

“优秀青年学者文库·电子通信卷”序

当 6G 的星地融合蓝图在科研攻关中徐徐展开，当太赫兹通信的波束穿透高原的晨曦完成远距离传输，当 AI 与算力网络的融合重塑产业生态，我们正处在电子通信行业从“跟跑”、“并跑”向“领跑”跨越的关键时期。6G、人工智能、未来网络、量子通信、集成电路等前沿领域的创新突破，既需要基础理论的坚实支撑，更呼唤一代又一代青年学者的接续奋斗与开拓进取。在此背景下，针对电子通信行业面临的前所未有的发展机遇与挑战，强化自主创新能力、加快高水平人才培养，不仅是实现科技自立自强的必然要求，也是建设信息产业强国的战略基石。

科学出版社组织出版的“优秀青年学者文库·电子通信卷”，旨在系统梳理我国电子通信领域的最新科研成果，展现优秀青年科技工作者在面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求等关键方向取得的理论突破与技术创新。同时，也为加快优秀青年人才成长打造高水平、专业化的科研成果交流平台，让不同研究方向的思想碰撞出创新火花，引导更多青年学者在基础理论创新与工程实践应用中找到突破口，在直面行业痛点、解决实际问题中实现学术价值。

该丛书的出版凝聚了众多权威专家与我国当代优秀青年科技工作者的智慧。丛书内容既注重理论体系的完整性，也突出技术应用的先进性，力求体现“理论—技术—工程—产业”的贯通思维，具备很好的科学性、系统性和参考价值。

丛书不仅可为广大科研人员、工程技术人员提供有益参考，也将为推动我国电子通信领域的高质量发展注入新动能，为推动实现“通信大国”向“通信强国”的跨越贡献积极力量。丛书的出版工作得到了科学出版社、北京邮电大学及各参编单位的鼎力支持，丛书编委会全体专家为丛书的高水平呈现付出了辛勤努力，在此一并致以诚挚谢意！

展望未来，电子通信技术将继续在新一轮科技革命和产业变革中扮演关键角色。我们期待“优秀青年学者文库·电子通信卷”不仅成为记录当下创新成果的

学术载体，更能激发更多青年才俊投身科研、勇攀高峰，以“求真务实”的态度深耕学术，以“敢为人先”的情怀担当使命，在服务国家战略、引领技术前沿的征程中贡献智慧与力量。

谨以此为序，祝愿“优秀青年学者文库·电子通信卷”顺利出版，更祝愿每一位青年学者在学术探索的道路上勇攀高峰、成就辉煌！

A handwritten signature in black ink, appearing to read '张俊' (Zhang Jun), written in a cursive style.

前 言

为满足 1Tbit/s 的极值传输速率和 100Gbit/s 的用户体验速率需求，第六代移动通信系统(the sixth generation of mobile communications system, 6G)将全频谱接入，支持 3GHz 以下低频段，包括 3.3~3.6GHz 和 4.8~6GHz 在内的中频段，以及 7.5~24.5GHz 的上中频段，并将把 37~43.5GHz 和 66~71GHz 等纳入毫米波频段，引入潜在的 140~220GHz、275~296GHz、306~313GHz、318~333GHz 和 356~450GHz 太赫兹频段以及可见光波段，并将兼容非授权频段和卫星频段等，上述频段将与传统无线感知(雷达)频段产生越来越多的交叠。同时，面向 6G 的超大规模天线、太赫兹通信和可见光通信等无线通信技术具备三维定位和成像能力，通信感知一体化使降低成本成为可能。另外，新业务需要多时空维度的实时感知与协同决策，对端到端时延敏感，传统串行信息采集与信息传递的信息处理流程亟须重新更迭。这些趋势与需求促进了通信感知计算融合的发展，成为 6G 空口的核心组成和热点技术。

由工业和信息化部指导成立的 IMT-2030(6G)推进组(IMT 表示国际移动通信)在《6G 总体愿景与潜在关键技术》白皮书中明确指出，6G 可以利用通信信号实现对目标的探测、定位、识别、成像等感知功能，使得通信感知一体化成为 6G 的核心特征。此外，通信感知也逐渐由业务共存走向能力互助：一方面感知可借助通信系统提升感知精度、感知广度及感知信息的时效性，提供无缝泛在无感的感知服务；另一方面，基于无线感知对信道环境的感知和预测可以进一步提升无线通信性能，从而实现通信感知互利共生、融为一体。例如，在智慧交通场景中，通过在基站侧部署具有环境感知功能的通信感知一体化节点，利用无线感知的高分辨率透视能力及基站高视角、广范围的感知能力，辅助实现高精地图构建及全域覆盖的道路监管；在沉浸式扩展现实场景中，无线感知通过对通信环境的感知精确分配通信资源，深度挖掘通信潜能，从而实现更高沉浸感、更智能、更低时延的虚拟现实体验；在智慧工业互联网场景中，通信感知一体化的协作机器人通过低时延、高可靠的通信进行协作，并利用通信感知信息的交互与学习，实现高效的控制与决策；在低空无人机场景中，通信感知一体化基站可以通过对空域中无人机状态的感知，构建广域电子围栏实现飞行入侵检测，此外可以通过在无人机上部署通信感知一体化模块，进行无人机智能无线组网，降低对飞行控制的依赖，并利用对周围飞行环境的感知结果，辅助无人机进行飞行路径管理。简而言之，无论是从技术演进、性

能目标需求,还是从未来应用场景和需求来看,通信感知计算融合都是 6G 的核心组成,其理论和技术发展将对 6G 的成功起到关键作用。

通信感知计算融合分为功能协同和功能融合两个层次:在功能协同框架中,感知信息可以增强通信能力,通信可以扩展感知维度和感知深度,计算可以进行多维数据融合和大数据分析,感知可以增强计算模型与算法性能,通信可以带来泛在计算,可以实现超大规模通信;在功能融合框架中,感知信号和通信信号可以进行一体化波形设计与检测,共用一套硬件设备。感知通信计算可以在软件定义芯片技术发展的基础上实现功能可重构。通信感知计算融合的应用场景包括无人化业务、浸入式业务、数字孪生业务和体域网业务。在无人化业务领域,提供智能体交互能力和协同机器学习能力;在浸入式业务领域,提供交互式扩展现实的感知能力和渲染能力,全息通信的感知能力、建模能力和显示能力;在数字孪生业务领域,提供物理世界的感知能力、建模能力、推理能力和控制能力;在体域网业务领域提供人员监控能力、人体参数感知能力与干预能力。

通信感知计算融合信息理论是对传统通信理论、感知理论和计算理论的领域扩展,更是交叉融合后新的发展方向,将成为通信、感知、计算各自发展的基础和核心支撑。1948 年,香农(Shannon)发表了信息论开创性论文,奠定了现代信息论研究的基础。香农信息论主要讨论点对点通信中的一些基本问题,提出香农公式表征点对点信道容量与带宽和功率之间的关系。为了逼近理论信道容量,研究人员对多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)中的编码技术展开研究。从 1996 年基于多元天线阵列的贝尔实验室分层空时码结构,到比贝尔实验室分层空时码更加简化的垂直分层空时码结构,再到空时编码和空时网格编码以及空时分组编码,20 世纪 90 年代的各种编码技术逐渐提高了功率和频谱的利用率,获得了较高的编码增益和分集增益。此后,关于多输入多输出技术的研究如雨后春笋般迅速涌现,后续研究关注多天线信道容量影响因素、译码算法、分集方式、检测算法、信道估计、干扰抵消的分析。网络信息论旨在将香农点对点的信息理论扩展到具有多个发射机和接收机的通信网络。香农于 1961 年首次将点对点信道扩展到双向信道,开启了网络信息理论的研究。自 1972 年 Cover 广播信道的研究开始,学术界相继开展了多址接入信道、两发两收信道和无损分布式数据压缩等理论研究工作,激发出网络信息理论的研究热潮。

与此同时,无线感知理论源于雷达的使用与发展,雷达这种革命性的无线电探测和跟踪技术在第二次世界大战的盟军国家和轴心国家广泛使用,主要用来完成目标检测、测距、测向等工作。无线电探测和测距(radio detection and ranging, RADAR)技术由美国海军在 1940 年创造,之后“Radar”一词得到了广泛使用,检测理论作为信息感知理论的一个分支,是研究从有噪声信号中提取信息的最佳方式。1933 年, Neyman 和 Pearson 提出了 Neyman-Pearson 引理,给出了在给定虚警概率下,检测概率最大化的判决准则。Neyman-Pearson 引理为检测理论提供了

统计假设检验的理论基础。1954年, Peterson等^①基于检测理论提出了信号可检测理论, 推动了检测理论的发展。20世纪60~70年代, 经典检测理论在雷达上的应用发展到成熟阶段, 逐步提出了非参量检测理论、非线性检测理论和韧性检测理论, 开创了适用于噪声统计特性未知情况下的现代检测理论。在确定目标确实存在之后, 可以进一步对目标参数进行估计, 估计理论是统计学和信号处理中的一个分支, 主要通过测量数据或利用经验数据来估计概率分布参数的数值。雷达系统通过分析发射脉冲与接收回波的双向传输时间来确定估计目标的距离。反射脉冲不可避免地嵌入电噪声中, 因此其测量值呈随机分布, 通过无偏估计可以更好地表示目标检测的精度。为衡量估计值与真实值之间的差距, 克拉默-拉奥下界、Ziv-Zakai界以及 Weiss-Weinstein界被相继提出。识别理论是指利用雷达感知的方法识别目标, 反馈目标的空间信息。根据观测对象的抽象形态, 可以分为两个方向: 首先是在实际场景中可视为“点”的观测对象, 表征了雷达感知分辨多目标的能力; 其次对于无法视为“点”的观测对象, 仅测定其距离、速度和角度参数, 所能提供的目标空间信息有限, 不利于目标识别, 所以产业界又提出了雷达成像理论, 通过提供目标的共分辨微波散射图像, 丰富了所能提取的目标信息, 提高了目标分类性能和识别性能。

1936年, 数理逻辑学家提出了计算模型, 用于解决“每个问题是否都有算法可解”的问题。通用图灵机影响了计算机的设计思想, 计算理论主要包括算法、算法学、计算复杂性理论、可计算性理论、自动机理论和形式语言理论等, 主要研究模型包括图灵机、正则表达式、上下文无关文法和下推自动机等。通用图灵机模型的提出奠定了计算机设计的理论基础, 随着技术的进步, 该理论延伸至量子计算、超图计算等新兴领域, 其中超图计算理论包含结构建模方法、语义计算方法和高效计算方法。计算复杂度是理论计算机科学的重要分支, 主要研究计算问题所需的资源消耗规律, 包括时间复杂度和空间复杂度的定量分析, 用于评估算法效率, 其核心理论聚焦资源消耗下限分析, 例如, 时间复杂度反映算法执行步骤数, 空间复杂度衡量存储需求。复杂度理论与算法理论互补, 前者揭示问题难以高效解决的本质, 后者寻找优化方案。柯尔莫哥洛夫复杂度概念由 Kolmogorov^②率先提出, 其主张使用描述长度量化复杂性。20世纪70年代, Lempel等^③基于信息论定义随机序列复杂度, 20世纪80年代末, Kaspar等^④提出了 Kc

① Peterson W W, Birdsall T G, Fox W C. The theory of signal detectability. Transactions of the IRE Professional Group on Information Theory, 1954, 4(4): 171-212.

② Kolmogorov A N. Three approaches to the quantitative definition of information. International Journal of Computer Mathematics, 2:1-4, 157-168.

③ Lempel A, Ziv J. On the complexity of finite sequences. IEEE Transactions on Information Theory, 1976, 22(1): 75-81.

④ Kaspar F, Schuster H G. Easily calculable measure for the complexity of spatiotemporal patterns. Physical Review A, 1987, 36(2): 842-848.

算法,通过粗粒化信号生成“0-1”序列统计新模式频率,衍生出四值化等改进方法,广泛应用于信号处理等领域。

已有信息理论孤立地从通信、感知、计算等视角展开性能分析研究,大多仅能指导单一维度的网络性能优化提升。如何将通信、感知、计算基础理论分析方法融合,揭示多性能内在平衡关系与性能极限,是指导融合网络性能优化,支撑6G智能交互应用的关键前提。

本书由作者所在团队多年来在通信感知计算融合理论研究领域的成果和经验汇集而成。本书重点论述具有普遍性和代表性的基础理论知识,包括基本理论、问题挑战、技术思路和分析方法等,力求每部分内容都有新的观点及视角,注重逻辑严密,配备丰富的图示、表格和分析等。

6G通信感知计算融合研究和标准化工作还在进一步深入,为了尽量体现当前最新研究成果,本书内容参考了学术界和产业界的最新研究成果,并在每章列出这些参考文献,在此对参考文献的作者一并表示感谢,读者也可以参阅这些参考文献,以获得更全面、更深入的知识。本书提供部分彩图的电子文件,读者可扫描封底左上角的二维码查阅。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。欢迎读者来信讨论其中的技术问题,作者邮箱 pmg@bupt.edu.cn。

彭木根

目 录

“优秀青年学者文库·电子通信卷”序

前言

第 1 章 通信计算感知性能度量	1
1.1 通信感知计算分立性能度量理论	1
1.1.1 通信性能指标	3
1.1.2 感知性能指标	4
1.1.3 计算性能指标	5
1.2 通信感知一体化性能度量理论	9
1.3 通信计算融合性能度量理论	15
1.4 通信感知计算融合性能度量理论	21
参考文献	22
第 2 章 通信感知共享性能分析	24
2.1 通信感知一体化概述	24
2.1.1 通信感知一体化国内外标准进展	24
2.1.2 通信感知一体化技术演进	25
2.1.3 通信感知一体化理论性能分析现状	27
2.1.4 通信感知一体化网络化发展现状	32
2.2 通信感知频域共享性能分析	35
2.3 通信感知时域共享性能分析	40
2.4 通信感知空域共享性能分析	44
参考文献	51
第 3 章 通信感知协同信息理论与方法	54
3.1 太赫兹通信感知协同性能分析	54
3.1.1 太赫兹感知协同通信指标建模	54
3.1.2 太赫兹感知协同通信性能均衡建模	58
3.1.3 太赫兹角度感知协同通信性能增益	61
3.1.4 太赫兹角度感知协同通信理论	65
3.1.5 太赫兹时/频/空通信感知性能分析	70
3.2 低复杂度高精感知协同通信信道估计	76

3.2.1	系统模型	78
3.2.2	感知信道模型	78
3.2.3	通信信道模型	79
3.2.4	算法设计	80
3.2.5	性能分析	82
3.3	智能反射表面增强的感知协同通信波束成形	83
3.3.1	智能反射表面增强的通信感知一体化系统模型	84
3.3.2	基于卷积神经网络与长短期记忆网络的到达角预测神经网络设计	88
3.3.3	性能分析	90
	参考文献	94
第4章	通信感知一体化波形理论与方法	97
4.1	基于载波聚合正交频分复用的通信感知波形设计	97
4.1.1	基于载波聚合正交频分复用的通信感知一体化系统模型	97
4.1.2	感知回波信号模型	99
4.1.3	基于载波聚合正交频分复用的感知信号处理	99
4.1.4	性能分析	102
4.2	面向通信感知一体化的高分辨正交时频空间信号设计	105
4.2.1	信号模型	105
4.2.2	优化指标与问题构建	106
4.2.3	算法设计	107
4.2.4	性能分析	111
4.3	线性调频通信感知一体化波形	116
4.3.1	线性调频通信感知一体化系统	117
4.3.2	线性调频通信感知一体化波形感知性能	121
4.3.3	线性调频通信感知一体化波形通信性能	122
4.4	频率多普勒分复用通信感知一体化波形	123
4.4.1	频率多普勒分复用通信感知一体化系统	125
4.4.2	频率多普勒分复用信号加窗优化	128
4.4.3	频率多普勒分复用通信感知一体化系统仿真分析	131
	参考文献	137
第5章	无线通信系统感知理论与方法	140
5.1	单基站无线感知理论	140
5.1.1	信道状态信息感知理论基础	141
5.1.2	菲涅耳区几何理论	141
5.1.3	检测性能分析	143

5.1.4 实验验证与结果分析	144
5.2 同构网络感知覆盖理论	145
5.2.1 通信感知一体化同构网络	146
5.2.2 感知覆盖概率	148
5.2.3 基站部署优化	149
5.2.4 实验验证与结果分析	152
5.3 异构网络资源分配与感知提升	154
5.3.1 通信感知一体化异构网络	154
5.3.2 感知性能分析	156
5.3.3 资源分配图样	158
5.3.4 资源分配对感知性能的影响	161
参考文献	162
第 6 章 通信感知计算融合资源调度理论与方法	165
6.1 通信感知计算融合的驱动力及资源表征	165
6.1.1 通信感知计算资源性能单独表征	165
6.1.2 通信感知计算融合性能指标	166
6.2 单站理论优化模型及时频资源调度理论	167
6.2.1 基于信息年龄的车联网通信感知计算融合资源管理方法	168
6.2.2 感知计算辅助通信的多无人机资源管理策略	179
6.3 多站干扰协同下的干扰协调理论与方法	186
6.3.1 系统模型	187
6.3.2 信号模型	188
6.3.3 多基站协同感知和目标波束跟踪	191
6.3.4 多基站联合波束功率优化	195
6.3.5 性能分析	197
6.4 基于环境和通信资源感知的计算资源调度	198
6.4.1 基于协同感知任务的通信辅助计算架构	199
6.4.2 协同感知任务计算建模	200
6.4.3 IoSI-CP 框架设计	202
6.4.4 性能分析	205
6.5 意图驱动的多维度多粒度资源优化调度	210
6.5.1 意图驱动的多无人机资源调度背景	210
6.5.2 意图驱动的通信感知计算融合模型	211
6.5.3 优化指标与问题构建	214
6.5.4 基于交叉编码机制的语义编码器设计	215

6.5.5	意图驱动的数据选择与带宽分配策略	218
6.5.6	性能分析	219
	参考文献	221
第 7 章	无线算力调度理论与方法	224
7.1	动态算力编排与按需调度理论	224
7.1.1	系统模型	225
7.1.2	边缘智能实时算力平台	233
7.1.3	边缘节点算力智能实时动态调度机制	238
7.2	面向通信感知计算融合的实时边缘智能技术理论	243
7.2.1	边缘节点通信性能优化理论与方法	244
7.2.2	边缘节点感知数据实时聚合压缩技术	252
7.2.3	基于深度强化学习的多无人机系统通信总时延最小化方案	257
7.3	多层级场景算力调度理论	263
7.3.1	系统模型	264
7.3.2	问题求解	266
7.3.3	性能分析	268
	参考文献	270

第 1 章 通信计算感知性能度量

对通信感知计算融合来说，信息论度量参数研究是基础，这些参数包括但不限于容量、失真、互信息等，用于描述和量化通信、感知和计算性能之间的折中关系。本章首先介绍传统的独立性性能度量指标，然后分别阐述通信感知一体化(integrated sensing and communication, ISAC)、通信计算融合、通信感知计算三者融合的性能度量指标。

1.1 通信感知计算分立性能度量理论

相比于 5G, 6G 为支持更广泛的场景和业务需求，对系统所需支持的技术性能提出了更多、更高的指标要求^[1]。在《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》中，明确定义了 15 项关键性能指标，即峰值速率、用户体验速率、频谱效率、区域流量容量、连接数密度、移动性、时延、可靠性、覆盖能力、定位精度、感知相关能力、人工智能相关能力、安全/隐私/弹性性能、可持续性和互操作性。这些指标涵盖了未来网络在多种应用场景下实现性能极致化的核心需求。IMT-2030 性能指标体系如图 1.1.1 所示。图中，eMBB 表示增强型移动宽带(enhanced mobile broadband)，mMTC 表示海量机器类通信(massive machine type communications)，URLLC 表示超高可靠低时延通信(ultra reliable low latency communications)。

为了应对 6G 时代应用场景对多维极致性能的需求，关键之一是深度融合传统无线感知技术与现代通信技术。通过将检测、估计、成像等功能与通信相结合，并利用泛在的算力资源进行协同计算处理，可以形成具备深度融合特性的通信感知计算网络^[2]。该融合网络能够在通信、感知和计算之间实现协同效应，既相互促进，又彼此制约。然而，为了充分发挥其潜力，亟须构建新型性能评价体系，以应对不同业务场景下的波形设计、资源分配及网络调度等挑战。这一体系的构建过程，与通信感知计算融合网络架构的发展密不可分^[3]。其发展历程可概括为：从初步归纳通信、感知、计算三者各自独立的有效性与可靠性指标，到联合信息理论的快速演进，最终提出面向通信感知计算融合的全新网络度量指标，形成了如图 1.1.2 所示的通信感知计算深度融合性能评价体系。

在这一背景下，为适配新兴业务场景，需要提出更精准、更完善的性能指标体系，并且有必要对通信感知计算融合网络的性能进行系统建模和分析。通信感知计算融合性能建模方法(图 1.1.3)分别针对无线通信和无线感知进行一体化性能

建模，然后在其基础上进行计算赋能，给出三者融合的整体性能建模。通过性能

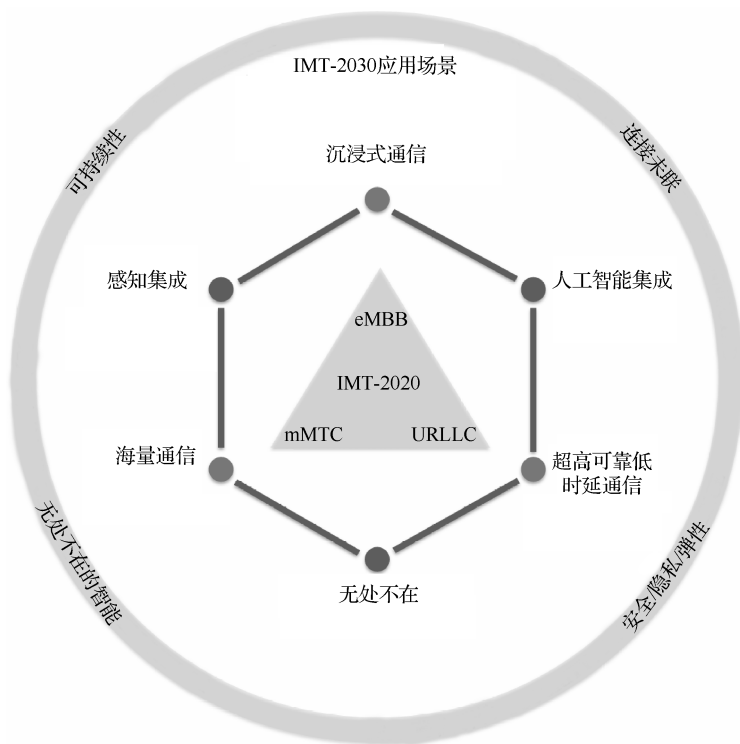


图 1.1.1 IMT-2030 性能指标体系

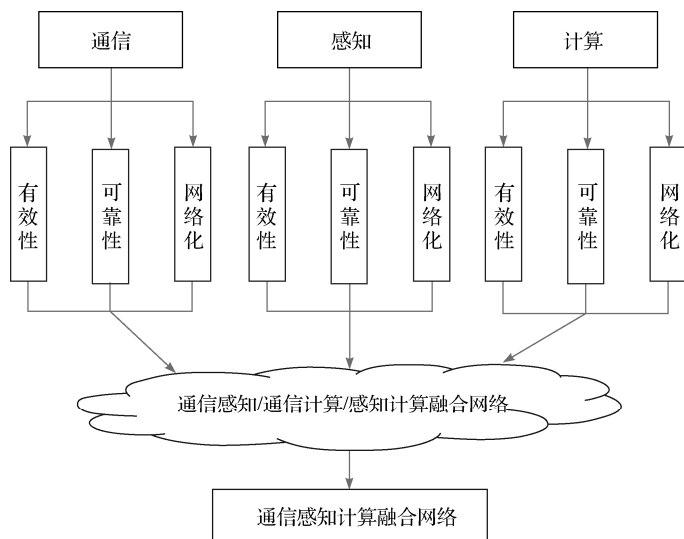


图 1.1.2 通信感知计算深度融合性能评价体系

建模可以高效支撑通信感知计算融合性能评价体系的建立与优化,进一步满足 6G 对多维场景和业务需求的全面支持。

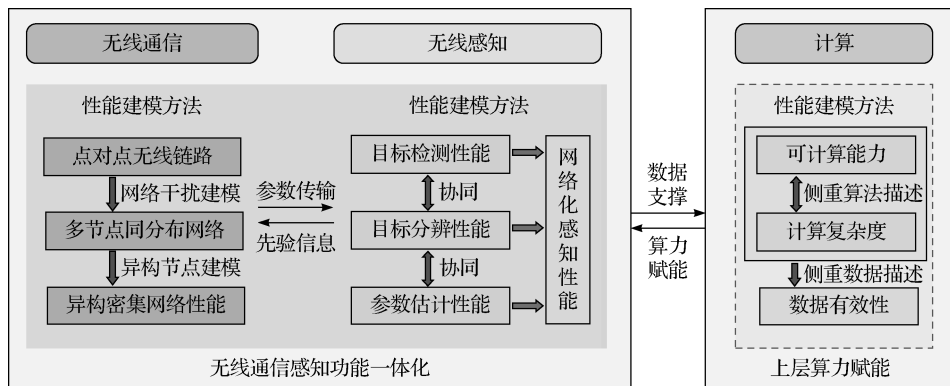


图 1.1.3 通信感知计算融合性能建模方法

1.1.1 通信性能指标

传统无线通信性能评价指标包括有效性、可靠性和网络化三个方面，是新型通信感知计算融合网络中通信性能建模的基础。

(1) 有效性是指在有限通信资源的限制条件下，从发送端到接收端的通信可达能力，主要包括峰值速率、频谱效率、能量效率、信道容量等指标。其中，频谱效率和能量效率是最常见的两类指标，分别定义为单位带宽信号每秒可以传输的信息比特数和单位能量系统可以传输的信息比特数，表征了融合系统网络的总吞吐量和能量资源利用效率。

(2) 可靠性是指系统对信道中存在的噪声、干扰和衰落等不良通信环境的抵抗能力，主要包括误比特率、误码率、中断概率、空口时延/抖动等。其中，误码率定义为传输码元在系统传输时出错的概率。中断概率是当链路容量不能满足所要求的用户速率时，产生中断事件的概率。一般情况下，中断事件的概率分布取决于链路的平均信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)及其信道的衰落分布模型。

(3) 网络化指标是指特定通信网络中的系统级性能评价指标，主要包括连接密度、网络总容量/速率、网络覆盖范围/覆盖率等。其中，连接密度定义为特定时间范围内单位面积区域可以同时激活的用户数。网络覆盖率定义为在特定区域内，可以接收到有效信号功率的用户数所占该区域范围用户数的比例。

在上述三大无线通信性能指标基础上，可以对不同条件下的无线通信过程及其性能极限进行数学建模分析，得到普适性结论。针对上述性能指标的建模方法可以追溯至 1948 年提出的香农公式^[4]。该公式被认为是最早也是最经典的无线通信理论，通过对有噪声条件下点对点通信过程的建模及推导，得到了给定噪声功

率谱密度条件下信道容量与带宽、功率的数学关系。信道容量表征了有噪声情况下点对点传输中最大无差错信息的传输速率,是信道编码、波形设计、信号检测等关键链路级技术的基本性能上限,为点对点系统及简单蜂窝小区通信性能提升指明了方向。然而,由于复杂无线网络中不同接收机干扰的相关性,无线网络已经不能抽象为点对点链路的简单并行,传统香农公式无法直接应用于无线网络通信性能的建模。针对这一问题,2000年左右提出的Kumar网络容量公式^[5]基于独立同分布的静态节点建模方法,给出了分布式多跳无线网络内由多个随机节点以某一传输速率在覆盖范围内形成的网络容量。Kumar网络容量公式拉开了网络容量建模及性能上限研究的序幕,但仍然无法表征节点异构时网络的通信性能。2010年左右,Andrews等利用随机几何方法对节点随机空间分布的异构密集网络覆盖性能进行了研究^[6],其将基站划分为活跃基站和空闲基站,并给出了异构密集网络下覆盖率的数学表达式。

随着新型无线网络的不断涌现,关于无线通信理论性能上限的工作仍在持续推进,这些理论性能建模方法将作为通信感知计算融合网络中无线通信性能建模的参考方案,为通信感知计算融合理论的发展奠定了基础。

1.1.2 感知性能指标

感知与对目标的感知场景密不可分,感知任务通常分为目标检测、目标估计和目标识别三类。本节参考通信指标的分类维度,将感知性能指标分别从有效性、可靠性、网络化指标三方面进行讨论。无线感知有效性指标是指在有限资源条件下从发送端到接收端的感知可达能力。无线感知可靠性指标是指感知能力的理论上限及感知可达性能。针对不同感知任务,可靠性指标可细化为以下几类。

目标检测是指接收机在噪声、干扰条件下,对接收到的雷达测量信号进行处理、统计判决,从而实现未知目标的识别。此判决属于阈值检测,是统计处理的结果,因此存在错误概率。其中,检测概率和虚警概率是常用的目标检测可靠性评价指标。检测概率是指将接收的回波信号判决为目标回波信号,且目标真实存在的检测正确概率。虚警概率是指将接收的回波信号判决为目标回波信号,但目标并不真实存在的检测错误概率。

目标估计是指在噪声或干扰观测中提取被感知对象的有用参数,包括估计目标的距离、速度、角度、数量、大小。其中,估计均方误差、费希尔信息、模糊函数等均是常用的目标估计可靠性评价指标。估计均方误差定义为参数的真值与其估计值之间平方误差的均值。克拉默-拉奥下界是任何无偏估计量方差的下界,也定义为费希尔信息的逆。费希尔信息是似然函数关于估计量的曲率(负二阶导数)的期望,用于衡量估计量的尖锐性或准确性。模糊函数是波形设计与分析的模拟工具,刻画了波形与匹配滤波器特征的对应关系,用于表征系统参数与距离、

速度分辨率之间的权衡关系。

目标识别是指根据有噪声或受干扰的观测来理解被感知对象是什么,通常在应用层的分类任务中使用。分辨率、识别准确率等是常用的目标识别可靠性评价指标。分辨率分为距离分辨率、速度分辨率、角度分辨率等,用于分辨邻近区域内的不同目标,由一体化波形参数与采用的阵列天线规模决定。

无线感知网络化指标衡量了组网后感知网络的能力水平,包括感知范围、可感知目标数目、网络平均感知能力、对移动目标的感知能力、网络协作能力等。

关于无线感知性能指标的建模方法可以划分为三个维度,对应于无线感知的三项关键任务,即检测目标有无、估计目标参数以及进行多目标分辨。其中,最为经典的目标检测理论是1933年提出的Neyman-Pearson准则^[7],由此衍生出虚警概率和检测概率两项重要的目标检测性能判别准则。Neyman-Pearson准则虽然源于统计数学的假设检验理论研究,但后来被广泛应用于以雷达检测为代表的,从无线回波信号中判决有效信息的过程,通过设立判决门限评估感知探测目标存在或不存在的概率。之后,为适配目标追踪等关键任务,需要对目标参数进行更加准确的估计。目标参数估计任务的研究基础是统计学的有噪估计理论及方法。1945年,克拉默-拉奥利用估计误差的协方差矩阵表征了目标参数估计的精度,并通过建立目标参数、观测量间的统计模型,利用无偏估计的统计特性进行推导,提出了克拉默-拉奥下界^[8]作为无偏估计下参数估计精度的极限,其数学表达式可以基于费希尔矩阵得出。随着以雷达为代表的无线感知技术的发展,多感知目标区分成为感知系统需要解决的重要问题。为表征雷达感知单元的多目标分辨能力,研究人员进一步提出了分辨率指标^[9]。目前常用的分辨率指标包括距离分辨率、角度分辨率和速度分辨率,分别用于表征垂直方向、水平方向和物体运动速度的分辨能力。

随着通信感知计算融合网络的不断推进,无线感知理论的研究也逐步向网络化指标扩展。其中,点对点指标将协同物理层的通信感知一体化系统方案,而网络化指标将作为通信感知计算融合网络中无线感知性能的评估基准。

1.1.3 计算性能指标

计算理论是数学的一个重要分支,与计算机关系密切,主要关心三方面的问题:一是采用什么计算模型(即形式语言、自动机);二是解决哪些是可计算的、哪些是不可计算的(即可计算性)问题;三是要使用多少时间、多少存储空间(即计算复杂性)。这三类问题可归纳为一个核心命题,即探究计算机的基础能力与固有局限。总之,计算理论最核心、最基本的内容是形式语言与自动机、可计算性和计算复杂性三大部分,从广义上来说,算法设计、计算经济学、计算生物学、机器学习理论等都属于计算理论范畴。

计算理论的部分数学基础可追溯至 18~19 世纪的数学研究。18 世纪,英国数学家托马斯·贝叶斯(Thomas Bayes)提出了贝叶斯定理,为基于先验知识与新观测数据的概率推理提供了框架,后被广泛用于朴素贝叶斯分类器,尤其是在自然语言处理与文本分类中获得了广泛应用。19 世纪,最小二乘法的提出为回归分析奠定了基础,通过最小化预测值与观测值的误差平方和实现最优拟合,成为线性回归和优化算法的重要工具。20 世纪,英国数学家艾伦·图灵提出了图灵测试,首次系统探讨了机器是否能够具备人类智能,这一思想为人工智能和机器学习的发展奠定了哲学基础与理论基础。

需要说明的是,计算理论的“计算”并非指纯粹的算术运算,而是指从已知的输入透过算法获取一个问题的答案,计算理论属于理论计算机科学和应用数学。为了对计算进行严谨研究,研究人员将计算以数学的方式进行抽象化,称为计算模型,其中最出名的是图灵机。图灵机又称为确定型图灵机,是艾伦·图灵于 1936 年提出的一种将人的计算行为抽象化的数学逻辑机,其更抽象的意义为一种计算模型,可以等价于能够实现任何有限逻辑数学过程的通用计算模型。艾伦·图灵的基本思想是利用机器来模拟人用纸笔进行数学运算的过程,他把该过程看作以下两种简单的动作:

- (1) 在纸上写或擦除某个符号;
- (2) 将注意力从纸的一处移动到另一处。

在每个阶段,人要决定下一步的动作,依赖此人当前所关注的纸上某个位置的符号和此人当前思维的状态。图灵机作为通用计算设备的抽象,定义了可计算问题的边界,而丘奇-图灵论题提出的所有有效计算均可由图灵机实现,奠定了现代计算机的理论基础。

算法理论关注问题求解的步骤设计与效率优化,涉及贪心算法、动态规划、分治策略等范式。数据结构研究信息的组织方式与操作特性,如树结构的时间复杂度分析、哈希表的碰撞解决机制,二者结合可以形成解决实际问题的系统方法,如 Dijkstra 算法在图论中的应用、快速排序的最优实现条件等。

复杂性理论通过时间复杂度、空间复杂度分类问题(如 P 问题与 NP 问题),揭示计算资源的本质限制。实际上,计算过程都需要耗费时间与空间。对图灵机而言,读写头移动的次数就是耗费的时间,读写头走过的纸带格子数就是占用的空间。如果输入串的长度为 n ,图灵机的时间消耗不大于 $f(n)$,则称该语言可以在 $D(f(n))$ 时间内得到判定。如果 $f(n)$ 是关于 n 的线性函数,则称该语言可以在线性时间内得到判定;如果 $f(n)$ 是关于 n 的多项式函数,则称该语言可以在多项式时间内得到判定。对于可以在多项式时间内得到判定的语言,其组成的集合用 P 表示,它是单词多项式 polynomial 的首字母。 P 是语言的集合,这些语言的判定问题俗称 P 问题。对于不可以在多项式时间内得到判定的语言,其集合就称为 NP 问题,

其中, N 是 nondeterministic 的首字母, 指不确定的。

人工智能时代最热门的计算理论就是机器学习及其算力技术, 机器学习是一种通过算法和模型使计算机从数据中自动学习并进行预测或决策的技术, 其核心目标是让计算机在没有明确编程指令的情况下, 通过对大量数据的分析来识别模式和规律, 从而构建适应新数据的模型。机器学习的实现包含三个关键要素: 模型(model)、策略(strategy)和算法(algorithm)。模型定义了输入与输出之间的映射关系, 是机器学习的基础, 它源自一个称为假设空间的集合, 例如, 线性回归模型假设目标变量是输入的线性组合, 而神经网络模型则能够建模复杂的非线性关系, 模型选择对学习效果具有决定性影响。策略用于衡量模型优劣, 通常通过损失函数评估模型预测与真实结果之间的误差。常见损失函数包括均方误差和交叉熵损失等。策略不仅指引模型优化方向, 同时也是算法迭代寻优的优化目标。算法是实现学习过程的技术手段, 主要通过优化算法寻找最优模型参数。常用的优化算法包括梯度下降法、牛顿法、拟牛顿法等, 它们根据损失函数的反馈不断调整模型参数, 逐步逼近最优解。

卡内基梅隆大学的汤姆·米切尔(Tom Mitchell)被认为是机器学习领域的奠基人之一。他的经典定义在机器学习教科书中被广泛引用: 如果计算机程序在完成某类任务 T 时, 通过经验 E 在某一表现度量 P 下的表现有所提高, 则称该程序从经验 E 中学习。机器学习的目标是使用计算机预测未知的事件或场景。机器学习旨在赋予计算机通过经验自动改进性能的能力。1959 年, 亚瑟·塞缪尔(Arthur Samuel)首次提出“机器学习”一词, 将其描述为“让计算机在未显式编程的情况下具备学习能力”。早期机器学习依赖规则和启发式算法, 以统计学为基础, 融合贝叶斯定理、概率论、线性代数和优化理论。20 世纪 50 年代的感知器模型是早期的线性分类器, 用于处理二元分类问题。1967 年, k 最近邻域法被提出, 成为经典的非参数学习算法之一, 这个时期人工智能以符号主义和专家系统为主流, 20 世纪 80 年代, 统计学方法逐渐取代符号主义, 监督学习成为主流, 研究人员开始利用标注数据训练模型以完成分类任务或回归任务, 神经网络正式引起研究人员的关注, 进入快速发展的新阶段。

1980~2010 年, 随着计算能力的提升, 机器学习进入快速发展时期, 涌现出多种经典算法, 1989 年, 杨立昆(Yann LeCun)将反向传播应用于卷积神经网络, 成功实现手写识别, 开创了深度学习的先河。1997 年, IBM 公司的“DeeperBlue”首次在锦标赛条件下击败了当时的国际象棋冠军加里·卡斯帕罗夫, 虽未采用机器学习, 但激发了人们对人工智能战略博弈的兴趣。1998 年, 索尼公司推出基于强化学习的娱乐机器人 Aibo, 展示了人机交互的潜力。2010 年, 随着图形处理单元计算平台(如计算统一设备架构)的成熟, 基于神经网络的深度学习快速崛起。深度学习通过多层网络结构自动提取数据特征, 在图像识别、语音识别和自然语

言处理等领域取得了突破性进展。自 2020 年,大模型迅速发展,展现出强大的语言理解与生成能力。ChatGPT 的问世标志着语言模型迈入实际应用阶段,大语言模型广泛应用于教育、医疗、客服等场景,推动了机器学习从文本扩展至图像、语音、机器人控制等多模态任务中,开启了通用人工智能的新阶段。

为了更好地发挥人工智能技术的优势,需要部署相应的支撑平台,其中最重要的就是算力,这也是通用人工智能阶段的核心竞争力。算力,也称为计算能力,通常指的是计算机系统执行算法、处理数据和解决问题的能力。算力可以量化为在单位时间内处理数据的速度,通常用每秒浮点运算次数(floating-point operations per second, FLOPS)来衡量,这一指标对评估和比较不同计算机系统在执行科学计算、图像处理、数据分析和机器学习等任务的效率至关重要。算力的提出是当前业务规模和数据信息与日俱增的必然结果。针对不同的业务场景,分别从计算的有效性、可靠性、网络化指标三个方面讨论计算性能评价指标。

算力有效性是指在有限计算资源的条件下,计算机的最优计算能力,主要包括计算峰值速率、算力能效、处理器运行效率、中央处理器运行效率等。计算峰值速率表示单位时间内执行的浮点运算次数,可以按照运算精度的不同分为双精度(FP64)、单精度(FP32)、版精度(FP16)和整型(INT8、INT4)。深度学习常用 FP16 运算精度,而整型的运算精度常用于模型推理中。算力能效是指单位功率可以提供的浮点运算次数,单位为 FLOPS/W。处理器运行效率是指单位时间内可执行的张量操作次数,单位为 TOPS,在机器学习领域应用尤为广泛。中央处理器运行效率是指中央处理器在单位时间内可以执行的百万计指令数,是衡量中央处理器执行指令集速度的性能指标。

算力可靠性是指提供服务的算力可达性能,主要包括计算安全性、服务响应时间等。计算安全性表示系统在一定时间内正常运行并为用户安全交付计算资源的能力,由软件、硬件、网络拓扑等因素共同决定。服务响应时间表示从用户输入请求开始到网络提供服务所耗费的时间。

算力网络化指标是指在算力网络(简称算网)中计算资源所能提供的计算水平,包括网络算力容量、算力利用效率等。其中,算力利用效率表示网络计算资源的利用效率,可以反映计算资源的冗余状态,为提高特定网络的有效性提供参考。

计算性能建模的研究起源于 20 世纪 30 年代,早于电子计算机的出现时间。此阶段计算理论的主要研究目标为讨论所有问题是否都有求解的算法,为此艾伦·图灵提出了可计算理论^[10]。可计算理论指出,凡可用某种程序设计语言描述的问题都是可计算性问题,进而衍生出基于内部状态转移的图灵机的概念,并根据状态组、符号组、输入符号集、转移函数、初始状态以及最终状态集对图灵机模型进行完备描述。尽管图灵机给出了任务的可计算性判决,但是仍然无法衡量算法的复杂性。针对算法复杂度的分析最早源于 1844 年对欧几

里得算法运行时间的研究。1965年,《论算法的计算复杂性》^[11]列出了时间复杂性和空间复杂性的明确定义,并阐明了层次结构定义,同时总结了时间层次定理和空间层次定理。随着电子计算设备算力的提升,分布式算力^[12]的思路被提出,如何高效传输计算任务所需数据成为新的挑战。然而,以图灵为代表的早期人工智能学派的思想更关注知识的表示与推理权重,已蕴含数据重要性之分的观念;而传统香农通信理论侧重于数据传输,并未挖掘数据重要性的排序关系。因此,数据多样性理论^[13]被提出,该理论结合了两者的核心思想,通过综合考虑模型训练因素和信道传输因素,给出了数据重要性因素。

随着协同算力、算网技术的不断推进,计算理论在任务分析方面将进一步融入感知任务模型,而在数据传输方面将进一步与通信理论深度融合,支撑通信感知计算融合信息理论构建。

1.2 通信感知一体化性能度量理论

理论性能分析是评价通信感知一体化适用性的关键。考虑到通信感知一体化功能需求和太赫兹应用前景,本书详细阐述包含性能指标和理论模型的通信感知一体化理论框架。

传统的感知(或雷达)和通信指标通常在物理意义和数量维度上是分开的。为了共同表征和优化通信感知性能,需要统一通信感知一体化理论框架的指标^[14]。表1.2.1列出了典型的通信感知一体化指标。该表中指标按照类型、名称、表达式和应用四个维度进行组织,全面展示了感知和通信两大功能领域的性能评估标准。表格内容分为三个主要部分。感知指标部分包含三类指标:第一类是感知导向的“边界”指标与“度量”指标,包括克拉默-拉奥下界和自由度,其中克拉默-拉奥下界用于参数估计,自由度则通过映射与估计来评估;第二类是通信导向的“边界”指标与“度量”指标,涵盖互信息、估计速率、雷达容量和香农容量等关键通信性能指标,主要应用于MIMO通信和目标检测场景;第三类是信号导向的“比”指标,包括杂波噪声比(clutter-to-noise ratio, CNR)、状态噪声比(state-to-noise ratio, StNR)、峰值旁瓣比(peak-to-side lobe ratio, PSLR)和峰值平均功率比(peak-to-average power ratio, PAPR),分别应用于有杂波的雷达、估计和预测、雷达波束成形以及正交频分复用通信。通信指标部分同样包含三类相应的指标,在结构上与感知指标对应,体现了通信感知一体化系统中感知与通信的对偶关系。统一指标部分则包括总和速率和联合克拉默-拉奥下界等综合性能指标,以及待推出的联合T-ISAC指标,用于性能折中分析。

表 1.2.1 典型的通信感知一体化指标

类型	感知		通信	
指标	感知导向的“边界”指标与“度量”指标			
	克拉默-拉奥下界	自由度	克拉默-拉奥下界	自由度
表达式	$\text{CRB}_\theta = -E_x^{-1} \left[\frac{\partial^2 p(y x; \boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}^T \partial \boldsymbol{\theta}} \right]$	$d_{\text{sen}} = \text{rank}(\mathbf{F} \cdot \mathbf{H})$	$\text{CRB}_x = -E_x^{-1} \left[\frac{\partial^2 p(y x; \boldsymbol{\theta})}{\partial x^2} \right]$	$d_{\text{com}} = \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \frac{R_{\text{ach}}}{C_{N=1}}$
应用	参数估计	映射与估计	参数估计	映射与估计
类型	感知		通信	
指标	通信导向的“边界”指标与“度量”指标			
	互信息	估计速率	雷达容量	香农容量
表达式	$\text{MI} = \frac{1}{2T} \log_2(1 + \text{SNR})$	$\text{ER}_\theta = \frac{1}{2T} \log_2(1 + C_\theta^T \text{CRB}_\theta^{-1} C_\theta)$	$C_R = \frac{1}{T} \log_2 \left(\frac{2\pi k R_{\text{max}}}{T \Delta R \Delta \theta \Delta f_d} \right)$	$C = \sum_{i=1}^N B \log_2(1 + \text{SNR}_i)$
应用	MIMO 通信	参数估计	目标检测	MIMO 通信
类型	感知		通信	
指标	信号导向的“比”指标			
	杂波噪声比	状态噪声比	峰值旁瓣比	峰值平均功率比
表达式	$\text{CNR} = \frac{P_{\text{clutter}}}{\sigma_m^2}$	$\text{StNR} = \frac{ \text{St}_{k+l} _k}{ \text{St}_{k+l} _k - \text{St}_{k+1} }$	$\text{PSLR} = \frac{ \text{S}_{\text{peak}} }{ \text{S}_{\text{sidelobe}} }$	$\text{PAPR} = \frac{\max s ^2}{E(s ^2)}$
应用	有杂波的雷达	估计和预测	雷达波束成形	正交频分复用通信
类型	感知		通信	
指标	统一通信感知一体化指标			
	总和速率	联合克拉默-拉奥下界	联合太赫兹通信感知一体化指标(待提出)	
表达式	$R_{\text{sum}} = \beta_1 \text{ER}_\theta + \beta_2 C$	$\text{CRB}_{\text{joint}} = (\text{CRB}_\theta^{-1} + \text{CRB}_x^{-1})^{-1}$	$U = U(C, \text{CRB}_\theta; \alpha, v, \mathbf{H})$	
应用	性能折中	性能折中	波束宽度 α , 目标速度 v , 信道矩阵 $\mathbf{H}$	

注: $p(y|x; \theta)$ 表示在参数 θ 下观测值 y 关于 x 的概率密度函数; $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{H}$ 分别表示费希尔信息矩阵和信道矩阵; d_{sen} 、 d_{com} 分别表示感知自由度和通信自由度; SNR 表示信噪比; CRB_θ 、 CRB_x 分别表示参数 θ 和状态 x 的克拉默-拉奥下界; MI 表示互信息; ER_θ 表示估计速率; C_R 表示雷达容量; C 表示香农容量; R_{ach} 表示可达速率; CNR 表示杂波噪声比; P_{clutter} 表示杂波功率; σ_m^2 表示噪声方差; St_k 表示第 k 个状态的信号; PSLR 表示峰值旁瓣比; S_{peak} 表示峰值信号; S_{sidelobe} 表示旁瓣信号; PAPR 表示峰值平均功率比; E 表示能量期望值; R_{sum} 表示总和速率; β_1 、 β_2 表示加权系数; α 表示波束宽度; v 表示目标速度; $\mathbf{H}$ 表示信道矩阵。

根据构建方向, 上述指标可以分为以下几类。

(1) 面向感知的度量。除了统计理论之外, 克拉默-拉奥下界被认为是雷达领域中使用最广泛的“边界”度量, 它界定了参数估计方差的下限^[15]。对应地, 通