

[1] 中计算得出了三级 MLC 方案的信道容量结果, 分别给出 AWGN 信道和 Rayleigh 衰落信道下, 三种不同集分割方式、8ASK 数字调制、采用 MSD 译码、总码率为 $R = 2.5 \text{ bits/symbol}$ 和 $R = 2 \text{ bits/symbol}$ 时的各级码率设计值。

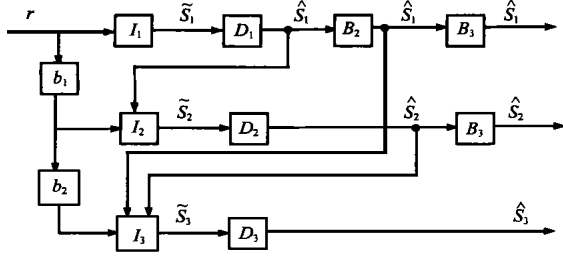


图 1 MSD 译码原理图 ($m = 3$)

3 多级编码译码方法的研究

多级译码(MSD)的原理如图 1 所示。现在考虑当 s_1, s_2, \dots, s_{i-1} 和接收信号 r 已知时, s_i 的估计问题。 s_i 的估计错误概率可以使用“最大后验概率”技术使其最小化, 即有下列的条件判决式^[2] :

$$P_i(0/s_1, s_2, \dots, s_{i-1} | r) \geq P_i(1/s_1, s_2, \dots, s_{i-1} | r) \text{ 时, } \tilde{s}_i = 0$$

$$P_i(0/s_1, s_2, \dots, s_{i-1} | r) < P_i(1/s_1, s_2, \dots, s_{i-1} | r) \text{ 时 } \tilde{s}_i = 1 \quad (i = 1, \dots, M)$$

为区别开译码前后的估计值 s_i 称上式中的 \tilde{s}_i 是 s_i 的中间估计值, 而图中 \hat{s}_i 为最终估计值。当 \tilde{s}_i 仅有 0, 1 两种结果时, 译码过程即称之为硬判决系统, 由于在接收端无法知道 s_1, s_2, \dots, s_{i-1} , 在对 s_i 进行估计时, 只能使用已经得到的最终估计值 $\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_{i-1}$ 来代替 s_1, \dots, s_{i-1} 。如果前级的估计值 $\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_{i-1}$ 与 s_1, \dots, s_{i-1} 相等的概率极大, 则使用 $\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_{i-1}$ 同接收信号 r 一起来估计 s_i 就比单独使用 r 来估计 s_i 更准确、可靠。

显然, 多级译码并不等同于最大似然译码, 相对于最佳译

码方案来说, MSD 会造成性能的略微下降, 但其总的译码复杂度却大大降低了。因为在 MSD 译码过程中, 系统的复杂度是各级译码复杂度的和而不是乘积。当然, 由于各级译码器不是并行工作的, 额外的时延也是不可避免的。

多级并行译码法 (PDL)^[3], 对应于编码级的 L 级 MLC 编码, 在接收端就有 L 级的并行译码级, 对于接收序列为 y , 译码器 D_0, D_1, \dots, D_{L-1} 分别译码, 对 MLC 各级码字 x^0, x^1, \dots, x^{L-1} 作出译码估计: $\hat{x}^0, \hat{x}^1, \dots, \hat{x}^{L-1}$ 。当然, 由于没有利用低级的译码结果会造成信息的丢失, 总的信道容量 C_{sum} 将不大于信号集的总容量 C_{set} , 即

$$C_{sum} = \sum_i C_i \leq C_{set} \quad (3)$$

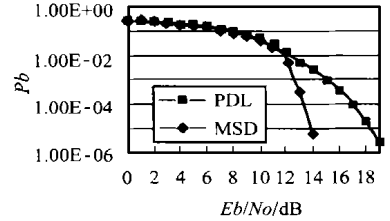
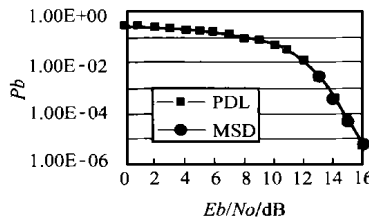
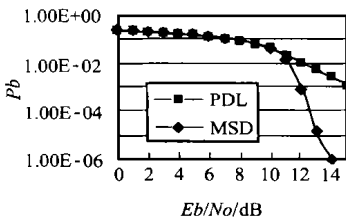
对比多级译码方法 MSD, PDL 译码法有下述明显的优点: 首先, 各级间不存在由低级 (D_0) 向高级 (D_{L-1}) 译码的“错误传播”问题; 其次, 由于采用并行结构, 因此它的译码时延比 MSD 大大减小。

4 计算机仿真及结果分析

依照提出的在 AWGN 和 Rayleigh 衰落信道中, 设计最佳 MLC 方案的“信道容量规则”的设计结果^[1]以及前面讨论的 MSD, PDL 两种常用的多级编码系统的译码方法, 本文对采用 8ASK 调制、三种不同集分割方式、不同码率的 BCH 码构成的三级 MLC/MSD、MLC/PDL 方案, 进行在 AWGN 信道和 Rayleigh 衰落信道的计算机仿真研究, 以选取 MLC 的最佳译码方案。

4.1 AWGN 信道中 MLC/MSD 与 MLC/PDL 方案的性能比较

图 2~ 图 4 的仿真结果给出了两种不同译码方法 MLC/MSD 和 MLC/PDL 在 AWGN 信道中, 分别按 UP、BP、MP 三种不同集分割方案但均符合 MSD“信道容量”规则^[1]下设计方案的性能比较。三种方案的总码率 R 相同为 2.5 bits/symbol , 由图中比较分析可见:



CO(127, 57, 11); C1(127, 127); C2(127, 127)

CO(127, 120, 1); C1(127, 106, 3); C2(127, 85, 6)

CO(127, 106, 3); C1(127, 78, 7); C2(127, 127, 0)

图 2 AWGN 信道, 8ASK, UP 分割, MLC/MSD 与 MLC/PDL 的性能比较

图 3 AWGN 信道, 8ASK, BP 分割, MLC/MSD 与 MLC/PDL 的性能比较

图 4 AWGN 信道, 8ASK, MP 分割, MLC/MSD 与 MLC/PDL 的性能比较

(1) 不论在何种集分割方式下, MSD 译码均优于 PDL 译码;

(2) 在所有的信噪比下, 采用 BP 集分割方式的 MLC/MSD 与 MLC/PDL 的性能几乎相同, 如图 3; 对于 UP 与 MP 方案, 在小信噪比下 ($E_b/N_o < 12 \text{ dB}$), MLC/MSD 与 MLC/PDL 译码性能基本相同; 但在大信噪比下 ($E_b/N_o > 12 \text{ dB}$), 两者间性能差距开始拉大, 如图 2、图 4 所示;

(3) 比较图 2~ 图 4 可见, 对于 MLC/MSD 系统, 采用 UP 或 MP 方案的性能比采用 BP 方案的性能好; 而对于 MLC/PDL

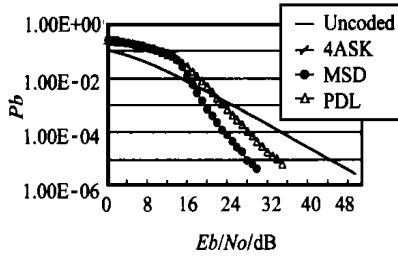
系统, 采用 BP 方案的性能是最好的。说明集分割方案的选取对于译码方法的选取有很大的影响。

4.2 Rayleigh 衰落道中 MLC/MSD 与 MLC/PDL 方案的性能比较

在 Rayleigh 衰落信道下, 对采取码长为 $n = 127$ 的 BCH 码作分量码的三级 MLC/MSD 与 MLC/PDL 方案的性能进行了计算机模拟, 并给出了两种不同译码方法在 UP、BP、MP 三种分割下均符合 MSD“信道容量设计规则”时的性能比较, 模拟结

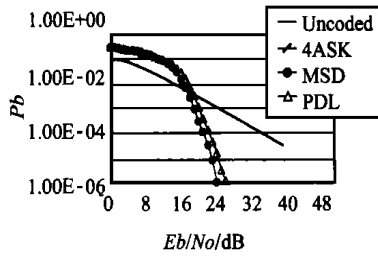
果如图 5- 图 7 所示. 三种方案的总码率 R 相同, 均为 2bits/symbol, 并给出了未编码的 4ASK 的曲线以作比较. 由图中比

较分析可见:



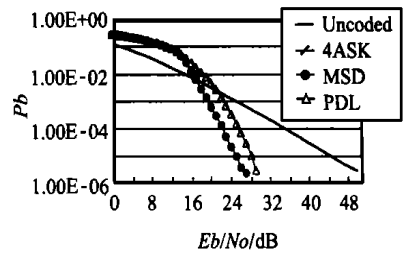
CO(127, 36, 15); CI(127, 99, 4); C2(127, 120, 1)

图 5 Rayleigh 信道, 8ASK, UP 分割, MLC/MSD 与 MLC/PDL 的性能比较



CO(127, 99, 4); CI(127, 92, 5); C2(127, 64, 10)

图 6 Rayleigh 信道, 8ASK, BP 分割, MLC/MSD 与 MLC/PDL 的性能比较



CI(127, 106, 3); CI(127, 43, 14); CI(127, 106, 3)

图 7 Rayleigh 信道, 8ASK, MP 分割, MLC/MSD 与 MLC/PDL 的性能比较

(1) 不论在何种集分割方式下, MSD 多级译码性能均优于 PDL 并行译码的性能. 这也证明了: 在 AWGN 和 Rayleigh 衰落信道下, MSD 都是一种准最佳译码法;

(2) 对于 UP 与 MP 方案, 在小信噪比下 ($E_b/N_0 < 14 \sim 16$ dB), 两种不同译码法的性能基本相同; 但在大信噪比时, 两者的性能差距开始拉开.

(3) 在图 6 的 BP 方式下, PDL 译码性能与 MSD 码性能相差很小, 仅为 ($1 \text{ dB } P_b = 10^{-5}$ 时), 故在 Rayleigh 衰道中可用简单、实用的 PDL 代替复杂的、串行的、迭代 MSD 译码, 当多级编码器的级数增加时, MSD 迭代译码的复杂度和时延均大大上升(如: 用六级构成的 64QAM 方案), 以致于无法实现, 因此这一发现对设计更高频带有效性(多级编码器的级数大于 3)的 MLC 方案具有重要意义和使用价值;

(4) 分别比较图 5、图 6 与图 7 可见, 采用 BP 方案、MSD 译码的 MLC 系统的性能要优于采用 UP 或 MP 方案、MSD 译码的 MLC 系统的性能. 说明在 Rayleigh 衰落信道中, 集分割方案的选取相对于译码方法的选取来说, 对 MLC 系统性能的影响更大.

5 结论

(1) AWGN 信道和 Rayleigh 衰落信道中, 无论采用何种分割方式, 以 BCH 码为分量码的多级编码系统, MSD 多级译码的性能均优于 PDL 并行译码的性能, MSD 是适合 MLC 的准最佳译码法;

(2) 在 BP 集分割下, 无论是在 AWGN 信道, 还是在 Rayleigh 衰落信道, PDL 译码的性能与 MSD 译码的性能相差很小. 故在同时伴有 AWGN 噪声和 Rayleigh 噪声出现的信道(如移动快衰落信道)中, 多级编码的译码可用简单实用、时延小的并行译码(PDL)代替复杂的、时延大的、迭代的 MSD 译码. 这一结论对设计更高频带有效性(也即多级编码器的分量码级数大于 3)的 MLC 方案具有重要意义和使用价值;

(3) 多级编码方案的译码方法的性能与集分割方式有关. 在 UP 与 MP 分割方式下, 由于 MSD 译码的性能大大优于 PDL 译码的性能, 所以建议采用 MSD 译码; 在 BP 分割方式下, 由于 MSD 译码的性能与 PDL 译码的性能相差不大, 所以建议采用简单的 PDL 译码.

参考文献:

- [1] D. F. Yuan, Z. G. Cao, D. W. Schill and J. B. Huber. Robust signal constellation design for AWGN and Rayleigh fading channels for softly degrading communication scheme using multilevel codes [J]. Chinese Journal of Electronics, 2000, 9(2): 115- 121.
- [2] H. Imai and S. Hirakawa. A new multilevel coding method using error correcting codes [J]. IEEE Trans. on IT, 1977, 23(5): 371- 377.
- [3] P. Schramm. Multilevel coding with independent decoding on levels for efficient communication on static and interleaved fading channels [A]. IEEE PIMRC' 97 [C], Helsinki, Finland, Sept. 1997: 1196- 1200.
- [4] U. Wachsmann, R. F. H. Fischer and J. B. Huber. Multilevel codes: theoretical concepts and practical design rules [J]. IEEE Trans. on IT, 1999, 45(5): 1361- 1391.

作者简介:

袁东风 (见本期第 498 页)



王承祥 1975 年 5 月生, 2000 年 7 月于山东大学电子工程系硕士研究生毕业并获工学硕士学位, 现为德国汉堡工大通信工程系博士研究生. 主要研究方向为移动通信纠错抗干扰及 MLC 技术等. 已发表学术论文 30 篇.