

声表面波阅读器的发射链路设计与实现

黄鑫¹, 陈智军^{1,2}, 李庆亮³, 陈涛¹, 高智翔¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏南京 210016; 2. 南京大学近代声学教育部重点实验室, 江苏南京 210093;

3. 深圳信息职业技术学院机电学院, 广东深圳 518172)

摘要:在声表面波射频识别系统的实现过程中,性能稳定的阅读器发射链路不可或缺。在典型发射链路结构的基础上进行改进,设计了声表面波阅读器的发射链路。其改进结构采用零中频调制原理,通过射频开关实现了发射信号的调制和收发隔离,省略了上变频电路和环形器,在简化电路的同时减小了干扰。对本振、功放、射频开关等重要的发射链路组成部分进行了研究,完成了发射链路各功能电路的模块化设计与制作,并通过实验对设计要求进行了验证。

关键词:声表面波;阅读器;发射链路;本振;功放;射频开关

中图分类号: TP212

文献标识码: A

Design and Implementation of Transmit Chain of SAW Reader

HUANG Xin¹, CHEN Zhijun^{1,2}, LI Qingliang³, CHEN Tao¹, GAO Zhixiang¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Key Lab. of Modern Acoustics of Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518172, China)

Abstract: The transmit chain with stable performance is one of the key devices of the radio frequency identification (RFID) based on SAW. A transmit chain structure of SAW reader has been designed by improving the typical transmit chain structure. The improved structure is based on the principle of zero-IF modulation. The modulation of transmitted signal, the isolation of transmitted and received signals are realized by RF switch. This improved structure excludes the upconverter circuit and the circulator, simplifying the circuit and reducing the interference. The important components of the transmit chain such as local oscillator, power amplifier and RF switch are researched. The design and fabrication of the circuit modules are completed, and the design requirements are verified by experiments.

Key words: surface acoustic wave; reader; transmit chain; local oscillator; power amplifier; RF switch

0 引言

作为新一代目标自动识别技术和信息存储传输技术的代表,射频识别(RFID)技术具有广阔的应用前景^[1]。与传统的基于集成电路(IC)的RFID相比,基于声表面波(SAW)技术的RFID具有许多独特的优势,如SAW器件本身工作在射频频段且工作时不需电源,可在金属和液体产品上读取、可用于识别速度达300 km/h的高速运动物体、可在高电磁辐射及低至-100℃或高到+300℃的恶劣环境条件下使用等^[2]。

与基于IC技术的RFID系统相同,基于SAW技术的RFID系统同样由标签和阅读器组成,阅读器的射频性能是整个RFID系统能否正常工作的关键因素^[3]。阅读器的发射链路主要由本振、功放、射频开关、带通滤波器、环形器等组成,这些部分对其性能起重要的作用。SAW标签与IC标签的原理不同,其相应的阅读器也具有自身的特点^[4]。

本文基于上述研究背景,在典型的阅读器发射链路结构的基础上进行了改进,设计了SAW阅读器的发射链路。本文的核心内容是对本振、功放、射

收稿日期:2012-05-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51005121),航空科学基金资助项目(2010ZD52045),江苏省科技支撑计划工业项目基金资助项目(BE2011180),南京航空航天大学研究生创新基金资助项目(201101017),江苏高校优势学科建设工程基金资助项目

作者简介:黄鑫(1989-),男,湖北武汉人,硕士生,主要从事声波识别与传感的研究。

频开关等重要的 SAW 阅读器发射链路组成部分的研究,在此基础上完成了发射链路各功能电路的模块化设计与制作,并通过实验对设计要求进行了验证。

1 SAW 射频识别原理

图 1 为基于 SAW 技术的射频识别系统。其工作原理:阅读器发射一个射频查询脉冲,标签天线接收脉冲进入叉指换能器(IDT),通过逆压电效应将电脉冲转换为 SAW 在压电基片表面传播;SAW 在沿基片传播的过程中碰到每个反射栅都会发生反射和透射,当反射回波到达 IDT 时,再通过正压电效应将 SAW 转换为电磁波,经天线传播回到阅读器;由于反射栅排列的不同,阅读器得到的回波脉冲串也不同,因此可通过反射栅编码来阅读标签信息^[5]。

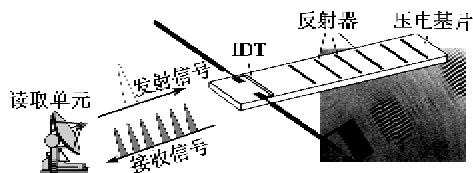


图 1 基于 SAW 标签的射频识别系统

图 2 为 SAW 阅读器的工作时序。阅读器在 t_0 发射 ΔT_0 宽度的射频查询脉冲,经过标签反射,得到一系列脉冲宽度有所展宽为 ΔT_1 的回波脉冲 ($\Delta T_1 > \Delta T_0$)。由于 SAW 传播速度比电磁波小 5 个数量级,发射脉冲和回波脉冲之间有很长的时间间隔。发射脉冲的能量经过这个间隔后在空间耗尽,因此利于阅读器对回波脉冲的采集^[6]。可通过压电基片在固定位置上反射栅的有无来改变固定时间上回波脉冲的有无,分别代表编码 1 和 0,从而实现编码识别。在图 2 中,编码为 110110, Δt 为相邻回波脉冲的时间间隔, t 为回波脉冲串的持续时间, t_d 为回波脉冲串与射频查询脉冲间的时延, T 为一个完整的识别周期。

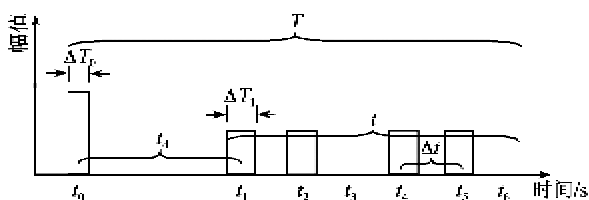


图 2 SAW 阅读器工作时序图

2 发射链路总体设计

图 3 为典型的阅读器发射链路结构。以阅读器

载波频率为 433 MHz 为例,本振(LO)产生低于 433 MHz(如 363 MHz)的本振信号,中频信号(如 70 MHz)经过射频开关后与本振信号进行上混频得到调制信号,经过带通滤波、功率放大和环形器后,由天线发射出去。其中,射频开关起到控制发射信号脉冲宽度的作用,环形器起到隔离发射信号和接收信号的作用。

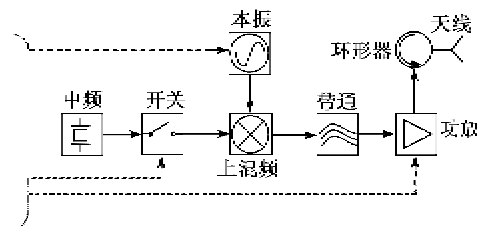


图 3 典型的阅读器发射链路结构框图

上述发射链路的结构较复杂。其中频源与本振对电路都存在很大的干扰,两者混频后产生了两种新的频率,很可能影响到接收解调电路,给整个阅读器电路及 PCB 的设计带来一定难度。与此同时,发射链路对混频器、射频开关和带通滤波器的参数性能要求很高,且环节过多对调试也不利。

结合 SAW 射频识别系统的自身特点,改进后的 SAW 阅读器发射链路结构如图 4 所示。该结构使用零中频调制原理,用开关 1 和开关 2 的组合完成 OOK 调制。载波信号由本振直接产生;阅读器工作在接收状态时开关 1 断开,因此本振不会对接收回路产生干扰;开关 2 为单刀双掷开关,代替环形器完成收发隔离的任务(开关 1 只需比开关 2 导通时间稍长即可)。功放模块利用功放芯片本身的禁带宽度和针对载波频率的匹配电路,在实现功率放大的同时,完成带通滤波功能。

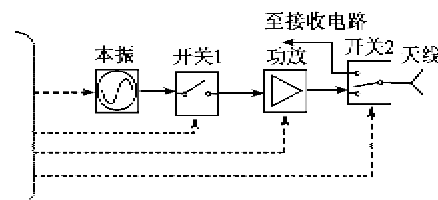


图 4 改进的阅读器发射链路结构框图

本文在已设计制作并测试完成的 SAW 标签^[7]基础上展开的后续阅读器研究。SAW 标签的压电基片材料为 128°YZ-LiNbO₃;SAW 在压电基片上的传播速度 $v=3\,837.56\text{ m/s}$;标签的 IDT 带宽 $B=5\text{ MHz}$;标签上具有 6 个可能放置反射栅的位置,相邻反射栅的间距 $\Delta L=767.5\text{ }\mu\text{m}$;第一条反射栅到

IDT 的距离 $L=2\ 878\ \mu\text{m}$ 。结合图 2 所示的 SAW 时序图有:

$$\Delta T_0 = 1/B = 200(\text{ns}) \quad (1)$$

$$\Delta T_1 \approx 1.5\Delta T_0 = 300(\text{ns}) \quad (2)$$

$$\Delta t = 2\Delta L/v = 0.4(\mu\text{s}) \quad (3)$$

$$t = 5\Delta t + \Delta T_1 = 2.3(\mu\text{s}) \quad (4)$$

$$t_d = 2L/v = 1.5(\mu\text{s}) \quad (5)$$

$$T = t + t_d + \Delta T_0/2 - \Delta T_1/2 = 3.75(\mu\text{s}) \quad (6)$$

在设计阅读器时,为减少干扰和降低控制的难度, T 越大越好。实际识别周期 $T'=10\ \mu\text{s}$ 。基于上述分析,SAW 阅读器的主要技术指标为:载波频率 433 MHz;查询脉冲宽度 200 ns;查询脉冲频率 100 kHz;发射功率 30 dBm。对于发射链路而言,其具体设计要求本振产生 433 MHz 的载波信号,经过功放后功率可达到 30 dBm,再经过射频开关调制后可得到脉宽为 200 ns,周期为 $10\ \mu\text{s}$ 的调制信号。

3 发射链路模块化设计与实现

3.1 本振

在阅读器中,为确保通信的稳定可靠,对载波频率准确性和稳定度的要求很高,一般的振荡器已不符合要求。晶体振荡器虽然准确性和稳定度高,但频率太小,同样难以满足要求。锁相环(PLL)频率合成器以其高准确性和稳定度、宽输出范围得到了广泛应用。

锁相环是一个相位跟踪系统,基本结构如图 5 所示。其包括 3 个基本部件,鉴频鉴相器(PFD)、环路滤波器(LF)和压控振荡器(VCO)。其工作原理:给锁相环送入外部参考信号 $u_r(t)$,一般由晶体振荡器产生一个基准频率;PFD 把输出信号 $u_0(t)$ 经过 N 分频得到的信号 $u_n(t)$ 和参考信号 $u_r(t)$ 进行相位和频率比较,产生误差电压 $u_d(t)$; $u_d(t)$ 经过环路滤波器,滤除高频成分和噪声,保证环路性能,提高系统稳定性,得到控制电压 $u_c(t)$; $u_c(t)$ 使压控振荡器频率向参考频率逼近。通过这样一个闭环系统,达到 $u_0(t)$ 与 $u_r(t)$ 一致。

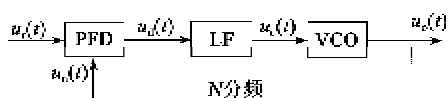


图 5 锁相环基本结构

本振芯片选用 ADI 公司的 ADF4350,该芯片是结合外部环路滤波器和外部基准频率使用,可实

现小数 N 分频或整数 N 倍频的锁相环频率合成器。输出为 137.5~4 400 MHz,具有低相位噪声的 VCO(VCO 的工作频率为 2 200~4 400 MHz),可编程分频输出,可编程功率控制,三线式串行接口,电源电压为 3.0~3.6 V。

由于输出信号是 433 MHz 的高频电信号,需要进行阻抗匹配。阻抗匹配包括电路阻抗匹配和 PCB 板走线阻抗匹配。对于电路阻抗匹配,输出信号经过如图 6 所示的阻抗匹配电路连接到 SMA 射频头上。

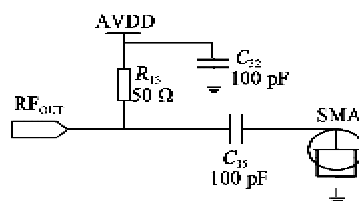


图 6 输出电路阻抗匹配

PCB 板走线阻抗匹配需要计算 PCB 板的厚度和输出走线的宽度,通过软件 SIG9000 设计传输线参数。PCB 板传输线剖面图如图 7 所示,底材材料为 FR4,底材和线路上涂层均为阻焊涂层绿油。

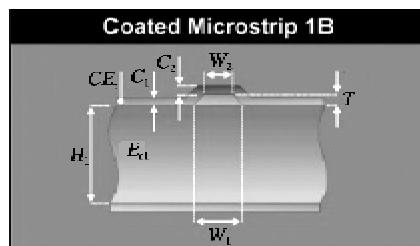


图 7 PCB 板传输线剖面图

图 7 中, H_1 为底材高度, E_{c1} 为底材电介质, T_1 为线路厚度, C_1 为底材上涂层厚度, C_2 为线路上涂层厚度, CE_r 为涂层电介质。上述参数在设计制作 PCB 板时均可以确定,由此可计算出下层电路宽度 W_1 和上层电路宽度 W_2 ,理论上电路为梯形,但是实际制作中由于工艺原因,一般设置为矩形,即 $W_1=W_2$ 。其具体值如表 1 所示,所有模块中涉及到 433 MHz 信号的走线宽度都采用表中数值。本振模块 PCB 板如图 8 所示。

表 1 传输线参数

H_1/mm	E_{c1}	T_1/mm	C_1/mm
0.6	4.2	0.035 0	0.025 4
C_2/mm	CE_r	W_1/mm	W_2/mm
0.025 4	4.2	1.041 4	1.041 4

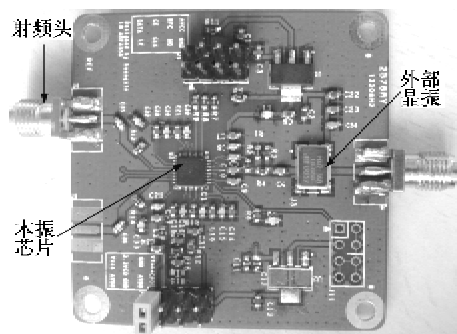
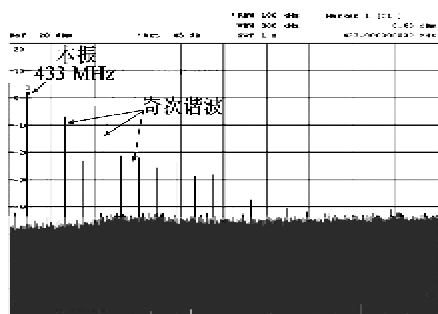
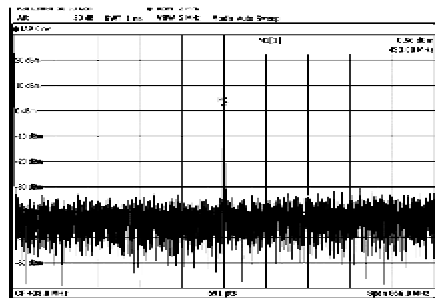


图8 本振芯片 PCB板

图9为使用频谱仪观察本振芯片输出。本振输出频谱的扫描范围为 $0 \sim 26.5$ GHz。由图9(a)可知,本振信号的高次谐波持续到约13 GHz,主要噪声为3次、5次、7次等奇次谐波,其原因是本振为VCO分频输出。改变频率扫描范围,以433 MHz为中心,带宽为3 MHz,图9(b)中每格带宽为300 kHz。由图9(b)可知,在433 MHz中心频率附近的噪声很小,中心频率输出功率为0.96 dBm。



(a) 本振输出频谱



(b) 本振输出功率

图9 本振输出

3.2 功放模块

本振芯片在433 MHz中心频率的输出功率只有0.96 dBm,其主要噪声为3次、5次、7次谐波。为实现阅读器30 dBm的发射功率,信号需经放大。功放芯片选择PA2460,其工作电压为2.7~6.0 V,输出功率可达30 dBm,且可通过窄带匹配电路来滤除高次谐波。PA2460系统框图如图10所示。

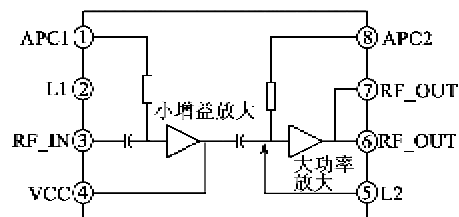


图10 PA2460系统框图

PA2460包括两级放大:Driver stage和Power stage。Driver stage为小增益放大,放大RF_IN信号用于驱动后面的大功率放大Power stage,Power stage将信号放大到需求功率。PA2460包括8个引脚,其中RF_IN和RF_OUT为输入输出引脚,APC1和APC2为两个模拟电压控制脚,可调节输出频率。功放的PCB板如图11所示。

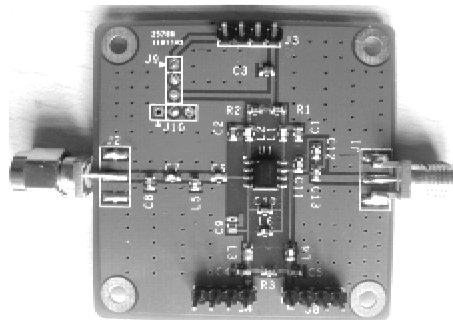
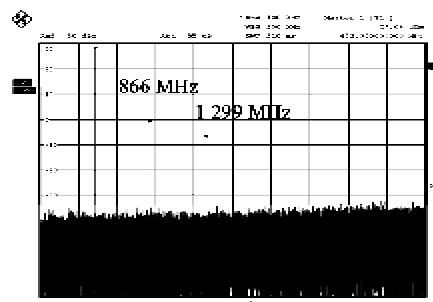
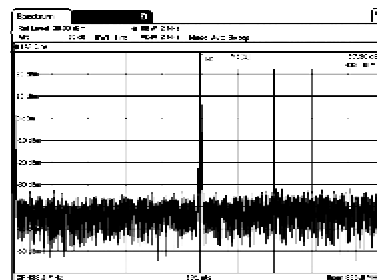


图11 功放芯片 PCB板

图12为本振信号经功放后的输出。图12(a)与9(a)相比可知,经过功放匹配滤波后,奇次谐波都



(a) 功放输出频谱



(b) 功放输出功率

图12 功放输出

得到了很好的抑制,这主要归功于功放芯片的自身禁带宽度和输入、输出阻容网络及严格按照数据手册上的 PCB 走线。功放输出功率如图 12(b)所示,433 MHz 中心频率附近噪声很小,中心频率的输出功率达到 27.30 dBm,基本达到功放芯片标称 30 dBm 的发射功率。

3.3 射频开关

阅读器需要发射 200 ns 宽的查询脉冲,可选择高速射频开关来截取本振信号以获得脉冲信号,这也是二进制幅移键控调制(ASK)的过程。射频开关选择 AS177 芯片,其控制电压有 0,3 V 和 5 V 三个值,隔离度为 50 dB,上升沿为 50 ns。射频开关结构如图 13 所示。其中 J_1 为天线信号口, J_2 为接收信号口, J_3 为发射信号口。通过控制 V_1 和 V_2 的电压值可控制 3 个信号口的通断。射频开关真值表如表 2 所示,其中 V_{HIGH} 为 3~5 V。

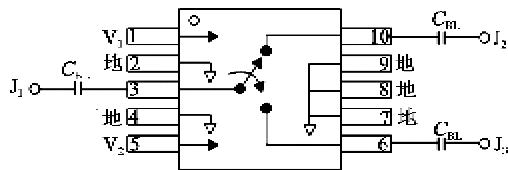


图 13 射频开关结构

表 2 射频开关真值表

V_1	V_2	J_1 - J_2	J_1 - J_3
0	V_{HIGH}	隔离	插入损耗
V_{HIGH}	0	插入损耗	隔离

射频开关 PCB 板如图 14 所示。经过射频开关截取后,输出信号的频谱如图 15 所示。由于方波的频谱是奇次谐波的叠加,所以在调制后产生奇次谐波的能量比偶次谐波的能量大。

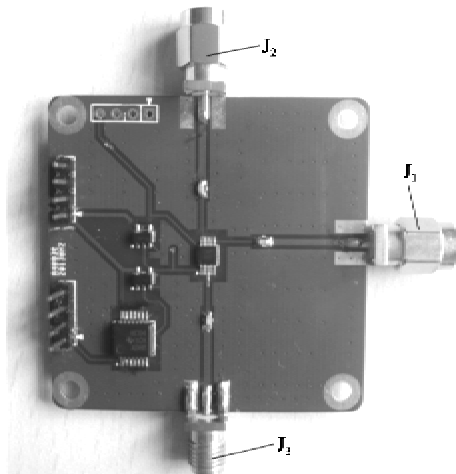


图 14 射频开关 PCB 板

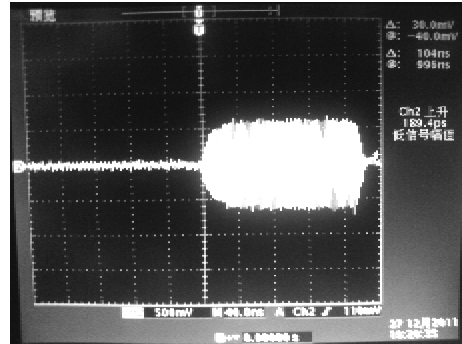
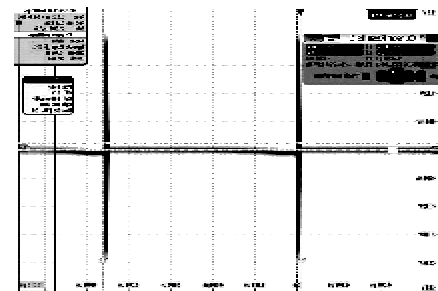
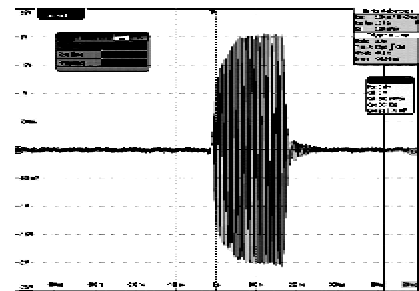


图 15 射频开关输出信号的频谱

经过射频开关调制后的发射信号周期如图 16(a)所示。2 个查询脉冲的时间间隔为 9.46 μs 。每个查询脉冲的时域信号如图 16(b)所示。在调制信号中可观察到 433 MHz 的载波信号,其脉冲宽度约为 190 ns,基本满足发射链路的总体设计要求。



(a) 发射信号周期



(b) 发射信号波形

图 16 调制后的发射信号

4 结束语

本文以典型的阅读器发射链路为基础,设计了声表面波阅读器的发射链路。其结构采用零中频调制原理,通过射频开关实现了发射信号的调制和收发隔离,省略了上变频电路和环形器,在简化电路的同时减小了干扰。

基于上述设计思路,本文完成了发射链路各功能电路的模块化设计与制作,并通过实验对设计要求进行了验证。发射链路由本振芯片 ADF4350、功

(下转第 173 页)