

第 1 章 绪 论

随着移动业务需求的爆炸式增长，容量需求和频谱短缺之间的矛盾越来越明显^[1]，无线带宽的扩展成为下一代无线通信的关键挑战。另一方面，从 30 GHz 到 300 GHz 的毫米波频段具有丰富的频谱资源，可有效缓解容量需求和频谱短缺矛盾。目前，毫米波通信已成为下一代无线通信的重要组成部分。毫米波通信可提供数吉比特量级的通信服务，如高清电视和超高清视频^[2,3]。毫米波通信大部分的研究集中于 28 GHz 频段、38 GHz 频段、60 GHz 频段和 E 波段（71~76 GHz 和 81~86 GHz），互补型金属氧化物半导体（complementary metal oxide semiconductor, CMOS）射频集成电路方面的迅猛发展为毫米波频段的电子产品铺平了道路^[4-6]。同时，用于室内无线个域网（wireless personal area network, WPAN）或无线局域网（wireless local area network, WLAN）的多个国际标准，如 ECMA-387^[7]、IEEE 802.15.3c^[8] 和 IEEE 802.11ad^[9,10]，已被制定。在毫米波蜂窝系统或毫米波室外网状网络方面，学术界、工业界和标准组织也表现出越来越多的兴趣^[11-15]。

然而，毫米波通信与现有的微波频段（如 2.4 GHz 频段和 5 GHz 频段）的通信系统相比有很多差异，如高传播损耗、定向性、对遮挡敏感等。毫米波通信要克服物理层、媒质访问控制（medium access control, MAC）层、路由层中的很多挑战才能在未来无线通信中产生大的影响，应对这些挑战需要有网络架构和网络协议方面的全新思路和设计。本章 1.1 节总结了毫米波通信的主要特征，1.2 节介绍了毫米波通信的典型应用，1.3 节分析了毫米波无线网络中的关键问题和研究现状，1.4 节给出本书研究内容与结构安排。

1.1 毫米波通信的主要特征

1.1.1 无线信道特性

相比于低频段的通信系统,毫米波通信具有更大的传播损耗。毫米波传播的雨衰以及大气和分子吸收特性限制了毫米波通信的距离^[16-18],例如,60 GHz 频段附近存在氧气吸收峰,且变化范围为 15 dB/km 到 30 dB/km^[19]。目前,随着小区半径缩小,频谱效率得到提高,雨衰和大气吸收并没有给半径在 200 m 左右的小区带来明显的附加路径损耗^[20]。

在毫米波传播特性研究中,有不少工作专注于 60 GHz 频段^[6,21-29]。由于自由空间损耗正比于载波频率的平方,60 GHz 频段的自由空间损耗比 2.4 GHz 频段的高 28 分贝 (decibels)^[14]。文献 [30] 中的信道特性表明,非视距信道 (non-line-of-sight, NLOS) 比视距信道 (line-of-sight, LOS) 具有更大的损耗。大尺度衰落 $F(d)$ 可建模为

$$F(d) = \text{PL}(d_0) + 10\gamma \lg \frac{d}{d_0} - S_\sigma \quad (1.1)$$

其中, $\text{PL}(d_0)$ 是在参考距离 d_0 处的路径损耗, γ 是路径损耗指数, S_σ 是阴影损耗, σ 是 S_σ 的标准差。表 1.1 列出在走廊、LOS 大厅和 NLOS 大厅中得到的路径损耗模型的统计参数^[30]。可以看到, LOS 大厅的路径损耗指数为 2.17, 而 NLOS 大厅的路径损耗指数为 3.01。为了补偿高传播损耗,毫米波系统中的收端和发端采用方向性天线来实现高天线增益。

表 1.1 路径损耗模型中的统计参数^[30]

	PL(d_0)/dB	γ	σ /dB
走廊	68	1.64	2.53
LOS 大厅	68	2.17	0.88
NLOS 大厅	68	3.01	1.55

在 60 GHz 频段的小尺度传播效应方面,多径效应在采用方向性天线后不明显。通过采用圆极化和窄波束宽度的接收天线,多径反射可被抑制^[31,32]。在 IEEE 802.11ad 标准中的会议室环境下的 LOS 信道模型中^[9],直接路径几乎包含了所有的能量,且几乎没有其他的多径分量存在。在这种情况下,信

道可建模为加性高斯白噪声信道 (additive white Gaussian noise, AWGN)。而 NLOS 信道没有直接路径, 且只有少量有重要能量的路径。为了实现高速率传输以及最大化功率效率^[33], LOS 信道传输是毫米波通信的主要方式。

在其他毫米波频段, 如 28 GHz 频段、38 GHz 频段和 73 GHz 频段, 也有大量的信道测量工作^[34,35]。文献 [20] 给出 28 GHz 频段在都市环境下的信道特性, 其中收发端的距离变化范围是 75 m 到 125 m。结果表明, LOS 信道的路径损耗指数为 2.55, 而 NLOS 信道的路径损耗指数为 5.76。文献 [36] 给出 28 GHz 频段在纽约市环境中的穿透和反射测量结果。结果发现, 有色玻璃和砖柱的穿透损耗分别为 40.1 dB 和 28.3 dB, 而室内材料如清晰的非有色玻璃和干壁的穿透损耗相对低, 分别只有 3.6 dB 和 6.8 dB。在反射方面, 室外材料有更大的反射系数, 而室内材料的反射系数更低。

表 1.2 总结了不同毫米波频段的传播特性, 具体包括在 LOS 和 NLOS 信道下的路径损耗指数、在 200 m 处的雨衰和在 200 m 处的氧气吸收。可以看到, 在 200 m 的距离, 28 GHz 和 38 GHz 频段的雨衰和氧气吸收损耗较低, 而 60 GHz 和 73 GHz 频段的雨衰和氧气吸收比较明显。另外, 在所有频段, NLOS 信道比 LOS 信道都要有额外的传播损耗。

表 1.2 不同毫米波频段的传播特性

频段	路径损耗指数		200 m 处的雨衰/dB		200 m 处的 氧气吸收/dB
	LOS	NLOS	5 mm/h	25 mm/h	
28 GHz	1.8~1.9	4.5~4.6	0.18	0.9	0.04
38 GHz	1.9 ~2.0	2.7~3.8	0.26	1.4	0.03
60 GHz	2.23	4.19	0.44	2	3.2
73 GHz	2	2.45~2.69	0.6	2.4	0.09

1.1.2 定向性

为了补偿强链路衰减, 毫米波通信采用定向天线实现波束赋形来提高天线增益^[37], 因而, 毫米波链路具有定向性。由于毫米波波长短, 电子扫描天线阵可实现为电路板上的金属模式^[5,38,39]。通过控制每个天线元素所发射信号的相位, 天线阵可将其波束对准任意方向, 即在这个方向实现高增益, 而在

其他方向的增益很低。发射端和接收端通过波束训练将其天线互相对准，且多种波束训练算法已被提出，以降低所需的波束训练时间^[40-42]。

1.1.3 遮挡敏感性

由电磁波理论可知，频率越高，波长越短，电磁波的绕射能力越弱。电磁波难以绕射通过尺寸明显大于波长的障碍物，例如，60 GHz 频段的链路对于人体和家具造成的遮挡很敏感，人体的遮挡可带来额外的 20~30 dB 的损耗。文献 [43] 给出有人类活动时室内环境中的传播测量结果，结果表明当有 1~5 个人时，信道被阻断的时间约有 1% 或 2%。考虑到人体的移动，毫米波链路是断断续续的。因此，为保证用户体验，提供可靠的网络连接对于毫米波通信来说是一个重大挑战。

1.2 毫米波通信的典型应用

1.2.1 无线个域网或无线局域网

为了满足爆炸式增长的移动业务需求，小区的大规模密集部署被提出，以实现到 2030 年 10 000 倍的网络容量增长^[44-46]。将无线个域网或无线局域网部署在宏蜂窝之下成为提升无线网络容量的很有前景的解决方案。具有巨大带宽的毫米波小区可提供数吉比特量级的传输速率以及宽带多媒体服务，包括设备间高速数据传输（如照相机、智能手机、平板电脑和笔记本电脑）、压缩和无压缩高清电视实时播放、无线吉比特以太网、无线游戏等。由于频段高和具有大气吸收峰，60 GHz 频段的毫米波通信具有更高的链路衰减，更加适用于室内应用场景。目前已经制定的毫米波标准，如 IEEE 802.15.3c 和 IEEE 802.11ad，都针对 60 GHz 频段，且将毫米波通信应用于无线个域网或无线局域网。

1.2.2 蜂窝接入

毫米波频段的大带宽促进了毫米波通信在蜂窝接入方面的应用^[13, 20, 47]。文献 [48, 49] 表明，只要基础设施密集部署，毫米波蜂窝网便具有高覆盖和高容量的潜力。基于毫米波频段充分的传播测量活动，将毫米波通信应用于

蜂窝接入的可行性和高效性已在 28 GHz 频段和 38 GHz 频段得到证实，小区半径在 200 m 的量级^[20]。文献 [50] 表明，方向性天线基于任意指向角的容量增益要比 4G LTE (long term evolution, LTE) 大 20 倍，且当方向性天线指向最强的发射和接收方向时，增益可进一步提高。文献 [51] 通过基于现有 60 GHz 无线设备的充分测量及系统级仿真，证实了 60 GHz 频段的毫米波通信用于室外微微蜂窝的可行性，并通过距离、反射衰减、对移动和遮挡的敏感性以及典型都市环境中的干扰分析，表明高容量的 60 GHz 室外微微蜂窝的部署没有根本的困难。由于位置邻近的 D2D 通信 (device-to-device communications, D2D) 能够节省功率且提高频谱效率，毫米波 5G 蜂窝系统应通过 D2D 通信来支持涉及发现邻近设备和与邻近设备通信的情境感知应用。图 1.1 给出支持 D2D 通信的毫米波 5G 蜂窝网架构。当蜂窝小区密集部

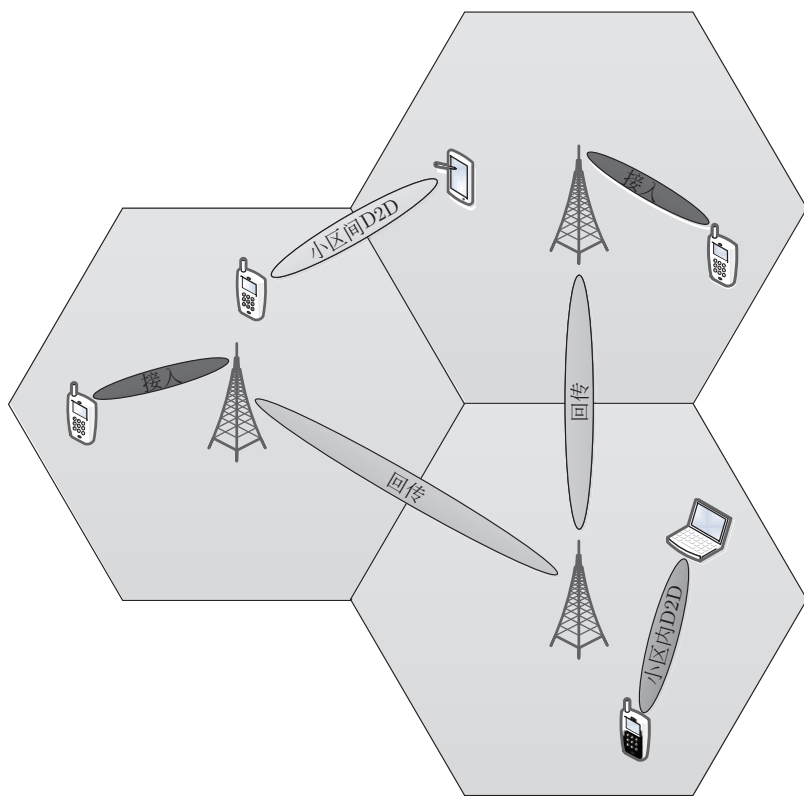


图 1.1 支持 D2D 通信的毫米波 5G 蜂窝网架构

署时,系统中有两种 D2D 模式,小区内 D2D 传输和小区间 D2D 传输 [52]。当接入链路、回传链路、小区间 D2D 链路和小区内 D2D 链路都处于毫米波频段时,高效且灵活的无线资源管理方案,包括功率控制、干扰管理、传输调度、用户接入、用户关联等,将成为充分发挥毫米波通信潜能的关键。

1.2.3 无线回传

随着小区密集地部署,在未来无线通信系统中,基于光纤的回传将基站连接到其他基站或网络具有很高的成本 [53]。相对而言,高速的无线回传更加灵活、成本更低、更容易部署。由于具有丰富的频谱资源,毫米波无线回传,如 60 GHz 频段和 E 波段 (71~76 GHz 和 81~86 GHz),可提供吉比特每秒量级的速率,已成为很有前景的无线回传解决方案。如图 1.2 所示,E 波段无线回传提供了基站间和基站与网关间的高速传输。

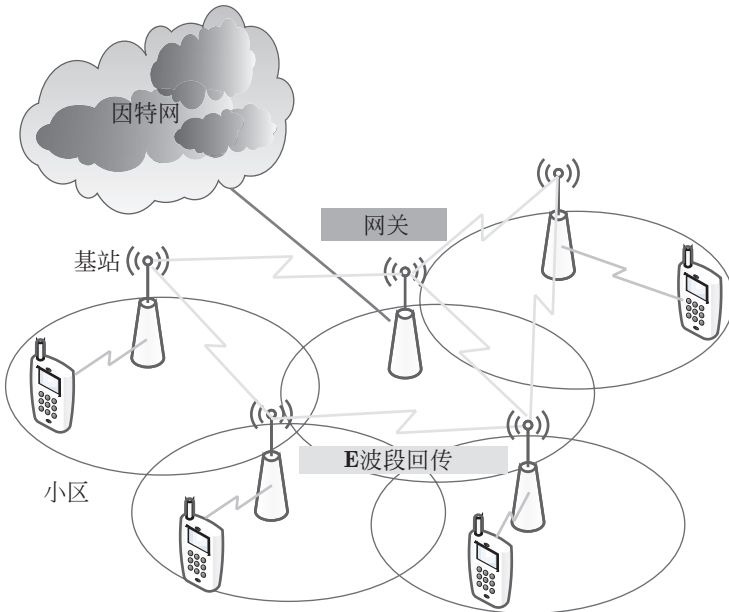


图 1.2 密集部署小区的 E 波段回传

1.3 毫米波无线网络关键问题与研究现状

1.3.1 空分复用

由于定向通信，毫米波链路间的干扰明显降低。文献 [54] 将 60 GHz 频段的室外网状网络中的高度方向性链路建模为伪线的 (pseudowired)，即不相邻链路间的干扰是可忽略的，且天线模式的细节也可在毫米波网状网的 MAC 协议设计中忽略。当链路间干扰降低时，多条链路可在同一个时隙并行地传输以最大化空分复用增益 [55]；另一方面，由于定向传输，第三方节点无法实现基于 IEEE 802.11b 标准的无线局域网 (wireless fidelity, WiFi) 中的载波侦听以避免碰撞，这被称为聋问题 [55]。因此，毫米波 MAC 协议设计需要考虑节点间的协调机制，并充分利用并行传输来提升网络容量 [14]。

然而，在室内环境下，由于受限的距离，伪线假设并不准确，不相邻链路间的干扰不能忽略 [56,57]。另一方面，为了克服受限的通信距离以及满足爆炸式增长的移动业务需求，公共和私人区域部署的接入点数量快速增长，例如，会议室需要部署很多接入点以提供无缝覆盖。在这种情况下，网络中的干扰可分为两部分，小区内的干扰和小区间的干扰 [58]。在本书中，将接入点及其管理的无线节点的集合称之为基本服务集 (basic service set, BSS)，也称为小区。如图 1.3 所示，当小区 1 和小区 2 中的两条链路同时在时隙 t 通信时，由于 AP1 将其波束对准笔记本电脑，AP1 将对笔记本电脑产生干扰。如果它

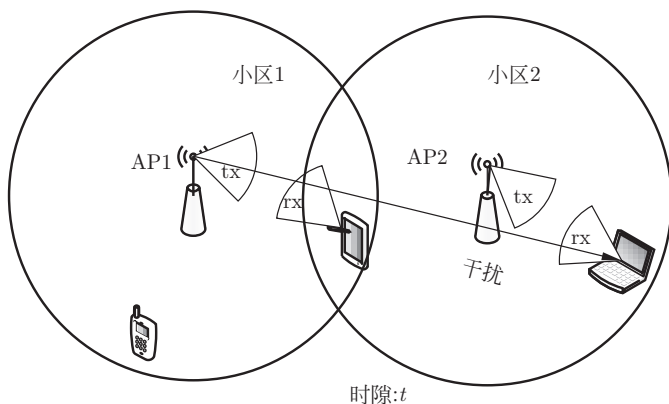


图 1.3 小区间干扰

们间的距离短的话, 笔记本电脑的服务质量将明显下降。因而, 为了避免干扰造成的网络性能恶化, 干扰管理机制(如传输协调和功率控制)成为必需。完成干扰管理之后, 并行传输(空分复用)可在小区内或小区间实现以提升网络性能^[55, 56, 59]。

为了解决上述问题, 目前已有一些毫米波无线 MAC 协议方面的相关工作。由于 ECMA-387 标准^[7] 和 IEEE 802.15.3c 标准^[8] 采用时分多址(time division multiple access, TDMA), 许多工作都基于 TDMA^[60, 61]。文献[62]引入专属区域的概念以实现并行传输, 且在全向天线和方向性天线模型中推导了并行传输优于 TDMA 的专属区域条件。基于专属区域的随机化调度方案获得了明显的空分复用增益。然而, 它在传输调度问题中仅考虑了二维空间, 且没有考虑功率控制来管理干扰。在基于 IEEE 802.15.3c 标准的两种协议中, 如果多用户干扰低于一定的阈值, 多条链路将被调度于同一时隙通信^[57, 63]。然而, 它们没有抓住方向性天线的特性, 且来自多条链路干扰的累积效应也没有考虑。文献[56]基于 IEEE 802.15.3c 无线个域网提出并行传输调度算法, 其中不干扰和干扰的链路被调度来并行地传输, 以最大化满足服务质量要求的流数。它可支持更多的用户, 且明显提升了无线个域网中的资源利用效率。进一步, 文献[64]提出多跳并行传输方案来解决链路中断问题和克服巨大路径损耗, 以提升吞吐量。它在二维的空间中分析了空分复用和时分多址增益。基于 IEEE 802.15.3c 标准, 微微网协调器(piconet coordinator, PNC)根据跳选择指标为业务流选择合适的中继跳, 且多跳并行传输方案也利用了空分复用。在基于 IEEE 802.15.3c 标准的协议中, 微微网控制器在随机接入期间处于全向模式以避免聋问题, 这可能会对处于数吉比特域且采用高度定向传输的毫米波系统来说是不合适的, 同时, 这也会导致增益不对称问题^[65]。基于 TDMA 的协议, 突发性业务所需的媒质时间具有高度不确定性, 这将引起一部分流有过多的媒质时间而其他流的媒质时间不足, 基于 TDMA 协议的即时媒质预留控制开销也可能变高。基于 IEEE 802.11ad 标准, 文献[59]提出一种空分复用策略, 将两个不同的服务周期互相重叠, 并分析了考虑理想方向性天线和实际方向性天线间差异时的性能。由于仅有两条链路被考虑用于并行传输, 该策略并没有充分地利用空分复用。

另一方面, 一些协议基于接入点或微微网控制器的集中式协调提供接入服务。文献[66]提出一种方向性的载波侦听多点接入/避免碰撞(carrier

sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA) 协议, 利用虚拟载波侦听来解决聋问题。网络分配向量 (network allocation vector, NAV) 信息由 PNC 发布。然而, 空分复用没有被充分利用来提升网络容量。文献 [55] 提出基于帧的方向性 MAC 协议 (frame based directional MAC protocol, FDMAC)。FDMAC 通过将调度开销分摊到连续的多组并行传输以实现高传输效率。FDMAC 的核心贪心染色算法, 较充分地利用了空分复用。与多跳中继方向性 MAC 协议 (multihop relay directional MAC protocol, MRDMAC)^[33] 和记忆导向的方向性 MAC 协议 (memory-guided directional MAC protocol, MDMAC)^[67] 相比, FDMAC 明显提升了网络吞吐量。同时, FDMAC 也有很好的公平性和低的复杂度。然而, FDMAC 在无线个域网中采用伪线的干扰模型, 这一假设由于范围受限并不合理。文献 [68] 提出一种方向性协作 MAC 协议来协调 IEEE 802.11ad 标准无线局域网中设备间的上行链路信道接入。其中, 从源节点到目的节点的具有高信道质量的两跳传输路径将替代低信道质量的直接路径 (从源节点到目的节点的链路)。通过两跳中继, 该协议明显地提升了系统吞吐量。然而, 由于大部分传输通过接入点, 该协议也没有考虑空分复用。文献 [69] 提出一种增量多播分组方案以最大化设备的和速率, 其中自适应的波束宽度依据多播设备的位置生成。基于 IEEE 802.11ad 标准的仿真结果证实, 与传统多播方案相比, 该方案可将整体的吞吐量提升 28%~79%。文献 [70] 采用粒子群优化方法来做 IEEE 802.11ad 中多种多媒体应用的信道时间分配, 该方法被证实即使在阻断发生时也可成功地分配资源。

对于 60 GHz 频段的室外网状网络, 文献 [67] 基于伪线假设提出 MDMAC, 该协议嵌入马尔可夫状态转移图来缓解聋问题。MDMAC 利用记忆实现近似的时分多址调度方案, 且没有充分利用空分复用。另一个用于方向性毫米波网络的分布式 MAC 协议是方向到方向 MAC 协议 (directional-to-directional MAC, DtDMAC)。其中, 发射端和接收端都运行在定向模式, 解决了增益不对称问题^[65]。DtDMAC 采用指数避退程序实现异步操作, 可通过马尔可夫状态转移图缓解聋问题。DtDMAC 是完全分布式的, 不要求同步。然而, 它没有抓住毫米波无线信道的特性, 且只给出 DtDMAC 的解析网络吞吐量。

表 1.3 按照几个关键属性比较了几种典型的 MAC 协议。从表中可看到

每种协议各有优缺点，需要设计更加高效且鲁棒的协议来充分利用空分复用以及克服遮挡问题。为了实现更好的网络性能，集中式的协议更具优势。另外，大部分的协议仅针对单个小区的情形，没有考虑密集部署时不同小区间的干扰。

表 1.3 毫米波通信 MAC 协议比较

	基于 TDMA	空分复用	集中式或分布式
方向性 CSMA/CA ^[66]	否	未指明	集中式
MRDMAC ^[33]	否	未指明	集中式
MDMAC ^[67]	否	不支持	分布式
FDMAC ^[55]	否	支持	集中式
D-CoopMAC ^[68]	否	未指明	集中式
REX ^[62]	是	支持	集中式
空间共享 ^[59]	否	支持	集中式
MHCT ^[64]	是	支持	集中式
STDMA ^[56]	是	支持	集中式
VTSA ^[57]	是	支持	集中式
空分复用 TDMA ^[60]	是	支持	集中式
DtDMAC ^[65]	否	支持	分布式
CTA-PSO ^[70]	否	未指明	集中式

1.3.2 抗遮挡

文献 [71] 估计了办公室环境中接入点与终端间的传播路径可视性，其中人体的遮挡时有发生。要完美地避免人体的阴影效应，如果不通过多接入点分集方式，则需要部署大量的接入点。然而，仅通过两个接入点间的分集切换可提供 98% 的传播路径可视性。文献 [72] 分析了典型室内环境中人体随机活动下的链路阻断概率。接入点放置在天花板上，且这个工作主要针对接入点和用户设备间的链路。结果表明，随着用户设备移动到服务区域的边缘，链路的阻断概率几乎线性增长。当支持用户设备间的通信时，用户间链路的阻断问题也应被考虑。

为了保证网络连接的鲁棒性，从物理层到网络层的不同抗遮挡策略已被提出。文献 [73] 利用墙面或其他表面的反射来绕过障碍物，文献 [74] 采用