性主要与归一化输入电压有关,也就是与偏置点 V_q 有关,MOS的跨导随着栅极电压的上升而表现出先上升后下降的特性.在设计CMOS射频AB类功率放大器时,选择合适的偏置点与输入归一化幅度范围,应用MOS跨导非线性与系统非线性相互抵消来提高AB类功率放大器的线性度.

3 放大器结构及仿真

本文设计的射频AB类功率放大器由文献[8]

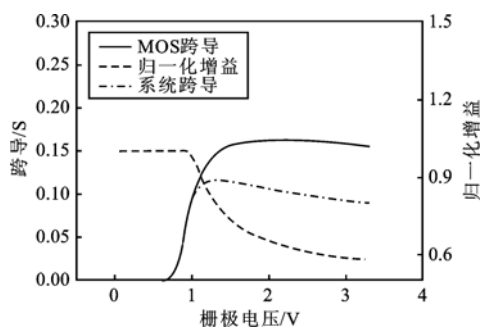


图5 短沟道MOS跨导与栅极电压的关系

中的单端结构改进而来,主要由M1完成放大功能,如图6所示.M2和M3构成差动转单端的驱动级,M4与M5为系统提供偏置. C_1 、 C_2 、 L_1 构成 π 型匹配网络.

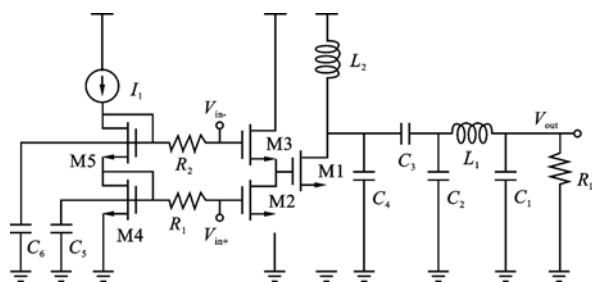


图6 射频AB类放大器结构

经过反复优化,本文最终选择偏置电压为905 mV,归一化输入电压约为3,此时放大器的增益线性度较为理想,对应导通角 α 为 110° ,最高效率为70%.考虑衬底耦合,本设计使用具有DNW的MOS管^[9],考虑输入电容的非线性,调整M2,M3的尺寸以补偿^[10].

使用SepctreRF对本文设计的射频功率放大器仿真,图7为输入与输出功率的关系,输出1 dB压缩点为17.2 dBm,效率为37%,在输入为0 dBm时,增益为11 dB.

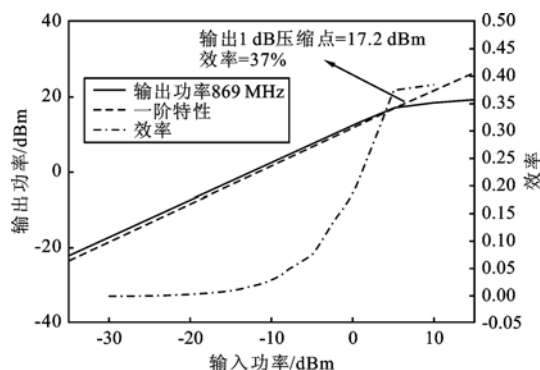


图7 输出1dB压缩点

三阶交调特性是表征放大器线性度的重要指标,图8显示放大器的OIP3为18.2 dBm.特别的,在输入为-10 dBm时,三阶交调项的增长受到抑

制,在输入为 $-10\sim-5$ dBm 之间,三阶交调项几乎没有增长,这使得 IMD3 大约改善了 15 dBc. 此时对应的归一化输入电压为 $1\sim2$ V 之间,对应栅极电压幅度为 $0.98\sim1.1$ V 之间,刚好是系统非线性与器件跨导非线性互补的区间. 这验证了使用 MOS 器件跨导非线性可以补偿 AB 类系统非线性.

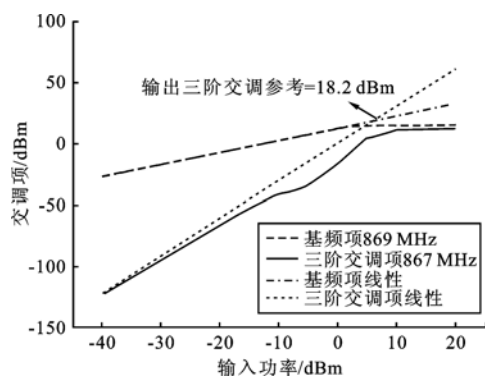


图 8 三阶交调特性

图 9 所示为放大器的 S21 参数,在通频带 804~940 MHz 内,系统增益起伏小于 1 dB,满足窄带短距离无线通信芯片的要求.

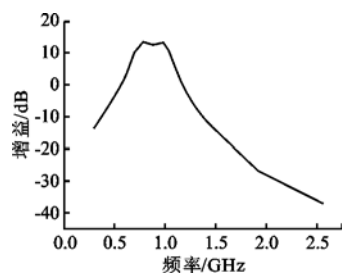


图 9 放大器带宽特性

4 结束语

本文对射频 AB 类放大器的效率与非线性特性进行分析,基于系统非线性与 MOS 器件跨导非线性相互补偿,设计了一款可用于窄带短距离无线通信芯片的 CMOS 射频 AB 类功率放大器. 仿真结果验证了归一化输入电压设计对于提高线性度的有效性.

参考文献:

- [1] 张国艳,黄如,张兴,等. CMOS 射频集成电路的研究进展[J]. 微电子学,2004,34(4):377-389.
- [2] Pui-In Mak, R P Martins. High mixed voltage RF and analog CMOS circuits come of age[J]. IEEE circuits and systems magazines, 2010, 10(4):27-39.
- [3] Patrick Reynaert, Brecht Francois, Ercan Kaymaksut. CMOS RF PA design: using complexity to solve the linearity and efficiency trade-off[J]. IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, 2009: 207-212.
- [4] 支传德. 射频功率放大器线性化和稳定性的分析与设计[D]. 北京:清华大学,2006.
- [5] 池保勇,徐志平,石秉学. CMOS 射频集成电路的分析与设计[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [6] Steve C Cripps. Advanced Techniques in RF Power amplifier design[M]. London:Artech House,2002.
- [7] 刘伟琴. 射频 AB 类功率放大器的非线性分析与研究[D]. 成都:电子科技大学,2010.
- [8] M Rofougaran, A Rofougaran, C Olgaard, et al. A 900 MHz CMOS RF Power amplifier with programmable output[C]//Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers. Honolulu, HI, USA; IEEE, 1994: 133-134.
- [9] Jongchan Kang, Daekyu Yu, Youngoo Yang, et al. Linear 0.18um CMOS power amplifier with deep n-well structure [J]. IEEE journal of solid-state circuits, 2006, 41(5): 1073-1080.
- [10] Chengzhou Wang, Mani Vaidyanathan, Lawrence E Larson. A capacitance compensation technique for improved linearity in CMOS class-AB power amplifiers [J]. IEEE journal of solid-states circuits, 2004, 39(11):1927-1937.

作者简介:

陈晓飞 女,(1968-),博士,副教授.研究方向为功率集成电路与器件研究.

沈 军 男,(1989),硕士.研究方向为模拟集成电路设计.