

激光与光电子学进展

自由空间光通信下 SCB-Spinal 码的性能分析

张兢, 李文庆*, 曹阳, 彭小峰, 杜凡丁

重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054

摘要 针对自由空间光通信中 Spinal 码译码复杂度高及不等差错保护问题, 提出一种分段循环冗余校验(CRC)、Spinal 码与 BCH 码级联的 SCB-Spinal 码方案。通过分段的 CRC 校验提前终止过程, 减少解码计算量, 降低了译码复杂度, 并在尾部级联 BCH 码对易错的尾部信息进行纠错保护。仿真结果表明: 在不同湍流强度下, SCB-Spinal 码方案都有效地降低了译码复杂度并获得了更好的误码率性能, 在弱湍流强度低信噪比情况下较传统 Spinal 码方案降低了约 62% 的复杂度, 速率也有 0.04~0.17 bit/symbol 的性能提升; 在中强湍流强度影响下, 较传统 Spinal 码方案降低了 50%~60% 的复杂度。在为自由空间光通信中 Spinal 码的高效应用提供了一种解决方案。

关键词 光通信; 自由空间光通信; Spinal 码; 译码复杂度; 循环冗余码; BCH 码; 大气湍流

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP2022059.2320003

Performance Analysis of SCB-Spinal Code in Free-Space Optical Communication

Zhang Jing, Li Wenqing*, Cao Yang, Peng Xiaofeng, Du Fangding

School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract Aiming at the problems of high decoding complexity and unequal error protection of Spinal codes in free space optical communication, a SCB-Spinal code scheme is proposed, in which cyclic redundancy code (CRC), Spinal codes, and BCH codes are concatenated. Premature termination of the segmented CRC check reduces the amounts of decoding calculations and the complexity of decoding, and also cascades the BCH code at the tail to perform error correction protection for error-prone tail information. The simulation results show that the SCB-Spinal code effectively reduces decoding complexity and obtains better bit error rate performance under different turbulence intensities. Compared to the traditional Spinal code, the SCB-Spinal code is approximately 62% lower with respect to signal-to-noise ratio and turbulence. In addition, it exhibited a performance rate of 0.04-0.17 bit/symbol. With respect to moderate and strong turbulence intensities, the complexity under SCB-Spinal code is reduced by 50%-60%, facilitating efficient application of Spinal code in free space optical communication.

Key words optical communication; free-space optical communication; Spinal code; complexity decoding; cyclic redundancy code; BCH code; atmospheric turbulence

1 引言

自由空间光通信(FSO)技术是以激光作为载波、以大气作为信道的无线通信方案,与射频无线通信相比,它具有无频谱许可、带宽大、固有安全、抗电磁干扰、低成本等诸多优势^[1],由于大气湍流会导致传输后存在波形失真、闪烁、相位波动等问题^[2],严重影响通

信系统的性能。目前,抑制大气湍流干扰的方法主要有:自适应光学技术、多输入多输出(MIMO)天线技术、调制技术、信道编码技术,其中信道编码技术是最常应用的。信道编码通过增加冗余信息的方式使接收端可以对接收到的信息进行检测纠错,以此获得更好的通信性能。在传统的自由空间光通信系统中,常用的信道编码技术有低密度奇偶校验码(LDPC)^[3]、里所

收稿日期: 2022-02-25; 修回日期: 2022-04-25; 录用日期: 2022-06-24

基金项目: 重庆市教委科学技术项目(KJQN201901125)、重庆市科委社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2017shmsA40019)、重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2019jcy-msxmX0233)、重庆市教委科学技术研究青年项目(KJQN202101124)

通信作者: *467144986@qq.com

(RS)码^[4]、Turbo码^[5]、Polar码^[6-7],但是受制于固定码率无法适应时变的大气信道,无速率编码没有码率约束,其正向增加冗余的特点可以自动适应信道的动态变化而不需要反馈,以此获得更高的通信质量。

Perry等^[8]于2011年通过引入伪随机哈希函数提出了无速率Spinal码,并在隔年详细地阐述了编码原理,提出了新的译码算法。2012年Perry等^[9]证明了Spinal码在二进制对称信道(BSC)和加性高斯白噪声(AWGN)信道上接近信道容量。Yang等^[10]提出了一种前向堆栈译码(FSD)算法,在不损失传输速率的情况下减少译码复杂度。Hu等^[11]提出了一种有效分布符号的Spinal码译码方法,该译码器所采用的分组译码方法降低了译码复杂度,与气泡译码器相比具有吞吐量增益。Spinal码的顺序编码结构也使其具有不等差错保护(UEP)性质,Yu等^[12]提出了一种不等长传输方案以提高传输速率并分析了所提出的UEP脊髓码的有限长度性能。Yu等^[13]又提出了一种适用于BSC的无速率叠加Spinal码,通过叠加运算,重要的信息比次要的信息由更多的编码符号传递,从而产生UEP特性。虽然上述译码改进方法优势明显,但是对自由空间光通信Spinal码系统性能的改善还有一定的提升空间。

Spinal码受其潜在的不等差错保护性的影响,有着差错控制性能不佳的问题,其错误比特主要集中在最后部分的码块中。此外Spinal码译码复杂度较高,译码速率有待提高。针对以上问题,本文提出一种Spinal码、循环冗余校验(CRC)码与BCH码级联的信道编码方案,简称SCB(Segmented CRC-BCH)-Spinal码。仿真结果表明,在大气湍流条件下,与不同的构造方法相比,SCB-Spinal码方案能取得更好的系统性能。

2 系统模型

2.1 自由空间光通信系统模型

基于Spinal码的FSO通信系统模型如图1所示。通信过程如下:1)在发送端,首先将分块后的信息序列通过CRC编码器和BCH编码器后,生成对应的校验位并与原信息组成新的信息序列,然后进行Spinal编码生成相应编码符号,将码字进行二进制相移键控(BPSK)调制并经过大气信道进行传输;2)在接收端,首先对接收到的信号进行解调与Spinal解码操作,依次对解码后的信息分段进行CRC与BCH校验。若成功解码出信息,则接收端只需要发送一个非常简单反馈信号给发送端,之后发送端停止发送信息序列,否则发送端将持续发送编码符号。

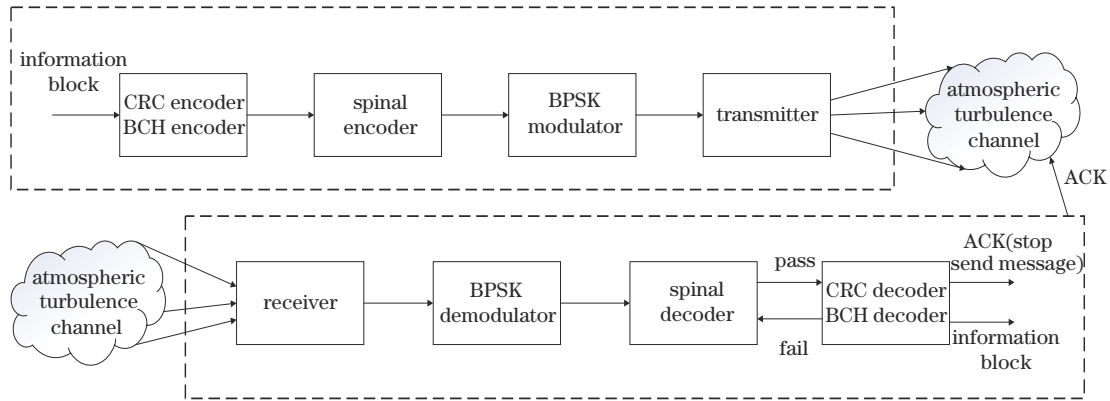


图1 SCB-Spinal码的FSO系统模型
Fig. 1 FSO system model of SCB-Spinal codes

2.2 大气湍流信道

激光在大气传播时会受到大气湍流的影响, Gamma-Gamma模型是应用最广泛的弱湍流模型之一,对不同强度的湍流下接收光的光强起伏建模都比较符合实际和仿真。在Gamma-Gamma模型中,归一化光强 I 是由两个变量 I_x, I_y 决定的,可表示为 $I = I_x I_y$,其中 I_x, I_y 表示为大规模和小规模的大气效应,其都服从Gamma分布,即

$$\begin{cases} P(I_x) = \frac{I_x (\alpha I_x)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\alpha I_x), I_x > 0, \alpha > 0 \\ P(I_y) = \frac{I_y (\beta I_y)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\beta I_y), I_y > 0, \beta > 0 \end{cases} \quad (1)$$

因此,可以得到归一化光强 I 的概率密度函

数^[14]为

$$P(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), I > 0, \quad (2)$$

式中: Γ 是伽马函数; $K_\alpha(\beta)$ 是第二类修正贝塞尔函数,其中 α 和 β 分别表示大湍流尺度和小湍流尺度。它们与大气条件有关,公式为

$$\alpha = \left\{ \exp \left[\frac{0.49\sigma^2}{\left(1 + 1.11\sigma^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{7}{6}}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (3)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[\frac{0.51\sigma^2}{\left(1 + 0.69\sigma^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{7}{6}}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (4)$$

式中： σ^2 为 Rytov 方差。 $\sigma^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数, λ 为波长, L 为传输距离, C_n^2 为大气折射率结构常数。

3 SCB-Spinal 码方案

3.1 Spinal 码编译码原理

如图 2 所示, Spinal 码的编码流程如下: 1) 将 n 位的信息 m 等分为 $D = n/k$ 数据包, 即 $m_1, m_2, m_3, \dots, m_D$, 数据包由 k 位组成。2) 编码器调用哈希函数, 将信息序列映射为 v 位的哈希状态。哈希函数有两个输入, 即一个 k 位的信息和一个 v 位的哈希状态, 表示为

$$S_i = h(S_{i-1}, m_i), 1 \leq i \leq n/k, \quad (5)$$

式中: S_0 作为哈希函数的初始状态可以随机选取, 但发送端和接收端都需要已知该信息。 m_1 与预设的哈希种子 S_0 输入哈希函数, 得到脊髓值 S_1 。随后 S_1 将作为新的种子值与 m_2 进行哈希运算得到 S_2 。依此类推, 直到得到 $S_{n/k}$ 。3) v 位的哈希状态 S_i 作为种子输入到伪随机数生成器 (RNG), $\{0, 1\}^v \times \mathbb{N} \rightarrow \{0, 1\}^c$, 其中 \mathbb{N} 为 C 位比特的索引, 以生成尽可能多的伪随机编码序列, 随后利用特定的映射函数将同一批次的随机序列映射为 C 位的码字进行传输。4) 将 $x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{n/k,j}$ 通过第 j 个 PASS 进行传输, 编码端不断执行上述操作, 直到接收端成功解码或者主动放弃, 使得 Spinal 码具有无速率性。

Spinal 译码是基于最大似然 (ML) 原理来实现的,

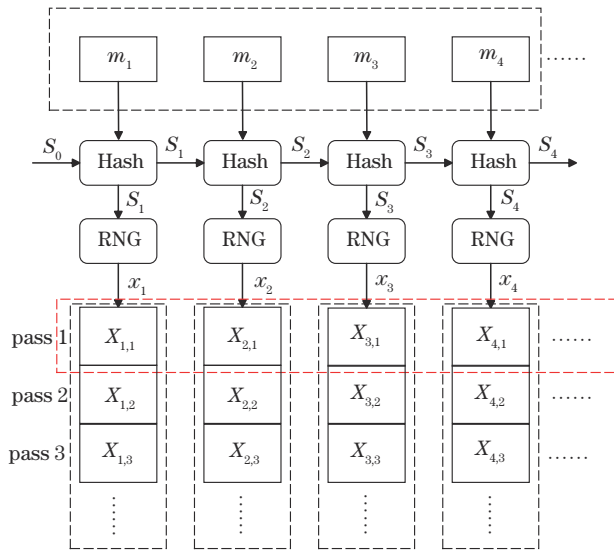


图 2 Spinal 码编码结构

Fig. 2 Encoding structure of Spinal code

通过再现编码过程进行解码。具体地说, 我们使用相同的初始哈希状态 S_0 、哈希函数和 RNG 来构造解码树, 即以 S_0 为根节点拓展深度为 n/k 的译码树, 每个节点都有 2^k 个子节点。ML 解码准则为

$$\hat{M} = \arg \min_{M' \in \{0, 1\}^n} \|\bar{y} - \bar{x}(M')\|^2 = \arg \min_{M' \in \{0, 1\}^n} \sum_{i=1}^{n/k} \sum_{j=1}^L \|\bar{y}_{i,j} - \bar{x}_{i,j}(\bar{m}')\|, \quad (6)$$

式中: \bar{y} 表示解码端接收到的编码符号序列; $\bar{x}(M')$ 表示的是解码端构造译码树时对应的编码符号序列; \hat{M} 是 $\bar{x}(M')$ 中编码符号序列与 \bar{y} 在欧氏距离上最近的信息序列; $\sum_{j=1}^L \|\bar{y}_{i,j} - \bar{x}_{i,j}(\bar{m}')\|$ 为第 i 级路径开销; $\sum_{i=1}^{n/k} \sum_{j=1}^L \|\bar{y}_{i,j} - \bar{x}_{i,j}(\bar{m}')\|$ 是 M' 叶节点的译码开销和。

虽然 ML 是最优的译码方法, 但 ML 译码需要计算 2^n 条路径的路径开销, 其复杂度会随信息长度呈指数增长。截断译码算法较 ML 算法添加了一个参数, 即保留路径 B 。截断译码不再搜索整个解码树, 而是每层根据路径度量对路径进行删减, 只保留路径开销和较小的 B 条路径, 对所保留的路径进行下一个深度的扩展, 使得具有指数级别复杂度的 ML 译码降低至多项式级别。

3.2 SCB-Spinal 码

目前大部分 Spinal 码编码方案都是在信息序列后添加 CRC, 只有在对整个信息序列进行解码时才能进行 CRC 校验。由于 Spinal 码是在深度优先解码树上进行解码的, 若在解码过程中有某一位置没有被成功解码, 之后的解码计算都是无用的, 导致了后续计算的浪费^[15]。如图 3 所示, 分段 CRC 校验与传统 CRC 校验的不同在于分段 CRC 将尾部校验位 r 替换为在信息序列中分散插入校验位 r/S , 每个分段包含 $n - r/S$ 信息位和 r/S 的 CRC 校验位, S 为分段数。

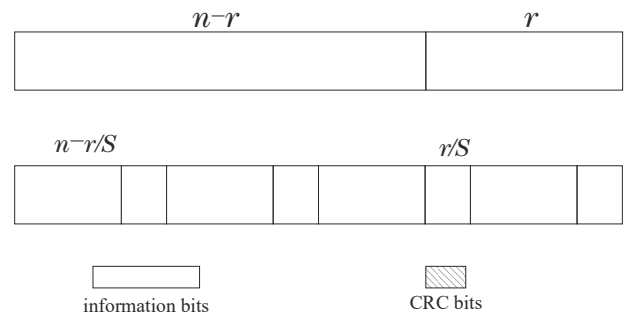


图 3 分段方案与传统方案

Fig. 3 Segmentation and traditional schemes

以图 4 为例, 将信息序列 M 分成四段 M_1, M_2, M_3, M_4 , 然后分别对每个信息序列进行 CRC 编码生成对应的校验序列, 将校验序列添加到信息序列 M_i 尾部组成 M'_i , 然后由 Spinal 码编码器编码。译码过程中 M'_i 译码结果无法通过 CRC 校验时提前终止译码过

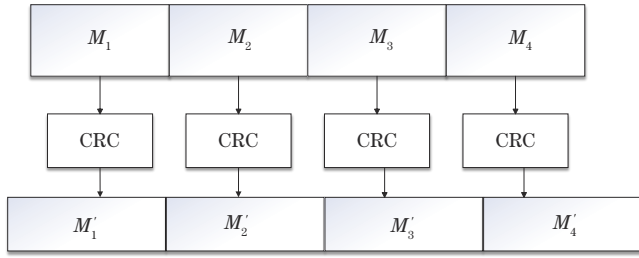


图 4 分段为 4 的 CRC 方案

Fig. 4 CRC scheme with 4 segments

程,保留通过 CRC 校验分段的结果并传输额外冗余对 M'_i 继续译码,防止前面已经出现错误却继续译码的计算浪费,降低了译码复杂度。

假设将 Spinal 码的传输 PASS 数设置为 L , 此类固定速率的 Spinal 码可表示为 $C_{\text{capacity}}(n, k, L)$, m 表示发送端发送的信息, \hat{m} 表示接收端的估计值, 错误概率可以表示为

$$P_e = 1 - P(\hat{m} = m) = 1 - P(\hat{m}_1 = m_1, \dots, \hat{m}_D = m_D) = 1 - \prod_{i=1}^D (1 - \delta_i), \quad (7)$$

$$\delta_i = P(\hat{m}_i \neq m_i | \hat{m}_1 = m_1, \dots, \hat{m}_{i-1} = m_{i-1}). \quad (8)$$

由 Spinal 码顺序编码的特性可知,对于信息分段 m_i , 只有 x_i, x_{i+1}, \dots, x_D 携带其信息, 其他输出符号 x_1, x_2, \dots, x_{i-1} 与信息分段 m_i 之间的互信息为 0, 可以分析出在 Spinal 编码中位置靠前的信息分段性能总是优于位置靠后的信息分段, 这说明 Spinal 码存在潜在的 UEP。如果只考虑最后一段信息 m_D , 发现 m_D 与 $x_1, \dots,$

x_{D-1} 相互独立, 只有 x_D 与其有关, 因此我们可以将式 (7) 近似为

$$P_e \geq \delta_D, \quad (9)$$

式中: δ_D 为一个短 Spinal 码 $C_{\text{capacity}}(k, k, L)$ 的误码率。Spinal 码的错误性能不会随着消息长度的增加而提升。根据上述分析得出 Spinal 码的差错控制性能受尾部信息分段的性能影响^[16]。

分段 CRC 译码同样存在这个问题, 尾部分段易出错且存在多次重发后仍可能无法成功译码的情况, 为解决此问题进而改进方案提出了一种尾部级联有强纠错能力的 BCH 码的 SCB-Spinal 码方案。

BCH 解码就是对错误比特进行自动纠错的过程。通过计算接收向量的伴随式, 并根据伴随式判断有无错误。根据所求得的伴随式, 进行迭代计算, 求得差错定位多项式 $\sigma(x)$ 采用钱搜索算法求解 $\sigma(x)$ 确定错误位置, 进行纠错处理, 从而实现 BCH 码的纠错功能。

改进后方案的编码结构框图如图 5 所示, 较传统编码方案有以下区别:

- 1) 将信息比特分为两个部分, 可靠比特 (RB) M_1, M_2 等和不可靠比特 (UB) M_D (本文中为尾部比特)。
- 2) 将 RB 分段 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_S\}$ 依次对每段 M_i 进行 CRC 编码并在 M_i 后加入对应 CRC 的校验序列, 构成新的信息序列。
- 3) 将 UB 送入 BCH 编码器, 得到校验比特 $p = \{p_1, p_2, \dots\}$, 并把校验比特与 UB 合并得到新的尾部信息序列。

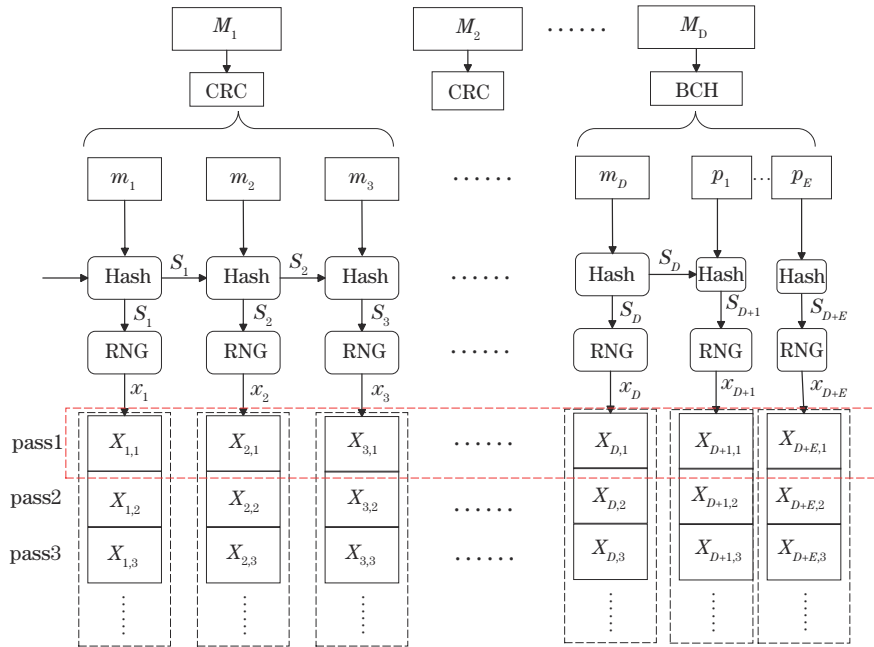


图 5 SCB-Spinal 码编码结构

Fig. 5 Encoding structure of SCB-Spinal code

本文进而提出一种适用于 SCB-Spinal 码的联合译码算法 (Algorithm 1)。依次对每个分段进行截断译码, 扩展译码树, 码树图构造如图 6 所示, 实心点为每层保留的节点, 加粗线为保留的路径。从根节点 s_0 开始构造, 计算每个子节点的路径开销和, 并删除多余的节点, 每个分段译码后只保留 B 条路径, 当分段 i 译码完成时, 对保留的 B 条路径进行 CRC 校验, 若存在校验成功的路径, 则继续译码, 否则解码终止并使用下一个 PASS 的信息对未通过 CRC 校验的分段继续译码。

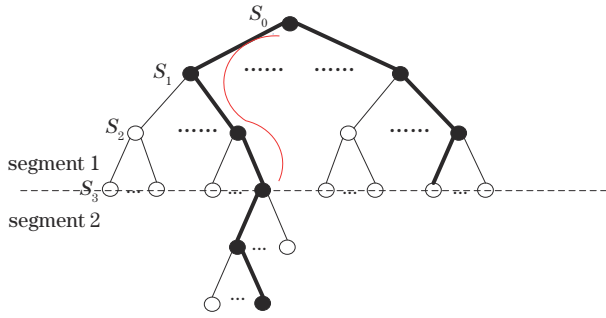


图 6 SCB-Spinal 解码树

Fig. 6 Decoding tree of SCB-Spinal

Algorithm 1

```

1: Initialization
2: while  $i = 1 \leq S - 1$  do #decoding segment by segment;
3:    $D \leftarrow n - m/kS$ ;
4:   for  $j = 1$  to  $D$  do
5:     calculate  $B2^k$  nodes and sort them;
6:     PATH  $\leftarrow$  the best  $B$  paths;
7:   end for
8:   for  $z = 1$  to  $B$  do
9:     if CRC PASS
10:      save the path
11:     else
12:      delete
13:   end for
14:   if CRC all failed
15:     declare a decoding failure and feedback ACK message to the sender
16:   end if
17: for  $i = 1$  to  $m + p/k$  do
18:   calculate  $B2^k$  nodes and sort them;
19:   calculate adjoint matrix
20:   if adjoint matrix check is 0
21:     return the path
22:   else
23:     calculate error locating polynomial  $\sigma(x)$  and error correction
24:   end if
25:   if adjoint matrix check is 0
26:     return the path
27:   else
28:     declare a decoding failure

```

如图中线条标注部分为分段 1 中通过 CRC 校验的路径。当分段 $S - 1$ 完成校验后, 对 UB 和校验比特组成的尾部序列进行译码, 计算分段 $S - 1$ 保留节点与 2^k 个子节点的路径开销和, 并删除多余的节点, 保留 B 条路径, 直到到达译码树叶节点, 对保留的路径进行伴随式校验。若存在伴随式校验为 0 的路径, 则译码器将此译码路径所对应的信息序列作为译码输出结果; 若不存在伴随式校验为 0, 则对保留的路径计算误差定位多项式 $\sigma(x)$ 进行纠错处理; 若纠错后存在伴随式校验为 0 的值, 则作为译码输出结果, 否则译码失败。

4 分析与讨论

针对本文提出的方案进行了仿真, 以验证 SCB-Spinal 方案比原始方案及分段 CRC 方案具有更好的性能。信息比特长度 $n = 256$, 信息分段长度 $k = 4$, 保留路径数 $B = 16$ 分段 CRC 方案每段的 CRC 校验位为 8 位, 分段数 $S = 4$, 分段 CRC 方案后续仿真图中简称为 SCA (Segmented CRC-Aided)-Spinal 码。SCB 方案将尾部的 CRC 校验替换为在尾部级联 (15, 7) 的 BCH 码, 其生成多项式为 $g(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + 1$ 。对于原始 Spinal 码方案设置了 32 位的 CRC 作为对照, 其余参数相同。仿真参数如表 1 所示。

表 1 模拟参数表

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Wavelength /nm	1550
Air fluctuation-distribution	Gamma-Gamma
Transmission distance /km	2
Modulation	BPSK
Turbulence intensity	0.2, 1.6, 3.5

Spinal 译码是通过重现编码过程实现的, 所以每个译码树节点都要进行哈希函数运算并进行路径开销的对比。对于信息长度为 n 、信息分段长度为 k 、保留参数为 B 、哈希状态参数为 v 的截断译码, 其每层进行的哈希函数运算量为 $O(B \cdot 2^k v)$, 开销和排序的运算量为 $O[B \cdot 2^k (k + \log_{10} B)]$, 可以认为每个节点译码的计算量是相同的。所以不同方案的复杂度可以按照其平均扩展节点数量来衡量。

图 7 为三种方案在弱湍流 $\sigma^2 = 0.2$, 不同 SNR 条件下的复杂度对比, 可以看出扩展节点数随着信噪比的上升而降低, 这说明信道质量越高, 译码的复杂度就越低。在 SNR 为 0 dB~10 dB 范围内, SCB-Spinal 方案较传统 Spinal 码方案复杂度有大幅降低, 例如: 在 SNR 为 4 dB 时降低了约 62%, 较 SCA-Spinal 方案也降低了约 14.6%~21.3% 的复杂度; 在 SNR 大于 10 dB 的高信噪比情况下, 弱湍流的影响较小, 只需要少量 PASS 数就能传输成功, 传统方案所需拓展节点

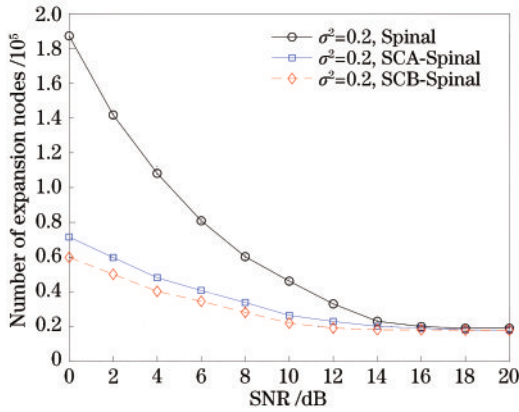


图 7 弱湍流下不同方案复杂度

Fig. 7 Complexity of different scheme in weak turbulence

数大幅减少,SCA与SCB方案提升逐渐减小;当SNR大于14 dB时只需要传输约一个PASS即可解码信息时,三种方案所需拓展节点数完全一致。

为了进一步测试本文所提方案的性能,在中湍流 $\sigma^2=1.6$ 和强湍流 $\sigma^2=3.5$ 下也进行相关仿真,如图8和图9所示。由于受到中强湍流的影响,即使在较高信噪比情况下也需要多次传输PASS进行解码,SCB方案在中强湍流下和传统方案相比都降低了约50%~60%的复杂度,尤其是强湍流的高信噪比情况下,传统方案的复杂度无法进一步下降,而SCA与SCB方案依旧随着信噪比的增加而小幅减少复杂度。SCB方案在中强湍流下较SCA方案也有10%左右的性能提升。

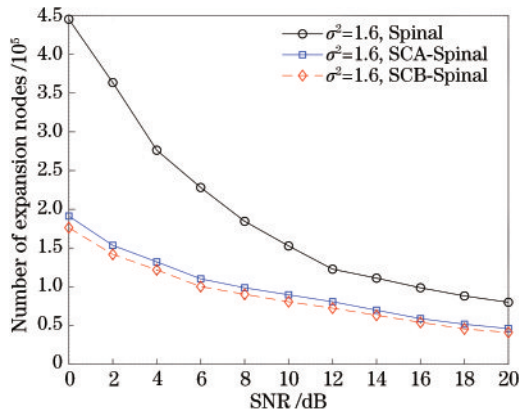


图 8 中湍流下不同方案复杂度

Fig. 8 Complexity of different scheme in moderate turbulence

考虑到自由空间光通信中反馈时延的问题,本方案不在每个PASS解码后向发送端发送反馈,只有解码成功后才发送反馈来让发送端停止发送信息。SCA方案的分段CRC校验失败后发送端依旧会发送信息序列来译码,导致SCA方案与传统译码方案相比在速率性能上没有太多提升,而SCB方案通过在尾部添加BCH码进行纠错处理,较传统方案有一定性能

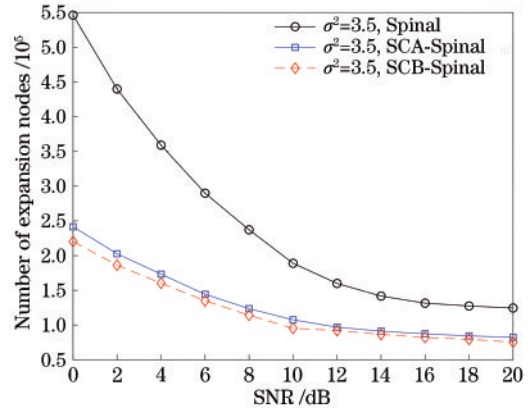


图 9 强湍流下不同方案复杂度

Fig. 9 Complexity of different scheme in strong turbulence

提升,如图10所示。弱湍流影响下,SCB方案约有0.04~0.17 bit/symbol的性能提升,信噪比高于14 dB时,受限于Spinal码的信息分块长度,达到速率性能限制,两种方案性能相同。在中强湍流影响下,相比传统方案,SCB方案有10%左右的性能提升。

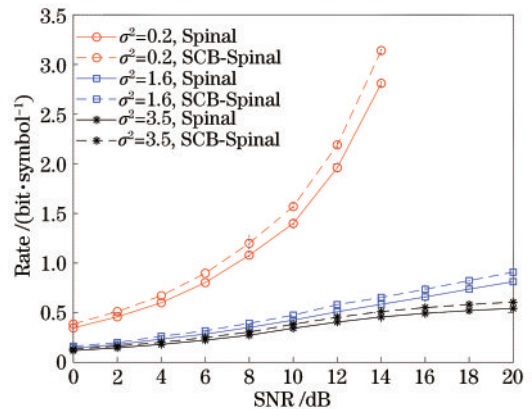


图 10 SCB-Spinal与传统Spinal码速率性能对比图

Fig. 10 Rate performance of SCB-Spinal and traditional Spinal code

图11为误码率性能对比图。通过将传输次数 L 固定为4,比较不同湍流强度下不同方案比特错误概率(BER)性能。在弱湍流强度 $\sigma^2=0.2$ 情况下:当BER为 10^{-1} 时,SCB方案较传统Spinal码方案有0.27 dB的增益,随着信噪比的提升,误码率性能也有明显提高;当BER为 10^{-4} 时,SCB方案较传统Spinal码方案有0.43 dB的增益。在中湍流强度 $\sigma^2=1.6$ 和强湍流强度 $\sigma^2=3.5$ 情况下,随着大气湍流强度的增大,在固定传输次数 $L=4$ 的条件下无法获得很好的误码率性能,但SCB方案与传统Spinal相比,依旧有着误码率性能的提升。中湍流强度下,当BER为 10^{-3} 时,SCB方案较传统Spinal码方案有1.7 dB的增益。强湍流强度下,当BER为 10^{-2} 时,SCB方案较传统Spinal码方案有1.1 dB的增益。因此SCB-Spinal码的

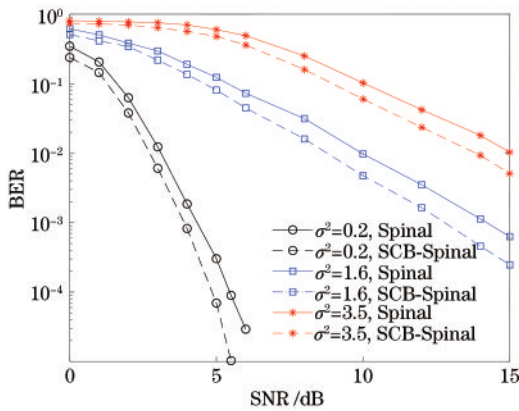


图 11 不同湍流强度和方案下的误码率性能

Fig. 11 Bit error rate performance under different turbulence intensities and schemes

误码率在不同湍流强度下均优于传统 Spinal 码。

5 结 论

本文提出了一种 FSO 中分段 CRC 与 BCH 纠错码结合使用的 SCB-Spinal 码方案, 通过将信息位与 CRC 校验位分为多段。在接收端解码时, 当某个解码段无法通过 CRC 校验时提前终止解码, 减少了冗余的传输, 尾部级联的 BCH 码进行不等差错保护。在弱湍流低信噪比与中强湍流影响情况下, 均大幅降低了译码复杂度, 速率性能也有部分提升。随着信噪比的提升, BCH 码的纠错能力不断提高, 误码率性能有不同程度的增益。在大气湍流情况下, 该方案保证了误码率与速率性能的同时, 降低了译码复杂度, 使 Spinal 码更适用于实际场景中。

参 考 文 献

- [1] Chan V W S. Free-space optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4750-4762.
- [2] 曹阳, 李岳, 李小红. 无线光通信中极化码构造方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2106003.
Cao Y, Li Y, Li X H. Research on construction method of polarization code in wireless optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2106003.
- [3] Gallager R. Low-density parity-check codes[J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8(1): 21-28.
- [4] Sun X L, Skillman D R, Hoffman E D, et al. Simultaneous laser ranging and communication from an Earth-based satellite laser ranging station to the Lunar Reconnaissance Orbiter in lunar orbit[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8610: 861003.
- [5] Leoraj R, Selvi J A V. Comparative performance analysis of forward error correcting codes for Free Space Optical communication[C]//2016 International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS), February 24-26, 2016, Pudukkottai, India. New York: IEEE Press, 2016.
- [6] Ito K, Okamoto E, Takenaka H, et al. Application of polar codes for free space optical communication[C]//2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, November 14-16, 2017, Naha, Japan. New York: IEEE Press, 2017: 183-187.
- [7] 曹阳, 文豪, 党宇超. 自由空间光通信下的 LSTM-SCFlips 译码方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1406004.
Cao Y, Wen H, Dang Y C. LSTM-SCFlips decoding method in free-space optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1406004.
- [8] Perry J, Balakrishnan H, Shah D. Rateless spinal codes [C]//Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, November 14-15, 2011, Cambridge, Massachusetts. New York: ACM Press, 2011: 6.
- [9] Perry J, Iannucci P A, Fleming K E, et al. Spinal codes [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012, 42(4): 49-60.
- [10] Yang W Q, Li Y, Yu X P, et al. A low complexity sequential decoding algorithm for rateless spinal codes[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(7): 1105-1108.
- [11] Hu Y M, Liu R K, Bian H X, et al. Design and analysis of a low-complexity decoding algorithm for spinal codes [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4667-4679.
- [12] Yu X P, Li Y, Yang W Q, et al. Design and analysis of unequal error protection rateless spinal codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(11): 4461-4473.
- [13] Yu X P, Li Y, Yang W Q. Superposition spinal codes with unequal error protection property[J]. IEEE Access, 2017, 5: 6589-6599.
- [14] 刘旭超, 李华贵, 孙时伦, 等. 湍流信道下光量子通信系统误码分析及优化[J]. 光学学报, 2022, 42(3): 0327018.
Liu X C, Li H G, Sun S L, et al. Bit error analysis and optimization of optical quantum communication system under turbulent channel[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(3): 0327018.
- [15] Zhang K, Li D Q, Wu S H, et al. Improved spinal codes: a segmented CRC-aided scheme[C]//2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference, September 22-25, 2019, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [16] 张兢, 杜凡丁, 曹阳, 等. 自由空间光通信下对称 Spinal 码的性能分析[J]. 激光与红外, 2021, 51(9): 1206-1211.
Zhang J, Du F D, Cao Y, et al. A symmetric Spinal code for performance improvement in free-space optical communication[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(9): 1206-1211.