

华中科技大学

本科生毕业设计[论文]

RIS 辅助的无线通信系统的原型验证

院 系 人工智能与自动化学院

专业班级 自动化 1705 班

姓 名 裴熙隆

学 号 U201714286

指导教师 陈忠、尹海帆

2021 年 5 月 12 日

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包括任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保障、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关学位论文管理部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权省级优秀学士论文评选机构将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于 1、保密 ☐，在 年解密后适用本授权书。

2、不保密 ☒。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名: 年 月 日

导师签名: 年 月 日

摘 要

近年来,

关键词: 可重构智能表面; 智能反射面; 无线中继; 大规模多进多出系统; 原型系统; 现场可编程逻辑门阵列

Abstract

Recently,

Key Words: Reconfigurable intelligent surface; intelligent reflecting surface; wireless repeating; massive multiple-input multiple-output; prototype; field programmable gate array

目 录

摘要	I
Abstract	II
1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 智能超表面概述	3
1.3 国内外现状分析	4
1.4 本文主要研究内容与组织结构安排	5
2 超表面相关理论	6
2.1 广义反射和折射定律	6
2.2 波束赋形理论	6
3 建模仿真分析	6
4 系统设计	6
4.1 超表面单元设计	6
4.2 控制电路设计	6
4.3 驱动、固件设计	6
4.4 算法设计	6
5 实验数据	7
6 总结与展望	7
6.1 论文研究工作总结	7
6.2 未来工作展望	7
7 段落	7
7.1 第二小节	7
7.2 第三小节	7
8 参考文献和交叉引用	9
8.1 参考文献	9
8.2 交叉引用	9
9 公式这么用	10
10 用图和表的示例	11

10.1 图的使用	11
10.2 表的使用	13
11 列表的使用	14
致谢	15
参考文献	16
附录 A 系统电路原理图	18
附录 B 这是第一个附录	18
B.1 附录可以有小节	18
B.1.1 附录中也可以有小小节	18
B.1.1.1 附录中也有小小小节	18

1 绪论

1.1 引言

作为最新一代蜂窝移动通信技术, 第五代移动通信技术(5G)以其大带宽、低时延、大连接等特性, 将为物联网、社交娱乐、智慧交通、工业互联网等技术发展注入新的活力, 助力我国数字经济发展。目前, 增强移动宽带(eMBB)、高可靠低时延(uRLLC)和海量机器类通信(mMTC)成为5G的三大应用场景。进一步细分, 在3D超高清视频、云工作/娱乐、AR/VR、工业自动化、关键任务应用、自动驾驶、ITU-R WP5D、智慧城市和智能家居/建筑等方方面面都有长足的应用。这是因为5G有着多项关键技术, 其中举足轻重的就是毫米波(Millimeter Wave)技术和大规模多入多出(Massive MIMO)技术; 前者可以增加带宽资源, 提供更低的时延, 并且天线尺寸更小, 可以使设备轻量化, 从而部署更为便捷, 后者可以提高频谱效率。5G毫米波技术频率资源丰富、带宽大、峰值速率极高, 有时延低和容量大的优点, 这是5G毫米波系统的最大优势之一, 适用于大量4k/8k视频业务的场景^[1]。

具体来说, 毫米波或极高频(Extremely high frequency, EHF)是指波长短于超高频(SHF)的电磁波, 它的波长由1 mm到10 mm, 所对应的频率范围是30~300 GHz^[2]。现阶段主要毫米波应用于气象雷达、空间通信、射电天文等方面。在5G通信中, 美国已率先启用毫米波频段, 其毫米波部署最为广泛, AT&T、Verizon和T-Mobile从2018年起陆续在美国国内的城市开通利用毫米波频段的5G商用网络, 而中国现在部署的主要是Sub-6 GHz频段^[3]。中国的三大运营商从2017年开始就不断联合各厂家进行了5G毫米波的关键技术测试和验证, 随着2020年3月工信部推动5G加快发展的通知以及2022年冬奥会毫米波应用场景的预期, 毫米波大规模商用的脚步越来越近^[3]。最近中新社报道称, 5G毫米波将赋能北京2022年冬奥会。可以想象, 有了毫米波技术的加持, 这一届冬奥会会给我们带来不一样的精彩。

但现阶段5G以及毫米波的应用还存在覆盖差、成本高、能耗高等痛点问题。由于频点较高, 毫米波呈现准光学传播特性, 穿透能力很弱, 绕射、散射很不明显。如表1-1所示, 毫米波容易收到大尺寸结构的阻挡, 生活中高楼、墙面、

混凝土、钢筋、玻璃、人体等物体的阻挡会造成信号衰减严重，在极端情况下，26 GHz 毫米波于 3.5 GHz 的穿透损耗高 90 dB，大雨等恶劣天气也会对毫米波的覆盖产生较大的影响^[1]。另外，人体的遮挡在极高频时也会有不可忽视的影响。从上述的毫米波的传播特性来看，它适用于室内室外的视距（Line-of-sight, LoS）通信，而不适用于室内外有较高的穿透损耗的场景。如图 1-1 为在城市中模拟的 3.5 GHz 和 26 GHz 两种频段的覆盖范围对比。从右图可以看到，对于视距场景，毫米波覆盖尚可；而被遮挡的区域就差强人意了。我们以参考信号接收功率（Reference Signal Receiving Power, RSRP）不低于 -110 dBm 为基准，26 GHz 的总体覆盖（按面积计算）只能达到 3.5 GHz 的 62%^[3]。

表 1-1 3.5 GHz 和 26 GHz 下不同材料的穿透损耗（dB）对比^[3]

	混凝土	木头	雨衰（10 mm/hr）	人体损耗	普通多层玻璃	IRR 玻璃
3.5 GHz	19	5.27	0	3	2.7	24.05
26 GHz	109	7.97	1.57	9-13	7.2	30.8

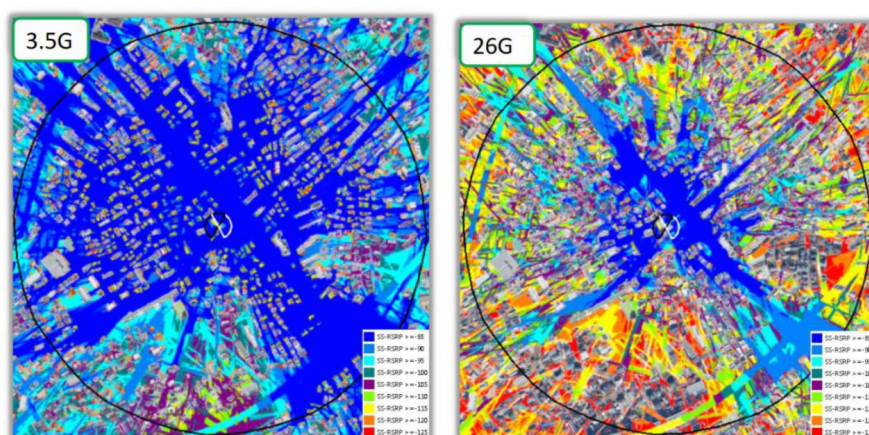


图 1-1 3.5 GHz 和 26 GHz 覆盖对比^[3]

从毫米波设备的硬件架构来看，毫米波设备由大量的射频链路、射频开关、移相器组成用来实现模拟波束赋形。这样的收发器的组成需要所需的天线、放大器等器件相比现有通信方案增加多达数十倍，造成了成本长时间居高不下。同时带来的也有能耗问题，复杂的射频硬件电路带来了令人难以置信的高功耗，这不是绿色通信的发展方向，也不利于实现碳中和（carbon neutrality）。

面对这些问题，急需一种能够规避高频信道不可靠性的方法，其中重要的一环便是能智能地改善当前的无线环境。中继站是一种可以将非视距路径（Non-line-of-sight, NLoS）转化为视距路径的方法^[4]。使用中继站传输时，需要为每个

中继站配备专用的电源和射频前端,这需要很高的资本投入,而且,中继站需要先接收处理无线信号再做转发,会带来较大的时延,更为严重的是,广播出的新信号可能会干扰原信号^[5]。反射阵列给出了有效的解决方案:当 LoS 径不能提供服务时,另一种建立替代路径的方法是通过无源非可重构镜面反射器,例如介质镜等。反射阵列是指能够以波束的形式反射电磁波的平面^[6],这和曲面的反射镜不同,后者依靠物理曲率的变化决定反射波束的方向,而前者是由离散的单元组成,每个单元对应着不同的幅度和相移^[7]。无源非可重构的反射器与传统中继器相比,在成本和功耗方面有一定的优势。但是,这种反射器的一个重大缺陷是它的反射在生产制造出来后就被固定了,在部署和使用是不可以修改的,这使得它无法适应高动态的无线信道环境。

近年来,人们研制出了能够对撞击的无线电波进行特定变换的基于电磁的可重构结构,它们的工作频段非常广阔,可以覆盖 Sub-6 GHz、毫米波甚至太赫兹^[8]。下面将详细介绍这一新技术。

1.2 智能超表面概述

由于具有主动适应、改变无线通信环境的能力,可重构智能表面,也称为可重构反射阵列、大型智能表面或智能反射表面,已成为无线通信研究领域的一个焦点,用于缓解在不同无线网络中遇到的各种挑战^[9,10]。智能超表面是由电磁材料构成的,因为它不需要改变现有的网络结构,也不需要修改现有的无线通信标准,所以特别适合“无感”地部署在建筑物外墙、公路指示牌、广告面板、车窗等平面物体上。RIS 能够通过被动反射接收信号在基站和移动用户之间形成虚拟视线链路,从而补偿长距离的功率损耗,智能地配置无线信号环境。当基站和终端之间的直射链路被高层建筑阻断时,通过 RIS 的智能部署和设计,可以构建软件定义的无线环境,进而使接收信的信噪比(SINR)增强。与传统的中继系统(如放大转发和解码转发)相比,RIS 不需要专用的大功率电源来运行,其功耗和硬件复杂度有着其他技术难以望其项背的优势^[5]。

2014 年,中国科学院院士崔铁军教授首次提出了可编程超表面并进行了实验验证,其基本结构如图 1-2 所示^[11]。这是一种具有可编程电磁特性的二维薄层人工电磁表面结构,可以应用于从微波到可见光的各种波段中^[12]。从图 1-2 中可以看出,超表面由精心设计的电磁单元规则排列而成,这些电磁单元通常由金

属铜片、电磁介质和可调元件¹组成。通过控制电磁单元中的可调元件，以可编程的方式更改反射的电磁波的电磁参数（例如幅度和相位）^[13]。

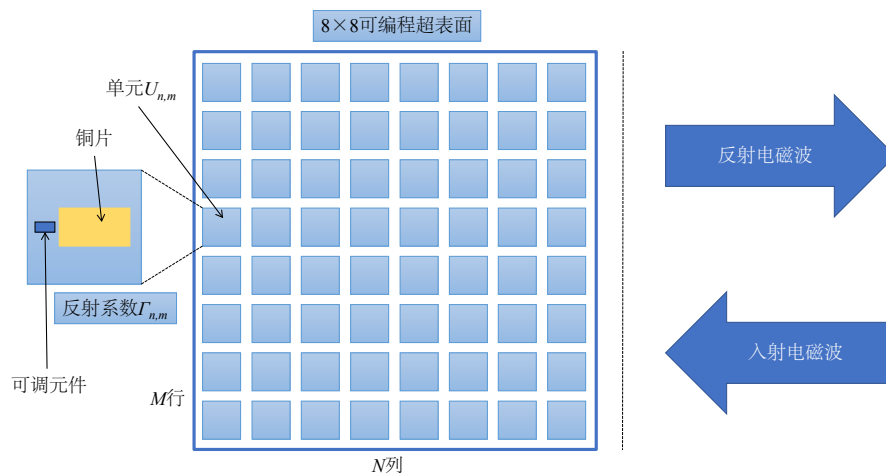


图 1-2 可编程超表面示意图

1.3 国内外现状分析

智能超表面（也被称为智能反射面）的主要组成部分是可编程人工电磁表面结构。该结构是一种由精心设计的亚波长单元按照周期或非周期性的排列组成的，具有可重配电磁特性的二维薄层。基本单元通常由金属、介质和可调器件构成。通过控制反射单元的可调部分，例如电磁波的幅度、相位，能够实现对电磁波传播方向的调控。该技术是近两年刚刚兴起的国际学术界研究热点。然而目前国内外绝大多数的研究只停留在理论分析与建模仿真阶段，基于智能超表面的无线通信实验验证系统十分稀缺。多伦多大学实现了一个 6×6 可重构发射天线阵列，每个振子连接一个变容二极管以增强其波束扫描角度范围。在 5 GHz 频率下，实现了 100×100 度的扫描窗口范围。中国科学院光电技术研究所研究团队通过变容二极管和 PIN 二极管实现了在微波波段（ 13.5 GHz 以内）对电磁波多个维度的控制，包括波束分裂、波束偏转、偏振变换等功能。东南大学崔铁军院士团队中提出了一种同时在时间和频率上操纵电磁波的时空调制数字可编程超表面。以上研究主要关注电磁超材料的设计本身，并没有在智能超表面对移动通信的增强上做过多研究。与无线通信相关的智能超表面硬件演示系统方面。东南大学团队提出了基于二进制频移键控的超表面，并通过数字编码序列控制离散反射相位，另外还设计了一个基于可编程表面的正交相移键控（QPSK）无线

¹这里可调元件指的是变容二极管、PIN 二极管、射频开关、MEMS 器件等有不同状态的元件。

发射机的原型。这两个原型系统是通过智能超表面实现信号的编码与调制，本质上属于一种信号源，与本团队的作品差别较大。2019 年 MIT 研究团队展示了一个由 3000 多个无源天线组成的反射面（由几十个 PCB 板拼接而成），工作频率为 1.6 GHz-3 GHz。实验表明它可以使接收信号强度增加 10 倍，将信道容量提升两倍。2019 年清华大学研究团队最近展示了一个工作在毫米波波段的 16×16 单元的智能超表面。可实现两比特的反射相位调整。这个系统实现了 28.5 GHz 下 19.1 dBi 的天线增益。然而该系统的设计初衷是与喇叭天线结合使用，替代传统的相控阵天线，与本团队的作品在设计理念和使用场景上有本质区别。本团队近期自主开发完成由 1100 个单元组成的智能超表面原型样机。团队在华中科技大学校园内进行了室外空口性能测试，测得接收信号强度提升 500 倍，实现了 500 米远距离传输测试，在智能超表面辅助下实现了高清视频的实时播放。

1.4 本文主要研究内容与组织结构安排

本文的主要研究内容是如何利用可编程电磁超表面增强 5G 信号覆盖。文中首先在第 2 节介绍了电磁超表面的相关理论，包括

在第 3 节 设计了一个由可编程超表面及其控制电路构成的智能反射面系统然后将它

招商银行股份有限公司

2 超表面相关理论

2.1 广义反射和折射定律

2.2 波束赋形理论

3 建模仿真分析

4 系统设计

4.1 超表面单元设计

4.2 控制电路设计

4.3 驱动、固件设计

4.4 算法设计

这个系统怎么设计呢?¹

¹哈哈

5 实验数据

6 总结与展望

6.1 论文研究工作总结

6.2 未来工作展望

7 段落

段落 这是一个带有顶头标签的段落这是一个带有顶头标签的段落这是一个带有顶头标签的段落这是一个带有顶头标签的段落这是一个带有顶头标签的段落这是一个带有顶头标签的段落

小段落 只是一个带有缩进标签的段落只是一个带有缩进标签的段落只是一个带有缩进标签的段落只是一个带有缩进标签的段落只是一个带有缩进标签的段落只是一个带有缩进标签的段落

7.1 第二小节

本模板已经引入伪加粗和伪斜体，这样就不需要对应的粗体和斜体字体也能生成需要的效果，就像下面这样

宋体加粗

宋体斜体

宋体粗斜体

请注意，使用加粗和斜体时，请与字体名称一同使用，否则会自动将粗体匹配为黑体，斜体匹配为楷体，就像下面这样

正常显示宋体

加粗后变为黑体

斜体后变为楷体

7.2 第三小节

Algorithm 1 Greedy Fast Beamforming Algorithm

```

1: Input: The feedback of RX signal power  $p_t$ .
2: Output: The reflection coefficients matrix.
3: Initialize a reflection coefficients matrix  $\mathbf{R}_0 \in \mathbb{C}^{M \times N}$ ;
4: Receive initial feedback of the RX signal power  $p_0$ ;
5: // Horizontal search;
6: for each  $n \in [1, N]$  do
7:    $\mathbf{R}_n \leftarrow [\mathbf{r}_{n-1,1}, \dots, \mathbf{r}_{n-1,n-1}, -\mathbf{r}_{n-1,n}, \mathbf{r}_{n-1,n+1}, \dots, \mathbf{r}_{n-1,N}]$ ;
8:   Receive feedback  $p_n$  using configuration  $\mathbf{R}_n$ ;
9:   if  $p_{n-1} \geq p_n$  then
10:      $\mathbf{R}_n \leftarrow \mathbf{R}_{n-1}$ ;
11:   end if
12: end for
13: return reflection coefficients matrix  $\mathbf{R}_N$ ;
14: // Vertical search;
15: Denote  $\mathbf{R}_N = [\mathbf{s}_{N,1}, \mathbf{s}_{N,2}, \dots, \mathbf{s}_{N,M}]^T$ ;
16: for each  $m \in [1, M]$  do
17:    $\mathbf{R}_{N+m} \leftarrow [\mathbf{s}_{N+m-1,1}, \dots, \mathbf{s}_{N+m-1,m-1}, -\mathbf{s}_{N+m-1,m}, \mathbf{s}_{N+m-1,m+1}, \dots, \mathbf{s}_{N+m-1,M}]^T$ ;
18:   Receive feedback  $p_{N+m}$  using configuration  $\mathbf{R}_{N+m}$ ;
19:   if  $p_{N+m-1} \geq p_{N+m}$  then
20:      $\mathbf{R}_{N+m} \leftarrow \mathbf{R}_{N+m-1}$ ;
21:   end if
22: end for
23: return reflection coefficient matrix  $\mathbf{R}_{M+N}$ .

```

8 参考文献和交叉引用

8.1 参考文献

这是一个参考文献引用的范例^[14, 15, 16, 17, 13, 12]

8.2 交叉引用

本模板已经重写了 `hyperref` 宏包的 `\autoref` 命令，方便引用章节、公式和图表。

比如说第 8 节和第 8.2 小节就引用了本章节，段落 7 和段落 7 引用了之前的两个段落。显然段落因为没有序号，引用结果和上一节的需要相同，因此建议使用段落“段落”和段落“小段落”。

9 公式这么用

在文中引用公式可以这么写： $a^2 + b^2 = c^2$ 这是勾股定理，他还可以表示为 $c = \sqrt{a^2 + b^2}$ ，还可以让公式单独一段并且加上编号

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \tag{9.1}$$

还可以通过添加标签在正文中引用公式，如式 (9.1) 或者式 (9.1)。我们还可以轻松打出一个矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 11 & 22 & 33 & 44 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 22 & 24 \\ 32 & 34 \\ 42 & 44 \\ 52 & 54 \end{bmatrix} \tag{9.2}$$

或者多个带编号的公式

$$f_1(x) = 12x^2 + 36x + \sin x \tag{9.3}$$

$$f_2(x) = \sqrt{3}x^3 + 3x \tag{9.4}$$

以上

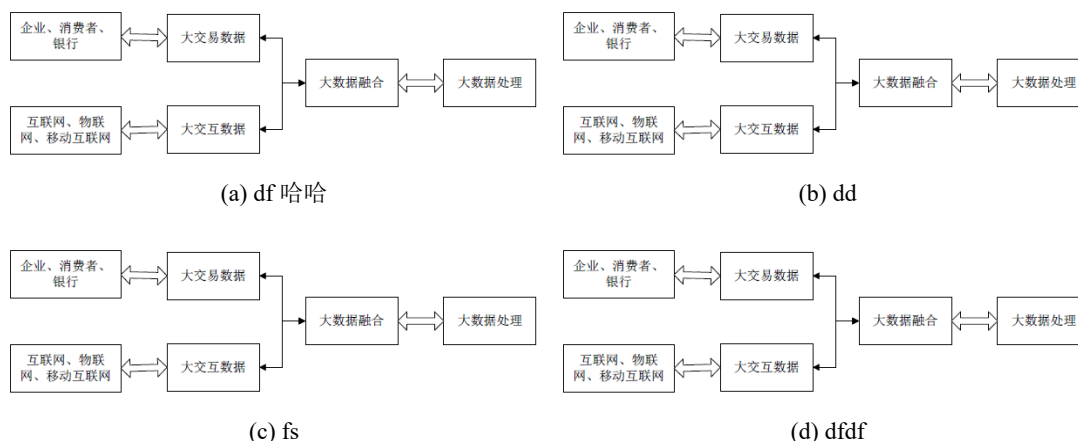


图 10-1 The 50 m outdoor over-the-air test: (a) the scene of the transmitter and receiver; (b) a copper plate of the same size as the RIS; (c) spectrum when using the RIS; (d) spectrum when using the copper plate.

10 用图和表的示例

10.1 图的使用

X_{La}TeX 环境下可以使用 EPS、PDF、PNG、JPEG、BMP 格式的图片，当然也可以用绘图包直接在 L_{at}TeX 中绘制图形，推荐使用宏包 tikz。图的环境是 figure，但 figure 环境使用复杂且不自带标题，因此本模板定义了一个通用版本的 generalfig，该环境会将 figure 内的图片居中并设置标签与引用名，同时会让图片位置设置为所有可行位置（htbp，即此处、页顶、页底、独立一页），此选项可以作为可选参数设置。

其使用方法如下： 10-1d

图 10-1

10-1d

10-1

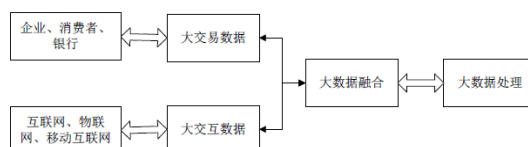


图 10-2 Indoor non-LoS test.

同时也可以引用该图片例如：图 10-3 或者图 10-3。请注意 generalfig 第一个

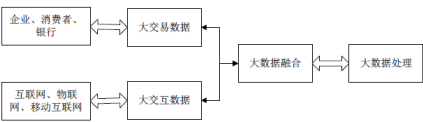


图 10-3 大数据信息处理框架

参数是标题，第二个参数是引用。

10.2 表的使用

作为论文，推荐使用三线表进行排版。所谓三线表，即在标题前有横线，标题后有横线，表格最后还有横线，其他地方无线。当然这不是死规定，也可以根据需要在合适的地方加线。、踩踩踩本文定义了新的可变长度左中右（LCR）格式，LCR 三个格式会根据表格宽度的设定自行控制宽度，且其宽度相等，方便设置和页面相同宽度的表格。但该功能需要使用 tabularx 做表。

表 10-1 某校学生升高体重样本

序号	年龄	身高	体重
1	14	156	42
2	16	158	45
3	14	162	48
4	15	163	50
平均	15	159.75	46.25

当然你也可以引用表格，就像这样：表 10-1 。

11 列表的使用

这是一个计数的列表

1. 第一项
 - (a) 第一项中的第一项
 - (b) 第一项中的第二项
2. 第二项
3. 第三项

这是一个不计数的列表

- 第一项
 - 第一项中的第一项
 - 第一项中的第二项
- 第二项
- 第三项

致谢

“文章本天成，妙手偶得之。”

“朝发鸡鸣未响，归路晚风凉。汗洒澄池桃李，几度银杏黄。”



2021年5月10日
于华中科技大学韵苑

参考文献

- [1] RAPPAPORT T S, XING Y, KANHERE O, et al. Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond[J]. IEEE Access, 2019, 7: 78729–78757.
- [2] CONTRIBUTORS W. Extremely high frequency — Wikipedia, The Free Encyclopedia[J], 2021.
- [3] 中兴通讯. 5G 毫米波 (mmWave) 技术白皮书 [R]. [S.l.]: 中兴通讯股份有限公司, 2020.
- [4] DOHLER M, LI Y. Cooperative Communications: Hardware, Channel and PHY[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.
- [5] DI RENZO M, NTONTIN K, SONG J, et al. Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: Differences, similarities, and performance comparison[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020, 1: 798–807.
- [6] HUANG J. Reflectarray antenna[J]. Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, 2005.
- [7] POZAR D M, TARGONSKI S D, SYRIGOS H. Design of millimeter wave microstrip reflectarrays[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1997, 45(2): 287–296.
- [8] Wu Q, Zhang R. Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2019, 18(11): 5394–5409.
- [9] LIU X, LIU Y, CHEN Y, et al. RIS enhanced massive non-orthogonal multiple access networks: Deployment and passive beamforming design[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020.
- [10] HUANG C, HU S, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: Opportunities, challenges, and trends[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(5): 118–125.

- [11] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218–e218.
- [12] 张磊, 刘硕, 崔铁军. 电磁编码超材料的理论与应用 [J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 1–12.
- [13] 周儒雅, 唐万恺, 李潇, et al. 基于可重构智能表面的移动通信简要综述 [J]. *移动通信*, 2020, 44(6): 63–69.
- [14] Wu Q, Zhang S, Zheng B, et al. Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Communications: A Tutorial[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2021: 1–1.
- [15] DI RENZO M, DEBBAH M, PHAN-HUY D-T, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: An idea whose time has come[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 2019(1): 1–20.
- [16] Yang D, Yang L , Hanzo L. DFT-Based Beamforming Weight-Vector Codebook Design for Spatially Correlated Channels in the Unitary Precoding Aided Multiuser Downlink[C] // 2010 IEEE International Conference on Communications. 2010: 1–5.
- [17] Liang Y, Long R, Zhang Q, et al. Large Intelligent Surface/Antennas (LISA): Making Reflective Radios Smart[J]. *J. Commun. Inf. Netw.*, 2019, 4(2): 40–50.

附录 A 系统电路原理图

附录 B 这是第一个附录

这里是附录环境，其中的 section、subsection、subsubsection 已经变为附录的样式，并且会以这种样式加入目录中。

B.1 附录可以有小节

B.1.1 附录中也可以有小小节

B.1.1.1 附录中也有小小小节

\autoref无法识别 Appendices 环境，引用效果和正文一样，如第 B.1.1 小节。所以如果引用附录的话，建议直接使用附录 B.1.1。