

一种应用于物联网的双频段射频 D 类功放的设计

崔剑慧, 张 科, 田 彤

(中科院 上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘 要: 基于 $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺, 设计了一个适用于物联网系统的双频段(400 MHz / 600 MHz)射频 D 类功率放大器. 电路采用了一种没有开关的双频段阻抗匹配网络来解决功放多频化的问题, 并进行了理论分析及设计. 测试结果表明, 采用 2 V 电源供电, 电路在 400 MHz / 600 MHz 两个频段上的输出功率分别为 14 dBm/15.4 dBm, 功率增益分别为 17.4 dB/16.8 dB, 功率附加效率分别为 35%/34%.

关键词: 多频段; 匹配网络; 功放; CMOS 工艺

中图分类号: TN722

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)12-0129-04

A Dual-Band Class-D CMOS Power Amplifier for IoT Applications

CUI Jian-hui, ZHANG Ke, TIAN Tong

(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China)

Abstract: In this paper, a dual-band Class-D CMOS power amplifier (PA) in a standard $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS process is presented for Internet of Things (IoT) applications. The paper describes the specific method of matching network at the dual-band (400 MHz / 600 MHz) and the circuit operates at 2V supply voltage. Measurement results indicated that the proposed amplifier provides 17.4 dB/16.8 dB gain, 14 dBm/15.4 dBm output power and the measured maximum efficiencies of the dual-band PA are 35%/34% at the 400/600 MHz bands, respectively.

Key words: dual-band; matching network; power amplifiers (PA); CMOS technology

1 引言

物联网是一个通过射频信息传感设备, 按约定的协议, 把任何物品与互联网相连接, 进行信息交换和通信, 以实现物品的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络, 它被认为是继互联网之后未来具有巨大应用前景的网络. 承载无线传递信息功能的无线节点收发机的功耗问题成为影响物联网应用的关键因素之一, 为延长使用时间并避免频繁更换电池所带来的困扰, 设计并实现超低功耗的无线节点成为迫切需要解决的问题. 功率放大器是构成无线节点发射机中最重要的部件, 因此, 设计高效率的功放成为实现低功耗无线收发机的核心问题.

相较于传统的 A 类等线性功放来说, D 类功放一般采用两只功率管组成推挽式工作原理, 具有较

高的效率. 另一方面, 随着 CMOS 工艺不断进步和成熟, 用低成本的 CMOS 来实现物联网单芯片多标准的无线节点收发机, 满足多种应用场合的需要已经是一种趋势. 因此, 很多研究工作围绕无线接收机中的多频带低噪声放大器技术而展开^[1-2], 对于无线发射机中多频带功率放大器也有很多工作对其进行研究设计.

目前主要有以下几种方法实现功放电路的多频: 多个功放并联^[3], 频率开关^[4]等等. 第一种方法采用两个功放并联的形式, 这样会占用很大的芯片面积, 非常不利于芯片的集成^[3]; 频率开关方法中引入的频率开关不仅会增加芯片的面积, 而且频率开关在输出端寄生的电阻会降低功放的效率^[4]. 为了克服上述方法缺点, 本文设计一种没有开关的多频段输入输出阻抗匹配网络来实现功放多频化, 即一

收稿日期: 2013-02-21; **修回日期:** 2013-04-01

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX02506-004)

种适用于物联网系统的并行式双频段(400 MHz / 600 MHz) D类功率放大器。

2 电路及匹配网络设计

图1所示为D类功放的整体结构,电路主要分为三部分:(1)调制电路;(2)主功放电路;(3)输出匹配网络。电路选用电压类的D类功放,采用两只功率管组成推挽工作结构,输入激励信号使功率管交替导通,并处于开关工作状态。(1)调制电路将输入的正弦电路调制成为方波信号,(2)主功放电路将输入的方波信号放大。在功率放大器的输出级与天线之间的匹配网络,完成阻抗变换和滤波,使天线阻抗变换为该级所要求的最佳负载^[5],后面将对(3)匹配网络进行详细说明。

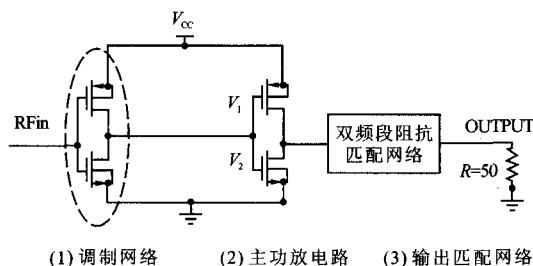


图1 D类功放的电路结构

2.1 输出匹配网络的理论分析

根据D类功放的基本原理,假如电源电压VCC(2 V),等效负载电阻 R_{opt} 和内阻 R_{on} 为固定值,可以得到D类功放的输出功率为

$$\begin{aligned} P_o &= \frac{1}{2} I_{i,m}^2 R_{opt} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{2}{\pi} \frac{(V_{CC} - 2V_{CES})}{R_{opt} + R_{on}} \right)^2 R_L \\ &= \frac{2(V_{CC} - 2V_{CES})^2}{\pi^2 (R_{opt} + R_{on})^2} R_{opt} \end{aligned} \quad (1)$$

电源供给功率 P_{dc} 为

$$P_{dc} = I_{dc} V_{CC} = \frac{2(V_{CC} - 2V_{CES})}{\pi^2 (R_{opt} + R_{on})} V_{CC} \quad (2)$$

那么D类功放的效率可表示为

$$\eta_c = \frac{P_o}{P_{dc}} = \frac{V_{CC} - 2V_{CES}}{V_{CC}} \frac{R_{opt}}{R_{opt} + R_{on}} \quad (3)$$

从式(1)、式(3)可以看出,功放的输出功率和效率与等效负载电阻 R_{opt} 有直接关系。为了达到需要的D类功放输出功率和效率,需要选择合适的等效负载阻抗 R_{opt} 值来实现。根据输出功率和效率的设计指标,最终确定 $R_{opt}=5 \Omega$ 。

为了能够将负载阻抗 R_L 在要求的两个频段下变换到需要的等效阻抗 R_{opt} ,需用双频段输出匹配

网络来实现阻抗变换。本文所使用的输出网络为L型匹配,如图2所示。Z1网络实现双频段阻抗下变换,将 50Ω 的负载阻抗在两个频段下实部均匹配到 R_{opt} 值,Z2网络对虚部进行匹配,实现虚部共轭。

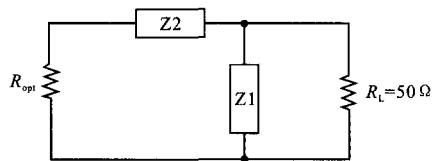


图2 输出匹配网络的等效电路

由L型匹配的理论可知,

$$R_L = R_{opt}(Q^2 + 1) \quad (4)$$

电抗 X_2 和 X_1 可表示为

$$X_2 = Q * R_{opt} \text{ 和 } X_1 = R_L / Q \quad (5)$$

2.2 输出匹配网络的设计

本文采用的是L型容性变换网络,如图3所示。

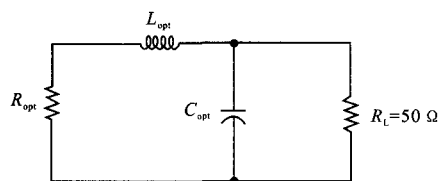


图3 输出L型容性变换网络的等效电路

根据式(4)、式(5)可得到双频率段下的 C_{opt} 和 L_{opt} 的值:

$$C_{opt} = Q / 2\pi f * R_L, L_{opt} = QR_{opt} / 2\pi f \quad (6)$$

由式(6)可得, C_{opt} 和 L_{opt} 在双频率段的值如表1所示。通过表1中的数据可发现,L型容性变换网络进行负载电阻下变换时,需要一个在相对低频下表现为大电容,在相对高频下表现为小电容的容抗网络和需要一个在相对低频下表现为大电感,在相对高频下表现为小电感的感抗网络。根据上述要求,具体实现电路如图4所示。

表1 匹配网络中的等效电容和电感值

频率	C_{opt}	L_{opt}
600 MHz	15.9 pF	3.98 nH
400 MHz	23.8 pF	5.96 nH

下面对图4进行理论分析说明。输出匹配网络分为两部分,左侧为电感实现电路,右侧为电容实现电路。电感实现电路由电感 L_1, L_2 和电容 C_1 组成,当频率非常低时, C_1 断路,等效电感为 $L_1 + L_2$,为高电感;当频率非常高时, C_1 短路,等效电感为 L_1 ,为低电感,满足双频率段下对等效电感的要求。电容实现电路由电容 C_2, C_3 和电感 L_3 组成,当频率非常低时, L_3 短路,等效电容为 C_3 ,为高电容;当频率非常

高时, L_3 断路, 等效电容为 $C_3 // C_2$, 为低电容, 满足双频率段下对等效电容的要求。

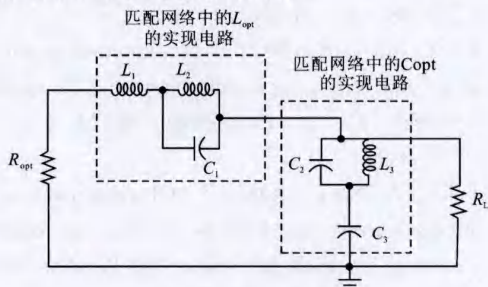


图4 输出匹配网络的具体实现电路

电容实现电路和电感实现电路的原理相同, 现主要对电容部分进行理论分析如下。

电容实现电路的阻抗 Z 可表示为

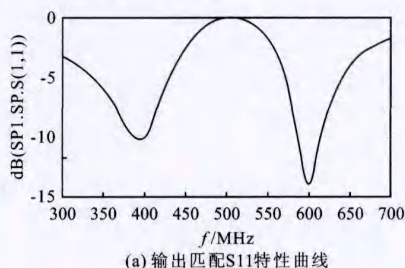
$$Z = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_3} + j\omega C_2} + \frac{1}{j\omega C_3} = \frac{1}{j\omega C} \quad (7)$$

由式(7)可得等效电容 C 的表达式:

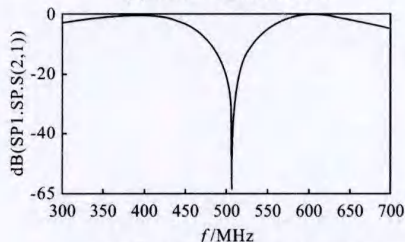
$$C = \frac{(1 - \omega^2 L_3 C_2) C_3}{1 - \omega^2 (L_3 C_2 + L_3 C_3)} \quad (8)$$

当 $\omega_1 = 1/\sqrt{(L_3 C_2 + L_3 C_3)}$ 时, 出现谐振。当 $\omega < \omega_1$ 时, C 表现为大电容值, 当 $\omega > \omega_1$ 时, C 表现为小电容值。电感实现电路的原理相同。

对输出匹配网络进行 SP 仿真, 可以看到 S_{11} 在 400 MHz, 600 MHz 的频段, 小于 -10 dB, 基本是满足要求的, 如图 5(a) 所示。对于 S_{21} 而言, 在 400 MHz, 600 MHz 的频段, 维持在接近 0 dB 左右, 如图 5(b) 所示。由 SP 仿真可以看出输出匹配网络基本满足了设计的要求。



(a) 输出匹配S11特性曲线



(b) 输出匹配S21特性曲线率的图形

图5 输出匹配曲线

3 测试结果

电路采用 0.18 μm CMOS 工艺来实现, 芯片照片如图 6 所示。芯片的面积约为 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$, 匹配网络在片外 PCB 板中实现。图 7 所示为 D 类功放的测试平台。主要包括: 电源 (Agilent N6705A), 信号发生器 (Agilent E4438C), 频谱仪 (Agilent N9030A)。

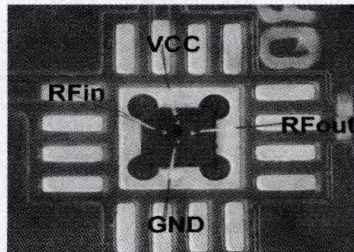


图6 D类功放的芯片照片

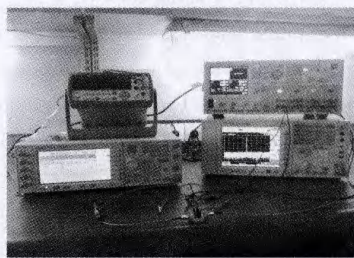


图7 D类功放的测试平台

图 8 所示为双频率段下的 D 类功放的输出功率, 增益, PAE vs 输入功率的曲线。由图 8 可以看出在 400 MHz 时, 当输入 0 dBm 时, POUT 可达到 13.88 dBm, GAIN 约为 13.88 dB, PAE 可达到 32%; 在 600 MHz 时, 当输入 0 dBm 时, POUT 可达到 15 dBm, GAIN 为 15 dB, PAE 可达到 32%。电路在双频段 (400 MHz/600 MHz) 最大的 PAE 分别为 35.42% 和 34.3%, 最大输出功率分别为 14 dBm、15.4 dBm, 且在双频段下增益都能够大于 16 dB。通过测试数据可以看出功放在 400 MHz 和 600 MHz 性能能够满足物联网的应用。

4 结束语

文中基于 0.18 μm CMOS 工艺设计了一款应用于物联网的双频段 (400 MHz/600 MHz) 的 D 类功率放大器。电路采用了一种无开关的双频段输出阻抗匹配的设计方法, 测试结果显示电路在两个频段上输出功率均达到 14~15 dBm, 功率增益均大于 16 dB, 功率附加效率可达到 34%。本设计方案结构简单, 成本低且易于集成, 很好地实现了功放的多

频率化.

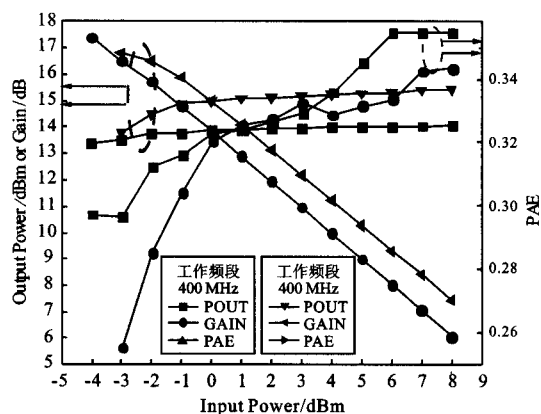


图8 Pout、Gain、PAE vs Pin的测量曲线

参考文献:

- [1] Howard D C, Saha P, Shankar S, et al. A UWB SiGe LNA for multi-band applications with self-healing based on DC extraction of device characteristics[C]// IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM). Atlanta, GA; IEEE, 2011: 111-114.
- [2] Datta S, et al. A concurrent low-area dual band 0.9/2.4 GHz LNA in 0.13 μ m RF CMOS technology for

multi-band wireless receive[C]// IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS). [s. l.]: IEEE, 2010: 280-283.

- [3] Liu X, Lin Y, Neo WC E, et al. Improved power amplifier efficiency using varactor-based tunable matching networks [C]// Proceedings BCTM. [s. l.]: IEEE, 2006.
- [4] Fukada A. Novel 900MHz/1.9GHz dual-mode power amplifier employing MEMS switches for optimum matching[J]. IEEE Microwave and Wireless components Letters, 2004, 14(3): 121-123.
- [5] Nam J, Shin J H, Kim B. A handset power amplifier with high efficiency at a low level using load-modulation technique[J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(8): 2639- 2644.

作者简介:

崔剑慧 女, (1989—), 硕士研究生. 研究方向为模拟/射频集成电路及系统设计.

张科 男, (1981—), 助理研究员. 研究方向为模拟/射频集成电路及系统设计.

田彤 男, (1968—), 博士研究生, 研究员. 研究方向为模拟/射频集成电路及系统设计.

(上接第128页)

- [6] Jins, Yeung D S. A covariance analysis model for DDoS attack Detection[C]// France IEEE International Conference on Communications, Paris; IEEE, 2004.

作者简介:

张龙 男, (1988—), 硕士研究生. 研究方向为计算机网络性能改善.

王辉 女, (1966—), 教授, 硕士生导师. 研究方向为网络性能改善与数据挖掘.