



对 6G 关键技术发展的思考

Reflections on Key Technology Developments of 6G

葛建华 /GE Jianhua, 李靖 /LI Jing

(西安电子科技大学, 中国 西安 710071)
(Xidian University, Xi'an 710071, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202102010

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210407.0921.004.html>

网络出版日期: 2021-04-07

收稿日期: 2021-02-20

摘要: 以 5G 为基础, 6G 将构建空天地海泛在通信网络, 并采用多种先进技术来进一步提升系统容量、能量与频谱效率、可靠性以及传输时延等核心技术指标。作为非正交传输技术的代表, 超奈奎斯特传输 (FTNs) 不仅可以实现频谱资源的高效利用, 还可与多种 6G 候选关键技术进行联合设计来提升系统核心技术指标, 因此极具应用潜力。

关键词: 6G; 非正交传输; 超奈奎斯特传输

Abstract: 6G will build an air-space-ground-sea ubiquitous communication network based on 5G, and employ a variety of advanced technologies to achieve further improvements in some core technical indicators such as system capacity, energy and spectral efficiency, reliability, and transmission delay. As a representative non-orthogonal transmission design scheme, faster-than-Nyquist signaling (FTNs) can realize the efficient utilization of spectrum resources, and be combined with a variety of 6G candidate key technologies to improve the core technical indicators of the system. Therefore FTNs has great application potential.

Keywords: 6G; non-orthogonal transmission; faster-than-Nyquist signaling

香农经典信息论为 70 余年来通信技术的发展奠定了理论基础。多输入多输出 (MIMO) 信道不仅具有经典香农信息论所涉及的时间和频率自由度, 还具有空间自由度, MIMO 无线传输已成为当代 4G 和 5G 提升系统容量和频谱效率的最为有效的核心手段^[1]。

围绕“增强宽带、万物互联”的发展理念, 5G 通过引入增强移动宽带 (eMBB)、超可靠低时延通信 (URLLC) 和增强机器类通信 (eMTC) 等场景, 首次将垂直行业应用纳入公众移动通信系统。除了采用大规模 MIMO 和非正交多址接入 (NOMA) 来提升系统容量和大连接能力以外, 5G 还采用了更短的时隙调度单位、重复发送、多连接等 URLLC 相关技术来降低无线传输时延, 提高可靠性。可以预计,

未来 6G 将以 5G 为基础, 采用空天地海泛在通信网络, 使用新频谱、多极化超大规模天线、大规模分布式协作 MIMO、NOMA 和高精度定位等技术, 以发展覆盖范围更广、传输速率更高、可靠性更高、时延更小的无线传输系统, 从而构建更新一代的普适性、智慧化、全业务移动信息基础设施。

6G 移动通信能否进一步改善系统容量、能量与频谱效率、可靠性与传输时延等核心技术指标, 是学术界和工业界普遍关心的一个问题。

1 未来 6G 核心技术指标与性能提升手段

为实现 6G 系统的愿景, 满足未来通信需求, 人们需要考虑的核心技术指标大致有:

(1) 更高的频谱效率与能量效率

5G 移动通信系统引入了多用户 MIMO, 将系统的频率利用率提升到一个新的高度。增加基站的天线数并形成多极化超大规模 MIMO, 可使未来 6G 系统的频谱利用率进一步提高。但当基站天线阵列部署的物理尺寸受限时, 过于密集的天线部署将存在严重的互耦效应, 相关 MIMO 信道容量存在理论极限。

无蜂窝系统消除了传统蜂窝构架在小区频率复用方面的限制, 其小区频率复用因子等于 1, 可实现真正意义上的跨小区、全动态的频率资源调配, 从而为构建资源调配灵活、频谱利用率更高的 6G 移动通信系统带来全新的可能。

(2) 更高的可靠性与更低的时延
5G 新空口 (NR) 首次将超可靠与低时延技术指标引入公众移动通信

系统。一方面,为将无线传输时延降低至 1 ms 以下,系统引入了更短的时隙结构、免许可接入认证,以及移动边缘计算等技术;另一方面,为将无线数据包差错概率降低至 10^{-6} 以下,系统又引入了时域或频域重复发送、多点发送或多连接等。这些操作未能从网络信息论的角度寻求传输时延、可靠性及传输速率的最优平衡,因此在网络拓扑优化和资源有效利用等方面仍有一定的性能提升空间。

(3) 超高峰值速率

面向未来,人们对移动互联网的流量应用、万物互联的速率需求也将越来越大。因此,能让人们随时随地享受高速率、低时延的连接是 6G 系统必须具备的。

5G 移动通信系统使用的是 6 GHz 以下频段,这些频段非常拥挤,且可用带宽有限。基于此,B5G 正在考虑使用大带宽的毫米波频段。6G 系统将采用新频谱和通信手段,进一步提升峰值速率。学者们普遍认为,应用于星间骨干链路的无线激光通信、毫米波太赫兹通信和可见光通信等技术可能应用于 6G 场景的新频段通信,因此这些方面值得探索研究。

(4) 更宽覆盖

5G 移动通信系统的覆盖范围受限,无法有效地解决海洋、森林、沙漠等人口稀少地区,以及地震、火灾和泥石流等应急场景下的通信难题。充分利用地面移动通信的大容量传输能力,结合天基网络的广域覆盖优势,构建星地深度融合的天地互联网络系统,能够实现 6G 无处不在的宽带连接。

6G 宽带通信系统将实现星地深度融合通信网络,提供“随时、随地、随心”的通信体验。这不仅解决了偏远地区和无人区的通信问题,还能为每位客户提供服务,实现智慧连接、深度连接、全息连接和泛在连接。

2 6G 候选关键技术

为实现未来 6G 核心技术指标,从网络通信角度出发,我们概括了以下的候选关键技术:

(1) 星地深度融合

6G 将集成地面移动通信网络和卫星互连网络。借助智能移动性管理技术,6G 可以在陆、海、空、天、地等多种复杂场景中提供高速互联服务,实现全球覆盖、按需服务、随遇接入、安全可信的网络通信能力^[2]。

6G 要实现地面网络与卫星网络间的宽带可靠通信,需要强大的物理层通信链路作为支撑。物理层通信链路主要包括星间链路、星地馈电链路和星地用户链路 3 种类型。星间链路距离远,激光通信是其主要的发展方向;星地馈电链路经过地球表面大气层时容易受到云、雾、降雨和大气湍流等天气因素的严重影响,高效能的新型激光通信和激光/微波混合传输是其未来的发展方向;星地用户链路将主要采用 Ka 高频段和多波束技术来实现卫星对地面用户的大容量通信。

(2) 新频段通信

与中、低频段(6 GHz 以下)相比,毫米波和太赫兹频段的电波传播路径损耗显著增加,但频谱资源非常丰富。太赫兹频谱通信具有频谱资源带宽大、传输时延低、传输速率高等优势,是未来 6G 移动通信系统极具吸引力的宽带通信技术。超大规模天线阵列是解决毫米波与太赫兹传播距离受限问题的有效手段。

(3) 超大规模天线

把太赫兹、可见光的新增频谱用于 6G 移动通信系统,意味着运营商能以更多天线系统传播信息,从而获得更大的吞吐量。超大规模天线技术可提供很大的空间分集,将成为提升 6G 移动通信系统频谱效率的关键技术。

将太赫兹频谱引入 6G 移动通信

系统,会增大系统的频谱跨度。实现大频谱跨度的大规模阵列天线是 6G 需解决的一大难题。

(4) 智能反射表面(IRS)

通过控制在无线传播环境中的亚波长人工合成超材料的电磁特性,IRS 技术使电磁波入射超材料时,能够获得预期的反射信号或透射信号,以达到控制信号的幅度、频率、相位、极化特性,实现干扰协调、波束形成与信号补盲、非线性频谱搬移,并解决高频信号绕射传播^[3]问题。与传统的无线中继技术相比,IRS 无须对信号进行再生和重传。IRS 采用能量消耗少的无源反射,在全双工模式下,能够以低成本方式实现频谱效率和能量效率的提高。

(5) 大规模分布式协作 MIMO 与无蜂窝网络

分布式 MIMO 拓展了经典 MIMO 的应用范畴:从单小区蜂窝基站扩展到多小区蜂窝基站场景,并以分布式多用户 MIMO 形式构成无蜂窝移动网络。分布式 MIMO 在同一时频资源下,为所有接入设备提供服务,无须小区间频率规划,即可实现系统资源全维度动态利用。因此,分布式 MIMO 可以有效改善系统资源配置的灵活性,大幅度提升无线资源利用率。然而,面对未来 6G 网络庞大的天线规模,分布式 MIMO 的天线单元处于不同的地理位置,这将成为分布式 MIMO 及无蜂窝无线网络应用的关键性挑战。

(6) 高效大容量的多址接入与传输

多址接入的核心问题是如何在有限的资源内接入更多用户。不同于传统的正交多址接入(OMA)技术,NOMA 技术可以在相同的资源上传输多个用户的信号,从而获得比 OMA 更大的容量和更多的用户连接数。一方面,NOMA 技术支持免调度随机接入,减少了信令开销,因此可为海量

连接场景下的低时延通信提供保障；另一方面，6G 使用太赫兹等高频段进行通信，电磁波的强方向性使得用户的信道高度相关，为 NOMA 技术的使用提供了便利。此外，超大规模天线 MIMO 产生的定向波束可以带来大的天线阵列增益和小的波束间干扰，而在每个波束上使用 NOMA 技术服务多个用户，有助于 6G 超高带宽和大规模连接^[4-5]。

(7) 人工智能与无线通信的结合

未来 6G 网络需要应对爆炸性的移动数据流量增长和海量的设备连接，而对这些海量数据进行实时管控会导致高的复杂度和时延开销。因此，如何有效感知业务特性、精确监测控制网络资源、动态分配无线资源成为 6G 网络中的重要问题。在 6G 网络的应用层和网络层引入人工智能，使得网络更加智能化，这将是管控海量无线大数据的必要途径^[6]。

此外，6G 需要支持大规模用户、大规模天线和多频段混合传输，传统物理层传输技术将面临性能、复杂度和效率的多重挑战。这为人工智能技术应用于无线物理层提供了可能^[7-8]。一方面，在复杂的通信场景下，信道环境很难用严格的数学模型来描述，因此有必要在没有确定信道模型的条件对物理层算法进行设计；另一方面，6G 中的物理层信号接收与检测是一个高维优化问题，实际中难以求解，此时可采用基于深度学习的信道估计和信号检测方法（该方法尤其适用于准静态衰落信道）。

综上所述，未来 6G 网络的关键候选技术主要有：星地融合、太赫兹通信、多极化超大规模天线、无蜂窝网络、大规模智能反射面、非正交多址接入及传输和基于人工智能的无线通信与网络技术。下面我们介绍一种能有效提高系统频谱利用率的非正交传输

波形——超奈奎斯特传输（FTNs）。该技术可与上述多种技术结合，实现更加高效的信息传输。

3 非正交传输波形 FTNs

根据基带信号的压缩方式，FTNs 可分为单载波超奈奎斯特（SC-FTNs）和多载波超奈奎斯特（MC-FTNs）。其中，SC-FTNs 是在时域对信号进行压缩后发送，MC-FTNs 是在频域/时域对信号进行压缩后发送。由于 FTNs 频谱利用率高，它已成为长距离光纤、第二代卫星数字视频广播（DVB-S2）、可见光通信等应用的备选方案。然而，FTNs 频谱效率的提升是以更加严重的符号间干扰作为代价的。当 FTNs 与 MIMO、NOMA 等结合时，如何更合理地利用 FTNs 的特点来支撑更高效、更大容量的传输将是一个有意义的研究课题。

3.1 性能限（Mazo 界和容量分析）

1975 年，美国贝尔实验室学者 Mazo 提出^[9]，对于采用 sinc 脉冲的 FTNs 系统，将符号传输周期压缩至奈奎斯特周期的 0.802 倍时，符号间的最小欧式距离不会发生改变，该压缩率被称为 Mazo 界。此后，有学者将 sinc 函数扩展至升余弦函数，阐述了不同滚降系数下的 Mazo 界，证明了 FTNs 系统带来的容量性能提升。随后，将单输入单输出（SISO）SC-FTNs 场景下的分析方法推广至 MIMO MC-FTNs 场景后，Mazo 界和系统容量增益也同样得到了说明。

在实际中，FTNs 系统可采用两种脉冲成形函数：一是选择典型函数，如高斯、根升余弦、汉明等；二是设计特定的脉冲，并且可以通过误码性能、FTNs 容量和实现复杂度等来对脉冲成形方法进行评估。对一个特定的 SISO/MIMO FTNs 系统，使得误码性能

最优的成形滤波器不一定能使系统容量最大。因此，如何折中考虑容量和误码率性能、优化成形滤波器的设计是一个重要问题。

3.2 收发机设计中的关键技术问题

3.2.1 发射机设计

(1) 波形产生

由于 MC-FTNs 子载波缺乏正交性，因此它无法像正交频分复用（OFDM）信号一样，直接利用逆快速傅里叶变换（IFFT）来实现。现有研究主要通过输入对符号序列进行处理，再利用 IFFT 来产生 MC-FTNs 信号。MC-FTNs 波形产生主要包括基于扩展 IFFT 点数和基于多路并行 IFFT 的两种方式，其中后者具备更高的设计灵活度和更快的硬件处理速度。在不同的压缩因子下，可通过对每路 IFFT 运算的点数进行优化设计，来进一步降低系统实现复杂度。当 MC-FTNs 与 MIMO 技术进行联合设计时，如何充分利用多天线的分集和复用优势，并以灵活、高效的方式产生 MIMO MC-FTNs 波形，也是重要的研究内容。

(2) 峰均比（PAPR）降低

由于 FTNs 信号波形之间存在符号间干扰，相邻波形彼此叠加，因此会带来较高的 PAPR。PAPR 过高将会使信号在传输时进入功率放大器的非线性区域，造成信号失真，从而对通信系统性能产生严重影响。尤其是在 MC-FTNs 系统中，信号的 PAPR 不仅会受到时频域压缩因子的影响，而且还会受到不同脉冲成形波形的影响。截至目前，能够兼顾信号 PAPR、频谱效率和误码性能的 FTNs 系统设计方法还没有定论。在众多的可能方案中，基于预编码的设计方法不仅可以降低 PAPR，还可以和接收机检测算法进行联合设计以降低接收复杂度，因此该

方法极具应用前景。

3.2.2 接收机设计

(1) 信道估计

通常, 现有的单/多载波系统利用导频插入对信道进行估计。在 FTNs 系统中, 符号和子载波之间不再保持正交。如果沿用传统的导频结构和信道估计算法, 那么插入的导频势必会被周围的数据符号所干扰, 从而降低信道估计的精确度。因此, 重新设计导频插入方式和信道估计算法是非常有必要的。目前, 已有的 FTNs 系统信道估计技术主要是针对静态多径信道, 并基于均衡或者预编码技术来实现的。动态多径估计问题, 如时变和双选择性衰落信道中的信道估计将更具挑战性。

(2) 信号检测

随着时间或子载波间隔压缩比的增大, 由 FTNs 引入的符号间干扰 (ISI) 会更加严重。这使得接收端的信号检测面临挑战: 一是大压缩比将导致形成 ISI 的干扰符号的数量增多。如果使用传统性能最优的检测算法, 如最大似然 (ML) 估计或最大后验概率 (MAP) 算法, 那么接收端的复杂度将会随干扰符号个数呈指数增长。二是波形之间的不正交导致接收匹配滤波后的采样序列受到色噪声的影响, 这也对检测算法的性能造成了影响。因此, 能够平衡复杂度与性能的次优检测算法是近年来 FTNs 领域的研究热点。

接收端的简化检测算法主要可分为两类: 一是仅位于接收端的符号检测/均衡技术, 二是联合发射端预编码的检测技术。前者无须对 FTNs 系统发射端做任何改变, 仅对下采样后的接收信号进行处理便可消除码间干扰。其主要思想是通过均衡器与信道译码器的软信息交互, 进行联合检测, 以消除 ISI, 从而获得更高的性能增益。

可以考虑的软输入软输出 (SISO) 算法包括串行干扰消除 (SIC) 算法、软输出维特比算法 (SOVA) 和各种简化最大后验 (MAP) 算法等。当联合考虑发射端预编码时, 可利用预编码技术对调制后符号进行处理, 改变发射信号特性及频谱特征, 并在接收机做相应的解码。这种方法性能优良, 复杂度低, 但是依赖于 FTNs 系统特性。因此, 需要一种不依赖于 FTNs 系统特性且复杂度低、性能优良的抗码间干扰检测算法。

(3) 基于深度学习的 FTNs 接收机

在无线通信领域, 目前已有学者将信道译码、信道估计、信号检测等与深度学习相结合, 提出了基于深度学习的通信接收机架构。相比于传统的通信接收机, FTNs 系统的 ISI 更严重。因此, 针对 FTNs 系统的高检测复杂度问题, 深度学习等人工智能工具值得人们深入探讨。尤其是在将子载波间隔和符号间隔同时进行压缩的 MC-FTNs 多天线传输场景下, 当 ISI 和 ICI 共存, 并且存在不同天线接收信号的干扰时, 利用深度学习将 FTNs 接收机进行一体化训练, 也许是一种很好的解决思路。

4 结束语

本文中, 我们从 6G 核心技术指标与性能提升方法出发, 总结了 6G 候选关键技术, 并给出了一种可与多种技术进行联合设计的非正交传输波形 FTNs, 以更有效地利用宝贵的频谱资源。可以预计, 未来 6G 核心技术指标如系统容量、能量与频谱效率、可靠性以及传输时延的进一步提升, 以多种技术的联合设计为基础, 且伴随着系统部署复杂度的上升。因此, 寻求系统性能和部署成本的折中, 是未来 6G 系统设计中的主要挑战。

参考文献

- [1] 尤肖虎. Shannon 信息论与未来 6G 技术潜能 [J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(9): 1377-1394
- [2] 尤肖虎, 尹浩, 邹贺铨. 6G 与广域物联网 [J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 3-11
- [3] YUAN J D, NGO H Q, MATTHAIU M. Towards large intelligent surface (LIS)-based communications [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(10): 6568-6582
- [4] ZHU L, XIAO Z, XIA X G, et al. Millimeter-wave communications with non-orthogonal multiple access for B5G/6G [J]. IEEE access, 2019, 7: 116123-116132. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2935169
- [5] CELIK A, CHAABAN A, SHIHADA B, et al. Topology optimization for 6G networks: a network information-theoretic approach [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2020, 15(4): 83-92. DOI: 10.1109/MVT.2020.3017152
- [6] KATO N, MAO B M, TANG F X, et al. Ten challenges in advancing machine learning technologies toward 6G [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(3): 96-103. DOI: 10.1109/MWC.001.1900476
- [7] MATTHAIU M, YURDUSEVEN O, NGO H Q, et al. The road to 6G: ten physical layer challenges for communications engineers [J]. IEEE communications magazine, 2021, 59(1): 64-69. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000208
- [8] 张平, 牛凯, 田辉, 等. 6G 移动通信技术展望 [J]. 通信学报, 2019, 40(1): 141-148
- [9] MAZO J E. Faster-than-Nyquist signaling [J]. Bell system technical journal, 1975, 54(8): 1451-1462

作者简介



葛建华, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 陕西省“三五人才工程”入选者, 享受国务院政府特殊津贴; 主要从事 5G/B5G 移动通信的宽带无线传输技术、面向特殊行业应用的空地/空空无线自组网传输技术的研究工作; 曾主持和参与国家重点研发计划、“863”计划和国家科技重大专项等 10 余项国家级项目, 并多次获得国家、省部级奖励。



李靖, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 中国电子学会高级会员; 主要从事 5G/B5G 移动通信的宽带无线传输技术、人工智能与无线通信的融合研究; 曾主持和参与国家科技重大专项、国家自然科学基金和“863”计划等多项国家级项目, 并获得陕西省科学技术奖二等奖 1 项。