

基于 PPM 调制的低密度矩阵编码与译码

吴永胜, 杨爱英, 孙雨南
(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘 要: 针对 PPM 调制信号的脉冲数具有稀疏性的特点, 本文提出了一种利用低密度矩阵编码的方法, 并根据最大后验概率准则进行译码. 仿真结果表明, 不管采用硬判决还是软判决, 提出的编码方法都具有比规则 LDPC 码更好的纠错能力和更快的译码速度.

关键词: PPM 调制; 低密度矩阵; 加性高斯白噪声; 最大后验概率

中图分类号: TP302.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 10-1976-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.10.012

A Low Density Matrix Coding and Decoding Method Based on PPM Modulation

WU Yong-sheng, YANG Ai-ying, SUN Yu-nan

(Department of Opto-electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: According to the sparse characteristic of the PPM modulated signal, this paper proposes a coding method making use of a low density matrix, and decoding with maximum a posteriori probability rule. Compared with the regular LDPC, the proposed method has better error correction ability and decoding speed when using hard or soft decisions.

Key words: PPM modulation; low density matrix; additive white Gaussian noise (AWGN); maximum a posteriori (MAP)

1 引言

由于 PPM (pulse position modulation) 调制能量效率较高, 因而被广泛应用在对功率有限制的场合, 如空间光通信等^[1]. LDPC (low density parity check) 码是迄今为止发现的最优秀的差错控制编码之一, 最初由 Gallager 于 1962 年在他的博士论文中提出^[2]. 但由于当时计算性能, 硬件条件等客观因素的限制, 在很长一段时间里被人们所遗忘. 直到 20 世纪 90 年代后半期, LDPC 码被人们重新发现, 并在全世界范围内得到了广大学者的研究^[3-7]. LDPC 码在码长较长时能渐进达到香农限, 在文献^[4]中, 作者设计了距离香农限只有 0.0045dB 的 LDPC 码. 对信息数据进行 LDPC 码编码矩阵进行编码后再进行 PPM 调制, 这样就可以期望同时得到较高的编码效率与优秀的纠错能力^[8-10], 但涉及如何从 PPM 调制信号中提取 LDPC 译码所需的信息的问题. 在本文中我们讨论了交换编码与调制顺序的方法, 即首先进行 PPM 调制, 再对调制后的信号进行编码. 如果用 LDPC 码对 PPM 调制信号进行编码, 则由于编码矩阵不具有稀疏性, 就会使得编码后的信息存在大量码元为比特“1”. 基

于 PPM 调制信号的特点, 本文提出了一种基于低密度矩阵的编码方法, 可有效的降低码元比特“1”的数量, 目前尚未见到有类似的报道. 编码时先将用户数据分组调制成 PPM 信号, 然后利用一个低密度矩阵对其进行编码, 在接收端利用最大后验概率 (maximum a posteriori, MAP) 译码准则实现译码. 通过仿真实验, 我们发现这种编码具有比规则 LDPC 码更好的纠错能力和更快的译码速度.

2 编码效率分析

对于一个调制数为 M 的 PPM 调制, 每一个调制符号对应的信息比特为 $\log_2 M$, 并将这些信息比特映射到 M 个时隙中的一个时隙脉冲上. 假设要传输的二进制信息比特数为 V , LDPC 码率为 R , 编码采用系统码. 对数据进行 PPM 调制, 再进行 LDPC 编码后传输, 可以得到对应 V 比特数据传输的比特数为 $V * M / (R * \log_2 M)$, 其中比特“1”的个数为 $V / \log_2 M + V * M * (1 - R) / (2 * R * \log_2 M)$. 由于 LDPC 码的生成矩阵不是稀疏矩阵, 编码后校验矩阵部分得到的比特“0”和比特“1”的概率是相同的, 即都是 0.5. 本文的目的就是寻求一种

有效的编码方式,使编码后的信息即能有 PPM 调制那样的能量效率,又能有 LDPC 码那样的纠错性能.在理想情况下,当编码采用码率为 R 的系统码时,可以得到对应 V 比特数据编码后的比特数为 $V * M / (R * \log_2 M)$,其中比特“1”的个数为 $V / (R * \log_2 M)$,即由生成矩阵生成的比特“1”的概率由采用 LDPC 码时的 0.5 降低到 $1/M$.

从上述分析可以看出,采用 LDPC 编码后比特“1”的数量明显比我们期望的理想编码方式多,图 1 给出了在不同调制数 M 下,LDPC 码与理想情况下生成码元比特“1”的比值随码率 R 变化的情况.从图中可以看出,采用 LDPC 码编码方式的能量效率随着码率 R 的提高而提高,而且速度随着 R 接近 1 而加快.

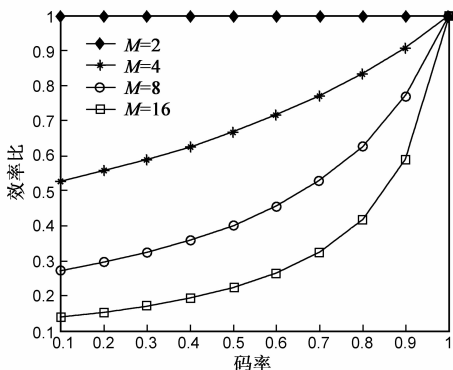


图1 不同调制数M下能量效率比值

分析 LDPC 码编码方式能量效率较低的原因后可知是由于生成矩阵不具有稀疏性,故我们可以通过构造具有稀疏性的生成矩阵的方式以提高能量效率.我们构造了一种低密度矩阵,如图 2 所示.前半部分是一个对角矩阵 I ,后半部分是校验矩阵 P ,其中每列“1”的个数很少,这样就可以保证编码后的数据也具有稀疏性.假设校验矩阵使得编码后生成的比特“1”的个数由 LDPC 校验矩阵的 0.5 降低到 R_M ,则可以重新计算得到编码效率比为 $1 / (R + M * (1 - R) * R_M)$,此处 R_M 表示校验矩阵生成码元比特“1”的概率.

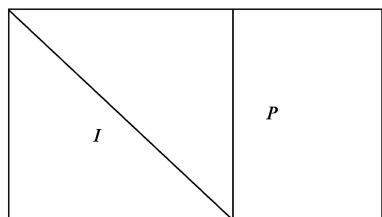


图2 低密度矩阵

图 3 给出了当 $R_M = 0.3$ 时,不同调制数 M 下的能量效率比值,可以看出比采用 LDPC 编码时有较明显的提高.下面采用码率 $R = 0.5$,校验矩阵生成码元比特“1”的概率 $R_M = 0.3$ 的低密度矩阵.在调制数 $M = 8$ 时,传输数据以 15 比特为一数据帧时给出仿真计算,此时

的能量效率比由原来的 LDPC 编码的 0.4 提高到了 0.6.

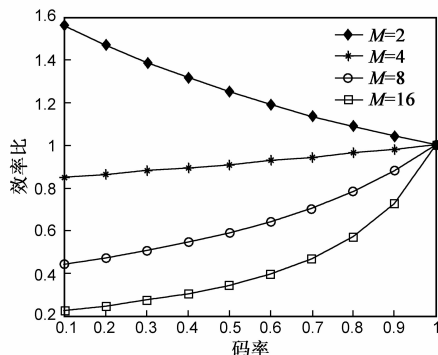


图3 $R_M=0.3$ 时不同调制数M下的能量效率比值

3 性能仿真与分析

为了检测构造矩阵的性能,我们利用 Mackay 的构造法构造校验矩阵 $H(80, 3, 6)$,即码长为 80,码率为 0.5,行重为 6,列重为 3 的规则 LDPC 校验矩阵^[11].利用高斯消元,得到系统型生成矩阵.本文采用的低密度矩阵可利用上节的方法,首先生成 40×40 的全 0 矩阵,然后每列随机选择 3 位取 1,其余保持为 0 作为校验矩阵 P .这样就可以得到和上述 LDPC 码率一样的低密度矩阵,通过仿真计算可知此时 $R_M = 0.3$.

由于 PPM 调制后的数据具有稀疏性,我们利用这个特点可以实现低密度矩阵编码的有效译码算法,具体为:

(1) 接收到 80 位编码后的信号强度数据,选择前 40 位,每 8 位作为一组,这样可以得到 5 组数据;

(2) 基于 PPM 调制的特点,每一组中只有一个位置为 1,则我们可以在每组中选择接收信号强度最大的位置取 1,其余取 0.后 40 位则按硬判决标准选择取 1 或者 0;

(3) 在 5 组数据中选择 2 组,这样可得到 10 种不同取法(从简单的概率运算可以得到在信道误码率为 10^{-2} 时至少 4 个比特出错的概率约为 10^{-8}).假设这两组没有传输误码,利用穷举法,得到所有可能的 $8^3 = 512$ 种消息组合,与生成矩阵相乘后可得到对应的码字组合;

(4) 分别求出每种码字和接收硬判决信息的汉明距离,即两个字符串对应位置的不同字符的个数,选择最小的为译码输出.

在本例中,基于 PPM 调制后的信息具有规则的稀疏性,将码字空间从 2^{40} 降低到 $8^5 = 32768$.再利用信道传输特性,可以进一步将码字空间降低到 $10 \times 8^3 = 5120$,在信道误码率较低时还可进一步缩小码字空间.编码规则确定之后,这些组合的选取都是固定的,所以

在硬件设计时可以通过面积换效率的方法实现完全并行运算,从而大大加快了硬件译码速度.

在仿真计算中选择了加性高斯白噪声信道作为数据传输通道,即 $y_i = x_i + n_i$,其中 y_i 为接收到的数据, x_i 为发送的数据, n_i 为 0 均值加性高斯白噪声. 比较和分析了利用 LDPC 码对 PPM 调制信号进行编码与本文提出的低密度矩阵对 PPM 调制信号进行编码的仿真结果,在 LDPC 码的译码中迭代次数均为 20.

图 4 为硬判决仿真结果,对应 LDPC 码采用了比特翻转译码方法^[2]. 从图上可以看出,采用低密度矩阵编码方法(L-PPM)在 0 到 14dB 之间始终优于 LDPC 码编码,而且不像 LDPC 码存在误码率阈值问题,即只有在误码率降到一定值时才能有更好的译码性能. 在信息数据为二进制比特数时,基于低密度矩阵的译码只涉及到简单的逻辑运算,可完全并行实现;而 LDPC 码译码中需要计算检验和,并通过迭代译码,不能实现完全并行运算.

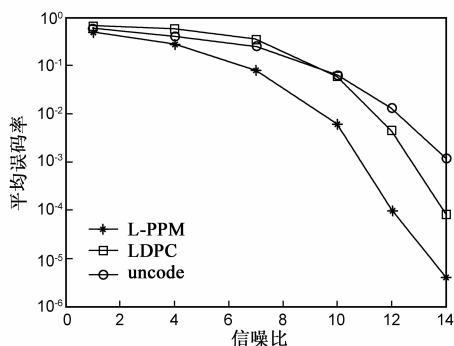


图4 硬判决误码率比较

在接收端,用后验概率比值 $p(y_i|1)/p(y_i|0)$ 和 $p(y_i|0)/p(y_i|1)$,代替硬判决结果的“1”和“0”,取概率累加最大值为译码输出,后验概率比值取法参见 LDPC 译码的 BP(Believe Propagation)算法^[12]. 得到软判决误码率情况如图 5 所示,此处 LDPC 编码采用标准 BP 译码算法. 从图中可以看出,基于低密度矩阵的方法可以得到很好的译码性能,而且译码复杂度和采用硬判决时基本不变,只是把原先的比特运算改为实数加减运算.

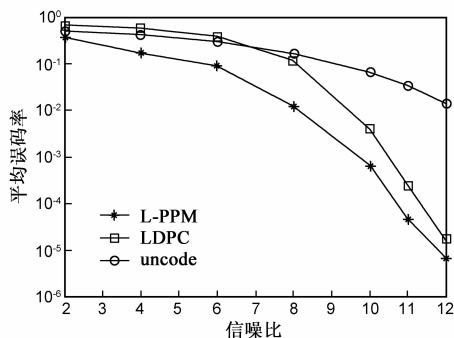


图5 软判决误码率比较

在 10^{-5} 误码率水平时,低密度矩阵译码采用软判决时能比硬判决时可提高 2dB 左右的增益.

4 结论

本文构造了一种低密度矩阵,并利用该矩阵实现了对 PPM 调制信号的编码与译码. 从上述分析可以看出,本文提出的低密度校验矩阵在短码的情况下即可达到可观的编码增益,不管是采用硬判决还是软判决译码均优于相同码率的 LDPC 码,而且译码也较简单,易于硬件实现,可实现完全并行译码. 从本质上来说,低密度校验矩阵其实就是针对 PPM 调制简化了的 LDPC 码,而故在码长增长后,可以预期低密度矩阵也能渐进达到香农限,有待于将来的工作中进行研究.

参考文献

- [1] J Hamkins, B Moision. Selection of modulation and codes for deep space optical communications [J]. Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2004, 5338(1): 123 - 130.
- [2] R G Gallager. Low density parity check code [D]. Cambridge, MA: MIT Press, 1963.
- [3] T J Richardson, M A Shokrollahi, R L Urbanke. Design of capacity-approaching irregular low-density parity-check codes [J]. IEEE Trans Inform Theory, 2001, 47(2): 619 - 637.
- [4] S Y Chung, G D, Jr Forney, T J Richardson, R Urbanke. On the design of low-density parity-check codes within 0.0045dB of the Shannon limit [J]. IEEE Commun Lett., 2001, 5(2): 58 - 60.
- [5] 雷维嘉, 谢显中, 李广军. 一种基于 LDPC 编码的协作通信方式 [J]. 电子学报, 2007, 35(04): 712 - 715.
LEI Wei-jia, XIE Xian-zhong, LI Guang-jun. A cooperative communication method based on LDPC code [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(04): 712 - 715. (in Chinese)
- [6] 王秀妮, 马啸, 白宝明. 多层叠加 LDPC 码编码调制技术 [J]. 电子学报, 2009, 37(07): 1536 - 1541.
WANG Xiu-ni, MA Xiao, BAI Bao-ming. Multilevel coded modulation based on superimposed LDPC codes [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(07): 1536 - 1541. (in Chinese)
- [7] 陈婧文, 仰帆帆. 基于非正规 LDPC 码的中继协作通信及其联合迭代译码的性能研究 [J]. 电子学报, 2010, 38(07): 1535 - 1540.
CHEN Jing-wen, YANG Feng-fan. Study on the Irregular-LDPC-Based relay cooperation and performance of joint iterative decoding [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(07): 1535 - 1540. (in Chinese)
- [8] Y Tan, J Z Guo, Y Ai, W Liu, Y J Fei. A coded modulation scheme for deep-space optical communications [J]. IEEE Photonic Tech Lett., 2008, 20(5): 372 - 374.

- [9] Z Dou, X J Sha, Y Wang, D Y Tian. DPC-coded optical PPM communication system over the atmosphere turbulence channels [A]. Proceedings of the 2010 International Conference on Information and Automation [C]. Harbin, 2010. 2277 – 2280.
- [10] B Barua, D Barua. Analysis the performance of a LDPC coded FSO system with Q-ary pulse-position modulation [A]. Proceedings of 3rd International Conference on Computer Research and Development [C]. Shanghai, 2011. 339 – 343.
- [11] D J C MacKay. Good error-correcting codes based on very sparse matrices[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1999, 45(2): 399 – 431.
- [12] F R Kschischang, B J Frey, H-A Loeliger. Factor graphs and the sum-product algorithm [J]. IEEE Trans Inform Theory, 2001, 47(2): 498 – 519.

作者简介



吴永胜 男, 1981年3月生于浙江衢州, 北京理工大学光电学院博士研究生, 主要研究方向是信道编码理论、LDPC码、编码调制技术等。

E-mail: yongsheng.wu@gmail.com

杨爱英 女, 1975年6月出生于江苏扬州, 北京大学光电学院副教授。主要研究方向是新型光通信, 宽带光学测量, 光信号处理。

E-mail: yangaiying@bit.edu.cn