

OFDM技术应用及其发展趋势

吕浩田, 张 涛, 苏发富

69224部队, 新疆 库车
Email: 1829891676@qq.com

收稿日期: 2020年9月23日; 录用日期: 2020年10月1日; 发布日期: 2020年10月20日

摘 要

正交频分复用(OFDM)是一种把高速传输的串行数据经过频分复用转换成并行传输目标的多载波传输技术。首先介绍该技术的基本原理、实现方法, 然后对该技术的优缺点进行阐述, 最后总结该技术的发展趋势。

关键词

正交频分复用, 快速傅里叶变换, 移动通信

OFDM Technology and Its Development Trend

Haotian Lv, Tao Zhang, Fafu Su

Unit 69224, Kuche Xinjiang
Email: 1829891676@qq.com

Received: Sep. 23rd, 2020; accepted: Oct. 1st, 2020; published: Oct. 20th, 2020

Abstract

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is a multi-carrier transmission technology that converts high-speed serial data into parallel transmission targets through frequency division multiplexing. Firstly, the basic principle and implementation method of this technology are introduced. Then, the advantages and disadvantages of this technology are expounded. Finally, the development trend of this technology is summarized.

Keywords

Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Fast Fourier Transform, Mobile Communications

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着当今数据处理速度、传输速度的飞快提升,数据传输的质量日益重要。正交频分复用(OFDM)可以支持多用户接入,并具有较好的抗多径衰弱能力。在上世纪 60 年代 OFDM 技术思想被首次提出,但是由于子载波之间相互正交的关系要求选用快速傅里叶变换去完成调制,但是被快速傅里叶变换设备的繁杂度与使用的严苛条件等要素限制了,因此初期并未获得科学的实际应用。上个世纪 80 年代早期,数字集成电路完成了快速傅里叶变换这种技术,OFDM 调制技术又一次变成探究的焦点。大家对于多载波调制在数字移动通信方面进行了更深层的研究,这就使得 OFDM 技术在无线移动通信方面的使用进展迅速。到目前为止,关于 OFDM 技术的使用已经约有七十年,随着时间不断推移,大家对于 OFDM 技术的探究更趋向实用性,由于 OFDM 的频率使用比率极高,并且适于快速傅里叶变换这种计算方法的处理,在许多种体系内都能成功使用,并在思想与技术方面较为完善。当前 OFDM 技术早已应用于 4G-LTE 技术[1],是长期演进三种核心技术中的一种,并且在 5G 中依然是首选的一种调制方式。

2. OFDM 技术概述

2.1. OFDM 技术基本认识

OFDM 技术属于一类特别的多载波输送策略,其基本原理是把信道划为一些正交子信道,把速率较高的串行信息转为速率较低的并行子数据流且完成并行输送。

2.2. OFDM 技术实现方法

OFDM 技术其实质是在频域中把信道划为一些正交的子信道,把速率较高的信息流转为子信息流,在任意 1 个子信道中选用 1 个子载波实施对应的调制,各类子载波能够在子信道实施并行方式的传递。因为任意 1 个子信道中均使用窄带方式的输送,信号的带宽会小于信道的有关带宽,所以这些子信道能够当作是平坦方式的衰弱,进而极大程度上清除了信号波形之间的干扰。在 OFDM 此类体系中,各类载波呈现出正交的关系,任意 1 个载波在某一时间内都具备整数个载波周期。关于载波自身的频谱零点可以和临近载波的零点实施重叠,能够减弱子载波间的干扰,并且也提升了频谱的使用比率。另外,在 OFDM 符号之间放置一类保护间隔,确保其长度高于无线信道最高的时延拓展,能够极大程度上清除了因为多径而造成的符号之间的干扰如果选用循环前缀(CP, Cyclic Prefix)当作保护的间隔,那么能够百分之百防止因为多径而产生的信道间的干扰[2]。由于其简洁有效,因此 OFDM 技术成为了一项无线高速通信体系内极为关键的技术。

OFDM 技术最早的任务是处理多径效应对信息输送造成的干扰。由于较高的输送速度导致频谱使用的比率不理想,并且多径输送的符号干扰是一个非常麻烦的问题,OFDM 技术处理这种问题是在符号之间添加保护间隔,无需传递信号,此类状况下依旧无法处置信道方面对接口控制信息(ICI, Interface Control Information)的干扰,假如子载波间损坏了彼此的正交特性,接收端无法极佳地接纳并且恢复初始信号,这个部分的问题具有毁灭性,因此 OFDM 技术的处理办法其实是从符号后方取出部分信息,置入每一个符号的前方当作保护间隔去实施输送,这类办法就是循环前缀。

OFDM 这种体系在二进制比特流导入之后输送流程中,先是通过编码实施交互、调制和添加导频,

然后实施串/并的转化,划为 N 个 M 字信息流,之后就依次对每个子信道信息实施正交调制,之后实施相加操作,并/串转换之后,插入一个循环前缀(CP, Cyclic Prefix),接着再进行模拟转换(D/A),最后通过射频放大后发送到接收端,接收端把循环前缀(CP, Cyclic Prefix)去除后对各个信道进行解调(FFT),把数据串并转变后,经过解编码的交织后还原出最初信号,其原理为图 1 所示。

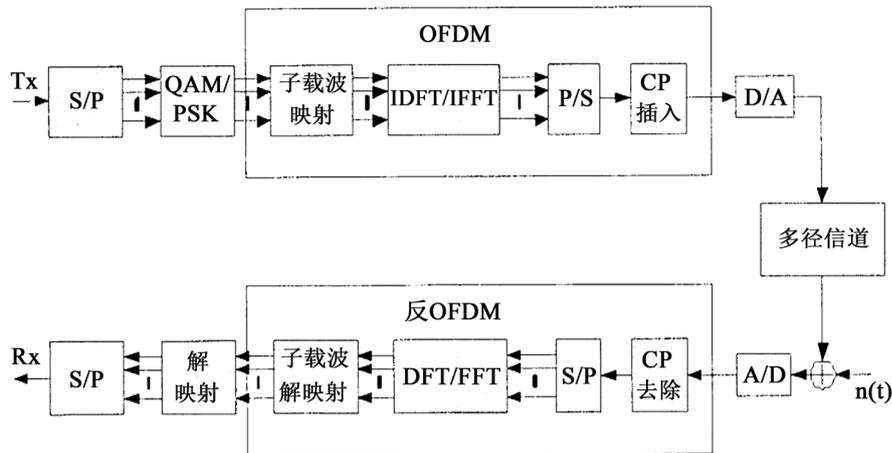


Figure 1. Schematic diagram of OFDM system
图 1. OFDM 系统原理图

2.3. OFDM 技术主要特点

2.3.1. OFDM 技术的主要优点如下

1) 频谱使用比率较高。因为 OFDM 技术选用了彼此正交的子载波当作子信道,OFDM 的子载波间不但无需对带宽实施维护,并且频谱间能够进行重叠,极大程度上运用频谱数据。而且,OFDM 内子载波同样选取多进制的调制办法,能够深层次提升频谱使用的比率。

2) 抵御多径干扰的实力较强。OFDM 技术经过把等候发送的数据码元实施串并转化、把速率较高的串行信息转化为 N 列速率较低的并行信息,结果码元的速率减小,进而确保码元的周期增加,所以科学地减弱多径效应造成码间串扰的干扰。另外,OFDM 技术指出了增添循环前缀 CP 当作维护间隔的办法,结果不但可以保障各个信道之间的正交特性不被干扰,能够最大限度降低乃至清除码间存在的干扰。

3) 抵御衰弱的实力较强。对于 1 个单载波输送体系而言,假如发生衰弱或干扰,那么全部的输送链路也许会无效,然而 OFDM 调制样式适合多径与衰弱信道内的速率较高的信息输送。如果发生衰弱或干扰的情况,那么唯有落在频率凹陷部位的载波和它携带的数据遭到干扰,别的子载波不会受到毁坏。

4) 资源的分派比较灵敏。简洁的调制解调流程中,OFDM 体系内运用 IDFT 与 DFT 去完成正交的调制解调,关于子载波的数量偏多的体系,能够经过选用 FFT 去完成。因为数字信号处置(DSP, Digital Signal Processing)技术与数字集成电路(CPLD, Complex PLD)技术以极快的速度开发,极易完成运用 IFFT 与 FFT 来完成计算的一系列任务。

5) 非对称型输送速率较快。OFDM 体系能够经过选用数目不同的子信道去调控上下行链路的输送速度,可以实施上下行速度的非对称型输送,此外,OFDM 能够经过载入计算方法将信息置于速率较高的信道中实施输送操作,因此 OFDM 体系可以完成速率较高的非对称型信息输送。

2.3.2. OFDM 技术的主要不足

1) 系统的复杂度比较高。OFDM 系统是由每一个子信道来决定其发送功率和数据速率的,所以为了

能够有效实施信号功率与信息的分派从而引进载入算法,然而引进载入算法,引进具有自适应特征的调制技术,将导致收发装备趋于繁杂,如果终端的移动速率极高,那么将无法适于自适应的调制技术。

2) 频率具有极高的敏感性。OFDM 体系对于噪音与载波的频偏较为敏感,极易遭到频率误差的干扰,由于其彼此遮盖的子信道频率随时间的变化而变化,导致子载波间损坏了彼此的正交特性,信号输送的频谱出现了偏离的情况,致使子信道之间出现干扰。

3) 峰值因数偏高。由于 OFDM 体系的导出信号由数个信道进行叠加,由数个单独调制的子载波构成,多个信号的同相位进行累加后也会造成合成信号出现极大的峰值功率,多个子信号叠加后的系统整体的瞬时功率会远远大于系统的平均功率,所以会产生很大的峰均比(PAPR, Peak to Average Power Ratio),会使功率的输送效力减小。与此同时,对于发射机中有关放大器的动态范畴与线性度条件影响巨大,会致使信号发生畸变,OFDM 的不同子信道间关于正交方面的性能遭到损坏,形成了一系列的干扰,影响体系特性。

3. OFDM 的应用

根据 OFDM 技术的这些优点,在很多技术领域已经得到了广泛的应用。

3.1. 在数字音视频广播业务方面。

数字音频广播(DVB)与模拟广播相比可以提高更高质量的语音数字业务,在 1995 年,欧洲电信标准协会通过了第一个 DAB 标准——ETS300401。此外,日本的 ISDB-T 和美国的 IBOC 方案也都包括了 OFDM 技术,在数字视频广播(DVB)的 DVB-T 标准中 OFDM 技术也得到了应用。

3.2. 在无线局域网领域

在高速无线局域网的相关标准中,OFDM 技术应用在了 HiperLAN/2 物理层中,同时 IEEE802.11 标准的 ISM 频段中,在 2.4 GHz 和 5.8 GHz 两个频段均采用了该技术的 IEEE802.11a 和 IEEE802.11g 标准。

3.3. 在 4G 蜂窝系统方案中

在考虑设计 4G 蜂窝网络的系统中的空中接口时,OFDM 技术凭借自身在对抗多径衰弱方面有着显著的优势而被采用。如日本 NTT DoCoMo 以及中国的 FuTURE 方案等,大大提高了系统的性能。

3.4. 第五代移动通信(5G)中的应用

与 OFDM 技术相比,OQAM-OFDM 技术更低带外频谱泄露[3],因此也成为 5G 关键技术的重要组成部分。由于 OQAM-OFDM 技术对各载波之间不需要同步,要求没有 OFDM 那么严格,因此具有更好的兼容性,从而适应更多的业务需求[4]。此外,5G 统一空中接口技术 F-OFDM 也是以 OFDM 技术为核心,F-OFDM 的子带滤波器能抑制子带带外频谱泄露。

4. OFDM 技术发展趋势

随着高速通信系统的不断发展,怎样在有限的信道容量资源、多数用户同时需求的前提下,充分为用户提供时效性强的服务是当务之急。多址方案的设计可以有效的解决这方面的相关问题。

4.1. OFDM 技术的多址方案

4.1.1. OFDM-CDMA 方案

码分多址技术(CDMA, Code Division Multiple Access)是移动通信的主流技术。窄带信号通过与扩频

信号相乘变为宽带信号，这里的扩频信号可以用伪随机码序列，这就让用户共享了相同的资源。增加了频谱效率，并且不会产生较大干扰。

OFDM 技术适宜使用在高速信息传递过程中，它能够将信息流划为许多子信息流，之后将它们依次调制分为许多个彼此正交的子载波中。子载波中的数据速度偏低，所有的子载波信道具备平衰落特性，能够科学地降低信道频率选择性的干扰，进而降低因为 ISI 引来的系统性能的亏损。子载波具备的正交特性使得信道干扰的不良影响被降低到每个单独子载波，然而，子载波处在深衰落状态下，假如没有选用纠错编码，那么将导致极高的误码率。OFDM 技术与 CDMA 技术分别有自己的优势和劣势，两者的联合能够补短取长，实现更好的通信传输成效，势必会在新一代的无线移动通信体系内饰演更加关键的角色。

4.1.2. OFDM-FDMA 方案

OFDM-FDMA 多址连入计划传送能够把带宽分割为正交型的子载波集，把不同的子载波集划分给不同的用户，给用户提供的带宽资源能够灵活的在各个接收终端之间共享，有效避免了不同用户之间出现多址干扰。为了避免不同用户之间无线信道的干扰，可以只将具有高信噪比的子载波划分给不同用户[5]，这实际上是按频率的划分来给用户分配多址的接入方式。如果体系有 M 个用户，1 个用户运用 N 个子载波，那么体系内会有 $M \times N$ 个子载波。对于第 $(m=1, 2, \dots, M)$ 个用户而言，它的导入信息先实施信道编码等相关操作，之后把交织过的比特流实施符号映射，将形成的矢量信号通过调制分派至 N 个子载波中。从理论方面剖析，任何 N 个子载波并未分派给别的 $M-1$ 个用户，便能够把这 N 个子载波分派给这位用户。然而由于子载波间具有关联特性，一般会使用一类等间隙的子载波分派计划。先是选用 N 个间隙最长(用 M 表示)的子载波，并且把它们分派给用户一；之后把这些子载波在频域移动 1 个子载波的方位，把它们分派给用户二……以此类推，最后生成的新子载波集分派给第 $m+1$ 个用户。如此分派给这 M 个用户的子载波集内，它们的关联性较弱，能够遏制多址干扰，并且信令的经费最低。在体系的时间同步还有载波同步均非常优良的状况下，接纳的信号能够不存在 ISI、ICI 这些干扰。

4.1.3. OFDM-TDMA 方案

OFDM-TDMA 多址接入方案在某个时段能够把所有的带宽分派给 1 个用户。这属于一类通过时间区别用户的多址连入样式。在 TDMA 帧架构内，1 个 TDMA 无线帧通过一些子帧组成，1 个子帧通过一些时隙构成，OFDM 信号在时隙内传递。在 OFDM-TDMA 传递体系内，在 OFDM-TDMA 传输系统中，采用测试驱动开发(TDD)模式，通过灵活地调整上行和下行链路之间的转换点来满足业务的需要，实现了双向业务，在高速传输数据的同时，实现了对资源的灵活管理。

如果用户的链路数据中上行高于下行，那么能够调节子帧内的转化点，增加用户使用的时隙数，由于传输至用户的 OFDM 符号数可变，所以 OFDM-TDMA 方案可以提供给用户不同数据速率的多种业务选择。如果用户的上行链路数据偏少，申请较低的信息传送速度，那么调节子帧内的转化点，降低用户运用的时隙数，分派给此用户的 OFDM 符号数对应降低[6]。

不同的多址连入算法的繁杂程度极大地依靠所有体系选用的自适应样式。对于 OFDM-TDMA 体系来讲，因为信噪比偏低的子载波被滤掉或运用自适应的调制技术，要求传递另外的数据，尽管改良了性能，但是同样增大了信令的开支。

4.2. OFDM 技术与空时技术、多天线技术的结合

4.2.1. 空时技术

如果载波频率很高，并且波长较短，对于移动终端方面就可以使用多个天线。空时处理技术和多输入多输出天线结构用相距很近的天线和差错控制编码和小尺度时间和空间分集，极大程度地提高了频谱

效率。在独立的瑞利分布散射环境中，理论上的数据速率随着天线数目的增加而呈线性关系而加大。与当今无线局域网和蜂窝电话系统中所用的调制技术和编码技术相比，OFDM 技术与 MIMO 空时技术结合的频谱效率可高一个数量级。从目前技术发展来看，空时技术不仅可以适应蜂窝网的使用，也可适应于自组网应用。

4.2.2. 多天线技术

因为多天线技术能够较为理想的提升体系容量和凸显体系特性，并且能够较为明显的提升网络的稳定性与可靠性，大大增加信号的覆盖范围，所以尤其适合使用在因特网与多媒体这些业务中。MIMO-OFDM 系统中将 MIMO 技术和 OFDM 技术两者结合，极大提高了系统的性能。在 MIMO-OFDM 体系内运用发送分集、空间复用、接受分集和干扰消除、自适应调制和编码等相关的部分核心技术与计算方法。

4.3. OFDM 技术与融合式接入结构的结合

4.3.1. 融合式接入结构

随着不断涌现的高清电视、手机视频和虚拟现实等新兴业务，人们对带宽的需求越来越大。高速宽带接入不仅是人们愈发迫切的需求，也是技术发展的必由之路。这些年，WDM-PON 技术(波分复用无源光网络)和 RoF 技术(光纤无线通信系统)分别作为有线与无线宽带接入领域中新型的解决方案被大家广泛关注[7]，OFDM 技术凭借着其在通信系统特有的优势，将 OFDM 技术与融合式接入结构结合大大提升了系统性能。

WDM-PON 虽然可以给用户提供非常大的带宽资源，但是它的可移动性有限；RoF 技术能够为用户提供一定范围内的移动性，但是它所提供的带宽并不能像前者那样满足高清电视等带宽对敏感性的需求。因此，有线接入与无线接入的融合是未来通信必然的发展方向[8]。所以人们提出了融合式接入网的解决方案来实现有线和无线的融合，推动接入网发展。

常见的融合接入式结构在发送端将数据进行预编码，调制到不同波长的光波上，用 AWG (列阵波导光栅)将不同波长的光波合路到一起后，用 IM(强度调制器)将射频信号重新调制到单播数据调制后的光载波上。通过光纤传输到端局后，用 AWG 将复用在一起的光载波解复用。通过光纤将不同波长的光载波传输到指定的光网络单元(ONU, Optical Network Unit)，在接收端，利用分路器将光载波分成两路传输无线网络信号的光波直接用光电接收，然后得到射频信号，通过天线发送出去；传输光网络信号的光波经 MZDI(马赫曾德延迟干涉仪)后，用接收 PD，得到数据[9]。

4.3.2. 基于 OFDM 技术的融合式接入网

因为 OFDM 技术具备成熟的理论体系以及广泛应用于各个领域，所以被作为 4G 和新时代无线局域网协议的焦点技术。同时，其与光接入网技术的结合也被证明是有价值的。如果能将技术作为桥梁，连接光与无线传输环境，将可以大大简化融合式接入网的结构，减少传输过程中的信号处理任务，降低系统复杂度和架设维护成本，提高其商用价值[10]。

5. 结论

OFDM 技术的产生顺应了当今社会对数据高速传输的需求，凭借着其特有的抗干扰能力与提升频谱利用率特性，广泛被全球各个国家关注与研究。OFDM 技术与其他技术结合之后，更多的优势可以有效解决单一技术中的不足，提升了 MIMO 数据传输体系的吞吐量，也解决了在地面环境恶劣的情况下数字视频广播有效通信的问题，并且运用于车载广播之中。在无线局域网领域，OFDM 技术大大增加了其网络的吞吐量，实现了高速传输信息的同时还可以保证其兼容性。

当今各类资源逐渐呈现匮乏之际，随着科技的不断发展，OFDM 技术的优势旨在满足人们不断增加的对更高速更高效的无线通信的愿望。

参考文献

- [1] Dixit, S. and Katiyar, H. (2018) OFDM for 4G Wireless Communications: A Comprehensive Analysis. *International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking (IJITN)*, **10**, 63-84.
<https://doi.org/10.4018/IJITN.2018010105>
- [2] 姜洁. MIMO 无线通信系统信道估计算法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [3] 张凯, 薛伦生, 陈西宏, 等. 基于压缩感知的 OQAM/OFDM 系统 POP 方法信道估计[J]. 测控技术, 2017, 36(12): 33-38.
- [4] 陈达. OQAM-OFDM 无线通信系统关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [5] 牛素芬. OFDM 自适应资源分配算法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
- [6] 蒋煜. OFDMA 系统小区间干扰抑制方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2007.
- [7] 丁道梓, 肖石林, 葛凌志, 等. 一种基于正交调制的 WDM-PON 和 RoF 混合接入网[J]. 光通信技术, 2010, 34(3): 37-39.
- [8] 殷爱菡, 周薇, 焦曰里, 等. 基于仿真软件的 DPSK 光纤传输性能研究[J]. 光通信技术, 2010, 34(3): 54-56.
- [9] 丁道梓, 肖石林, 葛凌志, 等. 一种基于正交调制的 WDM-PON 和 RoF 混合接入网[J]. 光通信技术, 2010, 34(3): 37-39.
- [10] 郝耀鸿, 冷丹, 熊耘云, 等. 基于光正交频分复用技术的融合式无源光网络研究[C]//广东省通信学会. 2013 广东通信青年论坛论文集, 2013: 20-25.