信息通信网络的内涵及发展趋势

李建东, 张琰*, 盛敏, 杨春刚

西安电子科技大学通信工程学院, 西安 710071

* 通信作者. E-mail: yanzhang@xidian.edu.cn

收稿日期: 2019-02-26; 接受日期: 2019-04-19; 网络出版日期: 2019-08-02

国家自然科学基金 (批准号: 91638202, 61725103) 资助项目

摘要 本文回顾了信息通信网络的发展历程, 阐述了对信息通信网络内涵的基本理解, 重新审视了信息通信网络发展的基础理论及其变化特征与趋势, 重点分析了信息通信网络资源维度拓展的新方向及其面临的重要挑战, 挖掘了多维资源协同管控的新增益, 同时讨论了数据、网络、智能三者之间的耦合关系与关键技术, 为信息通信网络向全频谱、全空间、全智能方向发展提供了参考。

关键词 信息通信网络, 资源新维度, 协同资源管理, 智能通信

1 引言

歌德曾经说过: “一门科学的历史就是这门科学本身”, 信息通信网络技术亦是如此。早在古代, 人们就寻求各种方法实现信息的传输。我国古代利用烽火传送边疆警报, 古希腊人用火炬的位置表示字母符号, 这种光信号的传输构成了最原始的光通信系统。利用击鼓鸣金报送时刻或传达命令, 后来又出现了信鸽、旗语等传送信息的方法。然而, 这些方法无论是在距离和速度方面, 还是在可靠性和有效性方面都没有明显的改善。19世纪人们开始研究如何用电信号传送信息。1837年莫尔斯 (Morse) 电码诞生, 1876年贝尔 (Bell) 发明了电话, 实现了声信号转变为电信号并沿导线传送, 真正意义上的模拟通信与网络诞生。20世纪20年代起有线通信网络开始逐步建设, 后续几十年间, 电信号的频分多路, 数字有线通信等技术的成熟与应用有效推动了全球公共电话网络的建设, 数字化通信与网络成为主导。

20世纪70年代玻璃光纤的研制成功具备了跨时代的意义, 极大地推动了通信网络容量的提升, 也成为了之后互联网技术发展的重要基础。同期, 地球同步轨道通信卫星的发射成功也为人类提供了新的通信手段。同样是在这个时期, 第1代商用移动通信系统的雏形诞生, 其主要采用模拟和频分多址技术, 仅能满足一般质量模拟语音的通信要求, 但这也迈出了无线通信技术走向实际应用的重要一步。随着历史的车轮推进到了20世纪末21世纪初, 无线通信技术也得到了爆炸式的发展, 不仅完成了由无线模拟时代向无线数字时代的蜕变, 而且针对各种不同应用场景所形成的新技术和新标准也如

引用格式: 李建东, 张琰, 盛敏, 等. 信息通信网络的内涵及发展趋势. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 949–962, doi: 10.1360/N112019-00045
Li J D, Zhang Y, Sheng M, et al. Concepts and trends of information communication networks (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 949–962, doi: 10.1360/N112019-00045

图 1 (网络版彩图) 信息通信网络的内涵
Figure 1 (Color online) The connotation of information communication network

雨后春笋般涌现, 呈现了无线广域网、无线城域网、无线局域网和无线个域网齐头并进的盛况. 20 余年间, 无线蜂窝网络经历了支持 9.6 kbps 低速话音业务, 以 GSM, IS-95 系统等为代表的第 2 代数字移动通信系统; 走过了支持 160 kbps 速率的第 2.5 代通用分组无线业务系统 GPRS; 迎来了最大传输速率达 2 Mbps, 基于码分多址技术的第 3 代移动通信系统, 如 TD-SCDMA, WCDMA 和 CDMA2000; 迈向了 3G-LTE, 以及无限接近能够支持 G 比特传输的第 4 代无线通信系统^[1]: IMT-Advanced, 而 3GPP R15 版本标准的冻结也宣告了 5G 商用时代的开启^[2]. 此外, 作为承载的室内数据业务的主体, WIFI 技术的发展更是如火如荼^[3]. 目前已大规模应用的 IEEE802.11n 已经能够提供 300 Mbps 甚至 600 Mbps 的传输速率, 同时 IEEE802.11ac, IEEE802.11ad, IEEE802.11ax 等标准也不断推出, 甚至可以为用户提供 10 Gbps 的传输能力, 进而给人们带来了更为酣畅淋漓的无线网上冲浪体验. 最后, 一系列 WPAN 主流技术如 Bluetooth, ZigBee, UWB 等^[4], 其发展看似波澜不惊, 实际却是暗潮涌动, 尤其随着物联网的概念一步步深入人心, 这类技术的上升空间更是不可限量. 正因为此, NB-IoT, eMTC 等蜂窝物联网标准也不断落地开花^[5]. 而在这背后的 IP 化成为了人、机、物互联的重要基础, 但随着 IP 网络诸多弊端的暴露, 后 IP 化网络的呼声与研究不断壮大, 蓬勃发展.

信息通信网络技术的发展经历了超过百年的风雨历程. 如今, 已经犹如空气和水一样, 自然而深刻地融入到人们的日常生活及工作之中, 极大增强了人类驾驭世界的能力, 也已成为一股推动人类社会变革的巨大力量, 然而仍需进步深入思考其本质内涵与发展趋势, 为信息通信网络的发展注入新的动力.

2 信息通信网络的内涵理解

信息通信网络的发展历程不断影响和塑造着其内涵, 但最为直观的分析可以看到: 信息、通信与网络是构成信息通信网络的三大主体, 对三者的理解及其相互作用关系形成了信息通信网络的基本内涵. 如图 1 所示, 信息是基础, 它描述了物理世界的存在状态及变化情况; 通信是桥梁, 它实现了信息的时空转移; 网络是升华, 它构建了信息的高效共享结构, 并赋予了信息其本身以外的新价值. 信息通信网络已经成为了人类认知与改变世界的重要工具, 将虚拟世界与现实世界深度耦合, 同时也是万物互联的基础, 建立了人与人、人与物、物与物相互可理解, 可作用的通道, 同时逐渐成为了改变人与物存在及发展状态的关键因素.

3 信息通信网络基础理论重审视

3.1 香农 (Shannon) 三问

香农信息论是支撑信息通信网络发展的坚实理论基础,在1949年香农出版的专著中就提出了信息通信的3个基本问题^[6]:

(1) 如何可以准确地传输通信符号?这也是信息通信网络学科构建的基础,目前在无数科学家和工程师的共同努力下完成了传统模拟通信向数字通信的转变,同时性能也逼近了香农的理论极限.当我们重新审视数字通信和模拟通信时,不难发现:数字通信抗干扰能力强、易纠错、易中继、易构建综合数字通信网,可支持综合业务的统一传输与交换,数字通信也成为了信息通信网络发展的重要基石.反观模拟通信其带宽占用少、系统结构简单、不引入量化误差,但由于其传输容量有限已逐渐淡出人们视线.在香农极限不断被逼近的今天,我们需要重新审视自然界中的通信,它们均是由模拟通信占主导的,通信容量虽小但自然界中的通信往往是有记忆、螺旋式上升的,而现有的数字通信往往是无记忆的,这一差别让人类发明创造的数字通信网络在某些应用中似乎还没有超越自然,例如鱼群、狼群、蜂群等自然界中典型的集群智能系统是目前研究的热点,这也成为信息通信网络突破的重要方向.

(2) 如何使传输的符号精确地传达所期望的含义?这里主要强调了语义传递的问题,现有的信息通信网络中所传递的均为机器语义,仅仅是没有思想的线性映射,最为典型的是数据链系统,其中广泛应用了以若干bit来代替语义信息的方式来完成指控、态势等语义信息的传递.但在当下的信息通信网络中信息背后的真正语义往往是时间和空间的非线性函数,以2018年爆发的疫苗事件为例,普通的适龄儿童注射疫苗图片被广泛传播,其所携带的语义在此刻指数增长,已远远超出了图片可量化的信息本身,此时信息背后的语义多元而丰富.因此,语义的准确描述与建模应充分考虑时空及环境因素,将传统的线性映射转变为时空信息的累积同时考虑环境的随机触发特征.

(3) 如何使收到的信息及含义有效地影响行为?这一层面主要是描述了信息的作用与效用问题,也强调了信息通信在时间和空间上对人与物的影响.在人工智能飞速发展的今天,重新审视该问题,信息通信网络的研究应更加关注信息通信在时间和空间上的累积效应,通过智能和信息的有机结合,引导人和物产生长期的正确的行为与响应.仍然以疫苗事件为例,信息的快速传播对整个事件起到了巨大的推动作用,快速查明了25万支问题疫苗的流向,使得涉及到的企业与人员得到应有的惩罚.与此同时也让人们更加关注信息的可信性与安全性,这也是区块链等新兴技术与应用不断拓展的契机.

3.2 信息通信网络理论待突破

香农为点对点的信息通信构建了完善的理论基础,但网络化的信息通信始终缺乏基本理论的有力支撑,需要从基础理论、技术进步与用户需求3个维度共同进行突破:网络本体如何设计,如何实现,如何使用的关键技术问题,如图2所示.当前移动互联网作为发展最快的信息通信网络就是有机结合了上述3个方面,也成为我国万亿级经济支柱产业之一.

移动互联网的发展历程已经经历了两个关键阶段,第1阶段是移动通信网络从传统语音通信向数据通信迈进,打破了移动通信网络封闭的状态,在其核心网处与互联网有了互通的接口,实现了传统互联网与移动网络的初次接触;而随着4G时代的来临,移动网络与互联网已从简单的互联互通迈向了深度耦合,移动网络在其接入侧引入了互联网的入口.移动互联网进入第2个关键阶段:以全IP化实现了数据表述的统一与信息分发的融合;随着无线网状回程、终端直通等无线传输技术的发展,未来移动互联网络将会进入第3个发展阶段,实现智能终端的互联互通,如图3所示.

图 2 (网络版彩图) 信息通信网络突破的三大关键因素

Figure 2 (Color online) Three key factors for the breakthrough of information communication network

图 3 (网络版彩图) 移动互联网能力与特性的发展

Figure 3 (Color online) The development of mobile Internet capabilities and features

在移动互联网不断发展、演进的过程中, 其承载、存储、计算能力不断提升, 且移动终端日益智能化, 使得移动互联网技术及其应用进入了爆发期. 然而, 由于其用户的规模性、移动性、业务的海量性、多样性, 以及无线接入网络的异构性、密集性, 使得移动互联网的信息分发无法保证大容量、低时延及高可靠的服务质量需求. 因此, 亟待分析移动互联网信息分发理论与传统互联网信息分发理论的本质差异, 从而指导移动互联网信息的智能分发, 使移动互联网从传统的“信息传递”向未来的“智能分发”演进, 实现“无处不在的网络, 无所不能的业务”.

与传统互联网络相比, 移动互联网在网络结构、节点属性、干扰特征等方面发生了巨大的变化, 这些变化不仅直接影响了移动互联网中信息的传播动力学机理, 改变了网络的信息承载能力, 而且还会进一步影响网络中信息智能分发方法的设计, 具体而言:

首先, 移动互联网的网络结构特征产生了本质变化. 传统互联网的拓扑结构具有较为直观的树状

图4 (网络版彩图) 移动互联网网络结构的变化

Figure 4 (Color online) Changes in mobile Internet network structure

特性,即由根服务器到中间网络节点再到终端节点树状结构.基于该结构特征,Barabasi 和 Albert^[7]于1999年在*Science*上揭示了传统互联网的“无标度性”,创造性地提出了传统互联网自我演化为无标度网络的两条基本原则:增长性和度优先连接性,准确描述了传统互联网连接数会不断增长且会优先关联“度”较大中心节点的特征,同时连接关系一旦确定将很少发生变化,从而形成了“富人俱乐部”效应^[8],从而决定了传统互联网中节点“度”越大对网络的信息分发越关键,这也奠定了传统互联网发展及其传播动力学的理论基础.然而,在移动互联网发展与应用的过程中,由于用户接入侧的无线化,以及用户节点间干扰的影响,导致单基站可关联用户数有限且随基站密度的增加而减少,且关联关系随用户移动而不断发生变化,从而打破了传统互联网“度优先连接性”的基本原则.另一方面,随着移动互联网中无线网状回程、终端直通等新型传输技术的引入,未来移动互联网的末梢网络结构从传统的树状结构演变为网状结构,整体拓扑结构呈现“树网结合”的新特征,如图4所示.这些新特征使基于幂律分布的传统互联网的信息传播动力学机理不再适用,从而无法揭示上述特征对网络信息承载能力的影响.显然,一方面由于移动互联网的结构由传统的“度优先的固定树状结构”演变为“灵活多变的树网结合结构”,导致面向移动互联网信息传播的基本理论分析手段亟待突破;另一方面,这种新结构的出现,也为移动互联网信息智能、适变发展提供了新的自由度.通过揭示信息在新型网络结构下的传播机理,建立网络物理拓扑结构、节点动力学行为、网络节点异质能力等对网络容量的制约关系模型;提出信息源裂变条件下的“内容拓扑”构造方法,使移动互联网中节点介数分布与节点能力匹配,获得信息流动增益;突破智能干扰状态认知,智能多维资源利用,设计并实现干扰结构-资源结构-信息分发结构相匹配的智能信息分发策略,逼近移动互联网的信息承载能力上限.为承载未来大容量移动业务提供理论支撑和技术保障,对未来移动互联网络的研究和发展起到引领和推动作用.

其次,移动互联网中节点属性特征产生了根本变化.传统互联网在分析网络中信息分发节点及其关联链路的重要性时,引入“介数”作为关键指标.所谓节点的介数是指在网络中所有最短路径之中,经过该节点的数量;同理,链路介数是指在网络中所有最短路径之中,经过该链路的数量.因此,在传统互联网中高介数节点往往位于网络中心,且网络的最大承载能力与网络中节点的最大介数成反比^[9].换言之,网络的最大节点介数越大反而会导致网络整体承载能力下降.随着无线设备存储、计算能力的提升,无线设备可以承担更多关键内容存储、智能信息分发的重要角色,使得移动互联网具备了通过“末梢化”(存有关键内容的节点)来调整网络“高介数”节点分布的能力,从而提升网络的整体服务质量.通过将业务内容前推,可以实现单信息源的裂变,从而将传统互联网中的信息源头分散化.也就是说,节点计算、存储能力的引入改变了传统复杂网络介数分布由物理拓扑决定且无法改变的现状.进一步,通过优化信息前推数量和位置,可以智能改善移动互联网的介数分布,从而改变网络对多样化信息的分发能力,这也恰恰满足了大容量、低时延、高可靠等新兴移动互联网业务的需求.

第三,移动互联网末梢网络的干扰特征产生了新变化.传统互联网以有线的方式承载信息,端到

图 5 (网络版彩图) 移动互联网基本形态及能力的变化

Figure 5 (Color online) Changes in the basic form and capabilities of the mobile Internet

端路径一旦建立, 相互之间不会存在所谓的由于干扰而导致的信息传输失败. 然而, 移动互联网中末梢节点的规模化、异构化、密集化特性, 如图 5 所示, 导致环境中出现复杂的干扰, 这与传统互联网无干扰的分发设计截然不同. 移动互联网信息分发时形成的干扰结构与信息分发设计息息相关, 且干扰的出现将进一步导致基于幂律分布的传统互联网信息传播动力学机理产生革命性变化. 因此需要智能地认知干扰状态、智能地利用多维网络资源、智能地设计信息分发策略, 改变传统互联网仅通过量化描述和建立数学模型来分析, 设计信息分发准则的状态, 实现从信号覆盖向容量覆盖再向内容覆盖的网络能力演进.

4 信息通信网络资源维度新拓展

基础理论是指引, 而资源则是信息通信网络发展的物质基础, 那么信息通信网络要解决的基本问题就是给定传输资源, 如何提高单位资源的传输速率. 与之呼应的应用问题则是给定传输能力, 在不同的网络和终端能力的情况下, 如何应用这个传输能力. 例如: 网络辅助的应用、内容辅助的应用、终端辅助的应用, 此外还需要解决如何实现的问题, 即给定实现的可能性, 如何构造传输的系统. 例如: 功能等效、软件定义、SoC 等. 但毋庸置疑的是挖掘信息通信的新资源, 增加资源的维度必定会极大推动信息通信网络的发展.

通信主体由人与人, 拓展到人与物、物与物, 造成无线业务指数级增长. 然而, 承载这些业务的无线电频谱已经基本分配殆尽且非常拥挤, 很难找到空闲的频谱来满足新业务的需求. 因此, 如何提升无线电波的承载能力, 始终是我们追求的目标.

麦克斯韦 (Maxwell) 电磁理论指出: 电磁波传播过程中同时载有能量和动量, 其动量包括线动量和角动量, 目前对电磁波的开发与利用均集中在线动量上, 而对角动量的信息承载能力尚未得到清晰的认知和有效的利用. 电磁波的角动量可以分为两个部分: 自旋角动量 (spin angular momentum, SAM) 和轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM). 自旋角动量与极化偏振方向有关, 轨道角动量与电

图 6 (网络版彩图) OAM 波束的强度分布及相位波前

Figure 6 (Color online) OAM beam intensity distribution and phase wavefront. Beam intensity distribution with (a) $l = 0$, (b) $l = 1$, (c) $l = -1$. Phase wavefront with (d) $l = 0$, (e) $l = 1$, (f) $l = -1$.

磁波的空间相位因子有关^[9~11]. 拉盖尔高斯涡旋电磁场 (Laguerre-Gaussian, LG) 是最具有代表性的涡旋电磁场, 通常情况下, 信号源发射高斯电磁波, 经过空间相位调制, 输出为 LG 涡旋电磁场, 其横截面上电场可以表示为

$$E(r, \phi, 0) = E_0 \left(\frac{\sqrt{2}r}{w_0} \right)^l L_p^l \left(\frac{2r^2}{w_0^2} \right) \exp \left(-\frac{r^2}{w_0^2} \right) \exp(il\phi), \quad (1)$$

其中, w_0 是初始束腰半径, $L_p^l(x)$ 表示缔结拉盖尔多项式, p 为 LG 涡旋电磁场径向参量, 反映 LG 涡旋电磁场径向场的分布特点, 通常环状分布的数量为 $p = 1$; $\exp(il\phi)$ 反映涡旋电磁波的相位分布特点, 其中 l 被称为涡旋电磁波的模态值^[12~14]. 如图 6 所示, 电磁波 OAM 波束的矢量电磁场强度分布及相位波前, 图 6(a) 和 (d) 对应于模态 $l = 0$, 图 6(b) 和 (e) 中 $l = 1$, 图 6(c) 和 (f) 中 $l = -1$. 携带轨道角动量电磁波的特征在于其拥有螺旋的等相位面, 并且螺旋前进^[15~17]. 理论上, 在同一频率下, 拥有无限个正交的涡旋模态, 可极大提高频谱利用率^[18~20]. 通过非平面波的传播方式, 涡旋电磁波为提高通信容量, 频谱利用率提供了一个新的发展方向. 2011 年, 瑞典空间物理研究所 Thidé 教授和其意大利同事在前期理论研究的基础上^[21, 22], 于意大利威尼斯的泻湖开展了一项引人注目的实验. 该项实验采用一个八木天线发送均匀平面波, 采用一个螺旋抛物面天线发送涡旋电磁波, 在 442 m 的距离上实现了同一频带内两路信号的同时传输. 这对解决日益突出的无线通信带宽拥塞问题提供了一个全新的解决方向. 然而, 实验仅初步验证了平面波与单一模态涡旋电磁波共存的可能性, 人们对涡旋电磁波进行多维调制和复用后的远距离传播物理特性和检测方法仍知之甚少, 这也正是涡旋电磁波迈向实际应用的关键.

现有的研究仅停留在通过实验来验证涡旋电磁波的存在及其典型场景的局部特性阶段. 无法有效和全面地观测、分析电磁涡旋现象, 更不具备发现和认知无线电磁波传播新模式、新维度的能力. 其主要挑战来自如下几个方面:

首先, 与波长小、易汇聚的高频段光学涡旋波不同, 涡旋电磁波在传播过程中具有易发散性, 且随

图 7 (网络版彩图) 3 GHz 涡旋电磁场在不同距离处的场强分布

Figure 7 (Color online) Field strength distribution of 3 GHz vortex electromagnetic field at different distances. (a) $l = 2$, propagation distance is 50 m; (b) $l = 2$, propagation distance is 200 m; (c) $l = 2$, propagation distance is 500 m; (d) $l = 2$, propagation distance is 1000 m

着传播距离的增大而不断增大. 如图 7 所示, 3 GHz 的涡旋电磁场在传播距离为 50 m 时, 场分布半径为 1 m 左右. 然而, 当传播距离达到 1000 m 时场强分布半径已经达到 500 m 以上, 使得在远场捕获完全的涡旋状态信息变得异常困难.

其次, 涡旋电磁波的模态值越高, 电磁波发散问题就越严重. 如图 8 所示, 高模态涡旋电磁波 ($l = 10$) 在 1 km 处的场心“黑洞”半径已达到 500 m 以上, 在该区域内可测得的场强极低, 使得涡旋电磁波在大范围内“不可见”, 这也对高模态涡旋电磁波以及多模态混合涡旋电磁波的探测提出了巨大挑战.

此外, 由于涡旋电磁波产生节点的位置、方向不可知, 导致接收与涡旋中心存在中心偏离 (如图 9(a) 所示, 偏离的角度为 θ 或偏离中心的距离为 o) 和轴向偏离 (如图 9(b) 所示, 检测的平面与传播方向垂直面有一个夹角 θ).

从上面的讨论我们可以看出, 在无线环境下, 我们观测到的涡旋电磁波往往仅为其中一部分 (如图 10 所示), 并且可能存在畸变. 因此, 涡旋电磁波的测量是一个在仅能观测到部分信号的情况下, 来准确辨识原始电波的模态及其携带信号的特征参数的过程.

最后, 涡旋电磁波应用环境复杂, 会受到物体反射以及同频信号的干扰, 致使涡旋电磁波的固有特征遭到破坏. 如图 11 所示, 传播 40 m 后的涡旋电磁波受到干扰后产生了严重畸变, 涡旋特征模糊.

综上所述, 由于受到涡旋电磁波“易发散”、测量“难对准”, 以及环境“易干扰”等因素的影响, 导

图 8 (网络版彩图) 3 GHz 不同模式涡旋电磁波在 1 km 处的场强分布

Figure 8 (Color online) Field strength distribution of 3 GHz with different mode vortex electromagnetic waves at 1 km. (a) $l = 1$; (b) $l = 5$; (c) $l = 10$

图 9 涡旋电磁波的“偏心”接收

Figure 9 “Eccentric” reception of vortex electromagnetic waves. (a) Center deviation; (b) axial deviation

致涡旋电磁波本质特性的发现与利用极其具有挑战性. 需要在涡旋电磁波的产生、传播与接收等多个方面形成完善的系统级的突破, 为电磁波传播新维度发掘、未来无线通信系统、国防信息安全、目标探测等国家领域的发展提供重要支撑.

图 10 (网络版彩图) 涡旋电磁波的非完全接收

Figure 10 (Color online) Incomplete reception of vortex electromagnetic waves

图 11 (网络版彩图) 40 m 处测量到的被干扰涡旋电磁波 (模式 $l=1$) [23]

Figure 11 (Color online) Interfered vortex electromagnetic waves measured at 40 m (modal $l=1$) [23]

5 信息通信网络资源利用率提升新方法

信息通信网络中可利用新维度的突破是物质基础, 而已有多维的高效协同则是提高信息通信网络运行效率的关键. 信息通信网络不仅要支持逐年倍增的移动互联网业务, 还需促进智慧城市、健康医疗、工业制造等国家重点领域的信息化发展, 因此其网络容量需要在高密度连接下不断倍增. 然而, 随着网络密度不断增长, 传统资源分配手段无法应对由于巨量资源配置, 密集用户突发接入和群聚用户随机迁徙带来的资源使用高冲突与强干扰, 从而引发了密集无线通信系统的网络容量难以持续高增长的科学问题. 需要空、时、频、网、业务多个维度协同管控, 将资源管控从平面冲突转化为网络化立体协同, 从静态孤立转化为动态流动, 提出具备学习和分层管理的能力, 多维的网络资源管理架构. 通过对网络状态的学习, 实现无线网络资源智能管控和网络设备的重新配置, 以适应网络业务流和状态的变化. 同时, 通过将多用户对资源的请求映射为资源的需求空间, 该空间与资源状态空间的势差驱动了资源的流动. 架构中各实体间的相互协作, 解决了多种资源的快速资源配置问题, 使网络资源按需流动, 实现了网络资源的自配置、自管理和自优化.

与此同时, 需要在密集环境下建模信号的传播特性, 刻画超密集无线网络的干扰, 研究干扰和网络

图 12 (网络版彩图) 多维网络资源协同与利用

Figure 12 (Color online) Multi-dimensional network resource collaboration and utilization. (a) Network resource multi-dimensional framework; (b) resource utilization and collaboration

容量的作用机理, 构建干扰 – 容量理论分析模型, 探索网络容量随网络密集程度变化的渐近趋势. 在此基础上, 挖掘超密集无线网络干扰的新特性, 联合干扰协同、消除、规避等多种手段设计适用于超密集无线网络的干扰管理方法, 在有效抑制和引导超密集无线网络中的干扰的同时, 倍增网络容量, 如图 12 所示.

6 智能驱动信息通信网络新增长

信息通信和人工智能本身就是相互补充的两大领域, 人工智能需要大量的数据和信息交互来提升

图 13 (网络版彩图) 智能通信节点能力描述

Figure 13 (Color online) Intelligent communication node capability description

其智能性, 而信息通信网络也希望人工智能来帮助其维护、管理甚至是理解信息. 在信息通信网络中随着节点的通信、计算、存储能力的不断提升, 使其具备内生智能成为了可能. 在此过程中呈现出的重要变化是从传统的服务被动依附网络演进到了网络智能提供服务, 也就是信息通信网络将从传统机械的数据交换演进到具备了数据理解能力, 端到端的网络智能将使网络产生了温度, 可以更加深入地理解用户的意图, 从而可以提供更加贴心的服务. 然而, 在网络智能化的过程中, 数据扮演了重要的角色, 同时数据的非完备、高动态, 以及非均匀的特征也为智能算法的设计与应用提出了重大挑战.

在突破数据处理和智能算法设计的基础上, 同时需要充分考虑信息通信网络中节点的功能结构定义与实现, 如图 13 所示. 整体上, 一个通信节点具备自我认知、内部处理和外部交互三大能力, 即意图驱动网络节点. 具体地, (1) 节点通过跨协议层优化配置实现跨层优化, 通过对计算、通信等具体的资源和社交意图等抽象资源的虚拟化实现对资源的理解, 跨层优化和理解资源能力实现了节点的自我认知, 理解自身效用或价值; (2) 节点接受数据或其他节点共享的模型, 借助人工智能技术建立模型, 分析数据, 实现对环境的感知、信道预测, 以及对通信内容的理解, 进而分析通信意图或动机并做出决策, 完成内部处理; (3) 节点之间可共享数据, 也可共享模型, 针对数据量和模型复杂程度以及节点之间关系等不同的情况, 灵活选择共享数据或模型, 此外节点之间通过状态反馈实现异常检测, 并基于身份认证获取对周围节点的控制权限, 对于传输中的异常情况造成的无效通信进行及时抑制, 实现外部交互.

在信息通信网络的信息交互中同样可以引入智能算法. 首先, 针对由于现有的端到端信息传输系统中的编码、调制等模块化建模导致性能损失严重及信道模型不精确的问题, 提出了研究基于人工智能的端到端信息传输系统, 从全局最优角度综合考虑端到端信息传输系统中各模块的策略选择方法, 实现端到端信息传输系统“策略智能化”; 利用人工智能技术拟合端到端传输系统的发射端和接收端, 设计 AI 发射机和 AI 接收机, 保证其通用性及低复杂度, 实现端到端信息传输系统“去模块化”. 探索人工智能端到端信息传输系统建模增益, 提高能量效率与资源利用率, 提升复杂通信场景下端到端信息传输系统的自适应性和鲁棒性. 其次, 通过建立并匹配发送方与接收方之间的知识库模型, 实现“达意”通信而非数据通信, 极大减少传输数据量, 提高网络容量. 探索语义基本的表征及建模方式, 研究

语义通信层级结构、语义编码解码、语义通信传输策略, 以及语义校验纠错机制等关键技术, 使得信息通信网络不再仅仅是信息传递的工具而是成为社会运行的大脑.

7 结束语

全频谱、全空间、全智能引领信息通信网络的发展, 同时也为信息通信网络的设计提出了诸多挑战, 在信息至上的今天, 需要我们不断的突破基础理论研究, 发现可利用的新维度, 高效智能地发展信息通信网络, 为国家的信息权保驾护航.

参考文献

- 1 Shen Z K, Papasakellariou A, Montojo J, et al. Overview of 3GPP LTE-advanced carrier aggregation for 4G wireless communications. *IEEE Commun Mag*, 2012, 50: 122–130
- 2 Olwal T O, Djouani K, Kurien A M. A survey of resource management toward 5G radio access networks. *IEEE Commun Surv Tut*, 2016, 18: 1656–1686
- 3 Ayyash M, Elgala H, Khreishah A, et al. Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: concepts, opportunities, and challenges. *IEEE Commun Mag*, 2016, 54: 64–71
- 4 Soomro A, Cavalcanti D. Opportunities and challenges in using WPAN and WLAN technologies in medical environments [Accepted from Open Call]. *IEEE Commun Mag*, 2007, 45: 114–122
- 5 Elsaadany M, Ali A, Hamouda W. Cellular LTE-A technologies for the future internet-of-things: physical layer features and challenges. *IEEE Commun Surv Tut*, 2017, 19: 2544–2572
- 6 Shannon C E, Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana-Champaign: University of Illinois Press, 1949
- 7 Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, 286: 509–512
- 8 Zhou S, Mondragon R J. The rich-club phenomenon in the internet topology. *IEEE Commun Lett*, 2004, 8: 180–182
- 9 Mohammadi S M, Daldorff L K S, Bergman J E S, et al. Orbital angular momentum in radio — a system study. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2010, 58: 565–572
- 10 Mohammadi S M, Daldorff L K S, Forozesh K, et al. Orbital angular momentum in radio: measurement methods. *Radio Sci*, 2010, 45: 4007
- 11 Mahmoudi F E, Walker S D. 4-Gbps uncompressed video transmission over a 60-GHz orbital angular momentum wireless channel. *IEEE Wirel Commun Lett*, 2013, 2: 223–226
- 12 Mair A, Vaziri A, Weihs G, et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons. *Nature*, 2001, 412: 313–316
- 13 Leach J, Padgett M J, Barnett S M, et al. Measuring the orbital angular momentum of a single photon. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 257901
- 14 Tamburini F, Mari E, Thidé B, et al. Experimental verification of photon angular momentum and vorticity with radio techniques. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 204102
- 15 Lu X H, Huang H Q, Zhao C L, et al. Optical vortex beams and optical vortices. *Laser Optoelectron Prog*, 2008, 45: 50–56
- 16 Allen L, Padgett M, Babiker M. The orbital angular momentum of light. *Prog Opt*, 1999, 39: 291–372
- 17 Allen L, Barnett S M, Padgett M J. *Optical Angular Momentum*. London: Institute of Physics Publishing, 2003
- 18 Shore K A. Twisted photons: application of light with orbital angular momentum. *Contemp Phys*, 2011, 52: 495
- 19 Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L. Twisted photons. *Nat Phys*, 2007, 3: 305–310
- 20 Wang J, Yang J-Y, Fazal I M, et al. 25.6-bit/s/Hz spectral efficiency using 16-QAM signals over pol-muxed multiple orbital-angular-momentum modes. In: *Proceedings of IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting*, 2011. 587–588
- 21 Thidé B, Then H, Sjöholm J, et al. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 087701

- 22 Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes. *Phys Rev A*, 1992, 45: 8185–8189
- 23 Tamburini F, Mari E, Sponselli A, et al. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test. *New J Phys*, 2012, 14: 03300

Concepts and trends of information communication networks

Jiandong LI, Yan ZHANG*, Min SHENG & Chungang YANG

School of Communication Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

* Corresponding author. E-mail: yanzhang@xidian.edu.cn

Abstract This paper discusses the history, fundamental theory and current concepts, and latest trends of information communication networks. The important challenges faced by such networks are analyzed and the performance gains of collaborative multi-dimensional resource management and control are explored. The coupling relationships among data, network, and intelligence, as well as the key technologies that pave the way to future information communication networks with full spectrum, space, and intelligence are also discussed.

Keywords information communication network, collaborative resource management, intelligent communication

Jiandong LI was born in 1962. He received his Ph.D. degree in Communications Engineering from Xidian University in 1991. He is currently the vice president of Xidian University and the deputy director of the Academic Committee of the State Key Laboratory of Integrated Business Network Theory and Key Technologies. He was awarded the Distinguished Young Researcher award by NSFC and the Changjiang Scholar award by the Ministry of Education, China, respectively. His major research interests include wireless communication theory, cognitive radio, and signal processing.

Yan ZHANG was born in 1983. He obtained his Ph.D. degree in communication and information systems from Xidian University in 2010. He is a doctoral tutor and associate professor at Xidian University in Xi'an, China. Additionally, he has been named the Shaanxi Science and Technology Star. He is mainly engaged in research on 5G/B5G dense wireless networks, heterogeneous converged networks, and self-organizing networks.

Min SHENG was born in 1975. She received her Ph.D. degree in communication and information systems from Xidian University in 2004. She is currently a full-time professor at the State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, China. She was awarded the Distinguished Young Researcher award by NSFC and the Changjiang Scholar award by the Ministry of Education, China, respectively. Her general research interests include mobile ad hoc networks, 5G mobile communication systems, and satellite communications networks.

Chungang YANG was born in 1982. He received his Ph.D. degree in communication and information systems from Xidian University in 2011. From 2015 to 2016, he was a visiting scholar at the University of Houston, USA. He is a senior member of IEEE and a member of the China Communications Society. His primary research interest is the design and research of information communication networks based on game theory, utility learning, and artificial intelligence.