

从 书 序

随着信息通信技术的飞速发展，第六代移动通信(6G)系统的研究与探索已在全球范围内如火如荼地展开。与第五代移动通信(5G)系统相比，6G 不仅延续了高速率、低时延和大规模连接的要求，还提出了全新的应用场景，如智能通信融合、通信感知一体化、具身智能等，进一步拓展了移动通信的服务范围，推动万物智联的实现。

为达成上述目标，6G 在基础理论研究、新型无线技术、新型网络技术、新型安全技术等方面需要进行全新的设计和创新，旨在构建全覆盖的空天地一体化网络，提供超高速率的传输能力、超低时延的通信体验，以及更高的能量效率和安全保障。近期，针对 6G 发展涌现出一系列理论和关键技术成果，包括语义信息论等基础理论研究的突破，卫星通信、智能超表面、太赫兹通信、毫米波雷达感知等关键技术的引入，标志着移动通信系统从传统的面向连接向面向智能的重大转变。

为推动 6G 系统的研究与发展，我们组织策划了这套“6G 信息通信网络丛书”。本丛书邀请通信领域的多位院士、专家组成编委会，分册由相关领域的专家撰写，内容涵盖 6G 的基础理论和核心关键技术。其中，语义信息论作为基础理论，深入探讨了语义信息度量和编码定理，为 6G 演进提供了重要的理论基础和技术路径。丛书对增强型无线空口技术、新型频谱技术、跨域融合技术、关键共性技术、新型网络架构、新型组网技术、低功耗绿色通信技术、先进网络技术，以及网络物理层安全技术等 6G 核心技术的研究成果进行了介绍。各分册均基于当前最新的研究进展，深入探讨了 6G 的发展方向，并强调了其在各行业的应用前景，具有鲜明的特色。

6G 的研究与发展是我国“十四五”规划的重要内容，是实现“数字中国”战略的关键支撑。本丛书的出版，正是为了推动 6G 研究的深入发展，汇聚全球智慧，促进技术与产业的深度融合，从而助力我国在 6G 领域的技术创新与产业发展，巩固我国在全球通信领域的领先地位。



主 编

中国工程院院士

前言

1864 年，英国物理学家、数学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell)在安培环路定律、法拉第电磁感应定律和高斯定理的基础上，通过引入位移电流的概念，建立了著名的麦克斯韦方程组，并根据其在自由空间中的解，首次从理论上预测了电磁波的存在。1887 年，德国物理学家海因里希·赫兹(Heinrich Hertz)通过实验成功验证了电磁波的存在，为电磁理论的实践应用奠定了基础。1895 年，意大利发明家古列尔莫·马可尼(Guglielmo Marconi)实现了人类历史上的首次无线电通信，开启了无线通信的新纪元。

20 世纪初至 20 世纪 40 年代，电报、广播和雷达技术迅速发展，其中雷达技术在第二次世界大战期间得到了广泛应用。20 世纪 50 年代至 70 年代是移动通信的起步阶段，首批商用无线电话系统开始出现，如美国的高级移动电话系统(advanced mobile phone system, AMPS)是第一代模拟蜂窝移动通信系统的典型代表，该系统于 1979 年首次投入商用，标志着移动通信进入实用化阶段。

20 世纪 80 年代至今，数字移动通信逐渐成为主流，移动通信技术经历了从 2G 到 3G、4G 的迭代升级，目前已进入 5G 时代。与此同时，6G 技术的研究也在全球范围内如火如荼地展开。在此期间，短距离无线通信技术，如无线局域网(WLAN/Wi-Fi)和蓝牙等，也得到了快速发展和广泛应用，进一步丰富了无线通信的应用场景和技术生态。

从麦克斯韦的理论预言到赫兹的实验验证，再到马可尼的无线电通信实践，以及现代移动通信技术的飞速发展，无线通信技术的演进不仅深刻改变了人类的生活方式，也为全球信息化进程提供了强大的技术支撑。

通信技术的演进史本质上是多维资源(频域、时域、空域、码域)持续开发与整合的过程。在技术代际变迁中，4G 时代成为重要分水岭：此前无线通信主要采用单输入单输出(SISO)架构，而 4G 时代则全面转向多输入多输出(MIMO)技术范式。

在 SISO 系统中，信道容量遵循香农定理，其提升路径主要受限于两大物理瓶颈：一是频谱资源制约下的带宽扩展；二是器件工艺限制下的信噪比提升。MIMO 架构突破性地引入了第三维度增益——通过多数据流空间复用，在同等带宽条件下实现系统容量数量级跃升。传统 MIMO 系统的实现基于独立射频通道与天线单元，其设计原则强调天线间距尽可能大以降低信号相关性。通过空间信

道矩阵实现信号交叉，接收端通过分集合并提升信噪比，或通过空间复用倍增数据流，前者优化传输可靠性，后者大幅提升系统容量。

5G 引入了大规模 MIMO(massive MIMO)系统架构。这时，各个射频通道和天线单元之间不再是独立的，而是作为一个阵列，天线单元之间的间距通常约为二分之一波长，通过在空间产生多个高增益窄波束实现多高速数据流的传输，以大幅提高系统容量。

面向 6G 时代 100Gbit/s+ 的超高速率需求，技术演进呈现双轨突破：在频谱维度向毫米波(mmWave)甚至太赫兹(THz)频段延伸，突破传统 sub-6GHz 频谱的资源瓶颈；在空域维度采用大规模有源一体化阵列，通过同时生成几十乃至数百个波束实现超大规模空间复用。因此，毫米波与太赫兹大规模阵列技术将成为未来无线通信系统的核心使能技术。

实现毫米波与太赫兹大规模波束成形阵列的方法有很多，大致可分为两类：无源波束成形阵列和有源波束成形阵列。代表性的无源波束成形网络有巴特勒(Butler)矩阵、诺兰(Nolen)矩阵、布拉斯(Blass)矩阵、多模矩阵、罗特曼(Rotman)透镜、 R - KR 透镜、龙伯(Luneburg)透镜等；代表性的有源波束成形阵列有相控阵、全数字波束成形阵列、混合波束成形阵列、非对称全数字波束成形阵列、 n bit 反射阵/透射阵、液晶相控阵等，而天线单元、波束成形网络与多通道收发芯片的一体化集成已成为这些阵列的演进趋势。高度集成化设计不仅显著提升了系统性能，还大幅降低了硬件复杂度和制造成本，为毫米波与太赫兹系统的商用化铺平了道路。

《毫米波与太赫兹大规模阵列技术》分为上、下两册，上册介绍无源波束成形阵列技术，下册介绍有源波束成形阵列技术。内容主要来源于作者所在毫米波全国重点实验室 20 多年来在这一领域的系列研究成果。这期间得到国家自然科学基金委创新群体科学基金、国家重点基础研究发展计划(973 项目)、国家重点研发计划项目和国家重大科技专项课题等的支持。

在本书撰写过程中，蒋之浩教授、童宣锋博士、江梅博士、胡博博士、Mustafa K. Taher Al-Nuaimi 博士、吴亚飞博士，在读博士生陈凯、李威及已毕业的硕士生王梓希、孔炜炆等为本书的撰写提供了素材，在读博士生陈凯、李威、王兆亿、童心玉、蔡润贤、马赛等参与了本书的校对等工作，在此向他们表示诚挚的谢意。

期望本书能对毫米波与太赫兹技术领域的学者、工程师和学生有所裨益。

作 者

2025 年 2 月于南京无线谷

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 移动通信技术的演进	1
1.2 无线局域网通信技术的演进	5
1.3 雷达技术的演进	6
1.4 射电天文技术的演进	9
1.5 本章小结	11
参考文献	12
第 2 章 天线与阵列基础	17
2.1 单元天线	18
2.1.1 Strutton-Chu 公式	18
2.1.2 对称振子天线的辐射场	22
2.1.3 矩形开口波导天线的辐射场	23
2.2 天线参数	26
2.2.1 方向图	26
2.2.2 方向性系数、增益与效率	28
2.2.3 天线带宽	30
2.2.4 相位中心	30
2.3 阵列天线	30
2.3.1 直线阵	31
2.3.2 非等幅馈电直线阵	34
2.4 面阵	42
2.4.1 矩形平面阵	42
2.4.2 圆形平面阵	44
2.4.3 圆柱形面阵	47
2.4.4 球面阵	48
2.5 本章小结	48
参考文献	48

第 3 章 Butler 矩阵及多波束阵列天线	52
3.1 90°电桥	55
3.2 一维 Butler 矩阵及多波束阵列天线	56
3.2.1 半模 Butler 矩阵	58
3.2.2 低副瓣设计的 Butler 矩阵多波束天线以及应用实例	64
3.2.3 SICL 小型化 Butler 矩阵及天线	86
3.3 二维 Butler 矩阵及多波束阵列	95
3.3.1 小型化平面宽带二维 Butler 矩阵架构	95
3.3.2 小型化平面宽带二维 Butler 矩阵设计	95
3.3.3 小型化平面宽带二维多波束天线实物及实验验证	104
3.4 本章小结	107
参考文献	108
第 4 章 Blass 矩阵以及 Nolen 矩阵	111
4.1 Blass 矩阵	111
4.1.1 Blass 矩阵的原理以及综合设计	112
4.1.2 双层交叉 SIW 紧凑型耦合器的设计	115
4.1.3 SIW Blass 矩阵的结构以及仿真结果	119
4.1.4 SIW Blass 矩阵的测试结果与分析	120
4.2 基于单波束 Blass 矩阵的高增益跟踪天线	122
4.2.1 双层旋转结构设计原理	123
4.2.2 耦合器以及转接结构设计	124
4.2.3 移相器设计	129
4.2.4 连续波束扫描的理论基础	131
4.2.5 天线结构	132
4.2.6 天线阵面设计	133
4.2.7 波束扫描阵列整体结构与验证	135
4.3 Nolen 矩阵	141
4.4 本章小结	147
参考文献	147
第 5 章 基片集成平面准光多波束阵列天线	150
5.1 基片集成平面罗特曼透镜	150
5.1.1 基片集成平面罗特曼透镜的基本结构及工作原理	151
5.1.2 基片集成平面罗特曼透镜的设计流程	154
5.1.3 毫米波基片集成罗特曼透镜设计实例	154
5.2 基片集成 R-KR 透镜	162

5.2.1 R - KR 透镜基本原理	162
5.2.2 基片集成波导改进型 R - KR 透镜	164
5.3 基片集成抛物反射面	172
5.3.1 工作原理	172
5.3.2 基于基片集成抛物反射面的多波束天线设计案例	172
5.4 本章小结	176
参考文献	176
第 6 章 多模波束成形网络及多波束阵列天线	179
6.1 多模波束成形网络的基本原理	179
6.2 基片集成波导多模波束成形网络及多波束阵列天线	181
6.2.1 基片集成波导平面多模波束成形网络	181
6.2.2 基片集成波导多模波束成形网络及多波束天线实验结果	183
6.3 基片集成波导折叠多模波束成形网络及多波束阵列天线	185
6.3.1 基片集成波导折叠多模波束成形网络的结构与分析	186
6.3.2 基片集成波导折叠多模波束成形网络性能的实验验证	190
6.3.3 采用基片集成波导折叠多模波束成形网络的小型圆极化多波束天线	192
6.4 本章小结	199
参考文献	199
第 7 章 多馈源透镜多波束阵列	201
7.1 基于相位补偿的平面透镜工作原理及波束扫描特性分析	202
7.1.1 工作原理	202
7.1.2 扫描特性分析	203
7.2 平面透镜多波束阵列天线	207
7.2.1 毫米波七波束平面透镜天线	207
7.2.2 多馈源圆极化平面透镜多波束阵列天线	215
7.2.3 多馈源双圆极化平面透镜多波束阵列天线	221
7.2.4 四色法平面透镜多波束阵列天线	230
7.3 多馈源龙伯透镜多波束阵列天线	241
7.3.1 龙伯透镜	241
7.3.2 结合有源相控阵列以及多馈源龙伯透镜的混合二维多波束阵列天线	244
7.4 多馈源高增益平面透镜天线	251
7.4.1 多馈源高增益平面透镜天线结构	251
7.4.2 实验测试	252
7.5 本章小结	257
参考文献	257

第 8 章 其他基片集成无源多波束阵列天线	260
8.1 基片集成单脉冲天线	260
8.1.1 单脉冲天线	260
8.1.2 正反渐变槽单脉冲天线阵	262
8.1.3 94GHz 基片集成波导单脉冲天线阵	266
8.1.4 基片集成同轴线单脉冲天线阵	270
8.2 八端口结基片集成多波束天线	283
8.3 多极化多波束阵列天线	285
8.4 本章小结	290
参考文献	291

彩图

第 1 章 绪 论

1864 年，麦克斯韦建立了麦克斯韦方程组并预言了电磁波^[1]。1887 年，赫兹利用实验验证了电磁波的存在^[2]。之后的一百多年，电磁波在雷达、通信、导航、射电天文等领域得到了广泛的应用。本章将简述移动通信、Wi-Fi、雷达和射电天文几个领域的演进过程，从中可以看到这些领域演进过程中的一些共性特征，其中需要特别指出的是：这些领域都在从单天线/单通道系统，向多天线/多通道 MIMO 系统，甚至大规模 MIMO(massive MIMO)、超大规模 MIMO(X-large scale MIMO)多波束阵列系统演进。在频率维度，也从 MHz、GHz 频段逐渐向毫米波甚至太赫兹频段拓展。《毫米波与太赫兹大规模阵列技术》分为上、下册，分别阐述毫米波与太赫兹无源和有源大规模波束成形阵列的基本原理和关键技术，以及一些代表性的系统应用。

1.1 移动通信技术的演进

在无线通信领域，1895 年，马可尼利用火花放电器、感应线圈和电键制成了一台无线电发射机，又用金属检波器和天线制成了接收器，完成了 30m 距离的无线通信实验，首次证明了使用电磁波无线传输信号的能力^[3]。20 世纪 20 年代至 40 年代，研究者在短波频段上开发了专用移动通信系统，如美国底特律市警察使用的车载无线电系统。20 世纪 40 年代中期至 60 年代初期，公用移动通信业务开始兴起，世界上第一个公用汽车电话网在美国圣路易斯市建立，随后多国相继研制了公用移动电话系统。20 世纪 60 年代中期至 70 年代中期，移动通信系统不断改进，实现了无线频道自动选择和自动接续到公用电话网。20 世纪 70 年代中期至 80 年代中期，蜂窝移动通信网成为实用系统，并在世界各地迅速发展，大大提高了系统容量。从 20 世纪 80 年代初开始，移动通信几乎每十年就会出现新一代^[4]。第一代移动通信(first generation, 1G)是基于频分多址(frequency division multiple access, FDMA)接入技术的模拟通信，主要支持语音通信^[5]。第二代移动通信(second generation, 2G)从模拟移动通信演进为数字移动通信，采用了时分多址(time division multiple access, TDMA)和码分多址(code division multiple access, CDMA)接入技术，除了支持语音通信之外，还支持用户之间的短信业务^[6,7]。第三代移动通信(third generation, 3G)采用先进的 CDMA 技术，开始支持多媒体数据

业务^[8]。第四代移动通信(fourth generation, 4G)引入了正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)和多输入多输出(MIMO)技术,从而获得了比 3G 高得多的数十 Mbit/s 的传输速率^[9,10]。4G 时代的革命性标志是智能手机在全球范围内的迅速广泛使用,它改变了人们相互联系的方式,甚至改变了人类的生活方式。第五代移动通信(fifth generation, 5G)采用的核心技术中最具代表性的就是引入了大规模 MIMO 和毫米波技术^[11-21]。5G 在移动通信基础设施中首次利用毫米波频谱,以提供更高的数据传输速率和极低的时延。目前,第六代移动通信(sixth generation, 6G)正处于核心技术研发和标准研究阶段。众所周知,地球表面约 71%是海洋,约 29%是陆地。1G~5G 基本上是面向陆地上的移动通信,而 6G 将实现中低轨卫星网与地面移动通信网络的融合,从而将在移动通信的历史上首次实现对整个地球表面到近地空间的全覆盖^[22-27]。

众所周知,描述一个通信系统容量的经典公式就是如下的香农公式:

$$C = B \cdot \log_2(1 + \rho) \quad (1-1)$$

其中, C 是系统的极限信息传输速率,单位为 bit/s; B 是信道带宽; ρ 为信号噪声功率比(信噪比)。香农公式描述了有限带宽、有随机热噪声信道的最大传输速率与信道带宽、信噪比之间的关系。香农公式表明,信道的带宽或信噪比越大,信息的极限传输速率就越高。然而,香农公式只是给出了理论上的极限传输速率,实际中要达到这个速率是非常困难的,因为在实际通信中总会存在各种损耗和干扰。

我们知道,1G~3G 的移动通信系统是单输入单输出(single input and single out, SISO)系统,上述香农公式实际上给出了 SISO 系统的容量极限。4G 移动通信引入了如图 1-1(a)所示的 MIMO 技术,假定左侧为基站,有 N 个射频通道、 N 个天线,右侧终端有 M 个射频通道、 M 个天线,则构成一个 $N \times M$ 的 MIMO 通信系统。图 1-1 中, Ant n 表示第 n 个天线, DPX/SW 分别表示频分双工(frequency-division duplex, FDD)和时分双工(time-division duplex, TDD)模式下的双工器和开关, LNA 和 PA 分别表示低噪声放大器和功率放大器, ADC 和 DAC 分别表示模数转换器和数模转换器, Lo 表示本振。

考虑下行情况,这时基站侧发射天线数为 N_t , 终端侧接收天线数为 M_r , 系统容量公式如下^[28]:

$$C = B \cdot \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^\dagger \right) \right] \quad (1-2)$$

其中, $\mathbf{I}_{M_r \times M_r}$ 为单位矩阵; $\mathbf{H}_{M_r \times N_t}$ 为信道矩阵; $\det(\cdot)$ 表示矩阵的行列式运算; $\dagger$ 表示矩阵共轭转置; ρ 是每个接收天线处的平均信噪比。

5G 移动通信又进一步拓展至大规模 MIMO, 6G 移动通信甚至在讨论超大规模 MIMO 和全数字大规模 MIMO(all-digital massive MIMO)阵列技术^[29,30], 如

图 1-1(b)所示。这时, 参照多波束卫星通信情况^[31], 我们可用下式描述 N 波束系统的容量:

$$C = B \cdot \sum_{n=1}^N \log_2(1 + \rho_n) \quad (1-3)$$

其中, ρ_n 为第 n 个波束的信噪比。

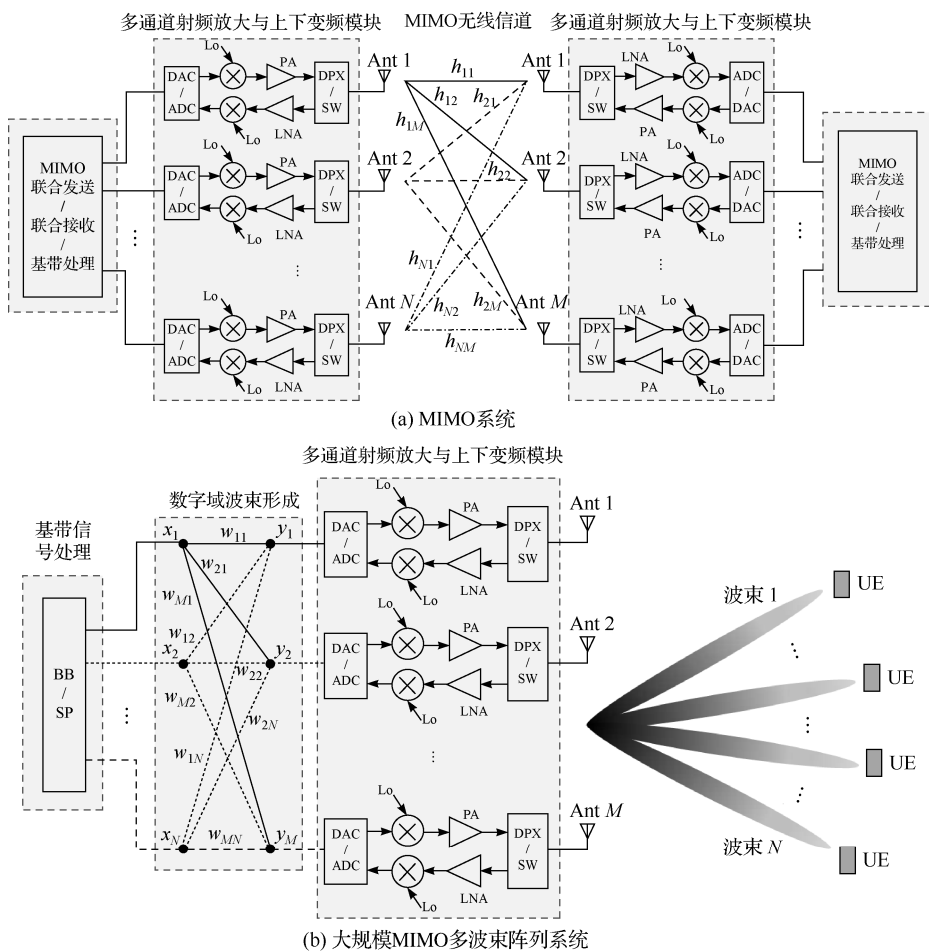


图 1-1 MIMO 系统与大规模 MIMO 多波束阵列系统

x 、 y 分别表示波束成形矩阵的输入、输出变量, w_{ij} 是加权系数,
BB/SP 表示基带信号处理, UE(user equipment)为用户设备

实际上, 对于多波束阵列系统, 我们可以理解为 N 个 SISO 系统共享一个阵列前端, 但互相之间的干扰会恶化每个波束链路的信噪比 ρ_n 。

近些年, 语义通信成为 6G 研究的热点之一^[32-34]。文献[34]中建议将信道容量

公式修改为

$$C = B \cdot \sum_{n=1}^N \log_2 \left[S^4 (1 + \rho_n) \right] \quad (1-4)$$

其中, S 表示平均同义时间长度。

文献[35]中给出了一个三维(3D)视距信道容量公式, 该公式内含了矢量电磁物理特性, 并适用于近场和远场场景:

$$C = B \cdot N \cdot \log_2 \left(1 + \frac{\beta P_t}{N \mu} \right) \quad (1-5)$$

其假定 N 个本征值近似相等, 即 $\beta_1 \approx \beta_2 \approx \dots \approx \beta_N \approx \beta$, 以及发射机为每个子信道分配相同的功率 P_t / N 。 N 个本征值也对应 N 个独立的子信道, μ 是第 n 个子信道的噪声功率。

对于广泛使用的 2^K QAM 调制, 系统容量与信道带宽 B 、调制阶数 K 以及波束或数据流的数量 N 成比例, 即

$$C \propto B \cdot K \cdot N \quad (1-6)$$

由式(1-6)可知, 增加无线通信系统容量或吞吐率的主要途径有三个: 一是增加带宽 B ; 二是提高频谱利用率或调制阶数 K ; 三是增加数据流个数 N 。频谱是受各国政府管控的一种资源, 所以增加带宽会受到政策限制。调制阶数越高, 对系统的信噪比要求越高, 而系统信噪比又受到半导体器件性能的限制。利用 MIMO 技术增加数据流个数是提高系统吞吐率的非常有效的手段, 这也是 5G 采用大规模 MIMO、6G 可能采用超大规模 MIMO 技术的原因。另外, 若要获得 100Gbit/s 的传输速率, 采用 1024QAM 调制, 对于 SISO 系统就需要至少 10GHz 的带宽, 这在微波频段几乎是不可能的, 所以从 5G 开始, 无线通信的频率逐渐向毫米波甚至太赫兹频段拓展^[29,30]。

低频段 5G(sub-6GHz)已实现大规模商用, 有些基站设备可支持 64T64R, 也就是可同时支持 64 个数据流, 从而大幅度提高了系统的吞吐率和传输速率。对于 5G 毫米波, 为了克服路径衰减, 同时平衡复杂度与成本, 采用了混合多波束架构的大规模 MIMO 技术, 每个相控子阵支持 1 个(单极化)或 2 个(双极化)波束或数据流, 一般配置 4 个相控子阵, 支持 4 个(单极化)或 8 个(双极化)数据流。由于 5G 毫米波的信道带宽比低频段 5G 的信道带宽宽很多, 因此在数据流较少的情况下也可支持高的系统吞吐率和传输速率。

可以看到, 1G~3G 移动通信是 SISO 系统, 而 4G 移动通信则引入了 MIMO 技术, 5G 发展至大规模 MIMO, 6G 将进一步拓展到超大规模 MIMO。对应的射频与天线技术也从单天线、单通道, 向多天线、多通道, 进而向大规模甚至超大规模阵列演进。

1.2 无线局域网通信技术的演进

无线通信的另一个重要的分支是 Wi-Fi，是基于 IEEE 802.11 标准的无线局域网(wireless local area network, WLAN)通信技术。IEEE 802.11 无线局域网标准有许多版本，包括 11b、11a、11g、11n、11ac 和 11ax 等，工作频段以 2.4GHz 和 5.8GHz 频段为主，都共享一个类似的媒体接入控制(media access control, MAC)层，以满足互操作性^[36]。不同代 Wi-Fi 与 IEEE 802.11 标准的对应关系如表 1-1 所示。

表 1-1 Wi-Fi 版本与对应的 IEEE 802.11 标准

Wi-Fi 版本	IEEE 802.11 标准	颁布年份	工作频段 /GHz	最大工作带宽	最高速率	调制阶数	最大流数
Wi-Fi 8	制定中	制定中	2.4/5/6 /毫米波	2.16GHz	~100Gbit/s	4096	—
Wi-Fi 7	802.11be	2022	2.4/5.8/6	320MHz	30Gbit/s	4096	16
Wi-Fi 6	802.11ax	2019	5.8	160MHz	9.6Gbit/s	1024	8
Wi-Fi 5	802.11ac	2014	2.4/5.8	160MHz	6.9Gbit/s	256	4
Wi-Fi 4	802.11n	2009	2.4/5.8	40MHz	600Mbit/s	64	4
Wi-Fi 3	802.11g	2003	2.4	20MHz	54Mbit/s	—	—
Wi-Fi 2	802.11a	1999	5.8	20MHz	54Mbit/s	—	—
Wi-Fi 1	802.11b	1999	2.4	20MHz	11Mbit/s	—	—
Wi-Fi 0	802.11	1997	2.4	—	2Mbit/s	—	—

从表 1-1 可以看出，Wi-Fi 的演进与移动通信的演进很类似，提高系统吞吐率或传输速率的主要方法也是增加带宽、增加数据流个数和提高调制阶数或频谱利用率。对应的射频与天线技术，也是从单天线、单通道向多天线、多通道演进。

目前，Wi-Fi 7 已进入商用，Wi-Fi 8 标准正在紧锣密鼓的制定之中。针对短距高速接入，IEEE 已陆续制定了毫米波无线局域网标准。例如，IEEE 802.11ad 工作组根据无线千兆联盟(WiGig)的意见制定了 802.11ad 标准。802.11ad 标准将 60GHz 频段划分为四个 2.16GHz 的信道，并支持高达 8.085 Gbit/s 的数据传输速率^[37]。此外，近十几年制定的毫米波高速通信标准还有 IEEE 802.15.3c 无线个人局域网^[38](wireless personal area network, WPAN)、无线高清(wireless HD, WiHD)^[39]、欧洲计算机制造商协会(european computer manufacturers association, ECMA)^[40]、IEEE 802.11ad 无线局域网(WLAN)^[41]和中国牵头完成的毫米波超高速

接入标准 IEEE 802.11aj^[42-45]等。

目前,在 Wi-Fi 8 标准的制定过程中,高低频协同通信逐渐成为共识。未来的 Wi-Fi 8 极有可能协同 2.4GHz、5.8GHz、6GHz 和 42~71GHz 多频段实现超过 100Gbit/s 的超高通信速率。

在 IEEE 802.11ad 中,为了克服 60GHz 频段的高路径损耗,引入了相控阵波束成形技术。可以看到,Wi-Fi 通信系统的演进,也是从 SISO 到 MIMO,再到大规模阵列的演进过程。

1.3 雷达技术的演进

雷达(radio detection and ranging, Radar)是最重要的无线电应用领域之一。在 20 世纪初,德国科学家克里斯蒂安·赫斯迈尔(Christian Huelsmeyer)利用电波探测远处的金属物体,用来防止轮船之间的碰撞,但没有考虑测距。之后,霍尔曼(Hollmann)等完善了该系统,使该系统可以探测到 8km 远的轮船和 30km 远、500m 高空飞行的飞机。后来,上述系统分别形成了舰载(Seetakt)和地基(Freya)两个雷达系统。该阶段被视为雷达的雏形阶段^[46-50]。

20 世纪 30 年代,随着远程军用轰炸机的出现,雷达的研发工作开始加速。1935 年,苏格兰物理学家罗伯特·沃森·瓦特(Robert Watson-Watt)牵头成功研制出第一台实用雷达系统,这一发明在第二次世界大战中发挥了重要作用。在第二次世界大战期间,雷达得到了迅速发展并广泛应用于实战。除了军用领域,雷达在民用领域也得到了广泛应用。随着数字电路技术的进步,雷达朝着更高频率、更高精度、更高灵活性和小型化的方向不断演进。如今,雷达技术已经发展了相控阵、合成孔径和脉冲多普勒等各种先进体制^[46-50]。

瓦特研制的最早的雷达是单天线、单通道(单通道发射机/单通道接收机)雷达,在高塔上架设线天线,天线增益低,无扫描功能。为了提高雷达的探测距离与精度,一方面可以提高发射机功率,另一方面可以提高天线的增益。因此,高增益的抛物面天线获得广泛应用。针形波束高增益天线带来的缺点是定向性强,只能探测一个小角度的空间区域。为了增加空间探测范围,人们通过机械伺服系统实现空域大范围扫描。虽然通过提高天线增益和机械扫描解决了探测距离和探测范围的矛盾,但机械扫描速度低的问题使传统雷达逐渐不能适应对高速移动物体和多目标的快速、精确探测需求。于是,电扫描雷达应运而生^[46-51]。

第二次世界大战时期,德国在“爱神”雷达的基础上研制升级成最初的无源相控阵雷达,采用一部发射机,在天线单元前引入移相器,阵列由 2×6 个偶极子组成,在垂直面实现了波束可控。直到 20 世纪 50 年代中期,美国休斯公司才研制出两部实用型舰载相控阵雷达,并装备于“企业”号航空母舰,这标志着相控

阵雷达开始进入实际应用阶段^[48]。20 世纪 50 年代,各国为了实现对洲际弹道导弹的预警,对相控阵雷达的需求大增。20 世纪 60 年代,美国研制成功了世界上第一部固态相控阵雷达,与传统的机械扫描雷达相比,具有多目标跟踪能力强、扫描速度快、可靠性高、抗干扰能力强等优点。同一时期,前苏联也在相控阵雷达技术上投入了大量人力和物力,建成了被西方称为“狗窝”和“猫窝”的相控阵雷达。到了 20 世纪 70 年代,英、法、日、德、瑞典等更多的国家加入了相控阵雷达的研发行列。20 世纪 80~90 年代,随着电子计算机、超大规模集成电路、固态功率器件、砷化镓等半导体器件以及各个波段移相等技术的日趋成熟,相控阵雷达的性能不断提升,成本逐渐降低。这一时期出现了与防空导弹相配套的多功能相控阵雷达,相控阵技术大量用于战术雷达,成为防空系统探测、跟踪和火力控制的主要传感器。21 世纪以来,相控阵雷达进入快速发展阶段,相控阵雷达不断向新型作战平台、新型探测体制扩展,向新工作频段延伸,并借助新型材料和先进加工工艺提高性能。例如,氮化镓等新型半导体器件在相控阵雷达中的应用,提高了雷达的功率和效率。数字阵列雷达等新型相控阵雷达技术不断发展,其在信号处理、抗干扰能力等方面具有更优异的性能。同时,相控阵雷达在民用领域的应用也不断拓展,如气象探测、航空管制等^[46-53]。

值得一提的是,调频连续波(frequency modulated continuous wave, FMCW)雷达^[54]和 MIMO 雷达^[55-58]是雷达技术中的两个重要分支,在军事和民用领域都得到了广泛研究和应用。

在雷达技术发展的早期,研究人员就开始探索连续波雷达的可能性。这一时期的理论研究为 FMCW 雷达的出现奠定了基础,但由于当时技术条件的限制,相关技术还无法得到实际应用。例如,在 20 世纪 40 年代,就有科学家提出了连续波雷达的概念,但缺乏合适的射频组件等关键技术,使这种雷达无法真正实现。20 世纪中叶至 20 世纪 70 年代,随着电子技术的不断进步, FMCW 雷达的实现成为可能。在这一阶段, FMCW 雷达的基本原理和技术框架逐渐形成,研究人员开始对其性能进行初步的研究和测试。不过,这一时期的 FMCW 雷达技术还不够成熟,其应用范围也比较有限,主要集中在一些对距离分辨率要求较高的特殊领域。20 世纪 80 年代以后, FMCW 雷达技术得到了快速发展。一方面,相关的电子技术、信号处理技术等不断进步,使 FMCW 雷达的距离分辨率、测速精度、抗干扰能力等性能不断提升;另一方面, FMCW 雷达的成本逐渐降低,这使它在更多的领域得到了应用。在民用领域, FMCW 雷达开始应用于汽车的自适应巡航控制、防撞系统等;在军事领域, FMCW 雷达也被用于各种武器装备的制导、目标探测等。进入 21 世纪以来, FMCW 雷达技术已经非常成熟,其应用范围也不断扩大。在汽车领域,随着自动驾驶技术的发展, FMCW 雷达成为自动驾驶汽车不可或缺的传感器之一,能够为汽车提供周围环境的精确信息,帮助汽车实现自动

驾驶。在工业领域，FMCW 雷达可用于工业自动化、机器人导航、物料检测等方面；在安防领域，FMCW 雷达可用于周界防护、入侵检测等；在航空航天领域，FMCW 雷达可用于飞机的导航、着陆辅助等。

20 世纪 80 年代末，巴黎萨克雷大学的国立航空研究办公室发明了脉冲与合成天线雷达(Radar à Impulsion et Antenne, RIA)，这可以说是 MIMO 雷达体系架构的早期形式^[55]。当时利用两个同心圆阵列制作了一个演示系统来演示这种新架构的能力。这一阶段是 MIMO 雷达的萌芽期，为后续的研究奠定了基础。进入 21 世纪初，MIMO 雷达的理论研究开始快速发展。研究人员深入探讨了 MIMO 雷达的信号模型、天线特性、系统建模和波形选择等基础理论问题。对 MIMO 雷达的工作原理、性能特点以及与传统雷达的差异等方面有了更深入的理解，为其进一步发展提供了理论支持。2005~2010 年，MIMO 雷达技术不断取得突破。同时，各国的科研机构和相关企业纷纷开展 MIMO 雷达的实验验证工作，通过实际的实验系统验证了 MIMO 雷达在目标检测、角度估计、杂波抑制等方面的优势，进一步推动了 MIMO 雷达技术的发展。近十多年来，随着 MIMO 雷达技术的不断成熟，其应用领域也在不断拓展。在军事领域，MIMO 雷达被应用于预警探测、目标跟踪、战场监视等方面，能够提高对复杂目标和隐身目标的探测能力。在民用领域，MIMO 雷达在汽车自动驾驶、交通监控、气象探测等方面也有着广泛的应用前景。例如，汽车上的毫米波 MIMO 雷达可以实现对车辆周围环境的高精度感知，为自动驾驶提供关键的环境信息。总之，MIMO 雷达作为一种新的雷达体制，经过几十年的发展，已经取得了显著的成果，并且在军事和民用领域都有着广阔的应用前景。未来，随着技术的不断进步，MIMO 雷达的性能还将不断提升，应用领域也将进一步扩大。

在通信领域，全数字多波束阵列或数字波束成形技术正在成为 6G 研究的热点。实际上，数字波束成形技术始于雷达领域。20 世纪中叶至 20 世纪后期，雷达技术不断发展，相控阵雷达的概念逐渐形成。相控阵雷达通过控制天线阵列中各个天线单元的相位和幅度，实现波束扫描，为数字波束成形技术的发展奠定了基础。这一时期，数字信号处理技术也开始兴起，为后续数字波束成形雷达对接收信号的数字化处理提供了技术支撑，但此时数字技术在雷达中的应用还处于初级阶段。20 世纪后期至 21 世纪初，随着集成电路技术的快速发展，高速模数转换器(ADC)、数字信号处理器(DSP)等关键器件的性能不断提升，对雷达回波信号的高速数字化采集和处理成为可能，为全数字波束成形雷达的发展提供了硬件基础^[59-62]。一些研究机构和企业开始尝试将数字技术应用于波束成形，探索数字波束成形的算法和技术，如自适应波束成形算法等，以提高雷达的性能和抗干扰能力。在这一时期出现了一些基于数字波束成形技术的实验性雷达系统，验证了数字波束成形的可行性和优势。进入 21 世纪，全数字波束成形雷达技术得到了快速

发展和广泛应用。在军事领域,全数字波束成形雷达被应用于各种先进的武器装备中,如战斗机的机载雷达、舰艇的舰载雷达、防空反导雷达等,能够实现对目标的高精度探测、跟踪和识别,提高了武器装备的作战效能。在民用领域,全数字波束成形雷达也开始应用于气象监测、空中交通管制、汽车自动驾驶等领域。例如,汽车自动驾驶中使用的毫米波雷达就采用了数字波束成形技术,能够实时感知车辆周围的环境,为自动驾驶提供准确的信息。同时,随着软件定义雷达技术的发展,全数字波束成形雷达的灵活性和可重构性进一步提高,能够根据不同的任务需求快速调整雷达的工作模式和参数,适应复杂多变的应用场景。

综上所述,我们可以看到,雷达从最初的低增益固定天线和单通道发射/接收系统,演进到高增益天线机械扫描雷达系统,又进一步演进到相控阵电扫雷达,从而实现快速、高精度探测与跟踪。面向通感一体化、可重构、多目标快速跟踪等需求,可以预测基于全数字多波束大规模阵列的数字波束成形雷达技术将得到高度重视和越来越多的应用。

1.4 射电天文技术的演进

射电天文技术是通过探测天体(如恒星、星系、黑洞等)辐射的无线电波来研究宇宙的技术手段,是天文学的重要分支,相关技术已历经近百年的发展及演进^[63-70]。1932年,美国贝尔电话公司的工程师卡尔·央斯基在研究越洋无线电话的静电干扰时,偶然发现了来源不明且重复的信号。经过分析,他确定该信号并非来自太阳,而是来自一个与恒星同步转动的天体。1933年,央斯基公布了这一发现,这标志着射电天文学的诞生。1937年,格罗特·雷伯修建了一架9m直径的抛物面碟形无线电望远镜,重做了央斯基早期的工作并进行了第一次无线电频率巡天。1940年,雷伯在美国用自制的直径9.45m、频率162MHz的抛物面型射电望远镜证实了央斯基的发现,并测到了太阳以及其他一些天体发出的无线电波。20世纪50年代,英国剑桥大学的科学家使用干涉仪描绘天空的无线电图,制作了有名的2C和3C无线电源巡天星表。20世纪60年代至70年代,射电望远镜观测到了类星体、脉冲星、星际分子和宇宙微波背景辐射等,这些发现极大地促进了天文学的发展,也使射电天文学成为天文学的重要分支。这一时期,射电望远镜的技术不断进步,大型设备不断涌现。例如,德国埃费尔斯贝格的射电望远镜,直径达100m,可以工作到短厘米波段。20世纪80年代之后,新一代射电望远镜投入使用,如欧洲的甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)网、美国的甚长基线阵列(very long baseline array, VLBA)、日本的空间VLBI等。这些望远镜阵列无论是灵敏度、分辨率还是观测波段都更优秀。中国在射电天文领域取得了显著成就。2016年,500m口径球面射电望远镜(five-hundred-meter aperture

spherical radio telescope, FAST)在贵州省平塘县落成启用,成为目前世界上最大的单口径射电望远镜。

从频率上看,早期射电天文望远镜的频率大多为几十 MHz 到若干 GHz。之后,频率逐渐向毫米波甚至太赫兹频段拓展^[71-74]。实际上,毫米波与太赫兹频段宇宙信号蕴含丰富的外太空信息。20 世纪 50 年代,出现了一系列小型毫米波射电望远镜。这些望远镜主要用于测量大气对毫米波传播的效应以及观测太阳、月球和行星的准热辐射。20 世纪 60 年代至 70 年代,技术进步推动观测进入亚毫米波(太赫兹)波段。20 世纪 70 年代,随着分子天文学的发展,毫米波天文学对星际物质、恒星的形成和演化等课题的研究取得了重要进展。20 世纪 80 年代至 21 世纪初,随着科技的不断进步,毫米波射电望远镜的技术不断提升,天线口径不断增大,观测精度和分辨率也不断提高。例如,各国开始研制更大口径的毫米波望远镜,并且在望远镜的设计、制造和安装等方面采用了更先进的技术和工艺。这一时期,望远镜阵列技术得到发展,多个小型天线组成的阵列可以实现更高的分辨率和灵敏度,为对宇宙中微弱信号的观测提供了更强大的工具。一些国家和地区开始建设毫米波望远镜阵列,如欧洲的相关项目等。21 世纪以来,毫米波射电天文望远镜进入快速发展阶段^[75-83]。2013 年在智利建立的阿塔卡马毫米波/亚毫米波阵列(ALMA)望远镜是一个大型的国际天文合作项目。它由 66 台天线组成,是世界上最强大的射电天文观测设备之一。我国在毫米波射电天文望远镜领域也取得了显著进展,不断提升我国在该领域的观测能力和研究水平,如中国电子科技集团公司第三十九研究所在建的 110m 单口径射电天文望远镜天线,其频率覆盖 150MHz~115GHz,建成后将是世界上单口径最大的毫米波射电天文望远镜。20 世纪 80 年代至 20 世纪末,随着电子学、光学等相关技术的发展,太赫兹波的产生、探测和调制等技术都有一定的进步。太赫兹源的功率不断提高,探测器的灵敏度也逐渐增强,这使太赫兹技术在天文观测中的应用变得更加可行。一些科研机构开始尝试建造实验性的太赫兹射电天文望远镜,用于对天体的太赫兹辐射进行观测和研究。这些望远镜的规模相对较小,性能也有待进一步提高,但为后续的发展积累了宝贵的经验。21 世纪以来,各国对太赫兹技术在天文领域的应用越来越重视,投入了大量的人力和物力进行相关研究。在这一时期,太赫兹射电天文望远镜的技术不断创新,包括天线技术、接收机技术、数据处理技术等方面。采用更先进的天线设计和制造技术,提高了望远镜的分辨率和灵敏度;新型的超导探测器的应用,大大提高了探测器的性能。太赫兹射电天文观测与其他波段的天文观测相结合,为天文学家提供了更全面的天体信息。

上述射电天文望远镜大多是单波束系统,利用机械伺服系统实现空域扫描,巡天效率较低。于是,为了提高巡天效率,多波束射电天文望远镜技术^[75-83]越来越得到重视。