

数字电视传输技术问答多载波调制 (上)

门爱东 韩猛 王军

本文作者门爱东先生，北京邮电大学电信学院多媒体通信中心教授，博士生导师；韩猛、王军先生，清华大学电子系博士。

关键词：数字电视 传输 调制 单载波 多载波 OFDM

什么是单载波调制？

单载波(SFN)调制是指用一个信号去调制一个载波，并且在一个信道中只有一个载波信号，即一个已调信号占据了信道的所有带宽。

在单载波调制技术中，调制信号改变载波的三个特征：振幅、频率和相位。在数字调制技术中，相应地表现为振幅键控(ASK)、频移键控(FSK)、移相键控(PSK)、正交调幅(QAM)和其它一些调整方法。

什么是多载波调制？

多载波调制(Multi-Carrier Modulation, MCM)就是将要传输的高速数据流分解成若干个低速比特流，并且用这些比特流去并行调制若干个子载波，即在频域将给定的一个信道分成许多子信道，在每个子信道上使用一个子载波进行调制。一般子信道之间没有频谱重叠。MCM 本质上可以看作是一种频分复用(FDM)调制。

多载波调制的主要优点是具有抵抗无线信道时间弥散的特性。

什么是频分复用？

在一个通信系统中，一个信道所提供的带宽一般远大于传送一路信号所需带

宽。如果一个信道只用于传输一路信号，将是极大的浪费，为了充分利用信道带宽，提出了信道分配复用技术。

所谓的“复用”，就是将许多彼此独立的信号合并为一个可在同一个信道上传输的复合信号的方法。其中，按信号所占频率区分的复用，称为频分复用(FDM)；而按时间区分的复用，称为时分复用(TDM)。

什么是正交频分复用(OFDM)？

正交频分复用调制(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)是一种多载波调制技术，其子载波之间保持正交性，有重叠。由于 OFDM 系统中载波数量常达几百，在实际应用中不可能像传统 FDM 系统中那样使用 N 个振荡器和锁相环阵列进行相干解调。

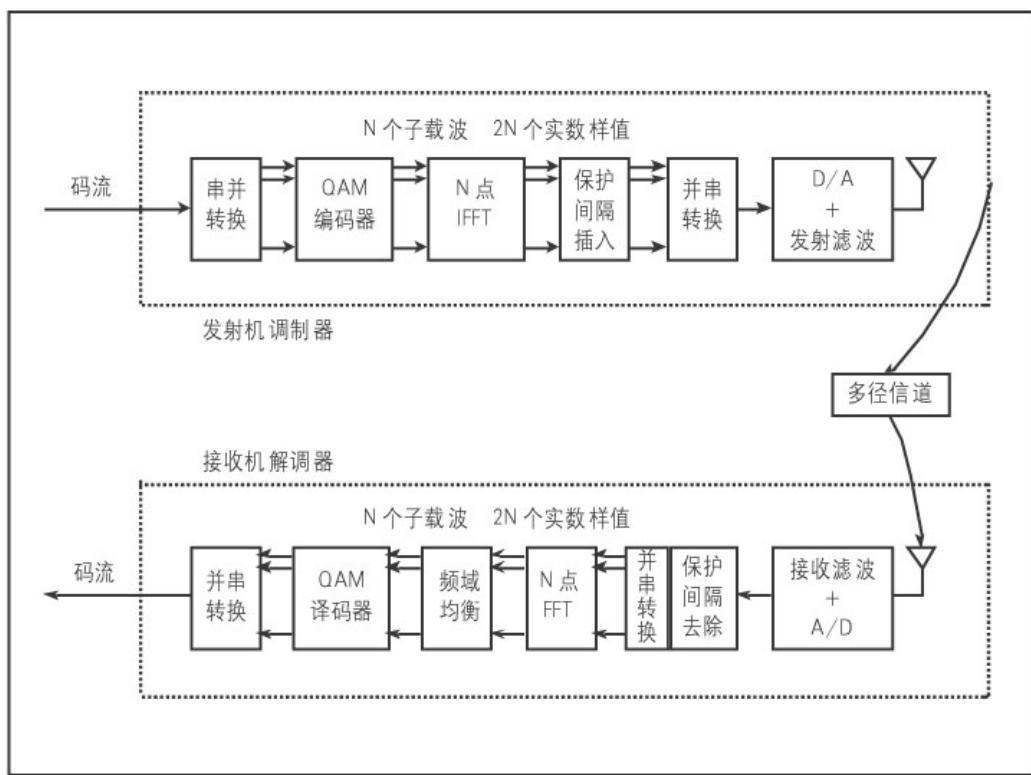


图 1 OFDM 的 DFT 实现

直到 S.B.Weinstein 提出用离散付立叶变换(DFT)实现 OFDM 的方法，简化了系统实现，才使得 OFDM 技术实用化。其核心思想是将通常在载频实现的频分复用过程转化为基带数字预处理。在实际应用中，DFT 的实现一般可运用快速傅里叶变换算法(FFT)。

经过这种转化，OFDM 系统在射频部分仍可采用传统的单载波模式，避免了子载波间的交调干扰和多路载波同步等复杂问题，在保持多载波优点的同时，使

系统结构大大简化。

OFDM 技术的核心是，在频域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，而且各子载波并行传输。这样就可以把宽带变成窄带，解决频率选择性衰落问题。在传统的 FDM 传输系统中，各个频带没有重叠，频谱利用率低。但 OFDM 的各个子载波是相互正交的，子载波间有部分重叠，所以它比传统的 FDM 提高了频带利用率。

在过去几十年中，OFDM 作为高速数据通信的调制方法，在数字音频广播(DAB)、地面数字视频广播(DVB-T)、无线局域网 802.11 和 802.16、非对称数字用户环(ADSL)和甚高速数字用户环(VDSL)等领域得到了应用。

为什么 OFDM 保护间隔能抗多径干扰？

OFDM 子载波上的符号周期比单载波调制扩大了倍，但是仍然不能完全消除多径衰落的影响。

在多载波系统中，多径回波不仅使同一载波的前后相邻符号叠加，造成符号间干扰(ISI)；而且会破坏子载波间的正交性，造成载波间串扰(ICI)。这是因为多径回波使子载波的幅度和/或相位在一个积分周期内发生了变化，以至于接收信号中来自其它载波的分量在积分以后不再为 0 了。

解决这一问题的方法是在每个符号周期上增加一段保护间隔(Guard Interval)时间，用表示。此时，实际的符号传输周期为。如图 2 所示，如果保护间隔大于信道冲激响应的持续时间(即多径回波的最大延时)，根据卷积的性质可知，前一符号的多径延时完全被保护间隔吸收，不会波及当前符号的有用信号周期。在接收端，只需在有用信号周期内进行积分就可以了。

对于 OFDM 系统的 DFT 实现形式来说，上述方法等效于在发射端个 IDFT 样点(称为一个 OFDM 周期或 OFDM 符号)前增加个样点的保护间隔，这个样点通常采用 OFDM 周期的循环扩展。在接收端，首先要去除保护间隔，再对点有用信号进行 DFT 变换。只要信道冲激响应长度小于保护间隔，OFDM 就不会

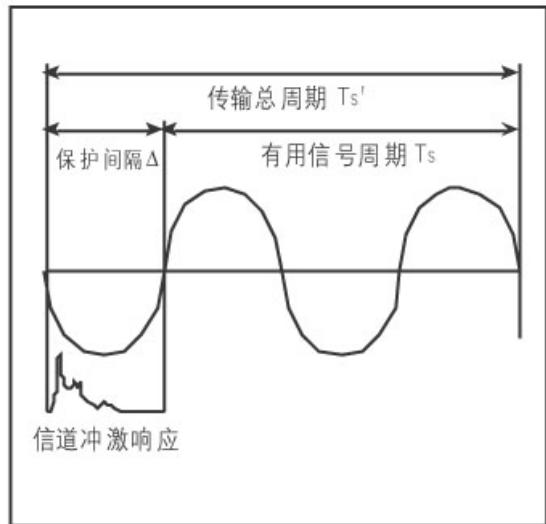


图 2 OFDM 的保护间隔

有 ISI 干扰。

如何选择 OFDM 子载波数量？

与冗余码元一样，保护间隔的引入必然会导致实际系统的频谱效率降低。对于一个确定延时的多径信道，系统的实际频谱效率为

$$\eta_{W\text{ 实际}} = \frac{\eta_{W\text{ 理想}} \cdot T_s}{T_s + \Delta}$$

因此，为了在保持信息速率的前提下提高系统的频谱效率，就必须增加，也就是增加子载波的数量。

但是，子载波数量也不是越多越好。除 DFT 计算复杂度和硬件成本会随值增大而迅速提高外，还因为限带系统的子载波间隔与值成反比；子载波间隔越小，对时间选择性衰落和多普勒效应造成的频谱扩展及载波相位噪声越敏感，越容易失去正交性。因此，在工程应用中，需要对这些问题折衷考虑。此外，我们选择的值还应该能够分解成小基数的乘积，以便采用 FFT 蝶形算法。

目前在地面数字电视广播系统中，子载波数量一般为 2k、4k 或 8k。具体选择哪一种参数，除了要考虑上述因素外，还要考虑移动性、网络规划的灵活性等。

在移动性能方面，在 2k 模式下可以提供非常好的移动性能，并且明显好于 8k 模式。在网络规划方面，很大的地理区域只被单一频率覆盖从而构成单频率网络(SFN)，但 2k 模式下符号持续时间和相应的保护间隔很短，这就使得网络设计者难于进行频率规划，阻碍了其在这类环境中的使用。所以，2k 模式只适合于小型单频网，而 8k 模式更适合于构成一个大范围的单频网。

4k 模式在移动性能和网络规划灵活性方面取得了很好的折衷。欧洲 DVB-T 系统方案原来只有 2k 和 8k 模式，日本 ISDB-T 系统方案和欧洲后来的 DVB-H 系统方案在原来 2k 和 8k 的基础上增加了 4k 模式。清华大学提出的 DMB-T 系统方案采用了 4k 模式，更好地兼顾了移动性能和网络规划。

简而言之，子载波数目的选择不会影响传播能力，但是，要在可容忍的多普勒频移和最大回波延迟之间进行折衷。

OFDM 调制有何优缺点？

OFDM 调制主要的优点有：抗多径干扰；支持移动接收；构建单频网，易于

频率规划；陡峭(高效)的频谱，好的频谱掩模；便于信道估计，易于实现频域均衡；灵活的频谱应用；有效的实现技术，利用 FFT 算法用单载波调制实现 OFDM；易于实现天线分集和 MIMO 系统；OFDM 的实验室和场地测试表现良好；OFDM 在众多新制定的国际标准中得到采用，是未来宽带无线通信的主流技术。

OFDM 调制的缺点主要有：对频率偏移和相位噪声敏感；高的峰均功率比 (PAPR)；插入保护间隔使传输有效码率降低。这是一个接收机的实现问题，对于 OFDM 调制技术，需要更好的调谐器，以及更好的定时和频率恢复算法。

相位噪声的影响可以模型化为两部分：一是公共的旋转部分，它引起所有 OFDM 载波的相位旋转，容易通过参考信号来跟踪；二是分散的部分，或者载波间干扰部分，它导致类似噪声的载波星座点散焦，补偿困难，使得 OFDM 系统的噪声门限略有降低。

OFDM 的 PAPR 比单载波高 2.5dB 左右，这意味着需要更大的发射机动态范围，或者功率回退，以免进入发射机的非线性区；需要更好的滤波，以减小邻频干扰。

减小 PAPR 是研究热点之一，近年已提出了一些行之有效的技术，例如：用非线性失真减小峰值幅度，又不引起 ISI。另外，OFDM 调制高 PAPR 的缺点只会对为数不多的发送端产生影响，而不会对数量巨大的接收用户产生影响。而且，采用单频网时，由于发射机功率小，PAR 将不是问题。

插入保护间隔使传输有效码率降低了约 10%。人们正在积极寻找方法克服此问题，例如清华大学提出的 DMB-T 系统方案中，就在保护间隔中插入了 PN 序列，代替 OFDM 常用的循环前缀方式，用于系统定时、同步和信道估计均衡等。

什么是峰均功率比？

峰均功率比(PAPR)是指发射机输出信号为非恒包络信号时，其峰值功率和平均值功率的比值。对单载波调制系统来说，PAPR 值主要由频谱成型滤波器的滚降系数决定。而对于多载波的 OFDM 调制系统来说，由于 OFDM 信号由一系列相互独立的调制载波合成，根据中心极限定理，OFDM 的时域信号在 N 比较大时，很接近于高斯分布的统计概率。一般而言， $N > 20$ 时分布就很接近高斯分布了，而一般的 OFDM 系统中， N 都可达几百以上。所以，从理论上讲，OFDM 信号的峰均功率比的分布与高斯分布信号的峰均功率比是极为相似的。多个子载波叠加的结果有时会出现较大的峰值。

决定 OFDM 信号峰均功率比的因素有两个：一是调制星座的大小，另一是并行载波数 N 。调制星座越大，峰均功率比就可能越大，这与串行传输方式时是相

同的。

较高的 PAPR 值意味着发射机会有更好的线性范围，或采用更大功率的发射机(约 1.8 倍功率)，以适应 2.5dB 的“输出功率回退”。

(全文完)

来源：《世界广播电视》

出版日期：2005 年 5 月

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训推荐课程列表：<http://www.edatop.com/peixun/tuijian/>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材；旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习，能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

手机天线设计培训视频课程

该套课程全面讲授了当前手机天线相关设计技术，内容涵盖了早期的外置螺旋手机天线设计，最常用的几种手机内置天线类型——如 monopole 天线、PIFA 天线、Loop 天线和 FICA 天线的设计，以及当前高端智能手机中较常用的金属边框和全金属外壳手机天线的设计，通过该套课程的学习，可以帮助您快速、全面、系统地学习、了解和掌握各种类型的手机天线设计，以及天线及其匹配电路的设计和调试…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/antenna/133.html>



WiFi 和蓝牙天线设计培训课程

该套课程是李明洋老师应邀给惠普 (HP)公司工程师讲授的 3 天员工内训课程录像，课程内容是李明洋老师十多年工作经验积累和总结，主要讲解了 WiFi 天线设计、HFSS 天线设计软件的使用，匹配电路设计调试、矢量网络分析仪的使用操作、WiFi 射频电路和 PCB Layout 知识，以及 EMC 问题的分析解决思路等内容。对于正在从事射频设计和天线设计领域工作的您，绝对值得拥有和学习！…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/antenna/134.html>



CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出, 是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装, 所有课程都由经验丰富的专家授课, 视频教学, 可以帮助您从零开始, 全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装, 还可超值赠送 3 个月免费学习答疑…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程, 是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装, 可以帮助您从零开始, 全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装, 更可超值赠送 3 个月免费学习答疑, 随时解答您学习过程中遇到的棘手问题, 让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程, 共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解, 并多结合设计实例, 由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS, 迅速提升个人技术能力, 把 ADS 真正应用到实际研发工作中去, 成为 ADS 设计专家…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>