

数字通信实验四

一、实验内容

1、模拟 OFDM 传输信号，设置 10 个长 OFDM 训练序列，并使用以下多径模型（Channel B），SNR 为 20dB；

Tap	Channel A		Channel B		Doppler spectrum
	Relative delay (ns)	Average power (dB)	Relative delay (ns)	Average power (dB)	
1	0	0	0	0	Flat
2	50	-3.0	100	-3.6	Flat
3	110	-10.0	200	-7.2	Flat
4	170	-18.0	300	-10.8	Flat
5	290	-26.0	500	-18.0	Flat
6	310	-32.0	700	-25.2	Flat

图 1 多径模型参数

- 2、根据每个子载波的估计信噪比，计算每个子载波可能的调制阶数和功率（针对每个子载波使用比特加载和功率分配）；
- 3、在期望的误码率为 10^{-3} 的情况下，尝试最大化传输速率；
- 4、比较使用/不使用比特加载和功率分配时的性能。

二、实验过程及结果分析

1、比特加载

比特加载指的是根据每个载波的信息质量参数将每对发射器/接收器的调制参数进行匹配。对每个载波的信噪比进行测量并选择优化调制，以实现最大传输速率，同时将比特错误率（BER）保持在预期水平。这种方法能够将来自其他电路连接设备的干扰降到最低。

简而言之，比特加载技术指根据实际情况选择每个载波的调制方式，以实现最大传输速率，保证比特错误率（BER）。

2、Chow 比特功率分配算法

Chow 算法是根据各个子信道的信道容量来分配比特的。它的优化准则是在维持目标误比特率的前提下，使系统的余量最大。该算法通过迭代过程，逐步分配比特，同时使系统的余量逐步增大，直到所有的比特都分配完毕。

(1) 计算各个子信道的信噪比 $SNR(i), \forall i$, 假设所有子信道上的信号能量都是归一化的, $\varepsilon(i) = 1, \forall i$ 。

(2) 令 γ_{margin} , 迭代次数为 $Itercount = 0$, 已使用的子信道数为 $Usedcarriers = N$, 其中 N 为可用的子信道数的最大数目。

(3) 依次计算 $b(i), \hat{b}(i), diff(i)$ 和 $Usedcarriers$ 。

$$b(i) = \log_2(1 + \frac{SNR(i)}{\Gamma + \gamma_{margin}})$$

$$\hat{b}(i) = \text{round}(b(i))$$

$$diff(i) = b(i) - \hat{b}(i)$$

若 $\hat{b}(i) = 0$, $Usedcarriers = N - 1$, Γ 为 SNR 间距, 定义为系统达到传输容量 C 时的理想 SNR 和实际传输容量 R 的 SNR 之比。 Γ 是 BER 和信道编码方式的函数, 假设采用 QAM 调制, 则

$$\Gamma = -\frac{\ln(5BER_{target})}{1.5}$$

(4) 计算 $R = \text{sum}(\{\hat{b}(i)\})$, 若 $R = 0$, 则信道太差, 无法使用。

(5) 计算 γ_{margin} 。

$$\gamma_{margin} = \gamma_{margin} + 10 \log_{10}(2^{\frac{R-R_T}{Usedcarriers}})$$

(6) 迭代次数 $Itercount = Itercount + 1$

(7) 若 $R \neq R_T$ 且 $Itercount < Maxcount$, 令 $Usedcarriers = N$, 转步骤 (3), 否则转步骤 (8)。

(8) 若 $R > R_T$, 找到最小的 $diff(i)$, 相应地 $\hat{b}(i) = \hat{b}(i) - 1, diff(i) = diff(i) + 1$, 重复此步骤直至 $R = R_T$ 。

(9) 若 $R < R_T$, 找到最大的 $diff(i)$, 相应地 $\hat{b}(i) = \hat{b}(i) + 1, diff(i) = diff(i) - 1$, 重复此步骤直至 $R = R_T$ 。

(10) 调整每个子信道上的发射功率, 使得相应于 $b(i)$

$$P_e(i) = P_{e,target}, \forall i$$

(11) 调整发射总功率。对所有已使用的子信道乘以相同的比例因子, 使总的信号功率 $P = P_T$

表 1 Chow 比特功率分配算法的参数设置

参数设置	
平均信噪比	20 dB
误比特率	10^{-4}
子载波数目	52
平均发射功率	1
比特总数上限	128

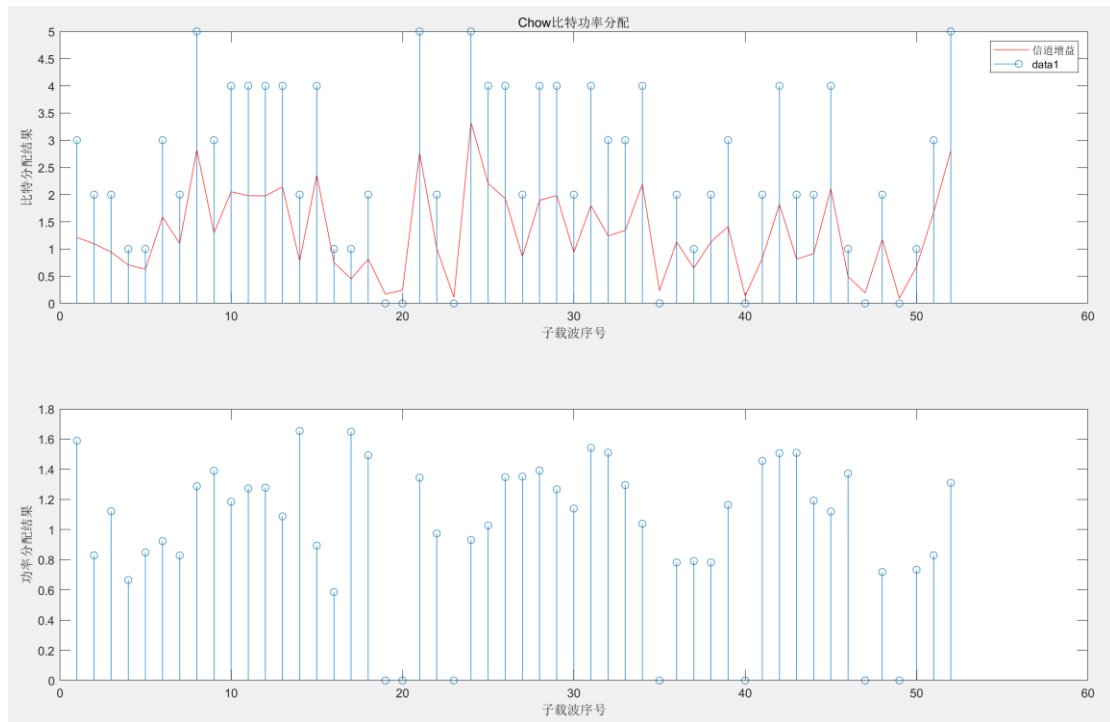


图 2 比特功率分配算法的结果

从上图中可以看出，通过逐步调整分配比特，从而使系统最终的比特数达到最大。同时，也可以看出，Chow 算法分配的结果有一定的优势，它是将信道状况较差的子载波舍弃，也就是说系统最终传输的所用的子载波一定有信息的传输，从仿真的结果可以证实这一点。

3、EVM（误差向量幅度，Error Vector Magnitude）计算

可以利用以下两个公式进行 EVM 的计算。

$$EVM = \sqrt{\frac{\sum_{\gamma=0}^{N-1} |Z'(\gamma) - R'(\gamma)|^2}{\sum_{\gamma=0}^{N-1} |R'(\gamma)|^2}} * 100 \%$$
$$EVM = \frac{1}{\sqrt{SNR}}$$

注意，这里的 SNR 是功率比，如果折算到 dB，需要进行 $10\log_{10}(SNR)$ 的计算。传输系统中的 52 个子载波 EVM 结果如下所示：

SNR: 20 dB	Channel: 1	EVM = 2.00e-01	Channel_SNR = 13.99 dB
SNR: 20 dB	Channel: 2	EVM = 1.61e-01	Channel_SNR = 15.87 dB
SNR: 20 dB	Channel: 3	EVM = 5.43e-02	Channel_SNR = 25.30 dB
SNR: 20 dB	Channel: 4	EVM = 2.21e-01	Channel_SNR = 13.11 dB
SNR: 20 dB	Channel: 5	EVM = 2.28e-01	Channel_SNR = 12.83 dB
SNR: 20 dB	Channel: 6	EVM = 1.37e-01	Channel_SNR = 17.27 dB
SNR: 20 dB	Channel: 7	EVM = 1.06e-01	Channel_SNR = 19.49 dB
SNR: 20 dB	Channel: 8	EVM = 4.23e-02	Channel_SNR = 27.48 dB
SNR: 20 dB	Channel: 9	EVM = 1.79e-01	Channel_SNR = 14.96 dB
SNR: 20 dB	Channel: 10	EVM = 1.74e-01	Channel_SNR = 15.18 dB
SNR: 20 dB	Channel: 11	EVM = 1.30e-01	Channel_SNR = 17.74 dB
SNR: 20 dB	Channel: 12	EVM = 2.09e-01	Channel_SNR = 13.59 dB
SNR: 20 dB	Channel: 13	EVM = 6.15e-02	Channel_SNR = 24.23 dB
SNR: 20 dB	Channel: 14	EVM = 2.25e-01	Channel_SNR = 12.98 dB
SNR: 20 dB	Channel: 15	EVM = 2.35e-01	Channel_SNR = 12.58 dB
SNR: 20 dB	Channel: 16	EVM = 7.19e-02	Channel_SNR = 22.86 dB
SNR: 20 dB	Channel: 17	EVM = 1.41e-01	Channel_SNR = 17.03 dB
SNR: 20 dB	Channel: 18	EVM = 1.62e-01	Channel_SNR = 15.82 dB
SNR: 20 dB	Channel: 19	EVM = 5.71e-03	Channel_SNR = 44.86 dB
SNR: 20 dB	Channel: 20	EVM = 9.88e-02	Channel_SNR = 20.10 dB

SNR: 20 dB	Channel: 21	EVM = 1.53e-01	Channel_SNR = 16.31 dB
SNR: 20 dB	Channel: 22	EVM = 1.37e-01	Channel_SNR = 17.29 dB
SNR: 20 dB	Channel: 23	EVM = 7.73e-02	Channel_SNR = 22.24 dB
SNR: 20 dB	Channel: 24	EVM = 1.67e-01	Channel_SNR = 15.53 dB
SNR: 20 dB	Channel: 25	EVM = 1.46e-01	Channel_SNR = 16.69 dB
SNR: 20 dB	Channel: 26	EVM = 2.49e-01	Channel_SNR = 12.07 dB
SNR: 20 dB	Channel: 27	EVM = 2.05e-02	Channel_SNR = 33.76 dB
SNR: 20 dB	Channel: 28	EVM = 6.74e-02	Channel_SNR = 23.42 dB
SNR: 20 dB	Channel: 29	EVM = 5.22e-02	Channel_SNR = 25.65 dB
SNR: 20 dB	Channel: 30	EVM = 2.92e-02	Channel_SNR = 30.69 dB
SNR: 20 dB	Channel: 31	EVM = 1.58e-01	Channel_SNR = 16.01 dB
SNR: 20 dB	Channel: 32	EVM = 1.63e-02	Channel_SNR = 35.74 dB
SNR: 20 dB	Channel: 33	EVM = 1.20e-01	Channel_SNR = 18.40 dB
SNR: 20 dB	Channel: 34	EVM = 6.58e-02	Channel_SNR = 23.64 dB
SNR: 20 dB	Channel: 35	EVM = 6.95e-02	Channel_SNR = 23.15 dB
SNR: 20 dB	Channel: 36	EVM = 6.59e-02	Channel_SNR = 23.62 dB
SNR: 20 dB	Channel: 37	EVM = 4.61e-02	Channel_SNR = 26.72 dB
SNR: 20 dB	Channel: 38	EVM = 5.51e-02	Channel_SNR = 25.18 dB
SNR: 20 dB	Channel: 39	EVM = 6.23e-02	Channel_SNR = 24.11 dB
SNR: 20 dB	Channel: 40	EVM = 7.38e-02	Channel_SNR = 22.64 dB
SNR: 20 dB	Channel: 41	EVM = 1.37e-01	Channel_SNR = 17.27 dB
SNR: 20 dB	Channel: 42	EVM = 1.05e-01	Channel_SNR = 19.55 dB
SNR: 20 dB	Channel: 43	EVM = 6.59e-02	Channel_SNR = 23.63 dB
SNR: 20 dB	Channel: 44	EVM = 7.29e-02	Channel_SNR = 22.75 dB
SNR: 20 dB	Channel: 45	EVM = 1.03e-01	Channel_SNR = 19.77 dB
SNR: 20 dB	Channel: 46	EVM = 1.55e-01	Channel_SNR = 16.17 dB
SNR: 20 dB	Channel: 47	EVM = 1.03e-01	Channel_SNR = 19.78 dB
SNR: 20 dB	Channel: 48	EVM = 1.26e-01	Channel_SNR = 17.96 dB
SNR: 20 dB	Channel: 49	EVM = 7.12e-02	Channel_SNR = 22.95 dB
SNR: 20 dB	Channel: 50	EVM = 1.39e-01	Channel_SNR = 17.15 dB

SNR: 20 dB Channel: 51 EVM = 2.42e-02 Channel_SNR = 32.31 dB

SNR: 20 dB Channel: 52 EVM = 5.30e-03 Channel_SNR = 45.51 dB

4、人工进行子载波调制方式的选择

我们将 52 个子载波平均分为四组，每组 13 个子载波，依次使用 BPSK，QPSK，16QAM 和 64QAM 的调制方式，得到的 BER 结果如下图所示。

可以看到，使用四种混合调制方式后，误码率要优于仅使用 64QAM 调制的情况。

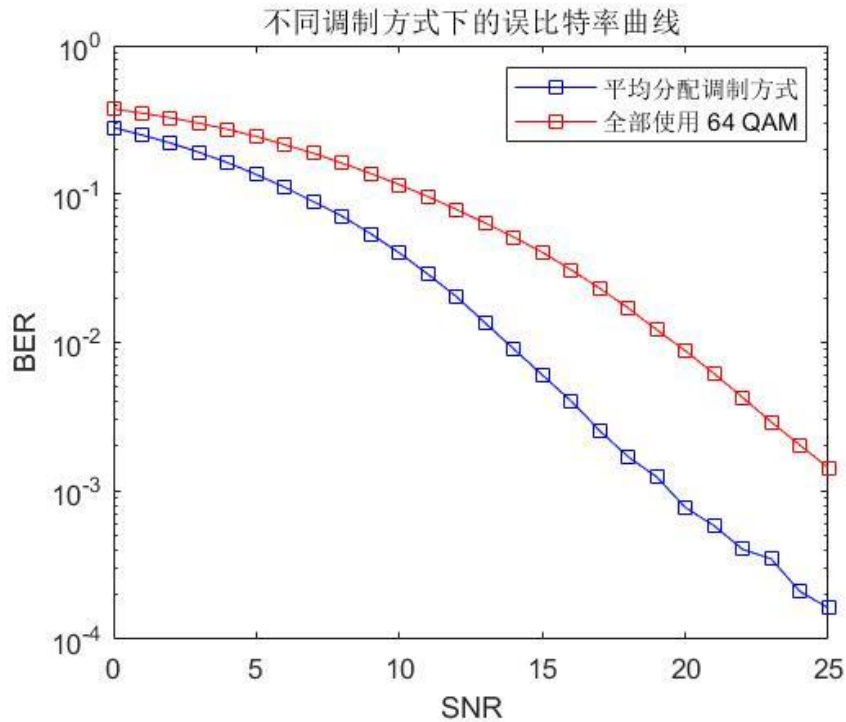


图 3 平均分配调制方式与 64QAM 调制方式的误比特率曲线

之后，我们探索了如何在保证误码率不高于 10^{-3} 的情况下，尽可能提高传输速率。在之前的 EVM 计算中，我们可以看到，序号较小的子载波信噪比较低，而序号较大的子载波信噪比较高，因此我们可以简单地认为，对序号较大的子载波采用较高阶数的调制方式，就可以在保证误码率的情况下，提升传输速度。我们仅考虑 16QAM 和 64QAM 两种调制方式，并通过仿真实验测试 1~N 子载波使用 16QAM 方式，N+1~52 子载波使用 64QAM 调制方式，能够达到误码率为 10^{-3} 的最小 N 值，如下图所示。

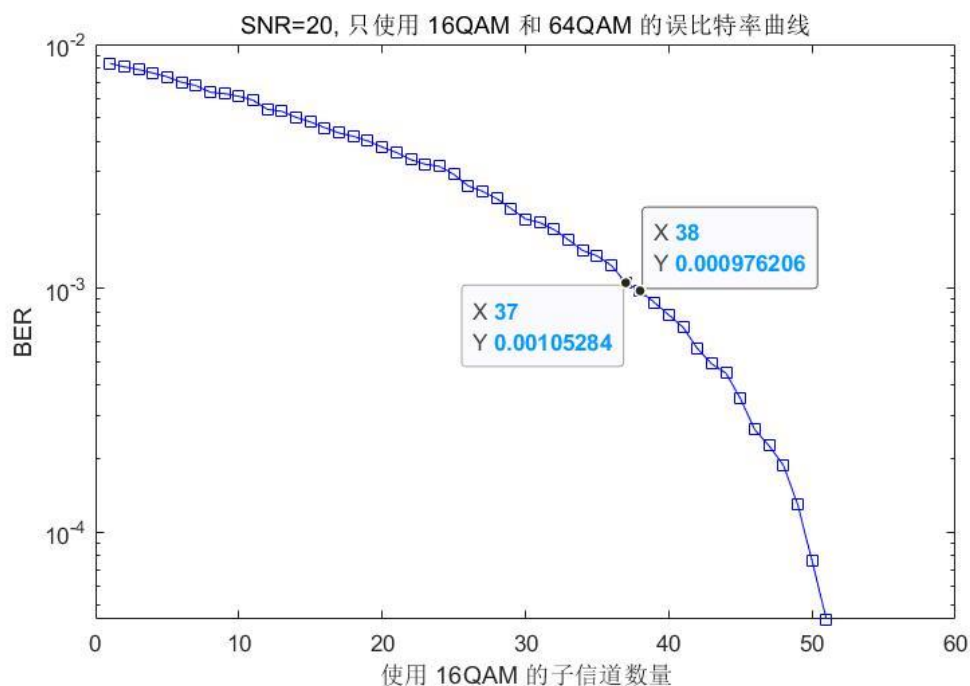


图 4 16QAM 与 64QAM 的结合调制方式的误比特率曲线

我们对 1-38 子载波使用 16QAM 调制方式，39-52 子载波使用 64QAM 调制方式，得到的误码率如下图所示（本实验中我们实现的最优调制方式），可以看到，误码率在 SNR=20dB 时，能够维持在 10^{-3} ，且在我们的能力范围内，使传输速率达到最大。

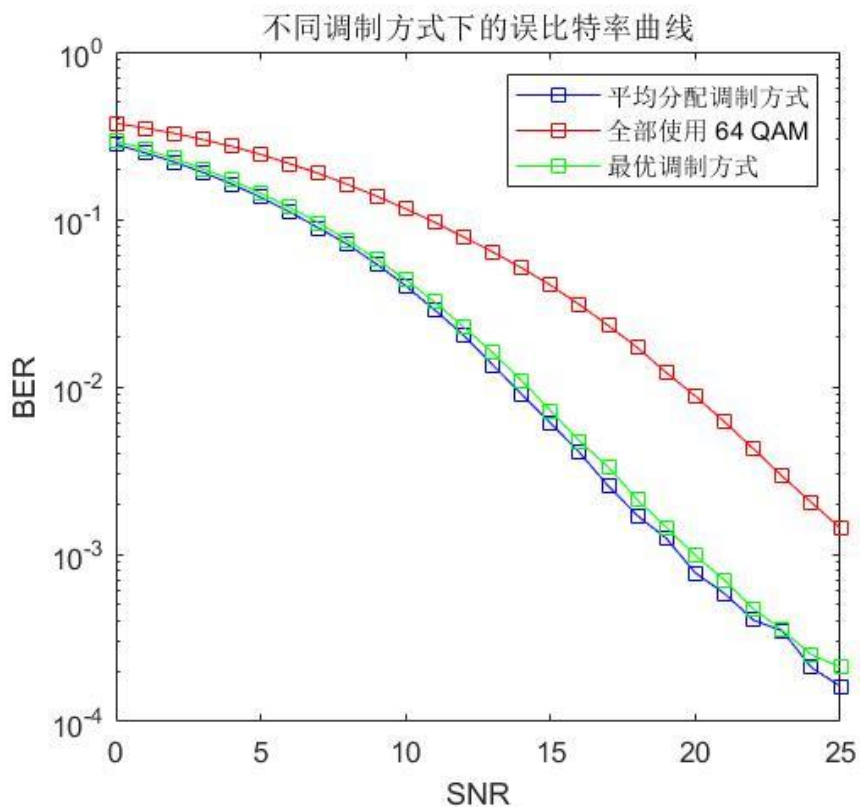


图 5 不同调制方式下的误比特率曲线

三、实验总结

为了完成本次实验，我们小组进行了长达十余个小时的集体学习和代码调试，在这个过程中进一步理解了比特加载和功率分配。调制方式复杂会使误码率上升，但是传输速率也会提升，使用比特加载和功率分配技术寻找到二者之间的平衡。

我们理解并尝试实现了 EVM 的计算；此外，我们实现了手动的子载波调制方法选择，可以根据实际情况人工进行参数调整；之后，我们小组可以尝试进行自适应比特功率分配的实验。我们小组的分工如下：

模型建立与代码实现：王晨阳、吴桐

结果测试与分析：吴桐、马运聪、唐翠霜、夏汉宁

实验汇报与报告撰写：吴桐、王晨阳、李政君