

文章编号: 1001 - 893X(2010)04 - 0112 - 05

LTE - Advanced 中 OFDM 技术的研究进展*

丁市召, 张祖凡

(重庆邮电大学, 重庆 400065)

摘要: OFDM 技术以其频谱利用率高、抗多径衰落、频谱资源灵活分配等优势, 成为新一代移动通信中的关键技术。介绍了 LTE - A 中关键技术 OFDM 的发展形势, 并对 OFDM 与其它多址技术、MIMO 技术相结合在 LTE - A 中的发展及其 BR - OFDMA 技术优化进行了分析。基于此分析结果, 提出了下一步的研究发展方向。

关键词: 多输入多输出; 正交频分复用; 频谱利用率; 块重复 - OFDMA

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001 - 893x.2010.04.024

Development Progress of OFDM Technology for LTE - Advanced System

DING Shi - zhao, ZHANG Zu - fan

(Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: OFDM has become a key technology for its high spectrum efficiency, anti-multipath fading ability, the flexibility in the allocation of spectrum resources and other advantages in modern mobile communication. This paper introduces the current situation of LTE - A key technology, or OFDM, makes the following analysis of OFDM in the development of LTE - A: the combining with multiple access technology, MIMO technology, and Block Repeat-OFDM Access(BR - OFDMA). According to the analysed result, it points out the developing trend of OFDM technology.

Key words: MIMO; OFDM; spectrum utilization; BR - OFDMA

1 引言

在无线通信系统中, 无线衰落信道中的多径传播、散射引起的信号衰落以及大的多径时延引起的符号间干扰, 成为实现高质量、高速率通信的技术难题。正交频分复用(OFDM)技术将信道分成若干正交子信道, 将高速数据信号转换成并行的低速子数据流, 调制到每个子信道上进行传输, 从而实现抗衰

落和抗码间干扰, 提高通信质量^[1], 从一定程度上解决了这些问题。

然而, OFDM 技术存在对频偏和相位噪声比较敏感、功率峰值与均值比(PAPR)大等缺点^[2-6], 很大程度上限制了其发展。为此, 研究人员致力于改善 OFDM 对频偏和相位噪声敏感的问题, 降低其峰均比, 促进了 OFDM 技术的进一步发展。

与此同时, 各标准化组织对系统的容量、传输速

* 收稿日期: 2010 - 01 - 22; 修回日期: 2010 - 03 - 05

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2009ZX03003 - 006 - 01 & 2009ZX03001 - 004 - 02); 重庆市科技攻关计划项目(CSTC, 2010AC2143); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ080516)

Foundation Item: The National Science and Technology Specific Program of China (No. 2009ZX03003 - 006 - 01 & 2009ZX03001 - 004 - 02); The Chongqing Scientific and Technological Key Task Project(No. CSTC, 2010AC2143); The Scientific Research Foundation of Chongqing Municipal Education Commission (No. KJ080516)

率、小区边缘用户的性能等提出了更高的要求,单一的 OFDM 系统已不能满足人们对现有通信技术的需求,于是人们力求在 OFDM 基础上寻求与其它技术相结合的方案。

从增加系统容量角度来看,OFDM 与其它多址技术相结合^[7-18]能允许多个用户共享有限的无线频谱,提高系统容量;从提高传输速率来看,OFDM 与 MIMO 技术结合^[19-21]将频率选择性衰落转换为子载波上的平坦衰落,信号通过多重切割之后,经过多重天线进行同步传送,大大提高了传输速率;从提高小区边缘用户的性能来看,大唐在前期的 B3G 研究中提出的一种新的多址接入技术 BR-OFDMA (Block Repeat-OFDMA) 和联合检测技术^[22],提高了小区边缘用户的性能。事实上,上述的处理技术会受到各种条件的约束。本文将对这些技术进行分析比较,为 OFDM 技术进一步的发展提供了分析依据。

2 OFDM 的研究现状

2.1 OFDM 技术与多址技术的结合

频分多址(FDMA)、时分多址(TDMA)和码分多址(CDMA)是无线通信系统中共享有效带宽的 3 种主要接入技术。OFDM 和多址技术的结合能够允许多个用户同时共享有限的无线频谱,从而获得较高的系统容量。但是与 OFDM 相结合的多址技术,也存在着自身的优势与劣势,本文对此进行分析比较。参见表 1,我们发现,在现有的与 OFDM 结合的多址方案,有着明显的优势。

但是,多址技术的相互结合不可避免地会引入新的问题,我们应该取长补短,充分利用它们的优势。为获得更大的自由度和更好的性能,我们还可以考虑将多种多址技术结合起来使用,未来通信系统可能采用的多址方案至少有如下 3 种^[23]:

- (1)将 OFDM 与 FDMA、TDMA 相结合,用时频网格区分用户;
- (2)将 OFDM 与 FDMA、CDMA 相结合,用不同的子载波集上的不同码字区分用户;
- (3)将 OFDM 与 CDMA、TDMA 相结合,联合不同的时间符号和不同码字来区分用户。

此外,表 1 还对 SDMA 与 OFDM 技术的结合进行了分析,SDMA 通常都不是独立使用的,而是与其它多址方式如 FDMA、TDMA 和 CDMA 等结合使用;也就是说,对于处于同一波束内的不同用户再用这些多址方式加以区分。但以其独特的优势并与多址

技术相结合,必能在未来通信中占有一席之地。

表 1 与 OFDM 相结合的多址方案的比较

Table 1 The comparison of multiple access technology combining with OFDM

相结合的多址方式	主要优势	主要缺点及需做工作
OFDM - TDMA ^[7-9]	(1)能够避免窄带衰落,提高频谱利用率和抗多径衰落的能力; (2)可支持具有不同数据速率的多种业务。	(1)分配方式存在带宽资源浪费、频带利用率低、灵活性差的缺点; (2)改善性能的同时增加了信令的开销。
OFDM - CDMA ^[10-11]	(1)能够有效提高频谱效率; (2)多抗窄带干扰和多径干扰。	OFDM - CDMA 系统的主要缺点是由于引入 CDMA 技术,必然存在多址干扰。它要求相干检测,所以信道估计和均衡是不可少的。鉴于此,多载波 CDMA 系统的多用户检测问题和多载波 CDMA 系统的信道估计和均衡问题是未来研究的重点。
OFDM - FDMA ^[12-15]	(1)子载波的分配采用自适应式,具有高度的适应性; (2)满足用户对不同的或可变的数据传输速率的需求; (3)有效对抗频率选择性衰落,提高频谱效率。	在快变信道中,AMC - OFDMA 系统,需要频繁的反馈信息增加信令的开销,适时性较差;FH - OFDMA 系统难以根据信道的状况产生一种简单有效的跳频图样;IFDMA 系统的数据是在时域信号上进行调制,系统信号构造的灵活性受到限制。
OFDM - SDMA ^[16-17]	提高天线增益,使功率控制更加合理有效,显著地提升系统容量;可以削弱来自外界的干扰,还可以降低对其它电子系统的干扰。	SDMA 实现的关键是智能天线技术,这也正是当前应用 SDMA 的难点。特别是对于移动用户,由于移动无线信道的复杂性,使得智能天线中关于多用户信号的动态捕获、识别与跟踪以及信道的辨识等算法极为复杂,从而对 DSP(数字信号处理)提出了极高的要求,对于当前的技术水平这还是个严峻的挑战。

3GPP 在 2005 年 12 月选定了 LTE 的基本传输技术,即下行采用 OFDMA 技术,上行 SC(单载波)FDMA。ITM - Advanced 根据 ITU 当前规划,2008 年

2月完成4G技术方案征集通函的制订,2008年年中开始4G候选方案的征集工作,2009年年中结束候选方案的征集,2010年年中完成候选方案的技术评估和融合,2012年前后发布4G技术标准方案。在技术上,ITM-Advanced将基于OFDM,在LTE(或相当)技术的基础上,作进一步增强。

2.2 LTE-A中的OFDM与MIMO技术的结合

MIMO技术是实现无线高速数据传输的核心技术之一,而OFDM技术的优势之一就是实现MIMO技术较简单。MIMO和OFDM结合是无线通信领域的重大突破,其频谱利用率高、信号传输稳定、传输速率高等基本特性能够满足下一代无线传输网发展要求。MIMO-OFDM系统内组合了多输入和多输出天线和正频分复用调制两大关键技术。这种系统通过空间复用技术可以提供更高的数据传输速率,又可以通过空时分集和正交频分复用达到很强的可靠性和频谱利用率,成为4G中关键技术之一,是当今移动通信领域研究的热点。

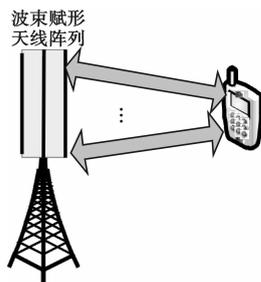
为了满足未来移动无线通信在高数据率和高系统容量方面的需求,LTE及LTE-A系统支持下行应用多输入多输出技术,包括空间复用、波束赋形以及传输分集。这3种技术对空间信道的要求不同,其应用的场景也有所不同。

(1)在低信噪比区域,应用传输分集技术和波束赋形技术可以有效提高接收信号的信噪比,从而提高传输速率或者覆盖范围;

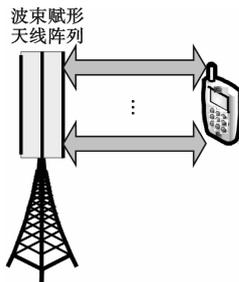
(2)在高信噪比区域,容量曲线接近平坦,再提高信噪比也无法明显改善传输速率,此时即可以应用空间复用技术来提高传输速率。

然而在实际系统中,如何获得复用和分集的折衷是目前需要解决的问题。在现有空间复用和空时编码都不能很好地获得复用增益与分集增益之间的折衷的情况下,人们提出了一种统计预编码方案,在对目前MIMO方案改变很小的情况下,可以获得复用增益与分集增益之间更好的折衷。需要指出的是,引入复杂的预编码方案,必然会对采用均衡技术的接收机提出更高的要求。

此外,在LTE系统的多种下行多天线模式基础上,至少从一方面可进行优化,即将R8中采用的单流波束赋形扩展到多流波束赋形^[23]。如图1所示,可将一个天线阵列形成两个或多个波束,同时用于一个用户端,形成基于波束赋形的SU-MIMO传输;如果将这多个波束分别用于多个用户端,可形成基于波束赋形的MU-MIMO传输。



(a) 基于多流波束赋形的SU-MIMO



(b) 基于多流波束赋形的MU-MIMO

图1 多流波束赋形

Fig. 1 Multi-stream beamforming

LTE-A要求支持的下行最高多天线配置规格为 8×8 ,同时多用户空分复用的增强被认为是标准化的重点。LTE-A相对于LTE系统的上行增强可行方案,一方面从终端来看,可以利用终端的多个功率放大器,利用上行发射分集来增强覆盖和上行空间复用来提高上行峰值速率等;另一方面,可以考虑在原有的MU-MIMO技术上,增加SU-MIMO、多天线发射分集和上行波束赋形等技术。

3 OFDM技术在LTE-A中的新发展及需要解决的问题

3.1 LTE-A中的BR-OFDMA技术

小区边缘和小区中心的性能差异,在LTE-Advanced系统中仍将是重大的难题。由于多天线技术的使用可以提高小区中心的数据率,却很难提高小区边缘的性能。另外,小区中心可以使用的高阶调制方式很难在小区边缘使用,这就造成小区中心和小区边缘的性能差异越来越大。

3GPP最近推出了LTE TDD系统的演进版本,即LTE+TDD方案。在此方案中,TD-SCDMA特色核心技术的扩展和增强,与MIMO、OFDMA主流技术有机结合,显著提高MIMO OFDMA系统性能,包括大唐电信提出的BR-OFDMA、基于BR-OFDMA的联合检测。BR-OFDMA多址接入技术创新地提出通过块重复和联合检测技术克服小区间的干扰,提

高小区容量和频谱效率,提高小区边缘用户的传输速率。位于相邻小区的两个小区边缘用户占用同一时频资源时,BR-OFDMA利用块重复增益和基于BR-OFDMA的联合检测技术能有效地减少两者之间的干扰。与MC-CDMA技术相比,BR-OFDMA技术更能大大增强小区边缘用户的性能。

从技术需求上看,LTE-A的上下行峰值速率分别为LTE的6.6倍和3.3倍,而上下行频谱效率分别为LTE的4倍和2倍,LTE的性能大为增强,彻底完成了3.9G到4G的转变。3GPP标准演进的LTE-A仍然将OFDM作为空中接口技术,而BR-OFDMA是块重复和OFDMA相结合的一种新的多址接入技术,必然推进3GPP标准的演进。

3.2 LTE-A中的BR-OFDMA技术需要解决的问题

BR-OFDMA技术能够抑制和消除小区间的干扰,提高系统容量,更容易实现同频组网,然而给出一个完整的基于BR-OFDMA技术的系统方案,还有大量的工作要做:

(1)在信号检测方面,由于BR-OFDMA系统与CDMA系统一样具有干扰受限的特征,其干扰主要来源于多址干扰(MAI)。为了进一步提高BR-OFDMA系统容量,可采用多用户检测(MUD)技术来降低或消除多址干扰(MAI),以改善系统性能,提高系统容量;

(2)在信道估计方面,应研究导频和数据之间的干扰和消除干扰的问题,以及在导频设计中如何消除干扰。其次要进行性能验证,同时给出具体的改进措施;

(3)在小区间资源协调与调度方面,为了能够更有效消除小区间多用户的干扰,BR-OFDMA需要采用多小区多用户联合检测算法。这就要求多小区用户应占用相同的时频资源,不同用户间尽量使用正交性优良的重复码,多小区间必须进行信息交互,协调多小区边缘用户所占用的时频资源和扰码及重复码;

(4)在信令设计方面,设计灵活高效的信令是一个重要的技术突破点,其中涉及到各种控制信令的编码、调制、扩频等具体的增强技术。基于这些信令增强技术,得到可靠的信令设计方案。同时,要分析考虑信令的有效性及其资源占用冗余度问题,尽量缩小信令开销,增强系统有效性。

另外,如何根据检测出的一段时间内小区的运行环境,分配块重复资源块组(BRBG)中的块重复资

源块(BRB)的数目。为减少外来的干扰,可以采取增加BRBG中BRB数目的方法,然而如上的处理必然会降低小区的运行负荷。因此,我们应该考虑到一种特殊的场景,在小区繁忙而外来干扰又比较严重的情况下,如何分配块重复资源块组(BRBG)中的块重复资源块(BRB)的数目,在最大可能的小区负荷情况下,尽可能地减少外来干扰。这就要求我们在干扰情况和小区运行负荷折衷考虑分配BRBG中BRB的数目问题。

4 结束语

众所周知,LTE-A已成最具竞争力的4G候选技术^[24-25]。OFDM作为LTE-A的核心技术,以后工作可从三方面展开:

(1)对于OFDM本身技术来说,如何进一步降低OFDM系统的PAPR和对频偏、相位噪声较敏感的问题;

(2)与OFDM相结合的新技术如MIMO技术,在达到LTE-A技术要求的同时,要对其兼容性、复杂度以及成本进行探究与评估;

(3)从继承性和后向兼容性考虑,对基于OFDMA的多址接入技术进行进一步的优化设计,减少原有的不足之处,从而满足LTE-Advanced的需求。

OFDM技术能够对抗多径衰落,提高频谱利用率,进一步增强系统的性能,成为下一代无线通信中一项关键技术,所以,对OFDM系统的进一步研究尤为重要。本文对OFDM系统较前沿的技术进行分析,并指出了下一步的工作方向,其中与其它技术如MIMO的结合应用,必将成为一项极具发展前景的研究方向。

参考文献:

- [1] Hwang Taewon, Yang Chenyang, Wu Gang. OFDM and Its Wireless Applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 1673 - 1694.
- [2] Xue Kaiyuan, Yang Hongwen, Su Shenglan. The Clipping Noise and PAPR in the OFDM Syst - em[C]//Proceedings of WRI International Conference on Communications and Mobile Computing. [S.l.]: IEEE, 2009: 265 - 269.
- [3] XIAO Yue, WRN Qing - song, LEI Xia. Improved PTS for PAPR Reduction in OFDM Systems [C]//Proceedings of the third Advanced International Conference on Telecommunications. [S.l.]: IEEE, 2007: 37 - 37.
- [4] Slimane S B. Reducing the Peak - to - Average Power Ratio of OFDM Signals Through Precoding[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(2): 686 - 695.
- [5] Zhu X, Zhu G, Jiang T. Reducing the peak-to-average power

- ratio using unitary matrix transformation[J]. IEEE Communications, 2009, 3(2): 161 – 171.
- [6] Ouyang Yuan. Peak-to-Average Power Ratio Reduction by Cross – Antenna Translation for SFBC MIMO – OFDM Systems[C]//Proceedings of the 2009 IEEE Vehicular Technology Conference-Spring (VTC 2009 – Spring). Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1 – 4.
- [7] Mordachev V, Kozel V. Comparative Analysis of Environmental Safety of Cellular Radio Networks with FDMA/TDMA and CDMA[C]//Proceedings of 2007 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. [S. l.]: IEEE, 2007: 327 – 330.
- [8] Takeo Fujii. Dynamic Subcarrier Controlled TDMA/OFDM Multi – Hop Wireless Network for Improving End to End Throughput[C]//Proceedings of IEEE Conference on Wireless Communications and Networking. [S. l.]: IEEE, 2009: 1 – 6.
- [9] Cionca V, Newe, Dadarlat T V. TDMA Protocol Requirements for Wireless Sensor Networks [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Sensor Technologies and Applications Second. [S. l.]: IEEE, 2008: 30 – 35.
- [10] Tsai Shang-Chun, Ueng Fang – Biau, Chen Jun – Da. Smart Antennas for Multi – Rate MC – CDMA Communication Systems[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Vehicular Technology. [S. l.]: IEEE, 2008: 524 – 528.
- [11] Chen J D, Ueng F B, Su H. Performance Analysis of OFDM – CDMA Receivers in Multipath Fading Channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 4805 – 4818.
- [12] Chong Chia – Chin, Watanabe F, Inamura H. On the performance comparison of VSF – OFCDMA and OFDMA[C]// Proceedings of 2008 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. [S. l.]: IEEE, 2008: 1 – 6.
- [13] Wong, Ian C Evans, Brian L. Adaptive downlink OFDMA resource allocation [C]// Proceedings of 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. [S. l.]: IEEE, 2008: 2203 – 2207.
- [14] Jin Bae Park, Young Jin Sang, Seong – Lyun Kim. Inter – Cell Interference Management for Downlink FH – OFDMA Systems[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Advanced Communication Technology. [S. l.]: IEEE, 2008: 1040 – 1044.
- [15] Wei Li, Takyu O, Adachi K. Performance evaluation of decision directed channel estimation for single user IFDMA [C]//Proceedings of IEEE Symposium on Radio and Wireless. [S. l.]: IEEE, 2008: 659 – 662.
- [16] Osseiran, Skillermark A, Olsson P M. Multi – Antenna SDMA in OFDM Radio Network Systems: Modeling and Evaluations[C]//Proceedings of IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. [S. l.]: IEEE, 2007: 1 – 5.
- [17] Choong II Yeh, Dong Seung Kwon. SDMA, Multiuser Diversity, and BF Using Array Antenna in OFDMA System [C]//Proceedings of IEEE Conference on Vehicular Technology. [S. l.]: IEEE, 2007: 671 – 675.
- [18] Berardinelli, G Ruiz de Temino, L A Frattasi S. OFDMA vs. SC – FDMA: performance comparison in local area IMT – A scenarios[J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 15(5): 127 – 129.
- [19] Zhao Chunming, Robert J Baxley, et al. Peak-to-Average Power Ratio and Power Efficiency Considerations in MIMO – OFDM Systems[J]. IEEE Communications, 2008, 12(4): 268 – 270.
- [20] Gao Feifei, Wu Wenyuan, Zeng Yonghong. A Novel Blind Channel Estimation for CP – Based MIMO OFDM Systems [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. [S. l.]: IEEE, 2007: 2586 – 2591.
- [21] Tang Taiwen, Robert W Heath, Jr. Space – Time Interference Cancellation in MIMO – OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(5): 1802 – 1816.
- [22] WANG Ying – min, SUN Shao – hui, XIE Yong – bin, et al. Research on the Block Repeated – OFDMA[J]. China Communication, 2008(10): 95 – 98.
- [23] 沈嘉, 索士强, 全海洋. 3GPP 长期演进(LTE)技术原理与系统设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008. SHEN Jia, SUO Shi – qiang, QUAN Hai – yang. 3GPP Long Term Evolution: Principle and System Design[M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2008. (in Chinese)
- [24] 3GPP TSG – RAN, TR 36.913, Requirements for Further Advancements for E – UTRA (LTE – Advanced)[S].
- [25] Bellanger M. Future radio systems: Impact of the air interface[C]//Proceedings of International Conference on Advanced Technologies for Communications. [S. l.]: IEEE, 2008: 125 – 127.

作者简介:

丁市召(1986 –),男,山东日照人,重庆邮电大学硕士研究生,主要研究方向为无线移动通信理论与技术;

DING Shi – zhao (male) was born in Rizhao, Shandong Province, in 1986. He is now a graduate student of Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research concerns the theory and technology of wireless mobile communications networks.

Email: seajol.d@163.com

张祖凡(1972 –),男,湖北荆州人,博士,教授,主要研究方向为无线移动通信理论与技术。

ZHANG Zu – fan (male) was born in Jinzhou, Hubei Province, in 1972. He is now a professor with the Ph. D. degree. His research concerns the theory and technology of wireless mobile communications networks.

Email: zhangzf@cqupt.edu.cn