

基于低密度奇偶校验码的 MPPM 比特符号映射及系统性能研究

冷蛟锋^{1,2} 郝士琦^{1,2} 吕旭光^{1,2} 周建国^{1,2} 王 勇^{1,2}

(¹ 脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037)
² 安徽电子制约技术重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要 建立了基于低密度奇偶校验(LDPC)码和多脉冲位置调制(MPPM)的无线光通信系统模型,给出了相应系统模型下的解码算法,研究了 $(m, 2)$ MPPM的比特符号映射方式,提出了用改进的遗传算法(GA)搜索的优化映射方法,最后在大气湍流信道下进行了仿真。仿真结果表明基于 LDPC 码和 MPPM 的无线光通信系统性能明显优于未编码的 MPPM 系统,结合 LDPC 码和多光束发射技术可以提高系统抗强大气湍流影响的能力;通过 GA 优化的映射方法在不增加系统复杂性的情况下能进一步提高系统的纠错性能,可以获得更大的编码增益。

关键词 光通信;低密度奇偶校验码;多脉冲位置调制;比特符号映射;遗传算法;大气湍流信道

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0406001

Study on Bit-Symbol Mapping Method of MPPM and System Performance Based on Low Density Parity Check Codes

Leng Jiaofeng^{1,2} Hao Shiqi^{1,2} Lü Xuguang^{1,2} Zhou Jianguo^{1,2} Wang Yong^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (Electronic Engineering Institute),
Hefei, Anhui 230037, China
² Key Laboratory of Electronic Restriction of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China)

Abstract Wireless optical communication system based on low density parity check (LDPC) codes and multi-pulse position modulation (MPPM) is established, and the decoding algorithm is introduced according to the system model. Bit-symbol mapping method of $(m, 2)$ MPPM is studied, and a novel bit-symbol mapping method is presented based on modified genetic algorithm(GA), which is simulated under turbulence channel. The simulation results show that LDPC codes have excellent error correction capabilities with MPPM, and the wireless optical communication based on multiple-beam propagating technique and LDPC codes can operate under a strong atmospheric turbulence. Bit-symbol mapping method optimized by GA can get more coding gain without increasing complication.

Key words optical communications; low density parity check codes; multi-pulse position modulation; bit-symbol mapping; genetic algorithm; atmospheric turbulence channel

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 010.1330

1 引 言

无线光通信具有不需要申请频谱、安全保密、信息容量大、设备尺寸小和功耗低等优点,近年来已经成为通信领域的一个研究热点。但是由于大气衰

减、大气湍流和背景光噪声等的干扰,无线光通信的系统性能受到严重影响^[1]。解决方案之一是差错控制编码技术的引入,它可以极大地改善地面无线光通信的误码性能^[2]。低密度奇偶校验(LDPC)码具

收稿日期: 2011-10-13; 收到修改稿日期: 2011-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(60902017)和安徽省自然科学基金(10040606Q60,10040606Q61)资助课题。

作者简介: 冷蛟锋(1987—),男,硕士研究生,主要从事 LDPC 码在无线光通信中的应用方面的研究。

E-mail: lengjiaofeng@yahoo.cn

导师简介: 郝士琦(1963—),女,硕士,教授,主要从事卫星通信和大气激光通信等方面的研究。

E-mail: liu_hsq@126.com(通信联系人)

有吞吐量大、较低的错误平底、极具高速译码潜力等优点^[3],非常适合作为高传输速率通信系统的前向纠错(FEC)方案^[4]。文献[5~9]对 LDPC 码在无线光通信中的应用进行了研究,表明采用 LDPC 编码的无线光通信系统可以获得优越的纠错能力并能获得较大的编码增益。

无线光通信普遍采用强度调制/直接检测(IM/DD)方式^[10]。脉冲位置调制(PPM)是一种能获得较好平均功率效率的调制技术^[11],基于 PPM 的改进形式,多脉冲位置调制(MPPM)不仅可以显著提高带宽效率、功率效率和信息传输吞吐量^[12],而且信号空间的冗余度为差错编码设计提供了可能性^[13]。不同的比特符号映射方式会影响 MPPM 系统的抗干扰性能,但是由于 MPPM 自身的特点,按正交振幅调制类似的距离定义 MPPM 的信号点间的距离没有实际意义^[12]。文献[14]利用星座图设计了基于格雷码的 MPPM 映射方法;文献[15]研究基于网格编码的 MPPM 红外光通信系统,也对 MPPM 映射方式进行了设计;另外考虑比特符号映射的工程实现性,文献[16]提出了基于下三角矩阵的编码映射方法。本文针对采用 LDPC 编码迭代译码的光通信系统中的 MPPM 比特符号映射方式进行研究,通过选择合适的比特符号映射方式使基于 LDPC 和 MPPM 的光通信系统有更好的编码增益,并对系统性能进行了分析。

2 系统模型

图 1 给出了采用 LDPC 编码和 MPPM 调制的无线光通信系统方框图。信源产生的信息序列经 LDPC 编码后进行交织,交织器如图 2 所示, M 是交织器的列数, N 是交织器的行数, M 与 LDPC 码的码长相等, $N = kn$, k 是一整数, n 是一个 MPPM 帧对应的二进制数据长度,交织时经 LDPC 编码后的数据,按行的方式写入,然后再按列的方式读出进行 MPPM 编码,最后对光源进行强度调制,通过发射天线送入大气信道,这样一个 MPPM 帧内的脉冲信号受到的大气湍流影响认为是相同的。当激光通过强大气湍流传输时,信道条件急剧恶化,可以通过多光束发射技术^[1]抑制强大气湍流的影响,并且由于 IM/DD 机制的限制,在无线光通信中重复发射系统性能优于空时编码系统^[17],因此本文在强湍流条件下选用多天线重复发射单天线接收(MISO)系统^[1,17]。接收端通过光电探测器把光信号变成电信号,再通过解调、解交织和信道解码还原信息比特。

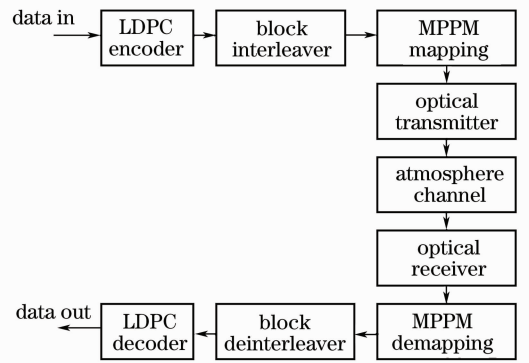


图 1 无线光通信系统框图

Fig. 1 Block diagram of wireless optical communication

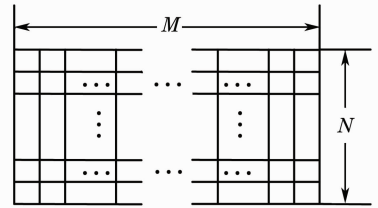


图 2 块交织器结构图

Fig. 2 Structure of block interleaver

地面无线光通信受大气影响,大气衰减主要影响无线光通信系统的通信距离,而湍流效应会使光波参量在传输过程中随机改变,影响系统的通信质量,因此,主要考虑湍流效应带来的影响^[2]。每个时隙光电探测器的检测输出电流信号可以表示为

$$r(t) = \rho[\alpha(t)I] + n(t), \quad (1)$$

式中 ρ 为接收机光电转换效率; $n(t)$ 为背景噪声场、光电转换过程以及接收机电路引入噪声,可认为是独立同分布的高斯噪声^[15]。当 MPPM 中时隙无脉冲时, $r(t) = n(t)$ 。 I 为无湍流状态下接收到的光强, $\alpha(t)$ 是大气湍流引起的乘性噪声,造成接收光强起伏,在弱湍流条件下,光强随机起伏服从对数正态分布^[13,14], $\alpha(t)$ 的概率密度为

$$p(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln I}^2}} \exp\left[-\frac{(\ln \alpha + 1/2\sigma_{\ln I}^2)^2}{2\sigma_{\ln I}^2}\right], \quad (2)$$

式中 $\sigma_{\ln I}^2$ 为对数强度方差;在强湍流信道条件下,光强起伏服从 K 分布^[18]

$$p_{\alpha}(\alpha) = \frac{2\mu^{(\mu+1)/2}}{\Gamma(\mu)} \alpha^{(\mu-1)/2} K_{\mu-1}(2\sqrt{\mu\alpha}), \quad \alpha > 0 \quad (3)$$

式中 $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $K_{\mu-1}(\cdot)$ 是 $\mu-1$ 阶第二类修正 Bessel 函数。 μ 是与闪烁指数 σ_{si}^2 有关的信道参数, $\mu = 2/(\sigma_{\text{si}}^2 - 1)$ 。

3 迭代译码

当系统采用 (m, p) MPPM 和 LDPC 码时,对每个 MPPM 帧都产生 m 个软输出且一个时隙对应一个软输出。

3.1 迭代译码算法

LDPC 码的校验矩阵 \mathbf{H} 可以用 Tanner 图表示^[3],Tanner 图中包含 N 个变量节点和 M 个校验节点。假设 $N(m)$ 表示与校验节点 m 相连的所有变量节点集合, $M(n)$ 表示与变量节点 n 相连的所有校验节点集合; $N(m)\setminus n$ 表示集合 $N(m)$ 中去掉变量节点 n , $M(n)\setminus m$ 表示集合 $M(n)$ 中去掉校验节点 m 。在实际的 LDPC 解码硬件实现方案中,多采用基于对数似然比的置信传播算法(BP)^[3],定义 $R_{mm}^{(k)}$ 表示校验节点 m 向变量节点 n 传递的消息, $Q_{mm}^{(k)}$ 表示变量节点 n 向校验节点 m 传递的消息,其具体步骤如下:

1) 译码消息初始化。计算经过信道后接收到的初始对数似然比为

$$\lambda^{(0)} = \ln \frac{p(x_i = 0 | y)}{p(x_i = 1 | y)}, \quad (4)$$

式中 x_i 为二进制信息比特, y 为从信道接收到的信号。

2) 校验节点更新。对每个校验节点 m 和 $n \in N(m)$,计算

$$R_{mm}^{(k)} = \left\{ \prod_{n' \in N(m)\setminus n} \text{sign}[Q_{mn'}^{(k-1)}] \right\} \times \Phi^{-1} \left[\sum_{n' \in N(m)\setminus n} \Phi(|Q_{mn'}^{(k-1)}|) \right], \quad (5)$$

式中 $\text{sign}(\cdot)$ 是符号函数, $\Phi(x)$ 定义为 $\Phi(x) = \Phi^{-1}(x) = \ln \frac{\exp(x) + 1}{\exp(x) - 1}$ 。

3) 变量节点更新。对每个变量节点 n 和 $m \in M(n)$,计算

$$Q_{mm}^{(k)} = \lambda_n^{(0)} + \sum_{m' \in M(n)\setminus m} R_{m'n}^{(k)}. \quad (6)$$

对于每个变量节点,计算伪后验对数似然比为

$$Q_n^{(k)} = \lambda_n^{(0)} + \sum_{m \in M(n)} R_{mn}^{(k)}. \quad (7)$$

4) 译码判决。一次迭代完成后,进行译码判决。由此可以得到关于译码码字的一个估计值 $\hat{y}(k)$,再计算伴随式 s ,如果 $s=0$,那么译码成功,结束译码,并将 $\hat{y}(k)$ 作为有效输出值;否则转步骤 2) 继续迭代,直至达到预定的最大迭代次数。

3.2 译码消息初始化

定义 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是 MPPM 帧对应的二进制信息比特序列; X_c 表示所有可能的 X 中 $x_i = c$ 集合, $c \in (0, 1)$; $R = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ 是对应的

经过干扰的 MPPM 帧软输出序列,则 MPPM 的初始化对数似然比为

$$\lambda^{(0)} = \ln \frac{p(x_i = 0 | R)}{p(x_i = 1 | R)}, \quad (8)$$

$$p(x_i = c | R) = \sum_{X_f \in X_c} p(X_f | R). \quad (9)$$

对于任意二进制比特序列 $X_w, 1 \leq w \leq L$,其后验概率为

$$p(X_w | R) = \frac{p(R | X_w) p(X_w)}{p(R)} = \frac{p(R | X_w) p(X_w)}{\sum_{j=1}^L p(R | X_j) p(X_j)}. \quad (10)$$

由于 $p(X_w) = p(X_j) = 1/L$,所以(10)式可以化简为

$$p(X_w | R) = \frac{p(R | X_w)}{\sum_{j=1}^L p(R | X_j)}. \quad (11)$$

对于单输入单输出(SISO)系统 MPPM 帧的第 s 个时隙接收的软输出信号 r_s 服从分布

$$p(r_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(r_s - \alpha I)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (12)$$

式中 σ^2 为高斯噪声的方差, α 为大气湍流引入的乘性噪声;显然针对有脉冲和无脉冲的情况(12)式的具体表达式不同,记有脉冲的概率分布为 p_m^s ,无脉冲的概率分布为 p_n^s 。假设 X 对应的 MPPM 帧中有脉冲的时隙位置分别为 l_1, l_2, \dots, l_p ,无脉冲的时隙位置分别为 t_1, t_2, \dots, t_{m-p} ,则

$$p(R | X_w) = \prod_{h=1}^p p_m^h \times \prod_{v=1}^{m-p} p_n^v. \quad (13)$$

对(13)式作变换,可得

$$p(R | X_w) = \prod_{h=1}^p \frac{p_m^h}{p_n^h} \prod_{v=1}^{m-p} p_n^v \prod_{h=1}^p p_n^h. \quad (14)$$

记 $G(X_w) = \prod_{h=1}^p \frac{p_m^h}{p_n^h}$,其中参数 m, l, h 对应于相应的 X_w 。把(9),(11),(14)式代入(8)式可得

$$\lambda^{(0)} = \ln \frac{\sum_{X_{w1} \in X_{i0}} G(X_{w1})}{\sum_{X_{w2} \in X_{i1}} G(X_{w2})}. \quad (15)$$

根据(15)式计算出初始化译码消息后,再结合(5)~(7)式进行迭代译码。以上是针对 SISO 的情况,在 MISO 系统中,译码信息初始化与 SISO 类似,区别在于第 s 个时隙接收的软输出信号 r_s 服从分布不同,以 2 发 1 收的系统为例,

$$p(r_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(r_s - \alpha_{11} I - \alpha_{21} I)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (16)$$

式中 α_{ij} 表示第 i 个激光器到第 j 个探测器间大气湍流引起的乘性噪声。用(16)式替代(12)式就可以得到 MISO 系统中的初始化译码消息。

3.3 比特符号映射选择

由(15)式可知 LDPC 码迭代译码消息的初始化与 MPPM 帧中有脉冲时隙信号有关, 这为比特符号映射的优化选择带来了可能。

由于乘性噪声和加性高斯白噪声的影响, 有脉冲时隙的信道输出可能小于无脉冲时隙信道输出, 那么直接根据信道输出就不能正确解调。在进行 LDPC 译码时, 当错误比特数超过 LDPC 码的纠错范围时 LDPC 码就不能正确译码。在一个 $(m, 2)$ MPPM 帧中, 设 p_d 是有脉冲时隙信号小于无脉冲时隙信号的概率, 忽略时隙的码间串扰, 有脉冲时隙信号和无脉冲时隙信号相互统计独立^[10], 则一个 MPPM 符号无错误的概率为

$$P_0 = (1 - p_d)^{2(m-2)}. \quad (17)$$

只有一个脉冲时隙信号小于其他无脉冲时隙信号及两个脉冲时隙信号只小于一个无脉冲时隙信号的概率, 即由于一个脉冲时隙信号错误导致 MPPM 帧错误的概率 P_1 为

$$P_1 = 2(1 - p_d)^{(m-2)} \sum_{i=1}^{m-2} [C_{m-2}^i p_d^i (1 - p_d)^{m-2-i}] + (m-2)p_d^2(1 - p_d)^{2(m-3)}. \quad (18)$$

两个脉冲时隙信号同时小于其他两个或两个以上无脉冲时隙信号的概率 P_2 为

$$P_2 = 1 - P_1 - P_0. \quad (19)$$

P_1 和 P_2 的大小可以通过数值仿真的方法得到, 这里首先看 p_d 的取值范围。图 3 给出了 MPPM 符号无差错概率 P_0 与 p_d 和 m 的关系曲线, 从图中可以看出对于相同的 P_0 , 随着 m 的增大, p_d 的值变小; 图中以 $P_0 = 0.5$ 为基准, 给出了不同 m 值在 $P_0 = 0.5$ 时相应的 p_d 值。图 4 给出了 $(P_1 - P_2)$ 与 p_d 和 m 的关系曲线, 从图 3 和图 4 可以看出当 p_d 的值使 $P_0 < 0.5$ 时, 都满足 $(P_1 - P_2) > 0$, 即在满足通信系统的误码性能要求的情况下, 同时发生两个脉冲错误的概率小于只发生一个脉冲错误的概率; 并且当 $(P_1 - P_2) = 0$ 时 ($p_d = 0$ 的情况除外), 对于不同的 m 值, 相应的 P_0 都约等于 0.1, 这表明在通信系统工作时都满足一个 MPPM 符号中同时发生两个脉冲错误的概率小于只发生一个脉冲错误的概率。

定义两个二进制比特序列 (a, c) 中对应的数字不同的位数称为比特序列汉明距离, 记为 $H_b(a, c)$, 定义两个二进制比特序列 (a, c) 相应的两个 MPPM

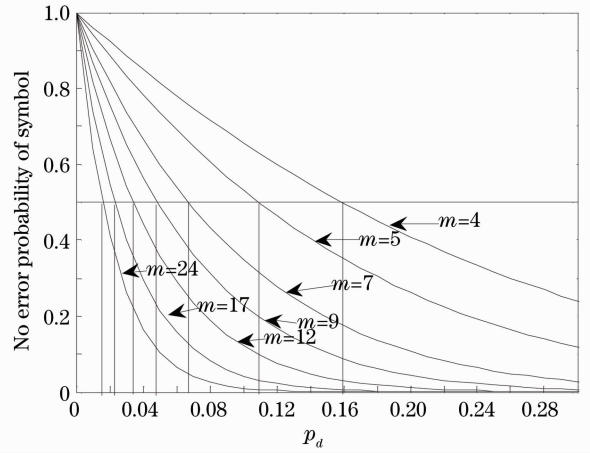


图 3 符号无错误概率与 p_d 的关系图
Fig. 3 Relation between no error probability of symbol and p_d

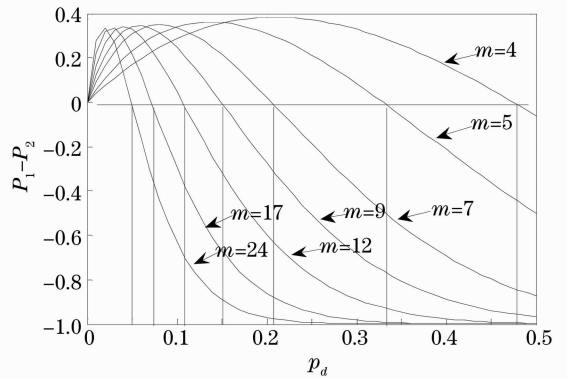


图 4 $(P_1 - P_2)$ 与 p_d 和 m 的关系曲线
Fig. 4 Relation among $P_1 - P_2$, p_d and m

帧中对应的时隙数字不同的位数称为时隙距离, 记为 $H_s(a, c)$ 。根据前面的分析可知, 比特序列汉明距离较大的二进制比特序列对应的两 MPPM 帧的时隙距离也应较大, 所以较好的比特符号映射方式应使

$$H = \sum_{a \neq c} H_b(a, c) H_s(a, c) \quad (20)$$

的值最大。

4 优化映射的搜索算法

遗传算法(GA)是基于自然选择和遗传变异作用机制的全局优化算法, 具有简单、稳健性强、适用于并行处理等优点。针对要解决的问题, 对传统的 GA 进行改进, 搜索最优的比特符号映射方式。

首先初始化种群, 种群中的个体不是传统 GA 中的二进制或十进制编码, 而是 MPPM 的信号空间^[12], 染色体是 MPPM 的一个信号点, 比如 $(5, 2)$ MPPM 中 (10010) 就是一个染色体; 适应度函数 H 如(20)式所示, 第 i 次迭代运算过程中选出适应度

最大的个体，并与前 $(i-1)$ 次迭代过程中的最佳个体比较，适应度较大的个体即为前 i 次代过程中的最佳个体 H_{\max} ，然后选择适应度值最大的前 N 个个体传递到子代种群中，子代种群中的其余部分由系统随机产生进行补充，最后进行交换和变异操作。需要注意的是在交换和变异操作中，要判断新产生的染色体是否是有效的染色体，交换和变异产生的新染色体与个体中的其他染色体不相同，新染色体才为有效染色体。迭代到最大迭代次数后运算停止。算法流程图如图 5 所示。

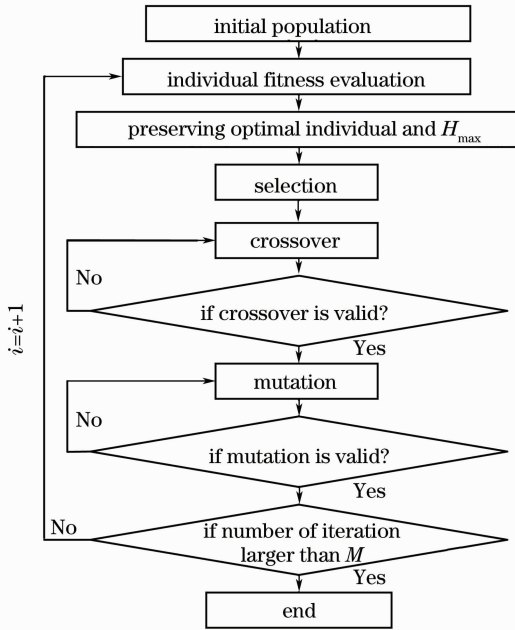


图 5 优化映射的 GA 算法流程图

Fig. 5 GA flow chart of optimizing mapping

图 6 给出了 GA 算法对 $(5,2)$ MPPM 比特符号映射进行搜索时搜索次数与 H_{\max} 的曲线，其中种群个数为 4，种群中的个体数为 5，交换概率为 0.9，变异概率为 0.1，选择最优个体数 $N=4$ ，最大迭代次数为 1000。从图中可以看出，在迭代次数为 200 次左右时 H_{\max} 收敛于 144。最后对算法进行了 50 次

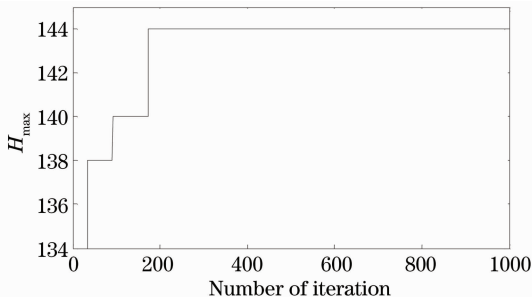


图 6 优化映射的 GA 算法仿真实验曲线

Fig. 6 Simulation curve of GA for optimizing mapping

的重复仿真实验，49 次仿真实验结果都收敛于 144，只有 1 次 H_{\max} 收敛于 140。这表明算法能够有效对 MPPM 的比特符号优化映射方式进行搜索，当然还可以通过增加初始种群数、优化初始种群等方法加快算法的收敛性^[19]。

5 仿真实验

仿真中采用最小环为 6，码长为 2400，码率为 0.5 的比特填充 LDPC 码，最大迭代次数为 100 次，弱湍流信道下的 $\sigma_{\ln I}^2$ 为 0.25。此外定义系统无信道编码的信噪比为 R_{SN} ，信道编码后的信噪比为 R'_{SN} ，LDPC 码的码率为 R ，为保证光电转换后的符号能量相等，则 $R_{SN} = R'_{SN}/R$ 。图 7 给出了不同比特符号映射方式的 $(5,2)$ MPPM 大气弱湍流信道下的误码率 (BER) 性能。不同的比特符号方式如表 1 所示，其中文献[14]和文献[15]的映射方式分别表示为 Gray mapping 和 TC mapping，本文通过 GA 搜索得到的映射方式表示为 GA mapping，需要特别说明的是第 4 节 GA 搜索中 H_{\max} 收敛于 140 时的映射方式表示为 GA1 mapping。由图可知，在大气弱湍流信道下 GA mapping 的性能明显优于其他映射方式，当 BER 为 10^{-5} 时，GA mapping 相对于 GA1 mapping，Gray mapping 和 TC mapping 分别有 0.4, 1.5, 1.4 dB 的优势，并且 H 值越大，系统性能越好；同时采用 LDPC 编码的通信系统性能均明显优于未编码的系统性能。

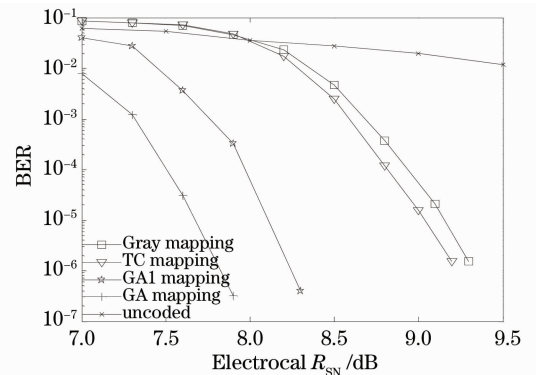


图 7 弱湍流下基于 LDPC 码 MPPM 的性能

Fig. 7 Comparison of LDPC coded $(5,2)$ MPPM with different mappings under weak turbulence channel

图 8 给出了强湍流信道下 MISO 系统中基于 LDPC 码 $(5,2)$ MPPM 不同映射方法性能，其中 $t=20$ ，并且要求发射天线间的距离 d 满足 $\theta L > d \geq \sqrt{\lambda L}$ ^[1,20]， θ 为光束的发散角， λ 是激光波长， L 是收发天线间的距离，从图中可以看出，在 2 发 1 收的

系统中,GA mapping 的性能也优于其他映射方式,在 BER 为 10^{-5} 时,GA mapping 相对于 GA1 mapping,Gray mapping 和 TC mapping 分别有 0.5,1.6,1.6 dB 的优势。同时基于 LDPC 码的 MISO 系统的性能明显优于编码的 SISO 系统,在 BER 为 10^{-5} 时,选用相同映射方式的 MISO 系统有 5 dB 的信噪比优势。

表 1 (5,2)MPPM 比特符号映射表

Table 1 Bit-symbol mappings for (5,2) MPPM

	GA mapping	GA1 mapping	Gray mapping	TC mapping
000	00110	01010	00011	01100
001	01010	10100	00110	10010
010	10010	11000	11000	10100
011	00011	10001	01100	11000
100	10100	01100	01001	00011
101	01100	00110	00101	00101
110	10001	01001	10100	01001
111	01001	00011	01010	00110
H	144	140	126	128

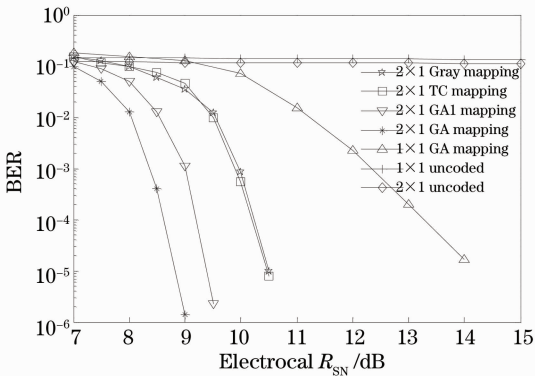


图 8 强湍流下基于 LDPC 码 MPPM 性能

Fig. 8 Comparison of LDPC coded (5,2) MPPM with different mappings under strong turbulence channel

6 结 论

MPPM 是 PPM 的改进形式,是一种高效的调制方式,MPPM 信号空间的冗余度为差错编码设计提供了可能性。在建立基于 LDPC 码和 MPPM 的无线光通信系统模型基础上,给出了相应的解码算法,研究了 $(m,2)$ MPPM 的比特符号映射方式,提出了基于 GA 的优化比特符号映射方法。仿真结果表明在湍流信道下,基于 LDPC 码和 MPPM 的无线光通信系统性能均明显优于未编码的 MPPM 系统,结合 LDPC 码和多天线发射技术可以有效提高系统对强大气湍流影响的抑制能力。相对于文献 [14,15] 的比特符号映射方法,通过 GA 优化的比特

符号映射方法在不增加系统复杂性的条件下提高了系统的纠错性能,可以获得更大的编码增益。

参 考 文 献

- 1 Ma Dongtang, Wei Jibo, Zhuang Zhaowen. Performance evaluation and channel modeling of multiple-beam propagation for atmospheric laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1020~1024
马东堂,魏急波,庄钊文. 大气激光通信中的多光束传输性能分析和信道建模[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1020~1024
- 2 Chen Dan, Ke Xizheng. Analysis on error rate of wireless optical communication using subcarrier modulation on turbo code[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2859~2863
陈丹,柯熙政. 基于 Turbo 码的无线光通信副载波误码性能分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2859~2863
- 3 Yuan Dongfeng, Zhang Haigang. The Principle and Application of Low-Density Parity-Check Codes [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2008. 1~15
袁东风,张海刚. LDPC 码理论与应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2008. 1~15
- 4 Yoshikuni Miyata, Rui Sakai, Wataru Matsumoto. Reduced-complexity decoding algorithm for LDPC codes for practical circuit implementation in optical communications [C]. OFC, 2007, OWE5
- 5 Wang Yong, Yu Lei, Cao Jianian. Performance of optical wireless communication system basing on the sub-carrier PSK intensity modulation and LDPC code [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3295~3298
王勇,于蕾,曹家年. 基于副载波相移键控强度调制和低密度奇偶校验码的光无线通信系统性能[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3295~3298
- 6 Guo Jianzhong, Tan Ying, Ai Yong. Performance analysis of LDPC coded pulse position modulation for deep-space optical communications [J]. *Technology of Optical Communication*, 2007, (12): 57~59
郭建中,谭莹,艾勇. 基于 LDPC 码和 PPM 调制的深空光通信系统性能分析[J]. *光通信技术*, 2007, (12): 57~59
- 7 Zhang Guangyi, Su Yanqin, Wang Hongxing et al.. Performance analysis for LDPC in PPM of ALC under weak turbulence[J]. *Control & Automation*, 2008, **24**(9-3): 252~253,270
张光轶,苏艳琴,王红星等. 弱湍流下基于 LDPC 码和 PPM 的性能分析[J]. *微计算机信息*, 2008, **24**(9-3): 252~253,270
- 8 Jia Kejun, Ke Xizheng, Peng Duo et al.. Design of π -rotation LDPC for atmospheric laser communication system and its performance analysis [J]. *J. Lanzhou University of Technology*, 2008, **34**(4): 109~113
贾科军,柯熙政,彭铎等. 大气激光通信系统中 π -旋转 LDPC 码的设计与性能分析[J]. *兰州理工大学学报*, 2008, **34**(4): 109~113
- 9 Chen Jiajie, Li Xiaofeng. Belief propagation decoding of low-density parity-check codes for atmospheric turbulent optical PPM communication systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 405~409
陈佳杰,李晓峰. 大气湍流光 PPM 通信系统中 LDPC 码的置信传播译码[J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 405~409
- 10 Hu Hao, Wang Hongxing, Zhou Min et al.. Modeling and analyzing of error performance for pulse position modulation and digital pulse interval modulation under turbulence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1269~1274
胡昊,王红星,周旻等. 湍流大气中脉冲位置调制和数字脉冲间隔调制差错性能建模与分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1269~1274
- 11 Pang Zhiyong, Piao Dazhi, Zou Chuanyun. Performance

- comparisons of several modulation schemes for optical wireless communication [J]. *J. Guilin Institute of Electronic Technology*, 2002, **22**(5): 1~4
- 庞志勇, 朴大志, 邹传云. 光通信中几种调制方式的性能比较[J]. 桂林电子工业学院院报, 2002, **22**(5): 1~4
- 12 Ke Xizheng, Yin Zhiyun. Coding Theory of Free Space Laser Communication Systems [M]. Beijing: Science Press, 2009. 71~79
- 柯熙政, 殷致云. 无线激光通信系统中的编码理论[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 71~79
- 13 Qin Ling, Ke Xizheng. Analysis of optical MPPM channel capacity without background noise [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(7): 107~110
- 秦岭, 柯熙政. 无背景噪声下的光 MPPM 信道容量分析[J]. 光电工程, 2007, **34**(7): 107~110
- 14 Li Tiansong, Yuan Weichao, Yi Miao *et al.*. Time jitter effects on bit error probability in multi-pulse position modulation satellite optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 26~30
- 李天松, 袁伟超, 易森等. 多脉冲位置调制卫星光通信中时钟抖动对比特错误概率影响[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 26~30
- 15 Hyuncheol Park, John R. Barry. Trellis-coded multiple-pulse-position modulation for wireless infrared communications [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2004, **52**(4): 643~651
- 16 Qin Ling, Ke Xizheng. A study of mapping scheme for dual-pulse MPPM[J]. *J. Xi'an University of Technology*, 2007, **23**(3): 269~272
- 秦岭, 柯熙政. 一种二脉冲的 MPPM 编码映射方法研究[J]. 西安理工大学学报, 2007, **23**(3): 269~272
- 17 Jaime A. Anguita, Mark A. Neifeld, Bane V. Vasic. Multi-beam space-time coded systems for optical atmospheric channels [C]. *SPIE*, 2006, **6304**: 63041B
- 18 Theodoros A. Tsiftsis, Harilaos G. Sandalidis, George K. Karagiannidis *et al.*. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2009, **8**(2): 951~957
- 19 Wu Bin, Wu Jian, Tu Xuyan. Research of fast genetic algorithm [J]. *J. University of Electronic Science and Technology*, 1999, **28**(1): 49~53
- 吴斌, 吴坚, 涂序彦. 快速遗传算法研究[J]. 电子科技大学学报, 1999, **28**(1): 49~53
- 20 Wang Huiqin, Ke Xizheng. Free space optical communication based on vertical Bell labs layered space-time [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 874~878
- 王惠琴, 柯熙政. 基于垂直分层空时编码的自由空间光通信[J]. 中国激光, 2008, **35**(6): 874~878

栏目编辑: 谢婧