

A Novel RF Front End with Adaptive Carrier-Nulling in RFID Sensor Reader *

ZHAO Hong-xin^{*}, YAN Li, WANG Cheng-guo, HONG Wei
(State Key Lab. of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract : A novel RF front end to be used in RFID (Radio Frequency Identify) sensor reader was proposed. Dramatic improvement of leakage suppression has been achieved by the adoption of adaptive carrier-nulling technique, as well as high quality of demodulated signal and better dynamic range of the reader. The computer simulation results show that more than 60 dB improvement with carrier suppression could be achieved against normal architecture. Carrier suppression improvement of 42 dB and better fidelity of demodulated signal has been manifested by prototype system. Fairly suppression of background reflection was verified by field tests, which yield effective operation range up to 11 meters.

Key words : RFID; sensor reader; carrier-nulling; RF front end
EEACC : 1205; 1280; 1370

一种用于 RFID 传感阅读器的载波抵消射频前端方案 *

赵洪新^{*}, 颜力, 王成国, 洪伟

(东南大学毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

摘要 : 为了改善传统 RFID (射频识别) 传感阅读器体制的载波泄漏问题、提高射频前端动态范围和解调信号的质量, 提出了一种采用自适应载波抑制技术的新型射频收发前端电路方案。计算机仿真结果表明, 采用该方案可以获得 60dB 以上的载波抑制性能改善; 实验验证结果表明, 采用该方案获得约 42dB 的载波抑制性能及动态范围改善, 解调信号的波形失真显著降低; 现场实测结果证明, 系统能够有效抑制强背景反射干扰, 有效阅读距离最长达 11 米。

关键词 : RFID; 传感阅读器; 载波抑制; 射频前端

中图分类号 : TN925

文献标识码 : A

文章编号 : 1004-1699(2008)09-1546-05

近年来, 传感器技术和 RFID 技术相结合的趋势越来越明显, 相关领域的技术研究也日趋活跃^[1-3]。结合射频无源反射式 RFID 技术, 以及基于 MEMS 工艺的天线^[4]和耦合线圈^[5]等技术, 可以制作出体积小, 且不需要电池供电的嵌入式传感器。由于传感器数据需要通过 RFID 标签由阅读器远程读取, 而嵌入式应用环境的电磁背景反射往往比较复杂, 有效反射信号能量微弱, 因此, 阅读器前端电路的设计直接关系到整个传感器系统的有效工作距离和可靠性。

常规无源反射式 RFID 系统主要由标签和阅读器构成。标签仅靠接收或感应到的电磁能量提供电力, 同时利用调变天线或线圈负载特性的方法向阅

读者传送数据^[6-7]。这样有利于缩小标签电路的体积, 便于嵌入或植入式应用。

然而, 由于面积限制, 标签所用的天线尺寸普遍较小, 其等效雷达反射截面积 (RCS) 的变化量^[8]至多为 0.05 m², 导致阅读器接收机前端所能收集到的反射调制信号非常微弱, 而背景反射干扰功率却非常强。另一方面, 在接收电路开启的同时, 发射通道必须保持电磁能量辐射以保证标签的能量供应, 这将导致相当严重的本地载波泄漏问题, 进而推动前端电路偏离线性工作区, 产生接收信噪比的恶化、系统有效阅读距离和解码可靠性下降等问题。尤其是在单天线或单线圈系统中, 载波泄漏问题更为严重。

基金项目 : 国家自然科学基金委创新群体基金资助项目 (60621002)

收稿日期 : 2008-03-11 **修改日期 :** 2008-05-12

为解决上述问题,文献[9]提出了一种采用定向耦合器和载波抑制技术相结合的方法,可以获得约 45 dB 的载波抑制度改善。但它仅能抑制幅度和相位相对稳定的载波泄漏信号,根本无法抑制信号参量随工作环境而时时变化的背景反射干扰信号;另外,该方法在反射信号通路上存在着高达 10 ~ 20 dB 的附加插入损耗,严重降低了接收信噪比,不可避免地导致有效阅读距离的下降。

本文提出一种新方法,并在 900 MHz 频段上进行实验电路验证。它采用数字控制技术的自适应载波抵消环路,不仅能够有效地抑制载波泄漏、改善收发隔离性能和前端动态范围,还能够抑制背景反射干扰,而且在反射信号传输通路上所引入的附加插入损耗很小。

1 工作原理

射频前端方案的工作原理框图如图 1 所示。

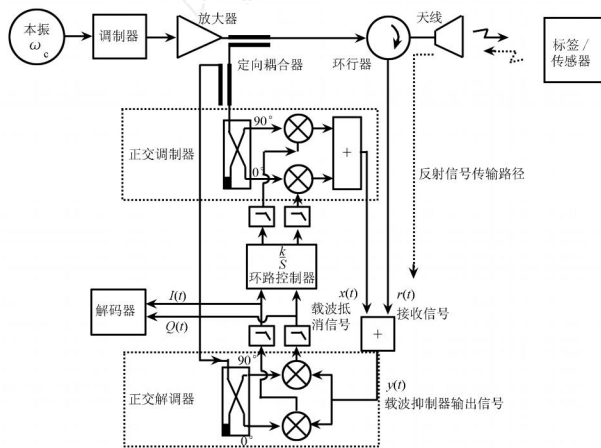


图 1 自适应载波抵消环路原理框图

阅读器射频收发前端电路由发射通道和接收通道构成。在一个阅读周期的起始阶段,阅读器先通过调制器将需要传送给标签(识别卡)的指令数据调制到载波上,再通过放大器、环行器/双工器和天线辐射出去,然后,发射通道持续辐射未经调制的载波信号,以便给无源标签和传感器提供不间断的电力供应,同时接收通道开始工作,以提取标签和传感器的反射信息。环行器/双工器的接收端口信号是各类反射信号和发射机泄漏信号的叠加,记为 $r(t)$;载波抵消环路在环路控制器的控制下,通过正交调制器输出的抵消信号记为 $x(t)$,它与接收通道中的载波泄漏信号应呈现等幅反相的关系;抵消信号和接收信号通过功率合成器之后获得载波抵消后的输出信号 $y(t)$,再通过正交解调器获得基带解调信号 $I(t)$ 和 $Q(t)$,并由解码模块作出数据判决。

和常规接收方案相比,此方案在反射信号通路

上仅增加了功率合成器这一个附加衰减环节,其插入损耗通常小于 1 dB。

显然,载波抵消环路是一个典型的矢量信号反馈网络。为分析方便,所有射频载波及调制信号都采用等效复基带信号的形式表达,绘出经过整理的简化框图如图 2 所示。图中, $R(S)$ 、 $Y(S)$ 和 $X(S)$ 分别是对应时域信号 $r(t)$ 、 $y(t)$ 和 $x(t)$ 的复频域表达形式。环路控制器采用增益因子为 k 的积分器实现。环路总衰减为 α ,总相移记为 θ 。

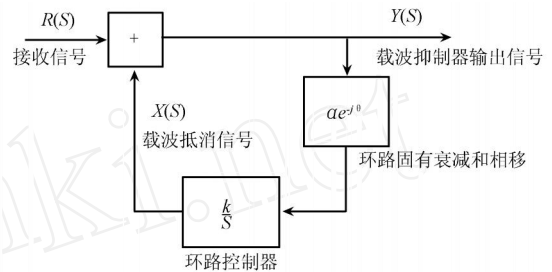


图 2 自适应载波抑制器简化框图

根据反馈网络控制理论,易知载波抑制器的传输函数如下:

$$H(S) = \frac{Y(S)}{R(S)} = \frac{S}{S + k e^{-j\theta}} \tag{1}$$

式中 $k > 0$,当环路总相移 θ 在 $(-90^\circ, +90^\circ)$ 区间之内时,传输函数的极点位于复平面的左半平面内,环路稳定收敛。在收敛状态下,传输幅度响应在频域的特性如下:

$$\left| \frac{Y(j\omega)}{R(j\omega)} \right| = \frac{\omega}{|j\omega + k e^{-j\theta}|} = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 - 2k \omega \sin(\theta) + k^2}} \tag{2}$$

当信号频率 ω 趋于 0 时, $|H(S)| = 0$;当 ω 趋于 $+\infty$ 时, $|H(S)| = 0$ 。很显然,这是一个等效高通网络。

定义 $\omega_0 = k$ 为载波抑制器的特征角频率,在不同环路总相移值 θ 的条件下,网络关于 ω_0 频率归一化的信号抑制特性曲线如图 3 所示。

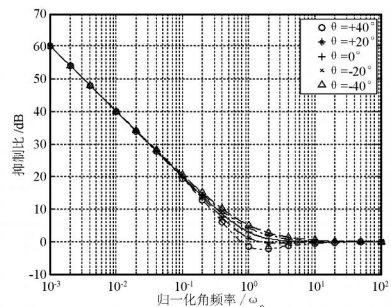


图 3 自适应载波抑制器的频域抑制特性

由图 3 可见,环路相移 θ 的值对抵消器的截止频率有一定影响,并且当输入信号角频率远低于 ω_0

时,网络的抑制性能按 20 dB/10 倍频程的规律改善,信号的变化越缓慢,抵消效果就越好,其极限受制于器件的不理想性和噪声性能。载波泄漏信号主要受器件温度漂移的影响,具有慢变化的特性,而有效信息具有快变化的特性。因此,我们通过设置控制器增益的方法可以选择合适的 w_0 值,使之处于背景反射变化率的最大值和有效信号调制速率的最小值之间,从而达到尽量抑制载波泄漏信号和慢变化的干扰电平起伏,同时又能保证有效信号通过的目的。

2 环路稳定相位补偿

为保持载波抑制环路的稳定,要求环路总相移值处于 $(-90^\circ, +90^\circ)$ 稳定区间之内。然而,值和信号路径传输相移、调制器及解调器本振相位差等诸多因素相关,这些参数在不同的实现电路和应用环境中都是不同的,而且还会随着工作时间和环境温度的变化而发生漂移,因此必须采取措施对相位飘移进行补偿,以保障环路的稳定性。本方案中,环路控制器在数字域实现,采用软件算法来提取环路相移,然后进行相位移补偿,从而实现环路相移的自适应补偿。

抵消信号的等效基带复向量记为: $x = x_i + jx_q$,它是环路控制器的输出信号,也是正交调制器的输入信号。环路误差信号记为: $y = y_i + jy_q$,它是正交解调器的输出信号,也是环路控制器的输入信号;令 $e^{-j} = z_i + jz_q$;算法采用迭代的方法工作,通过数学推导,有下式成立:

$$\begin{cases} y_i^k - y_i^{k-1} = z_i(x_i^k - x_i^{k-1}) - z_q(x_q^k - x_q^{k-1}) \\ y_q^k - y_q^{k-1} = z_i(x_q^k - x_q^{k-1}) + z_q(x_i^k - x_i^{k-1}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $k = 0, 1, \dots$, 表示迭代次数; y_i^k 和 y_q^k 表示第 k 次迭代时,环路误差向量的实部和虚部;同样的, x_i^k 和 x_q^k 表示第 k 次迭代时,抵消信号向量的实部和虚部。算法每隔 T 时间迭代一次。由于 x_i^k 、 x_q^k 、 y_i^k 和 y_q^k 在迭代过程中都是可观测量,因此,理论上只需前两次迭代即可获得 z_i 和 z_q 的估值,进而可获得 e^{-j} 的估计值。事实上,随着迭代的继续,误差向量趋于零,式(3)方程的左端将受到噪声的影响,估计值将不再可靠。

获得 e^{-j} 后,很容易对环路控制器的传递函数做出修正:

$$H(S) = H(S)e^j \quad (4)$$

若令 $x_i^{2k} = 0$ 、 $x_q^{2k+1} = 0$,则式(3)的迭代将不要求解代数方程;另外,完成式(4)的修正运算只需要一次简单的矢量旋转或共厄相乘操作,在硬件电

路实现中,可基于成熟的CORDIC(Coordinate Rotational Digital Computer Algorithm)算法完成。因此,算法整体上非常简单,运算量也不大。

由于器件的传输相移对于工作频率的变化比较敏感,因此在阅读器每次切换信道频率时,必须运行一次环路补偿算法,此后,可以间隔若干个读卡周期再重新校正一次,以消除电路参数漂移所带来的不稳定因素。

3 仿真及结果

在 Matlab 平台上,我们采用射频信号的复基带等效方法,按图 1 所示电路结构,针对整个阅读器的射频前端建立了数学模型。模型考虑到了主要器件参数的不理想性,其中包括:正交调制解调器的 I、Q 臂信号的幅度不平衡度和相位不平衡度、直流电平偏移等指标。

在发射机输出功率为 30 dBm,环行器收发隔离度为 -20 dB 的情况下,针对不同直流偏移条件下环路抑制的收敛特性进行了仿真,结果如图 4 所示。

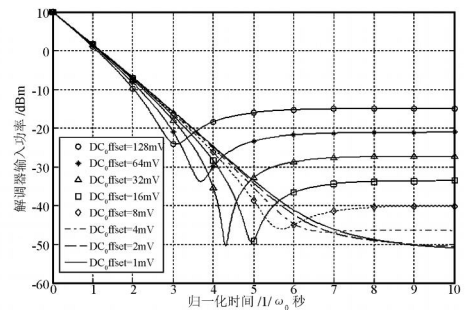


图 4 抵消器环路收敛过程和直流偏移的关系

仿真表明,解调器输入端的初始泄漏功率为 +10 dBm,随着时间的推移,环路逐步收敛,载波电平幅度逐步下降,最后到达稳定的载波抑制状态。特征频率越高,收敛速度越快,通常在 $1/\omega_0$ 时间内基本收敛到稳定状态。调制器的载波泄漏和功率合成器的平衡度指标对抑制器性能没有影响,但解调器的直流偏移指标却对环路收敛特性和载波抑制性能都有着非常显著的影响。由图 4 可见,抑制性能随解调器直流偏移电平的增加而下降,在直流偏移为 1 mV 的条件下,环路可以达到 60 dB 的载波抑制制度。

在千分之一特征频率处,调制解调器 I、Q 臂信号的幅度和相位不平衡度对抵消器性能的影响结果如图 5 所示。仿真表明,幅度不平衡不会影响环路的稳定性,但是当相位不平衡度超过 $\pm 90^\circ$ 时,补偿算法不再能够保证环路的稳定收敛。一般地,当环路的总幅度不平衡度小于 ± 6 dB 时,载波抑制比恶

化不超过 1.1 dB; 当总相位不平衡度小于 $\pm 10^\circ$ 时, 抑制比恶化不超过 0.1 dB。一般商用调制解调器的相位不平衡均小于 $\pm 3^\circ$, 幅度不平衡度均小于 ± 3 dB, 因此, 抵消器对调制解调器的指标要求并不苛刻。

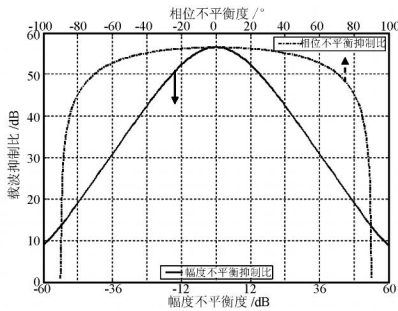


图 5 调制解调器幅度、相位平衡度指标对抑制比的影响

4 实验结果

为验证本文所提方案的有效性, 我们开发了一套阅读器原型电路, 并使用 EPC2 兼容的射频标签进行了实验验证, 实物照片如图 6 所示。

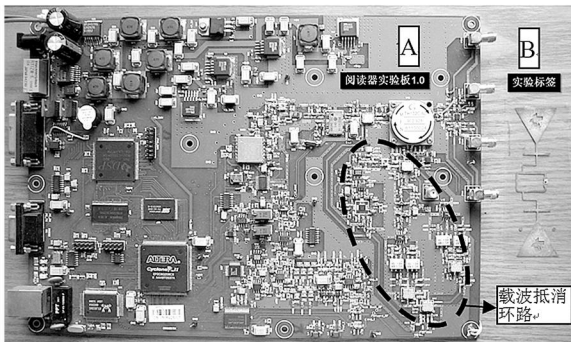


图 6 阅读器原型验证电路及实验标签
(A: 原型验证电路; B: 实验标签)

实验采用 200 mW 的阅读器辐射功率, 结果表明, 采用自适应载波抑制技术后, 获得了 42 dB 的载波抑制效果。由于实验电路部件匹配不完善、直流偏移较大等原因, 未能达到仿真系统的载波抑制水平。不过, 采用载波抑制技术后, 解调信号的波形失真获得了显著改善, 大大提高了解码的正确率。针对 inquiry 阶段的 RN16 (640 kbit/s) 数据解码的实测解调波形结果如图 7 所示。

在未采用载波抑制技术时, 极强的载波泄漏信号不仅导致接收通道前端饱和, 而且发射信号切换还产生了脉冲拖尾现象, 导致接收信号的波形失真很大, 无法正确解码; 而在载波抑制环路闭合之后, 脉冲干扰得到有效抑制, 实测解调信号波形获得明显改善, 16 比特数据也得到正确解码。图 7 中 B 所示解调信号波形的正确解码值为 0x2341。

我们利用金属反射体模拟强背景反射环境进行

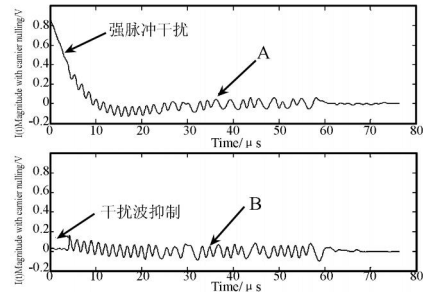


图 7 实测解调信号时域波形

(A: 未采用载波抑制技术; B: 采用载波抑制技术)

了实验测试, 结果表明: 在关闭载波抑制器而无法解码的情况下, 通常只要开启载波抑制器就能正确解码 (约有 70% 的统计概率); 而在所有开启载波抑制器无法解码的情况下, 关闭载波抑制器也无法解码 (100% 的统计概率)。这证明载波抑制电路在强背景反射环境下的作用是相当明显的, 尤其适合使用在反射背景相对复杂的嵌入式传感器网络中。在空旷的操场上, 采用 200 mW 的发射功率和 6 dBi 增益的天线, 系统最大实测阅读距离为 11 m。

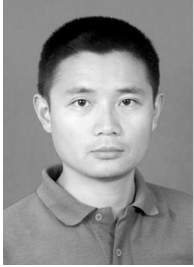
5 结论

原理分析和仿真研究结果说明, 本文提出的方案能够有效地改善 RFID 传感系统中阅读器的收发隔离问题, 同时还能抑制慢变化的背景反射。通过采用自适应环路补偿算法, 可以保障环路的稳定性。针对射频 RFID 系统的实验结果表明, 采用本方案可以获得 42 dB 的载波抑制, 降低了信号失真, 改善了传感阅读器数据解码的可靠性。

参考文献:

- [1] Cheng Hsu, Levermore D M, Carothers C. Enterprise Collaboration: On-Demand Information Exchange Using Enterprise Databases Wireless Sensor Networks and RFID Systems[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-Part A Systems and Humans, 2007, 37(4): 519-532.
- [2] Karn Opasjurnruskit, Thanhipwan T, Sathusen O. Self-Powered Wireless Temperature Sensors Exploit RFID Technology [J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2006, 40(2): 54-61.
- [3] Hong M Lu, Goldsmith C, Cauller L. MEMS-Based Inductively Coupled RFID Transponder for Implantable Wireless Sensor Applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2412-2414.
- [4] 黄闯, 陈迪, 陈翔等. 基于 MEMS 工艺的异性材料定向天线 [J]. 传感技术学报, 2008, 21(3): 533-535.
- [5] 陈石清, 李旦, 李修函. 适用于 RF MEMS 能量耦合传输的高 Q 值电感 [J]. 传感技术学报, 2008, 21(4): 604-606.
- [6] 赵洪新, 洪伟. 微型低功耗微波反射调制器的研究 [J]. 微波学报, 2001, 17(3): 69-76.

- [7] EPCglobal Inc. EPCTM Class-1 Generation-2 UHF Air interface Standard Version 1.0.9[S]. 2005.
- [8] Yen Chih-Chuan, Gutierrez A E, Veeramani D. Radar Cross-Section Analysis of Backscattering RFID Tags[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007, 6: 279-281.
- [9] Kim Wan-Kyu, Lee Moon-Que, Kim Jin-Hyun. A Passive Circulator for RFID Application with High Isolation Using a Directional Coupler [C]// Robert Weigel. Proceedings of the 36th European Microwave Conference, Manchester U.K., September 2006:196-199.



赵洪新 (1971-) 男, 工学博士, 副教授。
主要从事微波及毫米波电路、RFID 应用
技术等方面的研究, Hxzhao @em-
field.org

www.cnki.net