

LTE 中 SC-FDMA 技术的研究

江 泌, 曾黄麟, 徐增伟

(四川理工学院自动化与电子信息学院, 四川 自贡 643000)

摘 要:SC-FDMA 技术作为 3GPP LTE 上行链路多址技术,它联合了单载波调制技术、正交频率复用和频域均衡技术(FDE),是一种新的多址技术。文中概述了 SC-FDMA 技术,分析了子载波分配对系统的影响以及与 OFDMA、DS-CDMA 技术间的联系。

关键词:SC-FDMA; LTE; OFDMA; DS-CDMA

中图分类号:TN92

文献标识码:A

引 言

随着无线多媒体应用变得越来越广泛,对较高数据率的迫切需求导致了需要更宽的传输带宽。然而利用较宽的带宽,信道的频率选择性衰落和码间串扰(ISI)将变得更加严重。对于一个传统的信号载波通信系统,使用时域均衡可以有效消除 ISI。然而,对于一个宽带信道通信系统,由于技术的复杂性,用时域滤波器去实行均衡会有很大的困难。

多载波技术是消除宽带信道频率选择性衰落的有效方法,即把整个信道再细分为更小的子带宽或子载波。正交频分复用(OFDM)是一种多载波调制技术^[1-2],它使用正交的子载波去传递信息。在频域,因为子载波的带宽被设计成比相关带宽小,各个子信道可被看成是一个平坦的衰落信道,它简化了信道均衡过程。在时域,通过把高速的数据流转换为在并行传输的多个低速的数据流,由此 OFDM 解决了宽带通信中存在的 ISI 问题。

然而 OFDM 具有多载波系统固有的高峰均比(PAPR)特性,提高了系统成本,降低了系统的功率利用率。对于下行链路而言,基站作为信号发射端,可以容忍较高的功放成本和发射功率,但在上行链路中,终端设备作为信号发射功率增大会减小终端电池寿命,从而增加了终端设备成本。因此,为避免 OFDM 的上述缺点,在不改变 OFDM 系统传输结构的基础上降低 OFDM 信号

的 PAPR,提出了备受关注的新型的多址技术,即 SC-FDMA^[1-5]。

SC-FDMA(Single-Carrier Frequency Division Multiple Access),全称叫做单载波频分多址技术,该技术联合了传统的频分多址技术和单载波传输方案,并且具有动态的带宽分配功能,已经成为了 LTE 上行传输的方案。SC-FDMA 技术相比于多载波传输技术 OFDMA,它能够有效地降低发射信号的峰均比(Peak to Average Power Ratio, PAPR),从而相应地提高了功放的效率和增加了小区的覆盖面积^[4]。

1 SC-FDMA

1.1 SC-FDMA 概述

SC-FDMA 是在 OFDMA 的基础上,增加了 DFT/IDFT 模块,因此 SC-FDMA 也称为 DFT 扩展正交频分复用(DFT-S-OFDM)^[4]。SC-FDMA 与 OFDMA 的发射和接收框架如图 1 所示。发射机的输入和接收机的输出是复调制信号。实际的系统根据信道质量动态地采用调制技术,如在弱信道上采用 BPSK 调制,在强信道上使用 64-QAM 调制。

时域的数据码元在 OFDMA 调制前通过 DFT 被转换为频域码元。多用户正交性是由于各个用户在频域占用不同的子载波,类似于 OFDMA 的情况。因为整个发射信号是单载波信号,与 OFDMA 产生多载波信号的情况比较,其固有的 PAPR 较低。

收稿日期:2012-03-22

基金项目:四川省科技厅应用基础研究专项课题项目(2011JY0051);四川省白酒及生物技术重点实验室重点专项课题项目(NJ2010-01)

作者简介:江 泌(1985-),男,湖北武汉人,硕士生,主要从事通信系统和智能信息处理方面的研究,(E-mail)jm1885_1010@yahoo.com.cn

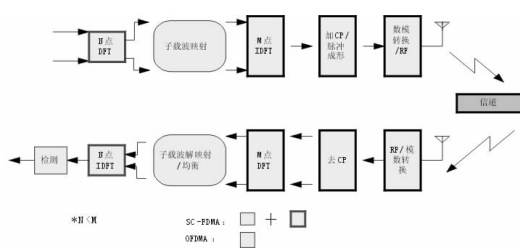


图 1 SC-FDMA 与 OFDMA 系统架构

SC-FDMA 系统的发射机首先把调制码元按块分组,每个块有 N 个码元。接着执行 N 点的 DFT 产生输入码元的频域信号。然后各个 N 点 DFT 输出映射到 $M (> N)$ 个正交子载波上进行发射。如果 $N = M/Q$ 和所有的终端都发射每块 N 个码元,那么系统就能处理 Q 个同时发射无信道间干扰的传输。 Q 是码元序列带宽扩展因子。

发射机在发射信号前需要实现另外两个信号处理操作。插入参考码元集作为循环前缀 (CP),目的是提供保护间隔阻止由多径传播引起的块间干扰 (IBI)。同时发射机执行线性滤波操作称为脉冲成形,目的是削减带外信号能量。通常,CP 是复制码元块的最后的部分,它被添加于各个码元块的开头部分。有如下原因:首先,CP 作为连续的两个块之间的一个保护间隔。如果 CP 长度长于信道最大时延,更确切地说,即信道脉冲响应的长度,此时将没有 IBI。其次,由于 CP 是码元块最后部分的复制,它将转换离散时间线性卷积为离散时间圆卷积。因而发射数据通过信道的传输可被认为是在信道脉冲响应和发射数据块之间的圆卷积,在频域它是 DFT 频率抽样的逐点相乘。

接收机通过 DFT 转换接收信号到频域,从子载波上解映射,然后实现频域均衡。多数的时域均衡技术,例如最小平均平方误差 (MMSE) 均衡,判决反馈均衡 (DFE) 和 turbo 均衡^[1],都能应用于频域均衡技术。均衡后的码元通过 $IDFT$ 变换到时域,然后在时域进行检测和译码。

1.2 子载波映射方式

子载波映射模块用于确定应如何将 DFT 输出的频域采样映射到输入 IFFT 的子载波上,并在哪些子载波上填 0。如图 2 所示,假设需要在相邻的 DFT 频域采样之间输入 $L-1$ 个 0。当 $L = 1$ 时,即将频域采样映射到连续的子载波上时,系统产生 Localized SC-FDMA 信号,此时系统会在 DFT 频域采样没有占用的高端和低端子载波上填 0,如图 2(a) 所示。当 $L > 1$ 时,即将 DFT 频域采样映射到离散子载波上时,系统产生 Distributed SC-FDMA 信号,此时系统会在相邻 DFT 频域采样之间填

$L-1$ 个 0,如图 2(b) 所示。当分布式子载波映射方式为均匀的子载波映射方式时,称为 IFDMA (交织频分多址)^[4]。Distributed FDMA 可以获得频域分集增益,而 localized FDMA 通过调度可以获得多用户分集增益。Distributed FDMA 的频域分集增益和 localized FDMA 的时频资源调度是当今的研究热点^[5]。

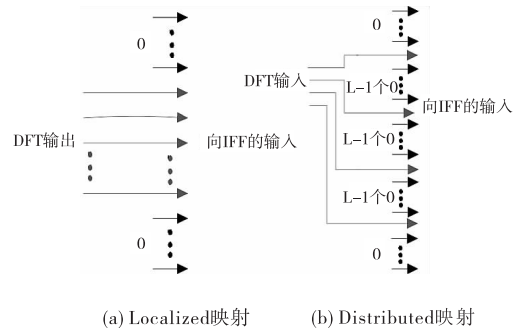


图 2 子载波映射

分布式系统将分配给一个用户的子载波分散到整个带宽,从而获得频率分集增益。但这种方式下信道估计较为复杂,也无法采用频域调度。设计中应根据实际情况在上述两种方式中灵活进行选择。一个系统可以获得的最大频域分集增益可表示为:

$$G_{Max} = B_{System} / B_c \quad (1)$$

如果子载波数 $Q \geq G_{Max}$, 那么它将获得的增益;如果子载波数 $Q < G_{Max}$, 它将获得 $G = Q$ 的增益。因此在一个以 Distributed 方式分布子载波的系统,合理设计子载波数目尤为重要,在波数较少,不能获得理想的频域分集增益;相反,载波数达到一定数目频域分集增益就会饱和,再增加载波数也无法获得更多的频域分集增益了。

“集中式”即是若干连续子载波分配给一个用户,这种方式下系统可以通过频域调度 (scheduling) 选择较优的子载波组 (用户) 进行传输,从而获得多用户分集增益。基于频域的多用户分集增益是由于不同用户在同一时刻性能优良的子频段 (对应于不同的子载波) 可能彼此不同,只把条件好的子载波分配给某一用户,从而使所有用户都获得性能的提升—误码率降低,吞吐量增加等。时延敏感的用户无法获得基于时间的多用户分集增益,对于这类用户来说,频域多用户分集增益是非常可观的。另外,集中方式也可以降低信道估计的难度。但这种方式获得的频率分集增益较小,用户平均性能略差。

如图 3 所示,SC-FDMA 采用 IFDMA 和 LFDMA 方式下的误符号率 (SER) 比较,以及在不同子带下的 SER 比较,由图可知,在理想 AWGN 的条件下,IFDMA 和

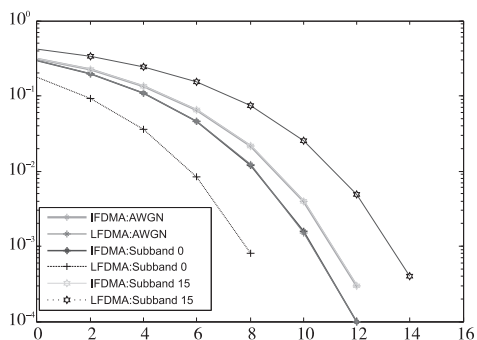


图3 分布式映射与集中式映射比较

LFDMA 的 SER 性能相同。在子带 0 时 LFDMA 的 SER 性能较优,而在子带 15 时 IFDMA 的性能较优。而对 IFDMA 和 LFDMA 单独来看,IFDMA 在子带 0 和子带 15 的性能相同,而 LFDMA 在子带 0 和子带 15 的性能不相同,子带 0 的 SER 较优,而子带 15 的 SER 的较差。

2 SC-FDMA 与 OFDMA

如图 1 所示,OFDMA 与 SC-FDMA 发射机和接收机实现许多共同的信号处理功能。唯一的不同是 SC-FDMA 中前面的 DFT。正是这个原因 SC-FDMA 有时也称为 DFT 扩展或者 DFT 预编译 OFDMA^[6]。这两种技术有以下共同属性:

- (1) 基于块的数据调制与传输。
- (2) 传输带宽划分为子带,信息携带于离散子载波。
- (3) 频域信道均衡。
- (4) 使用循环前缀阻止块间干扰。

然而,两者存在的明显不同之处使得两个系统实现功能有所区别。就接收机端数据检测而言,OFDMA 在各个子载波基础上执行,而 SC-FDMA 是在 IDFT 操作之后执行。由于这个区别,OFDMA 对信道频谱上零值更敏感,它需要信道编码或者功率控制去克服此缺点。同时,OFDMA 并行传输的数据块,在延长的时间周期里,调制时域码元持续时间被扩大了,而 SC-FDMA 串行的数据块调制码元压缩为更小的码片,与直接序列码分多址(DS-CDMA)系统非常的相似。而最明显的区别是 OFDMA 发射多载波信号,SC-FDMA 发射单载波信号,所以 SC-FDMA 的 PAPR 性能优于 OFDMA。

如图 4 所示,SC-FDMA 与 OFDMA 的 PAPR 性能比较图,由互补累积分布函数(CCDF)描述^[1-3]。由图可知 OFDM 的 PAPR 明显高于 SC-FDMA 的 PAPR 性能,IFDMA 的 PAPR 最优。

3 SC-FDMA 与 DS-CDMA

SC-FDMA 与 DS-CDMA/FDE^[1] 相似之处在于:首

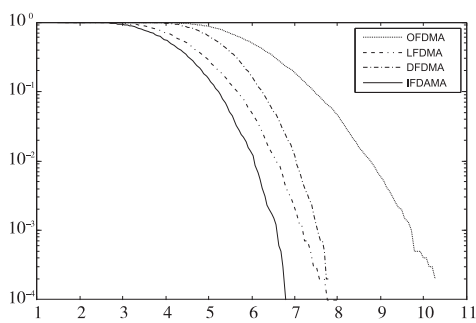


图4 SC-FDMA 与 OFDMA PAPR 比较

先,两种技术获得处理增益都来自于扩展窄带数据到宽带信道,即扩频操作;其次,它们都是单载波传输结构,与多载波结构相比都具有较低的 PAPR。另外 DS-CDMA 与 IFDMA 有一个有趣的联系,只要交换扩频序列与数据序列的角色位置,DS-CDMA 调制就变成了 IFDMA 调制,这个参考例子如图 5 所示,即 {1,1,1,1} 扩频序列与 4 个数据块交换。可以看到改变了扩频序列的角色位置的结果是 IFDMA 调制形式。

SC-FDMA 比 DS-CDMA/FDE 优越的是信道调度资源分配,因为它能削减信道的频率选择性衰落。

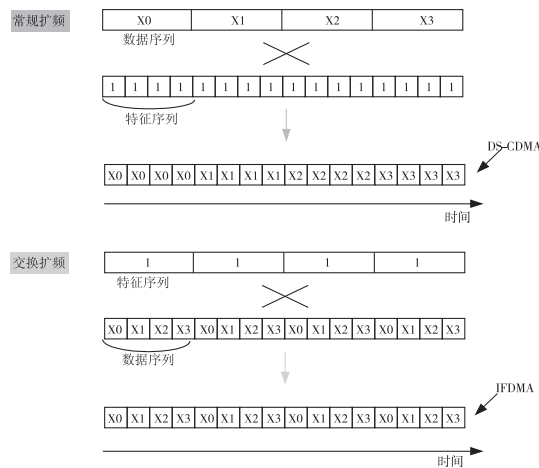


图5 特征序列和数据序列交换位置扩频

4 结 论

本文概述了 SC-FDMA 系统架构,同时也说明了它与 OFDMA、DS-CDMA 的联系与区别和子载波分配对系统影响。SC-FDMA、OFDMA 和 DS-CDMA/FDE,三种多址方案共同之处:基于块的处理方式、基于 DFT 频域信道均衡和采用循环前缀阻止干扰。文中只是简单分析了 SC-FDMA 系统,研究还不深入。SC-FDMA 未来的研究工作有:载波频偏对系统性能的影响及同步问题,基于导频信号的 SC-FDMA 峰值功率特性和信道估计问题,多输入多输出(MIMO) SC-FDMA 系统,以

及与扩频技术结合的混合子载波分配 SC-FDMA-CDMA 系统。

参 考 文 献:

- [1] Hyung G Myung, David J Goodman. Single Carrier FDMA: A New Air Interface for Long Term Evolution [M]. Singapore: Markono print Media Pte Ltd, 2008.
- [2] 温 杨. 基于 DFT-SOFDM 的上行链路传输技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [3] Hyung G Myung. Introduction to Single Carrier FDMA [J]. Qualcomm/Flarion Technologies, 2007, 8 (8): 2144-2148.
- [4] 沈 嘉, 索士强. 3GPP 长期演进 (LTE) 系统架构与技术规范 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [5] 王 维. LTE 上行接收技术的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
- [6] 胡宏林, 徐 景. 3GPP LTE 无线链路关键技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [7] 李德智, 李明富. CDMA 网络优化方法研究 [J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2005, 18(1): 33-37.
- [8] 陈明举. OFDM 系统中 MMSE 与 LS 信道估计算法的比较研究 [J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2009, 22(2): 91-93.

Research of Single Carrier FDMA Technical in LTE

JIANG Bi, ZENG Huang-lin, XU Zeng-wei

(School of Automation and Electronic Information, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: SC-FDMA is adopted as the uplink multiple access scheme in 3GPP Long Term Evolution (LTE). It is a new multiple access technique that utilizes single carrier modulation, orthogonal frequency multiplexing, and frequency domain equalization. An overview of SC-FDMA is given to analyze the influence of different subcarrier mapping to the system and the relationship with OFDMA and DS-CDMA.

Key words: SC-FDMA; LTE; OFDMA; DS-CDMA