

软信息辅助硬判决译码在自由空间光通信中的应用

雷 艺, 陈 斌, 周红平, 郭 凯, 郭忠义

(合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽合肥 230009)

摘要: 由于在性能和复杂度之间的良好折中, 软信息辅助硬判决译码近年来受到了光通信领域的高度关注, 其中包括了软信息辅助比特标记(Soft-Aided Bit-Marking, SABM)算法. 为了易于硬件实现, 本文基于阶梯码(Staircase Code, SCC)提出了一种改进型SABM算法(improved SABM, iSABM), 称为iSABM-SCC. iSABM-SCC利用信道软信息, 通过两个可信度阈值将硬判决输出比特标记为三种可信度等级, 用以辅助硬判决译码识别译码错误和扩展纠错能力, 达到提升阶梯码性能的目的. 在受大气湍流影响的自由空间光通信中的仿真表明, iSABM-SCC性能显著优于标准SCC和RS码. 以强湍流信道为例, 码率为0.75的iSABM-SCC在4-PAM调制下较标准SCC产生的性能增益可达4.37 dB, 在8-PAM调制下较RS码产生的性能增益可达11.06 dB.

关键词: 自由空间光通信; 前向纠错技术; 阶梯码; 硬判决译码; 软判决译码

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)10-1945-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20210220

A Soft-Aided Hard-Decision Decoder for Free-Space Optical Communications

LEI Yi, CHEN Bin, ZHOU Hong-ping, GUO Kai, GUO Zhong-yi

(School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: Due to a good trade-off between performance and complexity, a new class of decoding schemes, called soft-aided hard-decision (SA-HD) decoders, has become particularly interesting to optical communication fields in recent years. Soft-aided bit-marking (SABM) algorithm is one of the popular ones. To be friendly for hardware implementation, this paper proposes an improved SABM (iSABM) algorithm for staircase codes (SCCs), which we call iSABM-SCC. With the help of channel soft information, iSABM-SCC marks bits into three types according to their reliabilities using two thresholds. The marked information is then used to assist the staircase decoder to prevent miscorrections and to extend the error-correcting capability, thus improving the performance of SCCs. The simulation results for free-space optical communications show that the proposed iSABM-SCC scheme achieves higher performance gains over standard SCC (S-SCC) and RS code in turbulence channels. For instance, iSABM-SCC with code rate of 0.75 has been shown to yield up to 4.37 dB performance gain when compared to S-SCC for 4-PAM and up to 11.06 dB performance gain when compared to RS code for 8-PAM in a strong turbulence channel.

Key words: free space optical communication; forward error correction; staircase code; hard-decision decoder; soft-decision decoder

1 引言

自由空间光(Free Space Optical, FSO)通信是一种利用光在自由空间中传递消息的光通信技术. 与光纤通信技术相比, FSO通信无须铺设光纤, 因此成本低、部署灵活, 同时还具备频带宽、容量大等优势, 因此受到了业界广泛关注^[1,2]. 然而由于大气湍流效应, 接收光

信号呈现出了光强闪烁特性, 这将导致系统性能的严重恶化.

为了保障信号传输的可靠性, 前向纠错技术(Forward Error Correction, FEC)是现代光通信系统中至关重要的一项技术. 根据信号接收和处理的方式, FEC包括了两大类: 硬判决(Hard Decision, HD)译码(例如

BCH码、RS码、乘积码等)和软判决(Soft Decision, SD)译码(例如LDPC码、Turbo码、极化码等).在相同码率和码长下,软判决FEC的性能远高于硬判决FEC,但代价是高译码复杂度,对应着高时延、高功耗和高成本等问题.这大大地限制了软判决FEC在高速率低成本光通信系统中的应用.在此背景下,低复杂度高性能的阶梯码(Staircase Code, SCC)一出现便迅速引起了光通信领域的高度关注^[3].

阶梯码是Smith等人于2012年提出的一种新型硬判决FEC技术,在高斯信道下净编码增益高达9.41dB^[3].2018年,阶梯码正式被光传送网标准G.709.2/Y.1331.2^[4]和G.709.3/Y.1331.3^[5]采纳.随后,其又于2020年被光互连论坛采纳,与汉明码级联作为400ZR光传送网的FEC解决方案^[6].但是与LDPC等软判决FEC相比,由于硬判决损失了信道信息,标准阶梯码仍存在较大的性能损失.

为了提升阶梯码的译码性能,业界提出了多种改进译码算法.早期的方案主要是基于阶梯码中每个比特均被两个分量码字所保护的比特,通过译码冲突来避免译码错误^[7]或者通过比特翻转来降低错误平层^[8].这些方法虽然简单,但是性能提升有限.为了产生较高的编码增益,有部分研究提出可以利用软判决译码完全替代硬判决译码^[9,10],但是这将大幅度增加阶梯码的译码复杂度.

在复杂度和性能的折中下,业界近年来又提出了软信息辅助硬判决(Soft-Aided Hard-Decision, SA-HD)的新型译码方案^[11,12].SA-HD译码的核心仍然是硬判决译码,但是须适当地借助信道软信息来弥补硬判决的信道损失,辅助硬判决译码.例如,Sheikh等人提出可以对信道软信息和硬判决译码输出的加权后再进行硬判决,用以提升乘积码的译码性能^[11].随后,他们又提出可以利用信道软信息找出最不可信的两个比特并将其删除,然后进行带删除译码^[12].仿真结果表明,与标准阶梯码译码相比,SA-HD译码可以产生高达0.88dB的

额外编码增益^[12].由于兼顾了复杂度和性能,因此SA-HD译码被认为是下一代大容量、低成本光通信的三大备选FEC方案之一^[13].

近年来,笔者所在研究团队也提出了一种基于软信息辅助比特标记(Soft-Aided Bit-Marking, SABM)的SA-HD译码算法^[14,15].SABM利用信道软信息将硬判决比特标记为高可信比特(Highly Reliable Bit, HRB)、高不可信比特(Highly Unreliable Bit, HUB)和不确定比特(Uncertain Bit, UB)三类,用以辅助阶梯码译码识别译码错误和扩展纠错能力.但SABM存在一个显著缺点:为了标记HUB,需要对比特按可信度排序,这不利于算法的硬件实现.

为了避免排序,本文基于阶梯码提出了一种改进型软信息辅助比特标记(improved SABM, iSABM)译码算法,并将其运用至FSO通信系统中,用以缓解大气湍流对系统性能的恶化.论文结构如下:首先介绍FSO通信系统模型,然后介绍阶梯码及iSABM算法的基本原理,并结合脉冲幅度调制(Pulse Amplitude Modulation, PAM)优化iSABM相关参数,分析其在受湍流影响的FSO通信系统中的性能,最后总结全文.

2 FSO通信系统模型

2.1 系统模型

图1所示为本文所考虑的基于PAM的强度调制/直接检测FSO通信系统模型.在发送端,二进制消息序列经过FEC编码和交织后,在 l 时刻将连续的 m 个比特 $\{b_{l,1}, b_{l,2}, \dots, b_{l,m}\}$ 映射至符号 x_l ,形成 M 阶的光强调制信号(即 M -PAM调制).其中, $x_l \in \mathcal{X} = \{0, \Delta, \dots, (M-1)\Delta\}$, $M=2^n$, Δ 为相邻星座点间的欧氏距离.比特到符号采用格雷映射关系.

光信号经过大气湍流信道传输后,由光电探测器转换为电信号,再经过PAM解调、解交织和FEC译码后恢复成二进制数据流.假设光电探测器采用PIN光电二极管加跨阻放大器组件,那么信道模型可以描

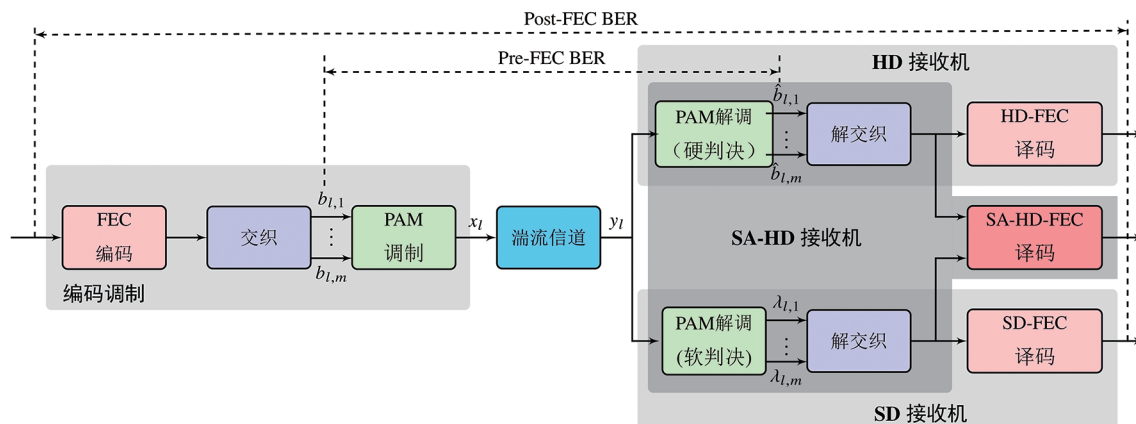


图1 系统模型

述为^[1,2,16]

$$y_i = \rho i_l x_i + n_i \quad (1)$$

其中, y_i 为接收信号强度, ρ 为光电二极管的响应度, $i_l > 0$ 为信道的光强衰落系数, n_i 是均值为 0、方差 σ^2 为 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声(主要来源于接收机内部的热噪声). 信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)定义为

$$\text{SNR} = \frac{E_b}{N_0} = \frac{E_s/m}{N_0} = \frac{E_s/\log_2 M}{N_0} \quad (2)$$

其中, E_b 为比特平均能量, E_s 为符号平均能量, $E_s = E[x_i^2] = \Delta^2(M-1)(2M-1)/6$. 为了简化分析, 本文将假设 $\rho = 1$.

在硬判决接收机中, 解调器将受噪声干扰的信号 y_l 通过硬判决转换为二进制数据流 $\{\hat{b}_{l,1}, \hat{b}_{l,2}, \dots, \hat{b}_{l,m}\}$, 解交织后, 由硬判决译码器译码; 在软判决接收机中, 解调器将首先根据 y_l 计算每个比特的软信息, 即对数似然比(Log-Likelihood Ratio, LLR). 假设所有符号等概率出现且接收端已知信道状态, 那么 l 时刻接收到的符号的第 q 个比特 $\hat{b}_{l,q}$ 的 LLR 值为

$$\lambda_{l,q} = \log \frac{\sum_{a \in \mathcal{X}_q^1} \exp\left(-\frac{(y_l - i_l a)^2}{2\sigma^2}\right)}{\sum_{a \in \mathcal{X}_q^0} \exp\left(-\frac{(y_l - i_l a)^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad q = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

其中, \mathcal{X}_q^b 表示在星座图 \mathcal{X} 中第 q 个比特值等于 $b \in \{0, 1\}$ 的所有符号的集合. $\lambda_{l,q} > 0$, 对应 $\hat{b}_{l,q} = 1$; $\lambda_{l,q} < 0$, 对应 $\hat{b}_{l,q} = 0$. $\lambda_{l,q}$ 绝对值(即 $|\lambda_{l,q}|$)越大, 表明 $\hat{b}_{l,q}$ 的值越可信. 软判决译码器便是利用这些软信息 $\lambda_{l,q}$ 进行译码.

在 SA-HD 混合接收机中, 除了硬判决输出的二进制数据流, 相应的软信息 $\lambda_{l,q}$ 也会提供给译码器辅助硬判决译码, 以期通过较少的复杂度增加来显著提升系统性能.

2.2 湍流信道

在大气湍流信道中, i_l 的起伏特性服从 Gamma-Gamma 分布, 其概率密度分布函数为^[1]

$$p(i_l) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} i_l^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}i_l) \quad (4)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 为 $\alpha-\beta$ 阶的第二类修正贝塞尔函数, α 和 β 的表达式分别为

$$\alpha^{-1} = \exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}}\right] - 1 \quad (5)$$

$$\beta^{-1} = \exp\left[\frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1 \quad (6)$$

其中, σ_R^2 为 Rytov 方差, 表示式为

$$\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} D^{11/6} \quad (7)$$

其中, C_n^2 为大气折射率结构常数, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数(λ 为激光波长), D 为光束传播距离. 在弱湍流情况下, $\sigma_R^2 < 1$; 在中湍流情况下, $\sigma_R^2 \approx 1$; 在强湍流情况下, $\sigma_R^2 > 1$.

3 阶梯码及 iSABM 算法

3.1 标准阶梯码编译码原理

阶梯码的基本结构如图 2 所示, 它由无数个维度为 $w \times w$ 的数据块 $B_i (i = 0, 1, 2, \dots)$ 按阶梯状串接而成. 数据块 B_0 为全 0 初始块, $B_i (i > 0)$ 白色区域填充 $w \times (w-p)$ 个信息位, 灰色区域填充 $w \times p$ 个校验位. 任意 $i > 0$, $[B_{i-1}^T B_i]$ 中的每一行均为一个有效分量码字 (B_{i-1}^T 是 B_{i-1} 的转置). 在现有报道中, BCH 码是阶梯码最常采用的一种分量码 \mathcal{C} . BCH 码的编码参数可用 (n, v, t) 表示, 其中, n 为码字长度, v 为信息位长度, t 为纠错能力. 那么, $w = n/2, p = n - v$, 阶梯码码率 $R = 2v/n - 1$.

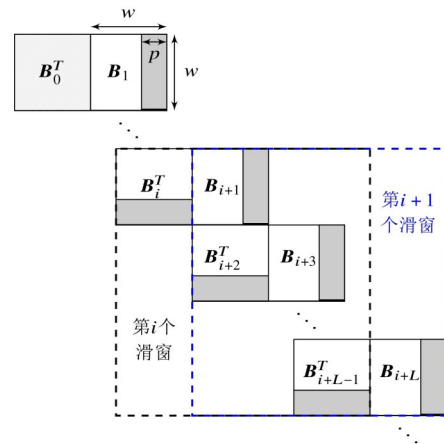


图 2 阶梯码结构

阶梯码译码采用滑动窗口方式, 窗口长度为 L . 假设在 i 时刻, 滑窗内包含数据块 $\{Y_i, Y_{i+1}, \dots, Y_{i+L-1}\}$ (Y_i 对应发送数据块 B_i), 那么标准阶梯码译码过程如下: ①利用限定距离译码算法(Bounded Distance Decoding, BDD)依次对 $[Y_{i+L-2}^T Y_{i+L-1}]$, $[Y_{i+L-3}^T Y_{i+L-2}]$, \dots , $[Y_i^T Y_{i+1}]$ 中的每一行进行译码; ②重复步骤①, 直到达到最大迭代次数或者译码器认为滑窗内所有错误均被纠正; ③输出 Y_i , 同时窗口滑动至 $\{Y_{i+1}, Y_{i+2}, \dots, Y_{i+L}\}$, 并重复上一个滑窗内的所有译码步骤. 以此类推, 阶梯码译码将一直不断地进行下去.

BDD 是用于线性分组码的硬判决译码器, 其译码输出 \hat{c} 取决于发送码字 c 和接收序列 r 的汉明距离 $d_H(c, r)$, 即

$$\hat{c} = \begin{cases} c, & d_H(c, r) \leq t \\ \tilde{c}, & d_H(c, r) > t \text{ 且 } d_H(\tilde{c}, r) \leq t \\ r, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $t = \lfloor (d_0 - 1) / 2 \rfloor$, d_0 为码字间的最小汉明距离, \tilde{c} 为分量码 C 中的另一有效码字. 从式 (8) 可知, 当且仅当接收序列 r 存在小于等于 t 个错误时, BDD 才能将 r 纠正至发送码字 c . 一旦 r 存在超过 t 个错误, BDD 将译码失败, 此时 $\hat{c} = r$. 在某些情况下, BDD 还可能发生译码错误. 此时 BDD 虽然宣称译码成功, 但实际却是将 r “纠正”至另一码字 \tilde{c} , 并非发送码字 c . 译码错误不仅不能将错误比特纠正, 反而还会将原本正确的比特纠错, 引入更多的错误, 恶化系统性能. 尤其是在迭代译码过程中, 一旦发生译码错误, 势必会对后续译码结果产生严重影响.

3.2 iSABM 译码算法

为了避免 BDD 译码错误并尝试纠正大于 t 个错误的情况, 本文提出了 iSABM 算法用以提升阶梯码的译码性能.

图 3 所示为 iSABM 算法的译码流程, 其中, r 为两个相邻接收数据块中的某一行或列 (对应一个分量码字), c' 为 iSABM 的译码输出. 与软判决译码不同, 软信息在 iSABM 中并不直接参与译码, 而是仅用于将硬判决输出比特标记为三种可信度等级: HRB、HUB 和 UB. 为了避免对比特按可信度排序, 本文提出利用两个可信度阈值 δ_1 和 δ_2 ($\delta_1 \geq \delta_2 \geq 0$) 对硬判决输出比特 $\hat{b}_{l,q}$ 按如下原则进行标记:

$$\begin{cases} \text{HRB}, & |\lambda_{l,q}| > \delta_1 \\ \text{UB}, & \delta_2 < |\lambda_{l,q}| \leq \delta_1 \\ \text{HUB}, & |\lambda_{l,q}| \leq \delta_2 \end{cases} \quad (9)$$

基于标记的 HRB、HUB 和 UB 信息, iSABM 对 BDD 宣称译码成功的输出进行译码错误检测; 对 BDD 译码错误或者译码失败, 则进行比特翻转 (Bit Flipping, BF), 以期纠正部分超过 t 个错误的情况. 具体工作原

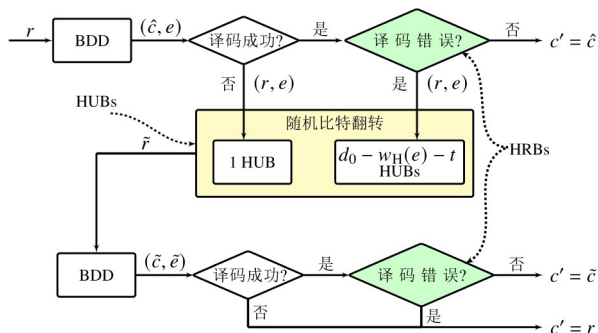


图3 iSABM 算法的译码流程

理如下.

(1) 译码成功: 译码错误检测

针对 BDD 宣称译码成功的输出, iSABM 通过两个准则来判断其是否为译码错误: ① BDD 所怀疑的错误不能是 HRB; ② BDD 所怀疑的错误不能与被认为是正确译码的分量码字相冲突. 当且仅当这两条准则均满足时, BDD 的译码输出才会被 iSABM 视为正确译码并被接受 (此时 $c' = \hat{c}$), 否则其将被标记为译码错误并被拒绝 (此时 $c' = r$).

(2) 译码失败或者译码错误: 比特翻转

针对译码错误和译码失败, iSABM 将从标记的 HUB 中分别随机翻转 $d_0 - w_H(e) - t$ 和 1 个比特, 其中 $w_H(e)$ 为 BDD 检测到的错误图样 e 的汉明重量. 在一些情况下, BF 可以使得部分错误得以纠正, 进而使得得到的新序列 \tilde{r} 在汉明空间上足够靠近发送码字 c , 即 $d_H(c, \tilde{r}) = t$. 因此, 当再次调用 BDD 对 \tilde{r} 进行译码时, \tilde{r} 中仅剩的 t 个错误将会被发现和纠正. 为了避免译码错误, 若第二次 BDD 宣称译码成功, iSABM 仍会进行译码错误检测.

在实际应用中为了控制译码复杂度的增加, iSABM 算法可以灵活地应用于滑窗内的 K ($2 \leq K \leq L$) 个数据块, 即在第 i 个滑窗内, $[Y_{i+L-2}^T Y_{i+L-1}^T]$, $[Y_{i+L-3}^T Y_{i+L-2}^T]$, \dots , $[Y_{i+L-K}^T Y_{i+L-K+1}^T]$ 利用 iSABM 译码, $[Y_{i+L-K-1}^T Y_{i+L-K}^T]$, $[Y_{i+L-K-2}^T Y_{i+L-K-1}^T]$, \dots , $[Y_i^T Y_{i+1}^T]$ 则仍利用 BDD 译码.

与现有其他 SA-HD 译码机制^[11-13]相比, iSABM 是一种硬件友好型译码算法, 具有如下特征:

(1) 无须对比特按可信度排序, 仅简单利用两个阈值标记比特的可信度等级, 易于硬件实现;

(2) 无须存储信道软信息. 针对每个硬判决比特, 仅需 2 个比特用以表示 HRB、HUB 和 UB 三种可能的可信度等级, 占用的额外内存少;

(3) 在迭代译码过程中无须更新信道软信息和标记的可信度信息.

此外, 还可以通过调整分量码参数 (例如扩展校验位、截断信息位、改变 t 等) 灵活地改变阶梯码码率, 从而较好地适应大气湍流引起的信道质量的波动.

4 仿真结果及分析

在本节中, 为了清楚地对比区分, 基于 iSABM 译码的 SCC 将被称为 iSABM-SCC, 而基于标准 BDD 译码的 SCC 则被称为 S-SCC (Standard SCC).

表 1 所示为阶梯码的仿真参数. $R = 0.5$ 的 SCC 所采用的分量码 C 为 BCH (88, 66, 3), 其是在 BCH (127, 106, 3) 的基础上先扩展 1 个校验位, 再截断 40 个信息位得到. $R = 0.75$ 的 SCC 所采用的分量码 C 为 BCH

(120, 105, 2), 其是在 BCH (127, 113, 2) 的基础上先扩展 1 个校验位, 再截断 8 个信息位得到. 阶梯码译码窗口长度为 $L = 9$, 迭代次数为 7.

表 1 S-SCC 和 iSABM-SCC 仿真参数

R	n	v	t	w	p
0.5	88	66	3	44	22
0.75	120	105	2	60	15

4.1 参数优化

为了使得 iSABM-SCC 性能最优, 参数 δ_1 、 δ_2 和 K 的选择是关键. 通过分析表明, 为了使得 iSABM-SCC 始终保持较好的译码性能, 标记的 HRB 和 HUB 占总比特数的比例 (分别用 ε_1 和 ε_2 表示) 须保持恒定, 即 δ_1 和 δ_2 的取值须随 SNR 的改变进行动态调整 (具体数值可以根据 ε_1 和 ε_2 的值通过 $|\lambda_{l,q}|$ 的概率密度函数理论计算得到).

图 4 所示为高斯信道下 $K = 7$ 的 iSABM-SCC 在不同 ε_1 和 ε_2 取值下的译码性能. 图 4(a) 对应的码率为 0.5, SNR 为 3.5 dB; 图 4(b) 对应的码率为 0.75, SNR 为 5.3 dB. 由图 4 可以看出, ε_1 和 ε_2 过大或过小均会导致 iSABM-SCC 性能降低. 若 ε_1 偏小 (即 δ_1 过大), 将导致部分足够可信的比特未能被标记为 HRB, 使得 iSABM-SCC 不能有效地识别译码错误; 反之, 若 ε_1 偏大 (即 δ_1 过小), 将导致部分错误比特被标记为 HRB, 进而使得部分正确的 BDD 译码被 iSABM 错误地标记为译码错误而被拒绝, 从而引起系统性能恶化. 同理, 若 ε_2 偏大 (即 δ_2 过大), 标记的 HUB 中将存在大量正确比特, 导致 BF 翻转到错误比特的概率变低; 反之, 若 ε_2 偏小 (即 δ_2 过小), 标记的 HUB 中将会漏掉部分错误比特, 导致 BF 不能有效发挥作用.

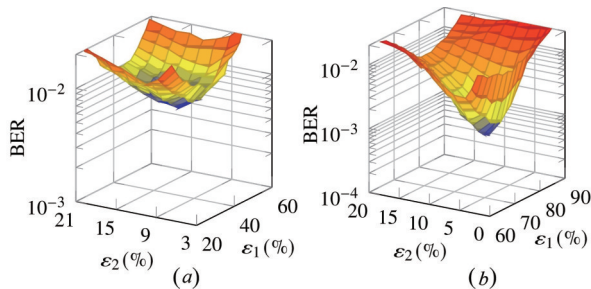


图 4 高斯信道下, $K = 7$ 的 iSABM-SCC 在不同 ε_1 和 ε_2 取值下的 BER 性能: (a) $R=0.5$, SNR=3.5 dB, (b) $R=0.75$, SNR=5.3 dB

图 5 所示为高斯信道下当 $\varepsilon_1 = 39\%$ 和 $\varepsilon_2 = 15\%$ 时, 码率为 0.5 的 iSABM-SCC 在不同 K 值下的译码性能. 可以看出, 当 $K < 7$ 时, iSABM-SCC 的性能将随 K 值增大而提升; 当 $K = 7$ 时, iSABM-SCC 较 S-SCC 的性能增益可达 0.46 dB. 但是一旦 $K > 7$, iSABM-SCC 的性能将迅速恶化. 这主要是由不准确的标记信息和未能识别的译

码错误导致. 一方面, 由于标记的信息并非完全可靠, 滑窗内存在部分译码错误未能被准确识别, 从而被误认为是正确译码. 另一方面, 由于前序滑窗的译码, Y_i 和 Y_{i+1} 相较于窗口内的其他数据块经历了更多次的迭代译码, 这使得其中大部分错误已被纠正. 因此, 与 Y_i 和 Y_{i+1} 相关的 BDD 输出是译码错误的概率极低, 但是却容易与不准确的标记信息和未能被识别的译码错误发生冲突, 进而被误认为是译码错误而被译码器拒绝, 导致系统性能恶化. 相反, 由于滑窗内 Y_{i+L-2} 和 Y_{i+L-1} 经历的译码迭代次数最少, 存在的错误数较多. 因此可以观察到, 当 $K = 2$ 时, iSABM-SCC 较 S-SCC 产生的增益可达其能产生的最大增益的一半, 即 0.23 dB.

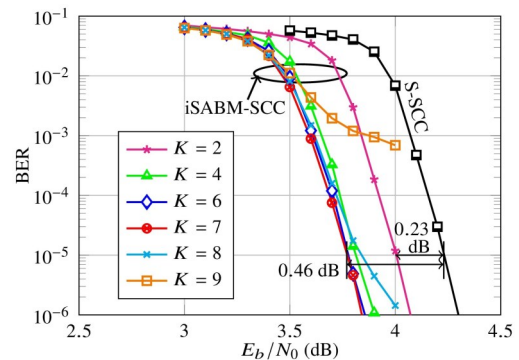


图 5 高斯信道下, 码率为 0.5 的 iSABM-SCC 在不同 K 值下的 BER 性能, 其中 $\varepsilon_1 = 39\%$ 和 $\varepsilon_2 = 15\%$

4.2 湍流信道下的 BER 性能分析

为了研究 S-SCC 及 iSABM-SCC 在 FSO 通信系统中的性能, 本文仿真分析了两种湍流信道, 即 $\sigma_R = 0.2$ 的弱湍流和 $\sigma_R = 2$ 的强湍流, 且假设接收端已知信道状态信息. 所采用的调制格式包含了 2-PAM、4-PAM 和 8-PAM 三种类型. 表 2 所示为 iSABM-SCC 在码率为 0.5 和 0.75 时标记的 HRB 和 HUB 比例. 同时 iSABM 算法应用于滑窗内的后 7 个数据块的译码, 即 $K = 7$.

表 2 iSABM-SCC 标记的 HUB 和 HRB 占总比特数的百分比

R	ε_1 (HRB)	ε_2 (HUB)
0.5	39%	15%
0.75	82%	6%

为了对比分析, 本文还仿真了 FSO 通信系统中常采用的 LDPC 码和 RS 码的性能. LDPC 码的参数为 (1944, 972) 和 (1944, 1458), 分别对应 0.5 和 0.75 两种码率. RS 码的参数为 (255, 127) 和 (255, 191). LDPC 译码采用置信传播算法, 最大迭代次数为 30. RS 码则采用硬判决译码算法.

图 6 所示是码率为 0.5 的 iSABM-SCC、S-SCC、LDPC 和 RS 码在弱湍流 FSO 通信系统中的 BER 性能. 由图可以看出, 与未采用编码时的系统性能 (黑色曲线)

相比, FEC 的引入可以有效降低接收信号误码率. 与 RS 码相比, 在 BER 为 10^{-5} 时, S-SCC 在 2-PAM、4-PAM 和 8-PAM 调制格式下可以分别产生 1.97dB、2.27dB 和 2.53dB 的性能增益; 而 iSABM-SCC 又可将 S-SCC 的编码增益再分别提升 0.52dB、0.64dB 和 0.75dB. 但是受限于译码复杂度, iSABM-SCC 的性能仍明显低于 LDPC 码 (在 8-PAM 调制格式下两者存在 3.35dB 的性能差异).

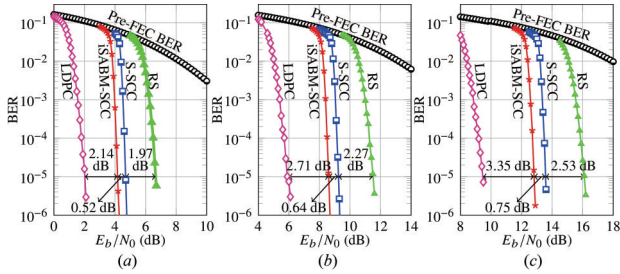


图6 弱湍流($\sigma_R=0.2$)下, 码率为0.5的iSABM-SCC、S-SCC、LDPC和RS码的BER性能对比:(a)2-PAM,(b)4-PAM,(c)8-PAM

图7所示是码率为0.75的iSABM-SCC、S-SCC、LDPC和RS码在弱湍流FSO通信系统中的BER性能. 可以发现, 随着码率的增加, LDPC码和RS码的性能差异变小, 而SCC的引入可以将RS与LDPC之间的性能损失缩小近一半. 更重要的是, 在2-PAM、4-PAM和8-PAM调制下, iSABM-SCC又可在S-SCC的基础上再分别产生0.74dB、0.85dB和1.04dB的性能增益. 相较于RS码, iSABM-SCC在8-PAM调制下产生的增益可达2.79dB. 这些数值略高于图6所示. 这主要是由于图7中SCC选用了较弱纠错能力的BCH码作为分量码. 由文献[17]可知, BDD发生译码错误的概率近似为 $1/t!$. 因此, 纠错能力 t 越小, BDD发生译码错误的概率越大, S-SCC性能恶化就越严重, 进而iSABM-SCC发挥作用的效力就越大.

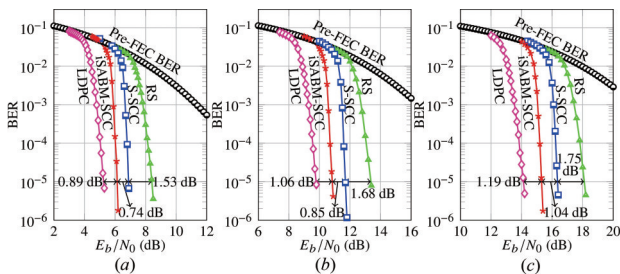


图7 弱湍流($\sigma_R=0.2$)下, 码率为0.75的iSABM-SCC、S-SCC、LDPC和RS码的BER性能对比:(a)2-PAM,(b)4-PAM,(c)8-PAM

图8和图9分别是码率为0.5和0.75的iSABM-SCC、S-SCC、LDPC和RS码在强湍流FSO通信系统中的BER性能. 通过与图6和图7对比可以发现, 在相同信噪比和调制格式下, 湍流强度的增加将会使得系统误

码率发生显著恶化, 从而严重影响通信质量. 就iSABM-SCC、S-SCC、LDPC和RS四种编码的性能而言, 其呈现的性能趋势与图6和图7一致, 即LDPC码性能最优(但复杂度最高), 其次是iSABM-SCC和S-SCC, 而RS码性能最差. 在BER为 10^{-5} 时, iSABM-SCC相较于S-SCC可以产生高达4.37dB的性能增益; 在8-PAM调制下, iSABM-SCC相较于RS码产生的增益可达11.06dB, 可以将LDPC与RS码之间的性能差异缩小76%.

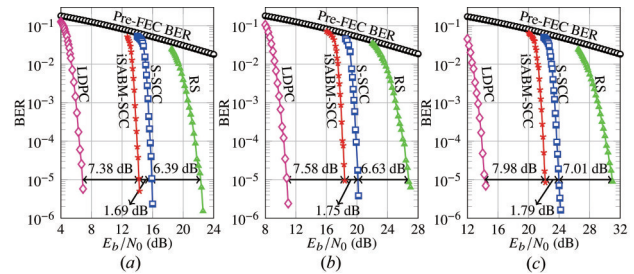


图8 强湍流($\sigma_R=2$)下, 码率为0.5的iSABM-SCC、S-SCC、LDPC和RS码的BER性能对比:(a)2-PAM,(b)4-PAM,(c)8-PAM

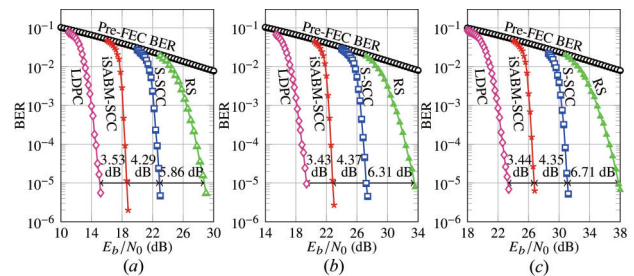


图9 强湍流($\sigma_R=2$)下, 码率为0.75的iSABM-SCC、S-SCC、LDPC和RS码的BER性能对比:(a)2-PAM,(b)4-PAM,(c)8-PAM

5 结论

本文基于高性能的阶梯码, 提出了一种改进的基于比特标记的软信息辅助硬判决译码机制, 可以作为硬判决译码和软判决译码的良好折中, 以较少的复杂度增加显著提升系统性能. 仿真结果表明, 当编码码率为0.75时, 所提方案在弱湍流信道和8-PAM调制下较标准阶梯码和RS码可以分别产生高达1.04dB和2.79dB的性能增益; 在强湍流信道中, 所提方案较标准阶梯码在4-PAM调制下可以产生高达4.37dB的性能增益, 较RS码在8-PAM调制下可以产生高达11.06dB的性能增益.

参考文献

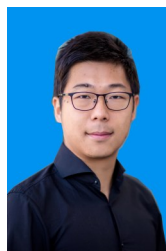
- [1] 陈纯毅, 杨华民, 姜会林, 等. 大气信道部分相干光通信链路性能分析与优化[J]. 电子学报, 2009, 37(8): 1869–1872.
Chen C Y, Yang H M, Jiang H L, et al. Performance analysis and optimization of partially coherent optical communi-

- cation links through atmospheric channel[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(8): 1869 – 1872. (in Chinese)
- [2] 邵军虎, 柯熙政, 陈强. 一种适用于大气弱湍流信道的极化纠错编码调制方案[J]. 电子学报, 2016, 44(8): 1831 – 1836.
- Shao J H, Ke X Z, Chen Q. A suitable polar coding modulation scheme for atmospheric weak turbulence channel[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(8): 1831 – 1836. (in Chinese).
- [3] Smith B P, Farhood A, Hunt A, et al. Staircase codes: FEC for 100 Gb/s OTN[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30 (1): 110 – 117.
- [4] G.709.2/Y.1331.2, OTU4 long-reach interface[S].
- [5] G.709.3/Y.1331.3, Flexible OTN long-reach interfaces[S].
- [6] Optical Internetworking Forum, Implementation agreement 400ZR[OL], OIF-400ZR-01.0_reduced2.pdf (oiforum.com) 2020, 5.
- [7] Hager C, Pfister H D. Miscorrection-free decoding of staircase codes[A]. Proceedings of the 2017 European Conference on Optical Communication[C]. Gothenburg, Sweden: IEEE, 2017. 1 – 3.
- [8] Holzbaur L, Bartz H, Wachter-Zeh A. Improved decoding and error floor analysis of staircase codes[J]. Designs Codes and Cryptography, 2018, 87: 647 – 664.
- [9] Wijekoon V B, Viterbo E, Hong Y. LDPC-staircase codes for soft decision decoding[A]. Proceedings of the 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. Seoul, Korea (South): IEEE, 2020. 1 – 6.
- [10] Condo C, Bioglio V, Land I. Staircase construction with nonsystematic polar codes [A]. Proceedings of the 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition [C]. San Diego, CA, USA: IEEE, 2020. 1 – 3.
- [11] Sheikh A, Amat A G I, Liva G. Binary message passing decoding of product-like codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(12): 8167 – 8178.
- [12] Sheikh A, Amat A G I, Alvarado A. Novel high-throughput decoding algorithm for product and staircase codes based on error-and erasure decoding[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, Early Access: 1 – 1.
- [13] Amat A G I, Liva G, Steiner F. Coding for optical communications – can we approach the Shannon limit with low complexity[A]. Proceedings of the 45th European Conference on Optical Communication[C]. Dublin, Ireland: IET, 2019. 1 – 4.
- [14] Lei Y, Alvarado A, Chen B, et al. Decoding staircase codes with marked bits[A]. Proceedings of the 2018 IEEE 10th International Symposium on Turbo Codes & Iterative Information Processing[C]. Hong Kong, China: IEEE, 2018. 1 – 5.
- [15] Lei Y, Chen B, Liva G, et al. Improved decoding of staircase codes: The soft-aided bit-marking (SABM) algorithm [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67 (12): 8220 – 8232.
- [16] 柯熙政, 田晓超. 二维相关K分布湍流信道的建模与仿真[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 41 – 49.
- Ke X Z, Tian X C. Modeling and simulation of Bi-dimensional correlated K-distributed turbulent channel[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 41 – 49. (in Chinese)
- [17] McEliece R J, Swanson L. On the decoder error probability for Reed-Solomon codes[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1986, 32 (5): 701 – 703.

作者简介



雷 艺(通信作者) 女, 1990年生, 重庆忠县人. 合肥工业大学计算机与信息学院讲师. 主要研究方向为光通信、信道编码等.
E-mail: leiyi@hfut.edu.cn



陈 斌 男, 1989年生, 安徽合肥人. 合肥工业大学计算机与信息学院讲师. 主要研究方向为新型编码调制技术.