



学士学位论文

THESIS OF BACHELOR



论文题目： 大规模物联网广播机制设计与实现

学生姓名: 李 可
学生学号: 516021910494
专业: 信息工程
指导教师: 田晓华教授
学院(系): 电子信息与电气工程学院

大规模物联网广播机制设计与实现

摘要

近来，随着物联网技术的不断创新和移动网络的快速发展，大规模物联网中的设备互相通信和并行控制这一研究领域逐渐引起了研究者越来越浓厚的兴趣。大规模物联网广播机制下的并行通信与控制系统有着非常广阔的应用前景，例如控制无人机集群或机器人集群为人类提供送快递的服务，或是对智能家居设备、医疗纳米机器人、无人驾驶汽车的控制等等。

在这样一种大规模物联网的应用之中，能量消耗是值得重点考虑的因素，因此将不需要消耗能量的反向散射标签作为该广播机制的技术基础是一个很不错的选择，也是现在很多物联网系统中使用的方式。该大规模物联网广播机制的设计可以采用每个设备搭载一个反向散射标签的形式，通过广播激励信号实现对多个标签、多个设备的并行控制。然而，目前反向散射系统的下行链路都是广播式的，而没有并行下行链路，所有标签同时只能从广播的激励信号中得到相同的信息。我希望改变这种现状，因此就在本文中设计了反向散射并行下行链路的实现算法，也即设计了大规模物联网广播机制及其并行通信与控制系统。同时，我在 Keysight ADS 仿真软件上和 PCB 电路板上都验证了该方法的可行性。据我所知，这是第一篇研究反向散射并行下行链路的论文。

关键词： 大规模物联网，反向散射系统，下行链路，OFDM 调制，二极管混频器

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF BROADCAST MECHANISM IN LARGE-SCALE INTERNET OF THINGS

ABSTRACT

Recently, with the continuous innovation of the technology of Internet of Things (IoT) and the rapid development of mobile networks, the research field of large-scale Internet of Things and the parallel communication and control of its devices has gradually drawn more and more attention from researchers. The parallel communication and control system under the broadcast mechanism in large-scale Internet of Things has very broad application scenarios, such as controlling clusters of drones or robots to provide courier services for people, or controlling smart home devices, medical nano-robots, unmanned vehicles and so on.

In such a large-scale IoT application, energy consumption is an important factor to be considered. Therefore, it is a good choice to base the broadcast mechanism on backscatter tags that do not consume energy themselves, which are widely adopted in current IoT systems. The basic idea of this broadcast mechanism in large-scale Internet of Things is to allow each IoT device to carry a backscatter tag, and realize the parallel control of multiple tags and devices through broadcasting excitation signals. However, the downlink of current backscatter systems is in the form of broadcasting instead of parallel downlink, which means all tags can only get the same information from the broadcast excitation signal simultaneously. What I want to do is to change the current downlink mechanism in backscatter systems. As a result, in this paper, I designed the algorithm of implementing backscatter parallel downlink, which is an algorithm realizing the parallel communication and control system under the broadcast mechanism in large-scale Internet of Things as well. I verified the feasibility of this design on Keysight ADS, a simulation software, and on the PCB circuit boards. As far as I am concerned, this is the first paper studying backscatter parallel downlink.

Key words: large-scale Internet of Things, backscatter system, downlink, OFDM modulation, diode mixer

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 大规模物联网	1
1.1.2 反向散射系统	3
1.2 本文贡献与创新	4
1.3 本章小结	4
第二章 相关文献	5
2.1 反向散射下行链路	5
2.2 大规模物体控制	6
2.3 本章小结	6
第三章 反向散射并行下行链路的算法实现	7
3.1 肖特基二极管混频器	7
3.2 标签接收机电路解调 OFDM 信号	10
3.3 本章小结	12
第四章 仿真电路验证和结果分析	13
4.1 标签接收机两次下变频验证与结果分析	13
4.1.1 二极管混频器下变频验证与结果分析	13
4.1.2 RF 开关混频验证与结果分析	15
4.2 标签接收机解调 OFDM 信号验证与结果分析	16
4.2.1 OFDM 信号的调制和实验参数设置	16
4.2.2 仿真接收机电路解调 OFDM 信号的结果分析	17
4.3 本章小结	19
第五章 PCB 电路验证和结果分析	20
5.1 实验器材与设备	20
5.2 标签接收机两次下变频验证与结果分析	21
5.2.1 二极管混频器下变频验证与结果分析	21
5.2.2 RF 开关混频验证与结果分析	22
5.3 标签接收机解调 OFDM 信号验证与结果分析	26
5.4 本章小结	30
第六章 本文设计的不足与未来的工作	31
6.1 本文设计的不足之处	31
6.2 未来工作的展望	32
6.3 本章小结	32
全文总结	33

参考文献	34
致 谢	36

插图索引

图 1-1 大规模物联网中的并行通信与控制系统的应用前景	2
图 1-2 反向散射标签的工作原理：接收载波信号，通过自身的电路将数据调制到载波上，再反射出去	3
图 3-1 反向散射并行下行链路实现方法示意图	7
图 3-2 二极管的 I-V 特性曲线 ^[19]	8
图 3-3 单端二极管混频器的原理图 ^[20]	9
图 3-4 IEEE 802.11g 在 2.4GHz 频段的信道 ^[21]	10
图 3-5 RF 开关混频电路图	11
图 3-6 以第一个子信道为例图示反向散射标签接收机解调 OFDM 信号的过程	11
图 4-1 验证二极管和 RF 开关混频效果的实验的逻辑图	13
图 4-2 验证二极管混频器的 Keysight ADS 仿真电路图	14
图 4-3 二极管混频器的仿真结果图	14
图 4-4 验证 RF 开关混频的 Keysight ADS 仿真电路图	15
图 4-5 RF 开关混频的仿真结果图	15
图 4-6 接收机电路解调 OFDM 信号的 Keysight ADS 仿真电路图	17
图 4-7 第一组实验解调 OFDM 信号得到的仿真结果和 ground truth 的对比	18
图 4-8 第二组实验解调 OFDM 信号得到的仿真结果和 ground truth 的对比	18
图 4-9 第三组实验解调 OFDM 信号得到的仿真结果和 ground truth 的对比	19
图 5-1 AD 中实际标签接收机电路原理图	21
图 5-2 AD 中实际标签接收机电路 PCB 电路图	22
图 5-3 验证二极管混频器下变频效果的 PCB 电路及验证结果	22
图 5-4 FPGA 分频输出的时钟信号波形图	23
图 5-5 RF 开关混频验证实验环境搭建图（不使用 RF 开关组）	24
图 5-6 RF 开关混频验证实验环境搭建图（使用 RF 开关组）	24
图 5-7 RF 开关混频验证的接收信号图	25
图 5-8 Keysight ADS 中利用 Smith 圆图进行阻抗匹配	27
图 5-9 第一组实验的本地振荡信号和解调信号波形图	27
图 5-10 第一组实验中接收机电路解调信号波形图分析	28
图 5-11 第二组实验的解调信号波形图	29
图 5-12 第二组实验中接收机电路解调信号波形图分析	29

表格索引

表 4-1 仿真验证标签接收机电路解调 OFDM 信号性能的三组对照实验参数	17
表 5-1 PCB 电路实验的器材与设备	21

第一章 绪论

近年来，随着移动网络的快速发展和硬件设备的不断创新，物联网（Internet of Things, IoT）这一概念正在被广泛地关注和研究。物联网是一个由相互关联的计算设备、机械和数字机器组成的系统，该系统具有唯一标识符（unique identifiers, UID），并具有通过网络传输数据的能力，而无需人与人或人与计算机的交互^[1]。物联网这一新颖的技术在现代无线通信的场景中正在迅速普及，这个概念的基本思想是利用在我们周围普遍存在的各种物体或对象，例如射频识别（radio frequency identification, RFID）标签、传感器、执行器、移动电话等，这些物体或对象通过独特的寻址方案能够实现彼此的交互并与他们相邻的设备合作以达成共同的目标。

物联网被认为是未来互联网的一部分，它将包含数以亿计的智能通信“物”。物联网将赋予这些大量的互相连接的设备以新的功能，这其中就包括实现大规模设备的并行通信与控制。这些异构的设备互相连接、互相合作，将通过物理实体和虚拟组件进一步拓展我们这个世界的边界。因此，物联网中的大规模物体无线通信与控制系统在生活中也有了越来越多的应用前景。例如控制无人机集群，让它们为人们提供送快递等服务。抑或是利用这样一种系统实时更新商店中货品的价格牌，同时更新成百上千个价格牌可以有效地节省人力成本。在这样一种大规模物联网的应用当中，能量消耗是值得重点考虑的因素，因此我就将目光转向了不需要消耗能量的反向散射标签之上。

反向散射标签利用发射机发射的激励信号，将标签自身所携带的信息加载到激励信号之上再反射出去，由接收机接收反射信号并加以解调得到所需的信息。反向散射系统的好处在于散射标签不需要消耗能量，能量由激励信号提供。

利用反向散射低能耗这一特点，在每一个设备上都装上一个反向散射标签，通过广播激励信号就可以实现对多个设备的同时控制。但是目前反向散射系统的下行链路，即信号发射端到标签这条链路，不是并行的，所有标签同时只能解调出一种信号。我希望改变这种状况，实现并行下行链路，让不同标签解调出不同信号，这样每个设备上带有的反向散射标签就会解调出发射端仅针对设备发射的独特信号，也即每个设备能够同时得到不同的信息、不同的指令，这样就可以实现对大规模物体的无线通信和控制系统，为每个设备实现个性化的控制和通信。

针对以上问题，我在毕业设计中开展了一系列的研究，取得了一定的成果。下面将首先介绍该问题的研究背景和本文的贡献与创新之处。

1.1 研究背景

本文的研究背景主要聚焦在大规模物联网和反向散射系统这两方面内容之上，因此本节将着重介绍这两方面的背景知识，为本文之后的技术与实验部分内容的展开做好铺垫，也方便读者更好地理解本文的研究领域与研究意义。

1.1.1 大规模物联网

物联网的概念起源于 1982 年卡耐基梅隆大学（Carnegie Mellon University）的一台经过改造的可口可乐售卖机，这台可乐售卖机是第一个与互联网相连接的器物，它能够报告

它的存货和新放入的饮料是否是冷的^[1]。WEISER M 在 1991 年的一篇关于普适计算和通信 (ubiquitous computing, UbiComp/pervasive computing and communications, PerCom) 的文章提出了现代物联网的一个构想^[2]。1994 年, RAJI R 将物联网这个概念描述为“将小数据包移动到一个大型节点集, 以便集成从家用到工厂的所有器件并实现其自动化”^[3]。在 1993 年到 1997 年之间, 几家公司提出了物联网的实现方案, 例如 Microsoft 的 at Work 和 Novell 的 NEST。JOY B 在 1999 年的达沃斯世界经济论坛上提出的“六网 (Six Webs)” 框架中, 将设备到设备的通信 (device-to-device communication, D2D Communication) 的构想作为该框架的一部分一起提出, 这一构想推动了该领域的发展^[1]。在 1990 年代末期, 物联网的愿景就是将日常所见的物体互相连接以实现我们的社会和日常生活的自动化。思科公司 (Cisco Systems) 认为真正的物联网“诞生”在 2008 年至 2009 年之间, 因为世界上物与人的比例从 2003 年的 0.08 增长到了 2010 年的 1.84, 即思科公司将物联网定义为“就是连接到互联网上的‘物体或对象’多于人的时间点”^[4]。

在过去的几十年中, 物联网在各种应用场景中实现了技术创新, 例如智慧城市、智能家居以及自动驾驶机器人、汽车和无人机等。预计在不久的未来, 物联网将包含数百亿的传感器以及其他类型的节点, 通过大规模物联网中的传感器收集的大数据在云中进行整合和分析, 可以对现实世界中人们普遍关注的问题进行测量和调节, 例如污染、交通拥堵和停车位监测等。在云计算的推动下, 物联网技术可以渗透到我们社会的各个领域, 从交通控制到业务管理, 从天气监测到家居管理, 都是物联网应用的场景。同时, 它也可以促进从物理到生物学的多个领域的科研突破^[5]。

因此, 随着移动网络技术, 特别是 5G 技术的不断发展, 以及硬件设备的不断更新, 针对大规模物联网的研究将是未来研究的一个重点领域。在大规模物联网的应用中, 除了利用传感器等节点收集数据进行整合和分析这一条上行链路之外, 还包括使用一个中心发射机向大规模物体或设备同时发送信息以控制它们完成一定的动作来为人类服务的这一条下行链路。为了提高控制和通信的效率, 实现实时通信和控制, 就需要实现大规模物联网中的并行通信和控制, 而本文研究的重点内容即是如何在大规模物联网中实现并行下行链路, 也就是设计大规模物联网中的广播机制, 以实现并行通信和控制。随着物联网技术及其辅助技术的不断进步, 大规模物联网中的并行通信与控制系统在生活中有了越来越多的应用前景。如图1-1所示的两种应用前景都可以成为未来大规模物联网建设和服务的绝佳场景, 在这种场景下, 人类可以同时控制一群物体或设备实现不同的操作, 为人类自己服务, 提高人类的生活质量。



a) 控制无人机群为人类送快递



b) 同时更新商店中所有商品的价格牌

图 1-1 大规模物联网中的并行通信与控制系统的应用前景

如之前所说，在大规模物联网的实现中，能量消耗是需要重点考量的因素，因此在我的毕业设计中，我选择了低能耗的反向散射系统作为实现这一广播机制的技术手段，对于反向散射系统的背景介绍将在1.1.2节中详细展开。目前反向散射系统的下行链路并不是并行的，所有标签只能解调出同一种信号，这与并行通信与控制的想法是违背的，因此我的研究就是如何实现反向散射系统的并行下行链路，让不同标签同时解调出不同的信号、得到不同的信息、实行不同的操作，这样也就为大规模物联网中并行通信和控制的广播机制的实现提供了有效的技术手段。到目前为止，反向散射系统的并行下行链路这一问题还鲜有人进行研究，所以这是本文的创新点之一，本文的贡献与创新将在1.2节中详细叙述。

1.1.2 反向散射系统

“物联网”这个词汇是由麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) Auto-ID Center 的创立者之一 ASHTON K 于 1999 年任职于 Procter & Gamble 公司时提出的。同时，他认为射频识别技术是物联网的必要技术之一，它可以让电脑操控管理所有个体设备或物体。

反向散射 (backscatter) 是一种利用诸如射频识别技术等一系列技术的通信方法，它像镜子反射光线一样，通过反射射频 (radio-frequency, RF) 信号来达到通信的效果。如图1-2所示，反向散射的工作原理是，使用一种被称为反向散射标签 (backscatter tag) 的特殊设备，反射附近的载波发射机发出的输入激励信号。同时，输入信号会激活芯片或集成电路 (integrated circuit, IC)，芯片或集成电路会有选择地改变信号的幅度、频率和/或相位以进行数据调制。然后，反向散射信号被接收机捕获，并通过信号处理系统以提取由反向散射标签加载在载波上的信息。在传统或单基地 (monostatic) 的反向散射系统中，例如射频识别阅读器，发射机和接收机是整合在一起的，而在收发分置 (bistatic) 的反向散射系统中它们则是分离的。这些发射机可以使用环境中的射频信号，例如电视 (TV) / 调频 (frequency modulation, FM) 无线电发射塔、蜂窝网络基站、Wi-Fi 接入点 (access points, APs) 来在任何地点实现。因此，反向散射系统具有时间灵活性、空间灵活性、技术灵活性等优点^[6]。

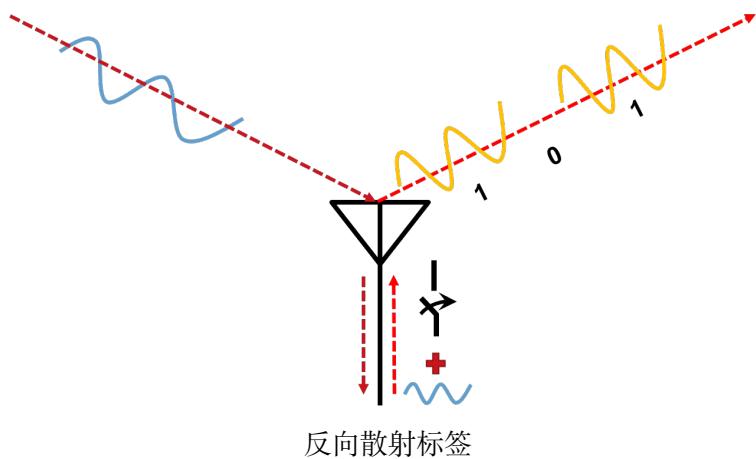


图 1-2 反向散射标签的工作原理：接收载波信号，通过自身的电路将数据调制到载波上，再反射出去

反向散射通信的最主要的优点是能量利用率比较高，也即能耗比较低。相比于其他传统的无线通信技术，例如 Wi-Fi (几十毫瓦特)、蓝牙 (几毫瓦特)、长期演进技术 (Long Term

Evolution, LTE) (几百毫瓦特) 等, 反向散射通信的能量消耗要小 1000 倍以上^[6]。这主要是因为通信系统中最消耗能量的部分, 即射频信号的产生, 在反向散射通信中被转移到了有能量供给的发射机上实现了, 而非在反向散射标签上实现。同时, 信号放大和处理也在发射机上实现了。这样一种设计使得反向散射标签的硬件设计非常简单且便宜, 同时低能耗的特点也可以很容易地将能量吸收技术, 例如太阳能吸收技术, 和反向散射标签相结合, 使其不用使用任何电池。正是因为这些因素, 反向散射通信是应用在物联网设备上的非常好的一项通信技术, 也是大规模物联网的部署能够得以实现的重要的技术基础。

1.2 本文贡献与创新

本文通过研究反向散射通信系统的并行下行链路, 为大规模物联网中设备的并行通信与控制系统提供了一种低能耗、高效率的解决方案。该方案通过设计每个设备上的反向散射标签的个性化的接收电路, 让每个设备的反向散射标签都在广播信号中解调到属于本设备的独特的信号、获取独特的信息、完成独特的任务, 从而实现大规模物联网中成千上万的设备的并行通信与控制。特别地, 本文的贡献与创新点主要有以下三条:

- 本文通过设计反向散射标签的接收电路, 提出了将反向散射通信系统原有的广播式的下行链路替换为并行下行链路的实现方法, 提升了反向散射通信下行链路的通信效率, 能够同时让不同标签接收个性化的信息, 实现个性化的控制, 为大规模物联网的并行通信与控制系统提供了重要的技术基础。据我所知, 这是第一次有人提出反向散射系统的并行下行链路的通信方法。此外, 该方法实际上是针对反向散射中的通信设备的, 并不局限于反向散射通信的应用, 也可以在这些设备上将其与其他通信技术相结合。从更高的层次上来说, 该方法实际上是一个低功耗相干解调技术, 且这是首次有人提出具体方法使用该项技术解调 OFDM 信号。
- 我在 Keysight Advanced Design System (ADS) 这一仿真软件上完全仿真了这一接收机电路, 并将调制好的 OFDM 信号输入这一仿真电路, 成功实现了 OFDM 信号的解调, 从仿真上证明了本文提出的反向散射并行下行链路的实现方法的可行性。
- 我将仿真成功的接收机电路打印成 PCB 电路板, 并使用购买和租赁的器材和设备实际做出了这一接收机电路, 同时对其解调信号的性能进行了测试, 并进行了结果分析, 从实际 PCB 实验上证明了本文提出的广播机制的可行性。同时我还测试了该标签接收机电路解调 OFDM 信号时的功耗约为 $467.3\mu\text{W}$, 远低于有源无线电解调的功耗, 由此凸显了本文设计的接收机低能耗的这一优势。

1.3 本章小结

在本章中, 我首先介绍了本文的研究问题和研究思路, 接着分大规模物联网和反向散射系统两部分具体介绍了本文涉及到的研究领域与背景知识, 最后, 着重突出了本文的贡献与创新点。

本文接下来的章节将按照如下的顺序组织。第二章将着重梳理本文研究问题的相关领域的研究论文; 第三章将具体介绍反向散射系统中并行下行链路的实现方法, 也即大规模物联网的广播机制中, 并行通信与控制系统的实现方法; 第四章将介绍我在 Keysight ADS 上对标签上实现反向散射并行下行链路的接收机电路的仿真及其结果; 第五章将讲述如何将仿真电路做成 PCB 电路板并进行性能测试, 同时分析了测试结果; 第六章将分析本文设计的不足之处和未来工作的展望; 最后一章对全文进行了总结。

第二章 相关文献

本文主要研究的问题是如何通过设计反向散射通信的并行下行链路实现大规模物联网中的并行通信与控制系统，因此，本文研究问题的相关领域主要有反向散射下行链路和大规模物体控制这两个。本章将着重介绍这两方面的相关研究文献，对有关这两个问题的论文做一个梳理，让读者能够更好地了解本文研究问题的研究现状，从而对本文的研究有一个更好的了解和评估。

2.1 反向散射下行链路

有关反向散射系统的背景知识已经在1.1.2节中进行了详细的介绍。由于传统的反向散射通信主要利用的是标签反射的信号进行识别和信息收集，大量的文献都是研究反向散射上行链路的，因此针对上行链路的研究和开发已经是比较成熟的了，例如 BHARADIA D 等人提出的能够达到传统 Wi-Fi 反向散射系统 1000 倍吞吐量的 BackFi^[7] 和 ZHANG P 等人提出的能够让 802.11b 接收机像调解 Wi-Fi 包一样解调反向散射信号的 HitchHike^[8] 都是在上行链路上做出技术突破的，他们也都在文章中提到了，他们的研究主要是针对物联网设备的上行链路功能的，因为这些设备，例如健身追踪器、家用传感器、可穿戴设备等，都是需要收集大量传感器数据，然后将它们上传到云中，这些设备通常不需要下行链路，就算需要的话，所要求的吞吐量也很低，只要几 Kbps 就能够满足，所以不需要特别地研究反向散射下行链路。

但是，随着人类对生活服务的要求和期望越来越高，以及物联网和移动通信技术的不断发展，仅仅利用反向散射系统的上行链路收集传感器数据服务于人类已经不能满足人们的需求了，现在的研究者也逐渐开始研究和改进反向散射的下行链路，通过高效地向传感器或设备发送一些数据，以达到控制物联网设备为人类服务的目的。2014 年，SMIDA B 等人提出了一套基于反向散射调制（backscatter modulation, BM）的全双工无线通信系统，能够高效地适应高下行流量^[9]。同年，KELLOGG B 等人在他们提出的能够为射频激励的设备提供网络连接的 Wi-Fi 反向散射系统中，给出了 Wi-Fi 反向散射标签的下行通信的方法。因为 Wi-Fi 反向散射标签无法直接解调 Wi-Fi 数据包，因此他们依靠能量检测电路来解调 Wi-Fi 数据包，当能检测到数据包的能量时，认为该数据包存在，则解调出比特位“1”，否则，则数据包不存在，则解调出比特位“0”^[10]。GONG W 等人在 2017 年注意到之前的工作没有仔细研究过反向散射下行链路，因此系统传输数据的效率还没有被很好地开发，所以他们就在反向散射网络中引入一种速率映射算法，可以帮助上行链路和下行链路选择最佳的速率，从而提升了反向散射下行链路的质量，进而提升了系统数据传输的效率^[11]。同年，KOTARU M 等人在文章中^[12] 提出他们的算法可以通过运行一个在 ZHANG P 等人的文章中^[13] 提出的介质访问控制（Media Access Control, MAC）子层协议来定位多个标签，它的基本思想是将接入点到标签的下行 MAC 控制信息编码为接入点发出的 Wi-Fi 数据包的长度，这样通过检查接收到的 Wi-Fi 数据包的长度，标签就可以决定它是否应该响应。到了 2019 年，KAPETANOVIC Z 等人提出了 Glaze 系统^[14]，可以通过在现有的无线信号上引入小的扰动来传输数据，这样就可以在例如 FM、TV 和 Wi-Fi 等已有的无线信号上覆盖上低成本、低耗能的环境反向散射（ambient backscatter）的下行链路，以实现物联网设备的数据传输，同时不影响已有的无线信号的传输。

以上这些文章都对反向散射下行链路做了一定的研究和改进，但他们的重点主要在于提升下行链路的流量和传输效率、在 Wi-Fi 反向散射中实现下行链路或是将下行链路应用于定位上，据我所知，到目前为止还没有论文研究过如何在反向散射系统中实现并行下行链路，因此大规模物联网的并行通信和控制的广播机制也就还不能很高效地实现，而本文就是重点解决这个问题的，这就弥补了该领域对于这个问题研究的空白。

2.2 大规模物体控制

大规模物联网广播机制的最终目的是同时控制大量的物联网设备，让他们执行特定的行为，为人类提供服务。因此，除了上一节介绍的反向散射下行链路的相关文献之外，本节将着重介绍一下大规模物体控制方面的相关文献。

JUNG J H 等人在文章中利用多跳通信（multi-hop communications）进行机器人之间的相互通信，设计了一个算法解决控制多机器人协同寻找路径的问题^[15]。GUO S 等人则在文章中给出了一个针对球形两栖机器人的多机器人协同控制系统，该系统主要是建立了一个支持多机器人连接的单点对多点网络。此外，他们也设计了多机器人协同控制系统的主从控制方法（master-slave approaches），其中领导机器人可以引导控制从属机器人。他们提出的多机器人协同控制系统可以协调大量的机器人，使其成为一个团队^[16]。此外，TUNA G 等人提出了无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）中实现移动机器人的协同控制的算法，从而提升了无线传感器网络部署的效率^[17]。

总的来说，在过往的文献中有许多关于大规模物体控制的研究，但很少有在大规模物联网中基于反向散射通信这项技术进行的相关研究，因此，在这方面，本文的创新性也是十分充足的。

2.3 本章小结

本章主要从反向散射下行链路和大规模物体控制这两个方面介绍了相关的文献，这两个领域之前都有学者做了许多研究，但都没有关注到本文研究的通过实现反向散射并行下行链路实现大规模物联网并行通信与控制系统的问题上，因此，据我所知，本文是第一篇研究该问题的文章，具有突出的贡献和创新度。

第三章 反向散射并行下行链路的算法实现

如本文之前所述，大规模物联网广播机制的设计最重要的就是实现反向散射并行下行链路。传统的反向散射系统的下行链路是广播式的，每个标签同时收到的都是一样的信息，并不是并行下行链路。本章将重点介绍如何在算法上实现反向散射并行下行链路。本文讨论的反向散射通信将主要针对 IEEE 802.11a/g 协议进行研究，直接来源为 IEEE 802.11g 协议标准，因为 IEEE 802.11g 在 2.4GHz 频段使用正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）调制技术，数据传输速率高，且 2.4GHz Wi-Fi 信号强、衰减小、穿墙强、覆盖距离远，适合在大规模物联网这个场景下应用。

我提出的反向散射并行下行链路的实现方法的示意图如图3-1所示，由一个中心基站对一系列搭载反向散射标签的物联网设备广播控制信息。首先，由中心基站将所有物联网设备所需要接收的信息全都加载在 OFDM 信号的各个子信道上，然后广播出去。物联网设备上搭载的反向散射标签包括天线和混频器，天线接收到广播的 OFDM 信号之后，通过混频器实现下变频，然后经过后续电路解调 OFDM 信号，得到属于自己的那个子信道上的信息。这样，不同的标签就会解调出不同的信号，每个设备都会得到中心基站发送的仅针对本设备的控制信息，也即所有设备能够同时得到不同的信息、不同的指令，这样就可以实现对大规模物体的无线通信和控制系统，为每个设备实现个性化的控制和通信。

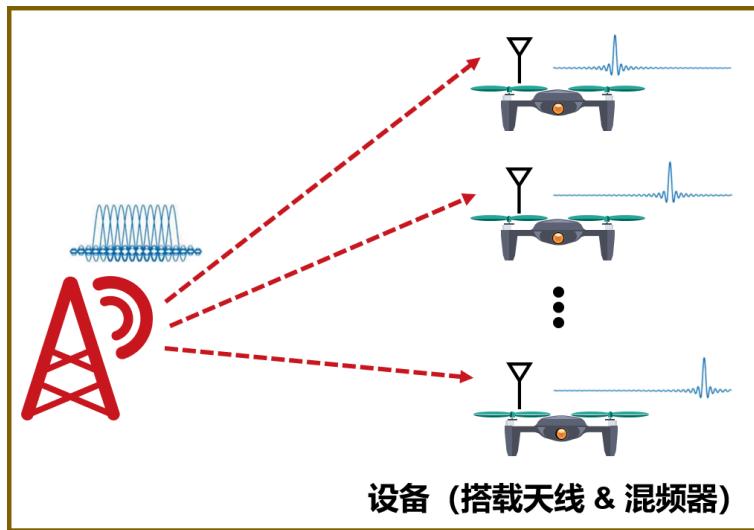


图 3-1 反向散射并行下行链路实现方法示意图

接下来，我就将在3.1节中介绍使用肖特基二极管制成混频器的原因和方法，并在3.2节中给出标签接收机解调 OFDM 信号的算法和电路。

3.1 肖特基二极管混频器

前文提到了，对某一个标签来说，在接收到中心基站发射机广播的 OFDM 信号之后，物联网设备搭载的反向散射标签的接收机需要解调 OFDM 信号得到属于自己的信息。而发射机广播的 OFDM 信号属于 IEEE 802.11g 的 2.4GHz Wi-Fi 频段，如果在这个频段直接进行信号解调会对解调电路有着过高的要求，因此，反向散射标签首先需要对信号实现下变频，将

高频信号通过频率搬移移动到低频段，再进行之后的解调工作。下变频需要混频器实现，因此，设计混频器就成了标签接收机电路需要解决的第一个问题。一般来说，射频混频器会需要用一个本地振荡器（oscillator）产生一个 2.4GHz 左右的本地振荡信号，然后将它与接收到的 OFDM 信号进行混频，就可以将 OFDM 信号搬到低频段，再进行解调。然而，本地振荡器需要外部供能，它的存在会消耗大量的能量，不符合我们用反向散射系统追求低能耗的初衷，而且如果在大规模物联网中大量部署会产生难以估计的巨大的能量消耗，这对大规模物联网广播机制的实现和运行都是极为不利的。因此，为了解决本地振荡器能耗过大的问题，受到 PÉREZ-PENICHET C 等人设计的不需要电池的 802.15.4 接收机^[18]的启发，我利用肖特基二极管的非线性效应制成混频器，在低能耗的条件下即可实现 OFDM 信号的下变频。

二极管之所以能够制成混频器，主要得益于其 I-V 特性的非线性，二极管的 I-V 特性可以表示为

$$I_D(V) = I_s(e^{V_D/\eta V_t} - 1) \quad (3-1)$$

其中 V_D 是二极管两侧的电压差， I_D 是通过二极管的电流， I_s 是二极管的反向饱和电流， η 是二极管的理想系数，对于肖特基二极管 $\eta = 1.2$ ， $V_t = kT/q = 26mV @ RT$ 。常见二极管的 I-V 特性曲线如图3-2所示，可以看见，二极管的 I-V 特性存在非线性，利用这一点可以将其制成混频器，下面本节将详细介绍二极管混频器电路。

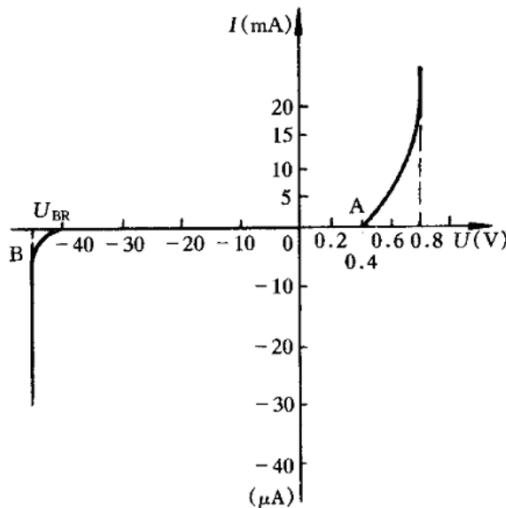


图 3-2 二极管的 I-V 特性曲线^[19]

现在假设有二极管工作点 V_{D0} 周围的一个小信号 $v(t)$ ，按照泰勒系数展开可以将二极管的电流写成

$$I_D(V) = I_D(V_{D0}) + G_d(v(t)) + \frac{1}{2!}G'_d v(t)^2 + \frac{1}{3!}G''_d v(t)^3 \quad (3-2)$$

其中 $V(t) = V_{D0} + v(t)$ ， G_d 、 G'_d 、 G''_d 分别为 I_D 对 V_D 在 $V = V_{D0}$ 时的一、二、三次偏导。在式 (3-2) 中，二次项可以用来进行混频的操作，其他高次项和直流项为干扰项或毛刺，需要用滤波器去除。

利用二极管产生的二次项，可以将 OFDM 信号和载波信号进行时域上的相乘，相当于进行了频域上的卷积，从而完成频率的搬移。单端的二极管混频器的原理图如图3-3所示。

双工器 (Diplexer) 将输入的射频 (RF) 和本地振荡 (LO) 信号叠加，然后用它们的组合来驱动二极管。二极管在直流电压 V_{D0} 上偏置，直流电压通过一个隔直电容 C_B 与 RF 和 LO 的信号路径解耦合。射频扼流圈 (RF Choke) 防止 RF 或 LO 信号进入偏置的直流源。由于二极管非线性而产生的其他高频分量通过中频滤波器 (IF Filter) 进行滤波，使得仅有二次项分量出现在输出中，就可以得到我们需要的混频信号。

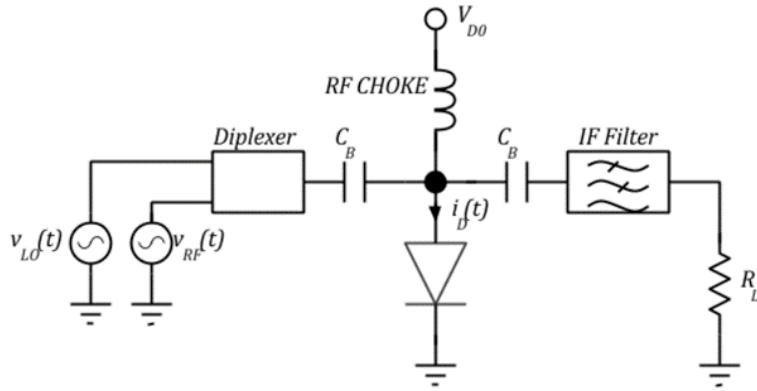


图 3-3 单端二极管混频器的原理图^[20]

我们将 RF 信号和 LO 信号分别写成 $v_{RF}(t) = V_{RF} \cos \omega_{RF} t$ 、 $v_{LO}(t) = V_{LO} \cos \omega_{LO} t$ ，那么输入信号就可以写成 $v(t) = v_{RF}(t) + v_{LO}(t) = V_{RF} \cos \omega_{RF} t + V_{LO} \cos \omega_{LO} t$ ，这样，二极管因为在工作点 V_{D0} 上加在两端的电压 $v(t)$ 而产生的电流就可以写成

$$i_D(t) = I_D(V_{D0}) + G_d v(t) + \frac{G'_d}{2!} v(t)^2 + \dots \quad (3-3)$$

其中

$$\begin{aligned} v(t)^2 &= (V_{RF} \cos \omega_{RF} t + V_{LO} \cos \omega_{LO} t)^2 \\ &= V_{RF}^2 (1 + \cos 2\omega_{RF} t) + V_{LO}^2 (1 + \cos 2\omega_{LO} t) \\ &\quad + 2V_{RF}V_{LO} [\cos(\omega_{RF} - \omega_{LO})t + \cos(\omega_{RF} + \omega_{LO})t] \end{aligned} \quad (3-4)$$

因为 ω_{RF} 和 ω_{LO} 相隔很近，所以除了二次项分量 $\cos(\omega_{RF} - \omega_{LO})t$ ，其他的分量都比它大很多，因此都能够被中频滤波器滤除。最后得到输出电流为

$$i_{IF}(t) = -G'_d V_{RF} V_{LO} \cos(\omega_{RF} - \omega_{LO})t \quad (3-5)$$

可以看到式 (3-5) 中，我们得到的输出信号的频率在 $\omega_{RF} - \omega_{LO}$ 处，这样就相当于用 LO 信号将 RF 信号进行了下变频，从射频频段搬移到了低频段，从而方便了后续解调电路的信号解调工作。对于本文中的标签接收机电路，因为本地振荡器产生本地振荡信号会消耗很大的能量，因此我们在广播 OFDM 信号的同时也广播一个载波信号，这样标签接收机通过天线就可以直接接收到两个信号的叠加，OFDM 信号和载波信号分别相当于图3-3中的 RF 和 LO 信号，它们的混合信号输入进来直接驱动二极管混频器，这样就可以实现 OFDM 信号下变频的效果，同时为标签接收机电路节省大量的能量消耗。

在本文中，我们使用肖特基二极管混频器，将中心频率为 2.412GHz 处的 OFDM 信号通过和 2.412GHz 的载波混频，下变频到中心频率为 0Hz 处，然后进行下一步操作解调 OFDM 信号，这将在3.2节中详细介绍。

3.2 标签接收机电路解调 OFDM 信号

为了解释本文中具体如何设计大规模物联网的广播机制以及如何设计反向散射标签接收机电路解调 OFDM 信号，首先我简单介绍一下 IEEE 802.11g 协议标准中的 OFDM 信号。IEEE 802.11g 使用 2.4GHz Wi-Fi 频段，该协议在这个频段使用 OFDM 调制技术，可以使数据传输速率提高到 20Mbit/s 以上，所以是一个很高效的协议。IEEE 802.11g 在 2.4GHz 频段的信道可以用图3-4来表示，根据协议标准，中心频率范围为 2.412GHz-2.484GHz，共划分为 14 个信道，中国可以使用 13 个信道（1-13），美国可以使用 11 个信道（1-11）。每个信道实际带宽为 22MHz，其中 2MHz 为隔离频带，信道有效带宽为 20MHz。相邻信道中心频点间隔为 5MHz，相邻的多个信道存在频率重叠，但是由于正交性，并不影响信号的解调。本文使用的是中心频率为 2.412GHz 的这个信道，进行 OFDM 调制之后，除去一个直流（DC）子信道和位于频带两侧的子信道，共有 52 个可用 OFDM 子信道（subcarriers），其中 48 个子信道为数据子信道，4 个子信道传输导频信号（pilot signal）。由于这个 OFDM 信号是由 64 点的 IFFT 算法生成的，所以这些子信道之间的间隔为 312.5kHz（20MHz/64），因此每个 OFDM 符号（symbol）的有效数据长度 $3.2\mu\text{s}$ ，加上 800ns 的保护间隔（guard interval），每个 OFDM symbol 的长度为 $4\mu\text{s}$ 。

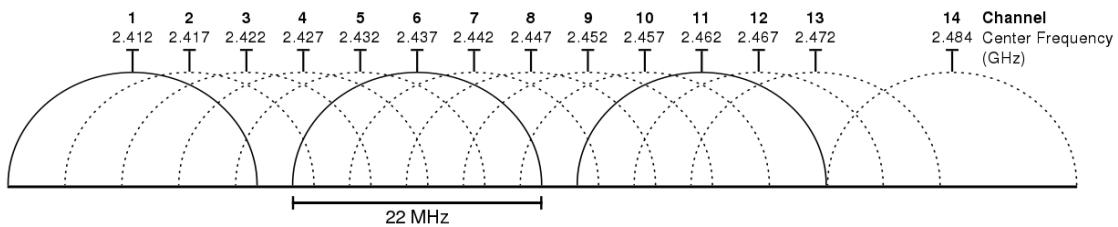


图 3-4 IEEE 802.11g 在 2.4GHz 频段的信道^[21]

在上面提到的以 2.412GHz 为中心频率的 OFDM 子信道上加载数据，就可以通过 OFDM 信号传输信息了，本文使用的广播机制就是为不同的反向散射标签分配不同的子信道，然后在相应的子信道上加载相应的信息，标签再解调得到属于自己的信息即可。但是，反向散射标签的接收机电路不同于普通的 IEEE 802.11g 标准的接收机，可以直接用 FFT 模块解调 OFDM 信号，由于能耗和体积等原因的限制，反向散射标签上不能直接搭载 OFDM 信号解调模块，因此本文就开发了一种新的算法，可以让反向散射标签解调得到对应的子信道信息，同时不会破坏反向散射低能耗的优势。

我提出的反向散射标签解调 OFDM 信号的方法就是在 OFDM 信号经过二极管混频器进行第一次混频完成下变频之后，OFDM 信号变成了以 0Hz 为中频，这时再使用 RF 开关进行第二次小的混频，这次混频的目的是将 0Hz 左右对称的两个子信道都搬移到 0Hz 处进行叠加，然后通过两个子信道相加得到的数据作为该标签从这一个 OFDM symbol 得到的信息。如图3-5所示，开关电路混频的原理就是将需要进行频率搬移的信号 (V_{RF}) 通过开关，然后使用另一个频率的信号 (V_{LO}) 开关电路，这样就可以实现这两个频率信号的混频，完成频率搬移。对于本文的广播机制下的反向散射标签来说，每个标签前面的的二极管混频电路都是相同，但是 RF 开关的混频频率是不同的，这个混频频率是根据标签对应的子信道来决定的。该机制给每个标签分配关于 0Hz 对称的两个子信道，发送给这个标签的信息就加载在这两个子信道上，RF 开关混频之后会将属于该标签的两个子信道搬到 0Hz 处相加，这两个子信道上的数据之和就是该标签需要接收的信息。

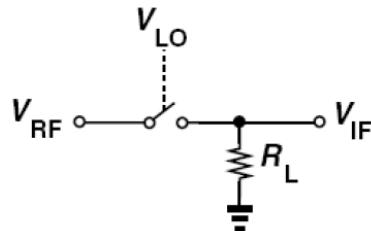


图 3-5 RF 开关混频电路图

举个例子，如图3-6所示，我给第一个反向散射标签分配第一个子信道和与第一个子信道关于 0Hz 对称的子信道，接收天线同时接收广播的 OFDM 信号和 2.412GHz 的载波信号，其中 OFDM 信号每个子信道都赋值 1 或 -1 作为该信道的信息。经过二极管的混频，OFDM 信号的中心频率被搬移到了 0Hz 处，此时对于第一个标签来说，它需要关注的是此时位于 312.5kHz 的第一个子信道和与其对称的位于 -312.5kHz 的子信道上的信息（即是 +1 还是 -1），因此，第一个标签会将它的 RF 开关的混频频率设置为 312.5kHz，这样就可以将 $\pm 312.5\text{kHz}$ 处的第一个子信道和与其对应的子信道在 0Hz 处叠加，此时低通滤波得出的数据即为 ± 2 或 0，如果将 ± 2 作为数字编码的“1”，将 0 作为“0”，通过能量判断电路，第一个标签即可得到它所需要解调的信息。这样，第一个标签从每个 OFDM symbol 都可以得到一个数字编码“1”或者“0”，如果连续发送一系列 OFDM symbols，第一个标签即可得到一串二进制编码，通过特别的约定，就可以从这串二进制编码中得到相应的指令，那么搭载有第一个标签的物联网设备就会做出相应的动作，从而实现了对于此物联网设备的控制。同样的，第二个反向散射标签只要将 RF 开关的混频频率设置为第二个子信道对应的频率，即 625kHz，那么即可解调出第二个子信道及其对称信道上的数据之和，这也就是广播机制中针对它的控制信息。以此类推，每个标签都解调出自己对应的两个子信道上的信息，那么所有标签都可以从广播的 OFDM 信号中同时得到不同的指令、进行不同的操作，那么就实现了反向散射系统的并行下行链路，也即实现了大规模物联网的并行通信与控制系统。

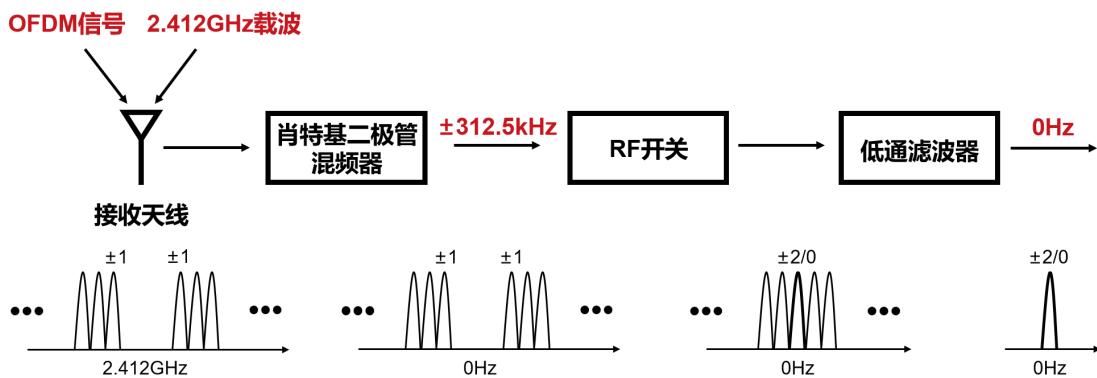


图 3-6 以第一个子信道为例图示反向散射标签接收机解调 OFDM 信号的过程

值得注意的是，传统的 OFDM 子信道之间会有频率交叠，但是由于正交性不影响使用 FFT 算法进行的信号解调。然而，在本方法中，如果子信道出现交叠，是会一定程度上影响 OFDM 信号的解调的。但是，通过分析，OFDM 信号的频域交叠是长时间观察的结果，也就是如果观察一个 OFDM 帧 (frame)，那么可以看到频域的交叠，这是因为前一个 OFDM symbol 结束的时候，下一个 OFDM symbol 开始之前，会出现相位的变化，从而引入了带宽。

但是如果我们在短时间内，也就是在一个 OFDM symbol 的时间 ($4\mu s$) 内完成下变频、二次混频、滤波，那么其实没有相位的变化，OFDM 子信道并不会出现交叠，甚至可能是频域上的一个个冲激信号，带宽为 0，因此用图3-6中的形式来表示 OFDM 子信道是合理的，本文中也不需要考虑子信道交叠带来的影响。

3.3 本章小结

本章从算法上介绍了如何通过实现反向散射并行下行链路，来实现大规模物联网的并行通信与控制系统。本文提出的大规模物联网广播机制采用的是 IEEE 802.11g 协议标准的 2.4GHz Wi-Fi 频段，该频段采用 OFDM 调制方式，数据速率比较高。该广播机制通过在 OFDM 子信道上加载数据然后广播出去来向反向散射标签传输控制信息。标签接收机电路接收到 OFDM 信号之后，首先需要用混频器进行下变频，考虑到低能耗的限制，我在3.1节中采用了肖特基二极管的非线性制成混频器，并从原理上解释了其可行性。

接着，3.2节详细阐述了标签接收机电路解调 OFDM 信号的机制，该机制为每个标签分配了关于 0Hz 对称的两个子信道，加载在这两个子信道上的信息之和即为该标签应该解调出的控制信息。将两个对称子信道相加的方法是将频率搬移到 0Hz 之后的 OFDM 信号再通过 RF 开关进行一次小的混频，每个标签设置不同的 RF 开关混频频率，这样每个标签就能得到不同的两个子信道的信息之和，也就是得到仅属于它的控制信息。在这种广播机制之下，所有标签同时解调出一个 OFDM symbol 中的不同信息、得到不同的指令，这样通过发送一串的 OFDM symbols，即可实现反向散射并行下行链路，也即实现大规模物联网的并行通信与控制系统。

接下来的第四章和第五章分别介绍了我在 Keysight ADS 这一仿真软件和实际 PCB 电路板上验证该算法的过程和结果分析。

第四章 仿真电路验证和结果分析

第三章介绍了大规模物联网广播机制的算法实现，我通过设计了反向散射标签的接收机电路，让它能够在低能耗的条件下解调 OFDM 信号，同时给不同标签分配不同的两个子信道，让每个标签都解调特定的子信道以得到特定的控制信息，这样所有的标签都可以同时解调同一个 OFDM symbol 得到不同的信息、执行不同的指令，从而实现了反向散射并行下行链路，也即实现了大规模物联网的并行通信与控制系统。在本章中，我将针对第三章提出的接收机电路进行 Keysight ADS 这一仿真软件上的仿真，并进行结果的分析。Keysight ADS 是一款专门针对高频电路的仿真软件，非常适合本文的电路场景进行仿真。针对3.1节和3.2节这两部分内容，我分别进行了反向散射标签接收机电路两次下变频和解调 OFDM 信号的仿真实验，这两部分的过程和结果分析分别在4.1节和4.2节中进行了详细介绍。

4.1 标签接收机两次下变频验证与结果分析

为了验证二极管混频器实现下变频的效果，本节设计了一个与输入 OFDM 信号略有不同的仿真实验，更有针对性的验证二极管的混频性能，同时也加入 RF 开关的第二次混频，把两次混频的效果一起验证，确保电路能够正常工作后，再在4.2节中引入 OFDM 信号进行真正的 OFDM 信号的解调。

本节中设计的实验的逻辑图如图4-1所示，为了简单起见，在这个实验中设定射频信号中心频率为 2.4GHz，第一个子信道在偏离中心频率 300kHz 处，所有信号为单频信号。我以研究第一个子信道为例，这样就需要将代表第一个子信道的 2.4003GHz 的单频信号和代表载波信号的 2.4GHz 单频信号同时输入电路中。然后通过肖特基二极管混频器将代表第一个子信道的单频信号下变频到 300kHz 处。接着使用 RF 开关验证第二次混频的效果，为了更方便地观察信号和验证混频性能，在本实验中我使用 RF 开关将下变频后的第一个子信道的信号再进行一次小的搬移到 200kHz 处，而不是 0Hz 处。如果在 Keysight ADS 中仿真的接收机电路能够完成这两次频率搬移，那么就说明仿真上可以成功验证二极管混频器和 RF 开关这两部分的混频性能。

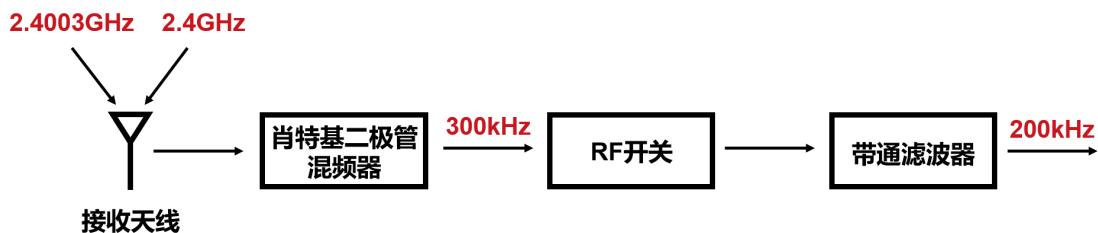


图 4-1 验证二极管和 RF 开关混频效果的实验的逻辑图

4.1.1 二极管混频器下变频验证与结果分析

有了接收机设计的逻辑图，我就开始在 Keysight ADS 这款仿真软件上设计接收机电路。如图4-2所示，我首先按照图3-3所示的二极管混频器原理图，在 Keysight ADS 上画好一个

二极管混频器。输入源使用的是功率源，可以同时发射两个频率的信号，已经完成了信号的叠加。二极管需要有一个模型（Model）输入它的 SPICE 参数，在仿真中我使用的是和真实 PCB 电路板的实验中使用的肖特基二极管 BAT 15-03W 一样的参数，它的 SPICE 参数可以从它的数据手册中找到^[22]。经过二极管混频之后，我使用 LC 带通滤波器滤除多余的信号，根据图4-1中的设计，二极管混频器是将第一个子信道搬移到 300kHz 处，所以带通滤波器的中心频率设计为 300kHz 即可。其他的电容、电感、电阻、直流电压源的参数都根据仿真结果调试修改，以使仿真得到最好的效果。

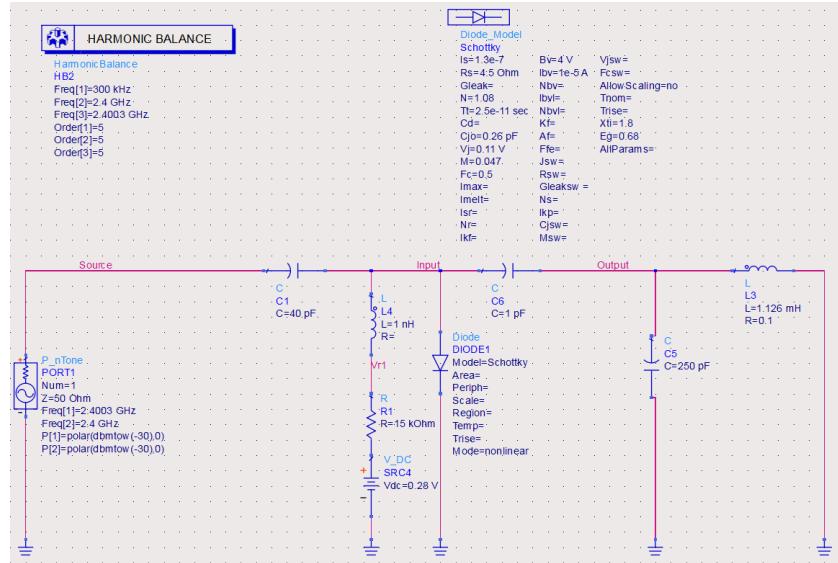


图 4-2 验证二极管混频器的 Keysight ADS 仿真电路图

完成仿真电路的搭建之后，就需要设置求解器（Simulator）进行电路的仿真，由于本次仿真实验要进行频域的仿真，所以我使用了谐波平衡（Harmonic Balance）这一个求解器，然后设置仿真频率为 2.4003GHz、2.4GHz 和 300kHz，运行仿真，即可得到仿真结果。该电路得到的仿真结果如图4-3所示，可以看到第一个子信道信号和载波信号原来在射频频段，然后经过肖特基二极管混频器的混频，再经过带通滤波器，成功得到了位于 300kHz 的信号，完成了频率搬移，这说明，用二极管制作混频器的办法是可以行得通的。

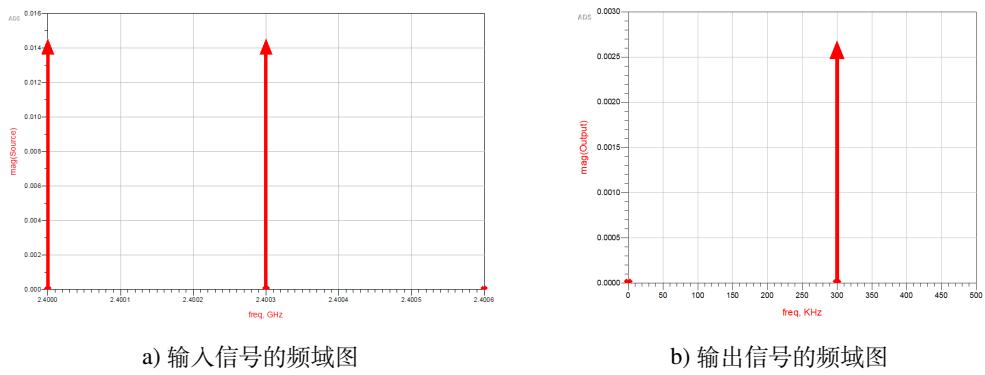


图 4-3 二极管混频器的仿真结果图



4.1.2 RF 开关混频验证与结果分析

成功完成肖特基二极管混频器的仿真之后，我再进行 RF 开关第二次混频的仿真。如图4-4所示，在肖特基二极管之后再加上一个开关电路，由于 Keysight ADS 仿真中没有 RF 开关器件，所以我在这里用理想开关模拟 RF 开关的混频效果。由二极管混频器得到的输出信号为 300kHz 频率，现在想再将它频移到 200kHz 处以验证 RF 开关的混频效果，因此就需要以 100kHz 的频移开关电路，这样就可以将 100kHz 的信号与 300kHz 的信号完成混频，再通过中心频率为 200kHz 的带通滤波器，就可以完成第二次下变频了。

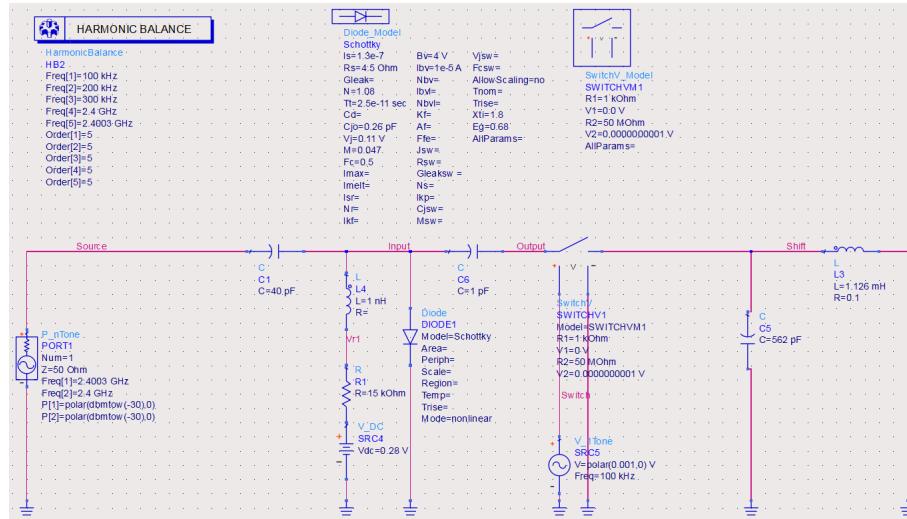


图 4-4 验证 RF 开关混频的 Keysight ADS 仿真电路图

RF 开关混频的仿真需要再在求解器里加上几个基础频率，然后运行仿真，得到的结果如图4-5所示。可以看到，最终输出的信号在 200kHz 处，说明 RF 开关成功完成了第二次小的频率搬移。可以看到，200kHz 处有好几个信号的叠加，这是在之前的混频电路中有其他高频谐波在 200kHz 处产生的信号，最终这些信号会叠加，并不影响输出结果的准确性。从图中也可以看到，最终输出信号强度为输入信号强度的 $\frac{1}{10}$ 左右，这是由于两次混频过程中的能量损耗所造成的，在仿真上并不影响结果的观察，而在实际 PCB 电路中，若结果强度太小不便观察，则可以使用运算放大器电路对结果进行放大，再进行观察。

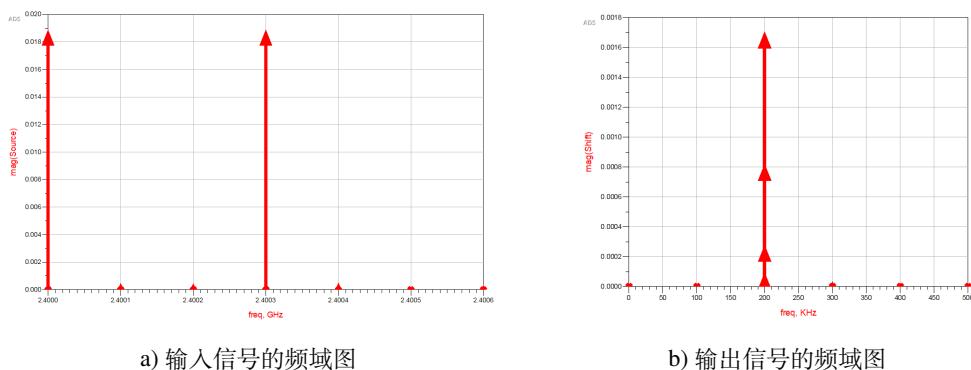


图 4-5 RF 开关混频的仿真结果图

本节在 Keysight ADS 上仿真了本文设计的反向散射标签接收机电路，分别验证了肖特

基二极管和 RF 开关的混频特性，仿真结果都说明，该接收机电路可以成功地完成两次频率搬移，将射频信号搬到合适的位置，方便下一步的解调。在下一节，我将介绍该接收机电路针对 OFDM 信号解调的仿真及其结果分析。

4.2 标签接收机解调 OFDM 信号验证与结果分析

本节将介绍我设计的接收机电路解调 OFDM 信号的仿真。上一节中我设计了一个实验在仿真上验证了肖特基二极管和 RF 开关的混频特性，但是，它还不是第三章中介绍的真正的针对在大规模物联网广播机制中使用的 OFDM 信号的解调。要完整地验证该广播机制是否可行，就需要真正在 Keysight ADS 中将调制好的 OFDM 信号输入接收机电路，然后进行仿真，通过结果查看该电路是否可以正确解调 OFDM 信号。基于这个思想，我进行了接收机解调 OFDM 信号的仿真实验，并进行了结果分析。

4.2.1 OFDM 信号的调制和实验参数设置

首先，要验证接收机电路能够解调 OFDM 信号，需要先产生一个调制好的 OFDM 信号。要产生 OFDM 信号，光用 Keysight ADS 这款软件是不够的，于是，我用 MATLAB 产生 2.4GHz Wi-Fi 频段的 OFDM 信号，同时将特定的信息加载到 OFDM 子信道上，用来模拟大规模物联网广播机制中中心机制向反向散射标签广播的 OFDM 信号。在 MATLAB 上，OFDM 信号就是用传统的 IFFT 算法实现调制，即首先将数据加载到频域的子信道上，然后设定导频信号，接着用 IFFT 算法生成 OFDM 信号的时域信号，再加上循环前缀（Cyclic Prefix, CP）后对信号做适当的整形，最后将其调制到 2.412GHz 这个载波频段，即可输出 2.4GHz Wi-Fi 频段的 OFDM 信号，也即本文中使用的 OFDM 信号。值得注意的是，该信号是时域信号，我将该 OFDM 信号用 csv 文件存储起来，然后在 Keysight ADS 中导入此 csv 文件，即可在 Keysight ADS 仿真中产生一个调制好的 OFDM 信号，用来验证接收机电路。

如图4-6所示，按照3.2节中设计的广播机制，将导入的 OFDM 信号输入4.1节中设计好的标签接收机电路，并将另一路 2.412GHz 的载波一起输入接收机电路，再将 RF 开关的混频频率设定为特定子信道的频率（312.5kHz、625kHz、……），最后将图4-4中的带通滤波器改成低通滤波器，在电路输出处即可观察到在 0Hz 处输出的某两个子信道的数据之和，也即该标签需要解调得到的数据。因为输入的 OFDM 信号是时域信号，本节中的仿真不能再使用4.1节使用的 HB 求解器，而是应该使用 Transient 求解器仿真时域信号。为了方便观察，我在 MATLAB 中调制产生的一个 OFDM 信号的 csv 文件包括 10 个 OFDM symbols，在观察仿真结果的时候，需要以一个 OFDM symbol 的尺度来观察，即以 $4\mu s$ 为一个单位来观察，得出一个数字编码，所以一次实验连续输入 10 个 OFDM symbols，可以一次观察到 10 个数据。3.2 节中提到了，每个 OFDM symbol 的长度为 $4\mu s$ ，因此，求解器的总时间长度就设置为 $40\mu s$ ，步长为 MATLAB 输出 OFDM 时域信号的时间间隔 $2ns$ 。

为了验证仿真电路解调的 OFDM 信号结果是否是正确的，我在 MATLAB 中直接对调制的 OFDM 信号做解调，得到完全准确的解调数据（ground truth），将其与仿真电路解调得到的数据作比较，即可验证接收机电路解调 OFDM 信号的性能。为了从各个方面验证该接收机电路的性能，我在本节中一共做三组对照实验，产生三个 OFDM 信号的 csv 文件。第一组实验用来模拟第一个反向散射标签解调第一对子信道的数据，一共 10 个 OFDM symbols，得到 10 个数据。第二个实验则换一组数据，换成另外 10 个数据，再次验证第一个标签的性能。第三组实验与第二组实验数据相同，但是需要更换标签，即换成模拟第二个反向散射标

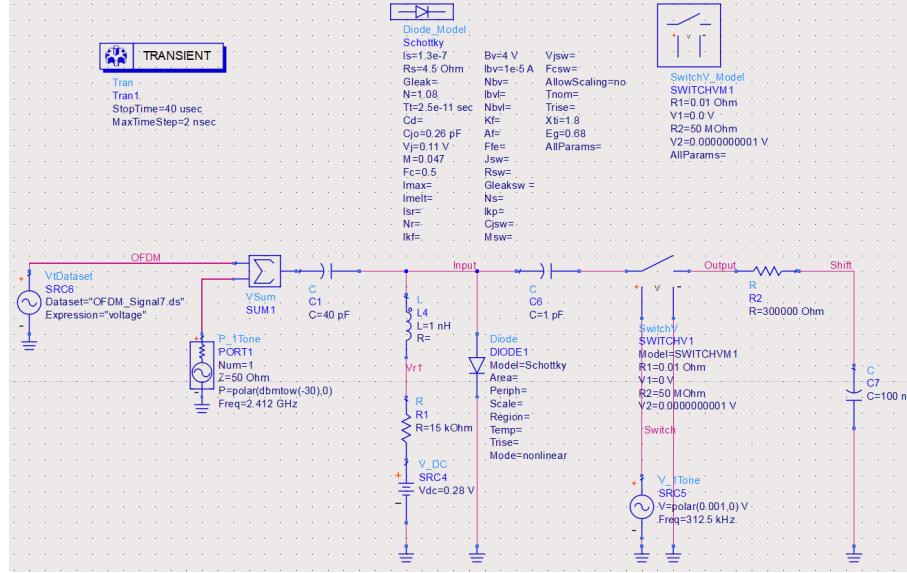


图 4-6 接收机电路解调 OFDM 信号的 Keysight ADS 仿真电路图

签解调第二对子信道的数据，验证该接收机电路解调 OFDM 信号是否对所有子信道都是成功。这三组实验的参数设置如表4-1所示。

表 4-1 仿真验证标签接收机电路解调 OFDM 信号性能的三组对照实验参数

反向散射标签		
对应子信道	RF 开关混频频率	10 个 OFDM symbols 的数据流
第一个子信道及其对称子信道	312.5kHz	1010101010
第一个子信道及其对称子信道	312.5kHz	0110010011
第二个子信道及其对称子信道	625.0kHz	0110010011

4.2.2 仿真接收机电路解调 OFDM 信号的结果分析

根据表4-1中的实验参数设置,我首先产生第一组实验的 OFDM 信号,然后输入 Keysight ADS 的接收机电路进行解调,将输出结果与 MATLAB 输出的 ground truth 进行对比,得到的结果如图4-7所示。按照3.2节中所设计的广播机制,第一个标签将位于 $\pm 312.5\text{kHz}$ 的第一个子信道和与其对称的子信道都搬到 0Hz 处叠加,每个子信道本身加载的数据为 ± 1 ,叠加后得出的数据如果为 ± 2 则判断为数字编码的“1”,如果为 0 则判断为数字编码的“0”,这两者概率相同,因此编码方式是合理的。尽管 ± 2 有相位的差别,但是其能量都是大于 0 的,因此使用功率检波器 (power detector) 即可轻松地辨别这两种编码。尽管本节仿真实验中观察的是时域信号而非频域信号,但是当频域信号强度为 0 时,时域信号也相应地为 0,所以同样可以使用能量大小来判断数字编码。图4-7 a) 所展示的结果为仿真电路给出的解调结果,根据之前提到的,我们以一个 OFDM symbol 的长度,即 $4\mu\text{s}$ 为一个单位观察仿真结果,得出一个数字编码。可以看到图4-7 a) 和图4-7 b) 的 ground truth 对比略有不同,图4-7 b) 中 0、2、-2 这三个数据的区分比较明显(虽然经过解调之后 ± 2 的强度大小略有变化,但是不影响观察),而在图4-7 a) 中,所有的 ± 2 都变成了同相位,我认为这是由于 Keysight

ADS 这个软件本身在时域仿真时不像频域仿真时那样能够很好地表示每一个 OFDM symbol 的相位，或者可能电路中了出现前后 symbol 的相位相互影响的情况，因此可能会出现相位翻转的情况，但是这并不会影响接收机电路的解调，因为接收机只需要通过能量判断数字编码，并不需要检测相位，在这里只需要一个能量的阈值即可成功地将“0”和“1”区别开来，因此没有必要去将相位信息纠正成和 ground truth 完全一致。从图4-7所展示的结果来看，第一组实验解调 OFDM 信号的仿真是成功的。

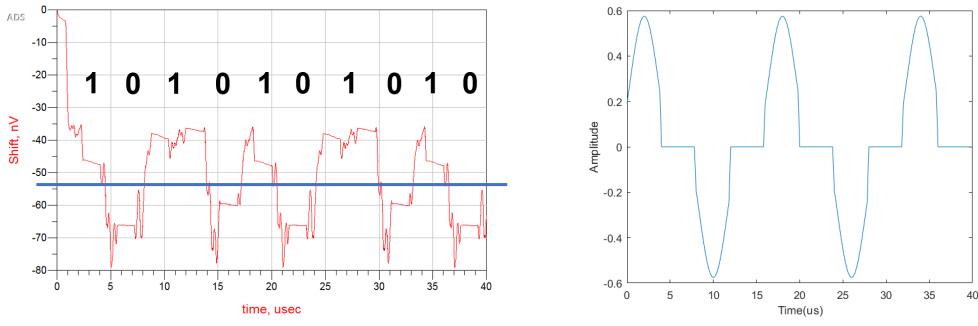


图 4-7 第一组实验解调 OFDM 信号得到的仿真结果和 ground truth 的对比

接下来，我进行第二组实验的仿真，第二组实验同样是仿真第一个反向散射标签，但是传输的数据流不同，因此解调的结果从理论上来说应该也是不同的。仿真得到的结果如图4-8所示，可以看到，跟第一组实验结果类似，仿真输出的结果还是会出现相位翻转的情况，但是并不影响接收机的数据判断。只不过，第一组实验是特殊情况，只有 +2 出现，没有 -2 出现，因此只需要一个阈值即可进行判断，而第二组实验使用两个能量阈值才能成功进行数据判断。从图4-8 a) 中可以看到，信号的对称中心并不在 0 处，我认为这是因为受到了直流源偏置的影响，但这也不影响解调结果，只需要设置两个阈值的值即可成功解调 OFDM 信号。可以看到，解调得到的结果和图4-8 b) 的 ground truth 是一致的，第二组仿真实验是成功的。在实际电路中，输出信号中可能会出现更大的毛刺，导致误码率的提高，这是实际电路中需要考虑的。同时，也可以看到，仿真电路输出结果的信号强度在 nV 级别，其实是比较小的，这可能是仿真软件特有的问题，但是如果在实际电路中的解调信号也是这个级别的强度，那么信号的捕捉和显示也会是非常具有挑战性的问题。

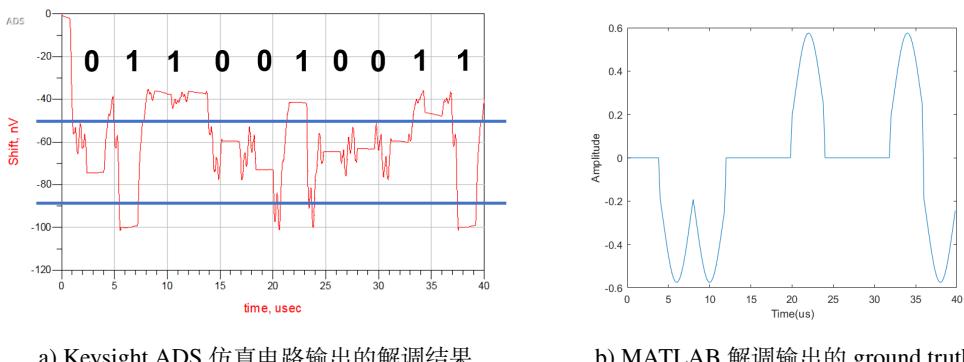


图 4-8 第二组实验解调 OFDM 信号得到的仿真结果和 ground truth 的对比

最后，第三组实验和第二组实验的设定基本一致，只是这次仿真的是第二个标签，所以



解调的是第二个子信道和与其对称的子信道的数据之和。得到的结果如图4-9所示。可以看到，虽然把数据加载到不同的子信道上得到的输出信号形状是不同的，很多地方都出现了相位的翻转，但是得到的仿真结果的输出数据流依然和 ground truth 是吻合的，也即解调出的数据都是正确的，因此输出信号的波形不同是不需要关注的。因此，第三组仿真实验也是成功的，这说明每个标签都能够解调得到属于自己的信息，也就是反向散射并行下行链路从仿真上已经实现了，这说明本文设计的大规模物联网并行通信与控制的广播机制是可以仿真实现的，接下来就是在第五章中在实际的 PCB 板上测试标签接收机电路的性能了。

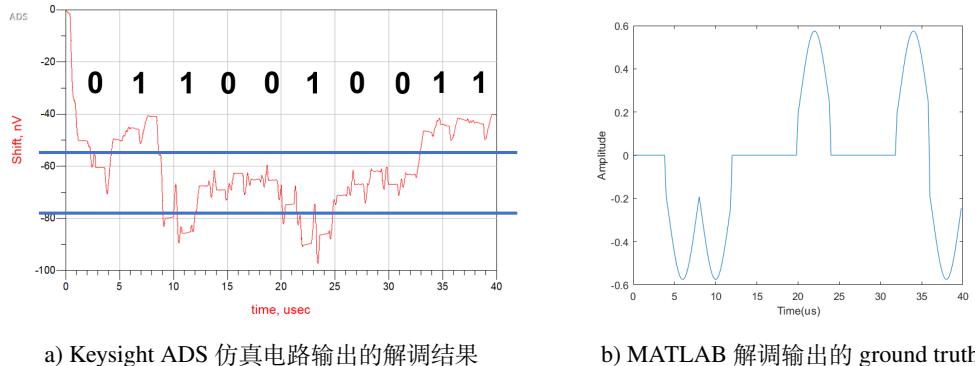


图 4-9 第三组实验解调 OFDM 信号得到的仿真结果和 ground truth 的对比

4.3 本章小结

本章在 Keysight ADS 这一仿真软件上测试了第三章设计的反向散射标签接收机电路的性能，首先4.1节从仿真上验证了肖特基二极管和 RF 开关实现两次混频的性能，证明了这两次混频都是成功且可以仿真实现的。接着4.2节中我设计了真正的针对 OFDM 信号进行解调的标签接收机电路，然后用 MATLAB 产生调制好的 OFDM 信号，输入 Keysight ADS 中进行仿真实验，同时用 MATLAB 产生解调结果的 ground truth 和仿真结果进行对比。为了验证不同的数据流和不同的子信道都能够成功进行解调，我设计了三组对照实验，这三组实验都成功解调出了发送的数据流，因此可以说，这个接收机解调 OFDM 信号是成功的，也就是说明第三章设计的反向散射下行链路是可以仿真实现的，所以这种大规模物联网的并行通信与控制的广播机制被仿真实验证明是可行的。接下来第五章就是在实际 PCB 板上测试该标签接收机电路的性能，并进行结果分析。

第五章 PCB 电路验证和结果分析

在第四章 Keysight ADS 仿真电路的基础之上，我利用 Altium Designer (AD) 这款软件将仿真电路画成原理图，再转换成 PCB 电路板，交付厂家由特殊的高频材料 Rogers 4003C 打印即可制成所需要的 PCB 电路板，这样就可以实际测试电路的功能。在前几次实验中，我因为没有经验而采用了普通的 FR-4 材料打印 PCB 板，但是该材料对高频电路是不适用的，所以前几次实际测试的结果都不理想。打印好 PCB 电路板之后，我再使用 5.1 节中介绍的实验器材和设备搭建接收机的 PCB 电路板，然后进行一系列的测试。实际反向散射标签接收电路的 PCB 板测试同样分为两次下变频和解调 OFDM 信号这两部分进行，这两部分的过程和结果分析分别在 5.2 节和 5.3 节中进行了详细的介绍。

5.1 实验器材与设备

本节将主要介绍 PCB 电路实验中需要用到的器材和设备，因为新冠疫情的影响，本次 PCB 实验由我在家中完成，所以没有学校实验室中那么完备的器材和设备，但我都想办法尽量解决了这个问题，尽可能使用了符合实验要求的器材和设备进行实验，保证实验的准确性和真实性。我本次实验所使用的器材和设备的具体型号将在本节中进行详细介绍，以使读者了解本次实验的实验环境和设置，也方便之后方面的研究者复现这个实验。

PCB 电路实验所用的器材和设备及其具体型号如表 5-1 所示。射频信号的发射，包括为了测试电路下变频功能的单频信号和广播机制使用的 OFDM 信号的产生，我都是用软件定义无线电 (Software Defined Radio, SDR) 来实现的，SDR 的优点在于小巧方便、可编程性强。二极管混频电路我则根据各种二极管的 I-V 特性、尺寸大小，选择了最合适的 BAT 15-03W 肖特基二极管制成混频电路。起到第二次混频作用的 RF 开关我则选择吸收式的 ADG901 进行实验，这样方便测量输入阻抗。用于显示接收波形的示波器，我选择了小型的手持示波器，虽然精度有限，但能够在家中这样有限的环境中测量大部分波形，能够基本满足验证电路的要求。为了进行第二次混频，除了 RF 开关之外，我还需要一个本地振荡信号，例如 100kHz 或 312.5kHz 的信号驱动 RF 开关与接收到的信号进行混频，我选择了 Xilinx Spartan 7 这款 FPGA 来实现这个部分，具体来说，我用的是 Cmod S7 开发板，它内部有晶振，可以产生 12MHz 的时钟信号，通过 Verilog HDL 编程可以进行时钟信号的分频，产生我需要的本地振荡信号。肖特基二极管和 RF 开关都需要直流电压信号进行驱动，这使用租用的两路输出的直流电压源提供就可以实现了，二极管和 RF 开关的工作电压大小都在电压源能够提供的范围内。最后，为了使射频信号在输入 PCB 电路板时减小损耗，我需要在电路板最前端进行阻抗匹配，因此需要测量 PCB 板的负载阻抗，这就需要用到矢量网络分析仪 (Vector Network Analyzer, VNA)，这个设备也是和直流电压源一起租借的。

在所有的器材和设备准备好之后，我将 AD 上画好的 PCB 电路板打印成板，然后经过元件的焊接再加上输入信号、直流电压、本地振荡信号，即可用示波器测试 PCB 板电路接收解调信号的实验效果。值得注意的是，因为 2.4GHz Wi-Fi 频段的信号衰减很大，所以来打印普通 PCB 板的 FR-4 材料已经不能满足实验的要求了。我在前几次实验中因为经验不足使用了 FR-4 板材，在测试中几乎测不到任何有效信号。经过前几次失败的实验测试后，我总结经验教训，使用了价格更高但是专门针对高频信号使用的 Rogers 4003C 板材打印了



PCB 电路板进行实验，得到了一些有效的实验效果，我将在5.2节和5.3节中给出详细的介绍和分析。

表 5-1 PCB 电路实验的器材与设备

电路部分及作用	实验设备	具体型号
射频信号发射机	软件定义无线电	ADALM-PLUTO SDR/HackRF One
混频器	肖特基二极管	BAT 15-03W E6327
开关混频电路	RF 开关	ADG901BRMZ
接收波形显示	手持小型迷你示波器	FNIRSI-5012H
混频本地信号产生	FPGA	Xilinx Spartan 7
直流信号产生	直流电压源	Agilent 66319D
输入阻抗测量	矢量网络分析仪	R&S ZVB 8

5.2 标签接收机两次下变频验证与结果分析

除了准备好5.1节中介绍的各种器材和设备之外，PCB 电路实验最重要的部分就是 PCB 电路板本身了。将第四章中使用的仿真电路在 AD 中画成原理图（如图5-1所示），然后生成 PCB 电路板的样图（如图5-2所示），设置好相应的板子参数，交付厂家打印成板即可。值得注意的是，因为在第四章中做了多组不同的实验，而每次打印 PCB 电路板都会耗费很多的时间和费用，所以我在板子上集成了几个电路，可以通过跳线帽短路、焊接短路某个元件的办法分别进行不同的实验，节省了打印板子的时间和费用，同时也满足实验的要求。在图5-1中的参数为预估参数值，因为电容、电感、电阻这三种器件的不同值的元件封装是相同的，所以实际焊接时可根据电路效果进行参数的调整。

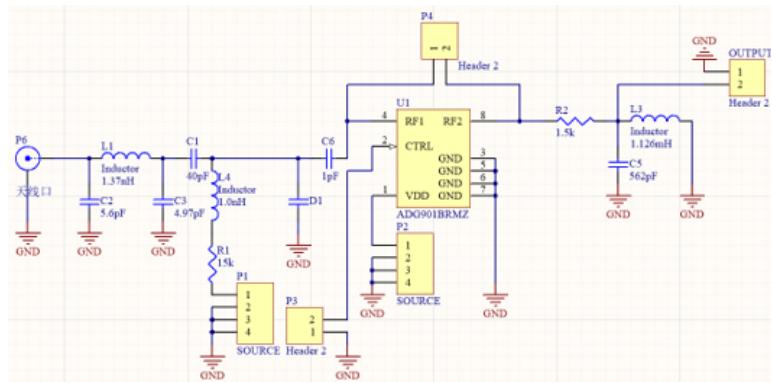


图 5-1 AD 中实际标签接收机电路原理图

5.2.1 二极管混频器下变频验证与结果分析

如4.1节中一样，我在实际标签接收机 PCB 电路实验验证的时候首先进行二极管混频器下变频的验证。按照图4-2所示的仿真电路，我焊接了图5-3 a) 所示的 PCB 电路，这个板子上只含有二极管混频器而不含有 RF 开关，这样可以首先单独验证肖特基二极管的混频效果。因为还未输入 OFDM 信号，所以信号衰减不是很大，可以先不加阻抗匹配网络。为了

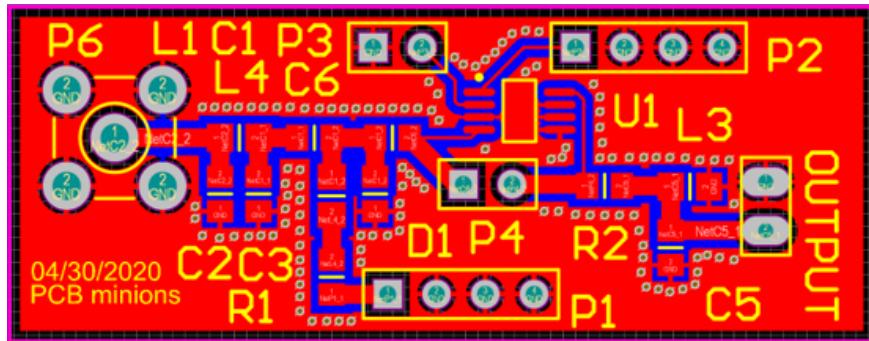
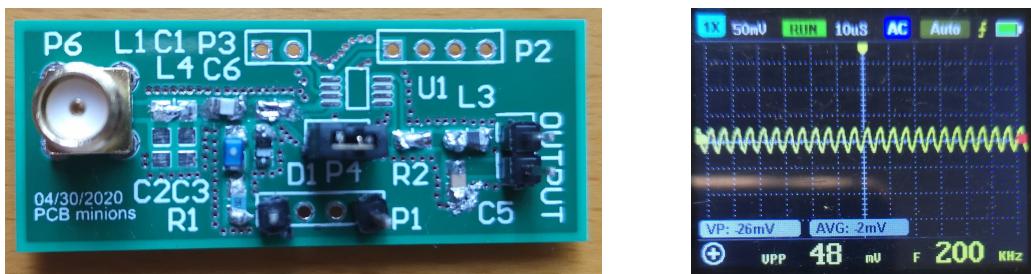


图 5-2 AD 中实际标签接收机电路 PCB 电路图

省去反复焊接的麻烦，这里验证二极管混频器下变频效果的时候没有如4.1节中一样把信号下变频到 300kHz 进行验证，而是直接将信号下变频到 200kHz；而在有 RF 开关时，我使用二极管混频器先将信号下变频到 300kHz，然后再使用 RF 开关将其下变频到 200kHz 处，这样 PCB 电路最后的带通滤波器只需一直将中心频率固定在 200kHz 处即可，无需反复焊接电感和电容以调整中心频率。



a) 验证二极管混频器的 PCB 电路板

b) 二极管混频器下变频验证结果

图 5-3 验证二极管混频器下变频效果的 PCB 电路及验证结果

因此，在输入信号时，我先在基带产生 100kHz 和 300kHz 两个正弦信号，然后将它们一起加载到 2.4GHz Wi-Fi 频段利用 ADALM-PLUTO SDR 发射出去，ADALM-PLUTO SDR 在这个频段典型的发射功率为 7dBm，我设置发射增益为 0dB。然后我使用接收机电路板接收信号，因为本次实验条件有限，示波器不能显示强度太小的波形，为了减少射频信号在空气中传播造成的衰减，我在本次实验里用同轴线直接连接 SDR 和接收机电路板传输射频信号。板子将输入信号经过肖特基二极管的混频之后输出信号，利用示波器测试得到的解调信号的时域波形如图5-3 b) 所示，可以看到，二极管混频器成功将 2.4GHz 射频频段上的两个单频信号进行了混频，下变频到了 200kHz 处，完成了频率搬移。这说明，用肖特基二极管制作混频器的办法在实际 PCB 电路中也是行得通的，而且在 2.4GHz 的射频频段标签接收机电路也没有使信号衰减到检测不到的程度，因此初步说明该接收机电路是成功的。

5.2.2 RF 开关混频验证与结果分析

在验证了肖特基二极管制成混频器完成下变频的性能之后，我接下来验证 RF 开关是否能成功完成第二次混频。为了完成第二次混频，首先需要如5.1节中所说的使用 FPGA 进行时钟信号的分频，从而产生一个本地振荡信号。我所使用的 Cmod S7 这款 FPGA 开发板内部 M9 管脚连接着一个 12MHz 的晶体振荡器^[23]，这个时钟旨在用作通用的系统时钟。12MHz

的输入时钟并不能直接驱动锁相环（Phase-Locked Loop, PLL），因为锁相环的最小输入频率为19MHz，但是该时钟可以驱动混合模式时钟管理器（Mixed-Mode Clock Manager, MMCM），生成各种频率的时钟，并且可以设定整个设计中可能需要的确定的相位关系。在Vivado这款软件中，可以使用Clocking Wizard IP核驱动MMCM对12MHz的晶振进行分频，但是IP核生成信号的频率范围有限，因此我首先生成较高的5MHz频率的信号，然后再使用Verilog HDL语言编程进行计数分频得到我需要的本地振荡信号，例如100kHz或312.5kHz。在本小节中，我需要在上一小节的基础上继续验证RF开关进行第二次混频的效果，因此需要产生一个100kHz的本地振荡信号，我将5MHz和100kHz的信号都通过FPGA的Pmod连接口输出出来，用示波器测试得到的输出信号，结果如图5-4所示。可以看到，5MHz信号由于上升时间的原因，不是很规整的方波，但是也产生出了5MHz的时钟信号，而100kHz信号的周期较长，所以方波的形状比较规整。图5-4说明，FPGA分频输出时钟信号的办法是成功的，图5-4 b) 得到的信号可以作为本地振荡信号供给RF开关进行混频。

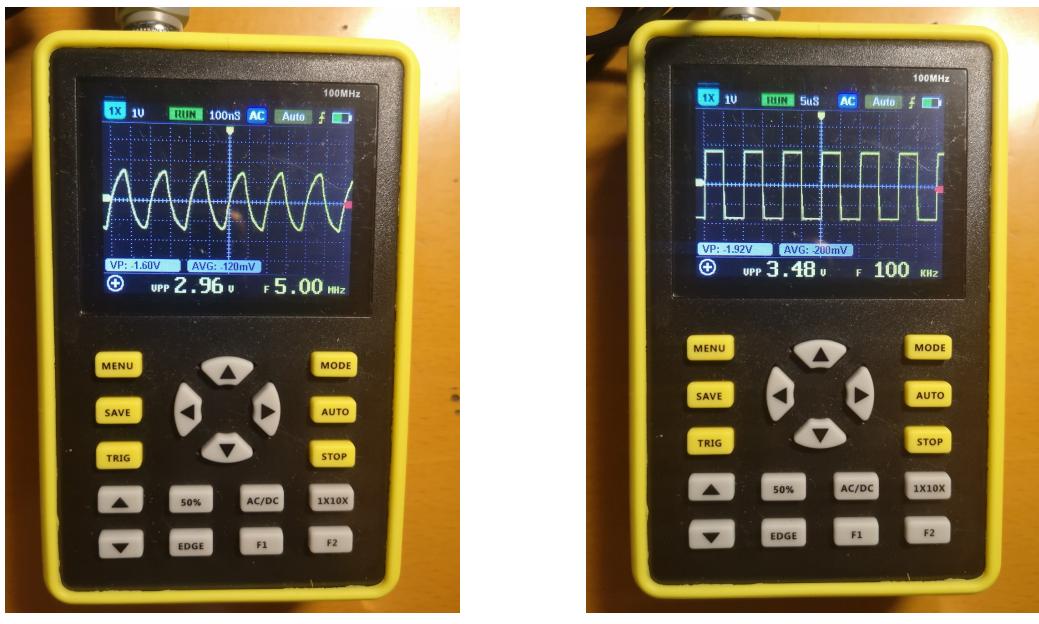


图 5-4 FPGA 分频输出的时钟信号波形图

完成本地振荡信号的产生之后，我就可以验证RF开关的混频效果了。在图5-3 a) 的基础上，我将跳线帽拔掉，然后焊接上RF开关，再将本地振荡信号输入RF开关相应的端口，最后给予直流电压供电，这样就可以在原来的二极管混频器之后再加入一个RF开关进行第二次混频，而且不用很大地修改原有的电路。为了防止肖特基二极管非线性产生的其他谐波对实验产生影响，我选择了相差较远的400kHz和700kHz这两个频率作为基带正弦信号的频率，然后再用SDR加载在2.4GHz频段发射出去，然后用接收机电路接收，观察示波器波形以验证电路。

为了验证RF开关是否真正实现了第二次混频的效果，我采取控制变量法，在其他设置都相同的情况下，使用RF开关和不使用RF开关做两组对照实验，这样就可以很好地验证RF开关的混频性能。首先是使用跳线帽短路RF开关，然后不使用FPGA和直流电压源供给RF开关，实验环境的搭建图如图5-5所示，此组实验用来测试不使用RF开关时接收机电路接收信号的效果，以提供RF开关混频验证的对比参照。



图 5-5 RF 开关混频验证实验环境搭建图（不使用 RF 开关组）

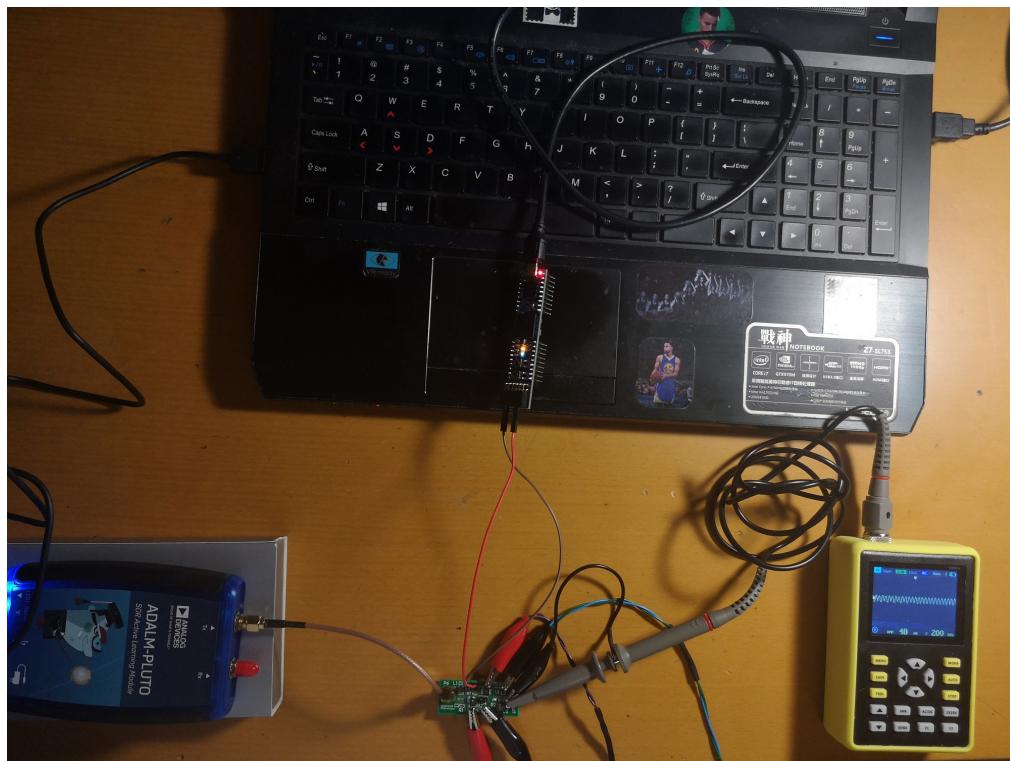
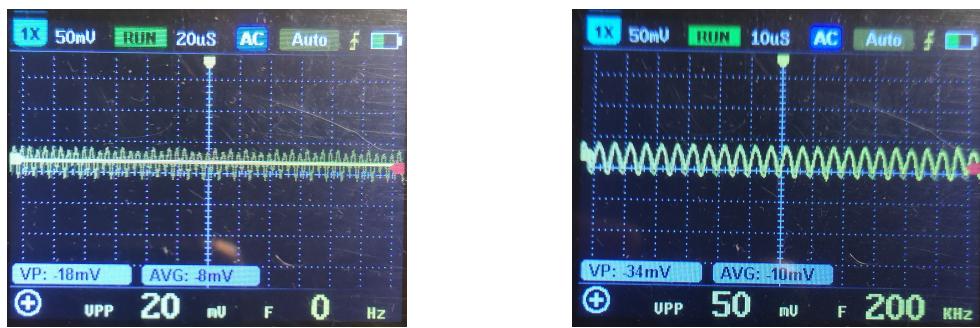


图 5-6 RF 开关混频验证实验环境搭建图（使用 RF 开关组）

第二组实验是在第一组实验的基础上加入 RF 开关进行第二次混频，我拔掉跳线帽，然后使用 FPGA 和直流电压源分别给 RF 开关供给本地振荡信号和工作电压，实验环境的搭建图如图5-6所示，此组实验可以和第一组实验进行对比参照，验证 RF 开关进行混频的效果。

在图5-5和图5-6中的示波器中可以看到两组实验中示波器显示的接收解调信号的波形图，因为在图中示波器太小不方便对比观察波形，因此我在重新近距离拍摄了示波器波形图，在图5-7中进行了对比展示。

图5-7中展示了示波器显示的 RF 开关混频验证的接收信号图，因为我购买的小型示波器没有 FFT 功能，不能直接显示接收信号的频谱图，所以这样控制变量的对比实验可以有效地验证 RF 开关是否真正起到了混频的作用。图5-7 a) 中展示的是不使用 RF 开关组（图5-5中的实验组）的波形图，可以看到，在不使用 RF 开关的时候，示波器只能检测到一些杂乱的波形，信号强度也很小，没有一个稳定频率的信号。这是因为，在不使用 RF 开关进行混频的时候，二极管混频器将 2.4GHz 频段上的 400kHz 和 700kHz 的正弦信号进行了混频，下变频到了 300kHz 处，但是标签接收机电路最后的带通滤波器的中心频率设置的是 200kHz，所以 300kHz 以及其他频段的信号基本都被滤除了，而 200kHz 处又没有稳定的信号，所以只能测试到一些杂乱的波形。图5-7 b) 中展示的是使用 RF 开关组（图5-6中的实验组）的波形图，可以看到，当我在电路中加入 RF 开关以后，原本经过二极管混频器下变频到 300kHz 的信号又被 RF 开关与本地振荡的 100kHz 信号进行了第二次混频，再次下变频到了 200kHz 处，然后经过带通滤波器输出。因此，此时示波器可以捕捉到一个清晰的 200kHz 频率处的正弦信号，这正是 RF 开关进行混频得到的结果，也说明了 RF 开关进行第二次混频在实际 PCB 电路中也是可行的，与4.1节中的仿真验证是一致的。



a) 不使用 RF 开关组的波形图

b) 使用 RF 开关组的波形图

图 5-7 RF 开关混频验证的接收信号图

至此，我已经成功在实际的 PCB 电路板上验证了反向散射标签接收机电路的肖特基二极管和 RF 开关的混频性能，实验结果显示，二极管混频器和 RF 开关的混频都是行得通的，而且可以保持不错的信号强度，说明我在第三章中设计的反向散射标签接收机电路初步验证是成功的，为实现反向散射下行链路和大规模物联网广播机制下的并行通信和控制系统打下了良好的基础。接下来，和第四章中一样，我将在5.3节中使用真正的 2.4GHz Wi-Fi 频段的 OFDM 信号传输数据，然后使用标签接收机电路进行解调，用示波器观察解调信号的波形，以验证反向散射系统的并行下行链路是否真正可行。

5.3 标签接收机解调 OFDM 信号验证与结果分析

在5.2节中，我验证了二极管混频器和RF开关这两部分的混频性能，在本节中，我在此基础上，将验证接收机电路解调OFDM信号的性能，并分析其结果。

首先，我需要先产生一个2.4GHz Wi-Fi频段的OFDM信号，并像4.2节中一样将想要传输的数据加载到OFDM信号的子载波上以传输。由于上一节使用的ADALM-PLUTO SDR只能调整一个增益系数，输出的信号强度较小，不适合本节的实验使用，因此在本节中我改用了HackRF One，HackRF One在2.15GHz到2.75GHz之间最大发射功率为13dBm到15dBm，它可以调整射频增益(RF Gain)、中频增益(IF Gain)、基带增益(BB Gain)这三个增益，我将这三个增益分别设置为40dB、60dB、60dB，因此可以将输出信号的强度保持在较大的程度上，适合本节实验的使用。此外，HackRF One没有MATLAB软件上的Toolbox可以直接使用，因此不能在MATLAB上直接对其进行编程，所以我安装了GNURadio这款软件，可以模块化地对HackRF One的输出信号进行编程，非常方便、可行。在GNURadio中，我与4.2节中一样，使用MATLAB产生OFDM信号，只是因为在GNURadio中还需要将信号加载到2.412GHz上发射出去，因此这里只需要用MATLAB产生OFDM symbol的基带信号，然后保存在csv文件中，再用GNURadio读取，最后加载到2.412GHz上用HackRF One发射出去，即可得到我们需要的发射信号。同样使用同轴线直接连接SDR和接收机电路，即可用标签接收机电路接收发射信号进行解调，观察示波器波形，即可验证接收机电路解调OFDM信号的效果。在本节的实际PCB电路验证中，我验证了表4-1中前两组OFDM数据流的解调结果，也即对第一个反向散射标签对应的第一个子信道及其对称的子信道进行两组不同数据流的解调，查看解调结果是否和ground truth相同，以验证标签接收机电路解调OFDM信号的性能。

与5.2节中不同的是，因为此时我需要的信号在直流0Hz处，所以标签接收机电路最后的带通滤波器需要改成低通滤波器，因为在之前打印板子的时候我就同时预留好了带通滤波器和低通滤波器的封装，因此在这里只需要重新焊一版板子，将滤波器改为低通滤波器即可，无需重新打印一次PCB板。需要注意的是，因为解调OFDM信号的过程中信号损耗比较大，因此在5.2节中没有进行的阻抗匹配网络在这里需要进行。具体的过程是，使用表5-1中列出的矢量网络分析仪测量没有阻抗匹配网络时PCB板的复数输入阻抗，然后使用Keysight ADS中的Smith圆图功能，计算出阻抗匹配网络各个元件的参数值。在本节的实验中，我先测量到不加阻抗匹配网络的PCB板的输入阻抗为 $13.710 - j50.736\Omega$ ，我选择L型阻抗匹配网络进行输入阻抗的匹配，在Keysight ADS中使用Smith圆图进行阻抗匹配的过程如图5-8所示，根据Smith圆图给出的结果，我需要一个2.44nH的电感和0.76pF的电容即可实现阻抗匹配网络，将PCB板的输入阻抗匹配到 50Ω ，减少输入射频信号的损耗，也减少射频信号反射回SDR中。

接下来，要解调第一个子信道及其对称信道，根据3.2节中介绍的机制，由二极管混频器实现下变频之后，RF开关输入的本地振荡信号应为第一个子信道对应的频率312.5kHz，这样第一个子信道及其对称信道才能够在0Hz处叠加。要输出312.5kHz的本地振荡信号，只需要将5.2节中FPGA的分频程序稍作更改，改变计数分频的倍数，即可输出312.5kHz的本地振荡信号，得到的结果如图5-9 a)所示。然后就是将表4-1中的第一组实验的10个OFDM symbols数据流加载到OFDM子信道上然后发射给标签接收机电路进行解调，得到的解调信号波形图如图5-9 b)所示，可以看到，虽然真实PCB电路板解调信号的质量不如仿真电路那么高，但是还是可以看到和图4-7 a)中仿真电路输出的波形有相似之处，也是可以通过

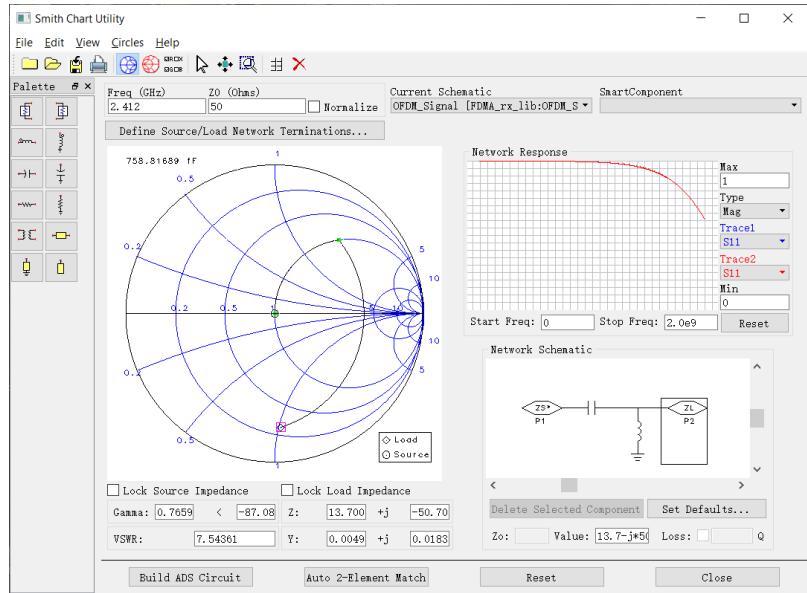
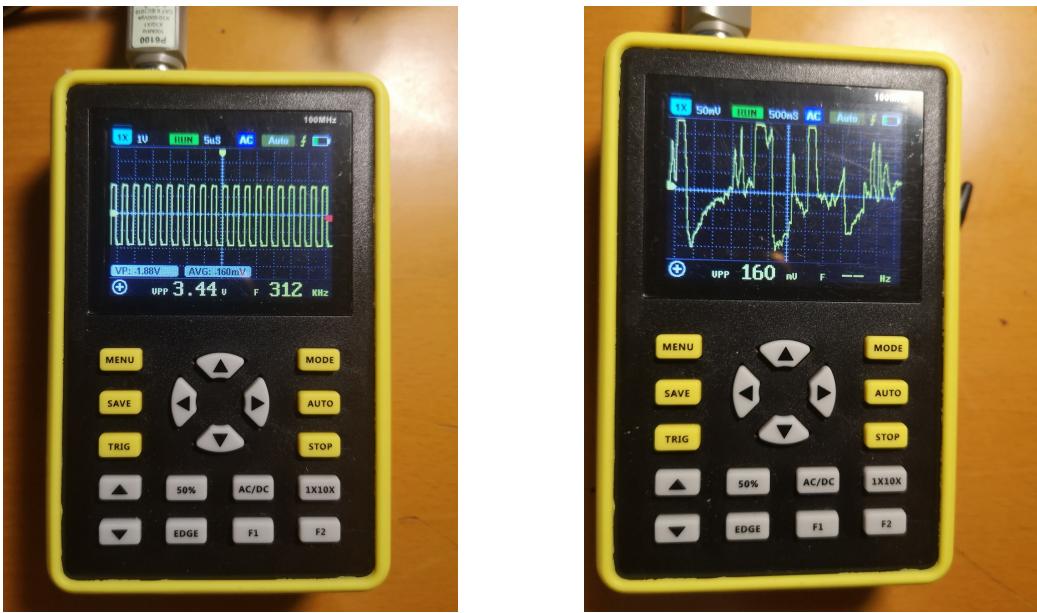


图 5–8 Keysight ADS 中利用 Smith 圆图进行阻抗匹配

电压的大小区分数字编码的‘0’和‘1’。



a) FPGA 分频输出 312.5kHz 本地振荡信号

b) 解调 OFDM 信号得到的示波器波形图

图 5–9 第一组实验的本地振荡信号和解调信号波形图

为了更清晰地分析解调信号波形，我作出了图5–10进行具体分析。可以看到，与图4–7 a) 中的仿真波形相似，实际 PCB 电路也输出了与第一组实验的数据流“1010101010”相对应的波形，只是因为示波器显示屏幕大小有限，所以图5–10中并没有完整地显示 10 个 OFDM symbols 数据流，但是从能够看到的 7 个 OFDM symbols 可以看出，只要通过能量判断即可成功解调出这个数据流，在之后的工作中，只需要在标签接收机电路之后加上一个功率检波器，即可通过设置一个能量阈值成功地判断数字编码，解调第一组实验的 OFDM 信号，所以第一组实验中实际标签接收机 PCB 电路的 OFDM 信号解调功能是成功的。值得注意的

是，在实际 PCB 电路测试中也出现了 ± 2 相位翻转的情况，这和仿真中是一样的，我认为也同样是因为示波器采样率等因素的影响，在时域显示的波形不能很好地显示每个 OFDM symbol 的相位，或者在电路中可能出现了前后 symbol 的相位相互影响的情况，因此出现了相位翻转的情况，但这完全不影响接收机电路的解调，所以可以直接忽略这一现象。

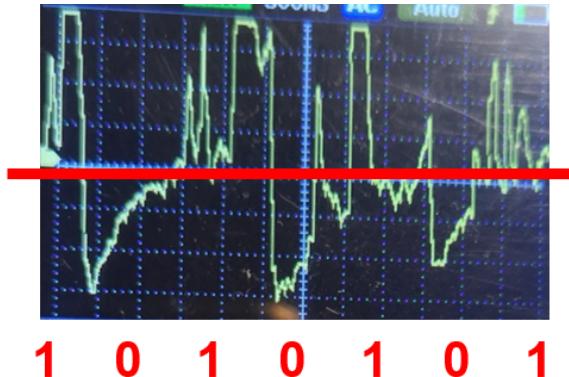


图 5-10 第一组实验中接收机电路解调信号波形图分析

如4.2节中所说，在实际 PCB 电路中解调 OFDM 信号得到的结果确实会出现更大的毛刺，没有仿真实验那么理想的信号出现，因此可能会增加信号解调的误码率，但是从图5-10中所示的结果来看，基本可以正确解调 OFDM 信号，这样的毛刺大小还是可以接受的。此外，4.2节中也提到了输出信号的强度大小问题，从图5-9 b) 中可以看到，输出信号强度在 mV 级别，比仿真中的 nv 级别还是大很多的，所以还不需要担心信号强度过小的问题。但是，由于此小型示波器的最小测试尺度为 50mV，因此如果在别的条件下，解调信号的衰减过大，可以考虑使用运算放大器对信号进行放大后再测试。

然后，我接着对表4-1中列出的第二组实验进行实际 PCB 接收电路的验证，第二组实验与第一组实验的其他实验设置完全一样，只是 10 个 OFDM symbols 数据流不一样，以此可以测试标签接收机电路解调不同数据流的 OFDM 信号的性能。由于示波器显示屏大小有限，我分两次拍摄了移动的示波器信号波形图，得到的结果如图5-11所示。为了方便展示和分析，我将这两部分信号进行拼接，同样作出了图5-12对解调结果进行具体分析。

从图5-12中可以看出，和仿真实验时一样，第二组实验需要两个能量阈值才能将‘0’和‘1’的数字编码区分开来，所以同样使用功率检波器，通过能量判断即可成功解调 OFDM 信号。但是，第二组实验 10 个 OFDM symbols 的数据流是“0110010011”，而图5-12中展示的实际 PCB 板解调得到的 OFDM 数据流是“1110010010”，在首尾两位出现了误码，我认为这是因为 SDR 在发送信号的时候，开始和结束的时候会出现不稳定的情况，可能会更容易受到外部环境影响，因此比较容易出现误码，这也是之后的工作需要解决的问题。但是，大部分 OFDM symbols 还是被成功解调了，至少可以认为这个反向散射标签的接收机电路原理是在实际 PCB 板上验证成功的，只是在之后的研究中需要不断改进、优化电路，提高解调 OFDM 信号的准确性。考虑到据我所知，之前从来没有人设计过反向散射系统并行下行链路的接收机电路，因此能够验证此广播机制有效且解调准确率达到 80% 已经是不错的效果了，可以说第二组实验在 PCB 板上也是基本测试成功了。

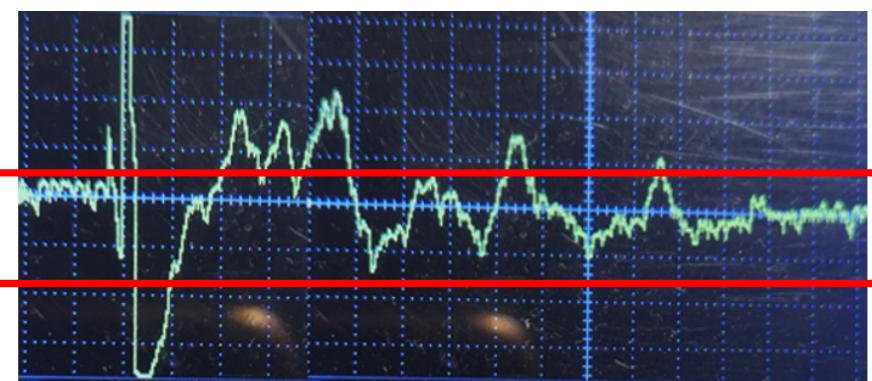
这两组实验说明，使用第三章介绍的反向散射系统的并行下行链路的实现方法不仅在仿真实验上是有效的，在真实 PCB 电路板上也是能够成功的，这也证明了本文设计的大规模物联网广播机制下的并行通信与控制系统具有可行性，经过之后进一步更多更深入的研



a) 解调信号波形图第一部分

b) 解调信号波形图第二部分

图 5-11 第二组实验的解调信号波形图



1 1 1 0 0 1 0 0 1 0

图 5-12 第二组实验中接收机电路解调信号波形图分析

究设计之后，很有希望大规模应用。

最后，本节将分析该标签接收机电路的功率消耗，以说明其低功耗的特性。在这里我主要考虑和研究的是接收电路模拟部分电路的功耗，而 FPGA 产生本地振荡信号的功耗应该算入解调模块中，所以在这里就不做分析、比较了。因此，该接收机电路的能量主要是在给肖特基二极管提供偏置和给 RF 开关提供工作电压时消耗的。在解调 OFDM 信号的实验中，肖特基二极管的偏置电压为 0.186V ，输出电流为 0.0025A ，因此二极管偏置的功耗为 $465\mu\text{W}$ 。RF 开关的工作电压为 1.65V 到 2.75V 之间，在本次实验中我设置为 2.303V ，但是由于工作电流太小，无法直接由直流电压源的显示得到，所以我查阅了我使用的 RF 开关 ADG901BRMZ 的数据手册^[24]，得到它的最大电源电流为 $1\mu\text{A}$ ，因此可以得到它在本实验中最大功耗为 $2.303\mu\text{W}$ 。这两部分功耗加起来，可以得到该标签接收机电路的功耗约为 $467.3\mu\text{W}$ 。我以集成了射频功能的常用单片机 CC3200 为例与本文设计的反向散射标签接收机电路的功耗进行对比，我查阅了 CC3200 进行有源无线电解调时的 Rx 电流为 59mA (@54 OFDM)，工作电压约为 3V ^[25]，因此其进行有源无线电解调时的功耗约为 177mW 。与本文设计的反向散射标签接收机电路解调 OFDM 信号时的功耗 $467.3\mu\text{W}$ 比较可知，本文设计的接收机电路的功耗低了好几个数量级，这证明了 1.1.2 小节中提到的反向散射通信低能耗的特点，同时也展示了本文设计的接收机的一个重大优势，那就是能量消耗很低，因此它是非常适合在大规模物联网中应用的。

5.4 本章小结

本章在第三章原理设计和第四章仿真实验的基础上，在实际的 PCB 电路板上测试了本文设计的反向散射标签接收机电路的性能，并对结果进行了分析。首先在 5.1 节中，我对于本章实验所使用到的所有器材和设备做了具体的介绍，以便读者了解本章实验的环境和复现本文的实验。接着我在 5.2 节中，我对肖特基二极管和 RF 开关的混频性能做了实验验证，两次下变频的结果都显示这两部分下变频的性能都是可靠的。因为要进行多组不同的实验，所以我设计打印的 PCB 板也包含了多个电路的整合，可以通过跳线帽、焊接等手段构造不同的电路，进行不同的实验，而不需要重新打印 PCB 板，节省了时间和预算。在验证完两次下变频的功能之后，我在 5.3 节中对标签接收机 PCB 电路解调 OFDM 信号的性能做了验证。考虑到信号衰减的问题，我在电路板最前端增加了阻抗匹配网络，然后进行了 4.2 节中的前两组实验。实验结果显示，PCB 板的 OFDM 信号解调性能比仿真中差一些，这是由于实验外部环境的影响，导致了误码率增高，但是依然在可以接受的范围之内。同时我还测试了该接收机电路解调 OFDM 信号时的功耗约为 $467.3\mu\text{W}$ ，远低于有源无线电解调的功耗，因此凸显了本文设计的接收机低能耗的优势。

本章的 PCB 电路实验说明了本文设计的广播机制不光在仿真实验中是有效的，在实际电路中也是可行的，之后的研究如果对标签接收机电路进行更深入的研究改进，可以提升解调性能，为大规模物联网广播机制下的并行通信与控制系统服务。本文设计的不足与未来可以改进的地方都将在第六章中进行详细的分析。

第六章 本文设计的不足与未来的工作

本章将在前五章的基础上，详细介绍本文设计的大规模物联网广播机制的不足之处，这将为之后的研究者继续这个课题的研究提供可能的方向，因此我也将简要介绍一下我对这个项目未来的工作的展望，供读者参考。

6.1 本文设计的不足之处

由于本次毕业设计的整体大环境受到新冠疫情的影响，我整个毕业设计一半的时间都不能返校，而是在家中进行毕业设计，所以很多实验室中精密的器材和设备都不能使用，所以毕设整体都受到了一定的影响，也遇到了一定的困难。但是，我还是在指导教师田晓华教授的帮助和支持之下，购买和租赁实验器材和设备，在家中搭建了实验环境，虽然相比实验室的实验环境会显得简易一些，但还是能够基本满足毕设实验的要求，我也努力充分利用了能够利用的资源，在家稳步推进毕业设计项目的进行。也因此，该毕设项目自开题以来，进展较为顺利，最终也取得了一定的成果。

尽管如此，由于实验环境受限，而且据我所知，之前没有研究者设计过反向散射系统并行下行链路的标签接收机电路，所以本文的设计几乎没有前人的接收机电路可以参考，因此在原理设计上可能存在着不完善，这些共同导致了本文的设计可能存在一些不足之处。在下面，我就我在设计和实验过程中发现的问题罗列了三点本文设计的主要不足之处：

- 本文设计的反向散射系统的并行下行链路的实现方法是将关于 0Hz 对称的两个子信道同时搬移到 0Hz 处叠加，然后通过能量阈值判断‘0’和‘1’，得到一个数字编码信息。这样的方式可以有效地实现反向散射并行下行链路，改变原来的广播式的下行链路，对设计大规模物联网广播机制下的的并行通信和控制系统是很有效的一个方法。但是它也存在一个问题，就是 OFDM 信号的信道利用率变成了原来的一半，因为两个子信道才对应一个标签的一个数据流。这可能会对大规模物联网的可扩展性造成一定的限制。要解决这个问题，可以考虑在不同的频段上同时传送数据，提升大规模物联网的可扩展性，而不是仅在 2.412GHz 这个频率上传送数据。
- 本文在第四章和第五章分别验证了我设计的广播机制在仿真实验和 PCB 实验上的可行性，但是这些实验都只到输出解调波形为止，由于时间的限制，我还没有加上功率检波器（power detector）对解调信号进行能量判断，然后输出数据流。同时，我也没有具体设计数据流如何通过某种协议对应到具体的信息，因此这部分实验还有待完善和提升。
- 本文在实验验证的过程中每次都是只使用一个标签的接收机电路对接收信号进行解调，如果要验证大规模物联网的广播机制，最好能够同时采用多个标签，让他们的接收机同时对广播信号进行解调，测试是否不同标签能够同时解调出不同的信号、得到不同的信息。

以上所罗列的本文的不足之处都是我认为在未来的研究中应该优先解决的问题，在我的毕业设计中，由于时间和实验条件的限制没有完全解决这些问题，希望在之后如果有机会继续进行这方面的研究，能够解决这些不足之处，或者之后的研究者阅读了本文，能够有效地解决这些问题，优化本文提出的广播机制。

6.2 未来工作的展望

在6.1节的基础上，我在本节提出解决这些不足之处之后未来对这个项目的研究工作的展望，希望能有一些借鉴意义，供读者和之后的研究者参考。

首先我觉得这个大规模物联网广播机制最先能够使用的场景是无人机集群或者机器人集群的控制，因为无人机集群和机器人集群中的设备相对比较类似，对其控制相对来说比较简单。可以简单设计一个通信和控制机制，比如就以 10 个 OFDM symbols 为一帧，前几个 symbols 可以组成无人机运动方向的控制信息，后几个 symbols 可以组成无人机朝运动方向运动的距离的控制信息，这样就可以通过解调的数据得到一条简单的指令，让某个无人机往某个方向运动某段长度的距离，这样无人机集群同时得到指令可以同时往不同的地方运动，达到无人机集群的并行控制。在此基础上，还可以加上其他一些动作的控制信息设计，以丰富对无人机集群的控制形式。

机器人集群的控制也可以采用以上机制，如果该技术成熟，可以将其应用在无人驾驶汽车等等场景，使用一种低能耗的方式对大规模的物联网设备进行并行通信和控制，这样该广播机制才能够完全完善，真正实现其完备的功能。希望随着对该项目的继续发展，在本文的基础上，这些不足之处都能够被解决，大规模物联网设备的通信和控制可以很完美地实现。

6.3 本章小结

本章分别在6.1节和6.2节中详细地介绍了一下本文设计的不足之处和对未来该项目继续研究的前景的展望，希望能够对读者和未来的研究者提供一点参考，也希望在本文的基础之上，不久的将来大规模物联网广播机制能够完美地实现。

全文总结

本文通过设计实现反向散射系统并行下行链路的标签接收机电路，实际上设计了大规模物联网广播机制下的并行通信与控制系统，为未来物联网中的大规模设备控制提供了一个有效可行的机制。同时，使用反向散射系统可以有效地降低广播机制中的能量消耗，具有低能耗的优点。在该原理设计的基础上，我在本文中设计并进行了仿真实验和 PCB 实验对该标签接收机电路进行了性能验证和结果分析，最终结果证明该接收机电路是可行的，可以有效地解调 2.4GHz Wi-Fi 频段的 OFDM 信号上加载的信息，同时可以让每个标签同时得到不同的信息，为实现大规模物联网的并行通信和控制系统打下了坚实的基础。

首先，本文的第一章大规模物联网广播机制及其并行通信与控制系统的研究背景进行了详细的介绍，让读者了解了该项目开展的意义所在，是可以将其应用到生活中很多场景，提升人类的生活便捷程度和幸福感，例如控制机器人集群为人类送外卖和快递等。同时，第一章也总结了本文的贡献和创新点，突出了本文的研究价值和意义。

接着，第二章对该领域的相关文献做了详细的介绍，使读者对该领域学术研究的发展有了必要的了解。据我所知，之前还没有人研究过反向散射系统的并行下行链路的实现，本文是第一篇研究该问题的文章，具有突出的贡献和创新度。

然后，第三章从原理上具体介绍了如何通过实现反向散射并行下行链路实现大规模物联网广播机制及其并行通信与控制系统。该算法设计是基于 IEEE 802.11a/g 协议进行的研究，基本思想是将 2.4GHz Wi-Fi 频段上的 OFDM 信号的各个子信道做关于 0Hz 对称的两两一对的划分，然后将它们分别分配给第一、第二、第三……个反向散射标签，每个子信道上都加载有 ± 1 的信息，我通过肖特基二极管混频器和 RF 开关进行两次混频，将对称的两个子信道搬移到 0Hz 处进行叠加输出，两个子信道上叠加的数据之和即为对应的标签应该解调得到的信息。由于每个标签分配了不同的子信道对，所以它们同时得到的信息都是独特的，也即可以实现反向散射并行下行链路，将这些反向散射标签装载在物联网设备上，即可通过这些解调信息对物联网设备进行并行控制。

紧接着，在第四章和第五章中，我分别在 Keysight ADS 这款仿真软件上和使用 Rogers 4003C 板材打印的 PCB 电路板上对第三章设计的反向散射并行下行链路的实现方法进行验证。在验证时，我都首先使用单频信号对二极管混频器和 RF 开关的下变频功能进行验证，然后利用 MATLAB 产生的调制好的 OFDM 信号，输入到标签接收机电路中进行解调，然后对解调结果进行分析。仿真实验和 PCB 实验结果都表明，本文设计的广播机制是有效可行的。同时我还测试了该标签接收机的 PCB 电路解调 OFDM 信号时的功耗约为 $467.3\mu\text{W}$ ，远低于有源无线电解调的功耗，因此展现了本文设计的接收机低能耗的优势。

最后，在第六章中，我对本文设计和实验过程中的不足之处进行了分析，同时对该项目未来进一步研究的方向和前景进行了展望，希望能够给读者和之后的研究者提供一些有用的参考。

总的来说，本文首次提出了反向散射系统的并行下行链路，并可以通过该设计对大规模物联网广播机制下的并行通信与控制系统做进一步的设计，同时本文也从仿真实验和 PCB 实验上分别验证了该广播机制的可行性，证明本文的设计总体上是成功的，其中的一些缺陷和不足之处希望能够在未来的研究之中一一解决。

参考文献

- [1] Wikipedia. Internet of things[EB/OL]. (2020-05-08) [2020-05-13]. https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things.
- [2] WEISER M. The Computer for the 21st Century[J]. Scientific American, 1991, 265(3): 94-104.
- [3] RAJI R S. Smart networks for control[J]. IEEE Spectrum, 1994, 31(6): 49-55.
- [4] EVANS D. The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything[M]. San Francisco: CISCO White Paper, 2011.
- [5] LIU W, HUANG K, ZHOU X, et al. Backscatter Communications for Internet-of-Things: Theory and Applications[J/OL]. CoRR, 2017, abs/1701.07588. arXiv: 1701.07588. <http://arxiv.org/abs/1701.07588>.
- [6] XU C, YANG L, ZHANG P. Practical Backscatter Communication Systems for Battery-Free Internet of Things: A Tutorial and Survey of Recent Research[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2018, 35(5): 16-27.
- [7] BHARADIA D, JOSHI K R, KOTARU M, et al. BackFi: High throughput WiFi backscatter[C]//ACM Special Interest Group Data Communication (SIGCOMM). London, United Kingdom: [s.n.], 2015: 283-296.
- [8] ZHANG P, BHARADIA D, JOSHI K R, et al. HitchHike: Practical backscatter using commodity WiFi[C]//ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Stanford, CA, USA: [s.n.], 2016: 259-271.
- [9] SMIDA B, ISLAM S. Full-duplex wireless communication based on backscatter amplifier[C]//IEEE International Conference on Communication Workshop (ICC). Sydney, Australia: [s.n.], 2014: 91-95.
- [10] KELLOGG B, PARKS A, GOLLAKOTA S, et al. Wi-Fi Backscatter: Internet Connectivity for RF-Powered Devices[C]//ACM Special Interest Group Data Communication (SIGCOMM). Chicago, Illinois, USA: [s.n.], 2014: 607-618.
- [11] GONG W, CHEN S, LIU J. Towards Higher Throughput Rate Adaptation for Backscatter Networks[C]//IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP). Toronto, Canada: [s.n.], 2017: 1-10.
- [12] KOTARU M, ZHANG P, KATTI S. Localizing Low-power Backscatter Tags Using Commodity WiFi[C]//ACM International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies (CoNEXT). Seoul/Incheon, South Korea: [s.n.], 2017: 251-262.
- [13] ZHANG P, JOSEPHSON C, BHARADIA D, et al. FreeRider: Backscatter Communication Using Commodity Radios[C]//ACM International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies (CoNEXT). Seoul/Incheon, South Korea: [s.n.], 2017: 389-401.

- [14] KAPETANOVIC Z, SAFFARI A, CHANDRA R, et al. Glaze: Overlaying Occupied Spectrum with Downlink IoT Transmissions[J]. The Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT), 2019, 3(4): 137:1-137:21.
- [15] JUNG J H, PARK S, KIM S L. Multi-Robot Path Finding with Wireless Multihop Communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(7): 126-132.
- [16] GUO S, LI X, GUO J. Study on a Multi-Robot Cooperative Wireless Communication Control System for the Spherical Amphibious Robot[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China: [s.n.], 2016: 1143-1148.
- [17] TUNA G, GUNGOR V C, GULEZ K. An autonomous wireless sensor network deployment system using mobile robots for human existence detection in case of disasters[J]. Ad Hoc Networks, 2014, 13(Part A): 54-68.
- [18] PÉREZ-PENICHET C, NODA C, VARSHNEY A, et al. Battery-free 802.15.4 Receiver[C]// ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). Porto, Portugal: [s.n.], 2018: 1-12.
- [19] 百度百科. 伏安特性曲线[EB/OL]. 2020 [2020-05-20]. <https://baike.baidu.com/item/%E4%BC%8F%E5%AE%89%E7%89%B9%E6%80%A7%E6%9B%82%E7%BA%BF/5477930?fr=aladdin>.
- [20] INTGCKTS A. Diode Mixer[EB/OL]. 2020 [2020-05-20]. <https://analog.intgckts.com/rf-mixer/diode-mixer/>.
- [21] Wikipedia. IEEE 802.11g-2003[EB/OL]. (2020-05-06) [2020-05-20]. https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11g-2003.
- [22] BAT 15-03W E6327 Datasheet[A/OL]. Infineon Technologies AG. (2015-01-27). https://www.mouser.cn/datasheet/2/196/Infineon-BAT15SERIES-DS-v01_02-EN-85097.pdf.
- [23] Digilent. Cmod S7 Reference Manual[EB/OL]. 2020 [2020-05-31]. <https://reference.digilentinc.com/reference/programmable-logic/cmod-s7/reference-manual>.
- [24] ADG901/ADG902 Datasheet[A/OL]. Analog Devices. 2017. https://www.mouser.cn/datasheet/2/609/ADG901_902-916906.pdf.
- [25] CC3200 SimpleLink Wi-Fi and Internet-of-Things Solution, a Single-Chip Wireless MCU[A/OL]. Texas Instruments. 2015. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc3200.pdf>.

致 谢

值此论文完成之际，我想向所有在我的毕业设计的过程中给予过我指导、帮助、支持和关心的老师、学长学姐、同学、朋友、亲人表示最衷心的感谢和感激。

本毕业设计和学士学位论文是在我的指导教师田晓华教授的亲身指导和帮助之下完成的，从项目的选题到项目的实施，田老师无时无刻不在向我提供着建议和支持，每周的例行组会田老师都会听取我的进度汇报，并给出具有建设性的意见和建议。本地实验环境的搭建也是在田老师的完全支持下才能搭建起来，我也才可能保质保量地完成本次毕业设计的实验。在平时完成毕业设计的过程中，如果我遇到什么困难和需求，只要跟田老师反映，总能得到他亲切且耐心的回复，也总能解决我的问题，让我的毕业设计顺利地进行下去。田老师作为我的师长，他严谨务实的科研态度、精益求精的工作作风、平易近人的待人方式始终深深地感染并激励着我，让我深受感动的同时也有无限的动力积极完成毕业设计的项目。十分感谢田老师一直以来对我不懈的支持和帮助，在此我向田老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

在此，我还要感谢在科研上给予我巨大帮助的实验室的学长学姐们，如果没有他们的帮助，我不可能这么顺利地完成毕业设计项目。我特别要感谢实验室的朱丰源学长，他杰出的科研能力令我深深地折服，他能够在科研的各个方面给予我技术性的指导，同时也激励着我追求科研的突破和创新。他总能在我一筹莫展的时候给我指明科研的方向，正是由于他的悉心指导，我才不会在一个个技术沟壑前难以逾越、停滞不前。

同时，我还要感谢我电子系 2016 级的同学，是他们让我有了一个快乐且充实的本科生活，他们的陪伴也让我在完成毕业设计的时候是愉悦且充满力量的。我想特别感谢王梓桐同学对我毕业设计的帮助，她在 PCB 电路设计上给予了我很多的指导，让我从对 PCB 设计一无所知到成功完成了本次毕设实验的设计，我十分感谢她的耐心帮助。

最后，我想感谢在我完成毕业设计的过程中我的朋友和亲人对我的关心和支持，张海扬同学总在我失落的时候给予我鼓励和安慰，罗铃镐、喻守彬、沈天瑜同学总是听我倾诉学习、科研和生活上的点点滴滴，并且作为朋友给予了我巨大的帮助，我衷心地感谢他们。同时，因为疫情原因在家完成实验的我也十分感谢父母、奶奶对我照顾和关心，虽然他们不懂我正在做的科研项目，但是他们都在能够做到的地方给予了我包容和支持，没有他们就没有我所取得的成绩，谢谢他们！

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF BROADCAST MECHANISM IN LARGE-SCALE INTERNET OF THINGS

In recent years, with the rapid development of mobile networks and the continuous innovation of hardware devices, the concept of Internet of Things (IoT) is being widely concerned and studied. IoT is a system composed of interconnected computing devices, machinery, and digital machines. The system has unique identifiers (UIDs) and the ability to transmit data over networks without the assistance of human-to-human or human-to-computer interaction. The novel technology of IoT is rapidly developing in the context of modern wireless communication. The basic idea of this concept is to take advantage of various objects that are everywhere around us, such as radio frequency identification (RFID) tags/sensors, executors, mobile phones, etc. These objects are capable of interacting with each other and cooperating with their neighbour devices to achieve a common goal through a unique addressing mode.

IoT has achieved technological innovation in various application scenarios in the past few decades, such as smart cities, smart homes, and autonomous robots/cars/drones. It is expected that in the near future, IoT will contain tens of billions of sensors and other types of nodes. The big data collected by sensors in the large-scale IoT will be integrated and analyzed in the cloud, which can be used to monitor and adjust the problems of general concern in the real world, such as pollution, traffic congestion, and parking spots monitoring. Driven by cloud computing, IoT technology can penetrate into every area of our society, from traffic control to business management, from weather forecast to smart homes, all of which are IoT application scenarios. At the same time, it can also promote scientific research breakthroughs in various fields from physics to biology.

Therefore, with the continuous development of mobile networks, especially the 5G technology, and the continuous update of hardware equipment, research on large-scale IoT will be a key area in future research world. In the application of large-scale IoT, in addition to the use of sensors and other nodes to collect data for integration and analysis (uplink), the use of a central transmitter to simultaneously send information to large-scale objects or devices and then control them to complete certain tasks and serve people (downlink) is also included. In order to improve the efficiency of the communication and control system, and realize real-time communication and control, it is necessary to realize parallel communication and control in large-scale IoT. Focusing on the problem, the key idea of this research paper is to realize backscatter parallel downlink in large-scale IoT, and also to design a parallel communication and control system under the broadcast mechanism in the large-scale IoT.

IoT is considered to be a part of future Internet and it will contain hundreds of millions of intelligent communicating "things". IoT will provide a large number of interconnected devices with new functions, including the implementation of parallel communication and control of large-scale devices. These heterogeneous devices are connected and will cooperate with each other to further extend the boundaries of our world. Therefore, the wireless communication and control system with large-scale objects in IoT also has more and more application prospects in reality. For example, it can be adopted to control clusters of drones to provide people with courier services. Besides, we can use

such a system to update the real-time price tags of goods in stores because updating hundreds of price tags at the same time can effectively save labor costs. In these scenarios, people can simultaneously control a group of objects or devices to complete different operations or tasks for themselves. The system offering these services is capable of improving the quality of life of human beings. In such a large-scale application of IoT, energy consumption is a factor worthy of consideration, so I turned my attention to the backscatter tags that do not require energy consumption themselves.

Backscatter tags rely on the excitation signal transmitted by transmitters to convey data. They load the information carried by themselves onto the excitation signal and then reflect the signal. Receivers receive the reflected signal and then demodulate it to obtain the information that they need. The main advantage of backscatter systems is that backscatter tags do not need to consume energy themselves, which is provided by the excitation signal.

Taking advantage of the low energy consumption of backscatter systems, if a backscatter tag is installed on each device, multiple devices can be controlled simultaneously by broadcasting an excitation signal. However, the downlink of current backscatter systems, which is the link from signal transmitters to tags, is not parallel, which means all tags can only demodulate the excitation signal to get the same information at the same time. What I want to do is to change this situation, realizing backscatter parallel downlink. In this way, different tags are allowed to demodulate the same excitation signal but obtain different data and information so that the backscatter tag on each device will get the unique information only intended for this device from the transmitter. As a result, all devices can obtain and follow distinctive instructions simultaneously, so that a wireless communication and control system for large-scale objects can be implemented, realizing personalized control and communication for each device.

This paper designed an algorithm to implement backscatter parallel downlink. The backscatter communication discussed in this paper will be mainly based on the IEEE 802.11a/g protocol, and its direct source is the IEEE 802.11g protocol standard because IEEE 802.11g uses Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) in the 2.4GHz frequency band, leading to a high data transmission rate. 2.4GHz Wi-Fi is famous for its high signal strength, small attenuation, strong wall penetration ability, and long coverage distance so it is suitable for the large-scale IoT applications.

Under the broadcast mechanism in large-scale IoT, a central base station broadcasts control information to a series of IoT devices equipped with backscatter tags. First, the central base station loads all the information needed by all IoT devices on each subcarrier of the OFDM signal, and then broadcasts it. The backscatter tag mounted on IoT devices includes an antenna and mixers. After the antenna receives the broadcast OFDM signal, the backscatter tag downconverts the signal through mixers, and then demodulates the OFDM signal through subsequent circuits to obtain its own information loaded on its corresponding subcarriers. In this way, different tags will demodulate different OFDM subcarriers, and each device will get the control information intended only for itself from the central base station. Therefore, all devices can get different information and different instructions at the same time, which means that the wireless communication and control system for large-scale objects, and the personalized control and communication for each device are both realized.

Based on the broadcast mechanism designed above, I tested the performance of the receiver circuit of backscatter tags on Keysight ADS, a simulation software. First, I verified in simulation

the performance of the Schottky diode and the RF switch adopted in the receiver circuit to implement two frequency mixing components. The results showed that the two frequency mixing components were both successful and could be simulated. Then I designed the receiver circuit of backscatter tags in simulation to demodulate OFDM signals. MATLAB was used to generate modulated OFDM signals, which were then input into the receiver circuit on Keysight ADS for simulations. Besides, MATLAB was also utilized to generate the ground truth of the demodulation results which were adopted to compare with the simulation results. In order to verify that different data streams and different subcarriers could all be successfully demodulated, I designed three experiments with different settings. The three experiments all successfully demodulated the transmitted OFDM data stream, so it could be said that the backscatter parallel downlink algorithm designed above could be successfully simulated, meaning that the parallel communication and control system under the broadcast mechanism in large-scale IoT has been proved feasible by simulations.

On the basis of Keysight ADS simulations, I used Altium Designer (AD) to draw the simulation circuit into a schematic diagram of the receiver circuit of backscatter tags, and then convert it into a PCB circuit board. The PCB circuit board could be printed with the high-frequency material, Rogers 4003C, by the factory so that the performance of the receiver circuit could be tested on the PCB board. At first, I used the ordinary PCB printing material FR-4 to print PCB boards due to the lack of experience. This material was not suitable for high-frequency circuits, so the results of the previous PCB experiments were not ideal as expected. After printing the PCB circuit board with Rogers 4003C, I used equipment at home to verify the performance and feasibility of the receiver circuit of backscatter tags that I designed. The experiments were divided into two parts as well, just like the simulations. The experiment results showed that the PCB board of the receiver circuit of backscatter tags could successfully demodulate OFDM signals transmitted by the central base station and obtain its unique control information. As a result, I demonstrated the feasibility of the broadcast mechanism in large-scale IoT that I designed both with Keysight ADS simulations and PCB experiments.

As far as I am concerned, this is the first paper studying backscatter parallel downlink, which has outstanding innovation and contributions.