

移动通信课程实验指导书

哈尔滨工业大学（深圳）

电子与信息工程学院

实验 1 正交频分复用

实验背景

正交频分调制即 OFDM 技术，其由 MCM(Multi Carrier Modulation, 多载波调制)发展而来。OFDM 技术是实现多载波传输的方式之一，它的调制和解调分别基于 IFFT 和 FFT 来实现，是实现复杂度最低、应用最广的一种多载波传输方案。通信系统中的一个信道所能提供的带宽通常比传送一路信号所需的带宽要宽。如果一个信道只传送一路信号是非常浪费的，为了能够充分地利用信道带宽，可以采用频分复用的方法。OFDM 的主要思想是：将信道分成若干个正交子信道，将高速数据信号转换成并行的低速子数据流，并调制到每个子信道上进行传输。在接收端可以通过相关技术分开正交信号，减少子信道之间的相互干扰(ISI)。每个子信道上的信号带宽均小于信道的带宽，因此个子信道可以看成平坦性衰落，从而消除码间串扰。

实验目标

在本实验中，需要掌握 OFDM 的收发原理以及在 Matlab 平台上实现信号的收发。

实验环境与准备

软件环境：Matlab 2018 或以上版本

硬件环境：一台计算机（可为大家提供云平台）

实验基础：了解 Matlab 编程环境

知识基础：了解 OFDM 的基本原理

实验原理及介绍

• OFDM 系统组成原理框图

图 1 为 OFDM 系统收发端的典型框图，发送端将被传输的数字数据转换成子载波幅度和相位的映射，并进行 IDFT 变换将数据的频谱表达式变到时域上。IFFT 变换与 IDFT 变换的作用相同，只是有更高的计算效率，所以适用于所有的应用系统。其中，上半部分对应于

发射机链路,下半部分对应于接收机链路。由于FFT操作类似于IFFT,因此发射机和接收机可以使用同一硬件设备。当然,这种复杂性的节约则意味着该收发机不能同时进行发送和接收操作。

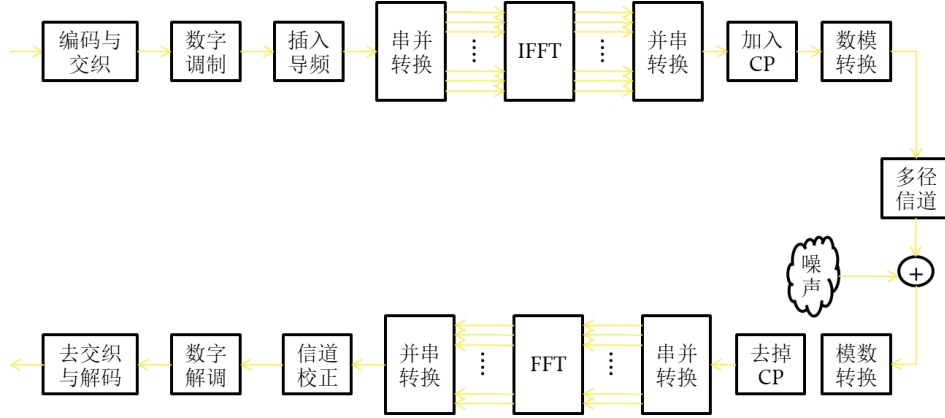


图 1 OFDM 收发机框图

接收端进行发送端相反的操作,将 RF 信号与基带信号进行混频处理,并用 FFT 变换分解频域信号,子载波的幅度和相位被采集出来并转换回数字信号。IFFT 和 FFT 互为反变换,选择适当的变换将信号接收或发送。当信号独立于系统时,FFT 变换和 IFFT 变换可以被交替使用。

• DFT 的实现

傅立叶变换将时域与频域联系在一起,傅立叶变换的形式有几种,选择哪种形式的傅立叶变换由工作的具体环境决定。大多数信号处理使用离散傅立叶变换 (DFT)。DFT 是常规变换的一种变化形式,其中,信号在时域和频域上均被抽样。由 DFT 的定义,时间上波形连续重复,因此导致频域上频谱的连续重复。快速傅立叶变换 FFT 仅是 DFT 计算应用的一种快速数学方法,由于其高效性,使 OFDM 技术发展迅速。

对于 N 比较大的系统来说,OFDM 复等效基带信号可以采用离散傅立叶逆变换 (IDFT) 方法来实现。为了叙述的简洁,对于信号 $s(t)$ 以 T/N 的速率进行抽样,即令 $t = kT/N$ ($k = 0, 1, \dots, N-1$), 则得到:

$$s_k = s(kT/N) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \exp\left(j \frac{2\pi i k}{N}\right) \quad (0 \leq k \leq N-1) \quad (1)$$

可以看到 s_k 等效为对 d_i 进行 IDFT 运算。同样在接收端,为了恢

复出原始的数据符号 d_i ，可以对 s_k 进行逆变换，即 DFT 得到：

$$d_i = \sum_{k=0}^{N-1} s_k \exp(-j \frac{2\pi i k}{N}) \quad (0 \leq i \leq N-1) \quad (2)$$

根据以上分析可以看到，OFDM 系统的调制和解调可以分别由 IDFT 和 DFT 来代替。通过 N 点的 IDFT 运算，把频域数据符号 d_i 变换为时域数据符号 s_k ，经过射频载波调制后，发送到无线信道中。其中每个 IDFT 输出的数据符号 s_k 都是由所有子载波信号经叠加而生成的，即对连续的多个经过调制的子载波的叠加信号进行抽样得到的。在 OFDM 系统的实际运用中，可以采用更加方便快捷的快速傅立叶变换 (IFFT/FFT)。 N 点 IDFT 运算需要实施 N^2 次的复数乘法，而 IFFT 可以显著的降低运算的复杂度。对于常用的基-2 的 IFFT 算法来说，其复数乘法次数仅为 $(N/2)\log_2(N)$ ，但是随着子载波个数 N 的增加，这种方法复杂度也会显著增加。对于子载波数量非常大的 OFDM 系统来说，可以进一步采用基-4 的 IFFT 算法来实施傅立叶变换。

• 保护间隔、循环前缀和子载波数的选择

应用 OFDM 的一个重要原因在于它可以有效的对抗多径时延扩展。通过把输入数据流串并变换到 N 个并行的子信道中，使得每一个调制子载波的数据周期可以扩大为原始数据符号周期的 N 倍，因此时延扩展与符号周期的数值比也同样降低 N 倍。为了最大限度的消除符号间干扰，还可以在每一个 OFDM 符号之间插入保护间隔 (Guard Interval)，而且该保护间隔长度 T_g 一般要大于无线信道中的最大时延扩展，这样一个符号的多径分量就不会对下一个符号造成干扰。在这段保护间隔内可以不插任何信号，即是一段空白的传输时段。然而在这种情况下，由于多径传播的影响，则会产生载波间干扰 (ICI)，即子载波之间的正交性遭到破坏，不同的子载波之间的产生干扰。由于每个 OFDM 符号中都包括所有的非零子载波信号，而且也可同时出现该 OFDM 符号的时延信号，由于在 FFT 运算时间长度内，第一子载波和第二子载波之间的周期个数之差不再是整数，所以当接收机试图对第一个子载波进行解调时，第二子载波会对第一子载波造成干扰。同样，当接收机对第二子载波进行解调时，也会存在来自第一子载波的干扰。

在系统带宽和数据传输速率都给定的情况下，OFDM 信号的符号速率将远远低于单载波的传输模式。例如在单载波 BPSK 调制模式下，符号速率就相当于传输的比特速率，而在 OFDM 中，系统带宽由 N 个子载波占用，符号速率则 N 倍低于单载波传输模式。正是因为这种低符号速率使 OFDM 系统可以自然地抵抗多径传播导致的符号间干扰（ISI），另外，通过在每个符号的起始位置增加保护间隔可以进一步抵制 ISI，还可以减少在接收端的定时偏移错误。这种保护间隔是一种循环复制，增加了符号的波形长度，在符号的数据部分，每一个子载波内有一个整数倍的循环，此种符号的复制产生了一个循环的信号，即将每个 OFDM 符号的后 T_g 时间中的样点复制到 OFDM 符号的前面，形成前缀，在交接点没有任何的间断，因此将一个符号的尾端复制并补充到起始点增加了符号时间的长度。

符号的总长度为 $T_s = T_g + T_{FFT}$ 其中 T_s 为 OFDM 符号的总长度， T_g 为采样的保护间隔长度， T_{FFT} 为 FFT 变换产生的无保护间隔的 OFDM 符号长度，则在接收端采样开始的时刻 T_x 应该满足下式：

$$\tau_{\max} < T_x < T_g \quad (3)$$

其中 τ_{\max} 是信道的最大多径时延扩展，当采样满足该式时，由于前一个符号的干扰只会在存在于 $[0, \tau_{\max}]$ ，当子载波个数比较大时，OFDM 的符号周期 T_s 相对于信道的脉冲响应长度 τ_{\max} 很大，则符号间干扰（ISI）的影响很小，将会没有符号间干扰（ISI）；而如果相邻 OFDM 符号之间的保护间隔 T_g 满足 $T_g \geq \tau_{\max}$ 的要求，则可以完全克服 ISI 的影响。同时，由于 OFDM 延时副本内所包含的子载波的周期个数也为整数，时延信号就不会在解调过程中产生 ICI。

OFDM 系统加入保护间隔之后，会带来功率和信息速率的损失，其中功率损失可以定义为：

$$v_{\text{guard}} = 10 \log_{10} \left(\frac{T_g}{T_{FFT}} + 1 \right) \quad (4)$$

从上式可以看到，当保护间隔占到 20% 时，功率损失也不到 1dB。但是带来的信息速率损失达 20%。而在传统的单载波系统中，由于升余弦滤波也会带来信息速率（带宽）的损失，这个损失与滚降系数

有关。但由于插入保护间隔可以消除 ISI 和多径所造成的 ICI 的影响，因此这个代价是值得的。

• 子载波调制与解调

(1) 调制

OFDM 采用四种调制方式，分别为 BPSK、QPSK、16QAM 和 64QAM。调制方式的选择根据 SIGNAL 中的 RATE 及速率来决定。6Mbits 和 9Mbits 用 BPSK, 12Mbits 和 18Mbits 用 QPSK, 24Mbits 和 36Mbits 用 16QAM, 48Mbits 和 54Mbits 用 64QAM。调制方法如下：

首先，把输入的二进制序列分成长度为 $n=1, 2, 4, 8$ 的组，分别对应 BPSK, QPSK, 16QAM 和 64QAM。接下来，把这些二进制序列组分别映射为星座图中对应的点的复数表示，其实是一种查表的方法。为了所有的映射点有相同的平均功率，输出要进行归一化，所以对应 BPSK、QPSK、16QAM 和 64QAM，分别乘以归一化系数 $1, 1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{10}, 1/\sqrt{42}$ 。输出的复数序列即为映射后的调制结果。

(2) 解调

由于在通信系统中存在噪声等干扰的影响，故信息在传输过程中会产生失真，解调接收就要求最大可能的减少误差。这里介绍其中一种解调的方法：首先，求出接收端信号值（复数形式表示）与星座图中各点的距离，接下来求出所有距离中的最小值，则将星座图中该点所对应的二进制值作为解调的结果输出。与调制相对应，要除以归一化系数。

实验任务

本实验需要完成 OFDM 信号从发射到接收的完整过程，仿真信道为 AWGN。其中，需要实现的功能有：

- 1、发射信号的调制和解调（调制方式自选），画出星座图；
- 2、画出信噪比和误码率的关系曲线；
- 3、提交上述程序和实验报告。

实验扩展

- 1、宽带信道频域响应是平坦的，还是频率选择性的？
- 2、当 $N=1024$ 和 64 时，子载波间隔分别是多少？
- 3、频率偏移随着时间的变化引起相位偏移，造成接收星座图旋转，为什么 OFDM 系统频率偏移造成的影响与单载波系统不同？为什么对星座图的影响不同？