

Internet of Things

物联网工程与技术规划教材

# 基于ADS物联网射频 电路设计与仿真技术

蔡光卉 主编    梁川 郑树文 副主编    杨军 主审



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

物联网工程与技术规划教材

# 基于 ADS 物联网射频电路 设计与仿真技术

蔡光卉 主 编

梁 川 郑树文 副主编

杨 军 主 审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书简要概述了物联网和射频通信电路的基本知识,按照“专业知识——软件使用——基础实验——系统级实验”的顺序,着重分析和讲解了基于 ADS 2012 射频通信电路的设计与实现。全书共 7 章,第 1 章为物联网与射频电路基础知识介绍,第 2~5 章为 ADS 2012 操作基础和仿真设计方法,第 6~7 章为射频电路基础实验和系统实验设计实例。本书基于实例项目,详细介绍了相关设计原理、结构框图、基本步骤,并提供了设计思路和优化方案,也穿插了一些经验技巧和注意事项,可有效帮助读者提升理论知识水平和实际操作能力。本书配套教学资源有电子课件及习题解答。

本书适用于电子信息、计算机、物联网、通信工程等专业本科、研究生,及从事电子线路、射频技术研发的工程技术人员。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于 ADS 物联网射频电路设计与仿真技术 / 蔡光卉主编. —北京: 电子工业出版社, 2014.8

物联网工程与技术规划教材

ISBN 978-7-121-23723-2

I. ①基… II. ①蔡… III. ①射频电路—电路设计—计算机辅助设计—软件包—高等学校—教材

IV. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 147927 号

策划编辑: 任欢欢

责任编辑: 郝黎明

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订: 北京京师印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

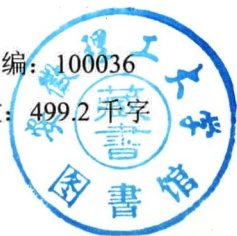
北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.5 字数: 499.2 千字

版 次: 2014 年 8 月第 1 版

印 次: 2014 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010)88258888。

# 前 言

物联网是新一代信息技术的重要组成部分，被称为继计算机、互联网之后世界信息产业发展的第三次浪潮。其含义是把生活中的各类物品和它们的属性标识连到互联网上，实现智能化识别和管理。目前，物联网技术具有广泛的应用领域，有望成为推动经济高速发展的“重要生产力”。

通信是物联网的关键，没有通信，物联网感知的大量信息就无法进行有效交换与共享，从而也就不能利用这些信息产生丰富的物联网应用，物联网通信包含有线和无线通信技术，而最能体现物联网特征的是无线通信技术，在无线通信技术中又离不开射频电路。射频电路的工作频率不断提高，从几百 MHz 到 GHz 频率的应用越来越多。目前，本科生实验内容多以单元电路的验证为主，所涉及的电路频率也大多在 10MHz 以下，传统实验模式耗材损失大，学生操作不便。因此我们需要利用新的方法和手段来设计射频电路实验。

由美国安捷伦公司研制的大型 EDA 软件 ADS (Advanced Design System) 是当今主流射频电路设计的开发软件，因其强大的功能、丰富的模板支持和高效准确的仿真能力（尤其在射频微波领域），已成为当今国内各高校和研究所使用最多的微波/射频电路和通信系统的设计仿真软件。ADS 软件具有强大的功能与友好的界面，在射频和微波电路设计、通信系统设计、射频集成电路 (RFIC) 设计、仿真方面具有很大优势。本书是作者结合近几年的 ADS 实践和教学经验，依托云南大学电子信息技术实验教学中心，针对目前本科生射频电路实验面临的实际问题，参考了大量设计书籍和技术文献，组织编写的实践教材。

本书首先介绍了物联网和射频电路的基础知识，然后重点讲解了 ADS 基本功能和使用方法，并结合实例对典型应用进行讲解。在实例讲解上，总结了通信领域经常用到的各类电子通信器件并在此基础上详细介绍了设计原理、结构框图、基本步骤和流程，提供了设计思路和优化方案，也穿插了一些经验技巧和注意事项，在潜移默化的过程中提高读者的理论知识和实践动手操作能力，迅速帮助读者提高基于 ADS 的射频通信电路设计分析综合实践能力。全书语言简洁，结构清晰，内容系统针对性强，基础知识和实际工程结合，紧紧围绕实用原则，然后由浅入深，安排应用实例精讲，便于读者深入学习和研究。

全书分为 7 章，共两大部分。基础知识概述部分包括前 5 章：第 1 章物联网与射频电路基础，第 2 章 ADS 2012 简介，第 3 章 ADS 设计向导，第 4 章 ADS 仿真设计与实例，第 5 章 ADS 通信系统仿真；实践部分包括：第 6 章 ADS 基础实验，第 7 章 ADS 通信系统综合实验。

本书配套教学资源有电子课件及习题解答，请任课教师登录华信教育资源网 <http://www.hxedu.com.cn> 免费注册下载。

全书由云南大学信息学院杨军教授主审，蔡光卉编写第 1~5 章，梁川编写第 6 章，郑树文编写第 7 章，全书由蔡光卉副教授统稿。李红晔、孙洪超、马晓聪、肖斌、李雪和万昌慧同学对本书的编写也作出了贡献。

本书在编写过程中得到云南大学信息学院的领导以及其他实验教师的关怀和支持，在此向他们致以诚挚的谢意。

在本书的编写过程中，参考和引用了很多同类资料的相关内容和美国安捷伦公司的有关技术资料，在此向这些资料的作者和安捷伦公司致以深深的感谢。

由于作者水平有限，本书难免有疏漏和不足之处，望读者谅解。

编 者

# 目 录

第 1 章 物联网与射频电路基础	1	3.3 使用向导的应用	69
1.1 物联网综述	1	3.3.1 原理图生成	69
1.1.1 物联网的定义	1	3.3.2 仿真结果说明	72
1.1.2 物联网与互联网的比较	2	3.3.3 观察分析	73
1.1.3 物联网的体系架构	3	3.3.4 查看元件参数	75
1.1.4 关键技术	4	习题	76
1.1.5 物联网应用	4	第 4 章 ADS 仿真设计与实例	77
1.2 射频电路基础	5	4.1 仿真概述	77
1.2.1 射频定义及应用	6	4.1.1 仿真功能分类	77
1.2.2 传输线与史密斯圆图	7	4.1.2 仿真功能综述	78
1.2.3 射频网络分析基础	16	4.2 直流仿真	80
习题	19	4.2.1 仿真界面	80
第 2 章 ADS 2012 简介	20	4.2.2 仿真操作	81
2.1 ADS 概述	20	4.2.3 仿真例程	86
2.1.1 ADS 的仿真分析方法	20	4.3 交流仿真	93
2.1.2 ADS 功能分析	21	4.3.1 仿真界面	93
2.1.3 ADS 兼容性分析	22	4.3.2 仿真操作	94
2.1.4 初识 ADS	23	4.3.3 仿真例程	98
2.2 ADS 界面介绍	23	4.4 S 参数仿真	103
2.2.1 主界面	23	4.4.1 仿真界面	103
2.2.2 原理图界面	34	4.4.2 仿真操作	106
2.2.3 布局图界面	48	4.4.3 仿真例程	110
2.2.4 数据显示界面	49	4.5 谐波平衡仿真	114
习题	53	4.5.1 仿真界面	114
第 3 章 ADS 设计向导	54	4.5.2 仿真操作	116
3.1 设计流程	54	4.5.3 仿真例程	123
3.1.1 新建项目	54	4.6 电路包络仿真	128
3.1.2 工程实例设计	54	4.6.1 仿真界面	128
3.1.3 工程实例分析	57	4.6.2 仿真操作	129
3.2 原理图优化与分析	61	4.6.3 仿真例程	133
3.2.1 原理图优化	61	4.7 瞬态仿真	137
3.2.2 原理图分析	64	4.7.1 仿真界面	137
		4.7.2 仿真操作	138

4.7.3 仿真例程·····	143	6.6 功率放大器·····	207
习题·····	146	6.6.1 放大器的基本原理·····	207
<b>第5章 ADS 通信系统仿真</b> ·····	147	6.6.2 设计实现低噪声放大器·····	210
5.1 设计基础级通信系统·····	147	6.7 混频器·····	230
5.1.1 新建工程·····	147	6.7.1 混频器基本原理·····	230
5.1.2 通信系统仿真操作·····	151	6.7.2 设计实现混频器·····	236
5.2 通信系统实例分析·····	156	6.8 功率分配器·····	243
5.2.1 实例仿真设计·····	156	6.8.1 功率分配器基本原理·····	243
5.2.2 仿真结果分析·····	162	6.8.2 设计实现功率分配器·····	248
习题·····	163	6.9 压控振荡器·····	256
<b>第6章 ADS 基础实验</b> ·····	164	6.9.1 压控振荡器基本原理·····	256
6.1 匹配电路·····	164	6.9.2 设计实现振荡器·····	258
6.1.1 设计向导实现匹配电路·····	164	习题·····	265
6.1.2 Smith 图实现匹配电路·····	167	<b>第7章 ADS 通信系统综合实验</b> ·····	266
6.2 衰减器·····	176	7.1 通信电路射频发射系统·····	266
6.2.1 衰减器基本原理·····	176	7.1.1 设计射频发射系统·····	266
6.2.2 设计实现有源衰减器·····	177	7.1.2 射频发射系统仿真与实现·····	269
6.3 移相器·····	180	7.2 通信电路射频接收系统·····	272
6.3.1 移相器基本原理·····	180	7.2.1 设计射频接收系统·····	272
6.3.2 设计实现移相器·····	180	7.2.2 射频接收系统仿真与实现·····	277
6.4 锁相环·····	183	7.3 通信电路中射频宽带放大器设计与 仿真·····	285
6.4.1 锁相环基本原理·····	183	7.3.1 设计指标·····	286
6.4.2 设计实现锁相环·····	186	7.3.2 射频宽带放大器的设计 与仿真·····	286
6.5 滤波器·····	196	习题·····	305
6.5.1 集总参数低通滤波器设计 向导·····	196	<b>参考文献</b> ·····	306
6.5.2 设计集总参数低通滤波器·····	201		

# 第 1 章 物联网与射频电路基础

物联网是新一代信息技术的重要组成部分。顾名思义，物联网就是物物相连的互联网。物联网通过智能感知、识别技术与互联网的应用融合，被称为继计算机、互联网之后世界信息产业发展的第三次浪潮。随着物联网理念日趋成熟，其涉及的应用领域也越来越广泛，从智能安防到智能电网，从二维码普及到智慧城市落地。具体来看，我国物联网技术已经融入到纺织、冶金、机械、石化、制药等工业制造领域，可以预见物联网将逐渐涉及生活各个领域，成为下一个推动世界高速发展的“重要生产力”。

与此同时，通信系统也正以惊人的速度向前发展，现代通信系统越来越复杂。从现有的射频、微波应用，可以看出射频电路相关领域具有很大的发展潜力，并有望成为未来许多应用富有成效的资源之一。为了实现无线电远程传输信息、无线电探测和测距、无线电近距离组网和数据传输以及无线电无接触识别等功能，人们发明了射频识别设备。而射频识别技术正是物联网关键技术且应用最广，因此射频电路与物联网理念具有密不可分的联系。

射频简称 RF，射频就是射频电流，它是一种高频交流变化电磁波的简称。传统实验只适合低频电路的设计，为了满足射频电路的频段要求，我们需要建立新的射频电路设计体系。此外，随着通信系统越来越复杂，电路各项参数的要求越来越严格（如低噪声放大器的噪声系数），产品功能的要求越来越多样化，而产品设计周期却越来越短，因此传统的设计方法已经不能满足现代电路设计的要求，借助于微波仿真软件进行电路设计已经成为必然趋势，美国安捷伦（Agilent）公司的大型 EDA 软件 ADS（Advanced Design System）凭借其强大的功能与友好的界面，成为当今主流设计开发软件。ADS 软件在完成射频和微波电路设计、通信系统设计、射频集成电路（RFIC）设计方面和数字信号处理仿真设计具有很大优势，同时包含时域电路仿真、频域电路仿真、三维电磁仿真、通信系统仿真等功能，并且可以实现从模块到系统的设计，是当前射频和微波电路设计的首选工程软件。

本章将分别对物联网和射频电路的概念和应用进行介绍，并简单讲解 ADS 的发展和主要功能。

## 1.1 物联网综述

### 1.1.1 物联网的定义

#### 1. 概念

1999 年物联网的概念首次被提出，它打破了之前将物理基础设施和 IT 基础设施分开的传统思路，成为继计算机、互联网与移动通信网之后的世界信息产业第三次浪潮。目前对物联网没有明确定义，较为公认的说法是：物联网是把所有物品通过射频识别（RFID）、条码和二维码、全球定位系统和其他基于物物通信模式的短距无线网络等信息传感设备及系统与互联网连接起来，进行信息交换的网络，目的是让所有的物品都与网络连接在一起，系统可以对



物体进行识别、定位、追踪、监控、管理并触发相应事件。简而言之，物联网就是把生活中的各类物品和它们的属性标识连到互联网上（图 1.1），实现智能化识别和管理。

物联网是物物相连的互联网，如果说互联网实现了人与人之间的交流，那么物联网就将实现人与物体、物体与物体相互间的连接和交互，世界万物都可以通过这个平台联系，包括经济管理、生产运行、社会管理乃至个人生活，可以说它的诞生将创造一个物联网时代。

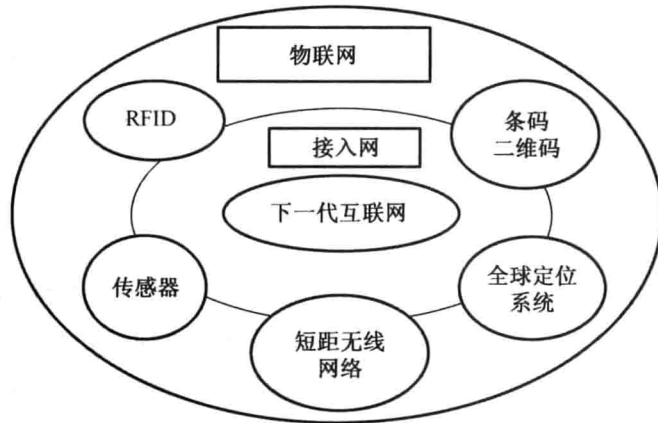


图 1.1 物联网概念模型

## 2. 基本特征

物联网的基本特征可概括如下。

**全面感知：**利用 RFID、传感器、二维码及其他各种感知设备随时随地采集各种动态对象信息，全面感知世界。

**可靠传输：**利用以太网、无线网、移动网将感知的信息进行实时的传递。

**智能控制：**对物体实现智能化的控制和管理，真正到达了人与物的沟通。

### 1.1.2 物联网与互联网的比较

首先，物联网是各种感知技术的广泛应用。物联网上部署了少量的多种类型传感器，每个传感器都是一个信息源，不同类别的传感器所捕获的信息内容和信息格式不同。传感器获得的数据具有实时性，按一定的频率周期性地采集信息，不断更新数据。

其次，它是一种建立在互联网上的泛在网络。物联网技术的重要基础和核心仍然是互联网，通过各种有线和无线网络与互联网融合，将物体的信息实时准确地传递出去。在物联网上的传感器定时采集的信息需要通过网络传输，由于其数量极其庞大，形成了海量信息，在传输过程中，为了保障数据的正确性和及时性，必须适应各种异构网络和协议。

再次，物联网不仅仅提供了传感器的连接，其本身也具有智能处理的能力，能够对物体实施智能控制。物联网将传感器和智能处理相结合，利用云计算、模式识别等各种智能技术，扩充其应用领域。从传感器获得的海量信息中分析、加工和处理出有意义的信息，以适应不同用户的不同需求。

物联网和互联网发展有一个最本质的不同点是两者发展的驱动力不同。互联网发展的驱动力是个人，因为互联网改变了人与人之间的交流方式，极大地激发了以个人为核心的创造力。而物联网概念下的服务平台的驱动力必须是来自政府和企业。物联网的实现首先需要改变的是企业的生产管理、物流管理模式、产品追溯机制和整体工作效率。实现物联网的

过程，其实是一个企业真正利用现代科技技术进行自我实现与创新的过程，这一阶段的主要工作是最大限度地吧需要感知的事物连接到管理平台，实际上是一个采集终端规模推广的过程。这个过程刚开始肯定会遇到阻力和困难，但只要坚定不移地去实践，一定会进入一个全新的世界。

### 1.1.3 物联网的体系架构

物联网是一种非常复杂、形式多样的系统技术应用。一般将物联网的主要技术体系按照三个层次建立模型。在这个技术体系中，物联网的技术构成主要体现在感知层、传输层和应用层3个层次上。

#### 1. 感知层

感知层 (Devices): 是指无处不在的物联网末端，数量在万亿以上，利用 RFID、摄像头、传感器、GPS 等技术识别物体、采集信息，是物联网系统的数据来源。

感知层是让物品说话的先决条件，主要用于采集物理世界中发生的物理事件和数据，包括各类物理量、身份标识、位置信息、音频、视频数据等。针对具体的感知任务，常采用协同处理的方式对多种类、多角度、多尺度的信息进行在线计算，并与网络中的其他单元共享资源进行交互与信息传输。感知层又分为数据采集与执行、短距离无线通信 2 个部分。数据采集与执行主要是运用智能传感器技术、身份识别以及其他信息采集技术，对物品进行基础信息采集，同时接收上层网络送来的控制信息，完成相应执行动作；短距离无线通信则完成小范围内的多个物品的信息集中与互通功能。

#### 2. 传输层

传输层 (Connect): 包括所有有线和无线、长距离和短距离、宽带和窄带通信系统，它利用移动通信系统和互联网将感知层获取的信息进行处理和传递，是物联网的基础设施。

传输层主要功能是对来自感知层的信息进行接入和传输，通过现有互联网或移动通信网 (TD-SCDMA、全球移动通信系统、无线局域网、无线接入网、卫星网等) 基础网络设施进行通信。为了更好地适应相对复杂的软件协议设计，传输层主要采用具有较强硬件支撑能力的异构网络接入设备，如接入互联网的网关、接入移动通信网的网关等。目前的接入设备多为传感网、公用通信网 (如无线互联网、有线互联网、TD-SCDMA 网、GSM 网) 和卫星网等。

#### 3. 应用层

应用层 (Application): 包括各种集成中间技术和应用层软件技术以及物联网门户系统，通过对感知层和传输层获取的信息进行分析和处理，作出正确的控制和决策，实现智能化的管理、应用和服务。

应用层的主要功能是对物品信息进行汇总、协同、共享、互通、分析和决策，相当于物联网的控制层、决策层。物联网的根本还是为人服务，为了更大程度地为人类服务，完成物品和人的交互，应用层将前面两层的信息收集起来，统一分析、决策，实现信息的综合利用。根据各行各业的特点，应用层分别提供相关内容的服务，如智能物流、智能医疗、智能交通、智能家居、智能电力等。

物联网各层次间既相对独立又紧密联系，三个层次相辅相成，缺一不可。针对某一具体应用，在进行系统设计时应兼顾各层功能，实现各层资源协同分配与共享。另外在同一个层

次上，也可以对选择的技术方案进行按需配置。总之，一个合理的设计方案应该能够为应用系统提供必要的整体性能保障。

### 1.1.4 关键技术

在物联网应用中三项关键技术：传感器技术，RFID 技术，嵌入式系统技术。

#### 1. 传感器技术

传感器技术就是把自然界中的各种物理量、化学量和生物量转化为可测量的电信号的装置与元件的技术。由信息采集层和网络层构成的信息感知体系是物联网应用推进的主要领域，而在其中起到关键推动作用的是无线传感器网络（WSN）。

传感器属于物联网的神经末梢，是人类全面感知自然的最核心元件。各类传感器的大规模部署和应用是构成物联网不可或缺的基本条件。对应不同的应用我们提供不同的传感器，覆盖包括智能工业、智能安保、智能家居、智能运输、智能医疗等各个行业。

#### 2. RFID 技术

RFID 技术即射频识别技术，是一种通信技术，它融合无线射频技术和嵌入式技术为一体，可通过无线电信号识别特定目标并读写相关数据，而无须识别系统与特定目标之间建立机械或光学接触。常用的有低频（125~134.2kHz）、高频（13.56MHz）、超高频（850~985 MHz）、微波（2.4~2.5GHz）等技术。RFID 读写器也分移动式的和固定式的，目前 RFID 技术应用很广，如图书馆、门禁系统、食品安全溯源等。其中 RFID 标签也是一种传感器技术。RFID 技术是融合了无线射频技术和嵌入式技术为一体的综合技术，在自动识别、物品物流管理有着广阔的应用前景。

#### 3. 嵌入式系统技术

嵌入式系统技术是综合了计算机软硬件、传感器技术、集成电路技术、电子应用技术为一体的复杂技术。经过几十年的演变，以嵌入式系统为特征的智能终端产品随处可见：小到人们身边的 MP3，大到航天航空的卫星系统。嵌入式系统正在改变着人们的生活，推动着工业生产以及国防工业的发展。如果把物联网用人体做一个简单比喻，传感器相当于人的眼睛、鼻子、皮肤等感官，网络就是神经系统用来传递信息，嵌入式系统则是人的大脑，在接收到信息后要进行分类处理。这个例子很形象地描述了传感器、嵌入式系统在物联网中的位置与作用。

### 1.1.5 物联网应用

物联网应用十分广泛，遍及智能交通、环境保护、政府工作、公共安全、平安家居、智能消防、工业监测、环境监测、路灯照明管控、景观照明管控、楼宇照明管控、广场照明管控、老人护理、个人健康、花卉栽培、水系监测、食品溯源、敌情侦查和情报搜集等多个领域。

#### 1. 应用模式

根据其实际用途可以归结为以下三种基本应用模式。

##### (1) 对象的智能标签

对象智能标签，通过 NFC、二维码、RFID 等技术标识特定的对象，用于区分对象个体，例如在生活中使用的各种智能卡，条码标签的基本用途就是用来获得对象的识别信息。此外

通过智能标签还可以用于获得对象物品所包含的扩展信息，例如智能卡上的金额余额，二维码中所包含的网址和名称等。

### (2) 环境监控和对象跟踪

环境监控和对象跟踪是利用多种类型的传感器和分布广泛的传感器网络，可以实现对某个对象的实时状态的获取和特定对象行为的监控，如使用分布在市区的各个噪声探头监测噪声污染，通过二氧化碳传感器监控大气中二氧化碳的浓度，通过 GPS 标签跟踪车辆位置，通过交通路口的摄像头捕捉实时交通流程等。

### (3) 对象的智能控制

物联网基于云计算平台和智能网络，可以依据传感器网络用获取的数据进行决策，改变对象的行为进行控制和反馈。例如，根据光线的强弱调整路灯的亮度，根据车辆的流量自动调整红绿灯间隔等。

## 2. 应用实例

在三种基本应用模式中，对象的智能标签，即 RFID 射频识别技术的应用最为广泛，从概念上来讲，RFID 类似于条码扫描，对于条码技术而言，它是将已编码的条形码附着于目标物并使用专用的扫描读写器利用光信号将信息由条形磁传送到扫描读写器；而 RFID 则使用专用的 RFID 读写器及专门的可附着于目标物的 RFID 标签，利用频率信号将信息由 RFID 标签传送至 RFID 读写器。

RFID 分为很多种，按频率主要分为超高、高、中、低 4 类。

(1) 低频 125kHz 主要用在门禁和停车场。

(2) 中频 13.56MHz 主要用在公交、考勤、门禁，如二代身份证。

门禁系统应用射频识别技术，可以实现持有效电子标签的车不停车，方便通行又节约时间，提高路口的通行效率，更重要的是可以对小区或停车场的车辆出入进行实时的监控，准确验证出入车辆和车主身份，维护区域治安，使小区或停车场的安防管理更加人性化、信息化、智能化、高效化。

(3) 高频 430~960MHz 主要用无源电子标签，在通信、物流、海关、展会进出证件、服装、企业资产管理、工业产品流动。

(4) 超高频 860M~2.4GHz 以上，主要用有源电子标签、电子收费系统、数据通信、区域管理。

ETC (Electronic Toll Collection)，即电子不停车收费系统，是指车辆在通过收费站时，通过车载设备实现车辆识别、信息写入（入口）并自动从预先绑定的 IC 卡或银行账户上扣除相应资金（出口）。电子不停车收费系统（ETC）是世界上最先进的收费系统，是智能交通系统的服务功能之一，过往车辆通过道口时无须停车，即能够实现车辆身份自动识别、自动收费。在车场管理中，为提高出入口车辆通行效率。

(5) 最近还有推出 5.8GHz，主要用于物流、资产管理。

## 1.2 射频电路基础

通信是物联网的关键，没有通信，物联网感知的大量信息就无法进行有效交换与共享，从而也就不能利用这些信息产生丰富的物联网应用，物联网通信包含有线和无线通信技术，而最能体现物联网特征的是无线通信技术，在无线通信技术中又离不开射频电路。

### 1.2.1 射频定义及应用

射频 (Radio Frequency), 即无线电频率, 广义地说就是可以向外辐射电磁信号的频率。实现无线电的发射、接收以及信息的加载和提取的电子线路称为射频电路。在电路设计中射频电路的频率较高、电路的尺寸可以与波长相比拟。射频电路应用的典型频段为几百 MHz 至几 GHz, 一般认为, 当频率高于 30MHz 时, 在电路的设计中就要考虑射频电路理论, 所以在这个频率范围内, 电路需要考虑波动特性和分布参数的影响, 低频的基尔霍夫电路理论不再适用。

频率范围为 300MHz~3000GHz 的电磁波被称为微波, 有分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波 4 个波段, 对应的波长为 1m~0.1mm。可以从频率划分看出, 微波的低频端与射频频率存在交叉, 目前没有明确定义出射频频率与微波频率的频率分界点。

在电子通信领域, 工作频率决定了信号采用的传输方式和信号的传输特性。根据不同的传输特性, 按照频率从低到高的次序, 将电磁频谱划分为不同的频段, 每一个频带有专门的用途。通常一个电路都是被设计成用于某个特定的频段, 对通信容量的要求越高, 使用的频率就越高。

频谱有许多划分方式, 表 1.1 列出了目前常用的频谱划分和使用情况。

表 1.1 IEEE 频谱

频段	频率	波长
ELF (极低频)	30~300Hz	10000~1000km
VF (音频)	300~3000Hz	1000~100km
VLF (甚低频)	3~30kHz	100~10km
LF (低频)	30~300kHz	10~1km
MF (中频)	300~3000kHz	1~0.1km
HF (高频)	3~30MHz	100~10m
VHF (甚高频)	30~300MHz	10~1m
UHF (特高频)	300~3000MHz	100~10cm
SHF (超高频)	3~30GHz	10~1cm
EHF (极高频)	30~300GHz	1~0.1 cm
亚毫米波	300~3000GHz	1~0.1mm
P 波段	0.23~1GHz	130~30cm
L 波段	1~2GHz	30~15cm
S 波段	2~4GHz	15~7.5cm
C 波段	4~8GHz	7.5~3.75cm
X 波段	8~12.5GHz	3.75~2.4cm
Ku 波段	12.5~18GHz	2.4~1.67cm
K 波段	18~26.5GHz	1.67~1.13cm
Ka 波段	26.5~40GHz	1.13~0.75cm

由于下面各因素, 通信系统通常采用高频率信号来有效地传输信息。

(1) 工作频率越高, 带宽越大。当工作频率为 1GHz 时, 就会出现一些在低频下没有的现象。若传输的相对带宽为 10% 时, 可以传输 100MHz 带宽的信号; 当工作频率为 1MHz 时, 若传输的相对带宽也为 10%, 只可以传输 0.1MHz 带宽的信号。通过比较可以看出, 高工作频率可以带来大带宽。

(2) 工作频率越高, 天线尺寸越小。无线通信需要采用天线来发射和接收信号, 如果天线的尺寸可以与波长相比拟的话, 天线的辐射更为有效。由于工作频率与波长成反比, 提高

工作频率可以降低波长,进而可以减小天线的尺寸。进一步地说,工作频率提高导致需要的天线尺寸减小,这迎合了现代通信对尺寸小型化的要求。

(3) 射频电路中电感和电容等元器件的尺寸较小,这使得射频设备的体积进一步减小。正是由于上述技术原因,越来越多的电子通信系统使用了射频频段,推动射频技术进一步发展。

随着科学技术不断进步,电子通信系统也不断地完善和发展。从有线传输的语音通信到无线传输的移动通信,从窄带语音通信到宽带综合业务通信,从模拟调制信号通信到数字调制通信信号,电子通信系统越来越先进,也越来越复杂。随着通信系统信息容量的不断提高,射频通信技术越来越体现其重要性。此外,目前几百 MHz 到几 GHz 频率的无线通信应用越来越多。全球移动通信系统(GSM)、全球定位系统(GPS)、无线局域网(WLAN)、第三代移动(3G)通信、第四代移动(4G)通信的主流标准都工作于 GHz,使得在此频率范围内的射频电路应用日趋广泛。对半导体器件和计算机来说,CPU 的工作频率已经达到 GHz,同样需要考虑在此频率下射频电路的设计问题。可以看出,射频技术在各个领域都具有重要作用。

## 1.2.2 传输线与史密斯圆图

### 1. 传输线

传输线理论是分布参数电路理论,它在场分析和基本电路理论之间架起了桥梁。随着工作频率的升高,波长不断减小,当波长可以与电路的几何尺寸相比拟时,传输线上的电压和电流将随空间位置而变化,使电压和电流呈现出波动性,这一点与低频电路完全不同。传输线理论用来分析传输线上电压和电流的分布,以及传输线上阻抗的变化规律。在射频频段,基尔霍夫定律不再适用,必须使用传输线理论取代低频电路理论。

#### 1) 传输线举例

传输线有特殊的结构。传输线有 TEM (横电磁波) 传输线和 TE (横电波)、TM (横磁波) 传输线(如波导),本书射频电路只涉及 TEM 传输线。TEM 传输线有许多种类,常用的有平行双导线、同轴线、带状线和微带线(传输准 TEM 波)。

#### 2) 传输线等效电路表示

电路理论与传输线理论的区别,主要在于电路尺寸与波长的关系。传输线属长线,沿线各点的电压和电流(或电场和磁场)既随时间变化,又随空间位置变化,是时间和空间的函数,传输线上电压和电流呈现出了波动性,所以长线用传输线理论来分析。

传输线上各点的电压和电流(或电场和磁场)不相同,可以从传输线的等效电路得到解释,这就是传输线的分布参数概念。分布参数是相对于集总参数而言的。在低频电路中,认为电场能量集中在电容器中,磁场能量集中在电感器中,电磁能的消耗全部集中在电阻元件上,连接元件的导线是既无电感、电容,又无电阻、电导的理想导线,这就是集总参数的概念。传输线理论是分布参数电路理论,认为分布电阻、分布电感、分布电容和分布电导这 4 个分布参数存在于传输线的所有位置上。当频率增高到射频,连接元件的传输线由于集肤效应的出现,使传输线的有效面积减小,传输线上的电阻增加,且分布在传输线上,可称为传输线的分布电阻;传输线上有高频电流流过,传输线周围就必然有高频磁场存在,沿线就存在电感,可称为传输线的分布电感;又因传输线两导体间有电压,故两导体间存在高频电场,沿线就分布着电容,可称为传输线的分布电容;传输线两导体间有漏电,沿线两导体间就存在着漏电导,可称为传输线的分布电导。

随着频率的增高，分布参数引起的阻抗效应增大，不能再忽略了，分布参数是高频条件下的必然结果，必须加以考虑。传输线的等效电路如图 1.2 所示，其中图 1.2(a)为一段  $dz$  长传输线的等效电路，图 1.2(b)为一条传输线的等效电路。

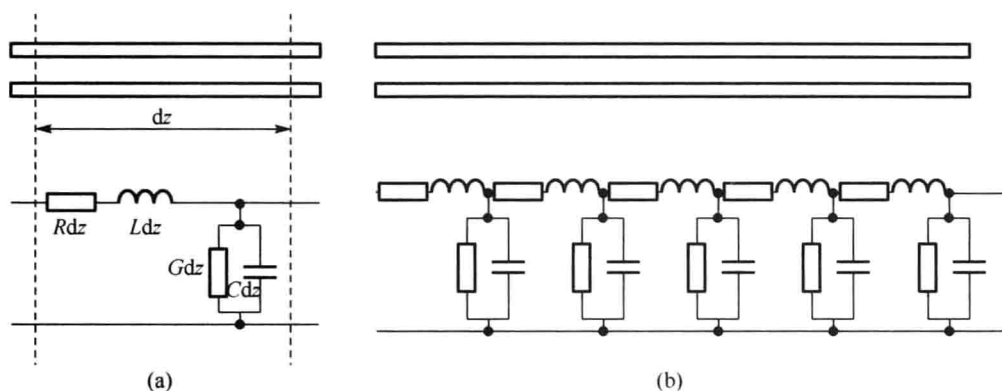


图 1.2 传输线的等效电路

### 3) 传输线方程及其解

传输线方程是研究传输线上电压、电流的变化规律以及它们之间相互关系的方程。对于均匀传输线，线元  $dz$  可以看成集总参数电路，线元  $dz$  上的电压和电流满足如下关系。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v(z,t)}{\partial z} &= - \left[ Ri(z,t) + L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \right] \\ \frac{\partial i(z,t)}{\partial z} &= - \left[ Gv(z,t) + C \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

式 (1.1) 称为均匀传输线方程。

通常传输线的始端接入角频率为  $\omega$  的正弦信号源，此时传输线上电压和电流的瞬时值  $v(z,t)$  和  $i(z,t)$  可以表示为：

$$\left. \begin{aligned} v(z,t) &= \text{Re}[V(z)e^{j\omega t}] \\ i(z,t) &= \text{Re}[I(z)e^{j\omega t}] \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

于是得到如下传输线方程：

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dV}{dz} &= (R + j\omega L)I \\ -\frac{dI}{dz} &= (G + j\omega C)V \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

式中， $Z = (R + j\omega L)$  为传输线单位长度的串联阻抗， $Y = (G + j\omega C)$  为传输线单位长度的并联导纳。

在式 (1.3) 两边对  $z$  再微分一次，可以得到：

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 V}{dz^2} - \gamma^2 V &= 0 \\ \frac{d^2 I}{dz^2} - \gamma^2 I &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

其中：

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (1.5)$$

式(1.4)称为均匀传输线的波动方程。 $\gamma$ 称为传输线上波的传播常数(Propagation Constant),一般情况下 $\gamma$ 为复数,其实部 $\alpha$ 称为衰减常数(Attenuation Constant),虚部 $\beta$ 称为相移常数(Phase Constant)。

式(1.4)的解为:

$$\left. \begin{aligned} V(z) &= A_1 e^{-\gamma z} + A_2 e^{\gamma z} \\ I(z) &= \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{-\gamma z} - A_2 e^{\gamma z}) \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

其中:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1.7)$$

实际中,常假定传输线为无耗传输线,于是有:

$$\alpha = 0, \gamma = j\beta \quad (1.8)$$

$$\left. \begin{aligned} V(z) &= A_1 e^{-j\beta z} + A_2 e^{j\beta z} \\ I(z) &= \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{-j\beta z} - A_2 e^{j\beta z}) \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

式(1.9)给出了均匀无耗传输线上电压和电流的分布。

#### 4) 基本特性参数

传输线的基本特性参数包括传输线的特性阻抗、反射系数、驻波系数和行波系数、输入阻抗、传播常数、衰减常数和传输功率等,下面对上述参数分别加以介绍。

##### (1) 特性阻抗

传输线上入射电压与入射电流之比(也即行波电压与行波电流之比),称为传输线的特性阻抗,特性阻抗用 $Z_0$ 表示。传输线特性阻抗的一般公式为:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

对于射频传输线,特性阻抗近似为:

$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{R}{C}} \quad (1.10)$$

在射频情况下可以认为传输线的特性阻抗为纯电阻。

平行双导线的特性阻抗为:

$$Z_0 = 120 \ln \left[ \frac{D}{d} + \sqrt{\left( \frac{D}{d} \right)^2 - 1} \right] \approx 120 \ln \frac{2D}{d} (\Omega) \approx 276 \lg \frac{2D}{d} (\Omega) \quad (1.11)$$

同轴线的特性阻抗为:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} (\Omega) \approx \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{b}{a} (\Omega) \quad (1.12)$$

式中, $\epsilon_r$ 为同轴线两导体间介质的相对介电常数。

##### (2) 反射系数

传输线上的波一般为入射波与反射波的叠加。波的反射现象是传输线上最基本的物理现象,传输线的工作状态也主要决定于反射的情况。为了表示传输线的反射特性,引入反射系



数  $\Gamma$ 。反射系数是指传输线上某点的反射电压与入射电压之比，也等于传输线上某点反射电流与入射电流之比的负值。反射系数  $\Gamma$  为：

$$\Gamma(z') = \frac{V^-(z')}{V^+(z')} = -\frac{I^-(z')}{I^+(z')} \quad (1.13)$$

式中， $V^+(z')$  和  $V^-(z')$  为  $z'$  处的入射电压和反射电压， $I^+(z')$  和  $I^-(z')$  为  $z'$  处的入射电流和反射电流，如图 1.3 所示。

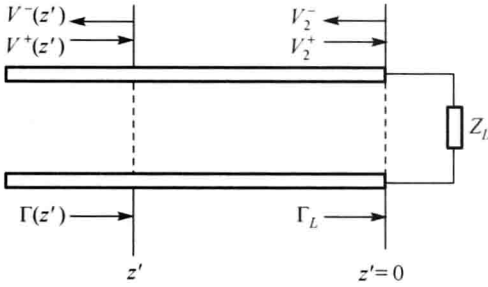


图 1.3 传输线上的入射电压、反射电压和反射系数

反射系数还可以表示为：

$$\Gamma(z') = \Gamma_L e^{-j2\beta z'} = |\Gamma_L| e^{j(\phi - 2\beta z')} \quad (1.14)$$

其中  $\Gamma_L$  为终端反射系数。

$$\Gamma_L = \frac{V_2 - I_2 Z_0}{V_2 + I_2 Z_0} = |\Gamma_L| e^{j\phi} \quad (1.15)$$

综上所述，可以得到如下结论：

- ① 反射系数  $\Gamma(z')$  随传输线位置变化。
- ② 反射系数  $\Gamma(z')$  为复数，这反映出反射波与入射波之间有相位差异。

③ 无耗传输线上任一点反射系数的模值是相同的，说明无耗传输线上任一点反射波与入射波振幅之比为常数。

④ 反射系数  $\Gamma(z')$  是周期性函数，周期为  $\lambda/2$ 。

⑤ 当  $Z_L = Z_0$  时，反射系数  $\Gamma_L = 0$ ，传输线上无反射波，只有入射波，称为行波状态。

⑥ 当  $Z_L = 0$  (终端短路) 时，反射系数  $\Gamma_L = -1$ ；当  $Z_L = \infty$  (终端开路) 时，反射系数  $\Gamma_L = 1$ ；当  $Z_L = \pm X_L$  (终端接纯电抗负载) 时，反射系数  $|\Gamma_L| = 1$ ，这三种情况下入射波和反射波的振幅相等，存在相位差异，称为驻波状态。

⑦ 当  $Z_L = R_L \pm X_L$  时，反射系数  $0 < |\Gamma_L| < 1$ ，称为部分反射工作状态，为行驻波状态。

### (3) 驻波系数和行波系数

由上面的结果可以看出，反射系数是复数，且随传输线的位置而改变。为更方便地表示传输线的反射特性，工程上引入驻波系数的概念。

驻波系数定义为传输线上电压最大点与电压最小点的电压振幅之比，用 VSWR 或  $\rho$  表示。驻波系数也称为电压驻波比。

$$\text{VSWR(或}\rho) = \frac{|V_{\max}|}{|V_{\min}|} \quad (1.16)$$

$$\rho = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} \quad (1.17)$$

电压驻波比的倒数为行波系数，用  $K$  表示。

$$K = \frac{1}{\rho} = \frac{|V_{\min}|}{|V_{\max}|} \quad (1.18)$$

$$K = \frac{1 - |\Gamma_L|}{1 + |\Gamma_L|} \quad (1.19)$$

可以得到如下结论。

- ① 当  $|\Gamma_L| = 0$ ，也即行波状态时，驻波系数  $\rho = 1$ ，行波系数  $K = 1$ 。