

空间光通信中基于多输入多输出的级联码方案研究

曹阳, 张勋*, 彭小峰, 任发韬

重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054

摘要 针对多输入多输出自由空间光通信系统中误码扩散的问题, 提出一种卢比变换码与奇偶检验码级联的级联码方案, 该方案通过在卢比变换编码包后增加一位校验元来定位并删除其中错误的编码包, 同时仿真比较卢比变换码与级联码的性能。在不同多输入多输出组数和通信距离的系统下对级联码进行仿真验证, 模拟不同大气湍流强度信道。仿真结果表明: 译码开销不超过 0.5 时, 级联码可提升译码成功率; 在相同湍流环境下, 相比于天线个数为 2×2 的系统, 天线个数为 3×3 的系统大约有 3 dB 的编码增益, 且采用级联码后, 当误码率为 10^{-5} 左右时, 编码增益提升范围为 0.5 dB~2 dB; 在强湍流环境下, 当天线个数相同时, 随着通信距离的增大, 相比于卢比变换码, 级联码仍有一定的编码增益优势。

关键词 光通信; 级联码; 多输入多输出自由空间光通信; 误码扩散; 误码率; 通信距离

中图分类号 TN911.22

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0106003

Cascade Scheme Based on Multiple-Input Multiple-Output in Spatial Optical Communication

Cao Yang, Zhang Xun, Peng Xiaofeng, Ren Fatao

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

Abstract Aiming at the problem of error diffusion in multiple-input multiple-output free-space optical (MIMO-FSO) communication system, we propose a cascaded code(LT-PC) scheme of the Luby transform (LT) code and the parity check (PC) code. The LT-PC scheme can locate and delete wrong packets by adding a checker based on LT code. The performance of the LT code is compared with that of the LT-PC code. The LT-PC code is verified by the simulation under the systems with different number of MIMO groups and communication distances. Different atmospheric turbulence intensity channels are also simulated. The results show that the LT-PC code can improve the success rate of decoding when the decoding overhead is less than 0.5. In the same turbulence environment, the system with antenna number of 3×3 has about 3 dB coding gain compared with the system with antenna number of 2×2 . After using the LT-PC code, the improving range of the coding gain is 0.5 dB~2 dB when the bit error rate is about 10^{-5} . In the strong turbulence environment, the LT-PC code still has certain advantages over the LT code with the increase of the communication distance when the numbers of antennas are the same.

Key words optical communications; cascaded code; multiple-input multiple-output free-space optical communication; error diffusion; bit error rate; communication distance

OCIS codes 060.2605; 010.1330

1 引 言

自由空间光(FSO)通信具有频谱资源丰富、传输速率高、带宽高、抗干扰能力强和携带方便等优点^[1-2], 近年来已成为宽带无线接入、空间卫星通信、

混合组网等领域的一项热门技术^[3]。然而在大气传输过程中, 分子、原子等粒子的吸收、散射效应以及湍流因素使接收的激光信号受到严重衰减与起伏, 极大地降低了 FSO 通信链路的传输可靠性^[4-6]。

为克服大气湍流对 FSO 通信链路的影响,

收稿日期: 2017-05-05; 收到修改稿日期: 2017-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(61205106)、博士后科学基金(2014M552329)、重庆市教委基金(KJ120827)、重庆市教委科学技术研究项目(KJ1500934, KJ1709205)

作者简介: 曹阳(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: caoyang@cqut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: 1437297890@qq.com

Ibrahim 等^[7]提出将多输入多输出(MIMO)技术应用于 FSO 通信链路,可有效地提高抗衰落能力;Navidpour 等^[8-9]分别研究了在弱湍流与强湍流环境下 MIMO-FSO 链路的误码性能,同时给出了 MIMO-FSO 系统平均误码率(BER)的有效近似闭式表达式;Qin 等^[10]分析广义选择多用户调度对于 MIMO-FSO 系统的影响,在 Gamma-Gamma 信道下推导出中断概率的闭环表达式,同时进一步讨论了信道波动所提供的分集效益;韩立强等^[11]建立综合大气效应下 MIMO 信道模型和系统模型,推导了等增益分集合并下 FSO 通信系统的遍历容量和中断概率闭合表达式;柯熙政等^[12]在 MIMO-FSO 系统基础上,提出垂直分层空时(V-BLAST)结构,比较了不同的 MIMO 组数条件下脉冲位置调制(PPM)和开关键控(OOK)调制两种调制方式的系统误码率;郝士琦等^[13]研究了基于低密度奇偶校验(LDPC)码的 MIMO 无线光通信系统性能,给出基于 LDPC 码的空时编码 MIMO 和重复编码 MIMO 系统的解码算法;Fan 等^[14]介绍了喷泉码,喷泉码因具有无码率特性可自适应于大气衰落信道,从分集复用权衡(DMTO)的角度分析了喷泉码在 MIMO 衰落信道上的性能,并提出 MIMO 衰落信道上喷泉码的设计准则;刘世涛等^[15]研究了基于 Gamma-Gamma 信道和卢比变换(LT)码的 MIMO-FSO 系统误码率,但激光信号在通过 LT 编码器编码后可能会出现错误的编码包,这些错误的

编码包经过置信传播(BP)译码后,会产生误码扩散的现象,降低了 MIMO-FSO 系统的通信性能。

本文针对误码扩散的问题,提出一种 LT 码与奇偶校验码(PC)级联的级联码方案,简称 LT-PC 码。激光信号经过 LT 编码器编码,在编码包后添加奇偶校验位进行校验,出现错误则删除。由于 LT 码是一种无码率的纠删码^[16-17],删除错误的编码包对译码不会造成影响,可有效抑制误码扩散的产生。在 Gamma-Gamma 信道模型下进行仿真,基于 LT-PC 码的 MIMO-FSO 系统与基于 LT 码的 MIMO-FSO 系统相比,前者的通信性能提升较大。

2 MIMO-FSO 系统模型

2.1 MIMO-FSO 结构

基于 LT-PC 码的 MIMO-FSO 垂直分层空时结构如图 1 所示。以二进制数据形式存在的信源经过串并转换后分别由 M 个 LT 编码器编码,在这些编码包后增加校验位进行检错,再进行空时编码,经 OOK 调制后由激光器阵列通过 M 个光学天线同频发射出去,经过大气信道传输,发出的光信号经捕获、跟踪、对准(ATP)后,被 N 个等增益光学接收天线接收,送往 N 个 PIN 光电探测器进行光电转换,输出的信号与信道估计出的传输特性矩阵一起通过反馈均衡器抵消干扰,然后将信号进行空时译码和信道译码,经过串并转换处理后恢复原信号。

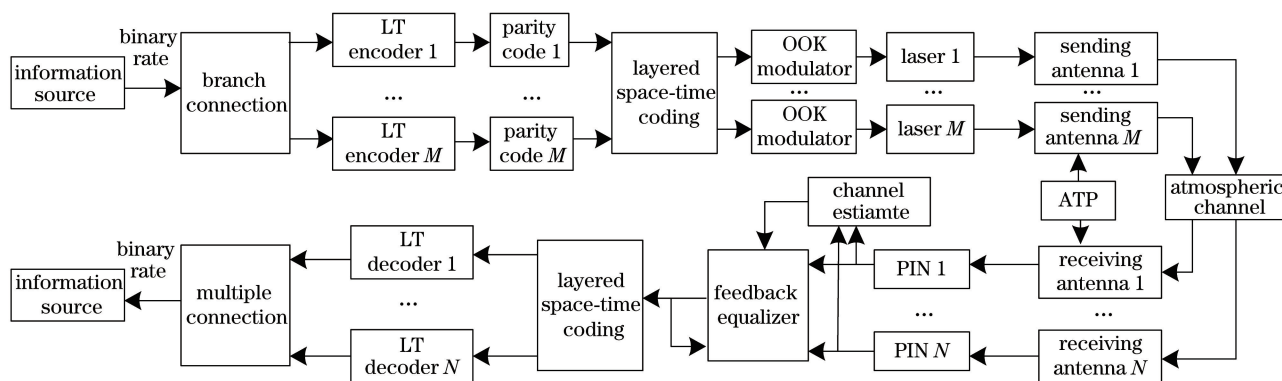


图 1 MIMO-FSO 系统模型

Fig. 1 MIMO-FSO system model

2.2 MIMO-FSO 垂直分层空时码编译码算法

垂直分层空时码可以提高 MIMO-FSO 系统的抗衰落性能,也无需添加 0 码,不会造成信息码的冗余^[18]。为了使垂直分层空时算法适用于空间光通信系统,将该结构的编译码进行了不同程度的改造。

LT-PC-垂直分层空时编码是将并行信道编码

器的输出按垂直方向进行空间编码,其编码原理如图 2 所示。假设发送天线数目 M 为 3,将 LT-PC 码等效为信道编码器,按照图 1 所给出的 MIMO-FSO 系统结构,以二进制数据形式存在的信源经过串并转换后分别由 M 个 LT 编码器编码,在这 M 个编码包后增加校验位进行检错,得到 M 个 LT-PC 码

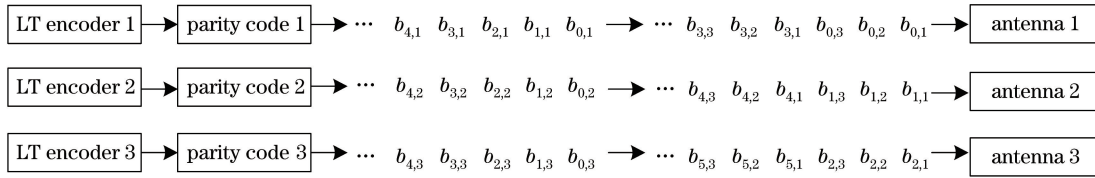


图 2 LT-PC-垂直分层空时编码

Fig. 2 LT-PC-vertical layered space-time coding

编码包,如经过信道编码器 1 编码后的码元为 $\{b_{0,1}, b_{1,1}, b_{2,1}, b_{3,1}, b_{4,1}, \dots\}$,按垂直方向进行空间编码后,第 1 个信道编码器输出的 M 个码元排在第 1 列,第 2 个信道编码器输出的 M 个码元排在第 2 列,一般第 s 个信道编码器输出的第 t 组 M 个码元(每 M 个码元一组)排在第 $s + (t - 1)M$ 列。编码后的码元按列由 M 副天线同时发送到信道中。例如,图 2 中码元 $b_{4,1}$ 表示未进行空间编码时它属于第 1 个信道编码器输出的第 2 组,按垂直方向进行空间编码后,它的位置在第 4 列,即 $1 + (2 - 1) \times 3 = 4$ 。

分层空时码译码算法分为最大似然(ML)算法、破零(ZF)算法和最小均方误差(MMSE)算法^[19]。ML 算法可提供满分集增益和零功率损耗,但发射天线数目 M 较多时,工作量基本不可能完成;ZF 算法可很好地分离同频信号,但只能在较高信噪比(SNR)时才能保持较好的性能;MMSE 算法可使由噪声和同频信号相互干扰造成的误码率最小,虽然它降低了信号分离的质量,但具有较好的抗噪性能^[20],文中软件仿真采用的是 MMSE 算法。

MIMO-FSO 系统信道模型表示为

$$\mathbf{y}(t) = \eta \mathbf{H} \mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (1)$$

式中 η 为光电转换效率,调制信号矩阵 $\mathbf{x}(t)$ 为 $[x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$,接收端信号矩阵 $\mathbf{y}(t)$ 为 $[y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)]^T$,噪声矩阵 $\mathbf{n}(t)$ 为 $[n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T$,其各个分量之间相互独立统计, \mathbf{H} 为方差 σ_n^2 、零均值的加性高斯白噪声,信道特征矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

在文献[12]中,根据 MMSE 算法,由相关公式与迭代算法可恢复发射端的调制信号阵列 $\mathbf{x}(t)$,从而完成译码。

2.3 大气信道模型

MIMO-FSO 链路主要受到大气衰减和大气湍

流的影响,其中大气衰减主要影响通信系统的通信距离,而大气湍流会使光波参量在传输过程中由于大气折射率的改变而发生随机变化,影响通信质量。因此,文中主要考虑大气湍流效应带来的影响^[21-22]。

根据湍流强弱的不同,多种统计模型可用来描述湍流强弱。针对弱湍流,信道模型服从对数正态分布^[23];针对强湍流,多数服从指数分布^[24]。实验及理论表明双伽马(Gamma-Gamma)分布能够较为准确地描述大气湍流信道,其概率分布函数为^[25]

$$P_I(I) = \frac{(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta/2)-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), \quad (3)$$

式中 I 为信号强度, Γ 为伽马函数, $K_{\alpha-\beta}$ 为修正的第二类贝塞尔函数,阶次为 $\alpha - \beta$, α 与 β 是 Gamma-Gamma 分布的参数,表达式为^[26]

$$\alpha^{-1} = \exp\left[\frac{0.49\delta^2}{(1 + 0.18d^2 + 0.56\delta^{12/5})^{7/6}}\right] - 1, \quad (4)$$

$$\beta^{-1} = \exp\left[\frac{0.51\delta^2 (1 + 0.69\delta^{12/5})^{-5/6}}{(1 + 0.9d^2 + 0.62d^2\delta^{12/5})^{5/6}}\right] - 1, \quad (5)$$

式中 $d = \sqrt{kD^2/(4L)}$, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, L 为通信距离, D 为接收端的接收孔径; δ^2 为 Rytov 方差,在弱起伏情况下, $\delta^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ ^[27]。 C_n^2 为折射率结构常数, $C_n^2 = (79 \times 10^{-6} P/T)^2 C_T^2$,其中 P 、 T 、 C_T^2 分别表示大气压力、温度和温度结构常数^[28]。 C_n^2 的变化范围是 $10^{-17} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$,对应于弱湍流到强湍流^[29]。参考文献[30]相关公式推导可得该 MIMO-FSO 系统的误码率表达式为

$$P_e = \frac{2^{\alpha_s + \beta_s - 3}}{\sqrt{\pi^3} \Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s)} \cdot G_{5,2}^{2,4} \left[\left(\frac{2}{\alpha_s \beta_s} \right)^2 \gamma \left| \frac{1 - \alpha_s}{2}, \frac{2 - \alpha_s}{2}, \frac{1 - \beta_s}{2}, \frac{2 - \beta_s}{2}, 1 \right. \right. \\ \left. \left. 0, \frac{1}{2} \right], \quad (6)$$

式中 $\alpha_s = S\alpha$, $\beta_s = S\beta$,其中 $S = M \times N$, M 、 N 分别为 MIMO-FSO 系统发送天线与接收天线数目, γ 表示 MIMO-FSO 通信链路的平均信噪比(SNR), $G(\cdot)$ 为 Meijer's 函数。

3 级联码方案

3.1 误码扩散分析

LT 码编译码原理可参考文献[15],在 LT 码编码过程中可生成任意个数的编码包,在这些编码包后增加奇偶校验位逐个进行校验,校验后的编码包可通过 BP 译码方法还原信息。

图 3 为编码包 T_2 错误时在 BP 译码过程中的状态转移图。若在 LT 码编码过程中生成错误的

编码包,这些编码包在译码过程中会通过异或运算不断得到错误的源数据包,从而产生误码扩散现象。文献[31]验证了误码扩散会使采用喷泉码的图像产生扭曲、错位和颜色失真,甚至会导致整幅图完全失真。LT 码作为喷泉码的一类具体实施方案,同样存在类似情形,必须采取措施进行纠正,因此提出用奇偶校验码来校验并且删除编码过程中出现的错误编码包,可有效遏制误码扩散现象。

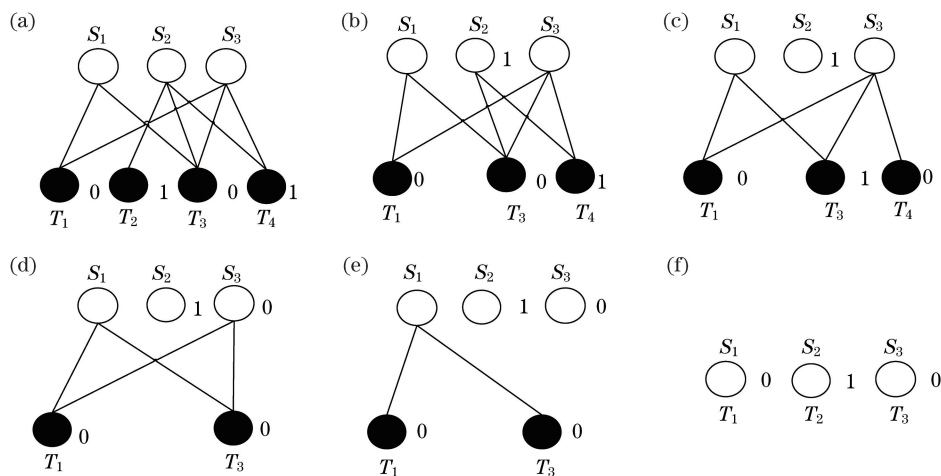


图 3 T_2 错误时 BP 译码状态转移图。(a) T_2 错误转移至 S_2 ; (b) 异或后 T_3 、 T_4 错误; (c) T_4 错误转移至 S_3 ; (d) 异或后 T_1 错误; (e) T_1 或 T_3 错误转移至 S_1 ; (f) 译码结束

Fig. 3 BP decoding state transition diagram when T_2 has error. (a) T_2 's error transfers to S_2 ;

(b) after XOR, T_3 and T_4 have errors; (c) T_4 's error transfers to S_3 ; (d) after XOR, T_1 has error;

(e) errors of T_1 or T_3 transfer to S_1 ; (f) decoding ends

3.2 校验原理

奇偶校验码是一种最简单的纠错码,其编码方式是在码字的末尾添加一个奇偶校验位,使得码字中“1”的个数恒为奇数(奇校验)或偶数(偶校验),以此来实现对信息的检错。它能检测出单个错误,但不具备纠错功能,故本文采用偶校验。

根据 LT 码编码算法得到单个编码包,该编码包有 $n-1$ 个码元,在该编码包后添加一个检验码元,得到 $(n, n-1)$ 奇偶校验码。假设 a_1, a_2, \dots, a_{n-1} 表示 $n-1$ 个信息码元, a_0 表示校验码元,则

$$a_0 \oplus a_1 \oplus a_2 \oplus \dots \oplus a_{n-1} = 0, \quad (7)$$

式中 \oplus 表示异或运算,即有限域 $GF(2)$ 上的加法运算。对于偶数校验,信息码元与校验码元之和为 1 代表有错,但奇偶校验码中出现偶数个错误码元时,错误码元不能被发现,因此,只有当出现奇数个错误码元时才能被发现。

具体利用奇偶校验码进行检错的步骤如下:

1) 将某一源数据包通过 LT 码编码器得到编

码包;

2) 在该编码包末尾添加校验位,得到奇偶校验码,根据奇偶检验码原理进行检错;

3) 若检测出错误,则删除该编码包;若未检测出错误,继续通过步骤 1)~3) 逐个检测每个编码包,直至未检测出错误编码包为止。

3.3 级联码性能分析

本文设计一种 LT 码与 PC 码级联的级联码,简称 LT-PC 码。根据 LT 码的编码原理与 LT 码 200~500 Byte 的典型包长,结合奇偶校验码校验机制,对编码后的错误编码包进行定位、删除,根据纠错删码无码率的特性实现接收无误码情形下 LT 码的正确译码。同时,LT-PC 码的译码过程与传统 BP 译码过程有 2 点差异:1) 译码前需要经过奇偶校验机制逐次删除错误编码包;2) 检验出错的编码包,在产生误码扩散之前会被删除。

为检测 LT-PC 码的检错能力,对提出的 LT-PC 码进行单个编码包出错的仿真测试,编码时采用文

献[31]中定义的度分布函数,并添加奇偶校验码进行校验。

设 LT 码编码包个数 $k=512$, 码长 250 Byte, 译码开销为 1%, 接收端采用 BP 译码。实验 1: 随机置错一个参与译码的编码包, 译码完成后进行对比, 记录每次测试译出的错误源数据包数目, 假设测试进行 1000 次; 实验 2: 随机选取不足 1% 的源数据包经过 LT 编码器进行编码, 然后每个编码包经过奇偶校验码进行校验, 校验后的编码包参与译码, 译码完成后进行对比, 记录每次测试出现错误的编码包数目, 假设进行 5 组测试, 每次测试进行 1000 次。

对于实验 1, 测试中译出的错误编码包数目的范围为 0~500, 其中 0~100 发生概率为 70%, 100~200 发生概率为 19.8%, 200~300 发生概率为 8.2%, 300~400 发生概率为 1.9%, 400~500 发生概率为 0.1%; 对于实验 2, 测试每组中错误编码包在 LT 编码生成的整个编码包中的比例, 第 1 组的错误率为 0.49%, 第 2 组的错误率为 0.24%, 第 3 组的错误率为 0.34%, 第 4 组的错误率为 0.12%, 第 5 组的错误率为 0.43%。

从实验 1 中可以看出即使是单个编码包出错也会导致严重的误码扩散, 且译出的错误源数据包数量分布呈集中趋势, 其中 0~100 个源数据包出错的情况占大多数, 而误码扩散严重时可达到源数据包数目的 70% 左右, 因此, 如果在关键的数据中出现很小的错误, 也很可能会引起严重的译码错误; 从实验 2 中可以看出在成功译码的前提下, 算法对于单个错误编码包校验后的出错率小于 0.5%, 因为此时的检错性能仅取决于奇偶校验码自身的性能, 而采用的奇偶校验码尽管有很高的检错性能, 但校验码设计本身对数据出错校验存在小概率漏检缺陷, 只能检测码元中奇数个错误, 从而导致在成功译出源包的前提下, 仍然存在一定的检错失败概率。

同时通过仿真给出 LT 码与 LT-PC 码的译码成功率和译码开销之间的关系。

本次实验中 LT 码编码包个数 k 分别为 500、1000, 码长 250 Byte, 其中 LT 码采用的度分布 $\Omega(d)$ 为鲁棒孤子分布 ($\delta=0.05, c=0.03$)^[16], 则译码开销可表示为

$$\epsilon = (n - k) / n, \quad (8)$$

式中 n 为发送端发送的编码包个数。

根据文献[33]相关公式推导出为 d 编码包译码的成功概率:

$$P_s = \sum_{i=d}^k \Omega_i \frac{n!}{(n-d)!} \frac{(k-n)! [k-n-(i-d)]!}{k! (k-i)!}, \quad (9)$$

式中 i 为 BP 迭代译码次数, 其中 $i=1, 2, \dots, d$ 。

图 4 为 LT 码与 LT-PC 码在 $k=500$ 和 $k=1000$ 时的译码开销与译码成功率的关系。从图 4 可以看出, 后者的性能明显要优于前者。当编码包个数 k 增加时, LT-PC 码的译码成功率增加幅度较大; 当 $0 \leq \epsilon < 0.5$ 时, LT-PC 码的译码成功率要高于 LT 码的译码成功率。在 LT 码编码包后增加校验位会使码长增加运算开销, 但不超过 1%。因此只需 ϵ 不超过 0.5, 即可提升译码成功率。

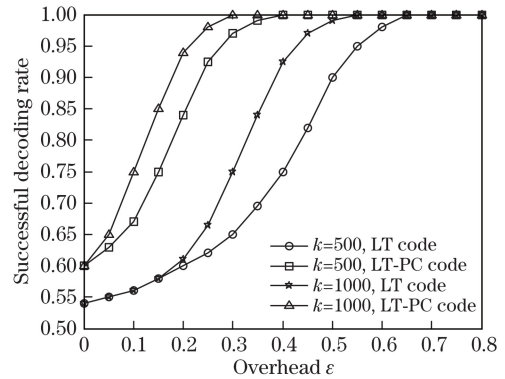


图 4 译码开销与译码成功率的关系图

Fig. 4 Relationship between decoding overhead and successful decoding rate

4 仿真结果

发射激光的波长为 1550 nm, 信道模型服从 Gamma-Gamma 分布, 考虑文献[34-36]中 MIMO-FSO 系统的遍历容量以及系统复杂性, 选取的天线为 $2 \times 2, 3 \times 3$, 讨论不同湍流环境下 LT 码和 LT-PC 码的误码性能。仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 大气湍流仿真参数

Table 1 Atmospheric turbulence simulation parameters

Turbulence environment	$C_n^2 / \text{m}^{-2/3}$	δ^2	α	β
Weak	6.0×10^{-16}	0.3	8.43	7.30
Strong	2×10^{-14}	2.1	4.12	2.42

图 5 为不同湍流环境下通信距离 $L=1000$ m 时 LT 码与 LT-PC 码的误码性能比较图, 根据 (6) 式以及 LT 码与 LT-PC 码的译码成功率进行仿真。从图 5(a) 可以看出, 在弱湍流环境下, 随着信噪比的逐渐增大, 误码率曲线均呈现下降趋势, 相比于天线个数为 2×2 的系统, 天线个数为 3×3 的系

统有大约 3 dB 的编码增益;当天线个数为 2×2 、BER 为 10^{-5} 左右时,LT-PC 码相对 LT 码具有编码增益,约为 0.4 dB,而当天线个数为 3×3 、BER 为 10^{-5} 左右时,两者间的编码增益约为 0.5 dB。从图 5(b)可以看出,相比于弱湍流情形下,强湍流环境时的 BER 曲线下降趋势较平缓,两个系统间的编码增益大约为 4 dB,当天线个数为 2×2 、BER 为 10^{-5} 左右时,相比于 LT 码,LT-PC 码有约为 1.2 dB 的编码增益,而当天线个数为 3×3 、BER 为 10^{-5} 左右时,两者间的编码增益约为 2 dB。分析图 5 可知,未校验的编码包与经过校验的编码包通过弱湍流信道后,由于弱湍流信道中湍流效应较小,导致编码包出错的可能性较小,译码过程中误码扩散现象出现概率较低,所以两者间的编码增益相差不大;而未校验的编码包与经过校验的编码包通过强湍流信道后,由于强湍流信道中湍流效应较大,导致编码包出错的概率较大,译码过程中误码扩散现象出现概率较高,但经过校验的编码包在通过强湍流信道之前,较大程度地删除这些编码包中出错的编码包,降低了在通过强湍流信道后编码包出错的概率,有效遏制误码扩散的产生,因此两者间的编码增益相差较大。

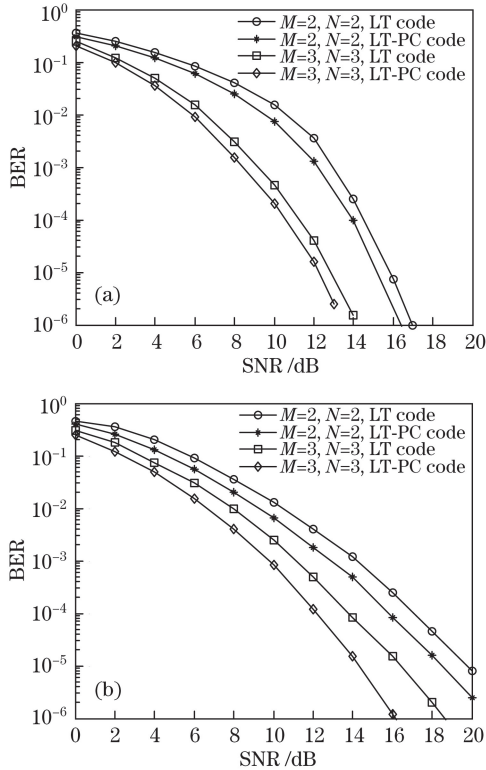


图 5 LT 码与 LT-PC 码的性能比较。(a)弱湍流;(b)强湍流
Fig. 5 Performance comparison of LT codes and LT-PC codes.
(a) Weak turbulence; (b) strong turbulence

图 6 为强湍流环境下通信距离 L 与不同系统的误码率曲线图,此时信噪比为 12 dB,由 (4) 式和 (5) 式可求得 α 与 β ,通信距离 L 范围为 1~3 km。从图 6 可以看出,随着 L 的增大, α 与 β 值逐渐减小,同时系统误码率也逐渐增大;相比于天线个数为 2×2 的系统,天线个数为 3×3 的系统误码率曲线上升趋势较大;当天线个数相同时,相比于 LT 码,LT-PC 码有较小的编码增益优势。这表明,MIMO-FSO 系统的通信距离越长,经过校验的编码包通过强湍流信道后,出错的概率越高,译码过程中误码扩散的概率也越高,从而导致 MIMO-FSO 系统误码率增大,该系统的通信性能下降。

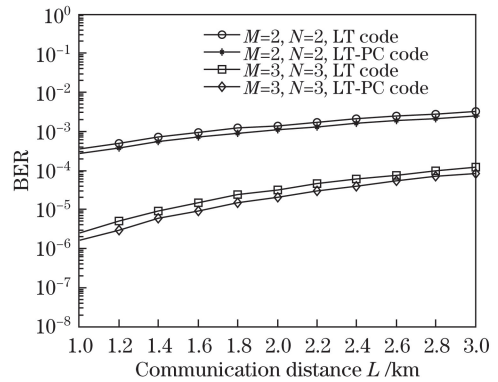


图 6 强湍流环境下通信距离与误码率的关系曲线图
Fig. 6 Relationship between communication distance and BER in strong turbulence

5 结 论

本文将 LT-PC 码应用于 MIMO-FSO 系统,结合奇偶校验码校验机制,通过对错误的编码包进行定位、删除来遏制误码扩散,提高译码成功率,降低 MIMO-FSO 系统误码率,同时比较不同组数天线条件下通信距离对于系统误码率的影响。仿真结果表明:同一湍流环境下,相比于天线个数为 2×2 的系统,天线个数为 3×3 的系统有较大的编码增益,且采用 LT-PC 码后,编码增益有较小的提升;在强湍流环境下,当天线个数相同时,随着通信距离的增大,相比于 LT 码,LT-PC 码仍有一定的编码增益优势。因此,LT-PC 码能降低误码扩散发生概率,从而保证 MIMO-FSO 系统的可靠性。LT-PC 码仅能检测出奇数个错误的编码包,MIMO-FSO 系统性能仍有提升的空间,下一步的工作是寻找更好的检错码。

参 考 文 献

[1] Fidler F, Knapek M, Horwath J, *et al.* Optical

- communications for high altitude platforms[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(5): 1058-1070.
- [2] Walther F G, Michael S, Parenti R R, *et al.* Air-to-ground lasercom system demonstration design overview and results summary[C]. SPIE, 2010, 7814: 78140Y.
- [3] Usman M, Yang H C, Alouini M S. Practical switching-based hybrid FSO/RF transmission and its performance analysis[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5): 7902713.
- [4] Chen C Y, Yang H M, Jiang H L, *et al.* Performance analysis and optimization of partially coherent optical communication links through atmospheric channel[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(8): 1869-1872.
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.
- [5] Hu Q S, Huang Y H, Wang J B, *et al.* Performance analysis of multi-hop free space optics over strong turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906004.
胡青松, 黄玉划, 王俊波, 等. 强湍流下多跳自由空间光通信的性能分析[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906004.
- [6] Han L Q, You Y H. Performance of free space optical communication with combined effects from atmospheric turbulence and pointing errors[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106005.
韩立强, 游雅晖. 大气湍流以及瞄准误差联合效应下自由空间光通信的性能[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106005.
- [7] Ibrahim M M, Ibrahim A M. Performance analysis of optical receivers with space diversity reception[J]. IEE Proceedings-Communications, 1996, 143(6): 369-372.
- [8] Navidpour S M, Uysal M, Kavehrad M. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 2813-2819.
- [9] Tsiftsis T A, Sandalidis H G, Karagiannidis G K, *et al.* Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(2): 951-957.
- [10] Qin M, Chen L, Wang W D. Generalized selection multiuser scheduling for the MIMO FSO communication system and its performance analysis[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(5): 7906609.
- [11] Han L Q, You Y H. Performance of multiple input multiple output free space optical communication under atmospheric turbulence and atmospheric attenuation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0706004.
韩立强, 游雅晖. 大气衰减和大气湍流效应下多输入多输出自由空间光通信的性能[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0706004.
- [12] Ke X Z, Yang L H, Ge Z Y. Vertical Bell Labs layered space-time for FSO MIMO system and hardware simulation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 473-476.
柯熙政, 杨利红, 葛子叶. FSO MIMO 垂直空时分层码研究及硬件仿真[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 473-476.
- [13] Hao S Q, Leng J F. Performance analysis of optical wireless communication based on LDPC codes and MIMO[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(s1): s105006.
郝士琦, 冷蛟峰. 基于 LDPC 码和 MIMO 的无线光通信系统性能[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s105006.
- [14] Fan Y J, Lai L F, Erkip E, *et al.* Rateless coding for MIMO fading channel: Performance limits and code construction[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2010, 9(4): 1288-1292.
- [15] Liu Shitao, Zhang Xun, Cao Yang, *et al.* Research on the application of LT code in MIMO-FSO system[J]. Optical Communication Technology, 2016, 40(12): 49-51.
刘世涛, 张勋, 曹阳, 等. LT 码在 MIMO-FSO 系统中的应用研究[J]. 光通信技术, 2016, 40(12): 49-51.
- [16] Luby M. LT codes[C]//Proceedings of 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science(FOCS'02), 2002: 271-280.
- [17] Mackay D J. Fountain codes[J]. IEEE Proceedings-Communications, 2005, 152(6): 1062-1068.
- [18] Xia D. Research on space-time coding based on MIMO in optical communication[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
夏丹. 空间光通信中基于 MIMO 的空时编码技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- [19] Cao M H, Wang H Q, Huang R, *et al.* BER performance of layered space time code in FSO[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1842-1847.
曹明华, 王惠琴, 黄瑞, 等. FSO 中分层空时编码的误码性能[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1842-1847.
- [20] Heath R, Paulraj A. Diversity versus multiplexing in narrow-band MIMO channels: A tradeoff based on Euclidian distance[J]. IEEE Transactions on

- Communications, 2002, 12: 1-26.
- [21] Li F, Wu Y, Hou Z H. Analysis and experimental research on bit error rate for free-space optical communication systems through turbulent environment[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0606002.
李菲, 吴毅, 侯再红. 湍流大气光通信系统误码率分析与实验报告[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0606002.
- [22] Chen D, Ke X Z. 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.
- [23] Zhu X M, Kahn J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(8): 1293-1300.
- [24] Kiasaleh K. Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(9): 1455-1461.
- [25] Uysal M, Li J, Yu M. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(6): 1229-1233.
- [26] Al-Habash M A, Andrews L C, Phillips R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media[J]. Optical Engineering, 2001, 40(8): 1554-1562.
- [27] Henniger H, Wilfert O. An introduction to free-space optical communications[J]. Radio Engineering, 2010, 19(2): 203-212.
- [28] Nistazakis H E, Tombras G S, Tsigopoulos A D, *et al.* Capacity estimation of optical wireless communication systems over moderate to strong turbulence channel[J]. Journal of Communications and Networks, 2009, 11(4): 384-389.
- [29] Zdravković N, Petkovic M I, Djordjevic G T, *et al.* Outage analysis of mixed FSO/WiMAX link[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1-14.
- [30] Deng P. Studies of novel partially coherent beams propagation through turbulent atmosphere[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013.
邓鹏. 新型部分相干光束及其在湍流大气中的传输特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [31] Xing Y L, Pei Y K, Ge N. LT coding and decoding algorithm with error detection and tolerance ability[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 25(7): 931-935.
邢艳玲, 裴玉奎, 葛宁. 具有检错容错能力的 LT 码编译码算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 25(7): 931-935.
- [32] Ryan W E, Lin S. Channel codes: Classical modern[M]. Bai B M, Ma X, Transl. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2017: 33-35.
威廉·E·瑞恩, 林舒. 信道编码: 经典与现代[M]. 白宝明, 马啸, 译. 北京: 电子工业出版社, 2017: 33-35.
- [33] Jiao J, Zhang Q Y, Li A G. A method of concatenated fountain codes in deep space communication[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(4): 1156-1161.
焦健, 张钦宇, 李安国. 面向深空通信的喷泉编码技术[J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 1156-1161.
- [34] Luong D A, Pham A T. Average capacity of MIMO free-space optical gamma-gamma fading channel[C]. 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2014: 3354-3358.
- [35] Kaur P, Jain V K, Kar S. Capacity of free space optical links with spatial diversity and aperture averaging[C]. 27th Biennial Symposium on Communications (QBSC), 2014: 14-18.
- [36] Alimi I, Shahpari A, Ribeiro V, *et al.* Channel characterization and empirical model for ergodic capacity of free-space optical communication link[J]. Optics Communications, 2017, 390: 123-129.