



本章从超高频 RFID 阅读器的基本构成和分类讲起,并针对阅读器的核心模块、芯片展开技术详解和对比,最后介绍与阅读器配套的天线技术。本章中会介绍许多行业最新的技术和创新产品,旨在与大家一同分享行业发展的新方向。相信无论是初学者还是经验丰富的从业人员都能有所收获。

## 5.1 超高频 RFID 阅读器基础

### 5.1.1 超高频 RFID 阅读器的功能和架构

#### 1. 超高频 RFID 阅读器功能

阅读器又名读写器,是超高频 RFID 系统中的重要组成部分。虽然名字叫阅读器,但它的功能不只是简单地读取标签信息那么简单,阅读器包含有许多辅助功能,如主机通信、IO 控制等。如图 5-1 所示为一个超高频 RFID 系统组成。阅读器通过阅读器天线辐射的电磁波给标签供电,同时发送同步时钟及 Gen2 的空中接口命令,并接收标签的返回数据。阅读器与标签之间的通信方式为半双工,即阅读器向标签发送数据时无法接收标签返回阅读器的数据,阅读器的发射和接收是时分的。但是由于标签为无源器件且无法储能,需要阅读器实时供电,当标签向阅读器发送数据的时候,阅读器必须发送载波给标签提供能量,这就是超高频 RFID 系统所特有的半双工通信方式。这种特殊半双工通信方式带来不少阅读器的技术难题,如自身干扰问题、接收链路(RX)的线性度(Linearity)问题等。

虽然阅读器在与标签的通信过程中一直是主机模式,标签为从机模式,但其实阅读器一直是配合标签工作的。当标签功能升级后,阅读器需要配套具备该功能的操作命令实现新应用。当标签的灵敏度提升后,阅读器的接收灵敏度需要加倍提升才能实现系统的稳定通

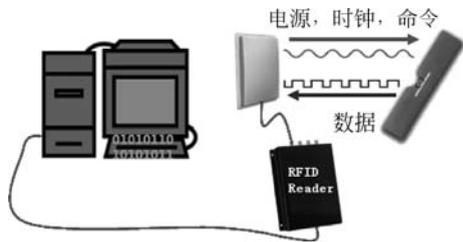


图 5-1 RFID 系统组成图



视频讲解

信,如标签灵敏度提升了 3dB,在标签的反向散射能力(反射系数)不变时,阅读器需要相应地增加 6dB 的灵敏度才能保证正向与反向链路预算相等。当然还有许多阅读器问题等着我们去解决,如在许多应用中需要一台阅读器盘点几千张标签,此时系统对阅读器的灵敏度、抗干扰、多标签算法等提出了很高要求,阅读器也在针对不同的应用场景不断改善和进步。

在图 5-1 中,阅读器的另外一端与计算机连接,可以理解为与数据终端或处理器终端连接。只有将阅读器与系统连接才能实现控制操作命令与数据的传输,从而获得标签数据信息,组成物联网的数据采集节点。阅读器不仅是标签的采集节点,同时可以当作传感器的采集节点或传感器的控制节点。随着技术的进步和行业的发展,阅读器的功能会越来越强大,在物联网中的地位也会越来越重要。

## 2. 超高频 RFID 阅读器架构

一个标准的阅读器系统包括阅读器的硬件本身、阅读器天线和其他外围设备。其他外围设备包括电源部分、主机通信部分等。许多阅读器内部都有操作系统可以独自执行任务,不过最终还是要与数据库进行数据通信。

如图 5-2 所示为阅读器的硬件架构图,图中阅读器内部分为两大部分:面向计算机终端和面向射频标签。在面向射频部分主要是收发电路,面向计算机部分为逻辑(Logic)、电源(Power)、输入输出(I/O Interface)、主机接口(Host Interface)。其外围设备中供电设备常有两种形式:一种是 AC 适配器转换为 DC 给阅读器供电,另一种为以太网供电 POE (Power Over Ethernet)。同时阅读器可以通过外围设备以太网(Ethernet)或串口(RS-232)与主机或服务器通信,也可以通过 I/O 与外围的传感器和指示灯等连接。

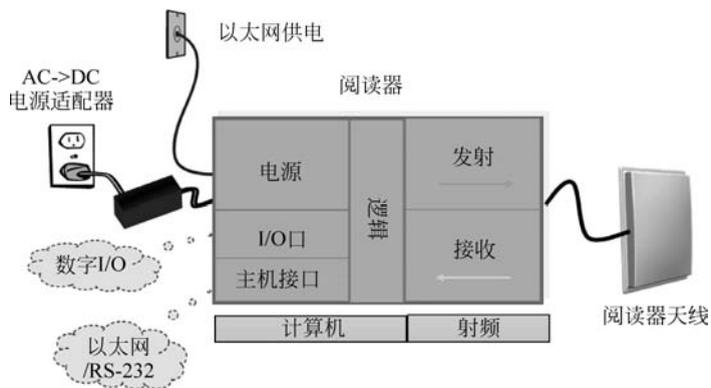


图 5-2 阅读器硬件架构图

在服务层阅读器的架构如图 5-3 所示,图中与超高频 RFID 相关且最重要的是阅读器固件(Reader Firmware)和射频硬件(RF Hardware),这两部分合在一起叫作阅读器核心模块,简称阅读器模块,5.1.2 节会对模块做深入讲解。在项目中最常见的是通过人机界面和应用程序(Humans/Applications)控制阅读器工作。在其底层的阅读器固件之上为阅读器

的主机协议(Reader-Host Protocol),在项目和软件开发中经常谈到的通信协议就是指这个主机协议。一般情况下,每一家厂商都有自己特有的主机协议,且互不兼容,所以在比较大的项目中选择中间件或低级阅读器协议(Low Level Reader Protocol,LLRP)。LLRP 是由EPC Global 创始的基于超高频 RFID 的统一阅读器协议,5.1.4 节有关于 LLRP 的协议详解。阅读器注册服务(Reader Registration Services)为阅读器的心跳包服务,阅读器每过一个时间段,则向阅读器注册服务器发送一个 UDP 心跳报文(Reader Heartbeat),这样即使是空闲情况,服务器端也知道阅读器是否正常工作。动态主机配置协议(Dynamic Host Configuration Protocol,DHCP)是一个局域网的网络协议,使用 UDP 协议工作,主要有两个用途:给内部网络或网络服务供应商自动分配 IP 地址,是用户或者内部网络管理员对所有计算机进行中央管理的手段。时间服务主要是与系统时间同步,保证数据的时间戳正确,以及在准确的时间启动或停止响应的操作和 I/O 控制。

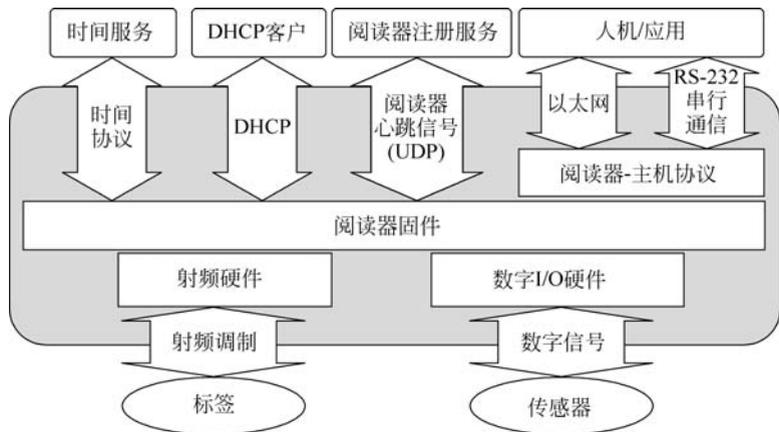


图 5-3 阅读器服务层架构图

上述所有的服务层架构为最全面的阅读器的架构,最简单的阅读器只要具有射频硬件、阅读器固件、主机协议和 RS-232 即可。评价一个阅读器是否全面主要看是否支持时间服务、DHCP、心跳信号这几个功能(其他功能都为标配)。如果是全球型的大项目还必须支持 LLRP 功能。

## 5.1.2 阅读器的分类

超高频 RFID 阅读器的核心部件是阅读器模块,它是整个阅读器的心脏,负责与标签通信的所有功能。阅读器根据功能和应用不同有多种表现形式,分为固定式阅读器、手持式阅读器(手持机)、一体式阅读器(一体机),这 3 类阅读器的共同点是都具有阅读器模块(简称模块)。

### 1. 阅读器核心模块

在 5.1.1 节中介绍了阅读器固件(Reader Firmware)和射频硬件(RF Hardware)这两

部分合在一起叫作阅读器核心模块,又叫作阅读器模块或模块。阅读器模块是构成阅读器的关键部件,阅读器功能和性能主要通过模块体现,而模块最关键的部分是射频硬件性能。

#### 1) 射频收发芯片选型

目前超高频 RFID 模块主要有 3 种:采用专用超高频 RFID 阅读器芯片、采用集成无线收发芯片、采用分立元件集成。

(1) 采用专用超高频 RFID 阅读器芯片。现在用于超高频 RFID 模块的专用芯片有 Impinj 公司的 R1000/R500/R2000 系列、奥地利微电子公司的 AS3990/AS3991/AS3992/AS3993 系列(已被 ST 公司收购)、Phychips 公司的 PR9000/PR9200 系列。其中 Impinj 的 R1000 芯片是最早出现的集成专用超高频 RFID 阅读器芯片,是由 Intel 公司开发的,后卖给了 Impinj 公司,具有良好的性能,是早期阅读器模块的首选方案。Impinj 的 R2000 芯片在 R1000 的产品上做了较大提升,增加了载波抵消功能,现阶段该芯片是市场上性能最好的专用阅读器芯片,中高端阅读器模块 95% 以上都采用该方案。采用 Impinj 系列专用芯片开发模块时,需要配套 MCU 工作,这个 MCU 工作为对专用芯片的寄存器进行操作,从而实现协议和射频收发的控制,一般高端采用 ARM7 及以上规格的 MCU。Phychips 的 PR9200 芯片是一款小型化内置 MCU 的高集成度的阅读器芯片,具有低成本、低功耗、小尺寸的优点,在中低端的阅读器中占有较大市场份额。国内的一些阅读器芯片开发公司也开发了自主知识产权的阅读器芯片,如上海智坤半导体推出对标 Impinj R2000 的带有载波自抵消功能的 IBAT-2000,无锡旗连电子开发了对标 Phychips PR9000/PR9200 的系列芯片。采用专用阅读器芯片的优点为:系统内嵌 ISO/IEC18000-6 协议、外围电路简单、易于调试和开发周期短。其缺点为:资料透明度低、扩展开发困难、成本相对集成无线收发芯片方案较高、核心芯片无法替换导致供应链风险较大。

(2) 采用集成无线收发芯片。由于超高频 RFID 的工作频率为 840~960MHz,与手机和许多小无线设备的工作频率重复,可以在市场上找到廉价的集成无线收发芯片。目前在超高频 RFID 模块中得到广泛应用的有 ADI 公司推出的 ADF7020、TI 公司的 CC100CC11、Semtech 公司的 SX1230 等。由于上述芯片在市场上有很大的销售数量,其单价成本相对于专用超高频阅读器芯片低很多。这是由于专用阅读器芯片只能用于超高频 RFID 阅读器,其芯片销量很少,一般一年只有几十万颗(或更少),而芯片开发的前期成本很高,就需要通过这每年的几十万颗专用芯片分担,因此单价很高。而这些集无线收发芯片年销售量在千万颗左右,其开发成本早已经被分担。一般情况下,集成无线收发芯片的成本仅为专用阅读器芯片的不到 10%。采用集成无线收发芯片的模块外围电路不太复杂,但需要工程师独立开发协议栈部分,一般因为成本因素会选择一个单片机来实现 Gen2 协议和集成无线收发芯片的控制。这样会给工程师提供很大的开发空间,开发具有自己知识产权的产品。采用集成无线收发芯片的模块成本很低,性能很差,常用于廉价的一体机和桌面机。

(3) 采用分立元件集成。即通过使用调制解调器、PA、Balun、ADC、DAC 等射频器件集成实现。由于采用分立元件,因此每一个部件都可以选择性能最好的,分立元件的性能优于集成芯片。由于采用分立元件集成的方案是针对高端应用,其协议和数据处理的要求很

高,一般采用 FPGA 或 DSP 实现协议处理,采用 ARM 9 及以上规格的 MCU 作为系统主控。如此开发的阅读器模块具有高性能的特点,其缺点是开发难度大周期长,尺寸大,产品成本也非常高。现阶段只有 Impinj 和 Alien Technology 等公司的高端阅读器会采用分元件的方案,一般分立元件集成实现的阅读器模块不在市场上销售,都会以整机的形式出现。

### 2) 阅读器模块的选择依据

阅读器模块选择的重要依据包括:符合产品标准要求、成本、体积、功耗、输出功率、抗干扰能力、接收灵敏度、外围元件的多少、数据传输速率和开发难易等等。下面重点介绍几点。

- 符合协议要求:这是设计中的重点,如果这一点不符合,系统则无法工作。
- 输出功率:发射功率越大,信号不仅覆盖面积广而且传输距离远。因此在同等条件下,应选择输出功率高的产品(符合当地无线电规范)。
- 抗干扰能力:同等发射功率和接收灵敏度的情况下,系统的抗干扰能力越强则实际的通信距离就会越远。
- 接收灵敏度:接收灵敏度反映接收机捕获微弱信号的能力。超高频 RFID 阅读器模块的接收灵敏度越高,识别误码率和识别距离都会有很大改善。
- 系统体积大小:可以有效减小 PCB 的空间,降低成本,利于超高频 RFID 阅读器的小型化开发。
- 识别速率:与处理器和算法相关,尤其是在仓库、智能零售等应用中,需要快速识别几百个标签,对处理和计算要求很高。采用集成无线收发芯片方案的模块多标签算法较差,很难支持超过 50 个标签的同时读取。
- 成本考虑:实际上中国的超高频 RFID 项目中,成本是非常关键的因素之一,许多时候选型是由成本决定的。

### 3) 阅读器模块案例分析

如图 5-4 所示为 ThingMagic 公司的 Mercury6e (M6e)嵌入式超高频 RFID 阅读器模块,其内部采用了 Impinj 的 R2000 芯片,搭配 ARM7 作为处理器。该器件按照全尺寸阅读器的性能标准设计,其体积小、能效高,足以满足移动应用要求。M6e 支持 4 端口,并能提供最大 +31.5dBm 输出功率。M6e 提供串行接口和 USB 接口,以支持板到板和板到主机连接。



图 5-4 Mercury6e 嵌入式超高频 RFID 阅读器模块

主机连接。

M6e 模块的特性有:

- 支持多协议,包括 EPCglobal Gen 2(ISO 18000-6C),含 DRM、ISO 18000-6B(可选)和 IP-X(可选)。
- 4 个 50 $\Omega$  MMCX 连接器,支持 4 个单静态天线。
- 独立的读取和写入电平,命令调节范围为 5~31.5dBm(1.4W),且高于 +15dBm 时

精度为 $\pm 0.5\text{dBm}$ 。

- 支持 860~960MHz 超高频 RFID 全载波频率范围,以满足全球规范要求。
- 可在采用 FCC、ETSI、MIC(韩国)和 SRRC-MII(中国)监管规范的国家获得使用认证。
- TTL 电平异步数据接口支持高达 921.6kbps 的速率。
- USB 2.0 全速设备端口(高达 12Mbps)。
- 工作温度范围为 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 。
- 采用高性能设置,标签读取速度为每秒 750 个标签。
- 在使用 6dBi 天线的情况下,标签最大读取距离超过 30 英尺(9 米)。
- 4 个 GPIO 线路通过数据接口控制。

Thingmagic 公司的 M5e/M6e 等系列模块,一直是超高频 RFID 市场上高性能模块的典范。不过随着中国市场的发展以及越来越多的人才进入超高频 RFID 阅读器领域,国产阅读器模块的性能越来越好,加上中国制造的低成本优势,现在中国的中高端模块市场中也有大量的国产品牌。

## 2. 固定式阅读器

固定式阅读器一般应用于工业场景中,具有高性能、高可靠性等优点。其核心模块一般采用分立元器件集成方案或 R2000 的专用芯片方案,前面介绍过的 M6e 模块就是为固定式阅读器设计的。固定式阅读器一般具有 4 个射频端口(也有 2 端口和 8 端口等不同端口的固定式阅读器),同时具有多种外部接口。

如图 5-5 所示为 Impinj R700 阅读器,是市场上性能最优的固定式阅读器之一,其具有如下特点。



图 5-5 Impinj R700 阅读器

- 企业级可靠性和安全性:具有安全防护功能并支持现场升级。
- 专为企业级部署而设计:高速处理能力和优越的接收灵敏度,适用于企业级物联网解决方案。
- 开发简单:通过 API 轻松地连接到 IoT 应用程序,并支持主流的 IoT 数据传输技术。
- 系统构建强大的、支持自定义的解决方案:具有强大的嵌入式系统,支持自定义的阅读器应用程序。
- 快速连接到 IoT 应用程序:阅读器支持千兆以太网连接防止了数据阻塞并降低了

延迟。

- 可在恶劣的环境下工作：阅读器具有坚固、抗冲击的铸铝外壳。

R700 的超高频 RFID 特性非常优越,体现在输出功率、标签识别速率、阅读器的灵敏度以及支持多种阅读器场景等几个方面。

- 输出功率：最大输出功率可达 33dBm(PoE+供电)。在普通 PoE 供电模式下由于供电能力不足无法支持最大功率输出,因此只支持 30dBm 的输出功率。现阶段市场上超高频 RFID 阅读器的最大输出功率一般设置为 33dBm,其主要原因是大功率可以获得更好的工作距离。并不是输出功率一味放大就可以增加工作距离,如果输出功率再增大,阅读器接收机中的载波信号会加强以至于系统的灵敏度下降,反而使系统的工作距离减小。
- 标签识别速率：可以达到最快每秒 1100 个标签,这是市场上速率最快的工业级固定式阅读器之一。R700 采用的多标签算法在 3.3.2 节中有详细介绍。
- 阅读器的灵敏度：阅读器在误码率千分之一的条件下实现了-92dBm 的灵敏度,可以说是市场上灵敏度最好的阅读器,领先行业其他竞争对手。
- 支持多种阅读器场景,如多阅读器场景(Dense Reader Mode),或干扰较大的场景,阅读器可以根据环境的干扰情况调整工作方式。

从市场的反馈看,R700 阅读器在主流固定阅读器中的性能第一,这与二十多年来 Impinj 公司的努力分不开,加上 Impinj 公司既有标签芯片,又有阅读器芯片,对整个系统的积累非常深,他们开发的 R700 阅读器无论在性能还是在稳定性上都有卓越的表现。

### 3. 手持式阅读器

手持式阅读器是超高频 RFID 应用中常见的阅读器设备,它不仅包含阅读器模块,还包含了操作系统、人机输入输出系统(按键、显示屏)、天线模块,可以说包含了一个超高频 RFID 系统中除了标签之外的所有元素。手持式阅读器体积小,操作方便,可以不依赖外界设备单独工作,广泛适用于资产管理、服装盘点、车辆管理、高速收费、仓储管理、金融管理等领域。

手持式阅读器根据是否带有操作系统和屏幕分为超高频 RFID 手持终端和超高频 RFID 蓝牙阅读器(也叫 SLED)。

#### 1) 超高频 RFID 手持终端

超高频 RFID 手持终端从出现至今也有十几年的历史了,其最早是通过手持条形码扫描枪改造而来的,只是在手持条形码扫描枪的前端放置了阅读器模块和天线。随着智能手机的发展,安卓系统的手机功能越来越强大且成本逐渐降低,因而手持终端的开发变为将安卓系统的手机增加握柄、阅读器模块和天线。如图 5-6 所示为 Alien Technology 的 H450 手持机,该手持机是笔者主导开发的产品。

H450 手持机是一款具有按键的工业级手持机,具有如下特点:

- 支持一维条形码和二维码。
- 支持蓝牙、Wi-Fi、GPS 和 3G 通信,还支持与智能手机相同的摄像头、麦克风、光亮

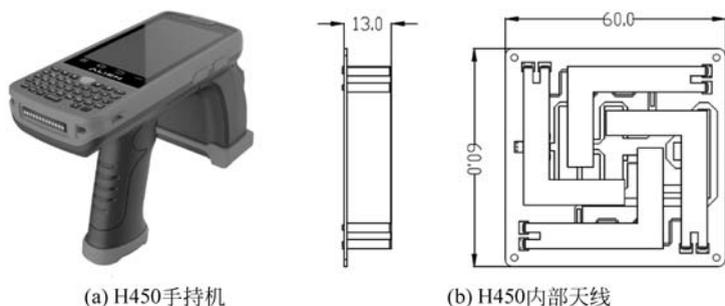


图 5-6 Alien Technology 的 H450 手持

及重力传感器等。

- 支持触摸屏和实体按键。实体按键的加入是许多工业用户的要求,因为一些应用场景中操作员需要带着厚重的手套,无法使用触摸屏。
- 有两块电池,一块 3200mAh 的电池在键盘的背面,一块 5200mAh 的电池在握柄内。
- 防护等级为 IP64。
- 支持 1.2m 跌落防护。
- 其超高频 RFID 模块为 R2000 的单端口模块,配合一个 5dBi 圆极化天线放置在手持机顶部的方形塑料盒中。支持 5~30dBm 的射频功率输出。

在一般的超高频 RFID 项目中,都会配套手持终端,用于人工盘点和管理,尤其是在服装应用中,每个门店都会有 2 或 3 台手持终端。

## 2) 超高频 RFID 蓝牙阅读器

蓝牙阅读器,顾名思义就是通过蓝牙通信作为与外界数据交互的阅读器。蓝牙阅读器构造非常简单,包括一个阅读器模块、天线以及蓝牙接口,与手持终端相比只是缺少了安卓系统的硬件设备。蓝牙阅读器必须配合手机等带有蓝牙通信功能的设备才能工作,同样具有简单灵活的优点。与手持终端相似,蓝牙阅读器的前端也有一个方形塑料盒子,里面是阅读器模块、天线、扫描头等,如图 5-7 所示为该前端的装配图。

如图 5-8 所示为一款带有手机夹子的蓝牙阅读器。该蓝牙阅读器可以配套 Android/iOS 手机工作,直接从一台简易的蓝牙阅读器变为手持终端。该设备的特点如下:

- 尺寸为 143mm×76mm×140mm(仅主体);重量为 483g。
- 电池规格: 5200mAh; 待机时间>70 小时(蓝牙连接状态); 工作时间 6 小时左右(超高频群读)。
- 具有 3 个指示灯,分别是电源电量灯、工作灯、蓝牙连接灯。
- 支持蓝牙 4.0 和蓝牙 BLE。
- 连续滚动 1000 次 0.5m,6 个面接触面滚动后依然稳定运行,达到 IEC 滚动规格。
- IP54,达到 IEC 密封标准。
- ±15kV 空气放电,±8kV 接触放电。

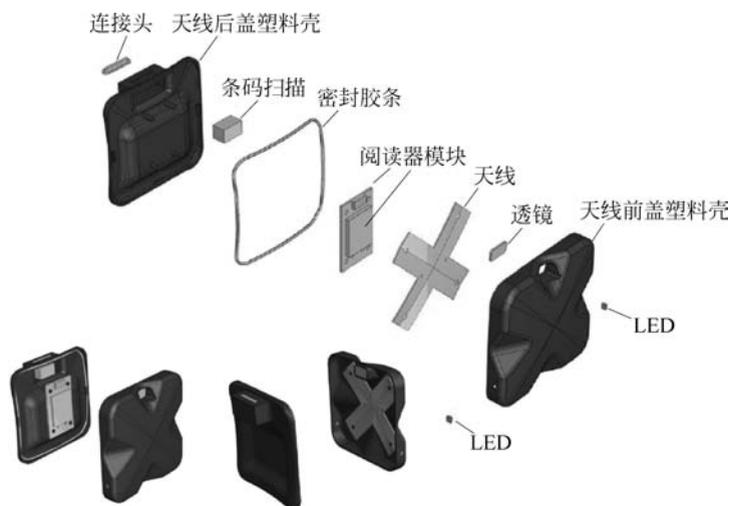


图 5-7 天线盒子装配图

- 支持一维条形码和二维条形码。
- 其超高频 RFID 模块为 R2000 的单端口模块, 配合一个 3dBi 圆极化天线放置在手持机顶部的方形塑料盒中。支持最大 33dBm(2W)输出。

如图 5-9 所示为一个类似球拍形状的蓝牙阅读器, 同样需要必须配合手机等带有蓝牙通信功能的设备才能工作。该蓝牙阅读器的特点是与手机完全分立, 操作更方便, 特别适合于服装盘点的应用。



图 5-8 带有手机夹子的蓝牙阅读器



(a) 正面图

(b) 背面图

图 5-9 球拍形状的蓝牙阅读器

#### 4. 一体式阅读器

一体式阅读器应用场景与固定式阅读器相同, 都不需要人为改变阅读器的位置, 不同点

在于一体式阅读器内部集成了天线。常见的一体式阅读器为桌面读卡器和带有定位、数据处理等功能的网关(Gateway)设备。

### 1) 桌面机

超高频 RFID 桌面机的产生是借鉴了 HF RFID 读卡器的应用场景。早期的公交卡、各种会员卡都是使用 HF RFID 技术,且需要大量的读卡器对 HF 标签进行初始化读取数据。因此超高频 RFID 桌面机只需要将原有的 HF RFID 读卡器内的模块和天线进行更换即可。

如图 5-10 所示为一款简易的超高频 RFID 桌面机,其特点为:

- 超高频 RFID 桌面阅读器采用 Impinj R500 模块方案,最大输出功率 30dBm(对工作距离要求不高时可以采用成本更低的模块)。
- 内置 3dBi 圆极化天线,读取标签距离可达 0~1m(可调)。
- 可实现 100tags/s 的标签识别率。
- 可单独使用 USB 口实现供电以及通信功能,实现最简化的连接。
- 内置 LED 灯和蜂鸣器,可根据需求对 LED 以及蜂鸣器进行控制。单 USB 供电时最大输出功率为 15dBm,如需要输出 30dBm,则需要采用双 USB 供电。
- 写入性能极佳,特别适用于桌面发卡器或高性能工业应用中的标签识别设备。



图 5-10 超高频 RFID 桌面机

### 2) 网关设备

网关设计其实是高性能阅读器或模块与天线的结合,其表现形式有很多种,如作为物流使用放置在仓库门口的网关,或作为图书馆出入口的防盗门,或作为仓库顶悬挂的可以实现定位功能的网关,如图 5-11 所示。

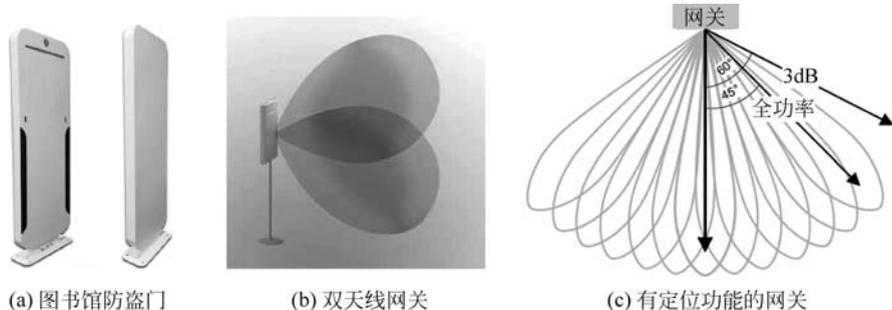


图 5-11 网关设备

这些设备的特点为根据具体的应用场景不同,将原来的固定式阅读器进行了一体化处理,配合更专业的天线实现良好的解决方案,许多网关设备内还带有强大的计算能力。这类网关设备的优点是专业性强,缺点是灵活度差,只能适合一类应用。

图 5-11(a)为一个图书馆防盗门网关,一般是由两扇门组成。该系统中有 4 个天线和一

个四端口模块或阅读器。如果采用固定式阅读器内置,则可以通过 I/O 口直接管理红外触发传感器;当采用阅读器模块时,则需要增加工控模块,管理 I/O 口和阅读器模块的工作和停止,并完成数据处理和传输。

图 5-11(b)为一个双天线网关,通过两个天线的切换,可以实现更好的覆盖,并减小盲点。

图 5-11(c)为一款带有定位功能的超高频 RFID 网关,当悬挂在房间顶部时,可以通过相位列阵天线的辐射角度变换判断房间内的标签分布位置。



视频讲解

### 5.1.3 阅读器外部接口详解

由于手持式阅读器和一体式阅读器的外部接口较为简单,所以本节将主要针对固定式阅读器的外部接口展开讲解,主要通过 Impinj 的 Speedway Revolution R420 和 Alien Technology 的 ALR-9900 这两款经典的阅读器设备作为案例进行详解。

#### 1. Impinj R420 阅读器接口分析

如图 5-12 所示,为 Impinj R420 的端口连接图。图中从左到右依次是带有锁扣的外部直流 24V 供电接口、POE 网口、默认自恢复按键(Default Restore button)、USB Type B 接口(作为设备从机)、USB 接口(作为主机)、RJ-45 接口的操作台串口 RS-232 (Console)、DE-15 口内部为 GPIO 和 RS-232。

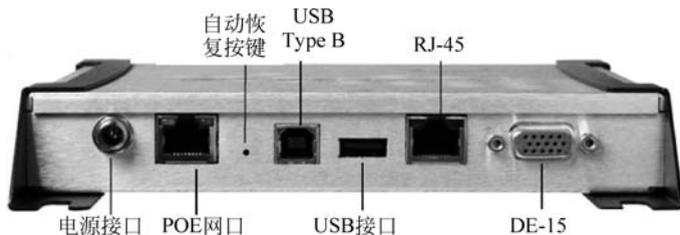


图 5-12 Speedway Revolution R420 端口连接图

如图 5-13 所示,为 R420 阅读器天线接口及状态灯,4 个 PR-TNC 天线接头和天线指示灯以及电源和状态指示灯。



图 5-13 Speedway Revolution R420 天线接口及状态灯

从上述 Speedway Revolution R420 的资料进行分析,可以得出以下结论:

- R420 的供电方式有两种,分别是外部直接供电和 POE 供电,其中外部供电插头也

为普通插头,在工业级应用中设备必须装在保护箱中。多数阅读器的供电为 24V,只有少数的工业级阅读器或小型设备使用不同的供电电压。

- 具有从机 USB 接头,电脑可以通过 USB 接口控制阅读器并与之通信。实际案例中很少用 USB 与阅读器直接通信,因为稳定性不高。一般情况下,使用网口作为通信手段,少数使用 RS-232 串口。只有小型阅读器设备会使用 USB 接口通信,如小型桌面机。R420 预留 USB 从机接口是为了方便开发者调试。
- 具有主机的 USB 接口,当设备的存储空间有限时,可以直接外接 USB 存储设备,扩大存储空间,可以理解为给计算机加了一个移动硬盘。此主机 USB 接口可以实现掉电保存功能,该方法被许多设备所采纳。
- 控制台 RJ-45 口,外形如网口,是类似思科设备的控制台串口,一般在阅读器内部配置参数时使用。
- GPIO 的 DE-15 接口其实是一个普通计算机接头,需要再接其他转换头才可以把 GPIO 的 4 进 4 出和 RS-232 转换出来。当然这样设置也有它的好处——当系统通过串口或 GPIO 触发工作时(触发工作模式)只需要拉一根通信线。R420 的 GPIO 接口有两个缺点:一个是使用不方便需要转接,另一个是 GPIO 的接口非工业级。
- 射频天线口为 4 个,并附有指示灯。一般的固定式阅读器输出天线口为 4 个,有的阅读器有 2 个或者 1 个,还有比较少的阅读器有 8 个射频天线接口,如 MOTO 的阅读器。如果需要阅读器连接更多的天线最好的方法是使用天线分配器。

## 2. ALR-9900 阅读器接口分析

如图 5-14 所示为 Alien Technology 的 ALR-9900 阅读器外部接口图,对比 Impinj 的 R420,其外部接口比较简单,包括多芯电源接口、9 Pin 的 RS-232 串口、网线口、GPIO 口。

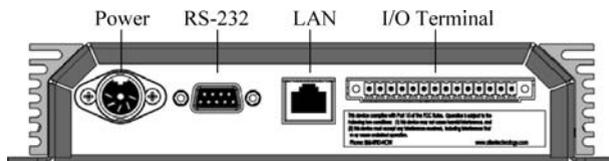


图 5-14 ALR-9900 阅读器外部接口图

如图 5-15 所示,ALR-9900 阅读器同样有 4 个 TNC 天线接头,指示灯为电源(Power)、连接(Link)、天线 0 到天线 3(Ant 0~Ant 3)、CPU、发现(Sniff)、错误(Fault)。其中 Power 表示是否有供电;Link 表明是否连接网络;Active 表明是否有数据在网络中传输;Ant 0~Ant 3 表示各个天线是否在工作;CPU 表示系统是否 Boost 成功并在运转中;Sniff 表示有标签被阅读器发现;Fault 表示阅读器是否出现错误。

从上述 ALR-9900 的资料进行分析,可以得出以下结论:

- ALR-9900 采用工业级的电源适配器供电,多芯多电压输入,减少阅读器内部电源管理压力,EMC 和 EMI 的稳定性提高,缺点是该设备没有 POE 供电,正常工作至少需要两根线缆。

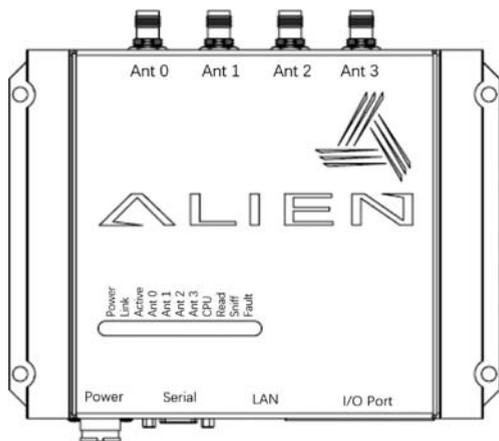


图 5-15 ALR-9900 阅读器天线接口及状态灯

- 串口采用标准 RS-232,使用 9-Pin D female 管脚,方便开发调试。
- I/O 接头使用了工业的标准接头,4 进 8 出 1 电源 1 地共 14-Pin,是非常专业的 I/O 接口。
- 指示灯非常齐全,开发和现场故障处理非常方便。

### 3. GPIO 接口对比

在做 GPIO 接口对比之前,先通过一个案例介绍一下 GPIO 的作用。如图 5-16 所示为 ALR-9900 阅读器给出的一个 GPIO 应用实例图,图中的叉车载着带有标签的物品通过一个区域,被区域内的红外传感器所感应,红外传感器通过 GPIO 的输入口将信息传递到阅读器。阅读器被红外信号触发启动盘点功能,发现正确的标签后通过 GPIO 的输出口点亮绿色指示灯,同时把标签的数据记录在阅读器的存储区。在整个叉车出/入库过程中,阅读器并未连接网络和计算机,只是通过自身的操作系统进行触发工作,不仅效率高而且节省了成本。许多智能仓库都采用这样的方案。

如图 5-17(a)为 R420 GPIO 的输入输出示意图,图 5-17(b)为 ALR-9900 GPIO 的输入输出示意图,两者的差异体现在电气隔离方式与供电方式的不同。

- R420 的 GPIO 与内部电路之间是通过电子管直连的;ALR-9900 的 GPIO 与内部电路通过光电耦合隔离,这样做的好处是当外界设备出现故障时不会损毁阅读器内部电路,也不会带来不必要的干扰。
- ALR-9900 的 GPIO 的输出 OUT 需要连接额外的电源供电 VDD,如图 GPIO 应用实例图中有一个很大的 24V DC 适配器供电,其输出电压可以达到 24V 0.5A。这个输出的驱动能力很强,可以直接驱动灯柱等外围设备;相比之下 R420 的输出驱动能力非常弱,只够实现简单的触发功能。

对比两个阅读器的 GPIO,ALR-9900 的要复杂很多,其优点为工业级稳定性高,而 R420 更加简单,可以直接与许多触发设备连接,使用简单方便。市场上大多数阅读器的

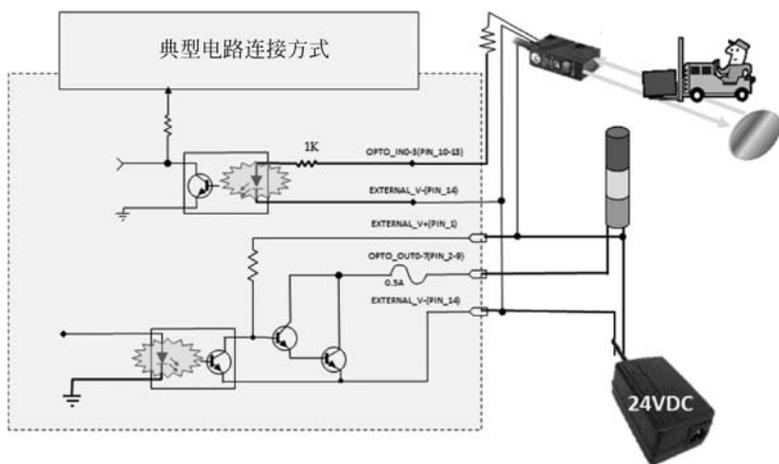


图 5-16 GPIO 应用实例图

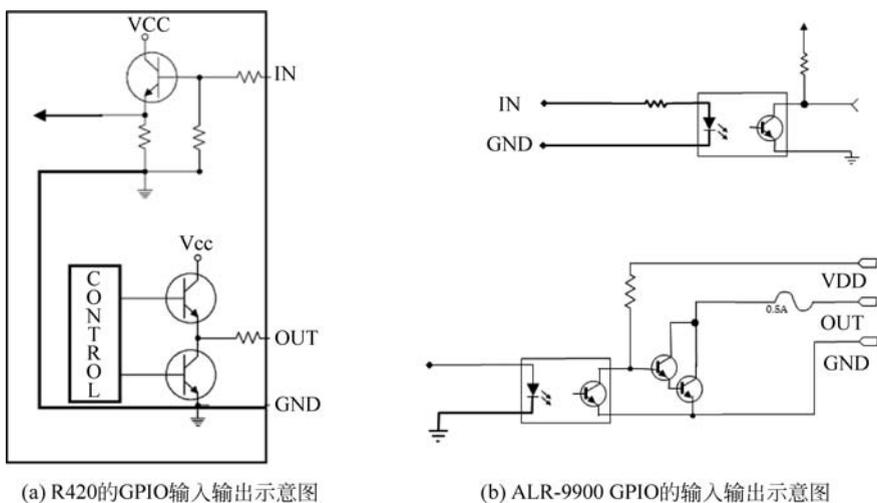


图 5-17 R420 与 ALR-9900 GPIO 接口对比

GPIO 都是采用 R420 的方式。

### 5.1.4 阅读器协议——LLRP 协议详解

初级阅读器协议(Low Level Reader Protocol)简称 LLRP,也称为低级别阅读器协议,是市场上主流超高频 RFID 阅读器都兼容的一套阅读器协议。

#### 1. LLRP 协议介绍

市场上每个超高频 RFID 阅读器厂商都有自己特有的阅读器硬件和配套的通信协议,但相互之间不兼容。当有一个大的项目需要同时使用多家供应商的阅读器时,就需要开发

多套通信协议,管理十分不便。因此在 EPCglobal 的组织下,开发了 LLRP 协议。LLRP 协议中低级别的含义是将原来阅读器的所有功能和操作都分解成最小的单元,每一步只完成最简单的一部分,如采用阅读器厂商的私有协议一个盘点的命令,LLRP 需要多个命令才能实现。开发一个大项目时可以完全针对 LLRP 协议,阅读器的选择很宽泛,项目的代码复制也很简单。

在一个超高频 RFID 系统中,LLRP 协议为上层应用层与底层物理层(阅读器设备)之间的中间接口,底层物理层因厂商不同而有差异,LLRP 协议将底层物理层的差异屏蔽掉,为上层应用提供统一的协议接口,使得上层应用可以无差别地对下层的阅读器进行控制和管理。

LLRP 协定定义了客户端与阅读器之间通信的格式与过程,LLRP 协议通信格式单元为数据协议单位(PDU),即报文(Message)。

LLRP 协议有 3 个作用:标签数据的处理、阅读器装置的管理以及阅读器之间的协调与同步。LLRP 的主要操作为盘点(Inventory)操作和存取操作,Inventory 为阅读器在其读取范围内辨识标签中的 EPC 的动作,而 Access 则是对标签数据进行存取的动作,包含了读取(Read)、写入(Write)、锁定(Lock)及灭活(Kill)等操作。

## 2. LLRP 操作与数据模式

从阅读器端传送给客户端的报文包含阅读器的状态回复报告、RF(Radio Frequency)调查、EPC 盘点(Inventory)和标签存取结果回复报告等,从客户端传给阅读器端的报文包含阅读器配置档的获取与设置、阅读器的读取能力、管理盘点参数设定以及标签的存取操作等。

### 1) LLRP 报文操作模式

客户端与阅读器之间典型 LLRP 报文序列会经过以下过程:

(1) 客户端在操作阅读器之前需先了解阅读器的能力,第一个过程就是客户端查询阅读器的能力,包含一般装置能力、LLRP 能力及监管能力等信息,其内容可能包含天线数量、软件版本、支持何种通信协议、读取灵敏程度、是否支持 RF 调查等信息。

(2) 取得或设定阅读器的配置内容,包含设定阅读器事件通知模式、天线属性、ROSpec 回复报告和 AccessSpec 回复报告的触发条件以及报告形态、事件和报告模式等。

(3) 发送阅读器操作命令,也即 ROSpecs,其可能包含一个或多个盘点操作细节命令。

(4) 发送阅读器存取命令,也即 AccessSpecs,其功能是要求阅读器存取标签数据。

(5) 获得的阅读器回复报告。

### 2) LLRP 报文与动作

LLRP 命令传输的最小单位为报文,报文可能由一组或多组参数(parameter)和场域(field)组合而成,在 LLRP 中大部分的报文是双向的,当客户端传递一组报文给阅读器时,阅读器会回复相对应的报告,如当客户端传递一个 GET\_READER\_CAPABILITIES 报文,则阅读器必须回复 GET\_READER\_CAPABILITIES\_RESPONSE 报文,通知客户端报文是否成功及信息回复。LLRP 报文依照功能分成下列几组。

- 阅读器装置能力报文：用于查询阅读器能力的报文，客户端在下达命令前必须了解阅读器的能力，以及阅读器支持何种命令，以便让客户端清楚如何对阅读器下达命令。
- 阅读器操作控制报文：控制阅读器通信协定中 Inventory 操作及 RF 调查动作的报文，Inventory 为辨识标签的操作，包含一连串的命令，当阅读器下达一个 Query 命令时，视为一个 Inventory 回合的开始；当客户端想要确认阅读器设备的操作环境，例如阅读器频率等，则需要进行 RF 调查的动作。
- 阅读器存取控制报文：客户端控制标签数据的存取操作的报文以及阅读器回复的报文，如对标签进行读取(Read)、写入(Write)、锁定(Lock)及删除(Kill)等存取操作。
- 阅读器装置配置报文：查询和设定阅读器装置的配置内容以及管理关闭客户端与阅读器之间连线的报文。
- 报告报文：这类报文主要有 Report、Notifications、Keepalives 三大类，当回传报告触发条件成立、使用者下达取得报告命令以及通知事件发生时，阅读器必须回复相对应的报告到客户端，报告可能包含阅读器的状态、标签数据、RF 调查报告结果等信息。Keepalives 主要是由阅读器向客户端发送，以确保与客户端的连线。
- 客户延伸报文：这个报文可以包含版本内容、客户需额外定义的数据格式以及数据内容等。
- 错误报文：此类报文负责定义错误事件或错误码，此错误报文会由阅读器回应给客户端。除了报文内容错误之外，如果接收到不支持的报文类型或是一个 CUSTOM\_MESSAGE，阅读器也需要回应给客户端一个错误报文。

当阅读器接收到客户端传送的报文(message)之后，阅读器需做相对应的回复及动作。例如，当阅读器接收到 GET\_READER\_CAPABILITIES 报文时，阅读器此时应该回应阅读器的性能数据，除了回应客户端的要求之外，阅读器还需要时常发送 KEEPALIVE 报文给客户端，要求客户端保持连线以接收报文，而此时客户端需回应告知阅读器，没有回应阅读器将视为连线中断。客户端最后发送 CLOSE\_CONNECTION 报文表示结束与阅读器的连线。

### 3. LLRP 的优缺点

LLRP 接口有以下优点：

- 客户端和阅读器之间的 LLRP 接口有助于对阅读器设备进行管理，以缓解阅读器对标记和阅读器对阅读器的干扰，并最大限度地提高了分离和数据操作的效率。分离是识别多标记环境中单个标记的过程。
- LLRP 接口提供了一种灵活的机制来管理对阅读器设备的访问操作，如读取、写入、删除和锁定。
- LLRP 接口帮助进行错误报告，并发现设备状态和设备功能。

LLRP 的缺点是操作复杂，阅读器厂商的私有协议效率远高于 LLRP 协议，一般的中小

型项目中不会使用 LLRP 协议,只有大型的全球性项目或多阅读器供应商的项目才会使用它。

## 5.2 阅读器技术原理及创新



视频讲解

### 5.2.1 阅读器工作原理

在无源超高频 RFID 系统中,当标签进入电磁场时,标签接收到阅读器提供的能量被激活。阅读器将后台数据服务器发来的命令进行处理、编码并调制,通过天线以电磁波的形式辐射出去,同时为标签提供所需能量。标签一方面通过天线从电磁波中吸收部分能量以驱动标签电路工作,另一方面对包含有效信息的电磁波进行解调、解码,产生返回信号。标签通过对接收到的电磁波反射率的控制(负载调制)实现该信号的发射。阅读器将接收到的微小信号放大、解调,再送入数字基带提取有用信息发送给后台数据服务器,从而完成标签和阅读器的通信。

在此通信过程中,阅读器为标签提供能量向四周空间发射电磁波,到达标签后电磁波能量的一部分被标签吸收驱动标签电路工作,另一部分则以不同的强度散射到各个方向上,反射能量的一部分最终会返回阅读器的发射天线。标签正是利用这部分反射的能量,与阅读器实现数据传输。这种方式被称为反向散射技术(又叫后向散射),是以雷达原理为基础的。

在无源超高频 RFID 标签系统中为完成与阅读器的通信,必须实现对反射信号的调制。反向散射是利用标签天线和其输入电路之间接口处的反射系数的变化来实现的,因为此反射系数是复数,故反射系数的变化实际是振幅和相位变化。其中改变反射系数是通过改变标签天线的阻抗来实现的。通过基于一种“阻抗开关”的原理实现控制标签天线阻抗。实际中采用的几种阻抗开关有变容二极管、逻辑门、高速开关等,其原理如图 5-18 所示。要发送的数据信号具有两种电平信号,通过控制一个简单的晶体管开关实现天线阻抗的改变,从而完成对载波信号的调制。因此,在整个数据通信链路中,仅仅存在一个发射机,却完成了双向的数据通信。

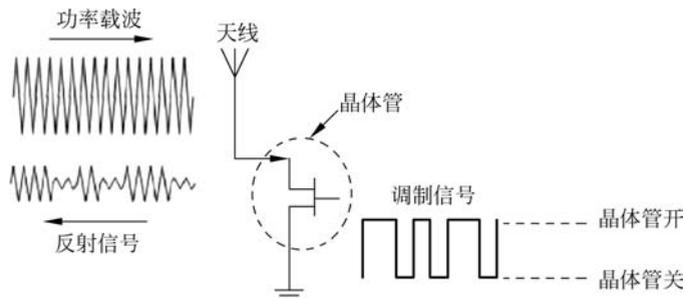


图 5-18 反向散射调制原理

为降低成本及减小阅读器体积而采用单天线系统(4 天线系统可以增加一个 1 分 4 的模拟开关)。由阅读器工作原理以及阅读器与标签之间的通信方式可以看出,在无源单天线系统中,超高频 RFID 阅读器系统结构框图如图 5-19 所示。超高频 RFID 阅读器系统根据功能主要分为数字基带和模拟射频两部分。电源模块为阅读器提供必需的能量以实现阅读器的正常工作,通信接口模块使得阅读器与后台数据服务器相连,实现阅读器与后台数据库之间的通信。控制模块主要实现阅读器数字基带的编解码、时序控制等功能,频率合成器主要为各模块提供它们各自所需的时钟频率。在单天线系统中,为使收发分置,利用隔离器件将接收信号与发送信号分离开实现半双工通信。天线主要负责接收标签后向散射回的信号及发送阅读命令和为标签提供能量的未调制载波。

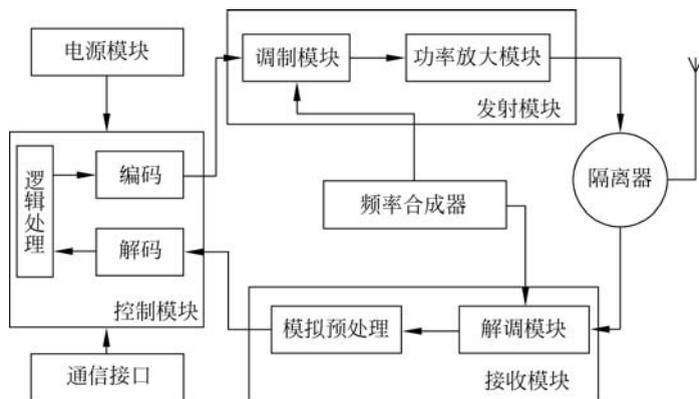


图 5-19 超高频 RFID 阅读器系统结构框图

射频部分主要由射频接收模块和射频发送模块组成。射频发送部分主要由调制模块和功率放大模块组成,负责将数字基带送来的信号调制成符合标准的信号,再经过功率放大模块放大。射频接收模块主要由解调模块和模拟处理模块组成,负责将从天线接收到的信号变频到模拟基带,经过模拟处理模块滤波、整形、放大,送往数字基带部分。其射频部分主要工作流程如下:

- 天线将从标签返回的电磁波转化为电信号,射频接收部分将电信号通过解调模块解调、滤波,并将微小信号进行放大、整形后送入数字基带进行处理。
- 将数字基带送来的基带信号对本振信号进行调制形成 ISO/IEC 18000-6C 标准规定的调制信号,再经功率放大形成最终的信号,最后通过天线以电磁波的形式辐射到空间。

其数字基带部分的主要工作流程如下:

- 将经过模拟预处理的信号进行滤波、整形、解码、校验,得到最终标签返回的有用信息,并通过通信接口送至后台数据服务器。
- 后台数据服务器通过通信接口发送命令给数字基带部分,数字基带将接收到的命令按照协议规定进行编码,形成基带信号送往射频处理部分。

## 5.2.2 超高频 RFID 阅读器结构方案

由 5.2.1 节所述,已从功能角度分析阅读器基本结构。本节将对阅读器的结构方案进行详解。由于超高频 RFID 系统遵循 ISO/IEC 18000-6C 协议标准,符合协议所要求的调制方式、数据率以及编解码方式,如图 5-20 所示为超高频 RFID 阅读器主流的方案框图。框图主要分为两部分:射频前端和数字基带部分,本节重点介绍射频前端部分(多数开发者采用专用芯片开发阅读器,射频前端是系统的关键)。

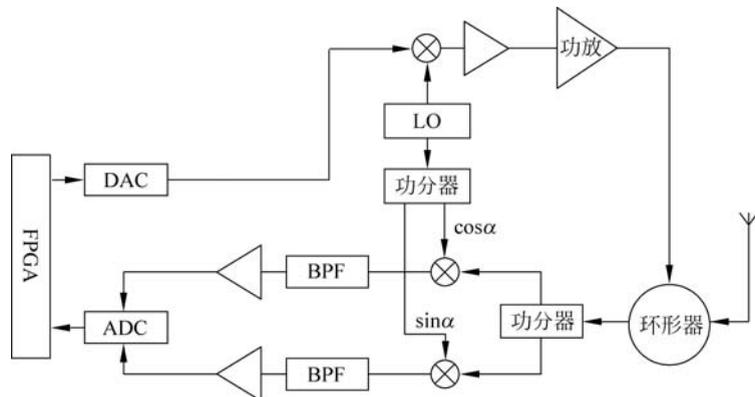


图 5-20 超高频 RFID 阅读器主流设计方案框图

本设计中,从天线经环形器馈入接收机的标签返回信号不像传统的射频接收机一样直接通过 LNA 和带通滤波器。这是因为在传统的射频接收机中,接收信号先通过带通滤波器,可以去除频段外的干扰,并对接收的微弱信号进行放大。但是在超高频 RFID 系统中,滤波器的用处并不大。因为其他频段的干扰信号幅度相对于无源标签反向散射的信号幅度较小(无源标签的信号强度一般为  $-60\text{dBm}$  左右,而同频带的干扰信号一般为  $-100\text{dBm}$  左右);而不通过 LNA,则是因为超高频 RFID 的主要噪声来源于环形器泄漏的未调制载波,很容易导致低噪声放大器饱和并带来进一步影响。数字基带部分由模数转换器(ADC)、数字信号处理模块、协议控制器组成。其信号数字化采样、通道计算选择、数据相干判决以及数据编解码,都由一个单独的 FPGA 完成(如采用专用芯片,则芯片内部自带数字处理模块)。

### 1. 超高频 RFID 阅读器射频接收机架构

在现有的射频前端接收机结构中,最简单有效的设计便是在射频频段将信号数字化后直接送入数字基带进行处理,但考虑现有 A/D 转换技术限制及成本要求,接收机一般将从天线送来的射频信号先一级或多级下变频到能处理的频段再进行后续处理。根据混频器将天线送来的射频信号下变频到的频率不同,可将接收机分为超外差式接收机、零中频接收机和低中频接收机。

超外差接收机是利用本振将射频信号直接下变频到中频,选择性与灵敏度较好,较易实

现有有用信道的选择、A/D转换等,但其结构复杂,组合干扰频率点多,镜像干扰现象在3种结构中最为严重。零中频结构使本振频率与载频相同,将信号直接下变频到零频,不存在镜像干扰,使得结构相对简单、设计成本低,但存在本振泄漏、直流偏移等问题。低中频结构虽克服了直流偏移和闪烁噪声等问题,但是它对本振相位噪声要求较高并存在镜像干扰。在超高频 RFID 阅读器设计中,绝大多数采用零中频结构,将从天线接收到的射频信号直接通过本振下变频到零中频,并分为 I/Q 两路信号,如图 5-21 所示。

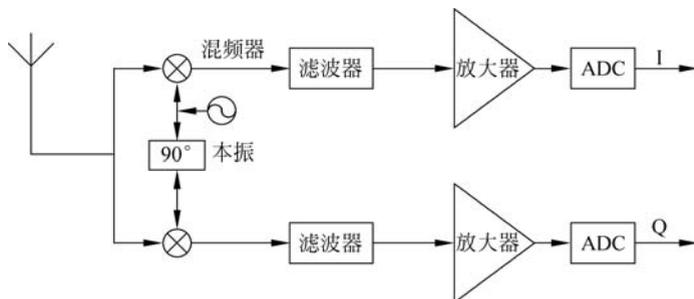


图 5-21 零中频接收机架构

在超高频 RFID 阅读器中,接收机采用零中频设计结构的主要原因为:阅读器天线接收到的信号为标签对阅读器发送信号的反射,因此接收端接收信号的频率与阅读器本振信号频率相同,并且信号接收端本振和发送端本振可为同一个本振,从而简化电路结构并降低硬件开销。但仍然存在零点效应及信号自混频引起的直流偏移问题。直流偏移将导致后级电路阻塞或输入直流点偏移。

现今,在应对产生的直流偏移时,常用的方法如下:

(1) 在混频输出和基带之间加入一个截止频率很低的高通滤波器,滤除直流偏移的影响,为了不干扰有用信号,这些高通滤波器的截止频率通常应不低于数据率的 0.1%,在实际应用中通常会用一个大电容代替高通滤波器。此方案最好对基带信号采用适当编码和合适的调制方式,以减少基带信号直流附近的能量。

(2) 对于时分复用(Time Division Duplexing, TDD)系统,由于收发时分复用,在发射阶段,接收机处于空闲状态,这时就可以利用这些空闲间隙对直流偏移进行采样并存储起来,在接收机转为工作状态时,将接收到的基带信号和存储的信号相减,就可以消除直流偏移的影响。

(3) 谐波混频。将本振信号频率设为接收射频信号频率的一半,本振信号的二次谐波与输入射频信号进行混频。因此,由本振信号泄漏引起的自混频将产生一个与其同频率的交流信号,而不产生直流偏移。有些器件支持该功能,在混频器内部对本振信号进行倍频或分频。

(4) 利用成熟的数字信号处理技术来确定直流偏移的大小,并将结果反馈回模拟前端来消除直流偏移。

在这些方法中,方法(3)较为复杂,在超高频 RFID 阅读器中,一方面直流偏移因为本振相位噪声的影响,不一定为直流,而是在低频段;另一方面,因为直流偏移噪声基本来自未调制载波通过隔离器件的泄漏,其强度远大于有用信号幅度,因此必须在放大器放大之前将其消除,故无法使用方法(2)。考虑到接收信号带宽有限,因此,为尽可能消除直流偏移问题,通常情况下在模拟前端采用类似(1)的方法,用截止频率较低的带通滤波器对其进行滤波,以滤除小部分有用信息为代价换取消除直流偏移现象,带通滤波器的低通截止频率由接收信号带宽确定。也可采用方法(4),在射频前端增加功率抵消环路,消除直流偏移影响。市场上的绝大多数阅读器都是采用了方法(1)大电容隔离的方式减小直流偏置,其中,中高端阅读器同时还采用方法(4)载波抵消的技术方案提高系统灵敏度。

## 2. 发射机架构

在 ISO/IEC 18000-6C 协议中,前向链路和后向链路的调制方式、编码方式等因素决定

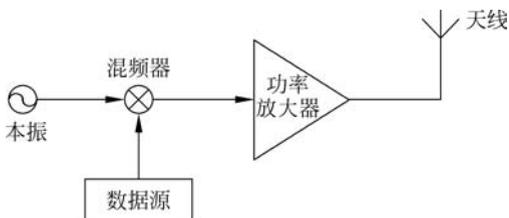


图 5-22 发射机架构

了阅读器发射机的架构。在前向链路中采用 DSB-ASK、SSB-ASK、PR-ASK 调制方式,而后向链路采用 ASK 或 BPSK 对回波进行调制,因此发射机的架构要能够用于发送幅度和相位调制的信号,其结构图如图 5-22 所示,由混频器、本振、天线、功率放大器组成,利用本振和乘法器对基带送来的信号进行调制,经

过功率放大器后由天线将射频信号辐射到空中。

## 3. 收发通道隔离

无源 RFID 系统为半双工工作方式。阅读器一方面向外发射未调制功率载波为标签提供能量,另一方面还要接收标签后向散射回的有用信号,这种通信机制导致接收机前端的载波泄漏。阅读器工作时,两信号将同时出现在天线上且两信号频率相同,阅读器的发射信号强度远远大于接收的标签反向散射的信号。

载波泄漏信号的产生有 3 个途径:收发之间有限的隔离度使得发射端载波泄漏到接收前端;阅读器天线的失配造成载波信号反射到接收前端;环境对载波信号的反射再次进入接收天线。为了减小载波泄漏,需要在阅读器结构中将阅读器收发通道隔离,常用的隔离方式有 3 种,分别是采用收、发天线分离的双天线结构;采用环形器;采用耦合器。

### 1) 双天线结构

对于使用无源标签的超高频 RFID 系统,无论是双天线结构还是单天线结构的阅读器,其接收前端都存在载波泄漏问题。对于如图 5-23 所示的双天线结构的阅读器,接收机天线与发射机天线之间的隔离度为 25~30dB,其隔离度与两个天线位置和摆放相关,如果两个天线靠得较近或辐射面相对则隔离度会大幅下降。

假设阅读器功率放大器的输出功率为 30dBm,接收天线收到的标签反向散射的信号强度为 -60dBm,收发天线之间的隔离度为 25dB,天线的输入反射系数  $S_{11} = -15\text{dB}$ (双天线

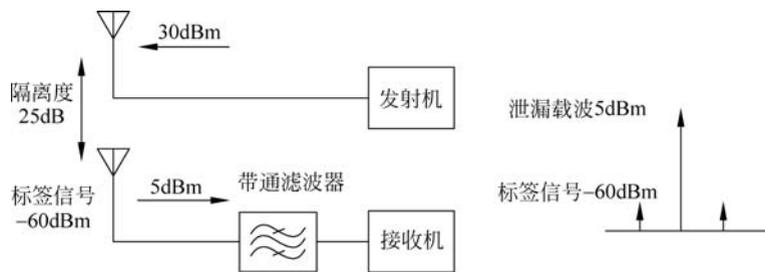


图 5-23 双天线结构隔离

结构中,天线的输入反射系数与载波泄漏无关)。此时产生的载波泄漏功率约 5dBm (30-25dBm),通过带通滤波器后接收机收到的信号包括 5dBm 的泄漏载波和 -60dBm 的标签信号。隔离效果的好坏主要由如下几个参数判断:接收机收到的载波信号的强度、标签信号的强度以及两个信号的差值。

- 接收机收到的载波信号越强,则直流偏移影响越大,所以接收到的载波越小越好。一般带有载波消除功能的阅读器能够处理的载波泄漏强度为 +15dBm 左右,如果大于该值将很难实现有效的载波消除,阅读器的灵敏度会受限。
- 接收机收到的标签信号强度越大,则系统越容易解调该信号,阅读器的灵敏度越高。在没有载波泄漏的情况下,阅读器的灵敏度可以达到 -90dBm 之下的灵敏度,在有载波泄漏的环境中灵敏度会下降,中高端的阅读器可以实现在 10dBm 载波泄漏的环境下 -80dBm 的灵敏度。因此标签反向散射的信号强度一般需要在 -80dBm 之上。
- 两者信号强度的差值越小,信号处理越方便,可以获得更好的解调效果。接收机收到两个信号后,可以通过可变增益处理将两个信号同时变大或变小,从而满足载波消除和接收机小信号解调的问题。本系统中两者差值为 65dB,隔离效果非常不错。

双天线结构是常用 3 种隔离方式中效果最好的,其缺点是系统需要两个天线,成本和实施难度都提高了,应用时还需要注意两个天线的隔离问题。早期阅读器多采用双天线结构,不过随着对小型化、低成本、实施简易的要求,市场上的主流阅读器已经不再采用收发双天线结构了,而是采用收发同天线结构。

## 2) 环形器

环形器是一种多端口器件(常见 3 个端口),采用的材料是铁氧体,利用铁氧体在恒定电场中对电磁波各方向表现出不同磁导率选择导通端口实现发送和接收通道的隔离。环形器是将进入其任一端口的入射波,按照由静偏磁场确定的方向顺序传入下一个端口的多端口器件。环形器是有数个端口的非可逆器件。比如:从 1 端口输入信号,信号只能从 2 端口输出,同样,从 2 端口输入的信号只能从 3 端口输出,以此类推,故称作环形器。如图 5-24 为一个三端口的环形器,当从端口 1 进入时从端口 2 的插损为 1dB,同时端口 3 的隔离为 20dB。此处的插损 1dB 和隔离度 20dB 是常用器件的参数,实际中可以选择插损更小、隔离

度更高的元件,这与环形器的尺寸和特性相关。

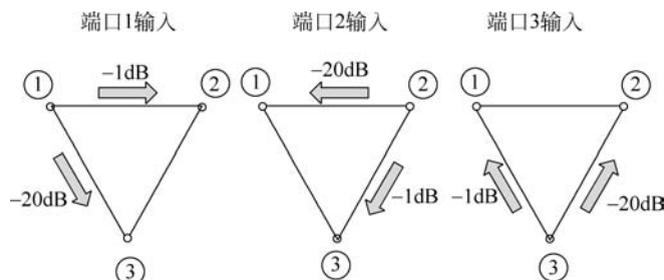


图 5-24 环形器原理

由于环形器具有直通和隔离的特性,因此非常适合超高频 RFID 阅读器的收发隔离系统,如图 5-25 所示为采用环形器作为隔离器件的单天线方案。同样阅读器功率放大器的输出功率为 30dBm,接收天线收到的标签反向散射的信号强度为 $-60\text{dBm}$ ,天线的输入反射系数 $S_{11}=-15\text{dB}$ 。此时发射机的 30dBm 输出信号经过环形器衰减 1dB 后到达天线端辐射功率为 29dBm,由于天线输入反射系数为 $-15\text{dB}$ ,则天线反射信号强度为 14dBm,该信号再次经过环形器衰减 1dB 后到达接收机,此时通过天线反射的载波泄漏为 13dBm。与此同时发射机的信号还可以通过环形器的隔离端口达到接收机,隔离泄漏信号强度为 10dBm,由于天线适配引起的载波泄漏是主要的,所以可以大致认为接收到的载波泄漏为 13dBm ( $13\text{dBm} > 10\text{dBm}$ )。标签信号通过环形器衰减 1dB 后到达接收接,信号强度为 $-61\text{dBm}$ 。

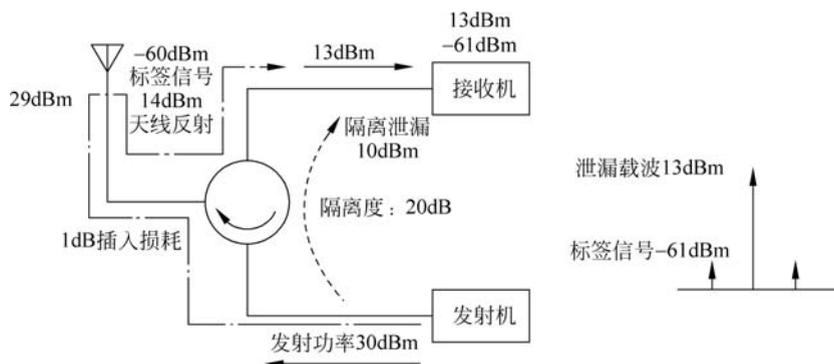


图 5-25 采用环形器作为隔离器件的单天线方案

从隔离效果看,使用环形器后,载波泄漏为 13dBm,可以通过载波消除的手段抑制;有效信号的强度为 $-61\text{dBm}$ ,是不错的信号强度;两个信号的差值为 74dB,可以说有不错的效果。环形器在超高频 RFID 系统中广泛应用,尤其是高端阅读器,基本都采用环形器作为隔离器件。其缺点为尺寸较大,无法使用于小型阅读器或手持设备,再加上成本高,一般的阅读器都不采用该方案。

### 3) 耦合器

在微波系统中,往往需将一路微波功率按比例分成几路,这就是功率分配问题,实现这一功能的元件称为功率分配元件,即耦合器。如图 5-26 所示为一个 4 端口的耦合器,其特点为:

- 1→2 为直通通路(direct path),衰减很小,一般小于 1dB。
- 1→4 耦合通路(coupled path),常见的耦合能量为 5dB、7dB、10dB 等,R2000 系列的阅读器常选择参数为 10dB 的耦合器。
- 1→3 隔离通路(isolated path),常见隔离度为 30dB。

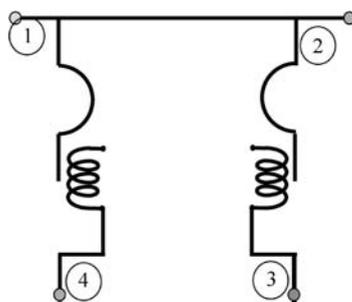


图 5-26 耦合器原理

超高频 RFID 阅读器常使用定向耦合器作为隔离元件。定向耦合器是一种具有方向性的功率耦合(分配)元件。它是一种四端口元件,通常由称为直通线(主线)和耦合线(副线)的两段传输线组合而成。直通线和耦合线之间通过一定的耦合机制(例如,缝隙、孔、耦合线段等)把直通线功率的一部分(或全部)耦合到耦合线中,并且要求功率在耦合线中只传向某一输出端口,另一端口则无功率输出。如果直通线中波的传播方向变为与原来的方向相反,则耦合线中功率的输出端口与无功率输出的端口也会随之改变,也就是说,功率的耦合(分配)是有方向的,因此称为定向耦合器(方向性耦合器)。

如图 5-27 所示为使用定向耦合器作为隔离器件的阅读器射频前端的结构示意图,其中阅读器功率放大器的输出功率为 30dBm,接收天线收到的标签反向散射的信号强度为 -60dBm,天线的输入反射系数  $S_{11} = -15$ dB。定义该定向耦合器的输出端到输入端损耗为 0dB;输出端到耦合端的隔离为 -30dB;输入端到耦合端的耦合为 -10dB。此时,天线端的载波信号强度为 30dBm,天线失配反射的载波信号强度为 15dBm(30dBm - 15dBm),耦合到接收机的载波信号强度为 5dBm(15dBm - 10dBm),与此同时,发射机的载波也直接耦合

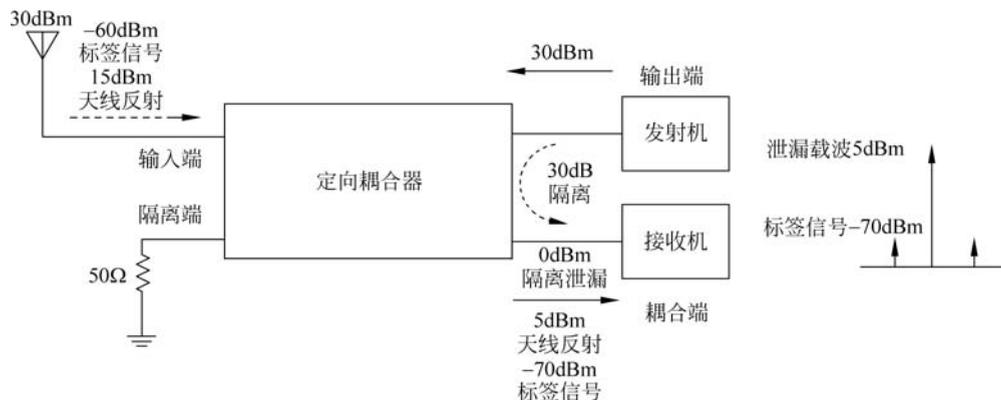


图 5-27 采用定向耦合器作为隔离元件的单天线方案

到接收机的信号强度为  $0\text{dBm}$  ( $30\text{dBm} - 30\text{dBm}$ )。由于隔离泄漏的载波能量小于天线反射的耦合泄漏,因此可以认为接收机的载波泄漏信号强度为  $5\text{dBm}$  ( $5\text{dBm} > 0\text{dBm}$ )。标签信号通过耦合到达接收机的信号强度为  $-70\text{dBm}$  ( $-60\text{dBm} - 10\text{dBm}$ )。

从隔离效果看,使用定向耦合器后,载波泄漏为  $5\text{dBm}$  自身泄漏并不大,还可以通过载波消除的手段进一步抑制,有效信号的强度为  $-70\text{dBm}$ ,可以实现解调,两个信号的差值为  $75\text{dB}$ ,与环形器的结果类似。定向耦合器借助其尺寸小、成本的优势成为超高频 RFID 阅读器系统中普遍使用的隔离器件。

定向耦合器的耦合系数太大或太小都不好,如果耦合系数太大,则接收机端的标签信号会衰减过大,导致低于阅读器芯片灵敏度无法解调;同理,如果耦合系数太小,则会有更多的载波泄漏入接收机。

在使用环形器和隔离器的电路中,天线的阻抗匹配是非常关键的参数,尤其是在阅读器大功率输出时,如果天线适配严重,则会引起接收机载波泄漏过大导致接收灵敏度下降。因此阅读器大功率输出时一定要选择输入反射系数小的天线,若天线的  $S_{11} > -10\text{dB}$ ,则接收机很容易被泄漏的载波阻塞而无法工作。

许多阅读器都带有载波泄漏强度指示功能,可以显示当前的载波泄漏情况,也从侧面说明天线的匹配是否良好。如果未连接天线或天线适配严重,系统就会发出提醒,建议使用者检查接头或更换天线。其目的是保护电路。当大功率的 PA 输出的信号都返回到阅读器时容易引起高温,从而损坏电路。

### 5.2.3 载波泄漏消除技术

载波消除技术 (Carrier Cancellation, CC) 又叫载波抵消技术,也叫自干扰消除技术 (Self-Jammer Cancellation, SJC),是提高超高频 RFID 阅读器灵敏度的关键手段。

#### 1. 载波泄漏消除技术的发展历史

5.2.2 节多次提到载波泄漏带来的问题,然而在载波消除技术未被发明之前,超高频 RFID 阅读器主要采用了两种应对方法:一是承受载波泄漏的设计,这类阅读器通常利用高隔离度的环形器来衰减载波泄漏,通过设计无源高线性度的接收前端来承受载波泄漏信号的干扰,但无源前端噪声性能较差,影响灵敏度;二是利用衰减器减小载波泄漏,通过片内或片外衰减器减少载波泄漏信号,但同时衰减器也同比例减小了有用信号,从而降低了阅读器接收灵敏度。以上两种方法阅读器接收机灵敏度都不高:在  $0 \sim 5\text{dBm}$  载波泄漏时,阅读器接收机灵敏度通常为  $-70\text{dBm}$  左右,  $-10\text{dBm}$  级别及更小载波泄漏时,接收机灵敏度才可达  $-85\text{dBm}$ ,两种模式下灵敏度差异达  $15\text{dB}$  甚至更高。由此可见,较高的载波泄漏正是制约阅读器芯片接收机灵敏度的重要因素。因此,从 2007 年起,国内外学者开始对载波泄漏消除技术进行研究。

Analog Device 公司的 J. Y. Lee 等人于 2007 年提出了一种具有载波泄漏消除的技术。该技术通过从片上本振信号抽取一路信号作为参考信号源,控制其幅度与相位,利用差分 LNA 与载波泄漏实时抵消的方法,信噪比有  $10 \sim 12\text{dB}$  的改善,最大可处理  $-6\text{dBm}$  的载波



视频讲解

泄漏信号,在标签距离阅读器 90cm 处平均标签识别率从 0% 提高到 42.8%。电路采用 0.18 $\mu\text{m}$  CMOS 工艺在 1.8V 电源电压下实现。

复旦大学的闵昊、倪熔华等于 2008 年提出通过片上本振信号抽取一路信号作为载波泄漏消除信号,控制其幅度与相位,与含有载波泄漏的有用标签信号分别输入差分 LNA 的两个输入端,实现消除共模载波泄漏信号,保留有用标签信号的目的,从而去除载波影响,最大可处理 5dBm 载波泄漏,灵敏度可达 -80dBm。该电路采用 SMIC 0.18 $\mu\text{m}$  CMOS 工艺在 3.3V 电源电压下实现。

美国加利福尼亚大学的 A. Safarian 和 A. Shameli 等人于 2009 年 5 月提出了一种有源载波泄漏抑制前端,设置两条射频路径:线性路径同时放大载波泄漏信号与有用标签信号;非线性路径去除标签信号,保留载波泄漏信号,通过调整其增益,在输出端相减从而消除载波泄漏信号,放大有用的标签信号。该电路采用 0.18 $\mu\text{m}$  CMOS 工艺在 1.8V 电源电压下实现,信噪比有 50dB 的改善,最大可处理 15dBm 的载波泄漏信号。

韩国三星光电子的 S. C. Jung 等人于 2010 年 3 月提出了一种采用定向耦合器和阻抗调谐电路的载波泄漏抵消方法,该阻抗调谐电路通过 PIN 管和变容二极管来实现阻抗调谐,通过调节阻抗调谐电路使得定向耦合器隔离端产生失配并反射信号,该信号和载波泄漏信号一起进入到接收前端,调节从耦合端反射的信号,使其与载波泄漏信号大小相同、方向相反以达到消除载波的目的。该方法使得接收机灵敏度有 15dB 的提升,标签识别距离提高约 30%,工作频率为 840~960MHz。

复旦大学的闵昊、熊庭文等于 2010 年 2 月提出了一种利用分立元件实现的载波泄漏抵消方法,电路由分立的定向耦合器、相移器、衰减器、环形器和功率合成器等器件组成,通过微处理器控制载波参考信号的幅度和相位,通过加法器与载波泄漏信号抵消,在 920~925MHz 内收发机隔离性能从原来的 20dB 提高到 40dB。

韩国 J. Y. Jung 等人于 2012 年 1 月使用发射的连续载波信号作抵消参考信号源,控制其幅度和相位,利用加法器与载波泄漏信号抵消。该电路通过相移器、定向耦合器、功分器等分立元件实现,使得接收机读模式灵敏度最大提高 13dB。

韩国科学技术院 S. S. Lee 等人于 2013 年 2 月提出一种利用死区放大器来抑制载波泄漏的技术,该技术通过工作在 B 类的放大器,抑制载波信号,放大标签的调制信号,通过片上功率检测器和相应算法实现自动控制。该方法使得信噪比最高可改善 15dB,最大可处理 10dBm 的载波泄漏信号。该芯片采用 0.18 $\mu\text{m}$  标准 CMOS 工艺实现,电源电压为 3.3V。

韩国三星电子公司的 M. S. Kim、S. C. Jung 等人于 2013 年 5 月提出了一种用直接泄漏耦合方法实现的具有自适应功能的发射端泄漏抵消前端。工作频率为 840~960MHz,该电路采用可变电容、可变电阻、电感、相移器以及 8 位微处理器等分立元件实现,和没有该抵消前端的阅读器芯片相比,商用标签的读取距提升了一倍。

至今仍有大量的学者和企业针对载波泄漏的消除技术进行研究,这也是 Impinj R700 阅读器比上一代灵敏度更好的原因。

## 2. 载波泄漏消除技术方案

按照电路结构来分,现在主流的载波泄漏消除技术可概括为以下3种类型。

### 1) 接收双路消除法

第一种载波泄漏消除方法为:在接收前端设置两条射频路径,其中一条为线性射频路径,另一条为非线性限幅射频路径,两条路径上的信号相减,保留有用标签信号且抵消泄漏信号。如图5-28所示,在射频接收前端,载波信号和泄漏信号同时通过两条射频路径:一条为线性路径,有用标签信号和载波泄漏信号都被放大;另一条为非线性限幅路径,该路径的输出信号只保留功率较大的载波泄漏信号的幅度及相位信号,去除了AM调制中位于包络中的标签信号,通过接收信号强度指示器(RSSI)监测输入输出信号的大小,通过由FPGA控制的数字算法调整非线性限幅路径的增益,使其输出信号和线性路径载波泄漏信号幅度、相位相同,在输出端相减,从而实现抵消载波泄漏信号、保留有用标签信号,该方法最大可获得30dB的载波泄漏信号衰减,然而抵消效果受到两条路径相位以及幅度匹配程度的影响,控制算法较复杂。

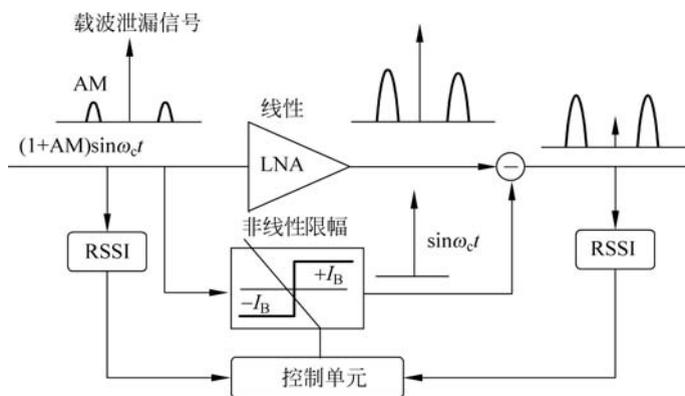


图 5-28 接收双路消除法

### 2) 负反馈环路法

第二种载波泄漏消除方法是通过载波泄漏消除负反馈环路来实现,如图5-29所示。该方法由载波消除参考源、相位及幅度调整、检测电路、控制单元4个电路模块组成。

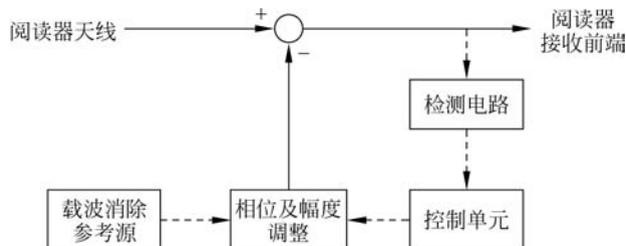


图 5-29 负反馈环路法

其中,载波泄漏参考源一般从发射机输出经定向耦合器等方式获得;检测电路用来检测残留的载波泄漏信号,其实现方式可通过功率检测器在进入接收前端进行射频功率检测,也可通过检测经下混频后的 DC 量;控制单元根据检测电路的输出调节载波消除参考信号的幅度及相位,当该信号与载波泄漏信号幅度相同、相位相反,通过矢量相加即可完全消除载波泄漏信号,根据相位及幅度电路实现方式的不同,该方法具体有两种实现方式,如图 5-30 所示。

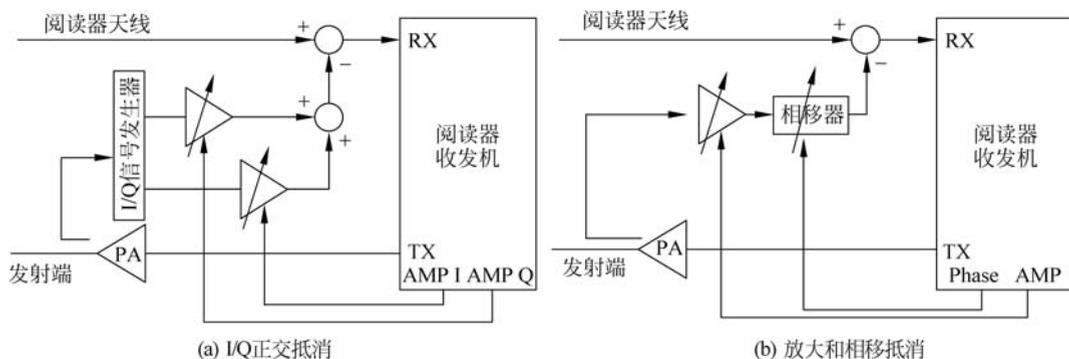


图 5-30 负反馈环路法电路实现

在图 5-30(a)中,载波消除参考源通过定向耦合器从发射机输出端获得,通过正交信号发生器产生两路正交 I/Q 信号,该电路通过由阅读器射频控制模块控制的两个可编程衰减器来实现其矢量合成信号的幅度和相位:同等程度地改变 I/Q 两路放大器的增益调节矢量合成信号的幅度;改变 I/Q 两路放大器的相对增益调节矢量合成信号的相位,该矢量合成信号与输入信号通过功率合成器或矢量加法器等方法相加,以消除载波泄漏信号。

在图 5-30(b)中,通过相同方法获得的载波泄漏参考源直接通过可编程放大器和相移器分别调整其幅度和相位,与输入信号在同一节点完成矢量合成以消除载波泄漏信号。

对于这两种电路实现方式,如图 5-30(a)所示的电路结构更容易与阅读器集成在一起,以 Impinj R2000 阅读器芯片为代表;如图 5-30(b)所示的电路结构一般通过分立的相移器和衰减器,以及微控制器来实现,以 R420 等高端阅读器为代表。

### 3) 死区放大器抵消法

第三种载波泄漏消除方法是韩国科学技术院 Sang-Sung Lee 等人提出的一种利用死区放大器抑制载波泄漏的技术。根据 ISO 18000-C6 协议规定,标签向阅读器发送数据采用 FM0 或 Miller 副载波编码,DSB-AS 或 PSK 调制。当标签反向散射是通过改变标签内部天线阻抗的实部完成时,该调制为 ASK 调制;当标签反向散射是通过改变标签内部天线阻抗的虚部完成时,该调制为 PSK 调制。对于含有标签返回信号、载波泄漏信号的输入信号,标签以 ASK 调制数据时,只有包络中包含有用信号,该死区放大器可通过工作在 B 类的放大器实现。通过衰减位于死区内的载波泄漏信号、放大位于包络中的有用信号,从而达到抑制载波泄漏信号,放大有用标签信号的目的。通过片上集成的功率检测器、比较器以及预放大

器来实现不同载波泄漏量的自适应消除,采用该方法信噪比最高可改善 15dB,最大可处理 10dBm 的载波泄漏信号。

在上述的 3 种方案中,第二种方案市场化最成功,即便如此,距离电子物理可以达到的灵敏度极限还有不小的提升空间,也期待大家在此技术上继续努力。



## 5.2.4 Impinj Indy 阅读器芯片详解

Impinj 的 Indy 系列阅读器芯片在全球市场占有统治地位。在采用专用集成芯片方案的全球中端阅读器市场中,几乎 100% 采用 Indy 系列芯片。Impinj Indy 阅读器芯片的前身是 Intel 公司开发的阅读器芯片 Intel R1000,后 Intel 公司将该业务板块卖给了 Impinj,改名为 Indy R1000。R1000 芯片是最早的超高频 RFID 阅读器集成芯片。Impinj 后续在 R1000 的技术上又开发了带有载波消除功能的高性能阅读器芯片 R2000,从此确定了 Indy 系列在阅读器芯片市场的领导地位。

### 1. Indy 阅读器芯片系列

至今 Impinj Indy 共发布了 3 款阅读器芯片,分别是 R1000、R2000 和 R500,其中 R1000 的发布时间为 2008 年,R2000 和 R500 发布时间为 2010 年。这 3 款阅读器芯片均采用 0.18 $\mu\text{m}$  SiGe BiCOMS 工艺,如图 5-31 所示为 R2000 的硅芯片图。

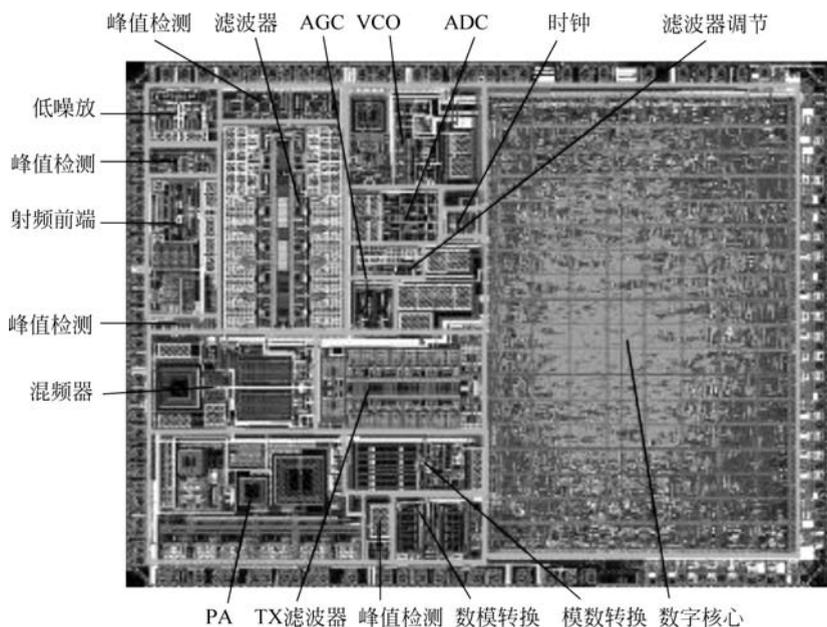


图 5-31 R2000 的硅芯片图

其中 SiGe 为硅锗材料,其特点为:高频特性良好,材料安全性佳,导热性好,而且制程成熟、整合度高,成本较低。

其中 BiCOMS 工艺的特点为:CMOS 工艺和 BiPolar 工艺是两种主要的硅集成电路工

艺,它们有各自的优点。CMOS 器件有集成度高、功耗低、输入阻抗高等优点。BiPolar 器件有截止频率高、驱动能力大、速度快、噪声低等优点。它们的优缺点正好互相补充,将它们集成到同一芯片上形成 BiCMOS 工艺,制得的器件性能定将超出单一工艺。由于 Indy 阅读器芯片中具有数字协议及处理部分,又需要射频高性能,因此采用 SiGe 材料和 BiCOMS 工艺的组合最合适,而  $0.18\mu\text{m}$  工艺具有很好的性价比,因此 Impinj 采用此选择。

作为全球最早出现的阅读器芯片,Indy 系列芯片具有如下优点:

(1) 集成度高。

- 集成了大约 90% 的射频器件;
- 极大地降低了成本;
- 可以作为 RFID Modem;
- 适合于嵌入式应用。

(2) 灵活性强。

- 支持多种的阅读器设计模型;
- 尺寸小(R500 和 R2000 芯片  $9\text{mm}\times 9\text{mm}$ ; R1000 芯片  $8\text{mm}\times 8\text{mm}$ );
- 相对于分立设计功耗较小。

(3) 支持行业主要标准。

- ISO 18000-6B、ISO 18000-6C、ISO 18000-6D(IPICO);
- EPC Global Class 1 Gen-2。

(4) 支持全球频段。

- 840~960MHz;
- 符合 SRRC、FCC、ETSI 规范要求。

如表 5-1 所示为 Indy 系列 3 款芯片的差异参数表。

表 5-1 Indy 系列芯片对比

比较项目	Indy R500	Indy R1000	Indy R2000	说明
RX 灵敏度(DRM)	-68dBm	-95dBm	-95dBm	密集阅读器模式的灵敏度
RX 灵敏度(LBT)		-110dBm	-110dBm	只是监听信道时的灵敏度
RX 灵敏度(10dBm 载波)		-70dBm	-82dBm	接收机 10dBm 载波泄漏时的灵敏度
RX 灵敏度(5dBm 载波)		-75dBm	-85dBm	接收机 5dBm 载波泄漏时的灵敏度
相位噪声@250kHz(dBc/Hz)	-124	-116	-124	相位噪声对于系统灵敏度和频谱规范有重要作用
封装尺寸	64 引脚 $9\text{mm}^2$ QFN	56 引脚 $8\text{mm}^2$ QFN	64 引脚 $9\text{mm}^2$ QFN	小尺寸且 QFN 封装,开发量产便利

由表 5-1 可以看出,在不同的情况下,阅读器的灵敏度是不同的,其中 R2000 芯片具有最好的载波消除特性,可以在 10dBm 载波泄漏的环境下依然保持很高的灵敏度。而 R1000

的芯片随着载波泄漏信号的增加灵敏度下降得很厉害。R500 芯片定义为中低端芯片,因此其灵敏度被锁死在 $-68\text{dBm}$ ,但这并非坏事,对于近距离的阅读器,其稳定性优于 R1000 和 R2000。R500 和 R2000 芯片是在 R1000 芯片基础上开发出来的,因此锁相环的相位噪声有所提高,由于增加了载波抵消等功能,其管脚数量有所增加,因此采用略大的封装。

## 2. Indy 芯片架构

### 1) R1000

如图 5-32 所示为 R1000 芯片的框图,该芯片包含射频前端模块和数字模块,其中接收机采用零中频的一次变频方案。与传统的零中频接收机相比,其不同之处在于锁相环 PLL 通过发射电路给接收电路的混频器提供本振信号,而非锁相环分别给发射机和接收机提供本振信号,这是由于超高频 RFID 阅读器 RX 信号的载波是由自身发出的。

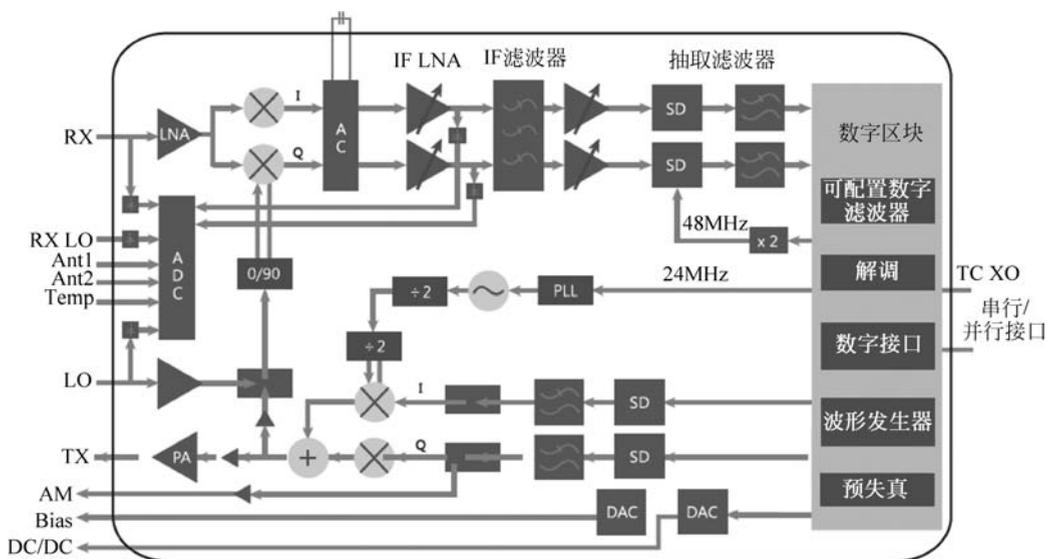


图 5-32 Indy R1000 芯片框图

标签反向散射的信号通过天线到达 R1000 接收机入口 RX,然后通过低噪声放大器(LNA),将微弱的信号放大,再通过功分器,分为 I/Q 两路信号,并与本振信号相乘完成下变频。此时的信号具有很强的直流偏移,因此需要通过一个大电容的 AC 耦合,滤掉直流偏移影响。此时的标签有效信号已经变成了中频信号,再通过中频低噪声放(IF LNA)和中频滤波器(IF Filter)。此时的信号具有较好的信噪比和解调性能,再通过一个可变增益放大器,其目的是调制信号幅度保证 ADC 采样精度。最终模拟基带处理好的信号通过 ADC 变为数字信号进行数据处理。

当阅读器需要发送命令时,波形发生器会产生需要的波形数字文件,再通过 DAC 转化为模拟信号,经过滤波后与本振相乘,完成上变频,成为超高频段的调制信号,再经过功率放大器输出芯片。

芯片的数字模块具有许多功能,包括数字信号处理、数字调制解调、数字接口管理和芯片电源管理等功能。

## 2) R2000

如图 5-33 所示为 Indy R2000 的芯片框图,其设计框架与 R1000 芯片基本相同。对比 R1000 芯片,其增加了载波抵消模块,大大提高了载波泄漏时的灵敏度。同时,还改善了 DRM 滤波器,支持二阶和高阶片外滤波器,从而实现更好的滤波效果。另外很重要的一点是,R2000 芯片大幅提升了锁相环 PLL 的相位噪声,不仅对灵敏度有改善,还对符合全球无线电规范的产品开发有帮助。

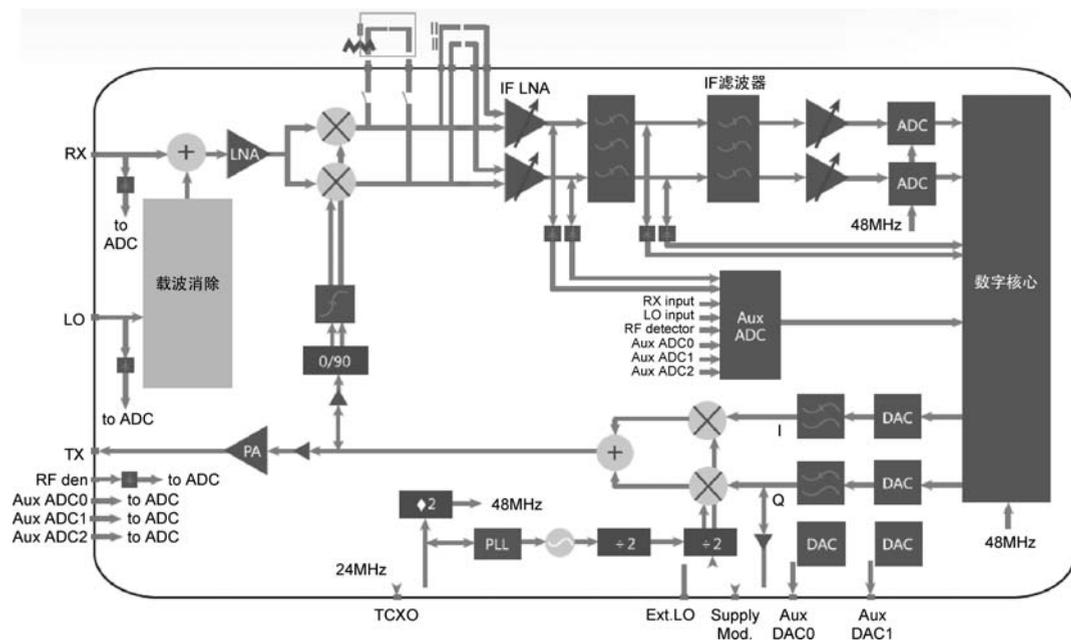


图 5-33 Indy R2000 芯片框图

R500 芯片其实就是 R2000 芯片的简化版,其基本参数完全相同,晶圆也是同一颗,只是在封装测试时在固件中锁死载波抵消功能,并在芯片封装时去掉了与载波抵消相关的引脚的连接。

## 3. Indy R2000 载波抵消

5.2.2 节已经介绍了载波泄漏消除技术的实现方式,此处针对 R2000 芯片的载波抵消电路展开剖析。图 5-34 所示为 R2000 芯片内部载波抵消电路示意图。载波抵消电路是在芯片内的一个信号相加的电路,通过产生反向的载波,与接收端的泄漏载波相互抵消,从而抑制载波泄漏的大小。该电路实现方式为:

- 通过抽样耦合器从芯片的发射端引出一路参考信号。
- 将参考信号通过一个无源、低噪声的  $90^\circ$  多相位滤波器,输出为 4 路信号:  $+I$ 、 $-I$ 、

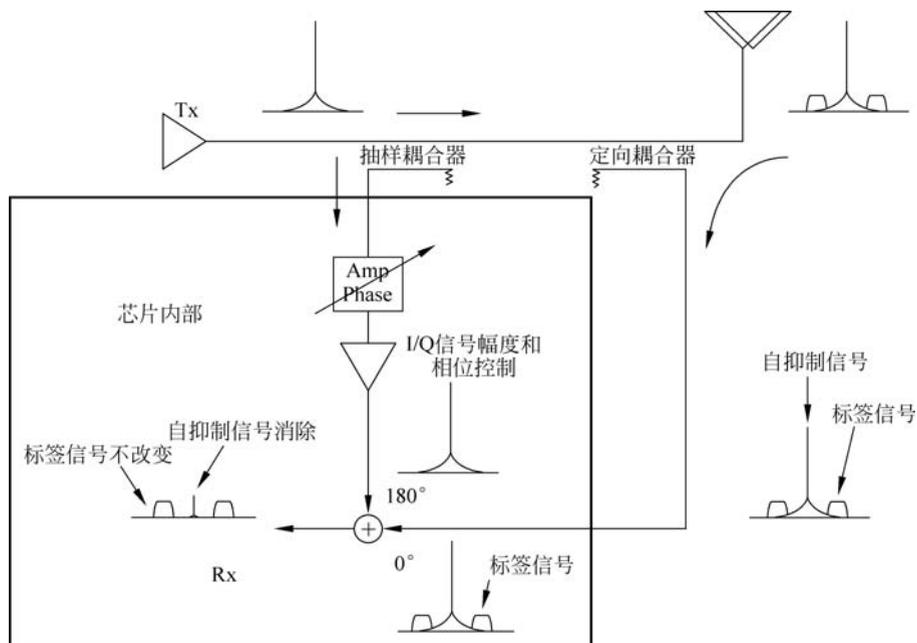


图 5-34 R2000 芯片内部载波抵消电路

$+Q$ 、 $-Q$ 。

- 通过调整这 4 路 I/Q 信号的大小,可以实现一个与接收机泄漏载波大小相同、相位相差  $180^\circ$  的信号。通过两个信号相加后(载波抵消后)的信号强度判断是否达到载波消除的预期。
- 理论上,这个抵消信号具有与接收到的泄漏载波相同的相位噪声,当两个信号抵消时,系统的噪声(发射机自带再生)也会相互抵消,因而有效信号的信噪比也会有所提升。

该电路存在如下缺陷:

- 由于抵消信号是从发射电路中耦合出来的,其信号强度不会特别大,因此对于很大的载波泄漏信号无法进行有效的载波消除。
- 调整 4 路 I/Q 信号的大小产生抵消信号的过程需要经过多次尝试,尝试的次数越多抵消效果越好,但是消耗的时间越长,需要在载波消除效果和扫描时间中寻找折中点。
- 4 路 I/Q 信号的精度是有限的,精度越高可以产生相位与幅度更匹配的抵消信号,但其精度与成本及扫描时间相关,因此也需要寻找折中点。

在上述讨论中,I/Q 信号的精度、载波抵消的响应时间等问题都需要折中考虑,经过对市场需求的理解,Impinj 给出了一套快速寻找抵消信号的算法。R2000 芯片将输出 4 路信号:  $+I$ 、 $-I$ 、 $+Q$ 、 $-Q$  做 4 比特量化,每个信号的大小为  $0\sim 15$ ,因此整个复频域空间共有

$31 \times 31 = 961$  个点。只要在这 961 个点中尝试,可以找到相对最合适的抵消信号,此参数的选择是经过折中考虑的结果。

为了提高寻找效率,R2000 给出了一套快速寻找匹配点的算法,如图 5-35 所示,首先在复平面内粗略扫描一遍,寄存器会记录下每个扫描点对应的加法器后的功率计度数。粗略扫描结束后从寄存器中找到度数最小的点,并记录下来。下一轮扫描为详细扫描,将围绕刚刚记录下的点周围  $3 \times 3$  的格子进行扫描(矩阵扫描),同时记录在寄存器中,寻找新的度数最小点。如果新的度数最小点不是上一个度数最小点,则进行下一轮详细扫描,继续对周围  $3 \times 3$  的格子中未扫描的点进行扫描,直到无法找到新的最小点,结束扫描。通过上述算法不必对整个星座图遍历一遍,可以大大提升效率。当然读者也可以通过自己的算法减小扫描时间。

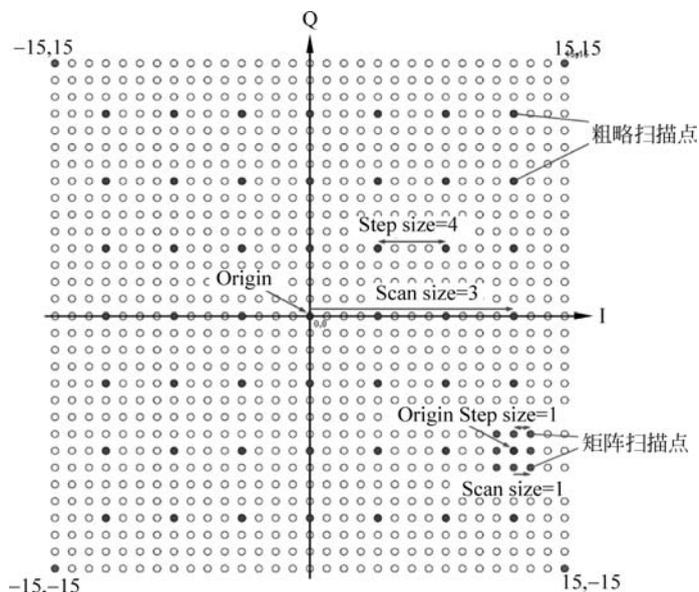


图 5-35 复频域快速匹配点的算法

当 R2000 采用 3MHz 的数据采样频率实现 SJC 校准,且针对每个点的采样次数为 16 和 8 个样本,采样时间为  $5.3 \mu\text{s}$  和  $2.6 \mu\text{s}$ 。执行一次粗略全扫描共需要 49 次,因此需要  $392 \mu\text{s}$ 。一个  $3 \times 3$  矩阵扫描时间为  $72 \mu\text{s}$ 。为了获得更好的载波抵消效果,最好重复多次寻找合适的匹配点。在实际应用中,每次阅读器发出命令之前,都会先启动 SJC 电路完成载波消除。

#### 4. Indy 芯片使用架构和开发

如图 5-36 所示为 Indy 芯片的使用架构图,图中阅读器模块由 Indy 阅读器芯片、ARM7 处理器(MCU)、功率放大器和隔离器件组成。其中,ARM7 处理器中下载了 Indy 芯片的固件,包括 Gen2 协议,射频控制和接口等,通过调用 Indy 芯片的寄存器控制上述功能。主机

通过 USB 或串口与 MCU 相连,通过 API 控制阅读器模块工作。

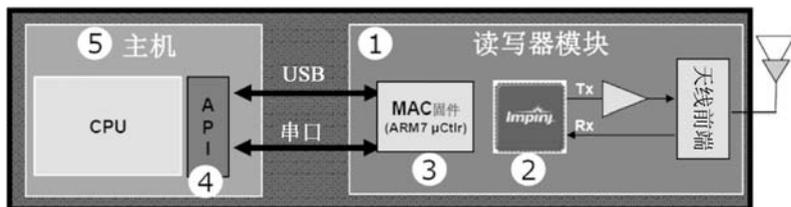


图 5-36 Indy 芯片的使用架构图

如图 5-37 所示为 Indy 芯片的固件架构图,该程序代码在 ARM7 芯片中,其中包括:

- 控制相关内容(Flash、GPIO、定时器、串口、调试);
- 状态机管理;
- Indy 寄存器接口(SSP)其中包换 Gen2 协议和射频控制模块;
- 固件升级模块;
- 主机寄存器和命令逻辑。

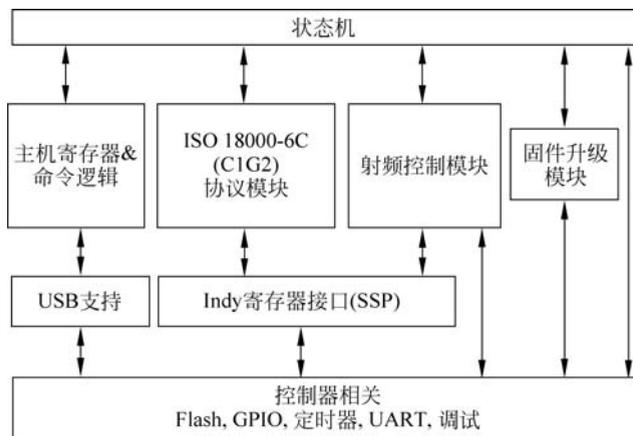


图 5-37 Indy 芯片的固件架构图

ARM7 固件内部 Flash 分 3 块,分别是:

- Bootloader,提供系统的恢复和升级机制。
- MAC 固件,管理调制解调器和主机接口寄存器。
- OEM 配置,静态设置寄存器,包括区域设置、主机接口设置、校准数据和板级诊断选项。

## 5.2.5 带有特殊功能的阅读器

4.3.5 节介绍了多种标签芯片的特殊功能,这些特殊功能中的大部分都需要阅读器的命令配合。本节主要介绍两种创新的阅读器功能,分别是接收信号强度(RSSI)处理功能和



视频讲解

相位列阵定位功能。

### 1. 接收信号强度(RSSI)处理功能

市场上主流的阅读器在盘点标签时,不仅可以获得标签的 EPC 数据,同时还会获得该标签的信号强度。RSSI(Received Signal Strength Indicator)是接收信号的强度指示,它的实现是在反向通道基带接收滤波器之后进行的,体现为基带 I、Q 信道功率积分得到的瞬时值。当信号小于灵敏度或遇到干扰时则 EPC 无法被解调出来,因此 RSSI 的值一定大于灵敏度。

#### 1) RSSI 强度过滤

RSSI 的数值越大表示信号越强,当使用同样的标签在辐射场中时,RSSI 越大可以解释为标签距离阅读器天线越近。因此可以通过 RSSI 的信号强度判断标签与天线距离(具体计算方法可以参照 2.3.3 节),从而实现过滤功能,如图 5-38 所示,将阅读器收到的信号强度根据一定特征分类,并选中其中的一类标签进行操作。如在一些近距离识别的应用场景中,远处堆放的标签有时候会被识别到,影响应用管理。这时,可以通过采用近距离过滤的功能。此时只有信号大于 $-40\text{dBm}$ 的标签可以被识别,远处的干扰标签就可以被滤除掉。

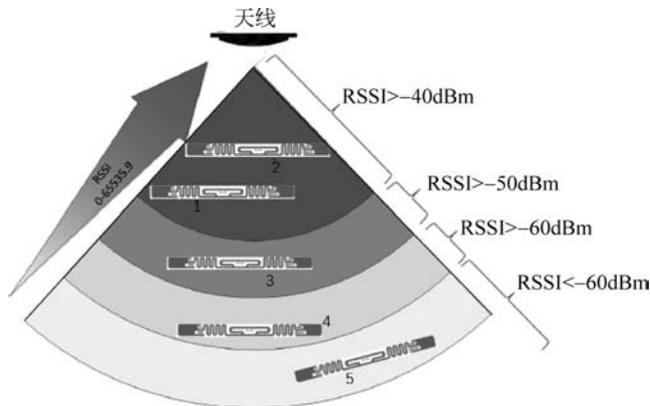


图 5-38 RSSI 强度过滤示意图

在实际应用中,通过 RSSI 过滤的应用有不少缺陷,主要是由于 RSSI 与标签的距离只有在理想状态下才能保证对应关系,主要是由如下几个问题引起的:

- 标签的一致性较差,标签生产时就存在一致性问题,且不同的标签灵敏度和反向散射的调制深度也不同,尤其是当标签贴放在不同物体上时,阻抗失配状况无法获得。
- 阅读器的灵敏度有限,在阅读器计算 RSSI 信号强度的时候会受到载波泄漏和直流偏移的影响,所以标签的 RSSI 会有一定的误差。
- 阅读器天线辐射与标签的耦合,即使阅读器天线采用圆极化天线,当标签垂直于天线平面时,则标签收到的信号强度会大幅下降甚至无法工作。

因此只是靠 RSSI 来判断标签的距离的确会存在不少误差。在利用 RSSI 的时候有几个窍门,对于常规标签正面识别时,RSSI 读数非常大,如果大于 $-40\text{dBm}$ ,那么一般标签都

很近；RSSI 读数非常小时，如果小于 $-70\text{dBm}$ ，那么标签一般很远。RSSI 读数很大的情况很容易理解，只有正向和反向损耗都很小才能有大的 RSSI；同理，只有在正向和反向损耗都很大的时候才能有很小的 RSSI。而有一些标签虽然距离天线不远但由于阻抗失配正向损耗很大，但其反向损耗不大，因此不会落在 RSSI 很大或很小的区间。

如果只是分析一个固定的标签，可以通过 RSSI 分析天线的辐射场区内的信号强弱变化。这一点对于现场测试非常有用，在没有便携功率计测试时，可以使用一个固定的标签摆放在不同的位置通过阅读器获得不同位置的 RSSI 信号强度数据，绘制出一张辐射信号强度分布图(6.1.3 节有辐射场图的相关介绍)。

## 2) 速度及方向过滤

由于可以通过 RSSI 计算标签与阅读器天线之间的距离  $s$  (计算方法可以参照 2.3.2 节)，RSSI 越大对应的  $s$  越小(距离近信号大)；同理，RSSI 越小距离越远。多次采集数据后获得连续时间内的多个  $s$ ，可以对  $s$  求导计算标签的速度  $v$ 。如图 5-39 所示，一个静止的标签，其 RSSI 的强度几乎保持不变，因此其速率表现为 0；当一个标签靠近天线时，其信号强度会变大，通过公式计算的  $s$  会变小，因此将标签向靠近天线运动的方向记为方向负(-)，同理远离天线的方向为方向正(+)。当一个标签从天线辐射场区外进入场区内再离开场区，则获得的标签的 RSSI 变化为先变大再变小，速度变化为先负方向，再正方向。

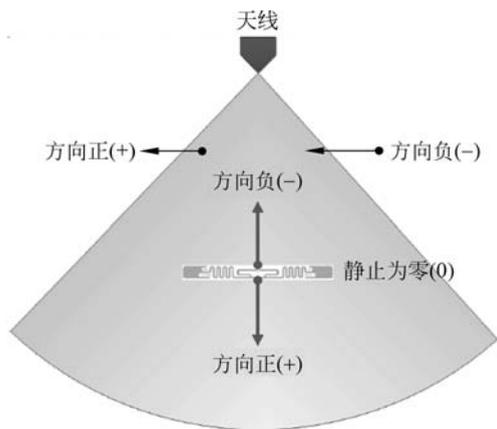


图 5-39 RSSI 方向判断示意图

在实际应用中，可以充分利用速度方向的特性，因为这个特性不会因为环境差异而发生变化，准确度非常高，只有在极少的情况下由于墙面或金属反射引起方向判断错误。通过 RSSI 速度方向的判断对于仓库的进出库管理等应用效果显著，尤其是配合具体的速度判断。如图 5-40 所示，不同移动速度的标签可以通过 RSSI 的变化速度展现出来，在快速进出库的叉车应用中，即使库房中有干扰标签的信号由于反射进入识别区域内，由于叉车内的物品标签具有相同的速度特性，而反射标签不具备该特性，从而可以过滤掉干扰标签。

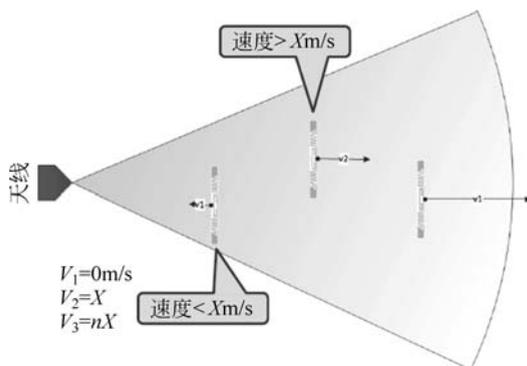


图 5-40 RSSI 速度判断示意图

### 3) RSSI 行为分析

在传送带的快速设备场景中,由于环境很难控制,因此无法实现传送带上的阅读器与标签一对一识别,许多时候阅读器都可以识别到传送带上前后多个标签,无法判断哪一个正是上方的标签。当采用 RSSI 作为判断手段时,可以通过“顶点”判断的方式确定哪一个标签是当前位置的标签,如图 5-41 所示。尤其是面对流水线上的标签一致性不同的情况,虽然每个标签的信号强度不同,但是它们的“顶点”是相同的。

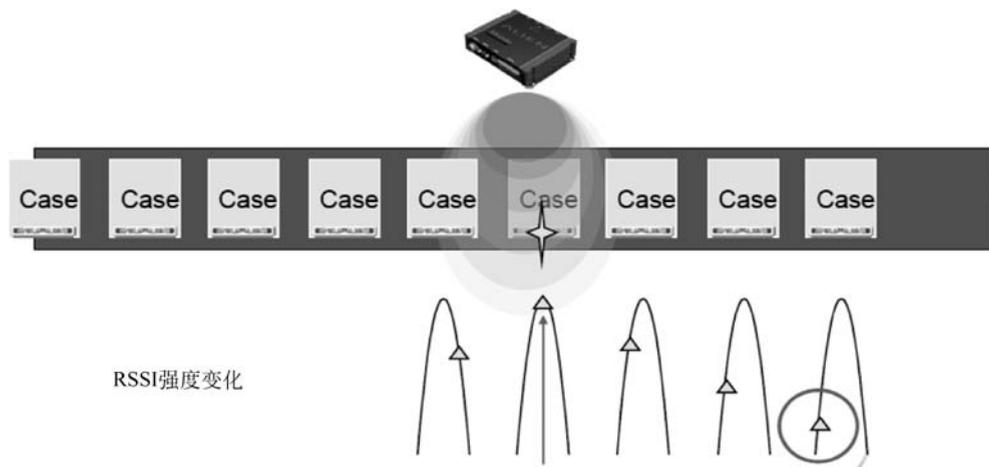


图 5-41 判断标签位置

这种“顶点”识别的方案在物流包裹分拣、单品贴标、流水线写标等场景中有很大帮助。

通过 RSSI 的数据分析还可以实现对零售客户行为的分析,该技术称为 RFID“天眼”。顾名思义,就是将超高频 RFID 阅读器天线放置在使用了电子标签的零售店铺的天花板上,并不断扫描覆盖区域的标签,相当于有一双眼睛一直看着这些标签。当有人经过时,人会遮挡或反射阅读器的电磁波,引起阅读器收集到的标签 RSSI 变化,经过 AI 学习,很容易判断出顾客的行走路径和停留时间,以及物品被拿起或带走等行为。如图 5-42 所示为“天眼”覆

盖下的 3 个标签 RSSI 的变化曲线,从中可以判断出:有顾客经过、顾客离开、A 物品被拿起来以及 A 物品被带走。

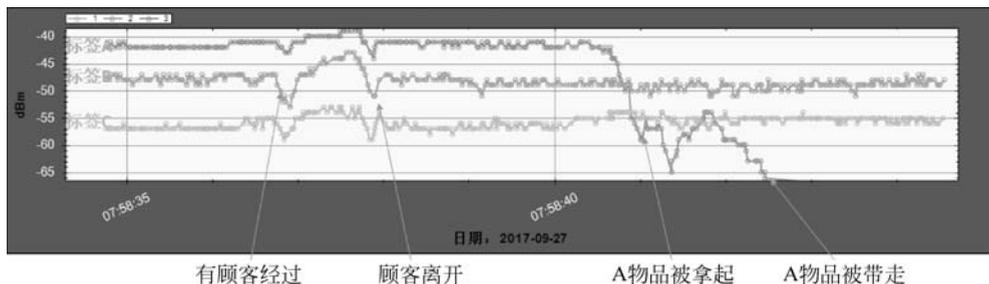


图 5-42 RSSI 数据分析曲线

至今,已经有多家超高频 RFID 厂商正在研究“天眼”技术,且已经有一些成功的试点,虽然技术还没有完全成熟,存在一定误判,但有不少的指导意义,尤其给新零售的发展开辟了一条新的道路。

## 2. 相位列阵天线

### 1) 超高频 RFID 相位列阵天线

相位列阵天线又叫相控阵天线,指的是通过控制阵列天线中辐射单元的馈电相位来改变方向图形状的天线。控制相位可以改变天线方向图最大值的指向,以达到波束扫描的目的。可以简单地理解为,传统的天线只有一个固定的辐射图,而列阵天线可以有多个不同方向的辐射图。当超高频 RFID 系统中使用了相位列阵天线后,可以将一个天线变成多个不同方向的天线,如图 5-43 所示为一个带有相位列阵天线的网关辐射图,原有的天线主瓣辐射轴  $\theta = 0^\circ$ ,对列阵天线中指定辐射单元进行相位调整后,其主瓣辐射轴会发生偏转,最大可以偏转  $45^\circ$ 。

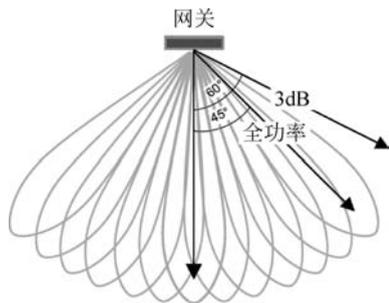


图 5-43 相位列阵天线的网关辐射图

采用图 5-43 方案的相位列阵网关,对比传统方案,覆盖范围大幅增加,原有的 3dB 辐射角度为  $30^\circ$ ,现在变为  $120^\circ$ 。

相位列阵网关具体工作时可以理解为一个单端口阅读器变成一个多端口阅读器(相位存在多少种组合对应多少端口),原来单端口的阅读器只能接一个天线,辐射范围固定,而多端口阅读器可以接许多个天线,且每个天线辐射的范围不同,这个多端口阅读器可以根据需求选择需要扫描的区域启动对应的端口发射信号通过对应的天线覆盖指定的区域。

不过相位列阵网关也存在自身的问题,虽然其覆盖范围比传统的增大了很多,但需要不断地切换相位进行扫描,因此完成整个区域的扫描时间是过去的几十倍。若标签的数量较多则扫描时间会更长,就存在遗漏运动标签的情况。相位列阵网关的另外一个缺点是其设

计和开发成本较高,如果只是为了增加覆盖区域,可以直接采用两个或多个天线辐射覆盖的方法,其覆盖的区域一般大于单个相位列阵网关的区域。只有在天线安装空间有限的情况下才会用单个相位列阵网关替代多天线系统。

## 2) 相位列阵天线定位功能

市场上常见两款相位列阵网关: Impinj 的 xSpan 和 xArray。如图 5-44 所示为 xArray 的波束方向图, xArray 为一个正方形的相位列阵网关。当 xArray 悬挂在屋顶时,其覆盖区域为圆形,共 8 个扇区 52 个辐射区域,可以简单地理解为一个 52 端口的阅读器连接着 52 个不同辐射区域的天线。

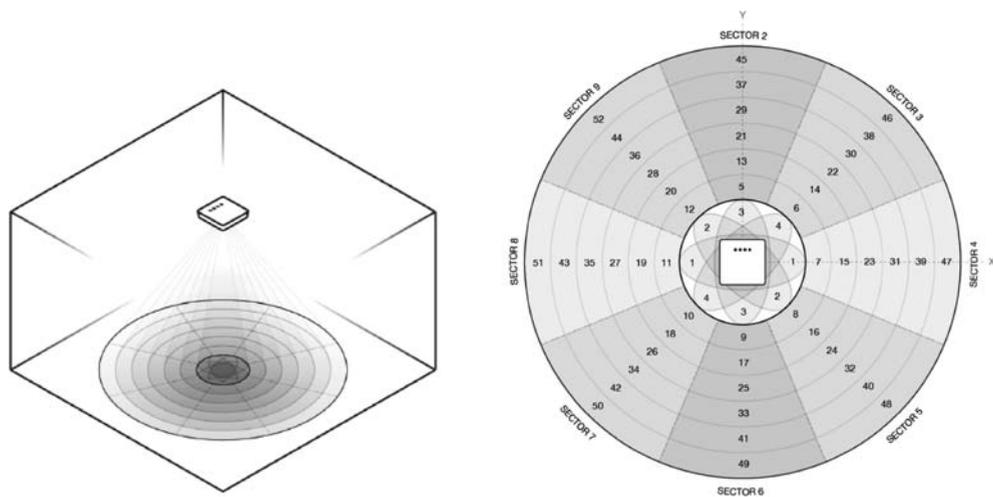


图 5-44 xArray 的波束方向图

如图 5-45 所示为 xSpan 的波束方向图, xSpan 为一个长方形的相位列阵网关。当 xSpan 悬挂在屋顶时,其覆盖的区域为一个长方形,共 13 个辐射区域,可以简单地理解为一个 13 端口的阅读器连接着 13 个不同辐射区域的天线。

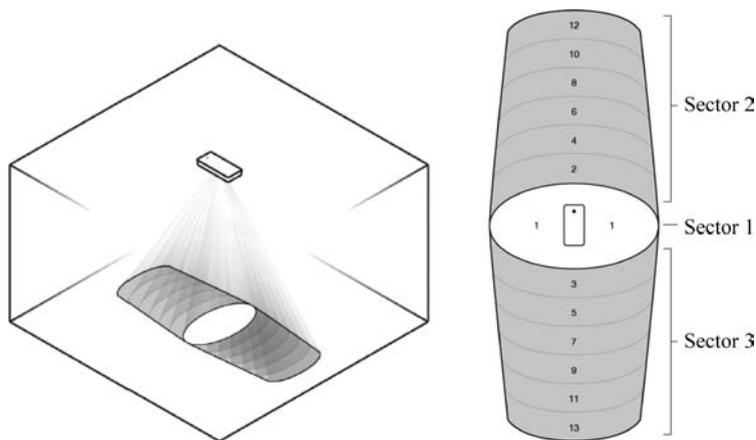


图 5-45 xSpan 的波束方向图

xSpan 网关可以被看作为 xArray 的简化版,当 xArray 的相位只工作在扇区(Sector)6 和扇区 2 时,其覆盖区域与 xSpan 相同。可以理解为 xArray 的 3 辐射扇区对应 xSpan 的 1 辐射扇区; xArray 的扇区 2 对应 xSpan 的扇区 2; xArray 的扇区 6 对应 xSpan 的扇区 3。因此当 xArray 只开启 3 辐射区的扇区 2 和扇区 6 内的所有辐射区时,实现的辐射覆盖波束方向与 xSpan 几乎相同。

实际环境中相邻编号的辐射区之间是相互重叠的,当多个编号的辐射区内都识别到同一个标签时,可以通过 RSSI 大小计算出标签的具体位置,计算过程为 RSSI 差转化为距离差,再通过多点定位算法实现。当然标签大概率落在 RSSI 值最大的辐射区内。

相位阵列网关最大的作用是定位,判断物品的位置和运动情况。如图 5-46 所示为 xSpan 和 xArray 可追踪的标签运动方式。其中, xSpan 只能追踪一个轴方向的标签运动,而 xArray 可以追踪多个不同方向运动的标签。

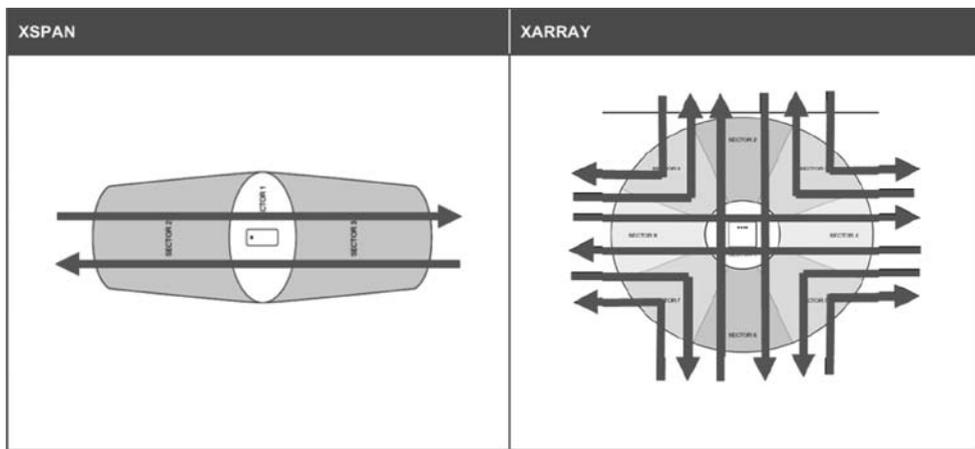


图 5-46 相位阵列网关方向追踪

为了保证追踪物体的实时性,需要保证天线切换的速度足够快,即使每次切换 50ms, xArray 将所有辐射区扫描一遍也需要 2.5s 的时间。因此在物品追踪的应用中,应保证场内的标签数量。如果需要高精度追踪,最好标签数量不超过 20 个;如果要实现高速追踪,标签数量要求不超过 50 个。如果需要追踪物体,则需要将 Session 设置为 S0;如果需要大批量盘点,则 Session 设置为 S1。

在实际测试中,由于多种原因,会存在一定的误差,在没有遮挡和反射的理想环境中实测数据为:有 85% 的概率误差在 1.5m 之内。在复杂环境中该误差会更大,尤其是零售商店等具有货架、墙壁反射影响以及标签的堆叠和摆放高度都会对测试精度产生很大影响。不过对比传统的技术,采用相位阵列网关对于物品定位和寻找大大提高了精度和便利性。

### 3) 相位阵列天线技术实现方法

虽然 xArray 具有 52 个辐射区域,但其内部并非有 52 个天线,实际上适合超高频 RFID 工作的天线尺寸即使最小化也无法将 52 个天线放置在 xArray 内。如图 5-47(a)所示为笔

者开发制作的一款 60 辐射区的 9 元阵相位列阵天线的仿真模型图,该天线可以实现与 xArray 相似的特性,其辐射场特性如图 5-47(b)所示。

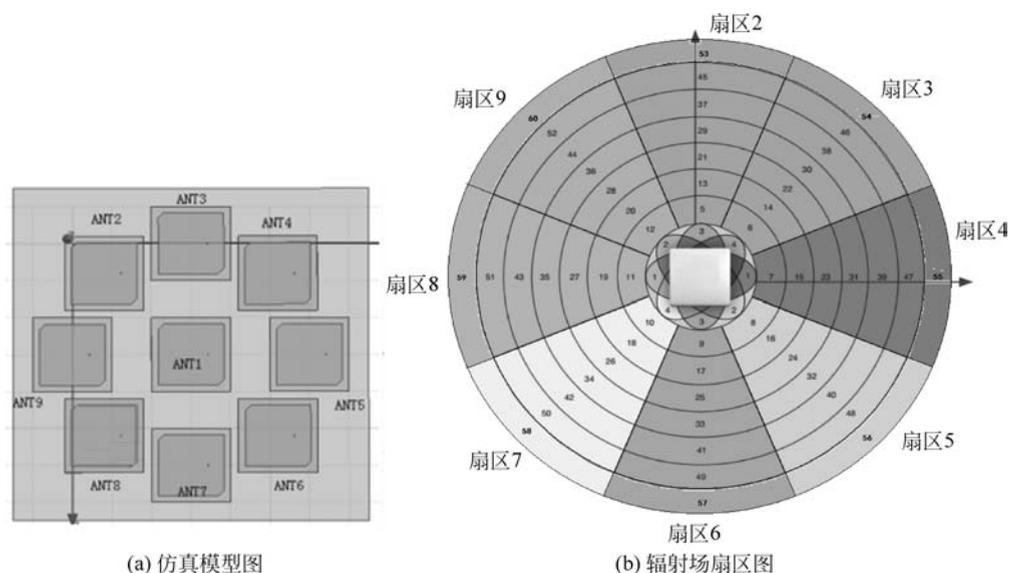


图 5-47 9 元阵相位列阵天线设计方案

图中 5-47(a)共有 9 个小天线,每个小天线都是可以独立工作的超高频 RFID 天线,其中小天线 1(ANT1)在整个天线阵列的中间,因此它的相位不需要改变。列阵天线工作时,以 ANT1 为中轴线,配合对称的两个天线形成一组三元阵天线,覆盖两个扇区。ANT3、ANT7 和 ANT1 组成一组三元阵覆盖扇区 2 和扇区 6; ANT2、ANT6 和 ANT1 组成一组三元阵覆盖扇区 9 和扇区 5; ANT5 和 ANT9 和 ANT1 组成一组三元阵覆盖扇区 8 和扇区 4; ANT8、ANT4 和 ANT1 组成一组三元阵覆盖扇区 3 和扇区 7。通过调节一组三元阵中两个对称小天线的输入相位,可以实现天线主瓣辐射轴  $\theta$  的变化,从而实现不同辐射区域。比如 ANT3 和 ANT7 相位输出共有 15 种不同的相位组合(ANT1 保持  $0^\circ$  相位不变),从而实现了辐射区域 53、辐射区域 45、辐射区域 37、辐射区域 29、辐射区域 21、辐射区域 13、辐射区域 5、辐射区域 3、辐射区域 9、辐射区域 17、辐射区域 25、辐射区域 33、辐射区域 41、辐射区域 49 和辐射区域 57 的扫描覆盖。当 ANT3 的相位为负而 ANT7 的相位为正时,辐射偏扇区 2,且相位差越大天线主瓣辐射轴  $\theta$  值也越大;同理,当 ANT7 的相位为负而 ANT3 的相位为正时,辐射偏扇区 6,且相位差越大天线主瓣辐射轴  $\theta$  值也越大。

上述 9 元阵相位天线的实现主要靠一个可控的相位电路实现,如图 5-48 所示,为该 9 元阵相位天线的电路实现方法。阅读器单端口输出的射频信号通过不等分功分器将能量分为 3 份,分别通往配到阵元 1(ANT1)、阵元 2 到阵元 5 中的一个以及其对称位置的阵元 6~阵元 9 中的一个,形成一组三元阵。数控相移单元可以调节相位的变化,其范围是  $150^\circ$ ,通过调节相位实现主瓣辐射轴的变化。如果开发与 xSpan 类似的网关可以采用同样的设计

方案,只需要选择阵元 3、阵元 1 和阵元 7 即可,电路基本相同,省去两组单刀四掷开关即可。

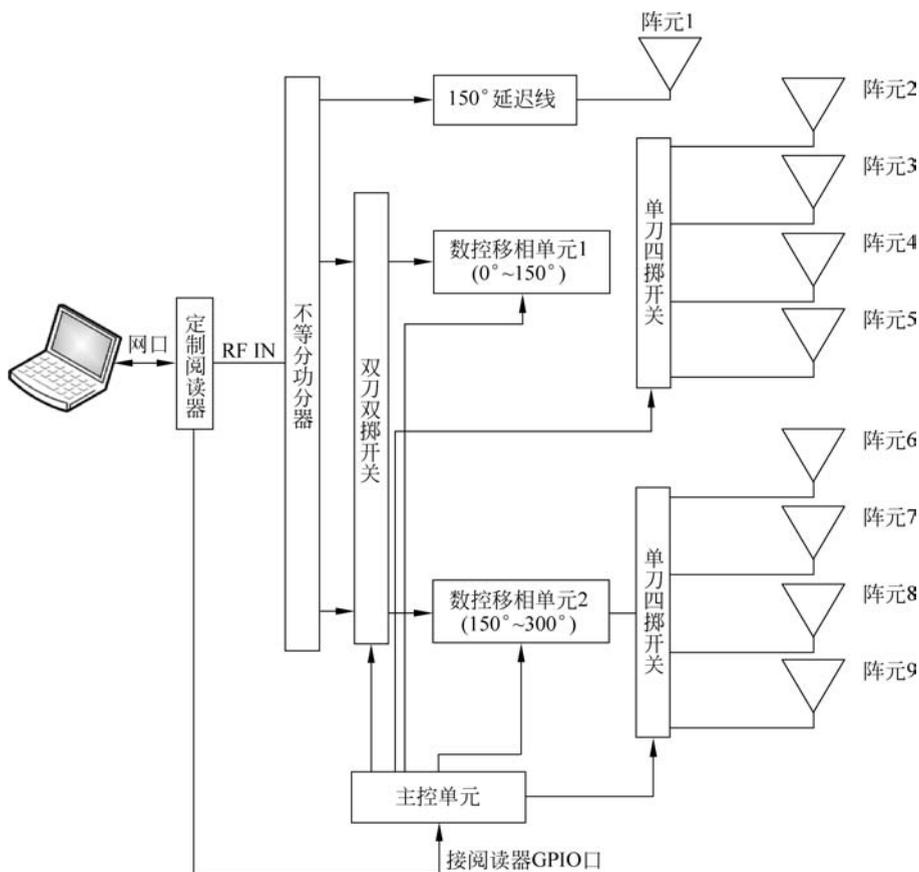


图 5-48 9 元阵相位天线的电路实现图

系统需要通过阅读器的 GPIO 管理主控模块实现天线的切换和相位的调节。由于主瓣辐射轴  $\theta$  变化时,天线与地面标签的距离会发生变化  $L = H / \cos\theta$ ,其中,  $H$  为天线与地面的距离,  $L$  为标签与天线的距离,因此  $\theta$  越大时天线距离标签的距离就越远,需要对阅读器输出功率进行校准,辐射区域为外围圈时需要增加输出功率进行补偿。

相位列阵天线的种类有很多,可以根据具体需求进行设计,需要考虑的主要参数为识别精度和追踪的实时性。在相同的覆盖范围内,辐射区域越多定位精度相对越高,实时性响应就越差,同理,辐射区域少的系统定位精度就越差,实时性响应就越好,比如单天线系统就有最好的实时性,不过无法实现定位功能。当然并不是辐射区域越多定位精度就越高,高精度定位可以通过不同区域的 RSSI 进行精确定位,有时候少量辐射区获得更高准确性的 RSSI 可以计算出更好的效果。

## 5.3 阅读器天线及配件

阅读器的系统中除了阅读器外,还需要天线和多种射频器件,最终配合实现项目,因此这些配合阅读器的射频器件也具有相当重要的作用。认识和了解这些天线和器件对于项目设计和实施非常重要。

### 5.3.1 阅读器天线

阅读器天线种类很多,且在 2.2 节中也有不少讲解,本节从应用入手,分析多种有特色的阅读器天线。

#### 1. 天线的近场与远场分析

通常,天线周围场,划分为 3 个区域:无功近场区、辐射近场区和辐射远场区,如图 5-49 所示为这 3 个区域的示意图,其中:

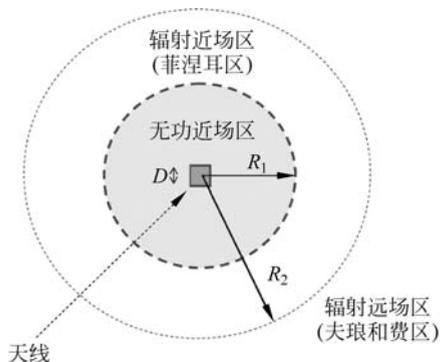


图 5-49 天线场区分布示意图

- 无功近场区——又称为电抗近场区,是天线辐射场中紧邻天线口径的一个近场区域。在该区域中,电抗性储能场占支配地位,该区域的界限通常取为距天线口径表面  $R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$  处,其中, $D$  为天线口径尺寸, $\lambda$  为波长。从物理概念上讲,无功近场区是一个储能场,其中的电场与磁场的转换类似于变压器中的电场、磁场之间的转换,是一种感应场。
- 辐射近场区——超过电抗近场区就到了辐射场区,辐射场区的电磁场已经脱离了天线的束缚,并作为电磁波进入空间。按照与天线距离的远近,又把辐射场区分为辐射近场区和辐射远场区。在辐射近场区中,辐射场占优势,并且辐射场的角度分布与距离天线口径的距离有关。该区域的界限通常取为距天线口径表面  $R_1$  与  $R_2$  之间的部分,其中, $R_2 = \frac{2D^2}{\lambda}$ 。对于通常的天线,此区域也称为菲涅耳区。



- 辐射远场区——通常所说的远场区,又称为夫琅和费区。在该区域中,辐射场的角分布与距离无关。严格地讲,只有离天线无穷远处才能到达天线的远场区。一般情况下,辐射近场区与远场区的分界距离为  $R_2 = \frac{2D^2}{\lambda}$ ,  $R_2$  的外围区域为远场区。

一个天线在近场表现为磁场特性,其磁场强度与距离的三次方成反比;天线在远场区域为电场和磁场的相互转换过程,给标签供电和通信的主要为电场,其电场强度与距离的二次方成反比。因此可以看出天线的磁场衰减速度非常快,而电场可以辐射到很远的地方。当需要一个远距离工作的系统时,此时要求阅读器的天线和标签的天线都有较好的远场辐射特性;当需要一个只允许近距离工作的系统时,需要保证阅读器天线和标签天线至少有一个是远场辐射特性较差的,当然,如果两个天线在远场辐射特性都较差,则是一个完美的近场通信系统。由于近场磁场强度随距离三次方衰减,因此很容易出现一个识别范围的界限,这个界限对于不同标签差异只有几厘米,而类似的系统在远场的识别范围界限差异可能会超过 1m。近场天线和远场天线在近场磁场辐射特性是相似的,不同点在于近场天线在远场的辐射特性较差。如图 5-50 所示为一个微带天线的磁场辐射图,可以看到,靠近天线 10cm 之内的区域磁场辐射较强,之后磁场强度迅速降低。

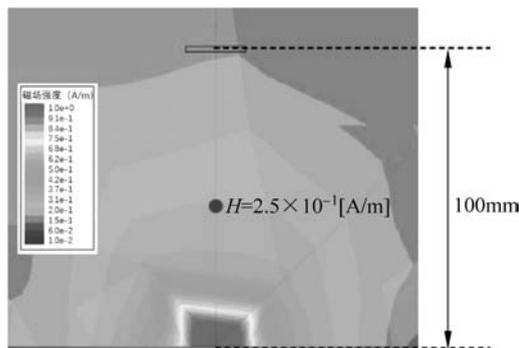


图 5-50 微带天线的磁场辐射图

下面通过一个测试来验证近场与远场的区别,在一个系统中,阅读器天线为一个口径为 25cm 的远场微带天线,工作在 920MHz 频率,标签有 4 种,分别是 A、B、C、D,如图 5-51 所示。其中,A 标签是一个闭合小环,远场特性较差,B、C、D 3 款标签具有一定远场特性。

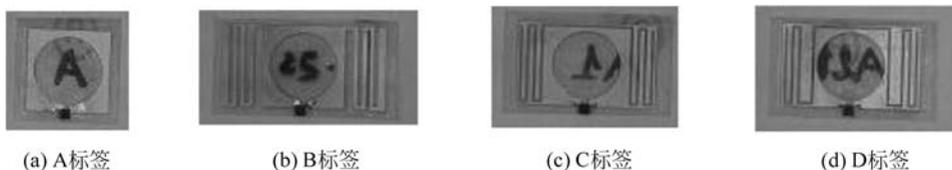


图 5-51 4 种测试标签

分别在空气中和装满水的塑料瓶表面测试其工作距离(工作频率为 915MHz),由于水的介电常数是  $\epsilon_r = 81$ ,而空气的  $\epsilon_r = 1$ ,因此标签贴在水瓶表面后,其远场特性会发生很大的变化,可以理解为可以获得的远场能量几乎为零。其测试结果如表 5-2 所示,可以看到,A 标签在空气中和在水瓶表面的工作距离均为 30cm 左右,而另外 3 款标签在自由空间中的工作距离为 1~4m,而贴在水瓶表面后,工作距离只有 40cm 左右。经过计算该阅读器天线的近场区大小为:  $R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \times 0.25^2 \times 920 \times 10^6}{3 \times 10^8} = 38\text{cm}$ 。所有的 4 款标签的工作距离(水瓶表面)与阅读器的近场区域相似。

表 5-2 4 款标签在自由空间和水表面工作距离对比

标签类型	自由空间/cm	水平表面距离/cm
A 标签	33	26
B 标签	400	42
C 标签	120	40
D 标签	230	35

由上述的测试可以看到阅读器天线的近场辐射区与远场辐射区的分布。同时也可以发现,标签的电感线圈主要影响近场特性,偶极子天线部分影响远场特性。

## 2. 常见的近场天线方案

超高频 RFID 近场天线的目的就是让系统中的标签只能在近距离工作,犹如标签是纯近场标签。这和 HF 的工作原理是一样的,关键在于降低辐射近场区以及远场区的磁场。

HF 近场天线(实际上 HF 在 RFID 应用中只有近场工作模式),这主要是由 HF 的频率很低造成的,由于天线尺寸比波长短得多,其远场辐射特性非常差。而超高频的频率较高,很难抑制远场辐射特性,只能通过分段耦合、小尺寸设计、抑制表面波等技术手段实现近场特性。

### 1) 分段耦合近场天线

类似于 LF/HF 近场 RFID 系统,在超高频 RFID 近场阅读器系统中,近场天线也可以通过近场耦合的方式控制近场通信,其设计方式为一匝线圈。如图 5-52 所示为这个近场天线的仿真图,但通过仿真和测试发现,其近场辐射区域不均匀,在天线的中间位置有很大一片盲区。这是因为电流在天线周长上流动时相位会发生变化,而超高频的波长较短,当电磁波走了一段距离后其相位与之前的相差甚远,无法形成相同的磁场方向(HF 没有该问题的原因是 HF 波长较长,围绕周长即使多圈其相位几乎不变)。

对于上述相位变化问题,提出了一种电感耦合的机场天线设计思路:要求沿着环的电流相位一致,且在一个单一的方向流动,所以能产生强大和均匀的磁场分布。

为满足上述要求,提出了分段耦合天线,其在 PCB 上的印刷天线如图 5-53(a)所示。在笛卡儿坐标系中,在  $x$ - $y$  平面上方有一个 FR4 PCB 板。该天线由很多分段线和匹配短截

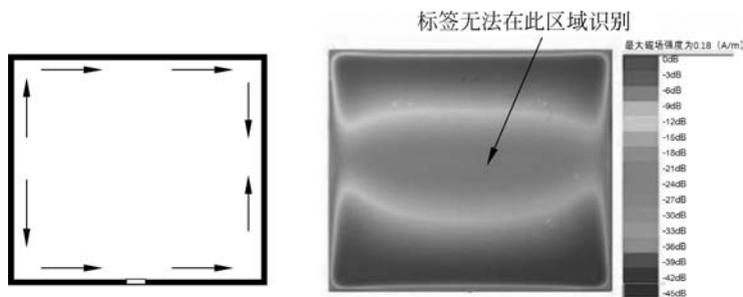


图 5-52 传统实线环天线的电流分布和磁场分布

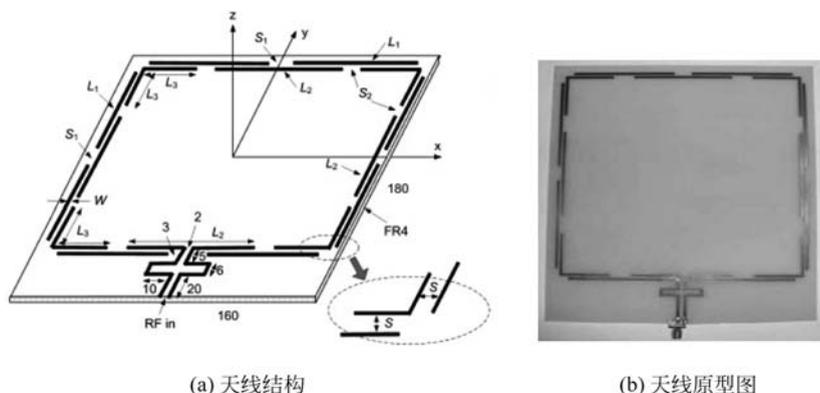


图 5-53 超高频近场 RFID 分段环天线图

线组成。其中匹配短截线相对于  $y$  轴对称,也印刷在 FR4 PCB 的同一边(厚度  $h=0.5\text{mm}$ , 相对介电常数为 4.4,损耗角正切  $\tan\delta=0.02$ )。分段耦合线段在与相连线段之间产生一个非常小的滞后相位,以至于电流流经分段线时,保持一个方向。换句话说,在分段环上的电流分布看起来是同步的。因此,即使改环为电大环,分段环天线产生的磁场仍是均匀分布的,如图 5-53(b)所示为天线原型。

如图 5-54 所示为分段耦合近场天线的仿真辐射图,可以看出,其天线内部的辐射非常均匀。

此类型天线非常适合近距离小型近场标签的批量识别,可以通过功率控制,稳定地调整近场标签的工作距离。虽然分段耦合近场天线有非常稳定的近场特性,但很难抑制其远场特性,无法实现对于一些远场标签的近距离控制。在识别近场标签时,若附近有远场标签,则很容易引起误读。

## 2) 小尺寸近场天线

实现近场天线的另外一个手段是天线的尺寸足够小,当其尺寸远小于波长时,其远场辐射特性会非常弱,而近场特性可以保留,且近场辐射区也很小。分段耦合近场天线存在远场辐射特性的缺点,可以通过小尺寸设计近场天线的方案消除掉。如图 5-55 所示为一个

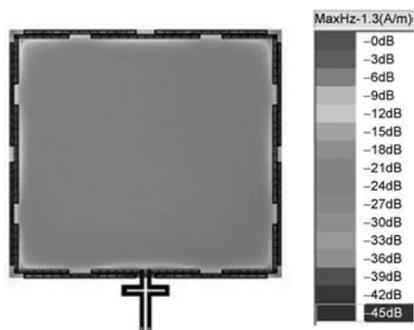
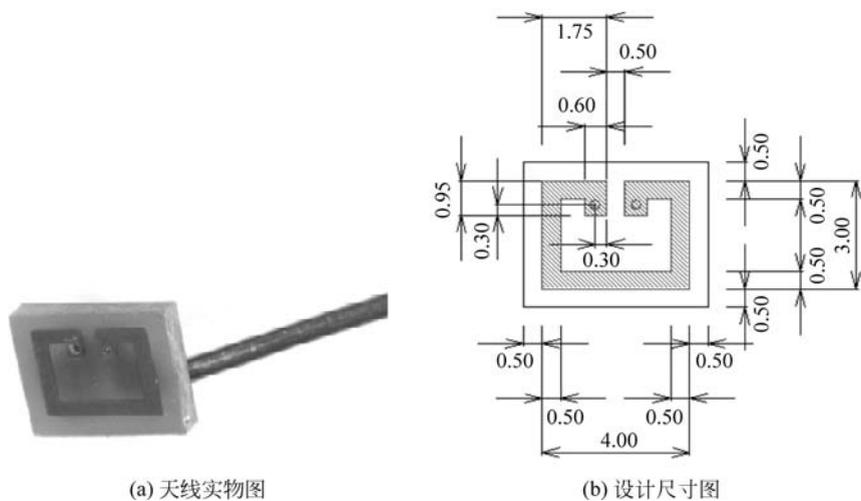


图 5-54 分段耦合近场天线的仿真辐射图

小尺寸近场天线。这个天线的大小为  $3\text{mm} \times 4\text{mm}$ ，其尺寸只有波长的  $1\%$  ( $922\text{MHz}$  频率，波长为  $325\text{mm}$ )。该小天线内部为一个闭合线圈，具有近场特性，由于超小的尺寸，远场特性很差。



(a) 天线实物图

(b) 设计尺寸图

图 5-55 小尺寸近场天线

小尺寸天线的空间有限，很难在天线上实现阻抗匹配，需要外接无源器件匹配到  $50\Omega$ ，否则阅读器会因为天线适配引起载波泄漏过大而无法工作。如图 5-56 所示为小尺寸天线的阻抗匹配电路，该阻抗匹配电路需要额外焊接一个电容  $C_1$  和一个电感  $L_1$ ，可以与馈线一起焊接在天线 PCB 的背面，从而节省空间。

其中， $C_1$  和  $L_1$  的数值是由天线的形状以及工作频率决定的，可以通过网络分析仪进行测试并选择合适的参数。

由于小尺寸近场天线的尺寸很小，其辐射覆盖范围也很小，无法同时识别多个标签。同样由于自身尺寸，近场辐射区大小  $R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \times 0.04^2 \times 920 \times 10^6}{3 \times 10^8} = 1\text{cm}$ ，尤其是针对小

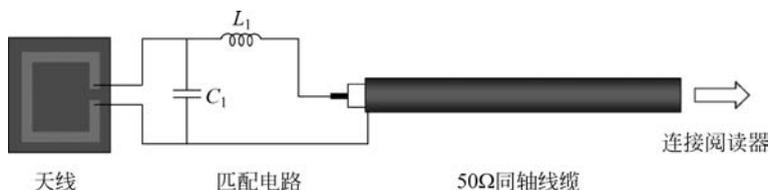


图 5-56 小尺寸天线的阻抗匹配电路

型近场标签,只有几毫米的工作距离,如图 5-57 所示。可以通过调整发射功率略微改变覆盖范围,但变化不大。

小尺寸近场天线适合一对一的应用场景,不容易受到外界标签和环境的干扰。尤其是具有超小型封装标签(见 4.2.2 节)的一些应用中,只有采用小尺寸近场天线配套才能完成识别。

### 3) 抑制表面波近场天线

市场上有一类近场天线需求非常特殊,应用于标签生产及测试设备,要求生产测试设备的 Inlay 快速行进的过程中,只能识别天线正上方的一个标签(测试、写标),而不识别到旁边的两个标签,如图 5-58 所示,一卷 Inlay 上两个标签的间距非常小,普通的近场天线无法如此精确地控制识别范围,而小尺寸近场天线因辐射范围太小,当 Inlay 在高速传送过程中由于振动,很容易离开原有的辐射覆盖区域形成漏读。再加上这些设备预留天线的空间很小,很难实现有效的屏蔽。这个天线既要高速稳定,又要辐射场覆盖范围刚刚好只有正上方的一个小区域,因此提出了 EBG 结构的抑制表面波的近场天线技术。

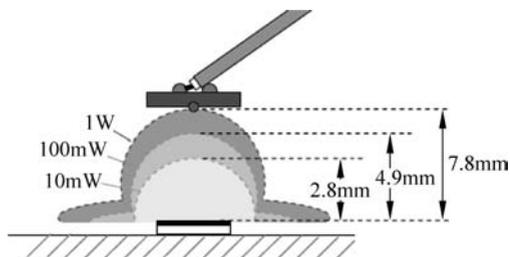


图 5-57 小尺寸天线的覆盖范围

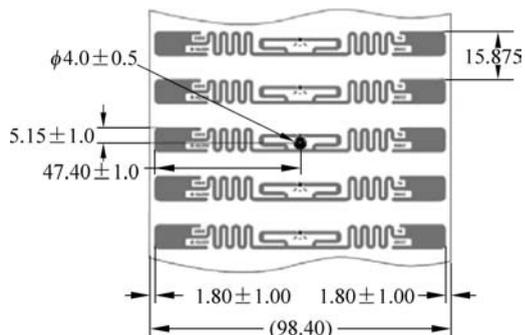


图 5-58 卷装 Inlay 尺寸图

EBG 即电磁带隙结构。电磁带隙材料也称为光子带隙材料,这种材料的特殊性在于:它能够在特定频率对反射波的相位进行特定的调制。由于其反射波的特殊性使得一般的偶极子天线以其为基板时仍可以正常使用。

如图 5-59 所示的蘑菇形 EBG 由如下几部分组成:两列中间有孔的金属贴片,双层电介质材料以及一个地板。其表面结构类似于一个集总环路。上表面相当于一个负载电容,一直通到地板处的孔洞则相当于一个电感。当电磁波向着它垂直入射时,其表面阻抗为:

$$Z = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (5-1)$$

其中,  $\omega$  是入射波频率,  $L$  是电感,  $C$  是电容。故当频率  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  时表面阻抗为无穷大。如此大的表面阻抗能够有效地抑制表面泄漏波。

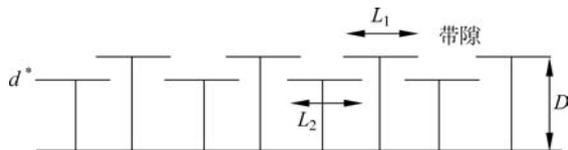


图 5-59 蘑菇形 EBG 结构

如图 5-60 所示为天线实物和辐射仿真图,可以看出其电场特性衰减非常快,且只有正上方的辐射主瓣,表面波的泄漏被有效地抑制了。

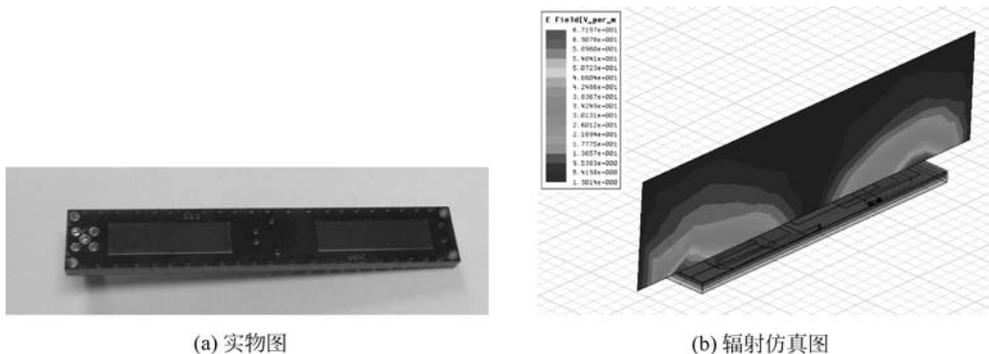


图 5-60 抑制表面波的近场天线

EBG 结构的抑制表面波的近场天线技术具有非常特殊的辐射特性,可以满足 Inlay 卷测试机的严苛要求。

### 3. 常见的远场天线

2.2 节介绍了关于远场天线的主要内容,本节针对应用介绍两类比较特殊的远场天线,分别是手持机天线、高增益天线和泄漏同轴电缆天线。

#### 1) 手持机天线

超高频 RFID 手持机经过十多年的发展,虽然操作系统面板等有了很大的变化,但其核心的阅读器模块和天线的变化并不大,总的来说有两大类,分别是带有辐射背板的天线和不带辐射背板的天线。

不带辐射背板的天线主要采用偶极子天线或偶极子的变形。早期的得逻辑(Psion Teklogix)的手持机就是采用该方案,如图 5-61 所示手持机顶部的小区域为天线区域,其内部是一个偶极子天线的变形。该天线为一个线极化天线,具有 2dBi 的方向增益。该天线的优点是设计和生产都很简单,且成本很低。这种天线的缺点是由于线极化所以使用时很不

方便,需要不停地转动手持机,寻找最好的角度,对于测试精度误差也很大,同时由于没有辐射背板,很容易被周围的物品影响,当手靠近天线时,天线的匹配会剧烈变化从而影响输入反射系数而大幅降低灵敏度。

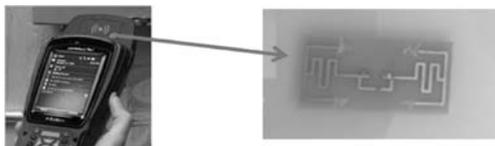


图 5-61 得逻辑手持机天线方案

为了解决线极化和抗干扰的问题,人们提出了采用微带天线的解决方案,由于手持机的尺寸受限,早期的中低端手持机设计中采用陶瓷天线。对于圆极化和抗干扰能力有所提升,但陶瓷天线自身问题非常多,包括圆极化特性很差,同一个标签面对天线旋转角度工作距离差异很大。陶瓷天线的量产一致性很差,阻抗和波束方向不一致。陶瓷天线的带宽也不好,还很重。上述的这些问题导致越来越多的公司开发小型的高性能手持机天线。常见的 5 种手持机天线如图 5-62 所示,其中:

- A 天线是一个四臂单极子天线,通过 3 个功分器将输入信号分为 4 路,能量平均分配到 4 个单极子天线,且 4 路信号相位都相差  $90^\circ$  (通过微带线实现相位差)。其底部的背板既可以增强方向增益,又可以减小环境干扰。其特点是阻抗性非常好,相位特性也比较好。
- B 天线与 A 天线很相似,只是没有采用功分器,通过微带线的方式实现功率分配,对比 A 天线,其 4 个单极子天线的功率有差异,圆极化特性受到影响。
- C 天线设计思路与 A 天线相同,不过在一块 PCB 板上实现,其带宽会稍差。
- D 天线设计思路与 A 天线相同,其所有部件都是采用 PCB 工艺组装焊接而成,组装对一致性会有影响。
- E 天线采用交叉偶极子天线设计,但并非圆极化天线,需要依靠模块的金属底板作为反射背板。

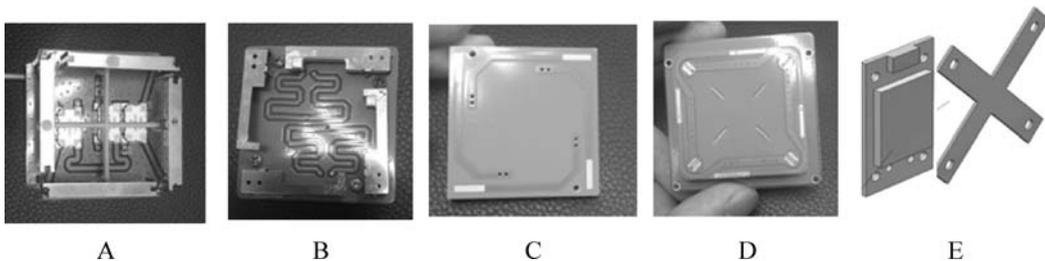


图 5-62 常见的手持机天线

这 5 款天线的对比如表 5-3 所示,手持机天线厂商可以根据客户需求设计适合自己的手持机天线。

表 5-3 手持机天线参数对比表

比较项目	A	B	C	D	E
增益	5	4	4	4	3
尺寸	2	3	4	3	5
设计难度	4	1	3	3	5
生产难度	2	4	5	3	5
成本	2	3	3	5	5
一致性	5	4	4	4	3
重量	3	4	2	5	5
带宽	5	3	2	5	3

评分标准为 1~5 分,其中 1 为最差,5 为最好。

### 2) 高增益天线

在超高频 RFID 应用系统中,有的特殊应用需要更远的工作距离(不考虑输出功率规范),最简单有效的方法是选择更高增益的天线。这是因为增加阅读器输出功率会引起载波泄漏影响灵敏度,单增加标签灵敏度会引起反向散射能量过小导致阅读器灵敏度受限。在超高频 RFID 系统中,一般认为,方向增益超过 9dBi 的天线都为高增益天线,其中常见的天线增益为 12dBi 和 15dBi。一般情况下,正方形的高增益天线为圆极化天线,长方形的高增益天线为线极化天线。

高增益天线的实现方式与相位列阵天线相似,是通过多个振子辐射的聚集从而实现其高增益的,对比相位列阵天线,只是系统无法通过相位变化引起主瓣辐射角度变化,该辐射角度是固定的。如采用两个 6dBi 的小天线作为振子,最大可以实现接近 9dBi 的高增益天线;同理,若使用 4 个 6dBi 的小天线作为振子,理论上最大可以实现 12dBi 的高增益天线。因此很容易估算一个高增益天线的尺寸。

高增益天线常应用于智能交通相关的领域,多数采用长方形的线极化天线。

### 3) 泄漏同轴电缆天线

泄漏同轴电缆(Leaky Coaxial Cable)又称漏泄同轴电缆,通常又简称为泄漏电缆或漏泄电缆,其结构与普通的同轴电缆基本一致,由内导体、绝缘介质和开有周期性槽孔的外导体 3 部分组成。电磁波在泄漏同轴电缆中纵向传输的同时通过槽孔向外界辐射电磁波;外界的电磁场也可通过槽孔感应到泄漏同轴电缆内部并传送到接收端。常用泄漏同轴电缆的频段范围为 450MHz~3GHz,适合现有的各种无线通信体制,应用场合包括无线传播受限的地铁、铁路隧道和公路隧道等。在国外,泄漏同轴电缆也用于室内覆盖。如图 5-63 所示为不同尺寸的几种泄漏电缆。

泄漏同轴电缆电性能的主要指标有纵向衰减常数和耦合损耗。

- 纵向衰减常数:衰减常数是考核电磁波在电缆内部所传输能量损失的最重要特性。普通同轴电缆内部的信号在一定频率下,随传输距离而变弱。衰减性能主要取决于



图 5-63 不同尺寸的泄漏电缆

绝缘层的类型及电缆的大小。而对于漏缆来说,周边环境也会影响衰减性能,因为电缆内少部分能量在外导体附近的外界环境中传播,因此衰减性能也受制于外导体槽孔的排列方式。

- 耦合损耗: 耦合损耗描述的是能量从电缆传播到外界天线或电路时发生的能量损耗,它定义为: 特定距离下,被外界天线接收的能量与电缆中传输的能量之比。由于影响是相互的,也可用类似的方法分析信号从外界天线向电缆的传输。耦合损耗受电缆槽孔形式及外界环境对信号的干扰或反射影响。在宽频范围内,辐射越强意味着耦合损耗越低。根据信号与外界的耦合机制不同,主要分为以下 3 种泄漏同轴电缆: 辐射型(RMC)、耦合型(CMC)和泄漏型(LSC)。

与传统的天线系统相比,泄漏同轴电缆天线系统在超高频 RFID 应用中具有以下优点:

- 信号覆盖均匀,尤其适合于不规则的小空间覆盖。
- 泄漏同轴电缆本质上是宽频带系统,某些型号的泄漏同轴电缆可同时用于 CDMA800、GSM900、GSM1800、WCDMA、WLAN 等系统。
- 泄漏同轴电缆的尺寸较小,可以装置在狭小的空间中。

超高频 RFID 应用中经常会遇到又长又窄的空间需要盘点其中的电子标签,如工业柜体内、深井中、管道中等。在这些环境中,普通的阅读器天线无法传播足够的距离,或由于天线的尺寸过大根本无法放置,又或者管道很长,无法同时放入多个天线和馈线。此时采用泄漏天线可以解决上述问题。大家可以理解泄漏天线就是一根屏蔽性能很差的射频线缆,在这根射频线缆附近的标签都可以被识别到,而且其长度可以根据需求定制,其长度甚至可达百米。



视频讲解

### 5.3.2 阅读器配件

在使用阅读器时,除天线之外,还有许多关键的射频器件对应用有很大帮助: 4 端口阅读器中使用的射频开关; 8 端口、16 端口甚至 64 端口工作时所需要的天线分配器; 需要低功率输出时的衰减器; 阅读器与天线之间的连接射频电缆。

#### 1. 射频开关

微波开关又称射频开关,它实现了控制微波信号通道转换作用。射频和微波开关广泛

用于微波测试系统中,用于仪器和待测设备(DUT)之间的信号路由。将开关组合到开关矩阵系统中,可以将来自多个仪器的信号路由到单个或多个 DUT。这使得多个测试可以在相同的设置下执行,无须频繁地连接和断开连接。整个测试过程可以自动化,从而提高大批量生产环境中的吞吐量。对于需要连接多个天线的阅读器,当使用射频开关后,不需要每次切换天线都手动更换射频接头,大大提升效率和实时性。

与其他电气开关一样,微波开关为许多不同的应用提供不同的配置:

- 单刀双掷(SPDT 或 1:2)开关将信号从一路输入路由到两路输出路径。
- 多端口开关或单刀多掷(SPnT)开关允许一个输入到多个(3 个或更多)输出路径(5.2.4 节中相位列阵网关的原理图中就使用该射频开关)。
- 转换开关或双刀双掷(DPDT)开关可用于各种目的(5.2.4 节中相位列阵网关的原理图中就使用该射频开关)。
- 旁路开关从信号路径插入或移除测试组件。

超高频 RFID 阅读器多为 4 端口,因此经常使用 SP4T 的单刀 4 掷开关。如图 5-64 所示为一个单刀 4 掷开关的功能框图,其中输入端口为 RFC,输出端口为 RF1、RF2、RF3 和 RF4,当 SP4T 的 GND 和 VDD 有供电时,该芯片启动,可以通过 A、B 两个数字输入引脚选择 RFC 的信号从 RF1~RF4 中的哪个输出端口。A、B 的数字信号通过 2:4 的 TTL 译码器后控制开关的打开和闭合,当  $A=0$ 、 $B=0$ (A、B 都为低电平)时 RF1 的端口接通与 RFC 直连。

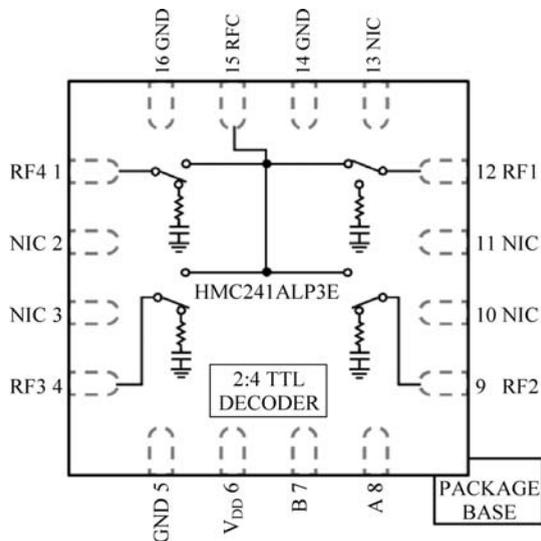


图 5-64 单刀 4 掷开关的功能框图

虽然多个参数与射频和微波开关的性能相关,然而以下 4 个由于其相互间较强的相关性而被视为至关重要的参数:隔离度、插入损耗、开关时间和功率处理能力。

- 隔离度:隔离度是在指定的端口检测到的无用信号的衰减程度。高隔离度减少了

其他通道信号的影响,保持了测量信号的完整性,降低了系统测量的不确定性。在使用超高频 RFID 多端口阅读器时,经常会出现“串读”现象,当只启动天线 1 工作时,发现盘点到天线 2 附近的标签。这个现象在中低端的 4 端口阅读器中时常出现,是因为采用的射频开关隔离度差(如 30dB),当端口 1 发射 33dBm 的信号时,端口 2 会耦合到 3dBm 的信号,从而进入天线 2,如果有标签距离天线 2 非常近,就可以识别到该标签,标签的反向数据会从端口 2 耦合到端口 1 再回到阅读器中,从而引起“串读”现象。这种“串读”现象尤其在端口 1 空载(未连接天线 1)失配时更为明显。

- 插入损耗:信号从输入口进入到输出口之间会有一个能量损失,称为插入损耗。插入损耗越小越好,一般超高频 RFID 阅读器的单刀 4 掷开关插入损耗为 0.5dB 左右。因此在电路完全相同的情况下,采用单端口输出比 4 端口输出的功率略大。
- 开关时间:当一个开关命令发出后,射频信号可以稳定传输的最小时间。对于超高频 RFID 阅读器的多天线快速识别应用,开关时间的大小也是至关重要的。现阶段超高频 RFID 阅读器常用的 SP4T 开关多数的延迟在 100ns 之内,对系统影响几乎可以忽略。
- 功率处理能力:由于通过电路实现的射频开关内部存在非线性器件,当大功率通过射频开关时,射频信号会发生畸变。超高频 RFID 阅读器的输出功率较大,一般都超过 30dBm,因此在选择射频开关时要非常重视。

微波开关可分为机电式继电器开关以及固态开关两大类。

机电式继电器开关的插入损耗较低( $<0.1\text{dB}$ ),隔离度较高( $>85\text{dB}$ ),且可以毫秒级的速度切换信号。此类开关的主要优点在于,其可在直流至毫米波( $>50\text{GHz}$ )频率范围内工作,而且对静电放电不敏感。此外,机电式继电器开关可处理较高的功率水平(达数千瓦的峰值功率)且不发生视频泄漏。然而,在机电式射频开关的操作中,开关的标准使用寿命大约只有 100 万次,而且其组件对振动较为敏感。

相比之下,由于固态开关的电路装配较为平坦且不包含较大的元器件,因此其封装厚度较小且物理尺寸通常小于机电式开关。超高频 RFID 阅读器开关一般选择固态开关。固态开关使用的开关元件为高速硅 PIN 二极管或场效应晶体管(FET),或者为集成硅或 FET 单片微波集成电路。这些开关元件与电容、电感和电阻等其他芯片组件分立集成于同一电路板上。使用 PIN 二极管电路的开关产品具有更高的功率处理能力,而 FET 类型的开关产品通常具有更快的开关速度。当然,由于固态开关不包含活动部件,因此其使用寿命是无限的。此外,固态开关的隔离度较高(60~80dB),开关速度极快( $<100\text{ns}$ ),电路的耐冲击/振动性较好。固态开关在插入损耗方面劣于机电式开关。此外,固态开关在低频应用中具有局限性。这是因为其工作频率下限只能到千赫级,而非直流。这一局限源于其所使用半导体二极管固有的载流子寿命特性。

## 2. 天线分配器

天线分配器英文名叫作 Antenna Hub,是基于超高频 RFID 多天线需求而出现的,其实

现方式相对简单,只需要采用不同的射频开关。如 16 端口的天线分配器可以采用 2 级共 5 个单刀 4 掷开关实现,实现方式如图 5-65 所示。射频输入信号进入后通过第一级单刀 4 掷开关将一个信号分为 4 个输出  $RF_A$ 、 $RF_B$ 、 $RF_C$  和  $RF_D$ ,同时它们又分接入下一级 4 个开关的输入端口,这样一共有 16 个输出端口。控制信号为 4 位,前 2 位管理第一级开关,可以选中第二级开关中的一个,后 2 位同时连接到 4 个开关,管理这 4 个开关的输出口。

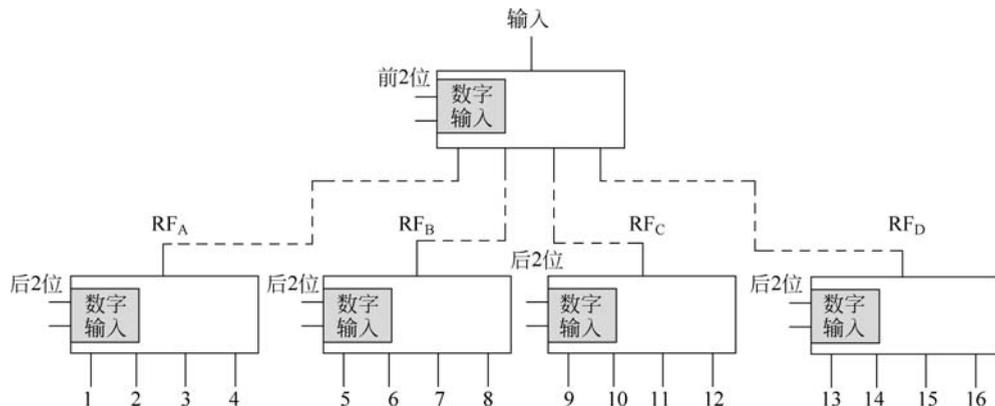


图 5-65 16 端口天线分配器实现框图

许多阅读器厂商开发了支持自家阅读器的专用天线分配器和配套控制单元。图 5-66 所示为 Impinj 公司提供的天线分配器方案。该系统可以从原有的 4 端口扩展为 32 端口,需要天线分配器(Antenna Hub)和 GPIO 适配器(GPIO Adapter Kit)。由于阅读器的 GPIO 接口数量有限,无法通过阅读器直接与多个天线分配器相连,因此需要一个 GPIO 适配器。GPIO 适配器的功能是将阅读器的 GPIO 信号处理为 4 路 RJ-45 线缆的控制信号,传递给天线分配器,同时给天线分配器供电。与此同时阅读器的 4 个端口分别连接 4 个天线分配器的输入端口。

采用 Impinj 的这套 32 端口天线系统的优点为系统架设方便,接线简单,管理也相对容易。其软件管理也比较简单,当需要轮询 32 个端口时,需要先将阅读器固定第一个射频输出端口,然后再通过 GPIO 适配器控制第一个天线分配器控制 1 号输出端口与阅读器第一个射频输出端口导通,当盘点结束后再切换天线分配器的 2 号输出端,当第一个天线分配器的 8 个输出端口全部盘点完成后,切换阅读器的第二个端口。

这里有一点需要注意,天线分配器或多天线的切换逻辑常用的策略有两种:定时逻辑和盘存逻辑。定时逻辑为:规定好每个天线的工作时间,按时切换,其优点是每个天线都有相同的盘点时间,缺点是可能会出现在尚未盘点结束时时间到了切换到下一个天线,前后两个盘点区域的效率都有所降低。盘存逻辑为当阅读器确定该天线覆盖区域的标签已经被全部识别后,自动切换下一个天线,这种策略的优势为效率高。对于大多数场景应用中应选择盘存逻辑,只有在特殊需要定时管理的场景中可以采用定时逻辑,不过每次盘点的定时时长应足够长,以保证完全盘点该区域内的标签。

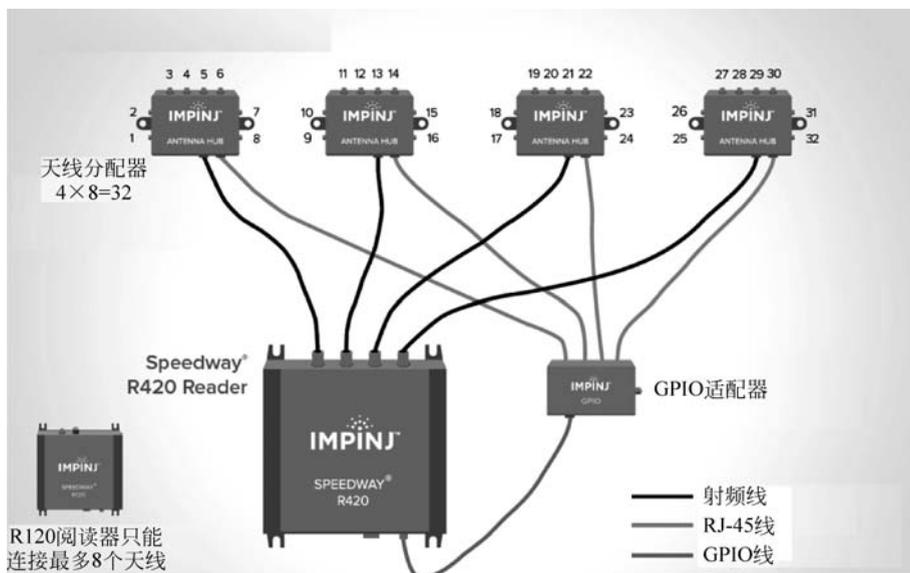


图 5-66 Impinj 公司提供的天线分配器方案

### 3. 衰减器

衰减器是一种提供衰减的电子元件,广泛地应用于电子设备中,它的主要用途是:

- (1) 调整电路中信号的大小;
- (2) 在比较法测量电路中,可用来直读被测网络的衰减值;
- (3) 改善阻抗匹配,若某些电路要求有一个比较稳定的负载阻抗,则可在此电路与实际负载阻抗之间插入一个衰减器,能够缓冲阻抗的变化。

在超高频 RFID 阅读器系统中,衰减器的作用主要是(1)和(3)。由于阅读器的输出功率最小值一般为 5dBm 或 15dBm,在一些需要距离控制的应用中需要更小的输出功率,因此需要衰减器的辅助。对于一些小型天线或匹配较差的天线,其载波泄漏非常严重,影响阅读器的工作距离,当接入衰减器后虽然天线端口的输出功率有所下降,但其阻抗特性有很大的改善,阅读器端口的输入反射系数减小,系统灵敏度提高,工作距离反而增加了。

构成射频/微波功率衰减器的基本材料是电阻性材料。通常的电阻是衰减器的一种基本形式,由此形成的电阻衰减器网络就是集总参数衰减器。通过一定的工艺把电阻材料放置到不同波段的射频/微波电路结构中就形成了相应频率的衰减器。如果是大功率衰减器,体积肯定要加大,需要重点考虑散热设计。

衰减器的关键参数有频率响应、衰减参数、接头类型、功率指标等。

- 频率响应: 即频率带宽,一般用兆赫兹(MHz)或吉赫兹(GHz)表示。通用的衰减器一般带宽为 5GHz 左右,最高到 50GHz。超高频 RFID 阅读器常用的工作频率为 800~900MHz,一般选择 3GHz 之内的衰减器即可满足要求。
- 衰减参数: 用于描述传输过程中从一端到另一端的信号减少的量值。可用倍数或

分贝数来表达。常见的衰减参数为 3dB、10dB、14dB、20dB 不等,最高可达 110dB。结构形式一般分两种形式:固定比例衰减器与步进比例可调衰减器。固定比例衰减器是指在一定频率范围固定比例倍数的衰减器。步进比例衰减器是以一定固定值(例如,1dB)等间隔可调比例倍数的衰减器,又分为手动步进衰减器和程控步进衰减器。在实验室中一般需要一台步进衰减器,而在实际应用中,都采用小型的固定衰减器。

- 接头类型:连接头形式分为 BNC 型、N 型、TNC 型、SMA 型、SMC 型等,同时连接头形状具有阴、阳两种。连接尺寸分为公制与英制形式,以上根据使用要求决定;如果连接头的形式多样,可以配用相应的连接转换头,例如,BNC 转 N 型头等。在阅读器配套的衰减器中常用 TNC 型和 SMA 型。
- 功率指标:衰减器将输入信号能量减小后输出,因而这部分被衰减的能量都留在衰减器内引起发热,当留在衰减器的热量过大时会损坏衰减器,因此需要确定该参数。一般尺寸大的衰减器具有较高的功率指标。

图 5-67 为一款阅读器常用的 SMA 接头衰减器,工作频率为 DC 到 4GHz,衰减 10dB,额定功率 2W。

在应用中,如果需要指定衰减参数的衰减器,而市场上无法找到,可以通过两个衰减器做加法的方式实现。如需要一个 13dB 的衰减器,可以通过一个 3dB 的衰减器和一个 10dB 的衰减器串联实现。

#### 4. 射频电缆

射频同轴电缆是用于传输射频和微波信号能量的。它是一种分布参数电路,其电长度是物理长度和传输速度的函数,这一点和低频电路有着本质的区别。射频同轴电缆大致可分为半刚和半柔电缆、柔性编织电缆和物理发泡电缆等几大类,不同的应用场合应选择不同类型的电缆。半刚和半柔电缆一般用于设备内部的互联;在测试和测量领域,应采用柔性电缆;发泡电缆常用于基站天线馈线系统。阅读器一般采用柔性射频同轴电缆,如图 5-68 所示。



图 5-67 SMA 接头衰减器

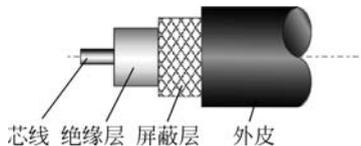


图 5-68 柔性射频同轴电缆结构图

其中,射频同轴电缆从里到外可分为 4 层。

(1) 芯线。射频同轴电缆的内导体,其实现方式有:

- 单根或多根无氧铜线;

- 单根钢包铜线；
- 单根铝包铜线；
- 铝管或波纹铜管。

(2) 屏蔽层。射频同轴电缆的外导体,其实现方式有:

- 单层或多层多股铜线纺织层；
- 单层多股铜线纺织层加铝薄；
- 单层铝薄加镀银铜带包绕层；
- 层铜管或波纹铜管。

(3) 绝缘层。射频同轴电缆的内外导体间的支撑介质,决定着射频同轴电缆的许多电特性和机械特性,其实现方式有:

- 实心聚四氟乙烯或聚乙烯；
- 高发泡聚四氟乙烯填充；
- 高发泡聚乙烯填充；
- 高发泡聚四氟乙烯带包绕；
- 藕状或骨架式空气混合绝缘支撑；
- 空气介质加 1/4 波长金属支撑子。

(4) 外皮: 射频同轴电缆的外保护层,其实现方式有:

- 聚四氟乙烯或聚乙烯外皮；
- 硅橡胶或有机材料编织外皮；
- 塑料或金属铠管护套。

射频电缆的关键参数有特性阻抗、传输损耗、频率范围,屏蔽效率、绝缘电阻、功率容量等。

- 特性阻抗: 由射频同轴电缆的内导体外径  $d$ 、屏蔽层内径  $D$  和绝缘层的介电常数  $\epsilon_r$  决定。阻抗  $Z_0$  计算方式为:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \quad (5-2)$$

- 传输损耗: 射频同轴电缆在传输微波信号时每百米电缆使信号产生衰减的分贝值。
- 频率范围: 电缆厂家推荐的使用频率范围。同种结构的电缆,尺寸越小使用频率范围越宽。频率范围  $f_c$  计算方式为:

$$f_c = \frac{190.8}{\sqrt{\epsilon_r} (D + d)} \quad (5-3)$$

- 屏蔽效率: 在特定频率下电缆射频泄漏的 dB 值,由电缆的外导体结构决定。
- 绝缘电阻: 考核绝缘介质材料特性的一项电性能指标。
- 功率容量: 与电缆机械尺寸有关的一项电性能指标。

射频电缆组件的正确选择除了频率范围、驻波比、插入损耗等因素外,还应考虑电缆的机械特性、使用环境 and 应用要求,另外,成本也是一个永远不变的因素。上面详细讨论了射

频电缆的各种指标和性能,了解电缆的性能对于选择一条最佳的阅读器射频电缆组件是十分有益的。

## 小结

本章讲解了超高频 RFID 阅读器相关的知识点。其中 5.1 节介绍阅读器的功能和架构、阅读器的分类以及接口和通信协议,这些知识都是基础的阅读器知识,需要全部掌握。5.2 节都是阅读器技术和原理相关内容,对于阅读器有兴趣且具有射频技术背景的读者可以重点学习;5.2.4 节的内容对于创新应用非常有帮助,应认真学习。5.3 节讲解的天线和配件需要认真掌握,对于超高频 RFID 的解决方案制定和实施有很大帮助。

## 课后习题

1. 在天线周围的场区中有一类场区,在该区域里辐射场的角度分布与距天线口径的距离远近是不相关的。这类场区称为( )。
  - A. 辐射远场区
  - B. 辐射近场区
  - C. 非辐射场区
  - D. 无功近场区
2. HF RFID 绝大多数射频识别系统的耦合方式是( )。
  - A. 电感耦合式
  - B. 电磁反向散射耦合式
  - C. 电容耦合式
  - D. 反向散射调制式
3. 下面关于超高频 RFID 在仓库管理的吊顶使用的阅读器天线选型所需要考虑的因素中,最不重要的一项是( )。
  - A. 天线的增益
  - B. 天线的波瓣宽度
  - C. 天线的极化方向
  - D. 天线的前后比
4. 下面关于超高频 RFID 阅读器天线选型表述中,错误的是( )。
  - A. 在物流中常使用圆极化天线
  - B. 在智能交通中常使用线极化标签
  - C. 一般情况下同尺寸的圆极化天线与线极化天线工作距离相当
  - D. 在图书馆通道门的应用中,波瓣宽度控制比增益更加重要
5. 在已经架设好的一个应用系统中如果发现总是会读取到旁边不需要读取的标签时,在保证读取率的前提下最好的解决方法是( )。
  - A. 减小功率
  - B. 使用阅读器跳频技术
  - C. 使用阅读器过滤技术
  - D. 更换阅读器天线或调整天线位置
6. 阅读器的过滤功能非常强大,其中单天线阅读器系统中无法过滤的是( )。
  - A. EPC 不同类别的标签
  - B. 速度不同(或是否运动静止)的标签
  - C. 位置不同的标签
  - D. 不同厂商的标签

7. 关于天线分配器的使用,下列描述中错误的是( )。
- A. 天线分配器可以使一个阅读器连接多个天线,从而降低系统的成本
  - B. 天线分配器在使用之后,系统需要时分轮询每一个天线,实时性很差,无法做人员定位等实时性要求很高的项目
  - C. 天线分配器可以让阅读器连接很多天线,同时阅读器的功率就会降低相应的倍数,比如一个阅读器连接 32 个天线,那么每个天线接口的输出功率只有原来的  $1/32$
  - D. 阅读器与天线分配器可以连接的数量(一个阅读器可以接多少个天线)与阅读器的 I/O 数量有关系
8. 下列关于阅读器配件和天线的说法中,正确的是( )。
- A. 一个系统中阅读器输出功率为 15dBm,配套天线为一个小尺寸近场天线,发现此天线失配严重( $S_{11} = -3\text{dB}$ )。由于项目紧急且没有备用天线,此时使用一个 10dB 的衰减器,并提高阅读器的发射功率为 25dBm,其测试结果会有很大提升
  - B. 阅读器的近场天线无法识 5m 外的远场标签
  - C. 一个普通的远场微带天线,不具备近场特性,无法控制小环标签只在近距离工作
  - D. 射频电缆的选择很重要,尽量应选择粗的,因为越粗其衰减越小,隔离度也越好,成本也越低
9. 下列关于载波泄漏消除技术的描述中,错误的是( )。
- A. 载波消除的目的是减少输出端的信号泄漏进入接收机
  - B. 接收机中收到的载波泄漏信号中,最主要的是由于天线失配引起的输入反射系数,如采用双天线收发模式,可以大大减小该影响
  - C. 如采用双天线收发模式,不再需要载波泄漏消除技术
  - D. 采用环形器作为隔离器件比定向耦合器效果要好,但由于成本和尺寸问题无法普遍应用于阅读器模块中
10. 下列关于相位列阵天线的说明中正确的是( )。
- A. Impinj 的 xArray 可以覆盖 52 个区域,因此其内部具有 52 个天线振子
  - B. 通过相位调整可以调整相位列阵天线的辐射范围,因此同尺寸的相位天线比传统天线在相同输出功率下可以覆盖更大的范围
  - C. 相位列阵天线覆盖区域越广,其定位精度越高
  - D. 相位列阵天线可以应用于定位和物品追踪,其天线覆盖区域越多,其物品追踪的轨迹相对越准确,实时性也越高