

# OFDM——第四代移动通信的主流技术

陈良明, 韩泽耀

(上海交通大学微电子学院, 上海 200030)

**摘要:**正交频分复用(OFDM)是一种特殊的多载波数字调制技术。不像常规的单载波技术,如AM/FM(调幅/调频)在某时刻只用单一频率发送单一信号,OFDM在经过特别计算的正交频率上同时发送多路高速信号。OFDM技术的最大优点是对抗频率选择性衰落或窄带干扰,同时又提高了频谱利用率。OFDM已经吸引了许多世界级电信设备制造商包括Alcatel-Lucent, Nortel(北电网络), Cisco, Nokia等公司的极大兴趣和认可,纷纷开始对其关键技术和标准进行研究和开发,希望能够在无线通信领域新的潜在市场中首先占领制高点,一些公司希望OFDM能推动更高速的第四代移动通信系统(4G)的形成。人们开始集中越来越多的精力开发OFDM技术在移动通信领域的应用,在无线宽带接入及未来4G领域中,OFDM技术都将成为继CDMA技术之后的又一核心技术。介绍了OFDM的原理和技术优势,分析了现存几种类型OFDM技术的特点,展望了OFDM标准化和在第四代移动通信系统的应用。

**关键词:**OFDM;第三、四代移动通信系统;FFT/IFFT;MIMO;FPGA

**中图分类号:**TN914.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2008)03-0184-04

## OFDM—Main Technology of 4G Mobile Communication System

CHEN Liang-ming, HAN Ze-yao

(School of Microelectronics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) is a special digital modulation technology of multi-carriers. Unlike normal single carrier technology, such as AM/FM, OFDM can transmit a number of data streams simultaneously through its sub-carriers which are orthogonal. The orthogonality also allows high spectral efficiency, and frequency (subcarrier) interleaving increases resistance to frequency-selective channel conditions such as fading. OFDM has attracted many suppliers worldwide, such as Alcatel-Lucent, Nortel, Cisco, Nokia etc. into the R&D of its key techniques and standards. All of them want to have a share of the potential wireless communication marketing and try to make 4G come into being based on OFDM. Nowadays, more and more people are involved into OFDM technology, undoubtedly it will be the core technology of wireless wideband access system and 4G after CDMA technology. In this article, the principle, advantages and applications of OFDM in communications are briefly introduced. In the end, highlighted the standardization of OFDM and its applications in 4G mobile communication system.

**Key words:** OFDM; 3G, 4G mobile communication system; FFT/IFFT; MIMO; FPGA

### 0 引言

随着通信技术的不断成熟和发展,如今的通信方式多种多样,变化日新月异,从最初的有线通信到无线通信,再到现在的光纤通信,人们对通信速率的要求越来越高。随着第三代移动通信技术的不断应用,目前人们对第四代移动通信技术的研究和开发正如火如荼地进行。而第四代移动通信将以数据通信和图像通信为主,数据通信的速率比第三代要大大提高,室外移动通信的速率将达到20Mb/s以上,室内移动通信速率

达到100Mb/s以上。近年来,随着DSP/FPGA等芯片技术的发展,傅里叶变换/反变换、高速Modem采用的64/128/256QAM技术、栅格编码技术、软判决技术、信道自适应技术、插入保护时段等成熟技术的逐步引入<sup>[1]</sup>, OFDM作为一种可以有效对抗信号波形间干扰的高速无线通信技术,引起了广泛关注。人们开始集中越来越多的精力开发OFDM技术在移动通信领域的应用,预计OFDM技术将成为第三代以后的移动通信的主流技术。

### 1 OFDM技术的基本原理

OFDM的英文全称为Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 中文含义为正交频分复用技术。

收稿日期:2007-06-22

作者简介:陈良明(1975-),男,上海人,硕士研究生,工程师,研究方向为移动通信系统设计;导师:付宇卓,副教授,研究方向为无线通讯SOC。

OFDM 技术属于多载波调制 (Multi-Carrier Modulation, MCM) 的一种, 是一种无线环境下的高速传输技术。无线信道的频率响应曲线通常是非平坦的, 而 OFDM 技术的主要思想就是在频域内将给定信道分成许多正交子信道, 在每个子信道上使用一个子载波进行调制, 并且各子载波并行传输。这样, 每条链路都可以独立调制, 因而该系统不论在上行还是在下行链路上, 都可以容易地同时容纳多种混合调制方式。因此, 尽管总的信道是非平坦的, 且具有频率选择性, 但是每个子信道是相对平坦的, 在每个子信道上进行的是窄带传输, 信号带宽小于信道的相应带宽, 这样就可以大大消除信号波形间的干扰<sup>[2]</sup>。由于在 OFDM 系统中各个子信道的载波相互正交, 于是它们的频谱是相互重叠的, 这样不但减小了子载波间的相互干扰, 同时又提高了频谱利用率。由于这种技术具有在杂波干扰下传送信号的能力, 因此常常会被利用在容易被外界干扰或者抵抗外界干扰能力较差的传输环境中。

其实, OFDM 并不是最近发展起来的新技术, OFDM 技术的应用已有近 40 年的历史, 主要用于军用的无线高频通信系统。但是, 传统的 FDM (频分复用) 理论将带宽分成几个子信道, 中间用保护频带来降低干扰, 它们同时发送数据。例如: 有线电视系统和模拟无线广播等, 接收机必须调谐到相应的频率。而 OFDM 系统比传统的 FDM 系统要求的带宽要少得多。由于使用无干扰正交载波技术, 单个载波间无需保护频带, 这样使得可用频谱的使用效率更高。另外, OFDM 技术可动态分配在子信道上的数据。为获得最大的数据吞吐量, 多载波调制器可以智能地分配更多的数据到噪声小的子信道上。传统 OFDM 系统的结构非常复杂, 从而限制了其进一步推广。直到 20 世纪 70 年代, 人们提出了采用 DFT/IDFT (离散傅里叶变换/离散傅里叶逆变换) 来实现多个载波的调制, 简化了系统结构, 使得 OFDM 技术更趋于实用化。

目前 OFDM 技术已经被广泛应用于广播式的音频和视频领域和民用通信系统中, 主要的应用包括: 非对称的数字用户环路 (ADSL)、ETSI 标准的数字音频广播 (DAB)、数字视频广播 (DVB)、高清晰度电视 (HDTV)、无线局域网 (WLAN) 等<sup>[3]</sup>。OFDM 系统组成如图 1 所示。

OFDM 技术的推出其实是为了提高载波的频谱利用率, 或者是为了改进对多载波的调制用的, 它的特点是各子载波相互正交, 使扩频调制后的频谱可以相

互重叠, 从而减小了子载波间的相互干扰。在对每个载波完成调制以后, 为了增加数据的吞吐量, 提高数据传输的速度, 它又采用了一种叫作 HomePlug 的处理技术, 来对所有将要被发送数据信号位的载波进行合并处理, 把众多的单个信号合并成一个独立的传输信号进行发送。另外 OFDM 之所以备受关注, 其中一条重要的原因是它可以利用离散傅里叶反变换/离散傅里叶逆变换 (DFT/IDFT) 代替多载波调制和解调, 而目前, 采用 DSP 或 FPGA 实现 DFT/IDFT 的技术已非常成熟和方便。

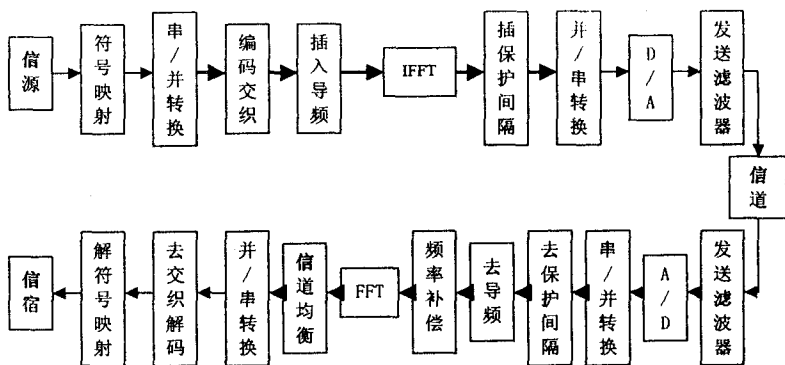


图1 OFDM系统的组成

子载波间正交可以使载波间交叠而彼此间又不会因交叠失真, 正交的子载波可通过离散傅里叶变换 (DFT) 获得 (在实际应用中, 用快速傅里叶变换 FFT)。在接收端, 对 OFDM 符号进行解调的过程中, 需要计算这些点上所对应的每个子载波频率的最大值, 因为在每个子载波频率最大值处, 所有其他子载波的频谱值恰好为 0, 所以可以从多个相互重叠的子信道符号中提取每一个子信道符号, 而不会受到其他子信道的干扰。因此用正交子载波技术可以节省宝贵的频率资源, 如图 2, 图 3 所示。

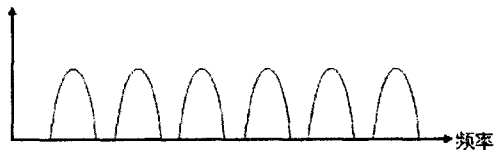


图2 传统的频分复用(FDM)多载波技术

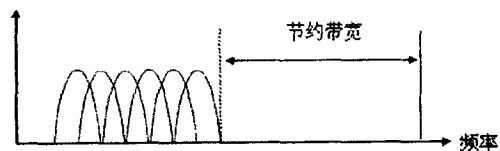


图3 OFDM多载波调制技术

## 2 OFDM 技术的优势

(1) OFDM 技术的最大优点是对抗频率选择性衰落或窄带干扰。在单载波系统中, 单个衰落或干扰能

够导致整个通信链路失败,但是在多载波系统中,仅仅有很小一部分载波会受到干扰。对这些子信道可以采用纠错码来进行纠错。

(2) 在 OFDM 系统中,每条链路都可以独立调制,因而该系统不论在上行还是在下行链路上都可以容易地同时容纳多种混合调制方式。这就可以引入“自适应调制”的概念。它增加了系统的灵活性,例如,在信道好的条件下终端可以采用较高阶的如 64QAM 调制以获得最大频谱效率,而在信道条件变差时可以选择 QPSK(四相移相键控)调制等低阶调制来确保信噪比。这样,系统就可以在频谱利用率和误码率之间取得最佳平衡。

(3) 可以有效地对抗信号波形间的干扰,适用于多径环境和衰落信道中的高速数据传输。当信道中因为多径传输而出现频率选择性衰落时,只有落在频带凹陷处的子载波以及其携带的信息受影响,其他的子载波未受损害,因此系统总的误码率性能要好得多。

(4) 通过各个子载波的联合编码,具有很强的抗衰落能力。OFDM 技术本身已经利用了信道的频率分集,如果衰落不是特别严重,就没有必要再加时域均衡器。通过将各个信道联合编码,则可以使系统性能得到提高。

(5) 该技术能够持续不断地监控传输介质上通信特性的突然变化。由于通信路径传送数据的能力会随时间发生变化,所以 OFDM 能动态地与之相适应,并且接通和切断相应的载波以保证持续地进行成功的通信。

(6) 可以选用基于 IFFT/FFT 的 OFDM 实现方法,从而简化系统。采用现场可编程门阵列(FPGA)进行 IFFT/FFT 等数字信号处理,不仅加速了产品上市时间,还可满足现在和下一代便携式设计所需要的成本、性能、尺寸等方面的要求,并提供系统级支持和享有快速有效地对新设计进行优化的灵活性。

(7) 信道利用率很高,这一点在频谱资源有限的无线环境中尤为重要;当子载波个数很大时,系统的频谱利用率趋于 2Baud/Hz。

### 3 OFDM 技术需要克服的缺陷

尽管 OFDM 有很多的优点,但在技术上仍存在以下两个主要缺点:

(1) 对频率偏移和相位噪声很敏感。移动无线信道存在时变性,在传输过程中会出现无线信号的频率偏移,这会使 OFDM 系统子载波间的正交性遭到破坏,使子信道间的信号相互干扰,因此频率同步是 OFDM 系统的一个重要问题。为了不破坏子载波间

的正交性,在接收端进行 FFT 变换前,必须对频率偏差进行估计和补偿。

可采用循环前缀方法对频率进行估计,即通过在时域内把 OFDM 符号的后面部分插入到该符号的开始部分,形成循环前缀。利用这一特性,可将信号延迟后与原信号进行相关运算,这样循环前缀的相关输出就可以用来估计频率偏差。

(2) 峰值与均值功率比(PAPR - Peak to Average Power Ratio)相对较大,这个比值的增大会降低射频放大器的功率效率<sup>[4]</sup>。由于 OFDM 信号在时域上为  $N$  个正交子载波信号的叠加,当这  $N$  个信号恰好都以峰值出现并将相加时,OFDM 信号也产生最大峰值,该峰值功率是平均功率的  $N$  倍。这样,为了不失真地传输这些高峰均值比的 OFDM 信号,对发送端和接收端的功率放大器和 A/D 变换器的线性度要求较高,且发送效率较低。

近年来,围绕这两个问题进行了大量研究工作,并且已经取得了许多进展。

## 4 不同类型的 OFDM

采用 OFDM 技术的一个主要障碍是现在存在许多不兼容版本且没有统一标准。目前主要的 OFDM 技术有以下几种。

### 4.1 V-OFDM

由宽带产品供应商 Iospan 公司和 Cisco 系统公司开发 V-OFDM(Vector OFDM)。该系统使用空间分集技术,利用多重信号发射以提高带宽,通过使用特殊天线和信号处理来实现。天线接收信号再进行信号处理,使延迟信号合并变为更高的数据流。V-OFDM 大多用于固定无线城域网(MAN)。

### 4.2 W-OFDM

目前,W-OFDM(Wideband OFDM)已经正式通过 IEEE 组织的认证,成为 IEEE 802.16a 标准(无线城域网的国际通用标准)物理层调制技术。OFDM 论坛称 Wi-LAN 公司的 W-OFDM 应该是标准版本。W-OFDM 使用的不是紧压缩正交载波,而是在正交信道之间引入额外频率空间。通过在 W-OFDM 数据的每一帧插入一些已知数据计算出传输信道的“估计”(这个“估计”就是理论中的“传输函数”),并利用这个“估计”来纠正选频衰落的影响。这能更好地减少干扰,并且对 OFDM 传输中存在的一些问题(如抖动)有了更高的容忍度。

无线互联网商务服务供应商在城域网中使用 W-OFDM,因为城域网中的收发信机往往是在室外并需要更高的容错能力。

### 4.3 F-OFDM

F-OFDM(Flash OFDM)是1998年由Bell实验室发明,后来由朗讯科技下设的Flarion公司推出商用化产品。相对V-OFDM、W-OFDM而言,它的特点是能在移动环境下工作,是一种移动宽带接入Internet解决方案。F-OFDM在OFDM中引入快速跳频扩频技术,该技术在传输中不断变换频率,即在每个时隙中可以根据跳频图样来选择每个用户所用的子载波频率。这种系统在比OFDM所需频带更宽的频带上传输信号,将信号能量扩展到更宽频谱上,提高了信号的抗干扰能力。且由于高速切换子载波,因而相邻节点可以使用相同频率的子载波,可提高频率利用效率。该技术与GSM后向兼容,可以为蜂窝电话用户和其他移动用户提供宽带服务。

### 4.4 MIMO-OFDM

MIMO(Multiple Input Multiple Output,多输入多输出)-OFDM是一种将OFDM和MIMO相结合的技术。MIMO是该项技术的核心,是在收发两端使用多个天线,每个收发天线对之间形成一个MIMO子信道,若各发射接收天线间的通道响应独立,则MIMO系统可以创造多个并行空间信道。通过这些并行空间信道独立地传输信息使得数据传输率得以提高。而OFDM技术有极好的抗衰落特性,通过在OFDM传输系统中采用阵列天线实现空间分集。通过结合MIMO和OFDM技术的优点,利用时间、频率和空间三种分集技术,使无线系统对噪声、干扰、多径的容忍大大增加,而且大大提高频谱利用率和业务覆盖范围<sup>[5]</sup>。

为了进一步提高系统传输速率,使用OFDM技术的无线通信网需要增加载波的数量,而这种方法会造成系统复杂度的增加,并增大系统的带宽,这对今天的带宽受限和功率受限的无线通信网系统就不太适合了。而MIMO技术能在不增加带宽的情况下成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率,因此将MIMO技术与OFDM技术相结合是适应下一代无线网络发展要求的。因此,MIMO和OFDM的结合成为第四代移动通信系统中有效对抗频率选择性衰落、提高数据传输速率、增大系统容量的关键技术。

### 4.5 Multiband OFDM

Multiband OFDM联盟由50多个世界知名企业所组成,手机芯片制造商德州仪器(TI)是该联盟的发起人之一。Samsung, Panasonic及Nokia都是该联盟的成

员。Multiband OFDM联盟称,与W-OFDM相比,该技术产品的数据将更为强大,其中包括能轻松处理视频流的能力。

## 5 应用现状及展望

目前世界各国许多大公司、研究团体已经充分认识到OFDM技术的应用前景,纷纷加入世界性的OFDM论坛,专门讨论OFDM在技术上、市场推广上的各方面问题,从而进一步推动了OFDM技术的商用化。

2005年3月,北电(Nortel)在渥太华高级无线实验室进行的演示采用了多输入多输出(MIMO)的无线通信技术,此项技术将奠定北电4G移动宽带解决方案的基础。在演示中,北电在蜂窝站点和4G设备上采用了MIMO支持的多天线系统,以及正交频分复用(OFDM)传输技术。而此前北电及行业研究表明,这两项技术的结合,确保了以最低的价格提供最高的网络带宽和最大的频谱效率。2006年2月,北电的高速OFDM和MIMO分组接入标准获得了批准,成为针对无线网络标准长期演进(LTE)的3G伙伴关系项目(3GPP)的一部分。

随着人们对通信数据化、宽带化、个人化和移动化的需求,OFDM技术在综合无线接入领域将越来越得到广泛的应用。可以预见,随着人们对OFDM技术的不断深入研究和完善,OFDM技术将成为第四代移动通信的主流技术之一。

### 参考文献:

- [1] 佟学俭,罗涛. OFDM移动通信技术原理与应用[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2003.
- [2] Steendam H, Moeneclaey M. Sensitivity of Orthogonal Frequency division Multiplexed Systems to Carrier and Clock Synchronization Errors[J]. Signal Processing, 2000, 80(17): 1217 - 1229.
- [3] 王文博,郑侃. 宽带无线通信OFDM技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2003.
- [4] 汪裕民. OFDM关键技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [5] Sampath H. A fourth-generation MIMO-OFDM broadband wireless system: design, performance and field trial results[J]. IEEE Commun. Mag., 2002, 40: 266 - 268.

《计算机技术与发展》欢迎投稿,欢迎订阅。