

文章编号: 1001-3806(2009)06-0604-03

## LDPC 码在水下激光通信中的研究

孙丽华, 陈名松\*, 李天松, 易 淼

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 桂林 541004)

**摘要:** 为了研究低密度奇偶校验码在水下激光通信系统中的性能, 采用软判决迭代译码算法对系统误比特率进行了仿真, 并对水下激光通信的信道模型和低密度奇偶校验码的编译码方式进行了探讨。在一定码长和调制阶数条件下, 当信号光子数  $n_s$  增大时, 可以使误比特率降到  $10^{-5}$  以下。结果表明, 通过利用光电检测输出的软信息进行低密度奇偶校验软判决译码可以明显地降低系统误比特率。

**关键词:** 光通信; 水下激光通信; 低密度奇偶校验码; 脉冲编码调制; 软判决译码

**中图分类号:** TN929.3      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.013

### Study about LDPC codes applied in underwater laser communication

SUN Li-hua, CHEN Ming-song, LI Tian-song, YI Miao

(Information and Communication Institute, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to study the performance of low density parity check (LDPC) codes applied in an underwater laser communication system, its bit error rate was simulated by means of soft-decision decoding algorithm. A model of underwater laser communication channel was introduced, and then the encoding and decoding algorithm of LDPC codes was studied. For a certain code length and modulation order, the bit error rate can be reduced to  $10^{-5}$  with the signal photon number  $n_s$  increase. The simulation results show that the bit error rate of the system can be improved obviously by means of LDPC soft-decision decoding based on the output soft information of the photo detector.

**Key words:** optical communication; underwater laser communication; low density parity check codes; pulse position modulation; soft-decision decoding

### 引 言

在水下激光通信中, 由于水分子和悬浮微粒对激光产生散射和吸收, 信号在传输的过程中会发生很大的衰减<sup>[1-2]</sup>, 使到达接收机的信号很弱。同时, 由于水下系统的体积和载重等限制, 不可能提供大能量的信号。因此, 数据传输的可靠性必须通过强有力的差错控制编码技术才能获得较好的通信效果。低密度奇偶校验(low density parity check, LDPC)码是一种具有稀疏校验矩阵的线性纠错码, 在高斯白噪声信道下性能接近香农限<sup>[3]</sup>, 译码简单且复杂度低于 Turbo 码。由于其良好的性能、近线性时间复杂度的编码算法、可并行实现的译码算法以及广阔的应用前景, LDPC 码已经成为信道编码领域的研究热点之一。脉冲编码调制

(pulse position modulation, PPM) 利用光脉冲的相对位置来传递信息, 是一种能取得较好平均功率效率的调制技术, 可用很小的光平均功率达到很高的数据传输率。PPM 具有能量传输效率高、抗干扰能力强等优点, 是大气激光通信中的一项关键技术。利用 PPM 可以减少激光器的发射功率, 增加通信距离。因此, 把 PPM 调制和 LDPC 编码结合起来将能极大地提高系统性能。

### 1 水下信道模型分析

在激光水下通信系统中, 由于衰减、噪声和干扰等因素的影响, 信号在传输过程中产生严重畸变<sup>[4-5]</sup>。光在海水中的衰减来自两种不同的过程: 吸收和散射。海水中不仅含有水分子和无机溶解质, 还包含大量的悬浮体和各种有机物, 这些物质在可见光范围对光的吸收远大于水分子。海水的吸收系数随海水的深度增加而减少。海水的散射包括水本身的瑞利散射和海水中悬浮粒子引起的米氏散射及透明物质折射所引起的散射<sup>[6]</sup>, 海水散射对光能量产生衰减。计算海水对激光的衰减时, 总的衰减系数为吸收系数和散射系数之

基金项目: 广西省科学基金资助项目(0832012); 广西省研究生创新基金资助项目(2008105950810M414)

作者简介: 孙丽华(1983-), 女, 硕士研究生, 现主要从事激光通信中的编解码研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: cms@guet.edu.cn

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-10-28

和,其值取决于水质,  $k = k_a + k_d$ , 散射系数  $k_d = k_{d,R} + k_{d,M}$ , 其中  $k_{d,R}$  为瑞利散射系数,  $k_{d,M}$  为米氏散射系数。所以,海水衰减率可转化为:

$$T_w = \exp[-(k_a + k_{d,R} + K_{d,M}) \cdot D] \quad (1)$$

式中,  $D$  为传输距离。经过海水信道的多次散射后,接收到的信号产生脉冲展宽,此外,信号还受到加性噪声和背景光的干扰。根据以上分析得到 PPM 水下信道模型如图 1 所示。

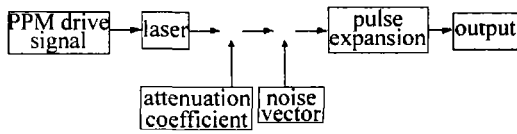


Fig. 1 The model of underwater channel based on PPM

## 2 LDPC 编译码原理<sup>[7-9]</sup>

LDPC 码是一种基于图和迭代译码的信道编码方法,它优异的纠错性能来源于校验矩阵的稀疏性。校验矩阵  $H$  的构造采用随机构造法<sup>[7]</sup>。

### 2.1 编码方法

编码采用具有系统形式的  $H$  矩阵的快速编码方法。已知一个码字  $U$ , 奇偶校验矩阵  $H$  为  $M \times N$ 。编码前的信息源为  $S$ 。假设编码后  $S$  位于  $U$  的后部,校验位  $C$  位于  $U$  的开头,即  $U = [C|S]$ 。分解校验矩阵  $H$  使之具有形式:  $H = [A|B]$ , 其中  $A$  是 1 个  $M \times N$  的矩阵,  $B$  是 1 个  $M \times (N - M)$  的矩阵。因此有:

$$U \times H^T = 0 \rightarrow AC + BS = 0 \quad (2)$$

由此可以推出  $C = A^{-1}BS$ , 因此只要  $A$  为可逆矩阵,就可以由此得到校验位。

### 2.2 最小和积译码算法

和积译码算法是基于置信传播的迭代概率译码算法,是逐符号软判决译码方法。设  $H = (h_{ij})_{M \times N}$ , 码字  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$  表示为一组信息节点,  $r$  为接收序列,  $Z = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_M\}$  表示为一组校验节点, 其中第  $j$  位是 1 的概率用  $p_j^1$  表示。令集合  $M(j) = \{i: h_{ij} = 1\}$  表示变量  $x_j$  参加的校验集,  $M(j) \setminus i$  表示  $M(j)$  不包含  $i$  的子集,  $N(i) = \{j: h_{ij} = 1\}$  表示校验  $z_i$  约束的局部码元信息集,  $N(i) \setminus j$  表示  $N(i)$  不包含  $j$  的子集。  $R_{i,j}^a$  ( $a$  为 0 或 1) 为校验信息,  $Q_{j,i}^a$  为信息消息。最小和积译码算法的步骤为:

(1) 初始化

$$Q_{j,i}^1(0) = p(x_j = 1 | r_j), Q_{j,i}^0(0) = p(x_j = 0 | r_j),$$

$$L(q_{ij}) = L(c_i) = \ln \frac{Q_{j,i}^0}{Q_{j,i}^1} \quad (3)$$

(2) 更新校验节点

$$R_{i,j}^0 = \frac{1}{2} [1 + \prod_{j \in N(i) \setminus j} (1 - 2Q_{j,i}^1)], R_{i,j}^1 = 1 - R_{i,j}^0,$$

$$L(r_{ij}) = \ln \frac{R_{i,j}^0}{R_{i,j}^1} = 2 \tanh^{-1} \left[ \prod_{k \in N(i) \setminus j} \tanh(L(q_{ik})/2) \right] =$$

$$\prod_{k \in N(i) \setminus j} \alpha_{i,k} f \left\{ \sum_{k \in N(i) \setminus j} f[\beta_{i,k}] \right\} \approx \prod_{k \in N(i) \setminus j} \alpha_{i,k} \min_{k \in N(i) \setminus j} \beta_{i,k} \quad (4)$$

式中,  $f(x) = -\ln[\tanh(x/2)] = \ln \frac{e^x + 1}{e^x - 1}$ ,  $\alpha_{ij} = \text{sign}[L(q_{ij})]$ ,  $\beta_{ij} = \|L(q_{ij})\|$ 。

(3) 更新变量节点

$$Q_{j,i}^0 = (1 - p_j) \prod_{k \in M(j) \setminus i} R_{k,j}^0, Q_{j,i}^1 = p_j \prod_{k \in M(j) \setminus i} R_{k,j}^1,$$

$$L(q_{ij}) = \ln \frac{Q_{j,i}^0}{Q_{j,i}^1} = L(c_i) + \sum_{k \in M(j) \setminus i} L(r_{kj}) \quad (5)$$

(4) 计算  $L(q_i)$

$$L(q_i) = L(c_i) + \sum_{k \in M(j)} L(r_{kj}) \quad (6)$$

(5) 判决

$$\tilde{c}_i = \begin{cases} 1, & (L(q_i) < 0) \\ 0, & (\text{其它}) \end{cases} \quad (7)$$

如果  $\tilde{c}H^T = 0$ , 则码字  $c = \tilde{c}$ , 否则返回步骤(2)继续迭代运算, 达到最大迭代次数停止译码, 令  $c = \tilde{c}$ , 输出码字。

## 3 LDPC 与 PPM 结合编译码原理

由于 PPM 的高能量效率、高灵敏度和功率利用率而被广泛应用于激光通信中。单脉冲位置调制是将 1 个二进制的  $n$  位数据组映射为由  $M = 2^n$  个时隙组成的时间段上的某一个时隙处的单个脉冲信号。LDPC 码的码长  $N$  应为  $n$  的整数倍。调制时, 将已经编码的  $N$  比特分成  $N/n$  组, 再把每组的  $n$  比特映射到  $M$  个时隙中的一个脉冲上, 然后发送出去。为了充分利用雪崩光电检测器的光电检测输出软信息, 不对 PPM 调制信号的脉冲出现位置作先期判决<sup>[10]</sup>。设 LDPC 码编码输出为  $X = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}\}$ , 对  $X$  进行 PPM 调制,  $Y = \{y_0, y_1, y_2, \dots, y_{M-1}\}$  是接收端软计数输出。由统计独立的假设, 第  $l$  个比特  $c$  仅取决于由它调制的 PPM 时隙的软输出。设  $p(c|I) = p(\text{码字为 } c | \text{给定 PPM 软信息})$ , 则有:

$$p(c|I) = p(\text{第 } l \text{ 个比特是 } c | Y) =$$

$$\sum_{\substack{X = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}\} \\ x_l = c}} p(X|Y) \quad (8)$$

式中,  $p_s(\cdot)$  和  $p_n(\cdot)$  分别为有光信号时隙和无光信号时隙的软输出概率。若将 PPM 帧的第  $l$  个时隙的似然函数记为  $L_l = p_s(y_l)/p_n(y_l)$ , 若光电子计数模型服从泊松分布假设平均信号光子数为  $n_s$ , 背景光子数为  $n_b$ , 可以得到:

$$L_i = \frac{p_s(y_i)}{p_n(y_i)} = \frac{\frac{(n_s + n_b)^{y_i}}{y_i!} \cdot e^{-(n_s + n_b)}}{\frac{(n_b)^{y_i}}{y_i!} \cdot e^{-n_b}} = \left(1 + \frac{n_s}{n_b}\right)^{y_i} \cdot e^{-n_s} \quad (9)$$

定义信道初始化信息<sup>[8]</sup>:

$$L(c_i) = \ln \frac{p(0|I)}{p(1|I)} = \ln \left( \sum_{x_j=0}^{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}} L_i \right) - \ln \left( \sum_{x_j=1}^{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}} L_i \right) \quad (10)$$

#### 4 仿真结果及分析

取码率为1/2,码长 $N=4000$ ,译码迭代次数为10次,对LDPC码在水下激光通信系统中的性能进行了仿真分析。仿真中随机产生信源序列,进行LDPC编码,编码序列每8个比特为单元进行256进制的PPM调制。在接收端对每帧PPM调制进行迭代译码,误比特总数为每PPM帧对应信息分组误比特数的累加和。PPM调制的误比特率(bit error rate, BER)计算可见参考文献[10]。图2、图3所示为当平均信号光子数 $n_s$

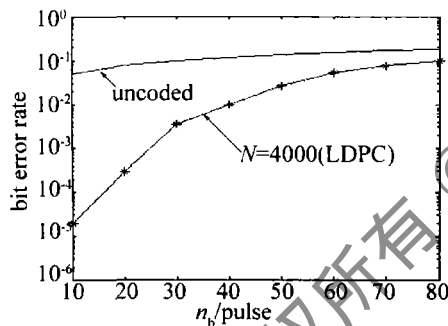


Fig. 2 Simulation curve of the system performance,  $n_s = 20$

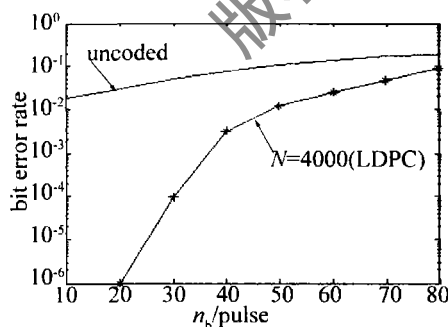


Fig. 3 Simulation curve of the system performance,  $n_s = 40$

分别为20和40时,未编码的PPM调制系统的误比特率和进行了LDPC编码后的系统的误比特率曲线图。可以看出,当背景光子数 $n_b$ 增大时,达到相同的误比特率需要更多的信号光子数。

#### 5 结论

在水下激光通信系统中,通过利用光电检测输出的软信息进行LDPC软判决译码可以降低系统误比特率。这样可以在给定误比特率条件下,大大降低需要发送的信号能量。在激光通信系统中,有效地降低发射激光能量,可以延长系统的使用寿命。在能量受限的信道中依然能够保持可靠的通信能力。

#### 参考文献

- [1] WANG M, LIU W H. Study on optical characteristics of seawater in blue-green laser uplink propagation model [J]. Journal of East China Shipbuilding Institute, 2005, 19(1): 59-62 (in Chinese).
- [2] KAN Q, RONG J, ZHONG X Ch. The application of turbo-code in underwater laser communication [J]. Laser and Opto-electronics Progress, 2005(11): 51-53 (in Chinese).
- [3] MACKAY D J C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45(2): 399-431.
- [4] YANG K T, WANG X B. Blue-green lidar ocean survey [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 41-48 (in Chinese).
- [5] WEN T, WEI J B, MA D T. Analysis of effect of multiple scattering on laser communication in light haze weather [J]. Laser Technology, 2007, 31(5): 500-502 (in Chinese).
- [6] RICHARDSON T J, URBANKE R L. Efficient encoding of low-density parity-check codes [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2001, 47(2): 638-656.
- [7] WEN H, FU Ch Sh, ZHOU L. The application and principle of LDPC code [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2006: 48-63 (in Chinese).
- [8] MACKAY D J C, NEAL R M. Near shannon limit performances of low density parity check codes [J]. Electron Lett, 1996, 32(8): 1645-1646.
- [9] HU H F, ZHANG J X. The analysis of performance of LDPC codes applied in the space optical communication based on PPM [J]. Space Electronic Technology, 2006, 3(3): 20-25 (in Chinese).
- [10] SRINIVASAN M, VILNROTTER V. Symbol-error probabilities for pulse position modulation signaling with an avalanche photodiode receiver and gaussian thermal noise [EB/OL]. Telecommunications and Mission Operations [2008-08-06]. [http://tmo.jpl.nasa.gov/pov/progress\\_report/42-134/134E.pdf](http://tmo.jpl.nasa.gov/pov/progress_report/42-134/134E.pdf).