复杂性与不确定性: 无线通信面临的双重挑战

陆建华*, 葛宁, 杜冰

清华大学电子工程系, 清华信息科学与技术国家实验室 (筹), 北京 100084

* 通信作者. E-mail: lhh-dee@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2013-06-13; 接受日期: 2013-09-22

国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2013CB329000) 资助项目

摘要 深空通信、移动通信、军事通信等领域的发展面临新的难题, 其核心挑战之一在于无线通信处理中存在难以克服的各种复杂性与不确定性的问题, 如何实现突破已成为当今无线通信研究的前沿热点. 本文以人工智能、蜂窝无线网络等发展为启示, 介绍了一种基于结构处理的研究视角, 并以无线通信中信息表征和信道编码等环节为例, 在分析复杂性与不确定性问题的基础上, 通过相应的结构处理有效克服无线通信的相关难题, 并探讨了无线通信理论与技术发展的新途径.

关键词 无线通信 复杂性 不确定性 编码 信息结构

1 引言

无线通信发展备受关注, 技术进步充满挑战.

无线通信泛指利用无线电磁波进行的通信. 作为重要的信息传递方式, 无线通信因为其快速、便捷和广泛应用而家喻户晓^[1]. 自 Marconi 成功演示越洋无线电报开始, 历经一个多世纪, 无线通信得到了长足的发展, 现已成为世界各国的支柱产业. 如今, 在任何时间、任何地点实现通信已不再是遥远的梦想. 随着人类对无线通信需求的迅猛增长, 受限的频谱等资源, 以及设备复杂度等制约导致其发展瓶颈日益凸显, 理论与技术的进步充满挑战, 也使得无线通信仍然是当今最为活跃的研究领域之一.

热点关注之一: 传输距离越来越远, 不断挑战通信能力极限.

经过长期发展, 无线通信已从地面常规视距通信拓展到 1000 km 左右的低轨卫星通信、36000 km 的同步卫星通信, 并正在延伸至月球以远的深空 (泛指 2×10^6 km 以远的外层空间)^[2]. 由于无线电信号的强度按传播距离的平方衰减, 远距离传输的大路径损耗致使接收机的信噪比极低^[3], 加之远距离通信的速率需求也在不断增长, 对于通信系统的可靠传输能力带来极大挑战. 例如, 探月卫星到地球的通信传输路径损耗比同步轨道卫星 (GEO) 到地球的通信传输路径损耗大 21 dB^[4]; 探火卫星到地球的通信传输路径损耗比探月卫星到地球的通信传输路径损耗大 60 dB^[4].

为了提升远距离通信能力, 一般采用增大天线口径、增大发射功率、降低接收机噪声温度、提高载波频率、利用高效信道编码技术等措施. 值得一提的是, 信道编码作为一种“软技术”, 可有效克服大口径天线制造等“硬技术”瓶颈难题. 空间数据系统咨询委员会 (CCSDS) 提供了多种信道纠错编码

引用格式: 陆建华, 葛宁, 杜冰. 复杂性与不确定性: 无线通信面临的双重挑战. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 1563–1577, doi: 10.1360/N112013-00070

图 1 美国深空站 70 m 天线传输能力^[7]**Figure 1** The transmission capability of 70 m antenna at goldstone deep space communications complex

方案, 以适应各种不同应用需求, 包含卷积码与 RS 码的级联码、LDPC 码和 Turbo 码, 这些编码在误码率为 10^{-7} 时, 相对于未编码的系统, 能提供大约 7~10 dB 的编码增益^[5,6].

目前, 世界上最大的深空地面站天线是美国直径 70 m 的波束波导 (BWG) 天线^[7], 图 1 为其以传输数据速率与通信距离表征的传输能力. 从图中可看出, 在火星的通信距离附近, 传输数据速率被限制在 Mbps 量级, 如果进行探测距离更远, 传输数据速率将进一步下降, 无法同时满足数据率和传输距离的需求. 随着载人深空探测计划的推进, 通信传输业务将向视频乃至高清视频发展, 速率需求将达到百兆量级.

到 2013 年 6 月, 美国 1977 年发射升空的旅行者 1 号已在太空飞行了 35 年, 距离地球 185 亿公里, 已飞抵太阳系边缘, 但其通信速率只能达到 Kbps 量级. 未来深空通信的距离会更远, 甚至有可能延伸到遥远的太阳系之外, 由此引发的技术挑战更为严峻. 美国宇航局 (NASA) 在 2012 年将深空通信与导航技术和纳米技术等并列为颠覆性创新 (game changing) 技术^[8].

热点关注之二: 业务需求越来越丰富, 宽带无线多媒体通信发展困境凸显.

传统蜂窝无线通信以话音业务为主, 无线互联网以数据业务为主^[1]. 随着物联网^[9]、移动互联网^[10]的发展, 以多媒体为主体的移动宽带数据业务迅速增长. 统计显示, 全球移动宽带数据流量在 2009 年底开始超过话音业务^[11]. 华为公司进一步预测表明, 移动宽带业务流量将在 2010 至 2020 十年间增长 1000 倍^[12]. 无线多媒体业务的迅猛发展对网络带宽的需求增长速度超过了摩尔定律, 网络带宽供求矛盾日趋尖锐. Cisco visual networking index 预测指出, 即使采用 MIMO 等新技术的 4G 演进方案, 2015 年无线通信总带宽仅能满足 1/10 的用户需求^[13]. 容量不足引发的无线多媒体通信容错性和稳定性等难题远比人们想象的更加棘手.

在早期的无线多媒体通信研究中, 多媒体通信与常规的数据通信常不加区分, 其传输方法往往是传统的“多媒体 + 通信”的简单模式, 多媒体信息的表征常忽略不同比特 (bit) 的差异及其相互影响, 导致信道带宽等设计过于冗余, 但整体传输性能并不能得到保证. 在理想无差错传输条件下, Shannon 率 — 失真定理可有效指导多媒体信息压缩编码和译码的设计, 在不同应用条件下获得多媒体传输重建质量与传输效率之间的折中^[14]. 然而, 在无线传输条件下, 压缩多媒体数据内在的相关性使其对传输差错极为敏感. 当传输差错超过一定阈值时, 或处于重要位置的数据出现误码时, 多媒体质量陡然

图 2 无线多媒体通信中的 Cliff Effect 示意图

Figure 2 The illustration of Cliff Effect in wireless multimedia communications

图 3 无线网络的“雪崩效应”示意图

Figure 3 The illustration of “avalanche effect” in wireless network

下降, 会导致 “Cliff effect”^[15], 不再遵循 Shannon 率 — 失真定理, 如图 2 所示. 如何克服无线多媒体通信的 “Cliff effect” 一直是信息与通信工程领域面临的重要挑战^[15~17].

另一方面, 当丰富的宽带业务量超过网络可承载能力时, 无线网络的 “雪崩效应” 将不可避免. “雪崩效应” 源于自然现象, 意指一种突变的过程, 当外界影响超过了临界值后造成大范围的系统崩溃. 如图 3 所示, 用户需求持续增长至超过网络容量 (虚线所示) 时, 网络的承载能力会迅速下降, 直至网络瘫痪. 2009 年 9 月, 3G 版 iPhone 手机在美国上市, App store 应用下载等业务需求陡增, 纽约和旧金山地区的 3G 网络严重过载, 并出现局部瘫痪, 呈现 “雪崩效应”^[18].

热点关注之三: 电磁环境越来越恶劣, 复杂干扰严重制约通信容量.

与有线通信不同, 无线通信电磁波在空中传播, 多个无线通信链路共享频谱资源时会产生相互干扰. 随着无线网络规模不断增长, 无线覆盖小区半径趋于缩小、天线数目趋于增加, 无线频谱资源在不同通信链路上重复使用的密度不断增加, 导致网络链路间的干扰成为制约提升无线网络容量最为突出的瓶颈难题.

例如, 由于移动用户数量的迅猛增长, LTE 等 4G 移动通信系统纷纷采用多天线 (MIMO) 和正交频分复用 (OFDM) 等技术提升网络容量^[1], 但也导致密集网络环境下多点 (多天线) 通信面临复杂干扰消除的难题. 多点通信网络的信道估计和反馈会引入频谱开销, 该开销随节点/天线数的增加而线性增长, 而且用于消除干扰的计算复杂度也随之增加, 反而限制了多点 (多天线) 通信的规模. Gupta 与 Kumar 关于无线网络容量的研究^[19] 引发巨大反响, 研究表明干扰环境下单个节点容量随网络规模的增大而降低. 美国 DARPA 资助 Stanford, MIT, Caltech 和 UIUC 等世界名校联合开展 “FLoWS” 项目, 致力于探索更为有效的复杂无线网络信息论^[20].

现代军事通信面临愈发恶劣的电磁环境^[21]. 跳扩频通信、雷达探测、电磁干扰、电磁攻击等手段多样, 类型繁多, 在空域、时域、频域上密集重叠、动态交迭, 形成了干扰与反干扰共存的复杂电磁环境. 在海湾战争中, 美军首次开启了 “全频域、全时域、全空域” 的电磁频谱权争夺之战. 复杂电磁干扰环境下的军事通信必须克服传输不连续、误码率高、频谱效率低等瓶颈问题^[22]. 美国 DARPA 为此于 2010 年设立课题支持极端电磁环境下的通信研究^[23].

深空通信也面临复杂的电磁环境, 深空探测器在运行过程中会遭遇太阳风、带电粒子、磁暴等各种突发的电磁干扰, 因而信息传输不可避免会出现突发差错. 1976 年美国火星探测由于传输误码等因

图 4 美国火星探测图片出现的“人脸”^[24]

Figure 4 The “face” on Mars

素导致回传的照片出现“人脸”^[24],如图4所示,引起了人们对火星存在文明的种种猜测.美国NASA不得不调整探测计划,从极为珍贵的探测任务中再次安排探测器飞往火星该地区进行探测验证.另外,美国JPL(喷气推进实验室)利用已经发射的近地小行星汇集点探测器NEAR和火星探测器Cassini对太空中的电磁闪烁效应进行了专门的研究^[25].1997年,NEAR在距离地球3.17 AU(AU为天文单位,1 AU = 14960万公里)时,遭遇到了严重的太阳闪烁效应,数据帧的正确率最低降至3%^[25].

2 复杂性与不确定性是无线通信面临的核心难题

无线通信发展中遇到的问题也是现代通信遇到的主要问题.这些问题是长期的发展中积累形成的,已成为阻碍通信进一步发展的难题.主要包括:

- 通信传输由有线(固定)为主发展为无线(移动)主导以后积累的问题;
- 通信业务从语音发展为多媒体以后积累的问题;
- 通信体制从模拟发展为数字以后积累的问题;
- 通信网络从树型网发展为网际网(Internet)、连续数字传输发展为分组传输以后积累的问题.

这些问题导致Shannon信息理论直接应用于无线通信系统设计时存在局限性,这一点在1998年纪念Shannon理论50周年的论文中著名学者Ephremides^[26]就明确指出过.

为探索解决问题的有效途径,还需要从基本问题出发.

2.1 关于复杂性问题

无线通信中的复杂性是指信号与系统分析处理的计算复杂度.复杂性往往可以从两个角度分析:系统的可分解性与处理过程的平稳遍历性.

可分解性意指将复杂系统分解为若干个简单、独立的子系统分别进行研究,进而综合获得整体系统的性能^[27].线性时不变系统作为具有可分解性的经典例子,其输出可以通过冲击响应的加权“叠

加”得到, 因此其设计、优化具备坚实的理论基础. 传统无线通信理论也依赖可分解性假设. 例如, Shannon 的信源信道分离编码定理指出, 如果信源具有独立同分布特性, 且信道是平稳的, 则可以通过分离设计信源编码和信道编码, 达到与联合设计等同的最优结果^[28]. 基于这种分离设计, 在很大程度上简化了通信处理算法的设计和实现复杂度. 但是, 分离编码定理并不总是成立的. 多址访问信道就是一个典型的反例^[28]. 假设一个抽象的多址访问信道是离散叠加无噪声信道, 不少于 2 个信源向同一个信宿发送二进制数据, 信宿的输出就是信源的和. 在此情况下, 独立同分布的信源输入就无法得到最优的互信息量.

无线网络容量求解常面临不可分解复杂性难题. 长期以来, 通信领域的学者试图分析无线网络环境下的容量域, 然而仅仅几类特殊的网络模型有明确的容量表示或者已经找到容量的上下界, 但一般网络模型的容量尚未知晓. 例如, Shannon^[29] 虽然定义了双向信道, 但迄今无人找到一般双向信道的容量表达式. 1971 年, Ahlswede^[30] 提出了多址访问 (多点对一点) 信道的信道容量, 进而广播 (一点对多点) 信道可看作是多址访问信道的对偶模型, 其容量也随后问世^[31]. Cover^[32,33] 进一步研究了中继信道的可达速率和容量界, 这个结果仍是迄今为止最具影响力的容量研究之一. 实际上由于无线网络存在链路间的耦合而无法把网络分解为独立的多条点对点链路, 即具有不可分解性, 迄今为止无线网络容量的研究还是个开放性的问题.

无线通信处理过程的平稳遍历性意味着可利用处理过程 (例如, 业务、信道动态变化过程) 的相似性而采用简化的静态优化方式, 传统系统的优化方法常依赖平稳遍历性假设. 以无线资源分配为例, 经典方法根据业务数据的需求分配可用的信道或网络带宽资源 (频谱资源、时间资源、空间资源等), 并将业务、信道和网络等复杂模型简化为以若干带宽、延时等参数^[28] 描述. 采用该方法的前提是业务和信道具有平稳遍历特性, 其特征参数可通过少量样本在一段时间内的统计平均获得, 以此建立的模型也只适用于稳态单链路和单业务, 其优化算法主要针对局部时域和个别样本.

然而, 移动多媒体业务在带宽、延时、差错率等参数要求上与传统的通信业务差异很大, 无线网络环境下复杂多媒体业务模型很难抽象. 例如, 端到端多媒体服务质量 (QoS) 参数的时空变化规律、多媒体业务在不同时间和空间尺度上的群体分布特征等, 使得面向复杂多业务的网络资源分配实际上是一个多参数复杂动态优化过程, 一方面问题难以分解, 以计算复杂度^[34] 角度来看, 是一个 NP 难问题; 另一方面, 往往具有非平稳与不可遍历性, 无法用统计平均优化求解, 而需要根据业务、资源的动态变化实时求解, 使其复杂性问题更加尖锐.

2.2 关于不确定性问题

不确定性或称随机性. 通信的本质就是处理不确定度的问题、消除不确定性的影响. Shannon 定义了熵作为随机变量不确定度的度量. 例如, 离散随机变量 X 的熵 $H(X)$ 定义为

$$H(X) = - \sum_{x \in \mathfrak{X}} p(x) \log p(x), \quad (1)$$

其中, $\mathfrak{X}$ 是随机变量 X 的取值空间, $p(x)$ 为其概率密度函数 $p(x) = \Pr\{X = x\}, x \in \mathfrak{X}$.

无线通信涉及的不确定性包括信源的不确定性和信道的不确定性.

信源的不确定性, 即信源熵的物理意义表现为通信过程中信源压缩编码速率的下界. Shannon 信源压缩编码定理^[28] 指出, 当信源 $X^n = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 为独立同分布 (假设 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 都与随机变量 Q 的概率分布相同) 时, 则若信源压缩编码速率 $R_S > H(Q)$, 就能以很小的错误概率重建信源

图 5 无线通信的分析模型

Figure 5 An analytical model for wireless communications

X^n . 独立同分布的假设可确保 $2^{nH(Q)}$ 个序列以很大概率表示所有可能的信源序列. 换言之, Shannon 的信源压缩编码定理在信源具有平稳遍历特性的前提下非常奏效, 然而大多数多媒体信源具有非平稳、非遍历特性, 难以满足这一条件.

信道的不确定性主要源自信道噪声、干扰与传播衰落等因素, 以信道容量来度量. 例如, 加性白高斯噪声信道的归一化信道容量为

$$C = \max_{p(x)} I(X; Y) = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P}{N} \right), \quad (2)$$

其中, $p(x)$ 为所有可能的信源输入概率密度分布; $I(X; Y)$ 为输入 X 和输出 Y 之间的互信息量. P 为信号发射功率, N 为噪声功率.

信道所引入的不确定性影响在某种程度上可以通过纠错编码去除. Shannon 给出的信道纠错编码定理称, 传输的信息速率小于信道容量时, 则一定会存在一种信道纠错编码方法, 使得译码差错率趋近于零 [28]. 值得注意的是, 应用该定理的前提条件是信道为平稳随机过程, 且具有遍历特性, 信道编码的码长也要足够长. 然而对于无线信道, 特别是在移动环境下, 时变衰落并不具有平稳遍历特性 [1].

2.3 无线通信的复杂不确定性问题

当复杂性与不确定性问题同时存在时, 我们称之为复杂不确定性问题.

图 5 所示为无线通信的一般分析模型. 其中, 信源表征为非平稳随机序列, 包括多媒体信源经压缩编码后形成的数据; 信道表征为多径传播移动环境等导致的时变衰落随机过程, 并伴以随机噪声、外部突发干扰及系统内由于多用户共享频谱资源形成的复杂干扰.

多媒体信源的复杂不确定性主要体现在其非平稳随机特性. 尤其在网络环境下, 压缩多媒体信源的时间分布规律具有非平稳性, 难以保证渐进等分特性, 利用数量为 $2^{nH(Q)}$ 的典型序列难以遍历所有序列, 错误概率的下界难以确定 [28]. 此外, 无线多媒体传输的率-失真函数也只针对少数具有特定分布的信源 (例如, 高斯信源, Bernoulli 信源) 才有闭合表达式 [28].

无线信道的复杂不确定性主要源自随机噪声、非平稳衰落, 以及多用户共享频谱资源形成的复杂干扰的综合影响. 无线移动环境中的多径、散射、反射、阴影等引起的衰落是随时间动态变化的随机

图 6 “边界效应”示意图

Figure 6 An illustration of the “diminishing marginal utility”

过程, 具有不可遍历性, 实测也只能得到有限样本; 另一方面, 移动环境中多普勒干扰造成频率串扰、时延扩展造成码间串扰、多径传播造成空间耦合干扰, 而多节点、多链路共享频谱资源将带来更为复杂的空域、时域、频域高维度干扰, 难以通过常规的简单统计模型来刻画 [19,35].

由于无线通信的复杂不确定性常涉及非平稳、非遍历与多元随机过程, 其概率分布、统计特性又极为复杂, 难以建立有效的分析模型. 那么如何实现突破, 寻找有效的处理方法呢?

经典通信理论以比特 (bit) 为信息处理单位, 这往往依赖于独立同分布等平稳遍历的假设来简化信源或信道的概率描述, 是基于一种“统计平均”的处理方法. 另一方面, 对于周期性的非平稳随机过程, 人们提出循环平稳 (Cyclostationary) 的概念, 在周期的颗粒度上研究随机过程, 可找到统计特性相对周期的不变性. 但是, 无线通信中多媒体信源、耦合干扰信道中的复杂不确定性往往并不遵循循环平稳假设. 实际上, 这种基于比特、周期等固定颗粒度的平稳遍历处理方法不足以应对无线通信发展中的许多问题. 受此影响, 无线通信的多业务宽带化技术演进已受到“边界效应”¹⁾的制约. 如图 6 所示, 即使大幅度增加无线资源利用的优化成本, 容量的增加却非常有限.

有效解决无线通信的复杂不确定性问题或需要另辟蹊径.

3 一种基于结构的研究方法

3.1 相关的研究启示

人工智能领域的专家系统是一类具有专门知识和经验的计算机智能程序系统, 模拟通常由领域专家才能解决的复杂问题. 早期的专家系统主要基于经验推理, 用于处理复杂的但往往是确定性的问题. 另一方面, 当数据不精确或信息不完整, 比如在诊断、预测、规划等任务中, 不确定性也是其重要特征, 这时也将面临复杂不确定性的问题.

美国 UCLA 教授 Judea Pearl 成功地引入概率图模型 (probabilistic graphical models, PGM)^[36] 作为分析高维关联信息的有效工具以刻画人工智能中数据的结构特性, 从而有效处理复杂系统中的不确定性影响. 由于这一杰出贡献和其他相关成果, Pearl 教授获得 2011 年图灵奖. 值得注意的是以概率图表征的结构成为解决复杂不确定性问题的关键模型之一.

1) “边界效应”源于经济学的概念, 意指单一品种投资的后期收益空间越来越小, 趋于饱和

图 7 信息结构作为通信微观处理与宏观体验的桥梁

Figure 7 Information structure bridges microscopic processing and macroscopic experience

无线移动网络的发展得益于蜂窝网络. 蜂窝网络将服务区域划分为蜂窝小区, 每个小区建设一个基站, 覆盖服务小区内的移动用户, 小区间通过频谱资源复用有效解决频谱资源短缺的问题, 同时由于用户和基站距离较近, 还解决了终端用户功率受限的问题. 蜂窝网络作为贝尔实验室影响世界通信技术的十大发明之一^[37], 自上世纪 90 年代起, 开始广泛应用, 至今仍是无线通信网络的主导架构.

蜂窝网络通过引入覆盖小区结构有效解决了大容量无线网络系统的复杂不确定性问题. 试想如果没有蜂窝划分, 用户通过共享有限的频谱资源进行通信, 将会面临极其复杂的干扰环境, 无线移动通信将难有如今繁荣发展的局面! 采用蜂窝结构, 有效控制了通信干扰的影响范围, 将复杂的通信问题局限在一个一个小区内而得到解决, 从而也说明在无线网络系统的规划中, 结构化的处理方法非常有效.

在生物学领域, 基于结构的研究方法起了至关重要的作用. 直接研究细胞是困难的, 而通过研究碳、氢、氧、氮等基本原子来研究细胞也是困难的, 因为这些基本原子的组合形态极其繁多几乎无法穷尽. 后来人们发现了具有大分子结构的氨基酸, 标准氨基酸只有 20 多种, 由此研究蛋白质、DNA, 乃至细胞就大为简化^[38]. 可见大分子结构的研究具有里程碑式的重要意义.

在力学、数学等其他研究领域还有类似例子^[39,40]. 由此看来, 结构是从微观分析预测宏观特性的有效中间层次, 可为复杂乃至复杂不确定性的问题研究提供一种新的视角.

那么针对无线通信中的复杂不确定性问题, 能否引入一种或若干种结构, 使得宏观的通信视听觉体验可从微观的比特处理性能推导分析出来? 如图 7 所示, 这类结构将是一种信息结构, 与常规的比特不同, 它或是一组相互紧密关联的比特, 或是承载一组比特的信号结构. 尝试通过信息结构这一中间层次以解决无线通信面临的难题或将开启一个新的途径.

3.2 一种结构化的多媒体信息表征与处理方法

无线多媒体通信同时面临 (压缩) 多媒体信源及无线信道的复杂不确定性. 由于无线信道的复杂不确定性影响, 导致多媒体数据在传输过程中会产生差错. 传统无线传输将多媒体数据看做“比特流”处理, 并不特别注重保护多媒体信息经变长及相关编码形成的动态结构. 这样, 无线传输中的差错一旦破坏动态结构, 将导致多媒体接收质量严重恶化, 以图 8 所示的图像传输为例, 这种现象有时被称为“峭壁 (cliff effect)”效应^[15]. 由于这种峭壁效应, 传统的基于比特处理的方法常面临带宽效率难以提高、质量难以控制等瓶颈问题.

能否通过基于结构的研究跳出传统的基于比特处理的理论框架?

文献 [41] 提出了基于最小数据单元 (MDU) 的信息结构化表征方法. MDU 对应一组相关比特, 如图 9 所示, 假设一个 8×8 像素的图像块经压缩编码后的数据, 是一种信息结构, MDU 之间以特征标

图 8 基于比特处理的无线图传示例

Figure 8 An illustration of bit-level processing in wireless image transmission

图 9 最小数据单元 (MDU)

Figure 9 Minimum data unit (MDU)

图 10 基于比特与基于 MDU 传输处理的变化特性比较

Figure 10 A comparison of the variation characteristics between bit-based and MDU-based processing

记分隔。

那么这种基于 MDU 的信息结构化表征与传统的基于比特的信息表征有何不同及优势呢? 在实时多媒体传输条件下, 采用基于比特的表征方法, 多媒体数据因常涉及变长编码, 其以比特速率度量的业务速率呈现复杂的动态变化²⁾(图 10(a)), 因而基于比特同步的传输过程难以保证多媒体数据内在的动态结构不被破坏, 造成传输质量难以控制。而采用基于 MDU 的结构化表征方法, 以 MDU 速率度量的业务速率呈现平稳特性(图 10(b)), 借助特征标记等同步传输过程可以针对多媒体数据的动态结构进行有效的差错控制。

换言之, 基于 MDU 的信息表征可将传统的基于比特的动态非平稳多媒体信息传输处理转变为基于 MDU 结构的平稳信息传输处理。因此, 如果以 $Er(MDU)$ 表示 MDU 的传输差错率, 则可以建立 $Er(MDU)$ 与多媒体失真度之间的度量关系。文献 [41] 同时还给出了无线信道条件下 $Er(MDU)$ 的定量计算方法, 从而可以构建无线信道动态差错及分布与多媒体传输失真度的计算关系, 如图 11 所示。该计算关系可以有效指导无线多媒体通信的信源信道编码设计, 并以此发展有效的编码处理方法。

2) 此处假设放松信道带宽的约束

图 11 无线信道动态差错分布与多媒体传输失真度的计算关系

Figure 11 The relationship between dynamic channel error distribution and multimedia transmission distortion

图 12 无线多媒体传输块乱置及差错隐藏技术效果示意图

Figure 12 The illustration of block shuffling and error concealment in wireless multimedia transmission. (a) The received image with burst error, PSNR=17.31 dB; (b) the received image with bit-interleaving, PSNR=14.41 dB; (c) the received image with block-shuffling, PSNR=19.54 dB; (d) image (c) after error concealment, PSNR=30.53 dB

文献 [42] 介绍了一种用于移动图像传输的基于结构处理的联合信源信道编码及差错隐藏算法. 无线通信的随机突发差错常导致连续的块 (编码后为 MDU) 差错. 如图 12(a) 所示, 黑色的条块表示由于 MDU 连续差错导致不能正确译码的图像信源. 若采用传统的基于比特交织抗突发差错的信道白化处理方法, 传输差错将被分散到更多的块, 反而导致更多的差错, 如图 12(b) 所示, 接收端即使采用复杂的差错恢复算法, 也很难得到高质量的图像. 而基于结构处理, 采用基于 MDU 的图像块置乱技术, 即在信源编码前将编码块 (如 8×8 , 16×16 像素等) 按空间位置置乱, 而在接收端译码前恢复原来的空间位置, 使出错的信源块在图像数据中分散分布, 如图 12(c) 所示. 在接收端利用基于 MDU 相关性的差错隐藏技术^[43], 可较好地消除差错的影响, 如图 12(d) 所示. 在常规 GSM 移动信道仿真条件下, 图像接收质量的峰值信噪比 (peak signal noise ratio, PSNR) 可以得到较大提升.

图 13 常规 LDPC 矩阵示意

Figure 13 Conventional LDPC matrix

3.3 一种结构化的随机编码方法

纠错编码是克服通信信道复杂不确定性的有效方法之一. 按经典编码理论, 纠错编码的设计要确保码长足够长、编码生成矩阵要足够随机. 码长足够长保证了冗余性, 而随机化则能将突发差错等不同类型的差错白化, 一般来说编码矩阵的构造越随机, 抗差错性能越好.

低密度奇偶校验 (LDPC) 码是性能接近理论极限的随机编码技术. 与采用简单编码多项式的卷积码、RS 码、Turbo 码等相比, LDPC 码是一种基于大型稀疏随机矩阵的分组码, 其主要难点之一在于其构造机理复杂, 常规的 LDPC 矩阵规模为数千行 $\times$ 数千列. 如图 13 所示, 矩阵中的元素为比特, 每行每列比特“1”的个数很少, 且其位置随机, 使得编码矩阵呈现稀疏随机特性. 由于稀疏随机矩阵与编码性能之间的关系难以刻画, 高性能 LDPC 矩阵的优化设计尚无成熟的构造理论可供遵循, 往往主要依赖计算机搜索.

为了搜索性能优异的 LDPC 矩阵, 常常需要遍历矩阵中比特元素的各种分布可能性, 最优构造时间将难以承受. 实际上, 这种基于比特元素的构造方法往往使得最优编码搜索成为 NP 难问题.

能否用结构的方法构造超大稀疏的随机矩阵呢? 或者说能否用一种简单的结构构造生成大型的复杂结构?

图 14 所示为一个简单的分形变换示意, 它利用二叉树生成复杂树. 受此启发, 文献 [44] 提出了“伽罗华域随机扩展”的级联构造理论和设计方法, 如图 15 所示. 该方法的基本思想是将基于比特元素的构造转换为一种基于“子矩阵”结构的构造. 首先构造一个基于伽罗华域 (GF) 参数表征的伪随机子矩阵, 以此子矩阵为基本结构通过改变 GF 参数得到不同的子矩阵, 进而根据基矩阵递进扩展构造出完整的 LDPC 编码矩阵. 由此 GF 子阵扩展形成的 LDPC 编码可具有高性能和低复杂度的特点. 这种基于“子矩阵”结构的构造方法可使得 LDPC 编码由通常的大规模计算搜索转变为规律性的构造设计, 而且所设计的编码性能好、实现复杂度低. 基于相关技术方法研制出的星载 LDPC 编码器, 应用于探月卫星, 是探月工程嫦娥二号任务的主要技术创新之一.

3.4 更多的问题与发展机遇

随着宽带无线通信、移动互联网等技术领域的飞速发展, 未来无线网络将面临有限的系统容量难以支撑大规模移动宽带服务等核心难题. 无线网络是众多节点与无线链路的集合, 单纯从传输角度研

图 14 简单的分形变换示意

Figure 14 An illustration of fractal transformation

图 15 结构化 LDPC 随机矩阵设计方法

Figure 15 An illustration of the design method of structural LDPC random matrix

究的局限性在于点对点的通信难以直接反映无线网络的服务容量及影响服务容量的复杂因素, 需要从网络及网络服务能力的角度开展研究, 但面临大规模无线网络干扰复杂性及宽带服务局限性的难题.

国家 973 项目“多域协同宽带无线通信基础研究”^[45] 针对电磁环境在时、频、空等多域的复杂耦合干扰等影响, 试图在复杂变化的电磁环境中找到相对不变的多域结构特征, 以此建立有效克服多域间耦合干扰的技术途径, 取得了初步的研究成果. 如何突破以现有技术为基础的链路分离、网络分层的无线网络架构, 从根本上大幅提升无线网络服务能力, 仍然是无线网络研究的重大挑战. 基于结构的研究方法或能大显身手.

此外, 大数据的复杂性给信息处理学科的理论基础和方法带来了极大的挑战. 针对大数据处理挑战, 挖掘利用大数据中蕴含的空间结构、语义概念之间的关联结构以及多数据源结构等, 发展基于结构处理的方法将为大数据的智能处理提供新的契机^[46].

4 小结

复杂性与不确定性既是无线通信面临的挑战, 也是计算机、控制等其他信息科学领域中的重要问题, 通过对其本质问题与规律的不断探索, 将为信息科学与技术的发展提供新的研究视角与理论和技术方法. 无线通信领域的基础研究方兴未艾, 以结构的视角将有助于探索新的发展途径, 也将面临新的机遇和挑战.

致谢 在本文的撰写过程中, 清华大学电子工程系朱雪龙教授提出了许多有益的修改意见, 作者在此表示诚挚的谢意.

参考文献

- 1 Tse D, Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communication. 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 1–6
- 2 Xiao S, Li Y, Bai B, et al. The key technologies of deep space communications. China Commun, 2006. 12: 82–94
- 3 Zhang G, Xie Z, Bian D, et al. A survey of deep space communications. J Elect, 2011, 28: 145–153
- 4 Wu W R, Dong G L, Li H T. Engineering and Technology of Deep Space TT&C System. 1st ed. Beijing: Science Press, 2013. 1–18 [吴伟仁, 董光亮, 李海涛. 深空测控通信系统工程与技术. 第一版. 北京: 科学出版社, 2013. 1–18]
- 5 CCSDS. TM Synchronization and Channel Coding - Summary of Concept and Rationale. Information Report. CCSDS 130.1-G-1. Washington: CCSDS, 2006
- 6 CCSDS. Low Density Parity Check Codes for Use in Near-Earth and Deep Space Applications. Experimental Specification. CCSDS 131.1-O-2. Washington: CCSDS, 2007
- 7 Preston B, Deutsch L, Geldzahler B. A Vision for the Next Generation Deep Space Network. NASA Jet Propulsion Laboratory, 2006
- 8 NASA. Crosscutting Space Technology Development. Mission Directorate: Space Technology Report, 2012
- 9 Gluhak A, Krco S, Nati M, et al. A survey on facilities for experimental internet of things research. IEEE Commun Mag, 2011, 49: 58–67
- 10 Geng W, Talwar S, Johnsson K, et al. M2M: from mobile to embedded internet. IEEE Commun Mag, 2011, 49: 36–43
- 11 Wu H Q. Great Challenges in the Development of Communication Networks. The Lecture of Chinese Academy of Engineering. 2011 [邬贺铨. 通信网络发展的重大挑战. 中国工程院学术报告. 2011]
- 12 Huawei. SingleRAN@Broad-Solution. Broadband World Forum 2010. 2010 [华为公司. SingleRAN@Broad 解决方案. Broadband World Forum 2010. 2010]
- 13 Cisco-White Paper. Cisco Visual Networking Index Forecast for 2008–2013. 2008
- 14 Sullivan G J, Wiegand T. Rate-distortion optimization for video compression. IEEE Sig Proc Mag, 1998, 15: 74–90
- 15 Goyal V K. Multiple description coding: compression meets the network. IEEE Sig Proc Mag, 2001, 18: 74–93
- 16 Comas D, Singh R, Ortega A, et al. Unbalanced multiple-description video coding with rate-distortion optimization. EURASIP J Appl Sig Proc, 2003, 2003: 81–90
- 17 Pradhan S S, Puri R, Ramchandran K. N-channel symmetric multiple descriptions-part I: (n, k) source-channel erasure codes. IEEE Trans Inf Theory, 2004, 50: 47–61
- 18 Goldman D. AT&T: The most hated company in iPhone land. <http://money.cnn.com/2009/12/29/technology/att/index.htm>
- 19 Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks. IEEE Trans Inf Theory, 2000, 46: 388–404
- 20 The FLoWS project, 2007. <http://www.mit.edu/~medard/itmanet>
- 21 Liu W, Luo P C. Complex electromagnetic environment effects on the modern war and its countermeasures. Nat Def Sci Tech, 2007, 11: 71–76 [刘伟, 罗鹏程. 复杂电磁环境对现代战争的影响及对策. 国防科技, 2007, 11: 71–76]
- 22 Luo G J, Cao Z Y. Communication jamming efficiency evaluation to link16 datalink. Elect Warf, 2006, 2: 007
- 23 DAPAR Strategic Technology Office. Communications Under Extreme RF Spectrum Conditions(CommEX). DARPA-BAA 10-74. 2010
- 24 NASA. Viking News Center. Caption of JPL Viking Press Release P-17384(35A72). 1976
- 25 Morabito D D, Shambayati S, Finley S, et al. The cassini May 2000 solar conjunction. IEEE Anten Propag, 2003, 51: 201
- 26 Ephremides A, Hajek B. Information theory and communications networks: an unconsummated union. IEEE Trans Inf Theory, 1998, 44: 2416–2434
- 27 Hao B L. The description of complexity and “complexity science”. Science, 1999, 51: 3–8 [郝柏林. 复杂性的刻画与“复杂性科学”. 科学, 1999, 51: 3–8]
- 28 Cover T M, Thomas J A. Elements of Information Theory. 2nd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2012. 1–82
- 29 Shannon C E. Two-way communication channels. In: Proceedings of the 4th Berkeley Symposium of Mathematical Statistics and Probability, Oakland, 1961. 611–644

- 30 Ahlswede R. Multi-way communication channels. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory, Ann Arbor, 1971. 23–52
- 31 Cover T M. Broadcast channels. IEEE Trans Inf Theory, 1972, 18: 2–14
- 32 van der Meulen E C. Three-terminal communication channels. Adv Appl Probab, 1971, 3: 120–154
- 33 Cover T, Gamal A E. Capacity theorems for the relay channel. IEEE Trans Inf Theory, 1979, 25: 572–584
- 34 Fortnow L, Homer S. A short history of computational complexity. Bull EATCS, 2003, 80: 95–133
- 35 Franceschetti M, Dousse O, David N C, et al. Closing the gap in the capacity of wireless networks via percolation theory. IEEE Trans Inf Theory, 2007, 53: 1009–1018
- 36 Pearl J. Reverend Bayes on inference engines: a distributed hierarchical approach. In: Proceedings of the American Association of Artificial Intelligence National Conference on AI, San Francisco, 1982. 133–136
- 37 Alcatel Lucent. Bell Labs Top 10 Innovations. http://www3.alcatel-lucent.com/wps/portal/!ut/p/kcxml/04_Sj9SPyk-ssy0xPLMnMz0vM0Y_QjzKLd4w3MXMBSYGYRq6m-pEoYgbxjgiRoNS8-PJyFV-P_NxUfW_9AP2C3NCIckdHRQC-ClF21/delta/base64xml/L3dJdyEvd0ZNQUFzQUMvNEIVRS82X0FfNDZL
- 38 Chinabaike. Biology. <http://www.chinabaike.com/article/baike/wli/2008/200801101128086.2.html> [中国百科网. 生物学. <http://www.chinabaike.com/article/baike/wli/2008/200801101128086.2.html>]
- 39 Hartmanis J, Stearns R E. Algebraic Structure Theory of Sequential Machines (Prentice-Hall International Series in Applied Mathematics). Ann Arbor: Prentice-Hall, 1966. 1–211
- 40 Kaveh A. Structural Mechanics: Graph and Matrix Methods. New York: Research Studies Press, 1995. 1–422
- 41 Lu J H, Letaief K B, Liou M L. Robust video transmission over correlated mobile fading channels. IEEE Trans Circ Syst Vid Tech, 1999, 9: 737–751
- 42 Lu J H, Liou M L, Letaief K B, et al. Mobile image transmission using combined source and channel coding with low complexity concealment. Sig Proc: Image Commun, 1998, 12: 87–104
- 43 Lu J H, Liou M L, Letaief K B. Efficient image transmission over wireless channels. In: Proceedings of 1997 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'97), Ann Arbor, 1997. 1097–1100
- 44 Lu J H, Yin L G, Pei Y K. The coding method of short code-length low-density parity-check code. Patent, ZL 200910077183.6, 2004 [陆建华, 殷柳国, 裴玉奎. 极短码长低密度奇偶校验码的编码方法. 发明专利, ZL 200910077183.6, 2004]
- 45 The Project of the National Basic Research Program (973 Program). The Fundamental Research on Multi-Domain Collaboration for Broadband Wireless Communications. 2007CB310600, 2007 [国家重点基础研究发展规划 (973) 项目. 多域协同宽带无线通信基础研究. 2007CB310600, 2007]
- 46 Fisher D, DeLine R, Czerwinski M. Interactions with big data analytics. ACM Interact, 2012, 5: 50–59, Cover story

Complexity and uncertainty: wireless communications face dual challenges

LU JianHua*, GE Ning & DU Bing

Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

*E-mail: lhh-dee@tsinghua.edu.cn

Abstract One of the fundamental challenges faced by new developments in Deep Space Communications, Mobile Communications and Military Communications is the detrimental effects of complexity and uncertainty which inevitably arise in wireless communication processing. The solution to this problem has become a hot-spot for the state-of-the-art research in wireless communications. Inspired by developments in artificial intelligence and cellular networks, this paper introduces a promising research paradigm based on structural processing. By appropriately utilizing structural processing based on the analysis of the effects of complexity and uncertainty,

the bottlenecks in wireless communications might be overcome, opening new avenues to wireless communication theory and technology advancements. The effectiveness of the proposed paradigm is demonstrated by examples from problems typically encountered in wireless communications, such as information representation and channel coding.

Keywords wireless communications, complexity, uncertainty, coding, information structure

LU JianHua received the B.S.E.E. and M.S.E.E. degrees from Tsinghua University, China, in 1986 and 1989, respectively, and his Ph.D. in Electrical & Electronic Engineering from the Hong Kong University of Science & Technology. Since 1989, he has been with the Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, China, where he now serves as a Professor. His current research interests include

broadband wireless communication, multimedia signal processing, and wireless networking. He is a Senior Member of the IEEE Communication Society and the IEEE Signal Processing Society, and a chief scientist of the National Basic Research Program (973), China.

GE Ning received his B.S. degree in 1993, and his Ph.D. in 1997, both from Tsinghua University, China. From 1998 to 2000, he worked on the development of ATM switch fabric ASIC in ADC Telecommunications, Dallas. Since 2000, he has been with the Department of Electronics Engineering at Tsinghua University, where he is a professor and serves as Director of Communication Institute. His research interests include

ASIC design, short range wireless communication, and wireless communications. He is a senior member of CIC and CIE, and a member of the IEEE.

DU Bing received her B.S. degree in 2002, and Ph.D. degree in 2009 from Beijing University of Aeronautics and Astronautics, China. Since then, she has been with the Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, where she is currently an Assistant Researcher. Her research interests mainly focus on wireless communications, network coding, and cooperative communications.