

衰落信道下 Turbo 网格编码调制在图像传输中的性能研究¹

白智全* 袁东风** 李长春* 徐文进*

*(山东大学信息科学与工程学院 济南 250100)

** (东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要: 基于 Turbo 码和网格编码调制的特点, 该文分析了 TTCM 的具体编译码方法, 并分析比较了 TTCM 在 8PSK 调制下结合两种典型映射方案 UP(Ungerboeck Partitioning), BP(Block Partitioning) 在 Rayleigh 信道中用于静态图像传输时的性能, 给出了计算机仿真结果和评价图像传输质量的峰值信噪比 (PSNR)。

关键词: Turbo 码, Turbo 码网格编码调制, 平坦 Rayleigh 衰落信道, 集分割

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)06-0995-05

Research on the Performance of Turbo Trellis Coded Modulation in Image Transmission over Flat Rayleigh Fading Channels

Bai Zhi-quan* Yuan Dong-feng** Li Chang-chun* Xu Wen-jin*

*(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

** (State Key Lab. on Mobile Communications, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract In this paper, based on the characteristics of Turbo codes and Trellis Coded Modulation (TCM), an improved method Turbo Trellis Coded Modulation (TTCM) is presented and analyzed over flat Rayleigh fading channels in image transmission with two typical mapping strategies. The selection of different mapping strategies of TTCM in Rayleigh fading channels for image transmission is analyzed and investigated. Furthermore, taking 8PSK modulation of TTCM as the example, two different mapping strategies are compared. Computer simulation results and PSNR that can evaluate the quality of the transmitted image are given.

Key words Turbo codes, Turbo Trellis Coded Modulation(TTCM), Flat Rayleigh fading channels, Set partitioning

1 引言

随着现代数字通信技术的发展, 多媒体通信逐渐成为通信的主流。作为多媒体通信中最常见的图像传输, 它所要求的图像的传输质量也越来越高。1993 年 C. Berrou 等人在 ICC'93 上提出的 Turbo 码^[1,2] 具有逼近香农限的特性, 它在较低的信噪比 (SNR) 下能够提供很低的误比特率 (Bit Error Rate, BER)。虽然 Turbo 码的二进制调制具有很好的性能, 但是它对于频带的利用率很低, 在频带资源日益紧张的今天, 采用基带调制在许多场合是不现实的。已有的 TCM^[3] (Trellis Coded Modulation) 技术能够有效利用频带资源, 所以一种将二者相结合的方

¹ 2003-01-17 收到, 2003-08-11 改回

国家自然科学基金 (69872020), 教育部《高等学校骨干教师资助计划》 ([2000] 65), 东南大学移动通信国家重点实验室访问学者基金 (V-99004), 东南大学移动通信国家重点实验室开放基金 (A-0102), 山东省自然科学基金 (Y2000G14) 资助课题

案 TTCM(Turbo Trellis Coded Modulation)^[4,5] 被提出。将 Turbo 码和 TCM 相结合, 可以在获得较好的传输质量的同时, 有效提高频带利用率。

本文中, 分析比较了典型的 TTCM 的 8PSK 调制在 Rayleigh 平坦衰落信道中, 结合两种典型的映射方案 UP(Ungerboeck Partitioning) 和 BP(Block Partitioning) 用于静态图像传输时的性能。证明了在 Rayleigh 平坦衰落信道中, TTCM 结合 UP 映射性能好于 TTCM 结合 BP 映射, 而且 TTCM 结合 BP 映射在 Rayleigh 信道中较其在 AWGN 信道中具有很好的自适应效果。在计算机仿真中, 通过对表征图像传输质量的峰值信噪比 (PSNR) 及 BER 的分析, 我们进一步验证了上述结果。

2 TTCM 系统原理结构

C. Berrou 等人提出的 Turbo 码具有很多优点: 灵活的码率设计 (可以通过使用不同的截断器实现)、不同 RSC(Recursive System Code 递归系统码) 编码器的级联方式等等。但是, 其二进制基带调制时的频带利用率低。早在 1982 年提出的 TCM 可以将编码和调制相结合, 通过扩大调制信号集, 能有效地提高频带利用率。将 Turbo 码和 TCM 相结合的 TTCM 可以得到很好的 BER 特性同时又能有效利用频带资源。我们将首先着重介绍 TTCM 的译码。

2.1 TTCM 译码器结构及对应的 Log-MAP 算法

TTCM 中信息比特的取对数的概率函数 $L(d_k)$ ^[5] 的计算公式如下:

$$L(d_k) = \log(p\{d_k = i|Y\}) = \log \left[\text{const} \cdot \sum_M \sum_{M'} \gamma_i(y_k, M', M) \alpha_{k-1}(M') \beta_k(M) \right] \\ \forall i \in \{0, 1, \dots, 2^m - 1\} \quad (1)$$

其中 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ 表示接收到的符号序列, d_k 表示信息比特对所对应的符号, γ, α, β 的表达式如下:

$$\gamma_i(y, M', M) = p(y_k | d_k = i, s_k = M, s_{k-1} = M') p(d_k = i | s_k = M, s_{k-1} = M') p(s_k = M') \quad (2)$$

$$\alpha_k(M) = \frac{\sum_{M'} \sum_{i=0}^{2^m-1} \gamma_i(y_k, M', M) \alpha_{k-1}(M')}{\sum_M \sum_{M'} \sum_{i=0}^{2^m-1} \gamma_i(y_k, M', M) \alpha_{k-1}(M')} \quad (3)$$

$$\beta_k(M) = \frac{\sum_{M'} \sum_{i=0}^{2^m-1} \gamma_i(y_{k+1}, M, M') \beta_{k+1}(M')}{\sum_{M'} \sum_M \sum_{i=0}^{2^m-1} \gamma_i(y_{k+1}, M, M') \alpha_k(M)} \quad (4)$$

在译码过程中需要考虑编码器的起始条件, 在此我们设定其初始值为

$$\alpha_0(s) = \begin{cases} 1, & s = 1; \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \text{和} \quad \beta_N(s) = \begin{cases} 1, & s = 1; \\ 0, & \text{其他} \end{cases} .$$

在式 (2) 中, 如果存在一个 i 值使得 $p(d_k = i | s_k = M, s_{k-1} = M') = 1$ 时, 亦即存在一个输入信息比特对使得编码器由状态 M' 转移到 M , 我们令 $p(s_k = M | s_{k-1} = M') = p(d_k = i)$; 如果不存在这样的 i 值, 则令 $p(s_k = M | s_{k-1} = M') = 0$ 。

在 Turbo 码的二进制译码中, 我们可以最终将信息比特的取对数的概率函数表示为 3 项之和, 即

$$L(u_k) = L_{\text{apriori}} + L_{\text{channel}} + L_{\text{extrinsic}} \quad (5)$$

在上式中右边三项分别称为: 先验信息, 系统信息以及外部信息。与 Turbo 码的二进制译码不同, TTCM 译码中信息比特对的最终概率函数只能表示为两项之和:

$$L(u_k) = L_{\text{apriori}} + L_{\text{e\&\&s}} \quad (6)$$

其中式 (6) 右边两项分别表示：先验信息、外部信息与系统信息 (即 $L_{e\&s}$ ，因为在 TTCM 编码时，信息比特和校验比特被一起映射到信号点，而传输过程中的噪声同时影响了信息比特和校验比特)。我们可以由公式 $L_e = L_{e\&s} = L(u_i) - L_{opriori}$ 计算出外部信息 L_e ，这里计算出的外部信息将作为先验信息被传递给另一个译码器。

2.2 TTCM 仿真中使用的 Rayleigh 衰落信道模型

图 1 所示为一典型的带有高斯噪声的 Rayleigh 衰落信道模型，对于平坦衰落过程，信道增益在一个符号衰落期间 T_s 内可以被认为是一个常数。在本文中我们考虑的是经过完全交织的平坦 Rayleigh 衰落信道，而且考虑的是 8PSK 的相关检测。信道的离散模型表示如：

$$y_k = a_k x_k + n_k \tag{7}$$

其中 x_k 为 8PSK 信号的幅度； n_k 为加性高斯白噪声，它的均值为 0，方差为 $N_0/2$ ；衰落系数 a_k 是概率密度函数为 $f(a) = 2ae^{-a^2}$ ($a > 0$) 的随机变量，并且 $E[a^2] = 1$ 。在接收端所获得的关于信道的信息称为信道边信息，记为 CSI(Channel Side Information)。CSI 可以通过使用辅助信道或者对 SNR 做直接估计而得到。在接收端，为了减小复杂度，我们使用 CSI 的统计信息，并设定统计值为： $E[a] = 0.8862$ 。

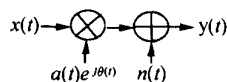


图 1 衰落信道模型

3 TTCM 结合 UP 映射和 BP 映射的分析

几乎所有的编码调制技术都是基于 Ungerboeck^[3] 提出的通过信号集分割的符号映射。通常对于 M-PSK 信号集，平方欧氏距离常被用作距离的度量。根据如图 2，Ungerboeck 提出的集分割方式，可以得到第 i 级分割的距离参数：

$$d_i = 4 \sin^2(2^{i-1} - m\pi), \quad 1 \leq i \leq m \tag{8}$$

我们可以看到图 2 中， $d_1 = 0.586$ ， $d_2 = 2$ 和 $d_3 = 4$ 。每一次分割后，子集中信号点的距离参数大于上一级子集中信号点的距离参数。这种集分割方式称为 UP。UP 分割中同一信号集中相邻信号点间的最小欧氏距离不断增加，从而使得信号抗干扰的能力也不断加强。

图 3 中所示的是另一种典型的集分割方式，它的思路与 UP 恰好相反，这种分割方式称为 BP。BP 分割中，每次集分割后汉明距离越小的点之间的欧氏距离也越来越小，每一级分割均保持距离参数不变，图中 $d_1 = d_2 = d_3 = 0.586$ 。

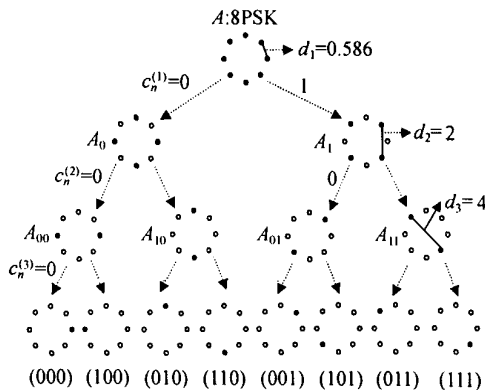


图 2 8PSK 信号的 Ungerboeck 集分割

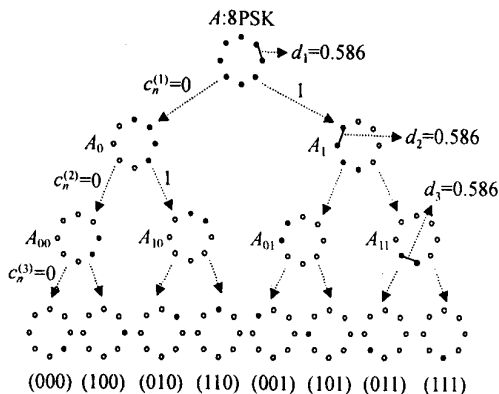


图 3 8PSK 信号的 Block 集分割

由于 UP 映射、BP 映射集分割方式的不同,使得采用它们的 TTCM 系统具有不同的性能。UP 分割的优势在于每次分割后子集中信号点之间的欧氏距离是不断加大的,这一特点使得 UP 分割具有了更好的纠错性能和更高的功率有效性。

4 仿真结果

在计算机仿真中,我们使用的递归系统码(RSC)的生成多项式是 $\begin{bmatrix} 001 \\ 100 \\ 010 \end{bmatrix}$,TTCM 系统的信息传输率为 2 bit/(符号·Hz),比普通的二进制 Turbo 码的信息传输率比特/(符号·赫兹)提高了 4 倍。我们将图像作为信源,直观地给出 Rayleigh 衰落信道下,TTCM 在两种不同集分割映射下的图像仿真结果及 BER 曲线。图 4 为采用 BP 映射下的结果;图 5 均为采用 UP 映射下的结果。在相同信噪比下,可以看在 Rayleigh 信道中 TTCM 结合 UP 映射可以得到较其结合 BP 映射更好的效果。从信噪比曲线图 6 和图 7 中可以看到,第一次迭代时,当 BER 为 10^{-3} 量级时,采用 UP 及 BP 所需的信噪比分别为 8.5 dB 和 9.5 dB;当信噪比为 10 dB 时,在 BP 和 UP 下,我们要达到 BER 为 10^{-5} 左右,所要进行的迭代次数分别为 6 次和 4 次。同样在迭代次数均为 8 时,要达到 10^{-5} 的 BER,采用 UP 映射要比采用 BP 映射有 0.2 dB 左右的增益。



(a) 4 次迭代译码 (b) 8 次迭代译码

图 4 BP 分割下信噪比为 7.5 dB



(a) 4 次迭代译码 (b) 8 次迭代译码

图 5 UP 分割下信噪比为 7.5 dB

从图 6 和图 7 中我们可以看到 TTCM 在 Rayleigh 衰落信道下结合 UP 映射可以比其在 BP 映射下取得更好的效果。在图像信源的传输中我们常使用峰值信噪比(PSNR)来衡量传输质量,在 256 级灰度图像中 PSNR 的定义为: $PSNR = 10 \log \frac{255^2}{MSE}$; 其中 $MSE = \frac{1}{num} \sum_Y \sum_X [g(x,y) - \hat{g}(x,y)]^2$, $g(x,y)$; $\hat{g}(x,y)$ 分别表示在原始图像和恢复图像中像素点的灰度值, num 表示图像中像素点的个数。仿真得到的 PSNR 值如表 1 所示:

表 1 采用 UP, BP 分割方式时恢复图像的 PSNR 值

| E_b/N_0 (dB) | 7.5 | 8.0 | 8.5 | 9.0 | 9.5 | 10 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| PSNR (BP) | 20.9586 | 25.5223 | 31.1745 | 35.9795 | 41.3221 | 42.886 |
| PSNR (UP) | 22.9765 | 28.6550 | 33.5650 | 37.3178 | 42.7170 | 44.753 |

5 结论

从仿真结果中我们可以看到,将纠错性能很好的 Turbo 码与 TCM 相结合得到的 TTCM 可以在较低的信噪比下得到很好的纠错性能,而且同时能够有效地利用频带资源,提高频谱利用率。基于我们前期的工作、实践和本文的计算机仿真,可以得出结论:在 Rayleigh 信道下,TTCM 结合 UP 映射较其与 BP 映射结合可以得到更好的性能,并且在较低 BER 及迭代次数下,将有 1dB 左右的增益;在较高 BER 及迭代次数下,将有 0.2 dB~0.4 dB 左右的增益,而且欧氏度量可以作为 Rayleigh 平坦衰落信道下判断纠错性能好坏的度量之一;仿真中可以看到

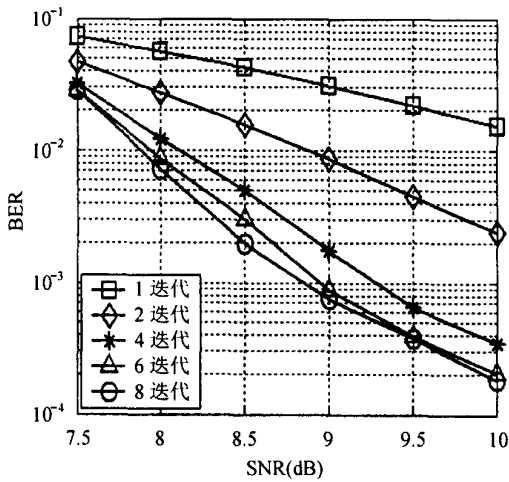


图 6 TTCM 的 BP 集分割下的 BER 曲线

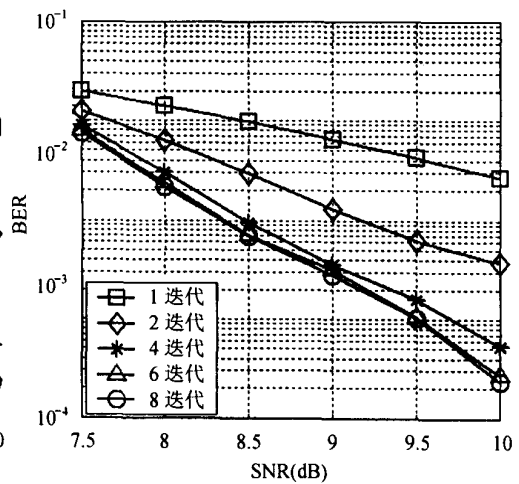


图 7 TTCM 的 UP 集分割下的 BER 曲线

在 Rayleigh 衰落信道下, BP 映射具有一定的自适应性, 它与 UP 映射的性能差距较我们前期所做的在 AWGN 信道时的性能差距有一定的减小^[6]; 同时衡量图像的传输质量可以通过对 PSNR 值的判断来准确地加以反映。

参 考 文 献

- [1] Berrou C, Glavieux A, Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes (1). Proceedings IEEE ICC'93, Geneva, 1993: 1064-1070.
- [2] Berrou C, Glavieux A. Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes. *IEEE Trans. on Comm.*, 1996, COM-44(10): 1261-1271.
- [3] Ungerboeck G. Channel coding with multilevel/phase signals. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 1982, IT-28(1): 55-67.
- [4] Patrick Robertson, Thomas Wörz. A novel bandwidth efficient scheme employing Turbo codes. URSI&ITG Conference, Kleinheubacher Tagung, Oct. 1995: 96-967.
- [5] Patrick Robertson, Thomas Wörz. Bandwidth-efficient Turbo trellis-coded modulation using punctured component codes. *IEEE J. on SAC.*, 1998, 16(2): 206-218.
- [6] Dongfeng Yuan, Zhiquan Bai, Jiming Ning. Comparison of Turbo trellis coded modulation with different mapping strategies over AWGN channels. Accepted by WWC2003(3Gwireless'2003), San Francisco, USA, May 27-30, 2003: 211-215.

白智全: 男, 1978 年生, 硕士, 研究方向: 移动通信纠错抗干扰技术、Turbo 网格编码调制、Turbo 码。
 袁东风: 男, 1958 年生, 教授, 博士, 博士生导师, IEEE 高级会员, 研究方向: 移动通信纠错抗干扰技术、编码调制技术、OFDM、Ad hoc 等。
 李长春: 男, 1963 年生, 博士研究生, 研究方向: 移动通信纠错抗干扰技术、多级编码技术。
 徐文进: 男, 1977 年生, 硕士, 研究方向: Turbo 码。