

面向5G的 非正交多址接入技术(NOMA)浅析

Initial Analysis of NOMA for 5G Mobile Networks

张长青(中国移动通信集团湖南有限公司岳阳分公司,湖南 岳阳 414000)

Zhang Changqing (China Mobile Group Hunan Co., Ltd., Yueyang Branch, Yueyang 414000, China)

摘要:

5G是一个高速率、超带宽、低时延和超高密度连接的移动通信网络体系。作为面向5G关键技术的非正交多址接入技术(NOMA),第一次将功率域由单用户独占改为由多用户共享,使无线接入总量提高了50%。原理的简单性使其在5G应用中具有一定的竞争优势。首先介绍了NOMA的基本原理,而后分析了NOMA的关键技术SIC接收机,分析了NOMA技术应用中的相关困难,最后总结了5G应用带给人们的相关体验和NOMA实现存在的问题。

关键词:

综合网络架构;小区划分;小区切换;POI;泄漏电缆
doi: 10.16463/j.cnki.issn1007-3043.2015.11.011
中图分类号:TN929.5
文献标识码:A
文章编号:1007-3043(2015)11-0049-05

Abstract:

5G is a mobile communication network system with high speed, super bandwidth, low time delay and super high density link. The NOMA, orienting 5G key technology, changes firstly the occupation of power area from single user to multi user. The total wireless access amount increases 50%. The simplification of the NOMA principle, gives the competition advantages in 5G application. It presents the basic principles of NOMA, then analyzes SIC receiver, which is the key technologies of NOMA, analyzes the related difficulty in NOMA application. Finally it concludes the related experience on 5G application and the problems on NOMA.

Keywords:

Integrated network architecture; Cell division; Cell handover; POI; Leak cable

0 前言

2013年5月,韩国三星电子宣布,率先开发出了首个5G核心技术支撑的移动无线传输网络,在实验室实现了1 Gbit/s的无线数据传输速率,是目前LTE最高下行速率的10倍。一年后,瑞典爱立信宣布,其研发的5G无线技术部分在测试中,实验室理想状态下的传输速率高达5 Gbit/s,这意味着爱立信的5G无线传输速率是目前LTE最高下行速率的50倍,标志着无线传输速率再创新高。显然,这些研究工作仅限于5G系统中无线传输的一部分,整个5G系统包括的技术特点和网络架构还远非如此。也就是说,迄今为止还没有一个

权威机构对5G系统做出一个全面科学完整的定义,普遍只是对5G系统作了愿景般的描述。

根据《5G愿景与需求白皮书》描述,5G具有覆盖广、速度快、连接设备多、功耗低、时延低等特点。可为用户提供广泛的无缝业务体验,即使在高速移动环境下,也能实现100 Mbit/s以上的用户体验速率;可为用户提供光纤般的接入速率,使用户能在局部热点地区享受到普遍可达1 Gbit/s极高数据传输的体验速率;接近“零”的时延可为用户提供在无线互联网上无人汽车驾驶的激情体验,保证远程控制百公里时速汽车的时延只在几毫秒的安全响应内;低功耗多设备连接则说明5G能够缔造万物互联,不仅具有无数设备的连接能力,人与人、人与物、物与物间的通信也是如此方便简单,使得移动通信技术能广泛地应用于工业、家庭和

收稿日期:2015-09-18

社会领域。

目前5G研究的关键性技术主要有大规模的MIMO天线阵列、全双工、编码与调制、超密集组网、非正交多址接入(NOMA)、高频段通信、滤波器组多载波系统(FBMC)、软件定义网络(SDN)、网络功能虚拟化(NFV)、内容分发网络(CDN)等。作为5G关键技术之一,NOMA技术在同一个子载波、同一个OFDM符号对应的同一个资源单元上,根据不同的信号功率为多个用户使用,可达到多址接入的目的。由于系统在频域和时域上仍然保持各子载波正交和每个OFDM符号前插入CP,NOMA技术的基础仍是成熟的OFDM技术,实现难度相对较小。

本文分析了5G系统中NOMA的工作原理,尤其是NOMA技术中的关键检测技术——串行干扰消除(SIC)技术,分析了NOMA技术在发射端和接收端存在的困难,指出其实现难度,为了解5G提供有益的帮助。

1 非正交多址技术NOMA

NOMA的基本思想是在发送端采用分配用户发射功率的非正交发送,主动引入干扰信息,在接收端通过SIC接收机消除干扰,实现正确解调。NOMA技术在时域仍然可以用OFDM符号为最小单位,符号间插入CP防止符号间干扰;在频域仍然可以用子信道为最小单位,各子信道间采用OFDM技术,保持子信道间互为正交、互不干扰;每个子信道和OFDM符号对应的功率不再只给一个用户,而是由多个用户共享,但这种同一子信道和OFDM符号上的不同用户的信号功率是非正交的,因而产生共享信道的多址干扰(MAI),为了克服干扰,NOMA在接收端采用了串行干扰消除技术进行多用户干扰检测和删除,以保证系统的正常通信。

图1所示是OFDM技术频域和时域平面上用户信息承载的资源分配简图,图中频域的最小单位是频宽为15 kHz的子载波,时域的最小单位是时长为1/14 ms的OFDM符号,每个资源单元是由1个子载波和1个OFDM符号组成的资源平面。由于LTE使用了MIMO多天线,空域也是LTE系统承载用户信息的基本资源,但每个天线端口号对应的都是一块频域时域资源平面,因而空域上系统的资源分配仍然是以频域时域资源平面为单位。在功率域方面,由于频域时域承载资源平面上承载的用户信息功率一样,所以LTE系统中的OFDM技术没有开发用户信息传输的功率域,是二维平面资源承载系统,无线信道的传输能力相对较弱。

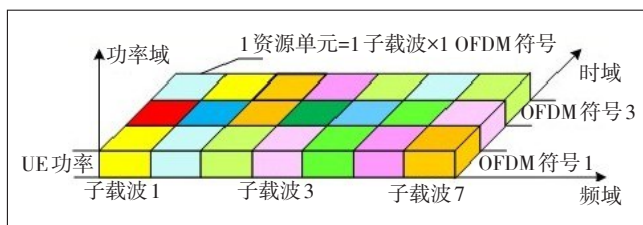


图1 OFDM技术的资源分配情况

图2所示是NOMA技术中频域、时域和功率域立体系统中用户信息承载的资源分配简图,对应的频域、时域平面与OFDM资源平面一样,不同的是它已开发了功率域应用,即频域、时域平面上的每个资源单元可以承载多个信号功率不同的用户。显然,NOMA技术是三维立体资源承载系统,无线信道的传输能力要比LTE强许多。当然,由于功率域的引入,系统的抗干扰技术将更加复杂,所以频域的子载波频宽可能并非是15 kHz,时域的OFDM符号时长可能并非是1/14 ms,但工作原理是一样的。因功率域中各用户的功率是非正交的,具有线性叠加性,由此而引起的同频同时用户的干扰不可避免,必须删除这些干扰才能保证系统的正常工作。

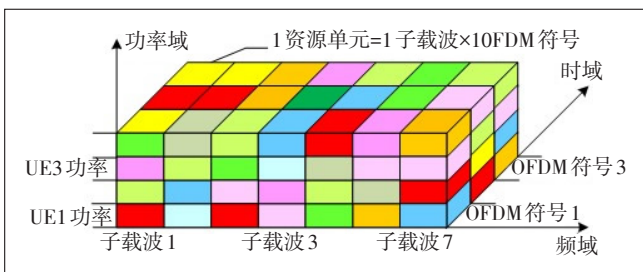


图2 NOMA技术的资源分配情况

NOMA是一种融合了3G的SIC和4G的OFDM的新技术,既克服了3G系统中的远近效应问题,又解决了4G系统中的同频干扰问题。NOMA是真正利用频域、时域、功率域的多用户复用技术,其中解决频域子载波间干扰的技术仍然是各子载波间的正交,解决时域OFDM符号间干扰的技术仍然是严格的子帧同步和添加的GP,解决功率域各用户功率间干扰的技术则是串行干扰消除技术SIC。在发送端,NOMA采用功率复用(或功率分配)技术,使同一子信道上的不同用户信号功率按照相关算法分配,使得到达接收端的每个用户的信号功率不一样。在接收端,NOMA采用SIC技术,根据不同用户信号功率大小按照一定顺序进行干扰消除,达到区分不同用户的目的。

图3所示为在OFDM基础上的NOMA多址技术原

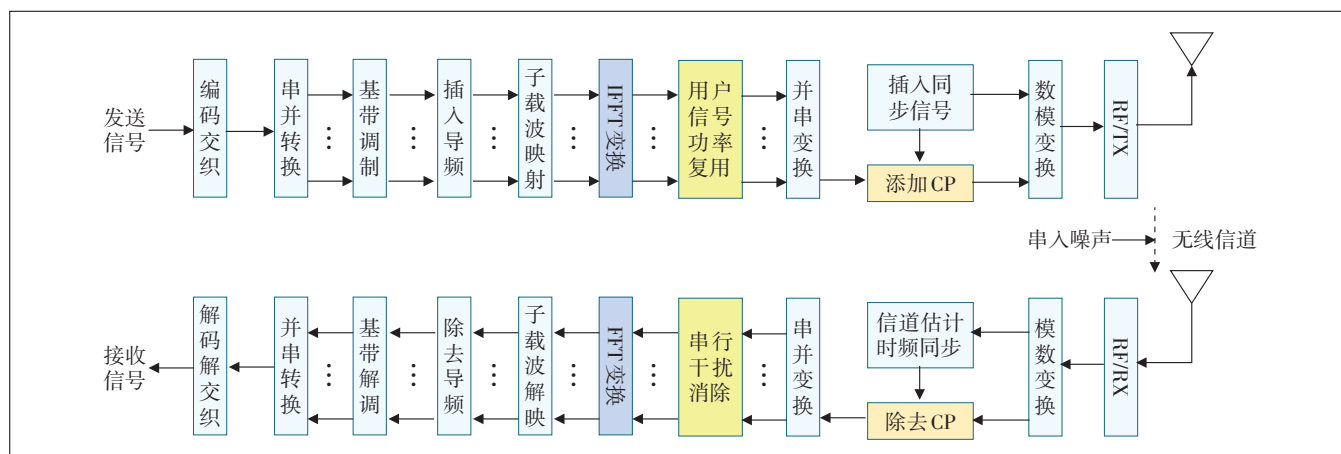


图3 NOMA技术原理简图

理简图,发送端在IFFT变换模块后增加了用户信号功率复用模块,接收端在FFT变换模块前增加了串行干扰消除SIC模块。因为在发射端只有在频域的正交子载波被分离出来后,才能对每个子载波上不同用户的信号功率采用复用技术,使之严格按照信道增益情况分配不同的发射功率。同样在接收端的FFT变换前通过干扰消除将每个子载波上不同信号功率的用户分离出来后,再参与子载波解码。NOMA的基本信号波形可设置为OFDM波形,NOMA在功率域叠加多个用户信号时可形成一个叠加编码,当用户之间信道差异很大(或路径损耗差值很大)时,NOMA的性能增益要比OFDM有所提高。

2 串行干扰消除(SIC)技术

NOMA技术是一个集频域、时域、功率域为一体的多址技术,可在同一子载波、同一OFDM符号对应的资源单元上,同时承载信号功率不同的多个用户。这种承载方式的最大问题是,大量叠加在一起的不同用户信号不可避免地存在明显的同步同时干扰。由于这些多址干扰(MAI)可以当作是一种有着强烈结构性特点的伪随机序列信号,可以利用这些伪随机序列的已知结构信息和统计信息(如相关性)来进一步消除这些干扰,提高系统的性能,这类抗MAI技术又叫多用户检测技术。多用户检测技术是根据信息论中的最佳联合检测理论提出的一类有效的抗MAI技术,SIC就是多用户检测技术之一。

SIC技术的简单原理是逐步减去最大功率用户信号中的MAI,SIC接收机对接收的多个用户信号,先按照功率的大小顺序操作,逐一进行数据判决,功率较大的信号优先,判出一个就减去该用户信号的MAI,进行

幅度恢复,并对剩下的用户再次进行判决,如此循环操作,直到消除所有信号中的MAI为止。SIC技术在NOMA系统中又叫SIC接收机,SIC接收机在性能上与传统检测器相比有较大提高,在硬件上的改动不大,易于实现。SIC接收机的每一级都需要有一个字符的时延,在信号功率发生变化时需要重新排序,上级判决对下级判决的影响很大,如果上级判决不可靠或判决出错误,就会引起下级各级性能严重下降。

SIC接收机的检测方案采用的是多级分层逐步检测机制,每一级只检测一个用户信号,如果在同一资源单元上叠加了 K 个用户信息,则SIC接收机需要 K 个级别的检测。由于系统对所有用户信息操作的顺序是根据其信号功率值排列进行的,又因为最强的用户信号最容易被系统捕获,所以功率越大的用户信号越有优先处理权。也就是说,每次接收端输出的信号都是经过SIC判决和除去MAI后的最大功率的用户信号,由于这时信号的SNR值最大,可以将MAI降到最低,且信号越弱获益越大,大大增加了检测的可靠性。多级分层结构采用将上一级输出信号作为下一级输入信号,不断重复着“检测、估计、消除、检测……”的循环操作,直到解码所有用户信号。

图4所示为SIC接收机工作原理简图。设有3个用户信号分别为 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 、 $x_3(t)$,且 $x_1(t) < x_2(t) < x_3(t)$,它们共享同一子信道和同一OFDM符号对应的资源单元,其中第 k 个用户信息比特值为 $x_k(t)$,加性白噪声为 $w_k(t)$,经过空中接口的信道响应为 $h_k(t)$,则SIC接收机接收到的这3个用户信号的叠加 $y(t)$ 可以表示为:

$$y(t) = \sum_{k=1}^3 h_k(t)x_k(t) + w_k(t)$$

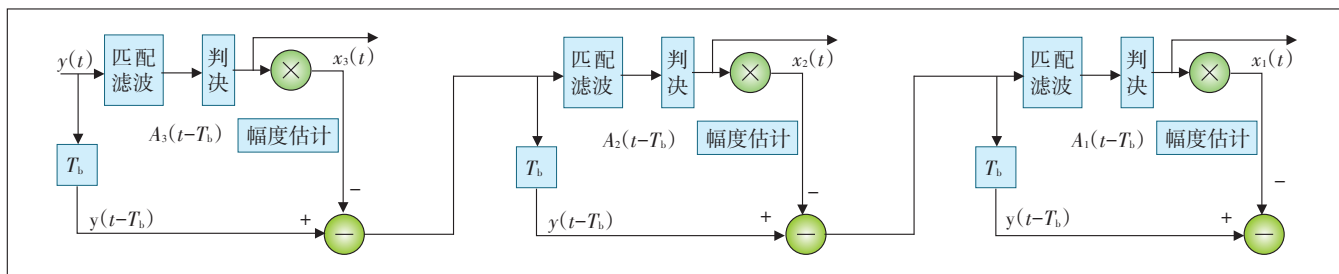


图4 SIC接收机工作原理

从上式中可以看出，SIC接收机接收到的是从无线信道的空中接口过来的包括信道干扰和白噪声干扰在内的所有用户信号。SIC接收机在第一级检测之前，先要将从发射机送来的并为SIC接收机接收到的所有用户信号，按照信号功率的大小进行排序，大致估计各信号的幅度。由于 $x_3(t)$ 信号功率最强，对应的SNR也最大，系统首先对最大信号 $x_3(t)$ 进行匹配滤波、判决，与估计幅度比对等处理操作，找到最大用户信号 $x_3(t)$ 并输出到下一级。留下的信号只有 $x_2(t)$ 最大了，SIC接收机继续按照功率顺序依次执行相同操作，完成对所有的用户信号检测，输送到下一级。

需要注意的是，在SIC接收机中的信号检测过程中，很重要的一点就是用户检测顺序。这里进行排序是根据用户的信号功率进行的。在NOMA中，发送端会采用功率复用技术对不同的用户进行功率分配，通常情况下，信道增益高的用户会少分配一些功率资源，信道增益低的用户会多分配一些功率资源。这些信号到达接收端后，每个用户的信号功率会不一样，对应的SNR值也不会不同，甚至影响SIC接收机的SNR。SIC接收机根据用户的信号功率进行排序，依次对不同的信号进行解调，达到区分用户的目的。

3 NOMA多址技术应用的困难

从原理上看，NOMA是最简单的非正交多址技术，因为NOMA技术是多个用户调制符号的直接线性叠加，这种功率域的线性叠加是一种独立的承载资源的简单叠加，理论上对现有的其他成熟技术没有多大影响，对当前应用的移动通信标准的影响也较小，甚至可以和OFDM简单结合，所以NOMA技术的实现难度理论上相对较小。然而这仅仅是对上行链路而言，对于下行链路，不管是发射端，还是接收端，NOMA技术本身带来的影响非同一般，存在的困难甚至在短期内还无法解决。

在NOMA的下行链路中，对于基站的发射机，面对小区内众多用户进行发射功率复用分配时，系统参考的主要数据是基站与终端间无线信道的信噪比SNR，由于终端是动态的，这使得系统对发射机的处理和响应能力要求很高；对于终端的SIC接收机，由于功率域叠加的传输需要有比特级的干扰消除，SIC接收机的结构复杂度同样不容小觑，而系统对终端的结构和耗能的要求同样很高。在《5G愿景与需求白皮书》中“高速度、低功耗、微时延”是系统的基本标准，所有面向5G的技术都必须以这个标准为参考，所以NOMA技术距离应用还有一段较远的路要走。

图5所示为NOMA系统下行链路发收端信号的处理流程。设在基站某扇区内有3个用户UE1、UE2、

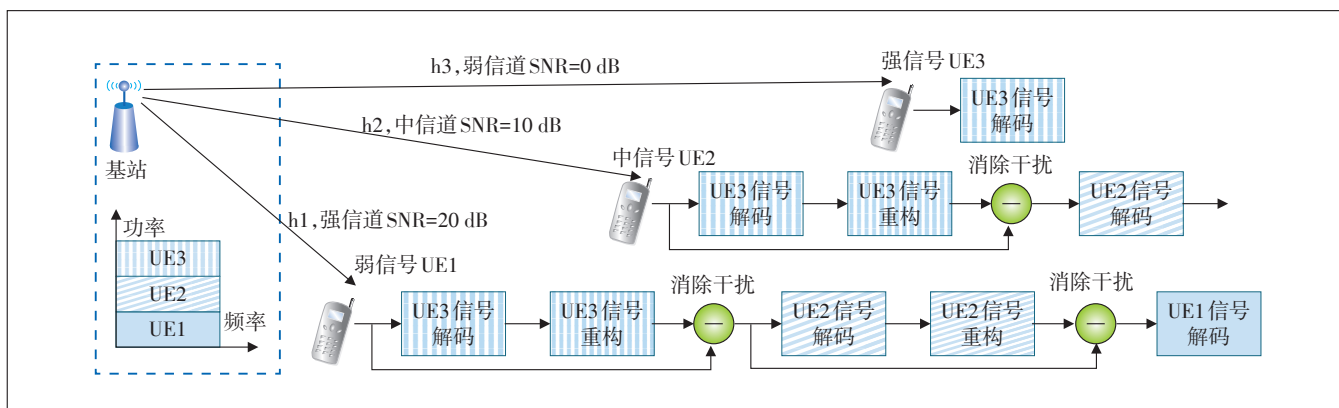


图5 NOMA下行链路发收端信号处理流程

UE3, 它们的信道响应分别为 h_1 、 h_2 、 h_3 , 信道对应的信噪比分别为 20、10、0 dB。显然 h_1 的信道质量最好、增益最高, 因而信噪比最高。 h_2 的信道质量中等, h_3 的信道质量最差。下面根据 NOMA 原理来分析 NOMA 下行链路中, 基站侧和终端侧的基本工作情况。

基站侧: 基站在对用户信号进行下行发射功率复用分配时, 由于 3 个用户与基站的信道质量不同, 系统根据各自不同的 SNR 值, 以及相关算法分配给 UE1 的发射信号功率最小, UE2 的发射信号功率中等, UE3 的发射信号功率最大, 即用户的信道越弱, 基站提供的下行信号的发射功率越强。

UE1 侧: 当 3 个发射功率强度不同的用户信号同时进入 UE1 的 SIC 接收机时, 由于强度高的信号最易被 SIC 接收机感知, 若想正确解调出 UE1 信号, 终端必先逐次对 UE3 和 UE2 信号解调、解码、重构、删除干扰, 并由终端 UE1 根据相关算法不断评估、比较 UE1 信道, 在得到最好的 SNR 值后, 最后解码出 UE1 信号送到下一级。

UE2 侧: 当 3 个发射功率强度不同的用户信号同时进入 UE2 的 SIC 接收机时, 终端同样先对 UE3 信号进行解调、解码、重构、删除干扰, 并由终端 UE2 根据相关算法不断评估、比较 UE2 信道, 由于 UE2 发射信号较强, 在对 UE3 处理后, 终端就能得到最好的 SNR 值, 所以终端将直接解码 UE2 信号并发送到下一级。

UE3 侧: 当 3 个发射功率强度不同的用户信号同时进入 UE3 的 SIC 接收机时, 由于基站分配给 UE3 的信号强度最高, 包括发给 UE1、UE2 的信号和其他干扰信号在内的所有信号, 都将受到抑制, 信道的 SNR 也很高, 所以终端无需做其他处理, 直接对 UE3 信号解码后送到下一级。

显然, 基站侧, 首先得了解各用户的信道情况, 由于用户是移动的, 基站必须不断地检测用户信道, 然后再不断地按信道质量合理分配下行信道的发射功率, 这种连续检测分析和分配发射工作, 不仅加重了基站的负担, 还延长了系统时延; 终端侧, 由于终端是通过正确评估信道的 SNR 值后, 才能解码出用户信号, 这种评估有较大的风险, 因为每一台终端都在不停地移动, 不同终端与基站间的信道质量也在不停地改变, 不仅终端要受到基站下发的信号强度不断变化的影响, 还要保证用户通话的感知质量, 终端的处理能力和结构的复杂性可想而知, 尤其是同小区用户数较多时。这种提高设备复杂度的做法与 5G 的基本标准相悖, 而

克服这些困难还有一定的难度。

4 结束语

NOMA 支持更多的终端同时接入网络, 在进行用户信号功率复用时, 无需知道或根本不依赖每个用户及时的信道状态信息 CSI 的反馈, 能在信道状态很差的高速移动场景中获得很好的性能, 可以组建更好的移动节点回程网络。NOMA 在发送端首次采用功率复用技术, 在基站应用相关算法, 对大范围内的用户信号功率进行差异补偿, 即不同用户分配不同的发射信号功率。NOMA 技术通过对功率域有较大范围信道增益差异的多用户发射信号的叠加, 将多用户信道增益差异转换为复用增益, 极大地提高了多址接入的性能。

NOMA 技术表面上并不复杂, 其发射模块和接收模块, 甚至可以认为是对 OFDM 技术的简单增补。但实现起来却有一定困难, 近期难以实现。因为 NOMA 技术在发射端和接收端采用的相关技术都会增加整个系统的复杂性和时延, 必须找到更科学、更简单的 SIC 接收机, 才能使 NOMA 技术顺利应用于 5G 系统。

参考文献:

- [1] 高峰, 和凯, 宋智源, 等. 5G 大规模紧耦合阵列天线研究[J]. 电信科学, 2015(5).
- [2] 康绍莉, 戴晓明. 面向 5G 的 PDMA 图样分割多址接入技术[J]. 电信网技术, 2015(5): 43-47.
- [3] 张琛. 异构网络协作通信技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [4] 张长青. TD-LTE 系统资源分配研究与建议[J]. 移动通信, 2013(16): 26-30.
- [5] 毕奇, 梁林, 杨珊, 等. 面向 5G 的非正交多址接入技术[J]. 电信科学, 2015(5): 1-8.
- [6] 张智彬. DS/CDMA 信号的串行干扰消除算法的误码率住址分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
- [7] 徐斌. 迭代多用户检测技术的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2008.
- [8] 殷作亮, 毛兴鹏, 张钦宇, 等. 实现 MIMO 系统串行干扰消除迫零检测的快速递归算法[J]. 通信学报, 2012(7): 67-74.
- [9] 张长青. TD-LTE 正交频分调制技术研究[J]. 移动通信, 2013(18): 34-38.

作者简介:

张长青, 毕业于中科院长春物理研究所, 高级工程师, 硕士, 主要从事计算机和移动通信技术相关工作。

