

大气激光通信中基于遗传算法的交织器设计

周建国^{1,2} 郝士琦^{1,2} 刘加林^{1,2} 冷蛟锋³ 王 勇^{1,2}

(¹脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037
²安徽电子制约技术重点实验室, 安徽 合肥 230037; ³后勤工程学院, 重庆 400030)

摘要 针对大气湍流造成激光通信产生长突发错误的问题,研究了低密度奇偶校验(LDPC)编码结合信道交织的差错控制方案。以交织距离作为适应度函数,提出了一种基于遗传算法的交织器设计方案。分析几种交织方式的距离特性表明所设计交织器较分组交织、随机交织和混沌交织具有明显的性能优势。误码率仿真结果也表明,在弱湍流条件下,当误码率为 10^{-5} 时,基于遗传算法的交织器较 Logistic 映射混沌交织器具有 0.5 dB 的性能优势,而与随机交织器相比,更有 0.87 dB 的性能优势。故该交织器设计方案在大气激光通信中将具有一定的应用价值。

关键词 光通信; 低密度奇偶校验码; 交织器; 交织距离; 遗传算法

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0605004

Interleaver Design Basing on Genetic Algorithm in Atmospheric Optical Communication

Zhou Jianguo^{1,2} Hao Shiqi^{1,2} Liu Jialin^{1,2} Leng Jiaofeng³ Wang Yong^{1,2}

(¹State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (Electronic Engineering Institute),
Hefei, Anhui 230037, China
²Key Laboratory of Electronic Restriction of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China
³Logistical Engineering University, Chongqing, 400030, China)

Abstract Because of the problem about long burst error which is caused by turbulence in atmospheric optical communication, a scheme of low-density parity-check (LDPC) code with channel interleaving is investigated. Taking the interleaving distance as fitness function, a design method of interleaver based on genetic algorithm is put forward. According to the analysis of the distance property about some interleavers, the new interleaver has obvious advantages compared with the block interleaver, the random interleaver and the chaotic interleaver. The simulation results show that compared with the random interleaver and the chaotic interleaver, the interleaver based on genetic algorithm at bit error rate (BER) of 10^{-5} have more gain 0.5 dB and 0.87 dB under weak turbulence, respectively. Above all, the new design scheme of interleaver will have certain utility in atmospheric optical communication.

Key words optical communications; low-density parity-check codes; interleaver; interleaving distance; genetic algorithm

OCIS codes 010.1330; 060.4510; 060.4080

1 引 言

近年来,大气光通信因具有天线尺寸小、数据传输速率高、抗电磁干扰能力强等诸多优点而备受关注。然而大气湍流和衰减效应严重影响着大气激光通信的性能^[1,2]。通常情况下,大气湍流引起的光强闪烁相干时间一般在毫秒至几十毫秒之间^[3],而单个比特符号的持续时间通常为纳秒量级,因此激

光在湍流大气中传输会产生缓慢深度衰落,造成通信系统产生长串的突发错误,仅靠差错控制编码技术很难实现可靠通信,因此有必要引入信道交织技术。国内外对此也展开了相关的研究,文献[4]分析了交织对无线光通信的性能改善作用;文献[5]在无线光通信系统中,给出了 Turbo 码结合信道交织的差错控制方案,仿真分析了不同交织深度下的系统

收稿日期: 2012-12-17; **收到修改稿日期**: 2013-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(60902017)资助课题。

作者简介: 周建国(1987-),男,硕士研究生,主要从事大气激光通信信道编码方面的研究。E-mail: zjg.1019@163.com

导师简介: 郝士琦(1963-),女,教授,博士生导师,主要从事卫星通信和大气激光通信等方面的研究。

E-mail: liu_hsq@126.com

性能;文献[3]将 Turbo 乘积码结合分组交织器应用于大气激光通信中,在不同湍流条件下,误码性能都获得了明显改善;文献[6]为克服湍流引起的光信号随机衰落,将比特交织、分组乘积编码脉冲位置调制(PPM)和迭代解调译码技术相结合,实现了解调译码的外信息联合迭代;文献[7]将低密度奇偶校验(LDPC)码与信道交织相结合应用于光无线信道中的数字视频传输系统,分析了系统允许时延与交织深度的关系。但在大气激光通信链路模型的构建过程中,多数只是提到了交织技术或采用简单的分组交织方式,研究并不深入。本文将 LDPC 码与信道交织技术相结合应用于大气激光通信系统中,提出了一种基于遗传算法对交织器进行优化设计的方

案,能够有效克服大气湍流导致的信道突发错误。

2 系统建模

基于 LDPC 编码与数据交织的大气激光通信链路系统如图 1 所示,在发射端对信息比特编码后经交织器,再经信号调制器调制,最后将光信号通过大气湍流信道传输;在接收端将接收到的光信号由光电探测器完成光电转换,进而实现解调、解交织和译码。

从系统链路可以看出系统抗突发错误能力的强弱主要取决于 LDPC 码纠正连续错误的能力和交织器分散突发错误的的能力,本文重点研究信道交织抗突发错误能力,编码直接采用 IEEE802.16e 标准 LDPC 码。

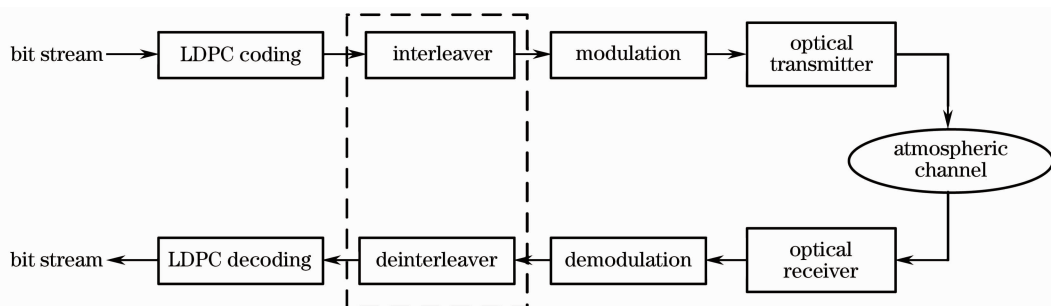


图 1 基于 LDPC 码与信道交织的大气激光通信系统链路框图

Fig. 1 Atmospheric optical communication system based on LDPC coding and channel interleaving

3 交织器距离特性

交织的作用就是打乱输入信息序列的码元位置,使相互邻近的码元在交织后具有尽可能远的距离,以达到将信道突发错误分散成为随机错误的目的。假设信息序列为 $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_N)$, 其位置矢量为 $\mathbf{V} = (V_1, V_2, \dots, V_N) = (1, 2, \dots, N)$, 经交织过后,位置矢量为 $\mathbf{U} = (U_1, U_2, \dots, U_N)$, 为了对交织器距离特性进行描述,建立交织器交织距离模型^[8]:

$$\begin{cases} F_1(\mathbf{V}, \mathbf{U}) = \min |V_i - U_i|, \\ \quad i = 1, 2, \dots, N \\ F_2(\mathbf{V}, \mathbf{U}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} |V_i - U_i| \\ F_3(\mathbf{V}, \mathbf{U}) = \min |U_i - U_{i+k}|, \\ \quad i = 1, 2, \dots, N-k \\ F_4(\mathbf{V}, \mathbf{U}) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} |U_i - U_{i+k}| \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $F_1(\mathbf{V}, \mathbf{U})$ 为相同信息比特交织前后的位置差的最小值,即最小自交织距离; $F_2(\mathbf{V}, \mathbf{U})$ 为相同信息比特交织前后的位置差的平均值,即平均自交织距离; $F_3(\mathbf{V}, \mathbf{U})$ 为位置差为 k 的两邻近信息比特经

交织后的位置差的最小值,即 k 阶最小互交织距离; $F_4(\mathbf{V}, \mathbf{U})$ 为位置差为 k 的两邻近信息比特经交织后的位置差的平均值,即 k 阶平均互交织距离。

4 基于遗传算法的交织器设计

长度为 N 的交织器,总共存在 $N!$ 种不同的交织方式,这 $N!$ 种交织方式组成集合 $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{N!}\}$ 。交织器设计即为在集合 Ω 中搜索满足某种规则的交织方式。而遗传算法是一种基于群体进化的全局优化算法,具有群体优化、物种多样性和并行搜索等诸多优点^[9]。故利用遗传算法设计的交织器将具有优异的性能。

4.1 遗传算法流程

遗传算法包括三个基本操作:选择、交叉和变异,其一般流程如下:

1) 随机产生初始种群,个体数目一定,每个个体表示为染色体的基因编码。

2) 计算个体的适应度,并判断是否符合优化准则。若符合,输出最佳个体及其代表的最优解,并结束计算;否则转向第 3 步。

3) 依据适应度选择再生个体,适应度高的个体被选中的概率高,适应度低的个体可能被淘汰。

4) 按照一定的交叉概率和交叉方法,生成新的个体。

5) 按照一定的变异概率和变异方法,生成新的个体。

6) 由交叉和变异产生新一代的种群,返回到第2步。

4.2 种群初始化

在初始化种群时,为了加快收敛速度,采用伪随机交织器生成初始种群。混沌交织器实质上是一种伪随机交织器,它通过混沌映射所得的序列有优于 m 序列的统计相关性,在此选择传统的 Logistic 映射作为混沌序列产生器,Logistic 映射的表达式为

$$x_{n+1} = \mu x_n(1 - x_n), \quad (2)$$

式中 $0 < x_n < 1, x \neq 0.5, 0.75, n \in \mathbb{Z}$ 。

混沌交织器交织矢量的产生方法如下:

1) 确定交织深度 K 。

2) 产生混沌序列:利用 Logistic 映射式产生 K 个混沌数据。

3) 混沌排序:对 K 个数据组成的混沌序列排序,组成序值向量 $\mathbf{R} = [\pi(t)], t = 1, 2, \dots, K$, 故有 $1 \leq \pi(t) \leq K$; 若出现 $\pi(t)$ 中重复序值,则重复此步。

4) 确定输出数值的序值:假定输入数据序列的第 v 个数据与混沌序列第 t 个相对应,则经过混沌排序后输出的序值为: $\pi(v) = \pi(t), 1 \leq t \leq K$ 。

4.3 选择、交叉、变异

选择:所有个体按照“自然选择,优胜劣汰”的繁殖规律,每次最优保留个体。

交叉:由于各个交织器内部相互关联,所以不采用交叉^[10]。

变异:随机选取位置矢量中两个元素,互换其位

置,得到新的位置矢量即为变异个体,如图2所示。

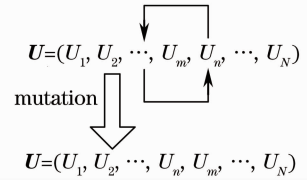


图2 变异操作

Fig. 2 Mutation step

4.4 适应度函数选取

交织器距离特性是衡量交织器的好坏的重要指标,因此适应度函数可以由第3节所述的交织距离模型变化获得,具体变化过程如下。

根据交织器的距离特性,定义多目标函数

$$\max_{U \in \Omega} F(\mathbf{V}, \mathbf{U}) = [F_1(\mathbf{V}, \mathbf{U}), F_2(\mathbf{V}, \mathbf{U}), F_3(\mathbf{V}, \mathbf{U}), F_4(\mathbf{V}, \mathbf{U})]. \quad (3)$$

采用线性加权法,为每个单目标函数分配一个权重系数,然后将所有目标线性累加为单目标函数。因此(3)式的目标函数可转化为

$$\max_{U \in \Omega} F(\mathbf{V}, \mathbf{U}) = \omega_1 F_1(\mathbf{V}, \mathbf{U}) + \omega_2 F_2(\mathbf{V}, \mathbf{U}) + \omega_3 F_3(\mathbf{V}, \mathbf{U}) + \omega_4 F_4(\mathbf{V}, \mathbf{U}). \quad (4)$$

由于 $F_2(\mathbf{V}, \mathbf{U})$ 和 $F_4(\mathbf{V}, \mathbf{U})$ 分别是 $F_1(\mathbf{V}, \mathbf{U})$ 和 $F_3(\mathbf{V}, \mathbf{U})$ 的小尺度细化^[8], 因此可将目标函数简化,从而获得适应度函数为

$$f_{\text{fit}} = \max_{U \in \Omega} F(\mathbf{V}, \mathbf{U}) = \omega_1 F_1(\mathbf{V}, \mathbf{U}) + \omega_3 F_3(\mathbf{V}, \mathbf{U}). \quad (5)$$

4.5 基于遗传算法的交织器设计流程

遗传交织器流程图如图3所示,主要流程如下:

1) 确定种群大小 M 和交织长度 N , 利用 Logistic 映射混沌交织器生成初始种群。

2) 计算种群中各个交织器的适应度值 f_{fit} , 在此认为自交织距离与互交织距离同等重要,故令

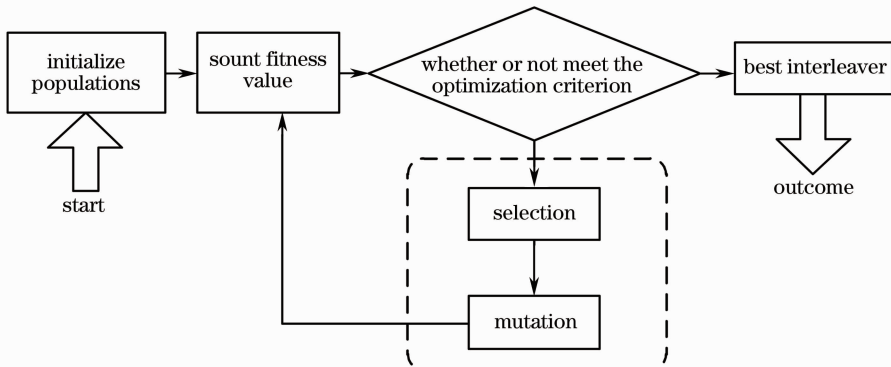


图3 遗传交织器产生流程图

Fig. 3 Flow chart of genetic interleaver

$\omega_1 = \omega_3 = 0.5$ 。

3) 将 M 个交织器按照 4.3 节所述变异操作, 得到 M 个变异后的交织器。

4) 将得到的 M 个交织器与原有的交织器按适应度排序, 根据优胜劣汰原则, 选择 M 个交织器, 每次保留最优交织器。

5) 重复步骤 3)、4), 直到满足设计要求或迭代次数 l 为止。

5 仿真与分析

交织长度为 150 时, 采用第 3 节所述距离模型计算分组交织器、随机交织器、混沌交织器和遗传交织器的距离特性, 结果见表 1 所示。遗传交织器虽

表 1 几种交织器的距离特性 [$F(\mathbf{V}, \mathbf{U}) = 0.5F_1(\mathbf{V}, \mathbf{U}) + 0.5F_3(\mathbf{V}, \mathbf{U}), N=150$]

Table 1 Distance property of several interleavers [$F(\mathbf{V}, \mathbf{U}) = 0.5F_1(\mathbf{V}, \mathbf{U}) + 0.5F_3(\mathbf{V}, \mathbf{U}), N=150$]

	Block interleaver	Random interleaver	Chaotic interleaver	Genetic interleaver	
				$l=50$	$l=100$
$F_1(\mathbf{V}, \mathbf{U})$	0	1	1	4	8
$F_2(\mathbf{V}, \mathbf{U})$	45.7	54.1	50.0	52.4	52.4
$F_3(\mathbf{V}, \mathbf{U})$	10	2	2	10	9
$F_4(\mathbf{V}, \mathbf{U})$	17.7	49.4	57.7	54.7	52.9
$F(\mathbf{V}, \mathbf{U})$	5	1.5	1.5	7	8.5

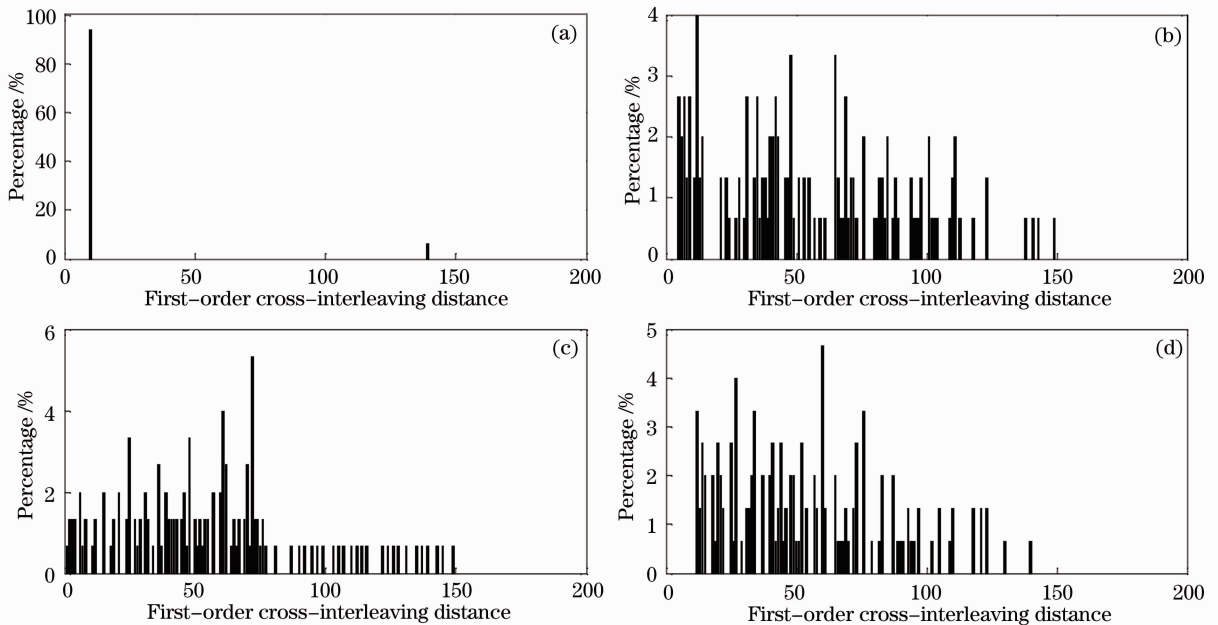


图 4 几种交织器的一阶互交织距离。(a) 分组交织器; (b) 随机交织器; (c) 混沌交织器; (d) 遗传交织器

Fig. 4 First-order cross-interleaving distance of several interleavers. (a) Block interleaver; (b) random interleaver; (c) chaotic interleaver (logistic mapping); (d) genetic interleaver

大气激光通信系统是一个受大气湍流乘性噪声和加性高斯噪声影响的级联信道^[11], 信道条件较为恶劣。图 6 分析了不同交织器应用于大气激光通信系统中对差错性能的影响, 大气湍流信道中光强起

然在平均交织距离特性上表现不出明显优势, 但在最小交织距离特性方面有着极其显著的优势。此外, 平均交织距离又是最小交织距离的小尺度细化, 而交织器的性能主要还是取决于最小交织距离特性, 因此本文所设计的遗传交织器相比于其他几种交织方式具有明显优势。不同交织器的一阶互交织距离统计特性如图 4 所示。图 5 显示了几种交织器的扩散图, 分组交织器的扩散图比较规则, 而其他三种交织器的扩散图则随机性较强, 但遗传交织器的扩散图中分散比较均匀, 没有出现局部密集的情况, 因此遗传交织器相比于其他几种交织器具有更优的性能, 在大气激光通信中能够有效克服湍流效应所引起的连续突发错误。

服从对数正态分布^[3], 图中横坐标 E_b/N_0 表示编码后的信噪比。仿真中对数光强起伏方差 $\sigma_{\ln I}^2 = 0.1$, 编码采用 IEEE802.16e 标准的 LDPC 码, 选择码率为 2/3, 调制方式为开关键控(OOK), 译码采用

置信传播(BP)译码算法,迭代次数为100次。考虑到激光通信中LDPC码不宜太长,以免引入过多的编译码时延^[12],故选择LDPC码的码长为576。从图6中可以看出,在大气激光通信信道条件下,采用LDPC码结合交织的差错控制方案与仅采用LDPC编码的差错控制方案相比具有明显的性能优势。LDPC码配合不同的交织方式,误码性能也有所差异,在误码率(BER)为 10^{-5} 时,采用基于遗传算法

设计的交织器较混沌交织器具有0.5 dB的性能优势,而与随机交织器相比,更有0.87 dB的性能优势。需要注意的是,基于遗传算法的交织器设计复杂程度与交织长度、初始化种群大小、适应度函数选择以及迭代次数都有密切关系,在实际应用的时候,需在系统时延要求与抗突发错误性能之间做折中处理。

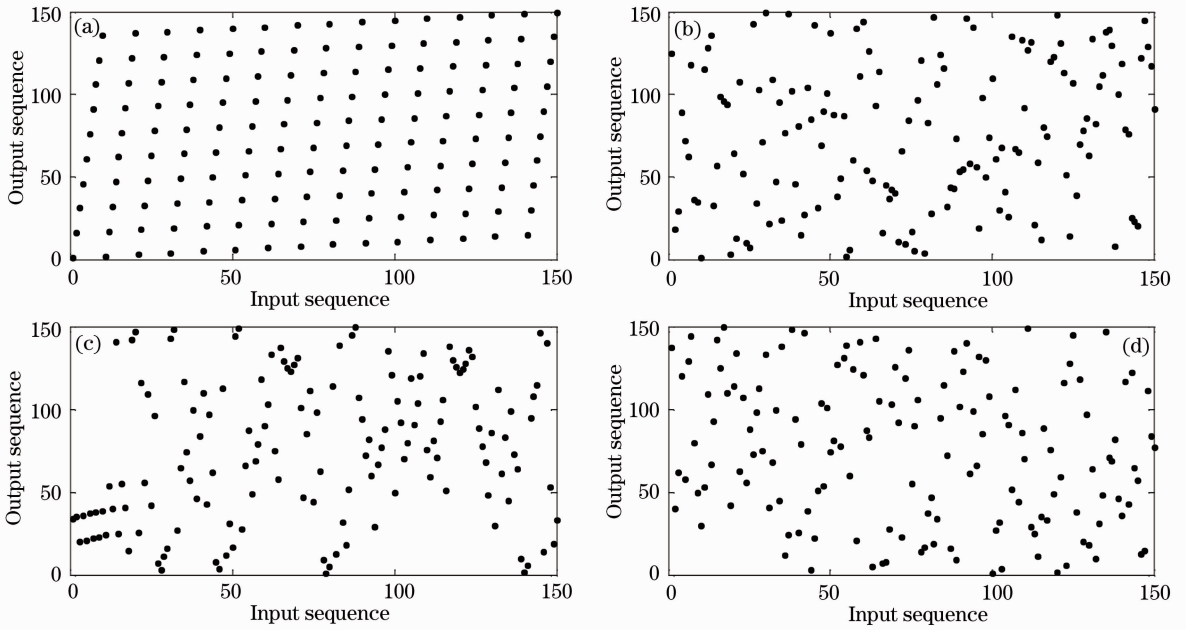


图5 几种交织器扩散图。(a)分组交织器;(b)随机交织器;(c)混沌交织器;(d)遗传交织器

Fig. 5 Scatter diagram of several interleavers. (a) Block interleaver; (b) random interleaver; (c) chaotic interleaver (logistic mapping); (d) genetic interleaver

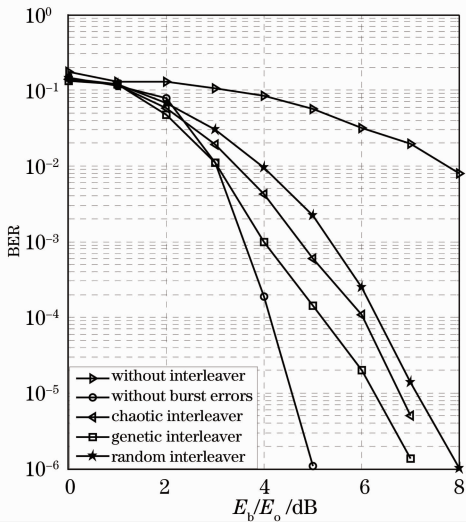


图6 基于LDPC码与信道交织的大气激光通信系统误码性能曲线

Fig. 6 BER curves of atmospheric optical communication system based on LDPC coding and channel interleaving

6 结 论

在大气激光通信系统中,采用信道编码与交织结合的差错控制方案能够有效克服因大气湍流导致的信道突发错误。基于此,提出了一种基于遗传算法的交织器优化设计方案,通过分析几种交织器的距离特性,表明本文所设计的交织器与分组交织器、随机交织器和混沌交织器相比具有一定的性能优势,在弱湍流条件下仿真所获得的误码性能曲线也表明本文所设计交织器明显优于其他几种交织器。且该交织器在大气激光通信领域抗信道突发错误方面,将具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- Li Fei, Wu Yi, Hou Zaihong. Analysis and experimental research on bit error rate for free-space optical communication systems through turbulent atmosphere[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研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(6): 0606002
- 2 Li Fei, Hou Zaihong, Wu Yi. Error performance for free-space optical communication systems in a real turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0906003
- 李 菲, 侯再红, 吴 毅. 实际大气中无线光通信的系统差错性能[J]. 光学学报, 2012, **32**(9): 0906003
- 3 Xie Weiliang, Liu lu, Tang junxiong. Characterization of time parameter of error control scheme in optical wireless communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 575~578
- 谢伟良, 刘 璐, 汤俊雄. 无线光通信差错控制系统的时间参数特性[J]. 中国激光, 2004, **31**(5): 575~578
- 4 Frederic M. Davidson, Yutai T. Koh. Interleaved convolutional coding for the turbulent atmospheric optical communication channel[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1988, **36**(9): 993~1003
- 5 Yaoqiang Han, Anhong Dang *et al.*. Theoretical and experimental studies of turbo product code with time diversity in free space optical communication [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(26): 20978~20988
- 6 Hu Hao, Wang Hongxing, Xu Jianwu *et al.*. Bit interleaved product coded pulse position modulation with iterative demodulation for free-space optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806004
- 胡 昊, 王红星, 徐建武等. 无线光通信中一种迭代解调的比特交织乘积编码脉冲位置调制[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0806004
- 7 Neda Cvijetic, Stephen G Wilson, Radivoje Zarubica. Performance evaluation of a novel converged architecture for digital-video transmission over optical wireless channels[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(11): 3366~3373
- 8 Liu Wenming, Zhu Guangxi, He Yejun. New short interleaver design for Turbo codes[J]. *J. Communication*, 2005, **26**(11): 62~67
- 刘文明, 朱光喜, 何业军. 一种新的短帧交织器设计[J]. 通信学报, 2005, **26**(11): 62~67
- 9 Leng Jiaofeng, Hao Shiqi, Lü Xuguang. Study on bit-symbol mapping method of MPPM and system performance based on LDPC codes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0406001
- 冷蛟锋, 郝士琦, 吕旭光等. 基于 LDPC 码的 MPPM 比特符号映射射系统性能研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 0406001
- 10 Gao Hongfeng, Xu Zongze. Interleaver of Turbo code optimization using genetic algorithms[J]. *J. Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2004, **36**(3): 388~391
- 高宏峰, 许宗泽. 用遗传算法优化 Turbo 码交织器[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, **36**(3): 388~391
- 11 Chen Dan, Ke Xizheng, Qu Fei. Research on homomorphism filtering technology of wireless optical communication based on four frequency shift keying modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205001
- 陈 丹, 柯熙政, 屈 菲. 基于四进制频移键控调制的无线光通信同态滤波技术研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0205001
- 12 Yuan Jianguo, Ye Wenwei, Mao Youju. Study on the SFEC code type based on the LDPC code for optical communication systems [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(11): 1450~1453
- 袁建国, 叶文伟, 毛幼菊. 光通信系统中基于 LDPC 码的 SFEC 码型研究[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(11): 1450~1453

栏目编辑: 王晓球