

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 13 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	5
1.4 本文主要研究内容与组织结构安排	6
2 超表面基础理论	7
2.1 广义反射和折射定律	7
2.2 波束赋形理论	8
2.3 本章小结	8
3 建模仿真分析	8
3.1 本章小结	8
4 系统设计	8
4.1 超表面单元设计	8
4.2 控制电路设计	8
4.3 驱动、固件设计	8
4.4 算法设计	8
4.5 本章小结	10
5 实验数据	10
5.1 本章小结	10
6 总结与展望	10
6.1 论文研究工作总结	10
6.2 未来工作展望	10
7 段落	10
7.1 第二小节	10
7.2 第三小节	11
8 参考文献和交叉引用	11

8.1 参考文献	11
8.2 交叉引用	11
9 公式这么用	12
10 用图和表的示例	13
10.1 图的使用	13
10.2 表的使用	15
11 列表的使用	16
致谢	17
参考文献	18
附录 A 系统电路原理图	21
附录 B 这是第一个附录	21
B.1 附录可以有小节	21
B.1.1 附录中也可以有小小节	21
B.1.1.1 附录中也有小小小节	21

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

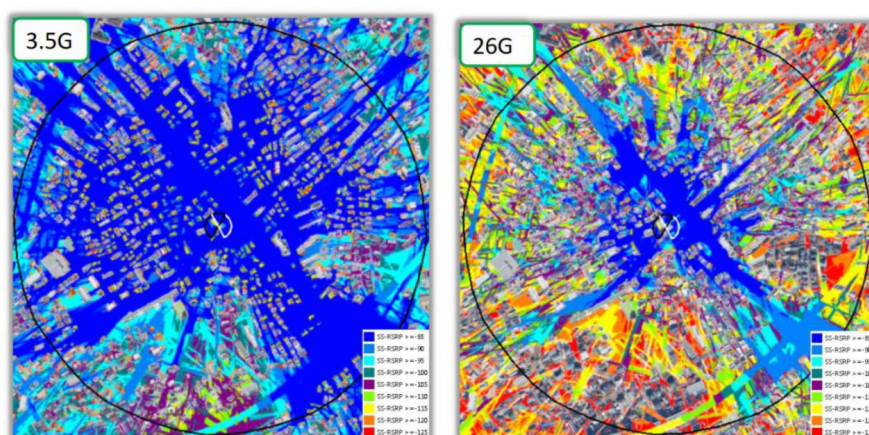


图 1-1 3.5 GHz 和 26 GHz 覆盖对比^[3]

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。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(RIS),也称为可重构反射阵列、可编程超表面、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。与传统放大转发和解码转发的中继系统相比,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智能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]。

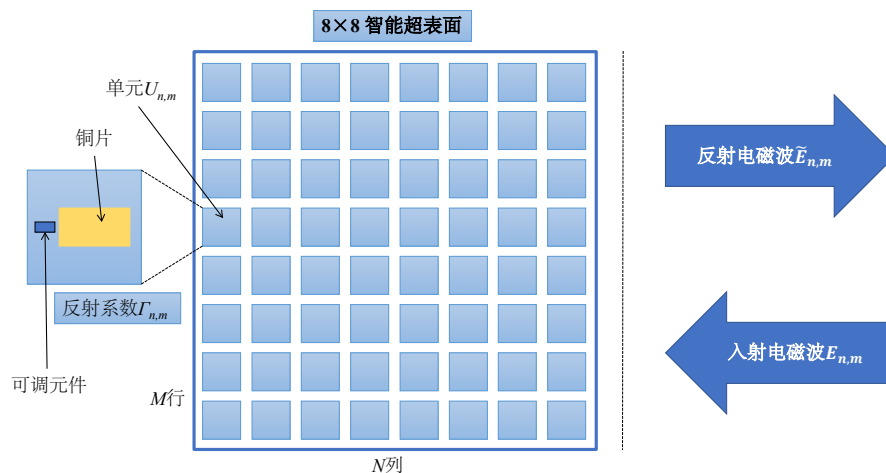


图 1-2 智能超表面示意图

如图 1-3 所示为智能超表面的异常反射、折射示意图，智能超表面可以将入射信号反射和折射到非斯涅尔定律预测的异常方向，可以改变入射电磁波的波形和极化方向^[14]。就无线电波的传播而言，基于超材料元表面的 RIS 就像一个突变的电磁间断，改变了散射场。如前所述，实现智能超表面的功能的关键要素便是元表面单元结构的设计。元表面是由亚波长金属或电介质散射粒子（称为亚原子）形成的亚波长阵列^[15]。图 1-3 描绘了电磁波对于给应的入射角，元表面的预期反射相应和折射相应，与普通平面的反射 $\theta_2 = \theta_1$ 不同，超表面可以使 $\theta_3 \neq \theta_1$ 。

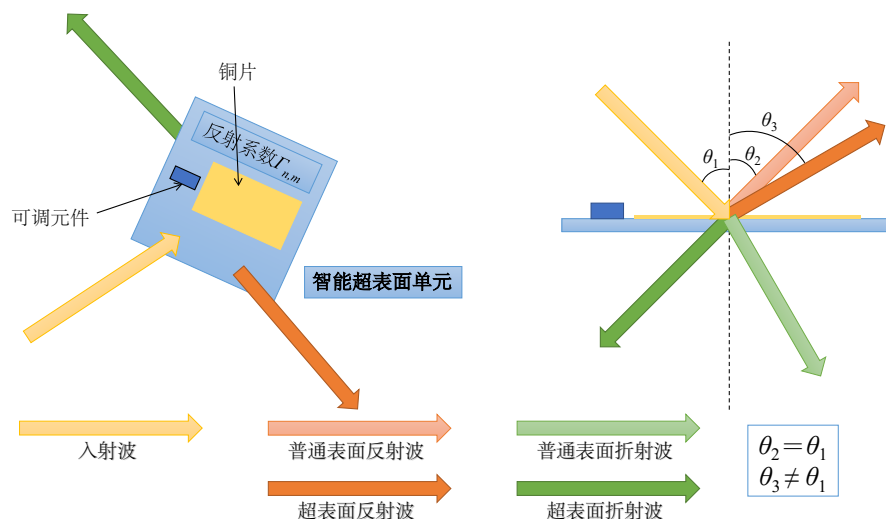


图 1-3 智能超表面的异常反射、折射

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

在智能超表面中, 每个单元的反射系数 $\Gamma_{n,m}$ 是可以根据外界环境调整改变的。图 1-2 上的可调元件一般被安装在单元上。这样, 通过外部的控制电路控制可调元件的状态, 就可以操纵元表面上无线电波的波前, 以实现信号调制或波束赋形。智能超表面的中央控制器一般采用现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 或微控制器 (MCU)。通过软件设计, 超表面可以实现对移动通信中电磁信号的实时调控。目前, 国内外有关智能超表面在移动通信领域的研究主要集中在两个方向^[13], 下面详细介绍国内外研究现状。

1.3 国内外现状分析

目前智能反射面的第一个主要研究方向是利用它进行无线中继, 构建智能无线电环境。如图 1-4 (a) 所示, RIS 可以被认为是一个多功能的“神奇镜”, 将它置于无线通信系统中, 可以主动地改善无线传播环境, 通过接收机的反馈动态调整反射系数, 使得接收机处通过 RIS 反射和其他路径的叠加信号功率最大化, 实现对电磁波资源的“再分配”。国内外有许多 RIS 增强系统的主动和被动联合设计的研究: Qingqing Wu 等人设计了在单用户和多用户情况下联合的主动和被动波束赋形, 可以在接收用户 SINR 的约束下, 最小化总发射功率^[8]。智能超表面可以使得各个路径的波束在用户 (UE) 处相干增强, 从而最大化接收功率。Chongwen Huang 等人将可重构智能表面用于多用户无线通信, 他们通过设计 RIS 的相移和从基站到用户的功率分配策略, 来最大化 RIS 系统的能效。此外, 文中还介绍了 RIS 的实际能耗模型。并针对基站发射功率分配和 RIS 反射系数提出了两个计算效率高的算法。其中一种采用梯度下降方法设计, 而另一种是基于分式规划方法。其中的仿真结果表明, 与传统的多天线自动对焦中继相比, 该系统能够获得高达 300% 的能效^[16]。

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, 目前只有少量的研究: Zhuqi Li 等人在室内环境中部署了一个 6×6 的可重构发射天线阵列, 设计了信道分解算法来快速估计无线信道环境^[17]。通过实时配置无线信道, 改善通信环境, 系统的吞吐量提高到了原来的 124%。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 (由几十块 PCB 板拼接而成), 取名为 “RFocus”, 工作频率为 1.6 GHz 至 3 GHz。实验表明它可以使接收信号强度平均增加 10.5 倍, 将信道容量平均提升

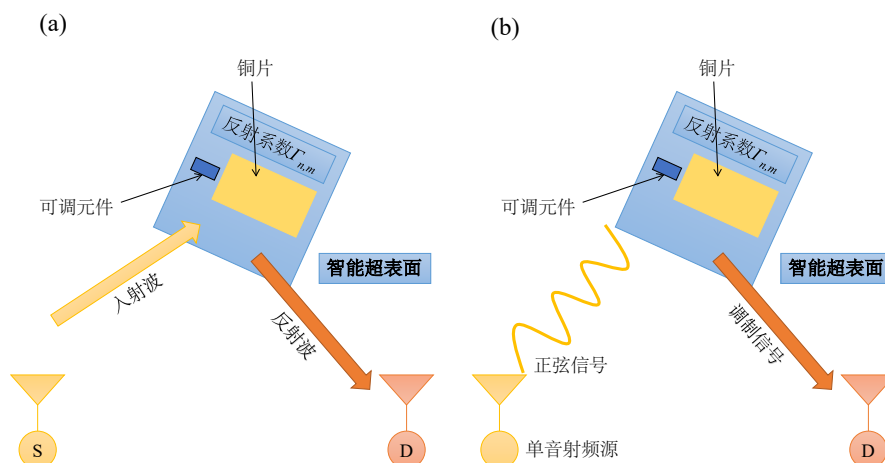


图 1-4 智能超表面的异常反射、折射

两倍^[18]。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。该 RIS 每个单元使用四个 PIN 二极管控制，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^[19]。

另外一个研究方向是通过智能超表面实现信号的编码与调制。智能超表面可以灵活地调控电磁信号波前，改变诸如幅度、相位、频率甚至极化方向等电磁参数^[13]。这一新型的发射机架构不需要复杂的基带信号处理和高性能的射频链路，未来有望应用于毫米波通信和 Massive MIMO 系统中。其基本结构如图 1-4 (b) 所示，基带信号直接作用于智能超表面，通过对反射系数的控制直接调制正弦信号。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，并实现了 BFSK 调制^[20]。进一步地，唐万凯等人设计了一个基于可编程表面的正交相移键控（QPSK）无线发射机的原型，实现了 2.048 Mbit/s 的数据传输速率，视频流也能实时传输^[21]。

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基础理论，包括广义反射定律和折射定律以及波束赋形理论。

第 3 节开始对 RIS 通信系统建模分析，比较了巴拉巴拉

第 4 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，

最后，在第 6 节得出结论，并对未来的研究工作作了初步分析。

2 超表面基础理论

超表面和超材料有着完善复杂的理论，本章根据后续内容的需要着重介绍超表面对电磁信号的调控机理。

2.1 广义反射和折射定律

电磁波在超表面上会发生相位或幅度的突变，这一现象的理论依据是广义斯涅尔定律^[22]。2011年Capasso教授等人发现了相位不连续的电磁波传播，并提出了广义反射和折射定律^[23]。通过沿着电磁波传播路径，在波长范围内引入突变相移，可以获得控制波前的新自由度。费马原理指出光线在两点A和B之间的轨迹是最小光程的轨迹，即 $\int_A^B n(\vec{r}) d\vec{r}$ ，其中 $n(\vec{r})$ 是局部折射率，由此容易推演得到两种介质之间的反射和折射定律。在其最普遍的形式中，费马原理可以表述为固定相原理^[24]，也就是说，相对于路径的无穷小变化，沿着实际光路累积的相位导数 $\int_A^B d\varphi(\vec{r})$ 将为零。但是研究表明，通过适当设计两种介质之间的界面，可以在光路中引入波长范围内的突然相移 $\Phi(\vec{r}_s)$ ，相移 $\Phi(\vec{r}_s)$ 取决于沿界面的坐标 \vec{r}_s 。那么，对于光所走的实际路径，总相移 $\Phi(\vec{r}_s) + \int_A^B \vec{k} \cdot d\vec{r}$ 是固定不变的，其中 \vec{k} 是传播光的波矢。这提供了反射和折射定律的一般化，其适用于整个光谱中两种介质之间的大范围的亚波长结构化界面。

下面考虑广义反射和折射定律，在两种介质的界面上引入一个突变的相移，称为相位不连续，这使得我们可以通过应用费马原理来重新审视反射和折射定律。考虑一个角度为 θ_1 的入射平面波。假设两条光路无限接近实际光路(图1)，那么它们之间的相位差为零

用于推导广义斯内尔折射定律的示意图。两种介质之间的界面是人为构造的，以便在光路中引入突然的相移，这是沿着界面的位置的函数。 f 和是两条路径(蓝色和红色)穿过边界的相移。

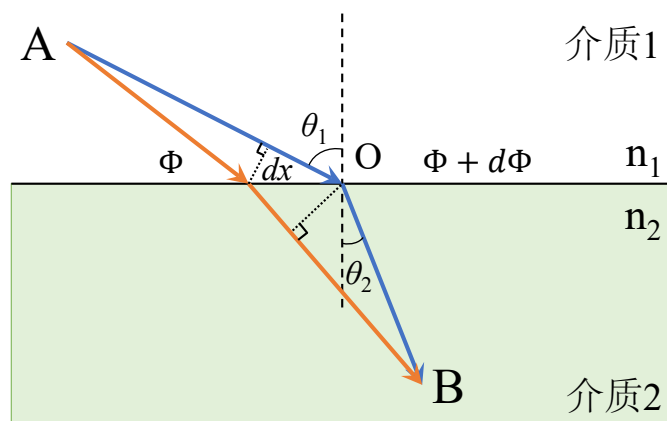


图 2-1 智能超表面的异常反射、折射

2.2 波束赋形理论

2.3 本章小结

3 建模仿真分析

3.1 本章小结

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？

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  $\mathbf{R}_{M+N}$ .

```

4.5 本章小结

5 实验数据

5.1 本章小结

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

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, 25, 26, 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

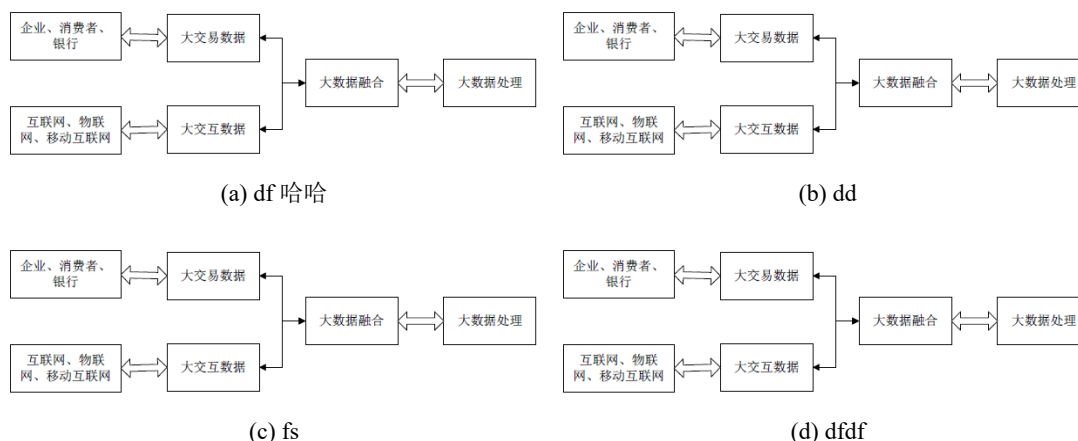


图 10-1 The 50 m outdoor over-the-air test: (a) the scene of the transmitter and receiver; (b) a copper plate of the same size as the RIS; (c) spectrum when using the RIS; (d) spectrum when using the copper plate.

10 用图和表的示例

10.1 图的使用

$\text{Xe}_{\text{L}}\text{TeX}$ 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 $\text{L}_{\text{A}}\text{TeX}$ 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

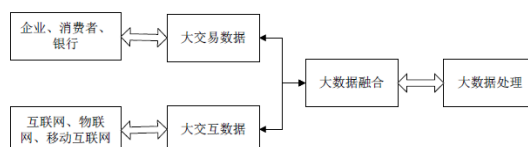


图 10-2 Indoor non-LoS test.

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

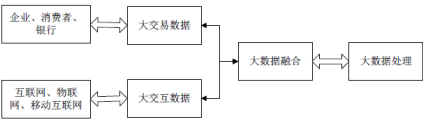


图 10-3 大数据信息处理框架

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

“满纸荒唐言，一把辛酸泪。”

“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] 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.
- [15] BASAR E, DI RENZO M, DE ROSNY J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 116753–116773.
- [16] HUANG C, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energy Efficiency in Wireless Communication[J]. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2019, 18(8): 4157–4170.
- [17] LI Z, XIE Y, SHANGGUAN L, et al. Towards programming the radio environment with large arrays of inexpensive antennas[C] // 16th {USENIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation ({NSDI} 19). 2019: 285–300.
- [18] ARUN V, BALAKRISHNAN H. RFocus: Practical beamforming for small devices[J]. *arXiv preprint arXiv:1905.05130*, 2019.
- [19] DAI L, WANG B, WANG M, et al. Reconfigurable Intelligent Surface-Based Wireless Communications: Antenna Design, Prototyping, and Experimental Results[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 45913–45923.
- [20] ZHAO J, YANG X, DAI J Y, et al. Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems[J]. *Natl. Sci. Rev.*, 2019, 6(2): 231–238.

- [21] TANG W, LI X, DAI J Y, et al. Wireless communications with programmable metasurface: Transceiver design and experimental results[J]. China Commun., 2019.
- [22] Wu Q, Zhang S, Zheng B, et al. Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Communications: A Tutorial[J]. IEEE Trans. Commun., 2021 : 1 – 1.
- [23] YU N, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. science, 2011, 334(6054): 333 – 337.
- [24] FEYNMAN R P, HIBBS A R, STYER D F. Quantum mechanics and path integrals[M]. [S.l.] : Courier Corporation, 2010.
- [25] 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.
- [26] 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。