

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2017.01.001

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20170117.0952.004.html>

**[摘要]** 针对未来无线通信发展中信息与通信的基本问题,首先从信息表征方法对通信质量、信息处理,乃至通信体系结构的深刻影响,探讨未来无线通信可能的发展变革;其次在分析复杂无线网络容量优化难题的基础上,阐述在通信与网络难以完成融合的情况下,建立新的网络通信研究范式的必要性。建议抓住当前的发展机遇,立足源头创新,跳出以规模建设实现持续扩容等传统发展范式,以理性的方式谋求无线通信新的飞跃。

**[关键词]** 无线通信;信息表征;网络容量

**[Abstract]** In this paper, regarding the fundamental issues of information and communications in future wireless communications, we discuss a potential paradigm shift of future wireless communications through analyzing the impact of information representations on the quality of communication, information processing, and even a communication system architecture. Then, by revealing the aporia in capacity optimization with future complex wireless networks, the necessity of building a new research paradigm for network communications is elaborated, especially with yet not merged communications and networks due to radically unsolved issues. We need to seize the opportunities of present vigorous R&D activities, innovate from origins, abandon the traditional development approaches featured by constantly constructing infrastructures for marginal capacity improvement, and finally, in a reasonable manner, achieve a new flourish of wireless communications.

**[Key words]** wireless communications; information representation; network capacity

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 01-0002-004



**陆建华**, 通信与信息系统专家, 清华大学信息科学技术学院院长、电子工程系教授, 中国科学院院士, IEEE Fellow; 主要从事无线通信的理论及应用研究, 为绕月探测等国家重大工程解决了重要的实际问题; 曾获国家自然科学基金二等奖、国家技术发明二等奖等奖项, 被授予“探月工程嫦娥二号任务突出贡献者”称号; 发表学术论文 200 余篇, 其中国际期刊论文 70 余篇, 国内核心期刊论文 70 余篇。

收稿时间: 2017-01-06  
网络出版时间: 2017-01-17

# 无线通信若干问题的思考

## Reflections on Wireless Communications

陆建华/LU Jianhua

(清华大学, 北京 100084)  
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**移**动通信正在迈向第 5 代 (5G)。以移动通信为代表的未来无线通信仍然面临日益匮乏的频谱资源与持续增长的容量需求等矛盾, 其发展速度将逐步趋缓。如何实现新的飞跃, 需要跳出传统的发展范式, 回溯信息通信工程的理论技术源头重新思考, 寻找新的发力点。文章中, 我们力求从系统的角度探讨无线通信发展需要面对的若干基础问题, 供本领域同行参考。

### 1 无线通信的现状与挑战

未来无线通信将显现出泛在应用的特征, 用户可在任意时间、任意地点, 使用任意终端设备实现任意网络接入, 全球无线通信业务随之呈现出爆发式增长。Cisco 公司于 2016 年

初发布白皮书指出<sup>[1]</sup>, 2015 年全球移动业务流量相比 2014 年增幅达到 74%, 相比 2005 年增长了近 4 000 倍; 同时预测, 到 2019 年全球具有移动连接功能的终端设备数量将可以达到 115 亿。

另一方面, 未来无线通信仍然面临诸多难题。

首先, 日益匮乏的频谱资源与持续增长的容量需求矛盾凸显, 工程能力趋于理论极限, 移动通信以及由其带动的移动互联网、智能终端等产业的进一步发展受到根本性制约, 工程技术与理论研究的进步充满挑战。

其次, 数字鸿沟依然存在。目前全球范围内 80% 以上的陆地、95% 以上的海域缺乏有效的宽带信息覆盖, 全球仍然有几十亿人口与互联网世

界隔绝,特别是对于生活在世界上最贫困国家的千百万人来说,他们无法享受到当今信息技术所带来的益处,消除数字鸿沟面临的布站、选址困难,建设成本昂贵等问题。

再者,关键应用领域宽带通信手段依旧非常匮乏。中国近海日常航行船舶超过一万艘,2016年全国海洋经济生产总值逾六万亿元,占中国国内生产总值近10%。然而中国的长期演进(LTE)等移动通信系统主要面向内陆覆盖,难以提供近海几十乃至上百千米以上宽带移动通信服务,指挥调度、安全生产存在严重隐患。此外,在航空通信、森林消防,以及突发事件等很多应用领域,对宽带信息通信技术的迫切需求也日益显现。

针对这些难题,我们需要跳出传统的以规模建设实现持续扩容的发展范式,从信息与通信理论方法的源头寻找解决途径,探索新的技术理论突破。

经典信息与通信理论的研究基础是假设系统可分解,以及信源、信道都服从独立同分布的统计特性。香农提出的信源、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。基于这种分离设计,在很大程度上简化了通信处理算法和实现复杂度,也成就了当今信息通信的繁荣。另一方面,未来无线通信系统的复杂性和不确定性导致信源、信道不再独立同分布,而且系统往往是不可分解的,继续沿用经典信息与通信理论不足以应对当前无线通信发展中的诸多难题,信息与通信理论需要源头创新。

## 2 关于信息与通信的思考

### 2.1 从信息表征到通信体系结构

回溯信息与通信理论的源头,首要问题是要再认识信息的本质。

从信息表征谈起。信息表征是

通信传输处理的基本信息单元,是信息论及通信理论的研究基础。信息传输过程由于受到传播环境中噪声与干扰的影响,因信息的表征方法不同通常使得传输的内容产生不同程度的失真。

已知的信息表征,在模拟通信中是波形,其抗噪声的性能不佳,但失真通常是线性的,其控制方法相对简单;发展到数字通信,其信息表征为比特,是香农作为熵的度量提出的。根据香农的定义,信息的数据表征如图1所示,将信息编码为比特串表示的数据,编码效率则反映信息量和数据量之间的关系。其中,信息量度量了信息的不确定度,数据量反映了实际花费多少比特。基于比特的信息表征抗噪声性能显著提高了,但由于比特间可能存在的关联性(比如经压缩的多媒体数据等),失真往往是非线性的,有时这种非线性失真不容易控制,有可能会造成通信质量的严重下降。

值得注意的是图1中的箭头方向,数据是由信息经编码后形成的。然而在现实应用中,箭头常常被反过来了,即先有数据(在信息获取过程中产生),再根据不同的应用需求提取信息;在有些应用场景下甚至简单地将数据与信息等同看待,这或许使得我们今天不得不面对越来越庞杂的大数据的困扰。

所幸的是,上述情况正在发生改变,寻求更为合理的信息表征成为人们努力的新方向。比如,视频、图像数据中蕴含的信息量远远小于现行编码方式产生的数据量。微软就做

了一个概念性尝试,在视频电话的应用中,只传输用户的语音数据,再参考本地存储的图像、唇形等信息,综合出可有效满足用户体验的视频,这种方法以信息为核心汇集所需传输的数据,使得通信数据量压缩好几千倍,相应的信息表征方法研究或将颠覆传统的信息处理。再比如,众所周知,人脑能在残缺、干扰等环境下瞬间完成复杂的信息感知。有研究指出,人类或只需要约1000个像素就可实现感知<sup>[2]</sup>,其原因在于人脑中大量的先验知识对信息进行分析可起关键性作用,由此亦可探寻一种信息表征方法,从而规避可能的大数据之扰。《Nature》在2015年5月特刊研讨深度学习<sup>[3]</sup>,指出其能够发现大数据中的复杂结构和特征,这将为研究如何基于信息内容的特征表征信息,并谋求信息通信的突破创新探索新的途径。

由此可见,信息表征不仅影响通信的质量控制,而且对于信息处理也有着深刻的影响。有研究表明,信息表征从“比特→结构”的创新探索可以有效克服传播环境中噪声与干扰的影响,提高无线通信的可靠性以及效率<sup>[4]</sup>。

然而,这还远不是问题的全部。进一步的一个问题是,信息表征如何影响通信的体系结构?

不妨看看人类是如何通信的。人类的通信方式是,大脑对信息进行感知和学习,存储先验知识,并在后期学习过程中不断对先验知识的特征进行提炼,从而逐渐增强乃至进化未来对新信息的辨识能力,即所谓的

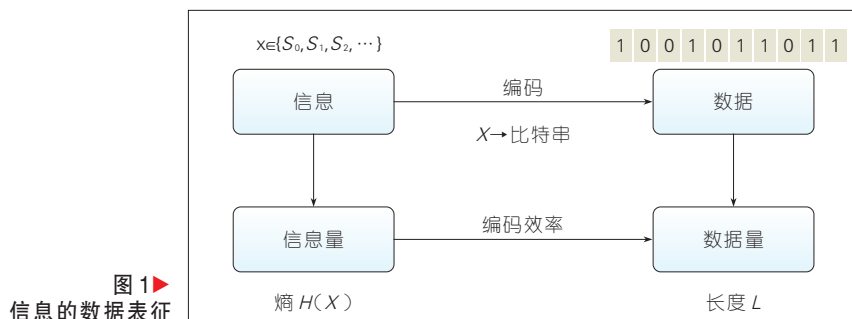


图1 信息的数据表征

“一回生，二回熟”。大脑感知结构化的信息<sup>[5]</sup>，是一种长期进化形成的信息表征，贯穿于大脑感知、学习、存储、处理的全过程，它需要处理的信息是少量的。这样，通信过程中的数据量越来越少，但知识却越来越丰富。由此，一个重要的启发是：信息表征抑或不再是孤立的、静态的度量，而是一个过程，是通信过程的一部分。过程的表征需要引入状态，状态的引入将对现有的移动互联网体系结构产生深刻的变革。

为此，可借鉴人类通信变革现有的通信体系结构：将“终端-网络转发-终端”的传统通信转变为“终端-网络计算-终端”的协同通信与计算过程，由此产生移动互联网环境下的新型计算通信模型，如图2所示。图中信源X通过编码器，基于媒体库（或先验知识库，下同）S的已知信息编码输出码字；译码器利用接收到的码字和译码媒体库Y译码输出重构信息X'。这里的媒体库S、Y可利用互联网的先验知识，为网络引入了状态，编码过程就是对信息进行计算与表征。在传统的通信体系结构下，假设接收端得到的信息为Z，那么无线信道需要传输的信息量为X与Z之间的互信息I(X, Z)。基于图2的新结构，所需传输的信息量为条件互信息I(X, Z|Y)。通常远小于原始的互信息I(X, Z)，由此可实现通信传输数据量的大幅压缩。

毋庸置疑，对信息本质的再认识，以及信息表征方法的再探索，对于未来无线通信的发展变革具有深远意义。

2.2 从容量优化到通信与网络融合

现有的以规模建设实现持续扩容的发展范式，其基本出发点是粗略假定规模与容量的某种单调关系，然而实际上系统规模与容量的关系远比想象的复杂，有必要逐步理清这个关系，从而以理性的方式发展新的无线通信基础设施。

经典理论中，单条链路的通信传输容量是指可靠传输的最大信息速率，定义为：

$$C_R = \max_{\text{信源信道条件}} I(X; Y) = \max_{\text{信源信道条件}} [H(X) - H(X|Y)] = \max_{\text{信源信道条件}} \left[ -\sum_x p(x) \log p(x) + \sum_x \sum_y p(x, y) \log p(x|y) \right]$$

其中的关键参数为：传输容量C<sub>R</sub>、互信息I(X; Y)、信源熵H(X)、条件熵H(X|Y)、信源概率分布p(X)、信道转移概率p(X|Y)。

当信源、信道的随机特性都可简化为独立同分布的模型时，上述容量可计算，上限即为香农的信道容量，它可简单给出带宽、信噪比等信道参数与通信容量之间的映射关系，如图3所示，这样通信系统的设计及扩容是简单的。

但当信源、信道的特性比较复杂时，通信传输容量通常难以建模求解，甚至是不确定的；加之未来无线网络中的链路通常由多链路构成，干扰复杂，无线通信业务（比如经压缩的多媒体数据）特性也复杂，这样的多链路网络架构参数（拓扑结构、链路特性、时/空/频多域资源组织运用方式等）与其信息服务能力（用户容量、传输容量、网络容量等）难以建立映射关系，如图4所示。因此，通信与网络的融合成为长期以来悬而未决的难题，在此情况下以规模建设实现持续扩容，或沿用传统方法构建新的复杂无线网络设施等发展模式就

缺乏理论依据了。

为了实现信息通信理论的创新突破，研究者们把目光从研究点对点通信转移到研究多点对多点网络中，这是一个重要的转折。最先研究的是多点对一点的多用户接入以及一点对多点的广播信道。在多用户接入信道下，Alshwed<sup>[6]</sup>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<sup>[7]</sup>。Cover<sup>[8]</sup>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。紧接着有学者尝试两点对两点的干扰信道研究，却发现当通信链路大于等于3时，从信息论的角度给出信道容量没有精确解<sup>[9]</sup>。

长期以来，许多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。研究表明，当延时、误码和用户业务的动态特性必须考虑的时候，经典的香农理论难以胜任<sup>[10]</sup>。如何在通信与网络这个未完成的融合中，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，需要建立一种新的网络通信理论研究范式。这是我们面临的新难题，也是发展网络通信理

图2 移动互联网环境下的新型计算通信模型

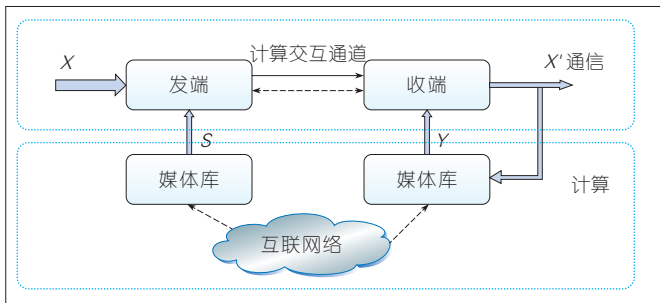
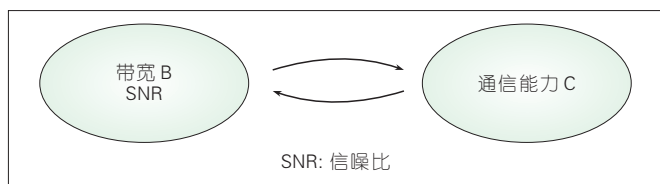
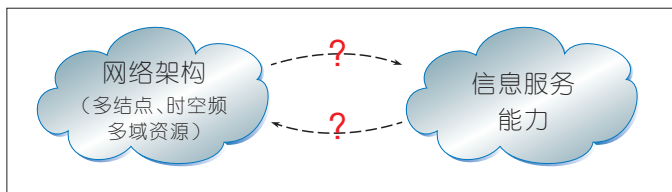


图3 信道参数与通信容量(能力)的相互映射关系







◀图4  
网络架构参数与其  
信息服务能力通常  
难以建立映射关系

论的新机遇。

### 3 探寻无线通信发展的新起点

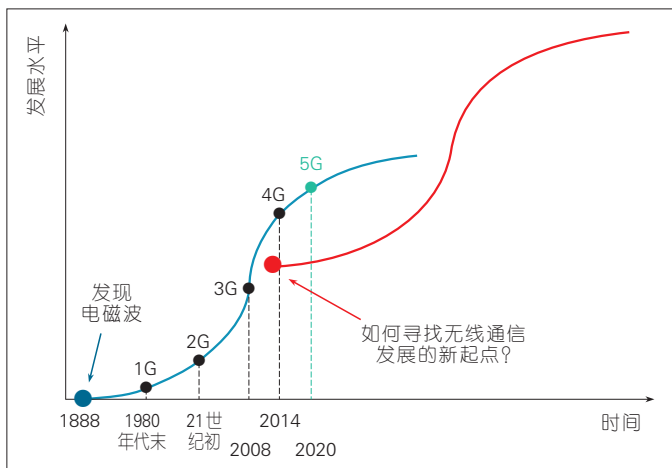
回顾无线通信的发展,自马可尼首次实现电磁波通信,到当前如火如荼的5G研发,历经了先漫长后迅猛发展的过程。如图5中的S曲线所示,自发现电磁波至1G模拟蜂窝网络问世花费了近一个世纪的时间,而从2G到4G的发展仅仅用了短短十几年。目前,产业界学术界都在全力投入5G研发中,但是从5G的几点核心技术来看:超密集网络(UDN)是传统微蜂窝基站在空域部署上的改进;毫米波则是传统宽带通信在频域部署上的扩展;而大规模天线则直接是传统多天线技术的进一步发展等。因此,5G更像是4G发展的延长线上的产物,抑或已经开始走向S曲线的天花板?

如何寻找到无线通信发展的新起点?

前面谈到,信息不能总是简单的以比特来度量,通信不能还是把主要的着眼点放在传输上,无线通信也不能简单理解为点对点的开环系统,通

信与网络的融合是大趋势。我们需要再认识信息通信工程,仿照人类通信“一回生,二回熟”的方式认识通信工程。早在1948年,“控制论之父”诺伯特·维纳就指出,通信工程应该作为一个闭环系统来考虑,而且通信与控制的问题是不能区分开的<sup>[11]</sup>。实际上,现在的通信系统可以涉及信息科学的几乎所有环节,从传输到协议,从协议到网络,从网络到数据,从数据到计算,从计算到控制等都可从属并服务于通信工程,并且各个环节之间动态、关联的相互作用也应该是闭环的,认识到这一点,无疑创新空间将大为拓展。

科学发展上可以得到最大收获的领域是各种已经建立起来的学科之间的、被忽视的无人区<sup>[11]</sup>。信息科学中,研究信息的产生、获取、存储、显示、处理、传输和利用等要素时,难以简单分割,常常表现出交叉、交织、胶着的状态,横向发展催生更多的边缘学科和交叉学科,成为科学进步和技术创新的主要源泉<sup>[12]</sup>。因此,将来的信息通信要以体系化思维来主导,在无线通信系统中将各学科深度融合,从学科交叉中探索发展是谋求创



◀图5  
无线通信发展的  
S曲线

新突破的有效途径。

### 4 结束语

未来无线通信面临复杂干扰,资源受限,能耗约束,广域覆盖等多重挑战,无线通信理论与技术的发展征程需要探索新起点。应以体系化的思维谋求创新突破,在学科融合和交叉中寻觅解决之道,揭示其中的本质问题与规律,再度彰显方兴未艾、风光无限的无线通信领域。

### 致谢

在文章的撰写过程中,清华大学宇航中心的姜春晓博士将作者的演讲PPT整理成文稿,制作了图5,补充了基础数据,在此表示衷心感谢。

### 参考文献

- [1] Cisco. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020 White Paper[R]. Cisco, 2016
- [2] WEILAND J D and HUMAYUN M S. Visual Prosthesis [J]. Proceedings of the IEEE, 2008, 96(7): 1076–1084
- [3] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep Learning [J]. Nature, 2015,(521): 436–444
- [4] LU J, TAO X, and GE N. Structural Processing for Wireless Communications [M]//Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering. Germany: Springer, 2015: 2191–8112
- [5] TENENBAUM J B, KEMPC, GRIFFITHS T L, et al. How to Grow a Mind: Statistics, Structure, and Abstraction [J]. Science, 2011, 331(6022): 1279–1285
- [6] AHLISWEDE R. Multi-Way Communication Channels[C]//International Symposium on Information Theory (2nd 1971 Tsahkadsor). Armenia, 1971:23–52
- [7] COVER T M. Broadcast Channels[J]. IEEE Transformation Information Theory, 1972, 18(1): 2–14. DOI: 10.1109/TIT.1972.1054727
- [8] COVER T, GAMAL A E. Capacity Theorems for the Relay Channel [J].IEEE Transformation Information Theory, 1979, 25(5): 572–584. DOI: 10.1109/TIT.1979.1056084
- [9] GUPTA P, KUMAR P R. The Capacity of Wireless Networks[J]. IEEE Transformation Information Theory, 2000, 46(2): 388–404. DOI: 10.1109/18.825799
- [10] HAJEK B, EPHREIMIDES A. Information Theory and Communications Networks: An Unconsummated Union[J]. IEEE Transformation Information Theory, 1998,44(6): 2416–2434. DOI: 10.1109/18.720543
- [11] WIENER N. Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal [M]. USA: John Wiley, 1948
- [12] 李德毅.《信息科学发展战略研究》中若干热点[J]. 中国计算机学会通信, 2010, (8):68–71