

一种 RFID 读写器载波泄露消除的技术

赵静好, 曹 阳, 马中华

(集美大学信息工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了消除接收回路的泄露载波, 提出采用接收机输入端泄露载波对消的方法。在读写器电路中加入衰减器和移相器电路, 由接收信号强度检测电路控制单片机来调整相应衰减量和相移量以消除在接收机输入端泄露的载波。在工作频带内, 仿真的泄露载波抑制制度达到了 91 dB, 提高了读写器接收灵敏度, 增加了读写距离。

[关键词] 环形器; 载波泄露; RFID; 相移; 载波抑制制度

[中图分类号] TN 929.5

Studying on Carrier Leakage Cancellation Technology of RFID Reader

ZHAO Jingyu, CAO Yang, MA Zhonghua

(School of Information Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to suppress the influence of the leaking carrier, a leaking carrier cancellation method using in the input of the receiver is proposed in this paper. The attenuator and the phase shifter circuits are added to the reader circuit, which can be adjusted to cancel the leaking carrier at the input port of the receiver by the received signal strength detection circuit controls the microcontroller unit (MCU). The simulated leaking carrier of the receiver can be suppressed by 91 dB in the operating frequency band. After the leaking carrier cancellation, the sensitivity of the RFID system is improved and the reading distance is increased.

Keywords: circulator; carrier leakage; radio frequency identification; phase shift; carrier suppression ratio

0 引言

超高频 (ultra-high frequency, UHF) 射频识别 (radio frequency identification, RFID) 系统是基于雷达系统的反向散射原理工作^[1], 主要由读写器、标签和后台数据处理部分组成。读写器发射询问电磁波唤醒标签工作, 由于标签反向散射回读写器的信号频率和读写器发出的连续询问的信号频率非常接近, 用滤波器不能够分离发射信号和接收的调制信号。因此 RFID 读写器采用环形器来分离发射信号和接收信号。但是一般的环形器隔离度只有 25 ~ 30 dB, 而读写器为了提高读取距离和唤醒标签工作, 发射的询问信号的功率一般都大于 1 W, 这样就会有非常强的载波询问信号泄露到接收回路。标签反向散射回读写器的调制信号功率非常低, 会被泄露的载波询问信号淹没, 导致接收机饱和失真, 造成读写器灵敏度下降, 读取距离缩短。

读写器发射机发射的射频载波分两路泄漏到接收机回路, 一路是发射机直接泄露到接收机回路

[收稿日期] 2019 - 07 - 01

[基金项目] 福建省自然科学基金项目 (2019J01718); 大学生创新创业项目 (2019xj208)

[作者简介] 赵静好 (2000—), 女, 本科生, 从事射频电路设计研究。通信作者: 马中华 (1973—), 男, 副教授, 从事射频微波电路和天线技术的研究。E-mail: mzhxm@jmu.edu.cn

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

(I 路) 的载波, 是由于环形器不理想、隔离度低造成的; 另一路是发射机输出的询问载波到了天线输入端, 是由于天线输入阻抗不匹配造成的反射, 经过环形器到达接收机回路 (II 路)。因为环形器的隔离度基本不变, 因此主要影响接收回路泄露载波变化的是 II 路的泄露载波, 它主要是由于天线端不匹配引起的。为了抑制泄露到接收回路的载波信号, 定向耦合器被用于载波泄露消除电路中^[2-3]。文献 [2] 提出利用平行微带耦合线定向耦合器进行泄露载波消除, 在 860 ~ 960 MHz 收发隔离度提高了 45 dB。但是, 它没有考虑到天线端阻抗随频率剧烈变化的情况。文献 [3] 采用分支线定向耦合器进行泄露载波消除, 虽然最大的隔离度达到了 46 dB, 但是没有考虑到工作频率和天线端阻抗的变化, 当载波频率偏离匹配后, 泄露载波抑制将急剧恶化。后来, 环形桥被用于射频识别读写器的泄露载波消除也被提出来了^[4], 为了小型化, 对环形桥进行了变形。该设计使得在整个通带泄露载波抑制制度达到 58 dB, 在中心频率处高达 71 dB。但是随着天线端口阻抗的变化, 泄露载波抑制制度会变差。近年来, Kuo 等^[5]提出了用单天线的频分双工读写器来减小载波对接收机的影响, 误差向量幅度比传统反向散射系统提高了 5.7 dB, 需要两个信号源和开关等射频器件, 造成读写器电路结构复杂。杨博等^[6]采用锁相环理论进行了测试系统的载波对消电路的研究, 可以降低 30 dB 左右的泄露载波功率, 但是对消系统非常复杂, 成本高。Guo 等^[7]提出了泄露载波抑制的片上接收器, 引入了可配置带宽的数字控制反馈, 实现了 55 ~ 73 dB 的片上泄露载波抑制制度。该设计需要采用 130 nm 互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 工艺, 也没有考虑到天线端阻抗的变化影响。

本文提出在读写器收发电路中, 增加载波耦合支路, 通过改变耦合支路中载波信号的幅度和相位, 把它和经过环形器泄露到接收电路中的泄露载波进行对消, 通过单片机控制耦合支路中的载波幅度大小和相位, 以达到对消的目的。

1 载波消除电路原理

图 1 为本文提出的载波消除电路的原理框图。

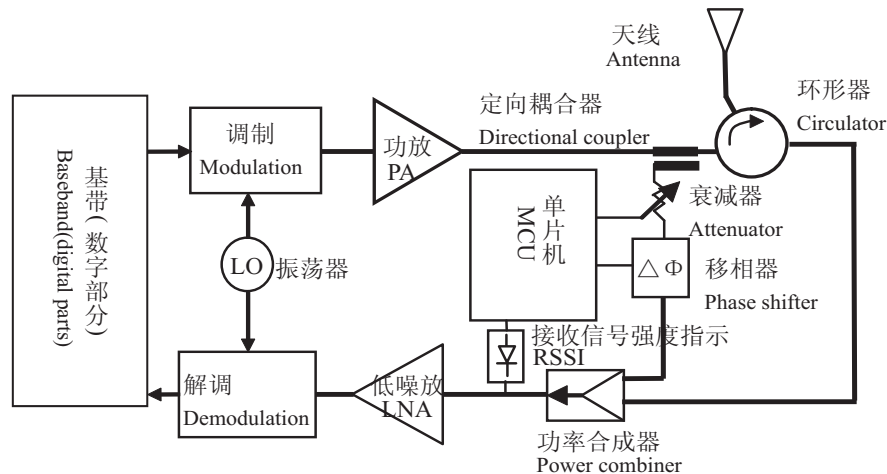


图 1 载波消除电路方案

Fig.1 The cancellation circuit scheme of leaking carrier

功放输出的连续载波询问信号经过定向耦合器, 一部分送入环形器经天线发射唤醒标签工作, 另外一部分被耦合到衰减器和移相器这一支路。单片机采集了接收回路泄露载波信号的幅度和相位信息后, 相应地调整衰减器的衰减量和移相器的相位, 使它们刚好和接收回路中的泄露载波的幅度相等, 相位相差 180°。泄露的载波和耦合的载波同时输入到功率合成器进行合成, 合成信号就使得两路载波信号刚好抵消。在功率合成器输出端无泄露载波输出, 输出信号只有从天线接收下来的标签调制信

号。这样就提高了读写器的接收灵敏度,提高了信噪比,使读取距离增大。接收信号强度电路实时监测接收回路泄露载波的幅度变化,并将这种变化反馈给单片机,单片机根据反馈相应调整衰减器和移相器的值。

在载波对消回路采用耦合器耦合泄露载波信号,输入到衰减器和移相器电路,微控制单元 (microcontroller unit, MCU) 根据对消后输出的泄露载波信号的强度输出数字控制信号,经过数模 (digital/analog, D/A) 转换去控制移相器和衰减器。泄露载波自适应对消电路的程序流程图如图 2 所示。

接收信号强度指示 (received signal strength indication, RSSI) 电路检测接收回路泄露载波信号的功率,MCU 判断是否低于规定的阈值。如果大于规定的阈值,则 MCU 发出指令分别调整载波耦合支路中的衰减器和移相器,使得泄露载波减小,RSSI 继续检测接收回路的泄露载波功率;如果小于阈值,则停止调整,进行数据解调。最终系统的泄露载波抵消程度受到设定阈值的大小和接收端信号强度检测电路检测灵敏度的限制。

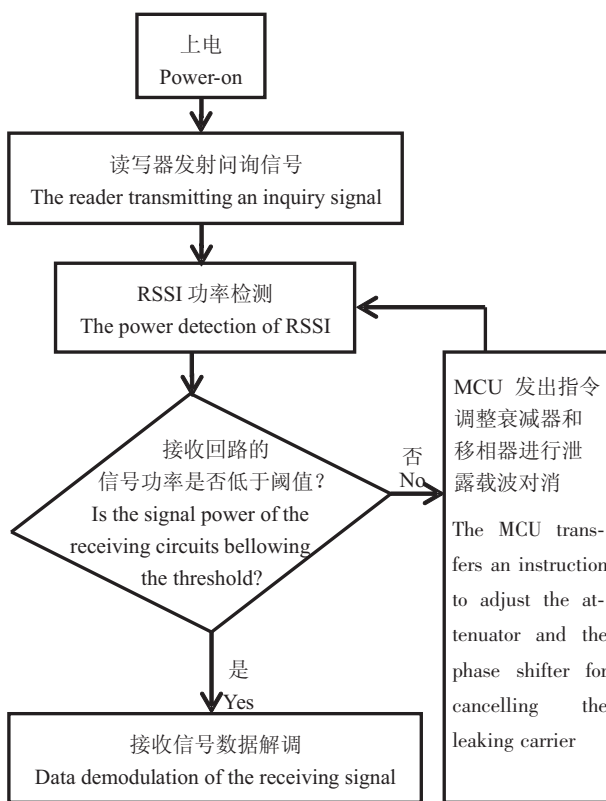


图 2 泄露载波对消程序设计流程图

Fig. 2 The flowchart of the carrier cancellation program design

2 ADS 软件的建模仿真

本文主要以射频电路先进设计系统 (advanced design system, ADS) 仿真验证为主,在 ADS 软件中可以实现实时检测泄露载波的幅度和相位,但是由于软件使用的局限性,不能够实现接收信号实时的参数提取仿真。为了实现自适应泄露载波消除,假定得到了接收回路中泄露载波的幅度和相位参数,通过 MCU 处理后直接控制载波对消回路移相器和衰减器的相位幅度来进行泄露载波抵消。

如果读写器发射电路的功放输出信号 $V_{PA} = A_1 \cos(\omega_c t)$ (A_1 为功放输出信号的载波幅度, ω_c 为功放角频率, t 为时间), 泄露到接收回路的载波信号 $V_{rec} = A_2 \cos(\omega_c t + \theta_1)$ (A_2 为泄露的载波幅度, θ_1 为载波经过环形器产生的相移), 则功放输出的载波信号通过定向耦合器耦合, 经过衰减器和移相器处理后达到功率合成器输入端的信号 $V_{can} = A_3 \cos(\omega_c t + \theta_2)$ (A_3 为载波幅度, θ_2 为经过衰减器和移相器后载波的相位)。如果 $A_2 = A_3$, 且 $\theta_1 + \theta_2 = 180^\circ$, 则在功率合成器输出端的泄露载波功率就为零。这是理想的情况, 实际上由于本系统中选用的射频器件的容差因素和实际幅度及相位的波动, 实现绝对的泄露载波的对消是非常困难的。图 3 是在 ADS 软件中建立的泄露载波对消电路模型。发射机电路的功放输出频率为 922.5 MHz、功率为 30 dBm 的连续载波。经过耦合系数为 10 dB 的定向耦合器分为两路, 一路直接传输到环形器后进入天线发射, 另一路耦合到移相器和衰减器电路。本研究设 L_R 为回波损耗 (return loss), 则反射系数 (reflection coefficient) $\Gamma = 10^{(-L_R/20)}$, 电压驻波比 (standing wave ratio, SWR) $S_0 = (1 + \Gamma)/(1 - \Gamma)$, 天线端的阻抗 (impedance) $R_0 = S_0 \times 50$ 。功率合成器的输出信号接特性阻抗为 50 Ω 的负载电路, 意味着功率合成器输出端和低噪声放大器输入端阻抗是匹配的。

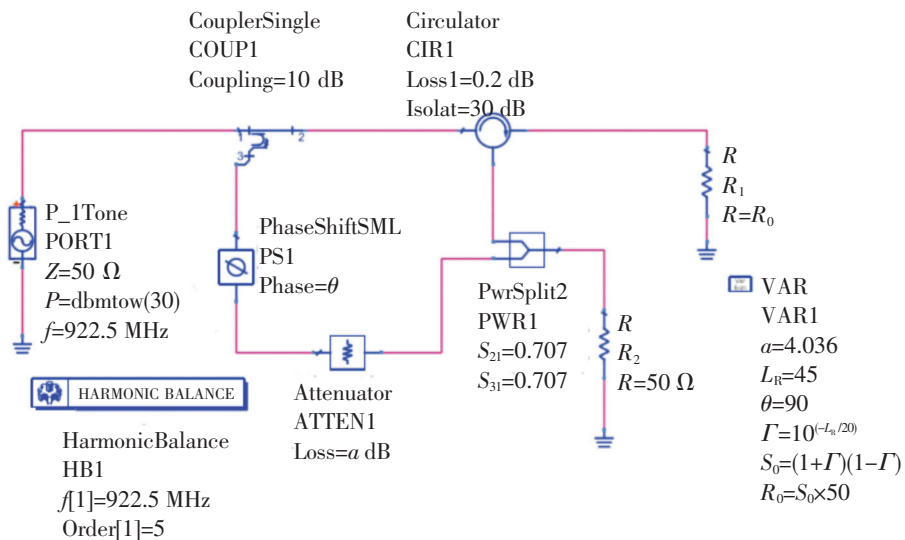


图 3 泄露载波对消电路的 ADS 模型

Fig.3 The ADS circuit model of the leaking carrier cancellation circuit

利用射频电路仿真软件 ADS 模拟图 3 的载波消除电路。当载波频率为 922.5 MHz 时,图 3 中每个功能电路输出的载波功率和相位如表 1 所示。其中定向耦合器耦合口输出的载波信号的幅度和相位分别为 19.94 dBm 和 64.83°,环形器输出到接收机输入端泄露的载波信号幅度和相位分别为 0.84 dBm 和 -25.17°,泄露的载波远远大于经过空间无线衰落信道到达接收机的调制信号。

表 1 载波频率为 922.5 MHz 时不同模块输出载波的功率和相位

Tab.1 Powers and phases of different module outputs when the carrier frequency is 922.5 MHz

射频器件 RF component	功率 Power/dBm	相位 Phase/(°)
耦合器 Coupler	19.94	64.83
环形器 Circulator	0.84	-25.17
移相器 Phase shifter	19.94	154.83
衰减器 Attenuator	0.84	154.83
功率合成器 Power combiner	-97.78	154.83

要想抵消这一部分强的泄露载波,必须调整耦合支路的载波信号幅度,使它和通过环形器泄露到接收机输入端的载波幅度相等,相位相差 180°,因此要调整耦合支路的衰减器和移相器。经过图 2 所示程序调整后,移相器输出端载波信号的幅度和相位分别为 19.94 dBm 和 154.83°。经过移相器调整后,环形器输出端和移相器输出端的两路载波信号的相位差已经达到 180°反相,但是幅度不相等。然后,调整衰减器输出载波信号的幅度,使最后从衰减器输出载波信号的幅度和相位分别为 0.84 dBm 和 154.8°。将幅度相等、相位相反的两路载波经过功率合成器合成后形成了泄露载波对消,在功率合成器输出端泄露载波的幅度降低到了 -97.78 dBm,泄露载波抑制度达到了 98.62 dB。

当发射机输出的功率为 30 dBm,载波频率为 922.5 MHz,调制信号频率为 10 kHz,功率为 -107 dBm 时,在接收机输入端仿真传统读写器接收的调制信号功率谱和泄露载波功率谱如图 4a 所示。振幅调制信号的频谱分布在载波两侧,载波泄露功率为 1.3 dBm,远远大于调制信号的功率。

当载波、调制信号的电特性参数不变,在传统环形器中加入泄露载波对消电路后,在接收机输入端仿真调制信号和泄露载波的功率谱如图 4b 所示。在接收电路中,载波功率已经被抑制到 -90.75 dBm,载波抑制度达到了 91.6 dB,而调制信号功率基本不变,不受载波对消电路的影响。

当天线端的匹配恶化,回波损耗 $L_R = 15$ 时,通过实时检测接收回路泄露载波幅度的改变情况,单片机相应的调整移相器的相移和衰减器的衰减量,由此得到抑制载波后的频谱仿真图(见图 4c)。可见,泄露载波幅度被抑制到了 -86.78 dBm,调制信号的幅度几乎不变。图 4d 为 $L_R = 30$ 时,通过

单片机实时调整移相器和衰减器后得到的接收机回路泄露载波和调制信号频谱。由图 4d 可见载波被抑制到了 -80.16 dBm, 调制信号的幅度为 -107.1 dBm, 基本保持不变。

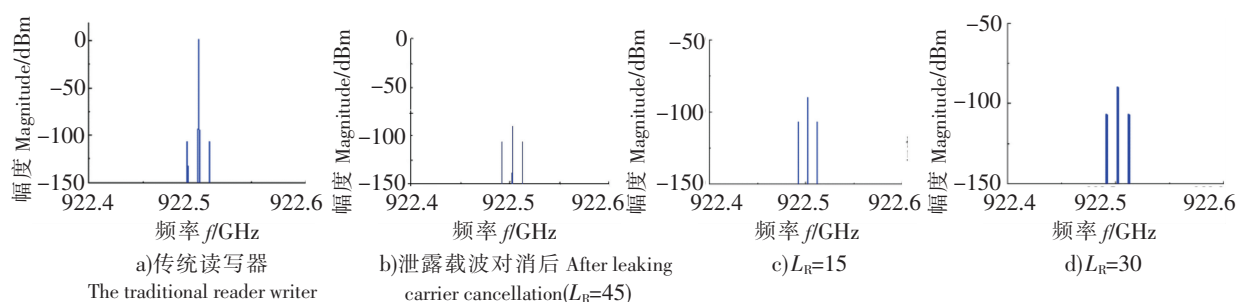


图 4 接收机输入端信号频谱图

Fig.4 The signal spectrum of receiver input

3 结论

本文在传统 RFID 读写器电路中增加了载波耦合电路后, 通过检测接收回路中泄露的载波, 实时调整耦合载波的幅度和相位, 使它们和泄露载波的幅度相等, 相位反相, 可对消泄露载波。无论载波频率改变, 还是天线输入阻抗变化, 在通带内载波抑制制度都达到 90 dB 以上。本文的方案对于提高 RFID 系统的接收灵敏度, 增大读写距离具有指导意义。

[参考文献]

- [1] JIRIGELE, HUA G, MA Y. Study on carrier cancellation in UHF RFID test system [C] //6th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies. Shanghai: IEEE, 2015: 648-651. DOI:10.1109/MAPE.2015.7510402.
- [2] KIM W K, LEE M Q, KIM J H, et al. A passive circulator for RFID application with high isolation using a directional coupler [C] //36th European Microwave Conference. Manchester: IEEE, 2007: 196-199. DOI:10.1109/EUMC.2006.281252.
- [3] PENG B, YIN Y, XI Y. A novel RX-TX front-ends for passive RFID reader with high isolation [C] //IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Hangzhou: IEEE, 2007: 332-335. DOI:10.1109/MAPE.2007.4393614.
- [4] 马中华, 杨光松, 陈朝阳, 等. 基于环形桥的超高频射频识别窄带载波泄漏消除器 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2015, 54 (4): 512-517. DOI:10.6043/j.issn.0438-0479.2015.04.013.
- [5] KUO N C, NIKNEJAD A M. Single-antenna FDD reader design and communication to a commercial UHF RFID tag [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(7): 630-632. DOI:10.1109/LMWC.2018.2840963.
- [6] 杨博, 刘琰, 胡冶. 高灵敏度 RFID 测试系统载波对消电路仿真 [J]. 计算机仿真, 2018, 35(8): 160-164. DOI:10.3969/j.issn.1006-9348.2018.08.035.
- [7] GUO Q, ZHAI Y, TAN X, et al. An on-chip configurable receiver with >55-dB Tx leakage suppression for UHF RFID reader [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(5): 357-359. DOI:10.1109/LMWC.2019.2907173.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄振坤)