

doi: 10. 3788/gzxb20124103. 0277

基于 MMSE 的大气激光通信中 LDPC 码 BP 译码算法研究

冷蛟锋, 郝士琦, 吕旭光, 周建国, 赵楠翔

(1 脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 合肥 230037)

(2 安徽电子制约技术重点实验室, 合肥 230037)

摘 要:针对大气激光通信中低密度奇偶校验码(LDPC)置信传播(BP)译码算法复杂度高的问题,对几类 BP-Based 简化译码算法进行了分析,并基于最小均方误差准则(MMSE)对 Scaled BP-Based 和 Offset BP-Based 两类改进译码算法的优化设计进行了探讨,得出两类算法的最优校正因子,并给出了数值计算.在不同的湍流强度下,对码长 1008 的(6,3)比特填充 LDPC 码进行了仿真实验,结果表明,对于短码长的 LDPC 码,当译码 BER = 10^{-5} 时,最小和算法(UMP BP-Based)相对于 BP 算法有 0.1~0.15 dB 的译码性能损失;基于 MMSE 设计的两类算法相比 BP 算法大大降低复杂度的同时,译码性能与 BP 算法相当,甚至优于 BP 算法,优于 UMP BP-Based 算法 0.075~0.15 dB.

关键词:大气激光通信;低密度奇偶校验码;最小均方误差准则;改进的置信度传播算法

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)03-0277-6

0 引言

大气激光通信是以激光束作为信息载体,在大气中进行信息双向传输的一种宽带通信技术^[1],它结合了光纤通信与无线通信的优点,信息容量大、发射光束窄、抗电磁干扰能力强、不占用频率资源,具有广泛的应用前景.但由于大气湍流、自然光背景噪声等影响,造成传输误码率的增大,严重影响了整个系统的性能^[2].考虑到大气激光通信是功率受限系统,以及发射功率对人眼安全的保证,高性能的信道编码技术应用到大气激光通信中逐步得到重视^[3-5].

低密度奇偶校验(Low-Density Parity-Check, LDPC)码是一种基于稀疏校验矩阵的线性分组码,具有可进行完全并行操作、吞吐量大、高速译码潜力、实用灵活、较低的错误平底等优点^[6],目前已用于广播电视标准 DVB-S2、CMMB 中,并被 IEEE802.11n 和 IEEE802.16e 选作系统前向差错控制方案.LDPC 码译码算法中性能较好的是置信传播(Belief Propagation, BP)译码算法,其本质上是并行算法,有利于硬件的实现,在无环状态下,BP 算法等价于最大似然译码算法.但是 LDPC 的 BP 译码复杂度较高,影响它在实际通信系统中的应用,

大气激光通信的通信速率通常在 10Mbit/s 到几个 Gbit/s 的范围内,进一步提高了对 LDPC 码译码运算速度的要求.为了降低译码复杂度,Fossorier 等提出了 LDPC 码的最小和算法,也称为 UMP (Uniformly Most Powerful) BP-Based 算法^[7],该算法只需要实数加运算,而且不依赖于信道的任何状态信息.UMP BP-Based 算法在降低 BP 译码复杂度的同时,也带来了译码性能上的损失.因此,又提出了两类改进译码算法^[8-9],称为 Scaled BP-Based 与 Offset BP-Based 算法,这两种算法的性能与尺度因子(ϵ)和偏移因子(β)的取值直接相关, ϵ 和 β 取值不合适,LDPC 码的译码性能会很差.针对以上问题,本文在弱湍流大气信道模型下,针对大气激光通信中采用二进制对称的调制方式的情况,对几类 BP-Based 简化译码算法进行分析,并利用最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)准则^[10]对 Scaled BP-Based 和 Offset BP-Based 两类改进译码算法优化设计进行探讨,并对不同湍流强度的信道条件进行实验仿真.

1 信道建模

大气激光通信在光信号传输和光电探测过程

基金项目:国家自然科学基金(No. 60902017)、安徽省自然科学基金(No. 10040606Q60、No. 10040606Q61)资助

第一作者:冷蛟锋(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为 LDPC 码在无线光通信中的应用研究. Email: lengjiaofeng@Yahoo. cn

导师(通讯作者):郝士琦(1963-),女,教授,主要研究方向为卫星通信、大气激光通信等方面. Email: liu_hsq@126. com

收稿日期: 2011-07-20; **修回日期:** 2011-12-15

中,会受到大气湍流、大气吸收散射、背景光噪音、探测器性能及电路热噪音等的影响.综合考虑系统复杂性和可靠性,大气中的无线光通信系统一般采用强度调制/直接检测方式(Intensity Modulation/Direct Detect, IM/DD)^[11],则 t 时刻光电探测器的检测输出电平可以表示为

$$r(t) = \alpha(t)\rho P_0 + n(t) \quad (1)$$

P_0 为无湍流状态下的接收功率, $\rho = \eta e g \lambda / hc$ 为接收机光电转换效率, η 为探测器量子效率, e 为量子电荷, g 为光电探测器增益, λ 为工作波长, h 为布朗克常量, c 是光速. $n(t)$ 是零均值、方差为 σ^2 的高斯噪音. $\alpha(t)$ 是大气湍流引起的乘性噪音,在弱湍流情况下,随机起伏被认为服从对数正态分布^[12-13], $\alpha(t)$ 概率密度为

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

式中 $\sigma_{\ln\alpha}^2$ 为对数强度方差.

2 BP 和几类 BP-Based 译码算法

LDPC 码的校验矩阵 H 可以用 Tanner 图表示, 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 . 对于二进制码,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方法,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, BP 译码算法的具体步骤如下:

1) 初始化计算经过信道后接收到的初始对数似然比为

$$\lambda_n^{(0)} = \log \frac{p(x_i=0|y_i)}{p(x_i=1|y_i)} \quad (3)$$

2) 校验节点更新. 对每个校验节点 m 和 $n \in N(m)$, 计算

$$R_{mm}^{(k)} = \left(\prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sign}(Q_{mm'}^{(k-1)}) \right) \times \Phi^{-1} \left(\sum_{n' \in N(m) \setminus n} \Phi(|Q_{mm'}^{(k-1)}|) \right) \quad (4)$$

式中 $\text{sign}(x)$ 是符号函数, $\Phi(x)$ 定义为

$$\Phi(x) = \Phi^{-1}(x) = \log \frac{e^x + 1}{e^x - 1}$$

3) 变量节点更新. 对每个变量节点 n 和 $m \in M(n)$, 计算

$$Q_{mm}^{(k)} = \lambda_n^{(0)} + \sum_{m' \in M(n) \setminus m} R_{m'n}^{(k)} \quad (5)$$

对于每个变量节点,计算伪后验对数似然比为

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

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, 并将作为 $\hat{y}(k)$ 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.

几类 BP-Based 算法与 BP 算法的区别在于校验节点对其输入消息的处理方式不同. UMP BP-Based 译码算法主要对式(4)作如下简化

$$R_{mm_1}^{(k)} = \left(\prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sign}(Q_{mm'}^{(k-1)}) \right) \min_{n' \in N(m) \setminus n} |Q_{mm'}^{(k-1)}| \quad (7)$$

显然 UMP BP-Based 算法在译码过程中只用到加法和比较运算, 特别适合硬件实现, 但同时, 其译码性能有所降低, 一般情况下, 给定码长的码, 行重与列重越大, 性能下降越严重; 给定行重和列重, 码长越长, 性能下降越严重^[5]. 在 Scaled BP-Based 算法中, 校验节点的输出消息由下式取代

$$R_{mm_2}^{(k)} = \epsilon R_{mm_1}^{(k)} \quad (8)$$

而在 Offset BP-Based 算法中, 则有

$$R_{mm_3}^{(k)} = \text{sign}(R_{mm_1}^{(k)}) \max\{|R_{mm_1}^{(k)}| - \beta, 0\} \quad (9)$$

式中, 乘性因子 ϵ ($0 < \epsilon \leq 1$) 称为尺度因子(scale factor), 加性因子 β ($\beta \geq 0$) 称为偏移因子(offset factor). 最优的 ϵ 与 β 值是信噪比(SNR)的函数且与迭代次数有关, 但考虑工程实用性, 与文献[8]和文献[9]的方法类似, 对于所有的迭代及 SNR 值, ϵ 与 β 均设定为某一定值.

3 基于 MMSE 的参量优化

3.1 MMSE 准则下参量确定

由于几类 BP-Based 算法在对校验节点的 LLR 信息的处理过程中引入了近似, 因而与 BP 算法相比这些近似方法可能会带来译码性能上的损失. 对于 LDPC 码, 由于第一次迭代时校验节点输出的信息不仅影响第二次迭代的准确性, 而且对这个译码过程的错误概率有很大的影响^[7], 特别是对于短码长的 LDPC 码, 第一次迭代的外信息近似会严重影响整个迭代过程的译码性能^[8], 因此本文只考虑第一次迭代的最优尺度因子和偏移因子, 以后各次迭代仍沿用第一次迭代的最优尺度因子和偏移因子. 为表述方便, 当进行第一次迭代时, 在不指定某个节点的情况下, 记 BP 和几类 BP-Based 译码算法的变量节点输出消息为 v ; BP 算法的校验节点输出消息为 u , UMP BP-Based, Scaled BP-Based 和 Offset BP-Based 算法的校验节点输出消息分别为: u_1 , u_2 和 u_3 . 第一次迭代译码时, 由于校验节点输入给变量节点的外信息为 0, 由式(3)可得此时变量节点的输

出消息为 $v = \lambda^0$, 对于 Scaled BP-Based 算法, 在 MMSE 准则下, ϵ 的取值应使均方误差 $E[(|u| - |u_2|)^2] = E[(|u| - \epsilon|u_1|)^2]$ 最小, 则 ϵ 的取值为

$$\epsilon = \frac{E[|u| \cdot |u_1|]}{E[|u_1|^2]} \quad (10)$$

同理可得 Offset BP-Based 算法, 在 MMSE 准则下, β 的取值应使均方误差 $E[(|u| - |u_3|)^2] = E[(|u| - \max\{|u_1| - \beta, 0\})^2]$ 最小, 此时 β 的近似取值为^[14]

$$\beta \approx E[|u_1|] - E[|u|] \quad (11)$$

3.2 大气激光通信信道下 ϵ 与 β 值的计算

文献[15]和前期的研究工作表明大气激光通信中基于副载波二进制相移键控强度调制(BPSK-SIM)和二进制脉冲位置调制(BPPM)与 LDPC 码结合具有优越的纠错能力, 并在未知信道信息(NCSI)情况下相对于已知完美信道信息(CSI)情况下的系统性能损失并不大, 因此考虑 NCSI 的情况. 在比特充分交织的信道, 此时信道的初始 LLR 值可近似表示为 $\lambda^0 = 2y \cdot E[\alpha]/\sigma^2$, 其中映射关系为 $\{0 \rightarrow +1, 1 \rightarrow -1\}$, y 是信道输出值. 由于基于 BPSK-SIM 和 BPPM 调制的大气激光通信信道在理想交织情况下具有二进制对称性的特点, 且对称信道下线性码的误比特率(BER)与发送码字无关, 不失一般性, 假定发送为全零码字, 此时, λ^0 关于衰落因子的 α 的条件概率密度函数为

$$f(z|\alpha) = \frac{\sigma}{2E[\alpha]\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\left(z - \frac{2\alpha E[\alpha]}{\sigma^2}\right)^2}{\frac{8(E[\alpha])^2}{\sigma^2}}\right] \quad (12)$$

则 λ^0 的概率密度函数可得

$$f(z) = \int_0^{\infty} f(z|\alpha)p(\alpha)d\alpha \quad (13)$$

进而 $|\lambda^0|$ 的概率分布函数为

$$G(z) = \int_{-z}^{\infty} f(z')dz' (z \geq 0) \quad (14)$$

$|\lambda^0|$ 相应的概率密度函数为

$$g(z) = f(z) + f(-z) \quad (15)$$

由于 $v^{(j)}$ ($j = 1, 2, \dots, d_c - 1$) 均来自信道的 LLR 值, 其密度函数与 λ^0 相同, 其中 d_c 是校验节点的度, $|u_1| = \min v^{(j)}$ ($j = 1, 2, \dots, d_c - 1$), 则 $|u_1|$ 的概率密度函数为

$$h(z) = (d_c - 1)g(z)(1 - G(z))^{d_c - 2} (z \geq 0) \quad (16)$$

那么均值 $E[|u_1|]$ 和 $E[|u_1|^2]$ 可以采用下式计算

$$E[|u_1|^k] = \int_0^{\infty} z^k h(z) dz, (k=1, 2) \quad (17)$$

对于 $E[|u|]$ 和 $E[|u| \cdot |u_1|]$, 不宜采用闭

式计算, 可以用蒙特卡洛仿真的方法实现.

3.3 数值计算

利用式(10)、(11)和(17)计算得到了规则(6,3)码的不同 SNR 和 σ_{in}^2 的尺度因子和偏移因子, 如图 1 和图 2 所示, 从图中可以看出(6,3)码的 MMSE 尺度因子和 MMSE 偏移因子随湍流强度变化不大, 对于相同的 SNR 值, $\sigma_{in}^2 = 0.25$ 与 $\sigma_{in}^2 = 0.1$ 的尺度因子 ϵ 和偏移因子 β 差值分别在 0.005 和 0.01 左右; 另外在相同的 SNR 情况下, 湍流强度越大, MMSE 偏移因子 β 越小. 文献[7]引入 SNR 临界区(critical range)的定义, 指出对于高于或低于该区域的 SNR 值, Scaled BP-Based 算法的译码性能对于 ϵ 值变化不甚敏感, 选取该区域内某一 SNR 对应的 ϵ 值作为 Scaled BP-Based 算法的尺度因子. 本文研究发现对于不同湍流强度的情况, 相同码长的临界区的选取是基本相同的, 对于码长为 1 000 左右的随机去四环 LDPC 码, 尺度因子对应的临界区域为 8~9.5 dB; 而偏移因子对应的临界区域为 9~10.5 dB. 本文选取的尺度因子和偏移因子如表 1 所示, 并且在不同的湍流强度条件下仍然沿用表 1 中的参量.

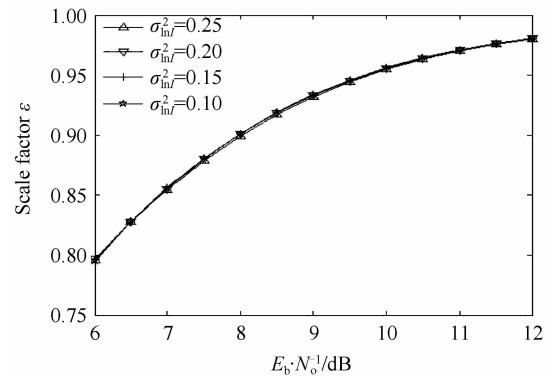


图 1 (6,3)LDPC 码在不同湍流强度下不同 SNR 值的 MMSE 尺度因子

Fig. 1 MMSE scale factor of (6,3)LDPC with different SNR and turbulence

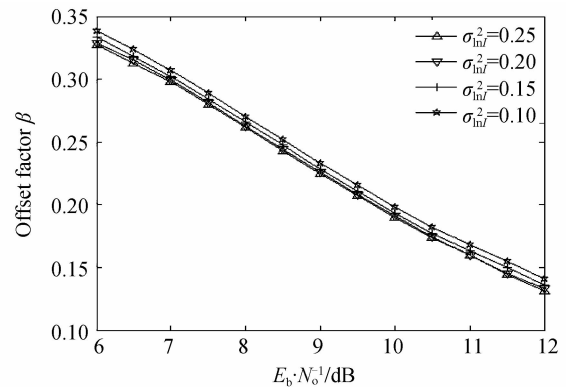


图 2 (6,3)LDPC 码在不同湍流强度下不同 SNR 值的 MMSE 偏移因子

Fig. 2 MMSE offset factor of (6,3)LDPC with different SNR and turbulence

表 1 MMSE 准则获得的尺度和偏移因子

Parameter name	Selected SNR dB	Parameter value
MMSE scale factor	8.7	0.92
MMSE offset factor	10.2	0.18

4 仿真实验

为表述方便,将基于 MMSE 准则设计的改进算法,简称为 MMSE 算法. 本文在大气激光通信信道下,对码长为 1008 的 (6,3) 规则 LDPC 码几类 BP-Based 算法的 BER 和 FER 性能进行了实验仿真,如图 3 和图 4 所示,LDPC 码是用比特填充法随机产生的. 为便于比较,在这些图中亦加入了 BP 算法的仿真性能. 对于所有的仿真,最大迭代译码次数均设定为 100 次;从图中可以看出当译码 BER = 10⁻⁵ 时,BP 算法相对于 UMP BP-Based 算法有 0.1~0.15 dB 的性能优势;同时在几乎不增加译码复杂度的情况下,MMSE Scaled 算法性能优于 UMP BP-Based 算法 0.1~0.15 dB,甚至优于 BP 算法;MMSE Offset 算法优于 UMP BP-Based 算法 0.075~0.1 dB;同时仿真发现在 $\sigma_{inl}^2 = 0.05$ 时,选取 $\epsilon = 0.92$ 和 $\beta = 0.18$,当译码 BER = 10⁻⁵ 时,

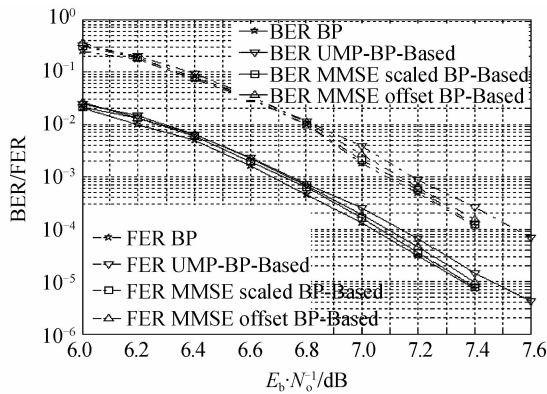


图 3 $\sigma_{inl}^2 = 0.25$ (6,3) 比特填充码几类译码算法比较
Fig. 3 Comparison of different decoding algorithm with bit-filling LDPC at $\sigma_{inl}^2 = 0.25$

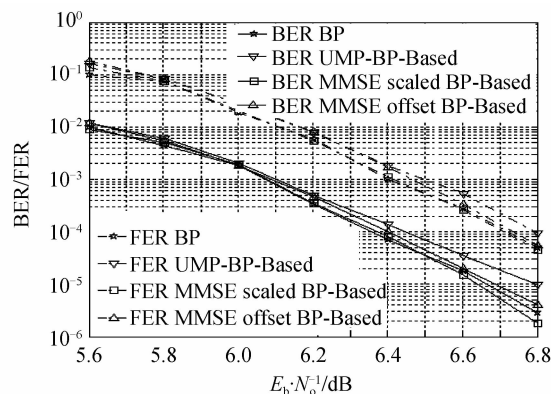


图 4 $\sigma_{inl}^2 = 0.15$ (6,3) 比特填充码几类译码算法比较
Fig. 4 Comparison of different decoding algorithm with bit-filling LDPC at $\sigma_{inl}^2 = 0.15$

MMSE Scaled/Offset BP-Based 算法亦优于 UMP BP-Based 算法,这表明 $\epsilon = 0.92$ 和 $\beta = 0.18$ 在整个弱湍流区域都能获得较好译码性能.

表 2 给出了校验矩阵是 $M \times N$ 阶 (d_v, d_c) 规则 LDPC 码的几类 BP-Based 译码算法的每次迭代运算计算量比较^[14],其中表中的 1,2,3,4 分别表示 BP,UMP-BP-Based,Scaled BP-Based 和 Offset BP-Based 算法,其中由于一次比较运算与一次实数加运算量相当,所以比较运算按加法运算进行统计.由表可知,几类 BP-Based 译码算法每次迭代运算的复杂度明显低于标准的 BP 算法;scaled/offset BP-Based 算法相对于 UMP BP-Based,每个校验节点只需要再分别多进行 2 次实数乘和 2 次实数加即可.

表 2 译码算法每次迭代运算计算量比较

Table 2 Decoding complexity for one iteration

	Additions	Multiplications	Table look-ups
1	$N(2d_v - 1) + 5M(3d_c - 6)$	0	$2M(3d_c - 6)$
2	$N(3d_v - 1) + M[\lceil lbd_c \rceil] - 2$	0	0
3	$N(3d_v - 1) + M[\lceil lbd_c \rceil] - 2$	$2M$	0
4	$N(3d_v - 1) + M[\lceil lbd_c \rceil]$	0	0

表 3 和表 4 给出了两次仿真实验的不同译码算法的迭代次数比较,从表中可以看出基于 MMSE 准则的 Scaled BP-Based 和 Offset BP-Based 算法的迭代次数略高于 BP 算法,并且随着信噪比的增加几种译码算法的迭代次数趋于一致. 迭代次数与每次迭代运算计算量的乘积就是一次译码总的复杂度. 由于 BP 算法的单次迭代的复杂度远高于几类 BP-Based 算法的复杂度,在本文仿真实验中 BP 单次迭代的加法运算次数为 35 280,查表为 12 096 而 Scaled BP-Based 的加法运算次数为 8 568,乘法为 1 008,offset BP-Based 与 Scaled BP-Based 复杂度相当,而迭代次数方面基于 MMSE 准则的两类 BP-Based 算法与 BP 算法差距不大,在高信噪比区域,

表 3 $\sigma_{inl}^2 = 0.25$ 不同译码算法的迭代次数Table 3 Number of iteration of decoding algorithm at $\sigma_{inl}^2 = 0.25$

$E_b \cdot N_0^{-1} / \text{dB}$	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4
BP	14.5	11.12	9.03	7.73	6.9
UMP-BP-Based	16.3	12.3	9.6	8.08	7.15
Scaled BP-Based	15.23	11.71	9.37	8.00	7.1
Offset BP-Based	15.84	11.82	9.45	8.03	7.12

表 4 $\sigma_{inl}^2 = 0.15$ 不同译码算法的迭代次数Table 4 Number of iteration of decoding algorithm at $\sigma_{inl}^2 = 0.15$

$E_b \cdot N_0^{-1} / \text{dB}$	6	6.2	6.4	6.6	6.8
BP	14.84	10.69	8.64	7.39	6.53
UMP-BP-Based	14.85	10.86	8.77	7.50	6.61
Scaled BP-Based	14.84	10.81	8.77	7.51	6.63
Offset BP-Based	14.92	10.87	8.78	7.52	6.67

迭代次数差小于 0.5 次,所以总的译码复杂度也明显小于 BP 算法。

5 结论

针对 LDPC 码 BP 译码算法复杂度高的问题,本文对几类 BP-Based 简化译码算法进行了分析,并基于 MMSE 准则对短码长 LDPC 码的 Scaled BP-Based 和 Offset BP-Based 译码算法优化设计进行了探讨。码长为 1008 的 (6,3) 规则码的仿真实验显示,在大气光通信信道中,当译码 BER = 10^{-5} 时,UMP BP-Based 相对于 BP 算法有 0.1~0.15 dB 的译码性能损失;基于 MMSE 设计的两类算法相比 BP 算法大大降低复杂度的同时,译码性能与 BP 算法相当,甚至优于 BP 算法,优于 UMP BP-Based 算法 0.075~0.15 dB。

需要注意的是:在长码长的情况下,最小和算法将会比 BP 算法带来更大的译码性能损失,而此时 LDPC 码的 Scaled BP-Based 和 Offset BP-Based 译码算法的最佳校正因子不易求出,找出一种通用性强,并且能在译码性能和实现复杂度较好折中的译码算法是亟待解决的问题。

参考文献

- [1] ARNON S, KEDAR D. Urban optical wireless communication networks: the main challenges and possible solutions [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, **42**(2): 2-7.
- [2] MA Dong-tang, WE Ji-bo, ZHUANG Zhao-wen. 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.
- [3] CHEN Jia-jie, LI Xiao-fen. 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.
- [4] WANG Yong, YU Lei, ZHANG Ya-bin, et al. Influence of fog on atmospheric laser communication system and the relevant methods [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3275-3278.
王勇,于蕾,张雅彬,等. 雾对大气激光通信系统的影响及克服方法 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3275-3278.
- [5] CHEN Dan, KE Xi-zheng. 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.
- [6] 袁东风,张海刚. LDPC 码理论与应用 [M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
- [7] FOSSORIER M P C, MIHALJEVIC M, IMAI H. Reduced complexity iterative decoding of low density parity check codes based on belief propagation [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1999, **47**(5): 673-680.
- [8] CHEN J, FOSSORIER M. Near optimum universal belief propagation based decoding of low-density parity check codes [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, **50**(3): 406-414.
- [9] CHEN J, FOSSORIER M. Density evolution for two improved BP-based decoding algorithms of LDPC codes [J]. *IEEE Transactions on Communication Letters*, 2002, **6**(5): 208-210.
- [10] KIM N, PARK H. Modified UMP-BP decoding algorithm based on mean square error [J]. *Electronics Letters*, 2004, **40**(13): 816-817.
- [11] 柯熙政,殷致云. 无线光通信系统中的编码理论 [M]. 北京:科学出版社,2009.
- [12] 张逸新,迟泽英. 光波在大气中的传输与成像 [M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [13] HAN Yao-qiang, DANG An-hong, REN Yong-xiong, et al. Theoretical and experimental studies of turbo product code with time diversity in free space optical communication [J]. *Optics Express*, 2010, **26**(18): 26978-26988.
- [14] ZHENG He. Research on iterative soft decision decoding of ldpc and GLD codes [D]. PLA Information Engineering University, 2006: 42-50.
郑贺. LDPC 码和 GLD 码的软判决迭代译码研究 [D], 信息工程大学, 2006: 42-50.
- [15] WANG Yong, YU Lei, CAO Jia-nian. 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.
- [16] ZHENG He, HU Han-ying, LU Pei-zhong. Optimization of two bp-based decoding algorithms for short LDPC codes on fast rayleigh fading channel [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, **29**(7): 1588-1591.
郑贺,胡捍英,陆佩忠. 快衰落 Rayleigh 信道下短 LDPC 码两类 BP-Based 译码的优化设计 [J]. *电子与信息学报*, 2007, **29**(7): 1588-1591.

Optimization of Two BP-based Decoding Algorithms for LDPC Codes Based on MMSE Criterion under Weak Turbulence Channel

LENG Jiao-feng, HAO Shi-qi, LÜ Xu-guang, ZHOU Jian-guo, ZHAO Nan-xiang

(1 *State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology(Electronic Engineering Institute), Hefei 230037, China;*

(2 *Key Laboratory of Electronic Restriction, Anhui Province, Hefei 230037, China*)

Abstract: Due to high complexity of Belief Propagation(BP) algorithm, several kind of BP-based simplified decoding algorithms are analyzed. Based on the Minimum Mean Square Error(MMSE) criterion, optimal design of the scaled BP-based and offset BP-based algorithms is discussed. The theoretical formulas and numerical calculations on the optimal factors for these two BP-based algorithms are provided. The simulation results for the $(6, 3)$ regular LDPC codes of lengths 1008 on the weak atmospheric turbulence channel demonstrate that the scaled BP-based and offset BP-based algorithms with the proposed factors are better than Min-Sum Algorithm, and even can achieve the performance better than that of the BP algorithm, and have lower complexity compared with BP algorithm.

Key words: Free space laser communication; LDPC codes; MMSE criterion; Improved BP algorithms