

集成温度传感器的超高频无源电子标签芯片设计

沈红伟, 李力南, 陈国华

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 提出了实现具有温度传感功能的 RFID 无源标签芯片电路设计思路, 针对 900MHz 超高频 EPC Class 0 协议, 采用多电压设计思想提出电子标签结构及参考电路, 包括射频前端接收电路、数字逻辑控制部分、温度传感及量化、存储器四部分。采用 Chartered 0.35 μm CMOS 工艺库仿真。芯片工作电流 15.4 μA (不包括存储器), 温度量化采用一个低功耗 8 位逐次逼近模数转换器实现, 输出温度量化误差在 $-10\sim 120^\circ\text{C}$ 范围内为 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

关键词: 射频识别; 整流器; 温度传感器; 逐次逼近型模数转换器

中图分类号: TN1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2008)04-0192-04

A Circuit Design for RFID Passive Tag With Temperature Sensor

SHEN Hong-wei, LI Li-nan, CHEN Guo-hua

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: A long range passive tag with temperature sensor in 0.35 μm CMOS process has been presented. And the design is followed the EPC Class 0 protocol. The design includes the RF front end circuit, digital logical circuit, temperature sensor and memory circuit. The design is simulated by using the library of Chartered 0.35 μm CMOS process. The circuits of the chip work at multi supply voltage for lower power, and the total current dissipation is 15.4 μA . A low-power 8bit successive approximation analog to digital converter (ADC) is used to quantize the temperature output. The error of the temperature quantity output is $\pm 2^\circ\text{C}$ in the range of $-10\sim 120^\circ\text{C}$.

Key words: RFID; rectifier; temperature sensor; SAR ADC

1 引言

随着无线通信技术的发展, RFID (Radio Frequency Identification) 超高频无线射频识别技术以非接触式、存储容量大、识别速度快、距离远、可多卡识别等优点而备受关注^[1]。随着 RFID 技术成熟与 RFID 标签成本的下降, 逐步呈现一些具有实际应用价值的发展趋势, 其中之一是 RFID 与温度传感器相结合。温度传感器与 RFID 芯片结合在一起, 只占很小的空间, 其附加成本微乎其微。传感器只需一个单一的温度校准点 (在芯片测试的瞬间), 既可以使制造商大大节省生产成本, 也能使终端用户得到好处。将温度传感与 RFID 结合起来可以为易腐坏食品、药品和物流中任何其他对温度敏感的物品采集温度信息, 也可以为许多医药诊断试验和程序

提供及时的数据。文献[2-4]中发表将温度传感器与 RFID 结合, 但是依旧存在需要解决的问题。文献[2]中芯片功耗太大而无法集成到无源芯片中; 文献[3]中仅设计了前端部分, 文献[4]中需要 216 个时钟周期完成温度量化, 不适合快速、多卡识别。

针对目前无源电子标签与温度传感器的特点, 采用多电压设计以及逐次逼近型量化温度输出, 整个芯片功耗 15.4 μA (不包括存储器), 温度误差在 $-10\sim 120^\circ\text{C}$ 为 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

2 系统结构与电路设计

无源电子标签依靠天线接收阅读器发射的能量。当标签处在阅读器的电磁场范围内时, 通过电磁场空间耦合, 标签从电磁场中获得能量, 再用整流的方法将射频能量转变为直流电源, 以激活芯片内部

电路. 标签的数据接收和解调部分从接收到的射频脉冲中解调出命令和数据, 送到控制模块, 控制模块根据接收到的指令完成数据存储、发送或其他操作. 温度传感器及模数转换器完成温度的传感及量化. 标签返回数据的方式是通过控制天线接口的阻抗, 由阻抗变化改变天线的反射系数, 从而对载波信号完成调制. 集成温度传感器的 RFID 电子标签, 主要由射频前端接收电路、数字逻辑控制部分、温度传感及量化、存储器四部分组成^[4].

2.1 射频前端接收电路

射频模拟前端模块实现信号能量转换, 调制解调, 时钟产生、整形等功能. 其中整流器完成交流到直流的转换, 由于标签接受到的能量随标签和阅读器之间的距离而变化, 整流器输出的直流电压有很大的变化范围. 稳压电路将整流器输出电压稳定在标签的工作电压. 时钟电路产生的时钟通过时钟计数器实时计数, 采用逐次逼近的方法控制振荡器工作电流实现时钟校准.

2.1.1 整流器

整流器的结构如图 1 虚线框内所示^[5-6]. 电路采用肖特基二极管整流器结构, 肖特基二极管导通电阻为 60Ω, 结电容约为 1fF. 整流器在终端产生一个电压为

$$V_{DD} = \left[\left(\frac{C}{C + C_s} \right) V_{p,RF} - V_{th} \left(\frac{i_{out}}{(C + C_s) \cdot f_{RF}} \right) \right] \cdot N \quad (1)$$

式中, N 为二极管的级数, $V_{p,RF}$ 为射频信号的幅度, V_{th} 为二极管正向开启电压. I_{out} 为输出电流, C 为每级连接电容, C_s 为每一级寄生电容, V_{drop} 为每级二极管压降. 输入阻抗 Z_{in} 主要取决于二极管的结电容和衬底电容, 随着二极管级数的增加, 输入阻抗 Z_{in} 逐渐减小, 其实部比虚部小的多, 并且依赖于负载, 给天线匹配增加了难度. 在天线阻抗 300Ω, 完全匹配时整流器转化效率可到 20%. 整流器能量转化效率随着级数的增加而下降^[5], 在满足芯片工作电压的前提下, 降低芯片工作电压, 尽量减少整流器级数可以增大标签识别距离. 数字逻辑部分的功耗与电源电压的平方成正比, 因此在满足时序约束的前提下, 0.35μm 工艺数字部分工作电压 (图 1 中 $V_{DD,low}$) 降低为 2V (标准工作电压 3.3V), 模拟前端模块和温度传感器工作电压为 3.3V. 不同电压模块之间信号传递中间通过电平移位模块转换电平.

2.1.2 稳压电路

电路功能是将整流器输出电压稳定在标签电路工作的电压, 电路结构如图 2 所示^[6], 通过放大器控

制 M_1 的栅极, 经负反馈, 输出一个与参考电压成比例的稳定的电压 V_{regu} .

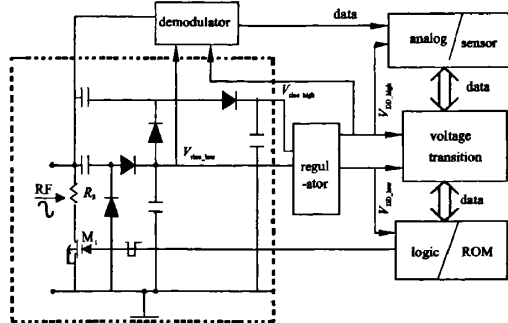


图1 电压整流器结构及电路多电压设计

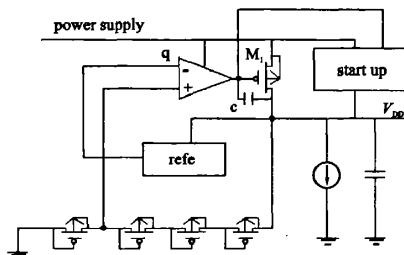


图2 稳压电路结构示意图

M_1 栅漏两端的反馈电容 C 使回路迅速稳定. 当输入电压变化较大时, V_{regu} 变化小于 -40dB, 电源高频纹波通过电容 C_1 耦合到地. 参考电压产生电路为了避免使用双极型晶体管, 采用电流源结构产生偏置电压. 输出参考电压随电源电压变化小于 -50dB.

2.1.3 解调反调制电路

EPC Class 0 协议规定阅读器发送的信号采用脉宽幅度调制, 信号周期 12.5μs, 标签解调部分采用二极管包络检波和峰值检波, 分别输出信号包络和参考电平, 作为下一级迟滞比较器的信号输入和参考输入. 反向调制电路通过控制 M_2 管的工作状态改变芯片入口的输入阻抗, 从而改变芯片与天线接口的反射系数, 达到反向调制的目的. 信号解调和反向调制电路如图 3 所示.

2.1.4 时钟产生及电流源电路

无源标签时钟电路采用松弛振荡器结构, 产生的时钟频率随温度、工艺的偏差较大, 通过时钟计数器实时计数, 采用逐次逼近的方法控制振荡器工作电流实现时钟校准. 其中基准电流源产生电流随工艺的偏差较大, 特别是电阻随工艺偏差 30%, 电流偏差也达 30%, 采用无电阻型电路结构产生基准电流^[7], 电流随工艺偏差为 10%.

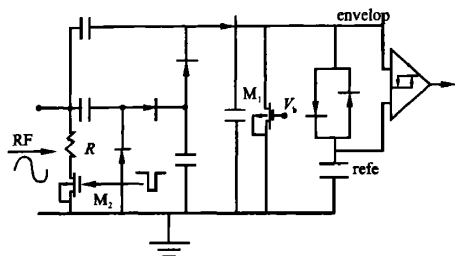


图3 信号解调和反向调制电路

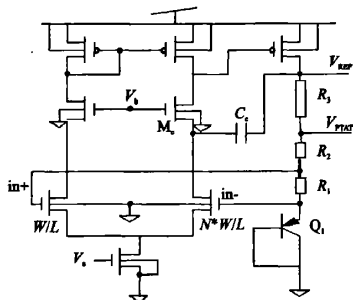
2.2 温度传感器电路

温度传感器^[8]分别产生两个不同温度特性的电压 V_{PTAT} 、 V_{REF} ，其中 V_{PTAT} 随温度线性变化， V_{REF} 不随温度变化。两者的差别如式(2)所示，通过 ADC 量化输出。

$$O(T) = \frac{V_{PTAT}}{V_{REF}} = \frac{\alpha V_{PTAT}}{\alpha V_{PTAT} + V_{BE}(T)} \quad (2)$$

图4为温度传感器电压 V_{PTAT} 和 V_{REF} 产生电路图。工作原理如下：电路左半边为差分输入、单端输出运算放大器的第一极。并且输入管 $in-$ 的宽长比是输入管 $in+$ 的 N 倍，因此此运放输入端就会产生固定的失调。同时输入对管 $in+$ 、 $in-$ 工作在亚阈值区，则运算放大器工作电流与输入电压就会是一个指数关系。并且此固定的失调电压是正温度系数。将此正温度系数的电压与二极管 PN 结的负温度系数的电压按照一定的权重叠加，输出零温度系数的电压。输出电压表达式如式(3)所示。 ξ 为亚阈值坡度因子。

$$V_{REF} = V_{be} + \frac{R_3 + R_1}{R_1} \xi V_T \ln N + \frac{R_2}{R_1} \xi V_T \ln N \quad (3)$$

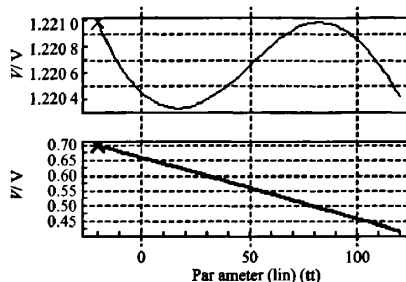
图4 温度传感器示意图，输出与温度成正比的电压 V_{PTAT} 和不随温度变化的电压 V_{REF}

由于二极管 PN 结正向电压降 V_{BE} 在室温下的温度系数不是温度线性函数，最后导致输出电压是非零系数的。补偿二次温度系数^[9]，可以得出更好温度特性的电压。其中 R_1 、 R_2 是同类型的高阻多晶

硅电阻，第二项为温度的线性函数。 R_3 是 N 井电阻。 R_2 与 R_1 的比值与温度的关系式(4)， $R_2(T_0)$ 表示电阻 R_2 在温度 T_0 时的值。

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2(T_0)}{R_1(T_0)} \cdot \frac{1 + K_{NwellR}(T - T_0)}{1 + K_{HpolyR}(T - T_0)} \quad (4)$$

图5为温度传感器输出电压 V_{PTAT} 和 V_{REF} 随温度变化曲线，在温度 $-10 \sim 120^\circ\text{C}$ 范围内，输出电压 V_{REF} 变化 0.5mV ，等效温度系数 $3.5\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。 V_{PTAT} 为 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ ，在 $-10 \sim 120^\circ\text{C}$ 内，电压变化范围 260mV 。

图5 V_{REF} (上)和 V_{PTAT} (下)随温度变化曲线

逐次逼近型模数转换器^[10]如图6所示，输入信号被抽样保持电路取样，从抽样值中减去数模转换器的初始输出值，余差被比较器量化，这个量化值再来指导控制逻辑是增加还是减少数模转换器的输出，然后这个新的数模转换器输出值再次从输入抽样值中被减去，这个过程不断的重复，直到其精度达到要求为止。ADC 的输入信号范围通过电容(如图6虚线框内所示)调整以匹配温度传感器器 V_{PTAT} 电压变化范围。由逐次逼近 ADC 的结构可以发现功耗主要消耗在比较器上。在低功耗情况下，比较器尾电流很小，所以速度很慢。比较器噪声、速度、功耗需要折衷考虑。当 ADC 完成温度量化输出后，关断 ADC 的电流源，使 ADC 处于休眠状态，不消耗功耗、不影响整个芯片工作。图7为 ADC 仿真仿真点数 1500 点(不充分，一般需要 4000 点)时差分非线性 ($-1/+2\text{LSB}$) 与积分非线性 ($\pm 2\text{LSB}$)。ADC 工作频率 10kHz ，功耗 $2.7\mu\text{W}$ 。

2.3 数字逻辑部分设计

标签数字电路由解码器，控制逻辑电路，存储器三个基本部分组成，其中，解码器部分包括复位信号解码器、时钟及数据校准信号解码器和数据信号解码器三部分；控制逻辑电路包括控制状态机模块、存储器读取控制模块及反调控制模块三部分。采用电源管理的方法降低数字部分功耗。将数字模块细化，使整个数据通信过程中，相关翻转的模块尽可能少，

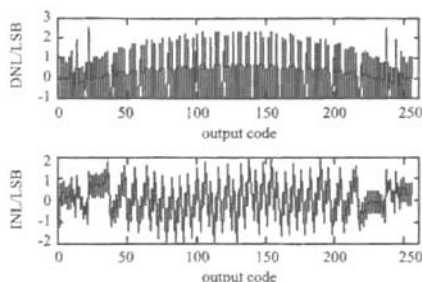
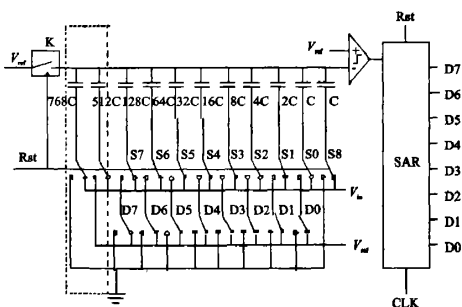


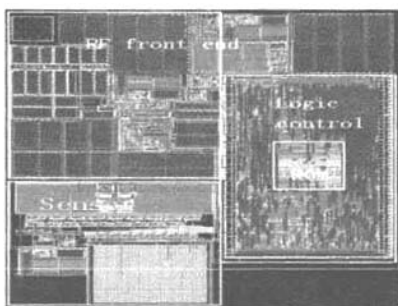
图 7 8 位逐次逼近型模数转换器的

差分非线性与积分非线性误差

以达到降低功耗的目的。电源管理模块根据状态机的变化,在不同的时间段分别切断不相关的解码器等电路信号与时钟。标签芯片工作频率比较低,电源管理是可行的。

3 电路版图

电路版图如图 8 所示,面积 $0.8\text{mm} \times 1.05\text{mm}$ 。



的空间,功耗增加很小,整个芯片消耗电流(不包含存储器) $15.4\mu\text{A}$. 芯片面积 $0.8\text{mm}\times 1.05\text{mm}$.

参考文献:

- [1] Rob Glidden, Cameron Bockorick. Design of ultra-low-cost UHF RFID tags for supply chain applications[J]. IEEE J. communications Magazine, 2004,42(8):140-151.
- [2] Kocer F, Walsh P M, Flynn M P. Wireless, remotely powered telemetry in 0.25 μ m CMOS[M]. USA: Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) symposium, 2004: 339-342.
- [3] Namjun Cho, Seong-Jun Song, Jae-Youl. A 8- μ W, 0.3-mm² RF-powered transponder with temperature sensor for wireless environment monitoring[J]. IEEE Circuit and System symposium, ISCAS, 2005(5):4763-4766.
- [4] Karn Opasjumruskit, Thaweesak Thanthipwan, Ohmmarin Sathusen. Self-powered wireless temperature sensors exploit RFID technology[J]. IEEE CS and IEEE ComSoc, 2006:54-61.
- [5] Udo Karthaus. Fully integrated passive UHF RFID transponder IC with 16.7- μ W minimum RF input power[J]. IEEE J. Solid-State circuits, 2003, 38(10):1602-1608.
- [6] Giuseppe De Via, Giuseppe Oanaccone. Design criteria for the RF section of UHF and microwave passive RFID transponders[J]. IEEE J. Transactions on microwave theory and techniques, 2005,53(9):2978-2998.
- [7] Oguey H J, Aebischer D. CMOS current reference without resistance[J]. IEEE J. Solid State Circuits, 1997,32(7):1132-1135.
- [8] Michiel A P P, Kofi A A M, Johan H H. A cmos smart temperature sensor with a 3 σ inaccuracy of 0.1 $^{\circ}$ C from 55 $^{\circ}$ C to 105 $^{\circ}$ C[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(12):2805-2815.
- [9] Ka Nang Leung, Philip K T Mok, Chi Yat Leung. A 2-V 2.3-e 5.3-ppm/PC 4th-order curvature-compensated CMOS bandgap reference[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2003,38(3):561-564.
- [10] Michael D Scott, Bernhard E Boser, Kristofer S J Pister. An ultralow-energy ADC for smart dust[J]. IEEE J Solid State Circuits, 2003,38(7):1123-1129.

作者简介:

沈红伟 男,(1981-),博士研究生.研究方向为射频电子标签设计.

李力南 男,研究员,研究方向为射频模拟电路设计.

陈国华 男,(1983-),硕士研究生.研究方向为射频电子标签数字电路设计.

4 结束语

针对 900MHz 超高频 EPC Class 0 协议,采用多电压设计思想实现了具有温度传感功能的电子标签。输出温度量化误差在 $-10 \sim 120^{\circ}\text{C}$ 范围内为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,温度传感器与 RFID 芯片结合在一起,只占很小