

FSO 通信系统中基于交织技术的 Spinal 码突发纠错策略

敖珺,张菲,马春波*

(桂林电子科技大学 信息与通信学院,广西 桂林 541004)

摘要:Spinal 码的无速率特性使其在自由空间光通信系统中具有良好的应用前景。针对 Spinal 码在湍流信道下遇到突发差错导致系统性能下降的问题,提出将交织技术引入 Spinal 码的编译码过程,并在基于 GPU 的仿真平台上对 Spinal 码的性能进行仿真。仿真结果表明:在湍流信道和加性高斯白噪声(AWGN)信道下,经过交织的 Spinal 码译码成功时所用的通道数低于未交织的 Spinal 码,其平均码率也比未交织时高约 0.4~3.8 bit/symbol。此外,经过交织的 Spinal 码在大气湍流信道下的性能波动比未交织的 Spinal 码小一半以上。

关键词:Spinal 码;自由空间光通信;交织;湍流信道

中图分类号:TN914 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)07-0051-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.07.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Outburst error correction strategy for Spinal codes in FSO communication systems based on an interleaving technique

AO Jun, ZHANG Fei, MA Chunbo*

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Spinal codes have a promising application in free space optical communication systems due to its rateless nature. This paper presents the idea of introducing the interleaved technique into the process of Spinal codes' coding and encoding to solve the problem of system performance degradation when signals are transmitted through turbulence channels, which can cause outburst errors. The performances of the Spinal codes are simulated on the GPU-based platform. The simulation results show that in both turbulence channels and additive white gaussian noise (AWGN) channels, the number of passes used in the interleaved Spinal code is less than that of the uninterleaved Spinal code and its average rate is about 0.4 bit/symbol to 3.8 bit/symbol higher than the uninterleaved Spinal code. In addition, the performance fluctuation of the interleaved Spinal codes over atmospheric turbulence channels is less than half of the uninterleaved Spinal codes.

Key words: Spinal codes; free space optical communication; interleave; turbulence channels

0 引言

自由空间光通信作为一种新兴的宽带接入方式,以其易于架设、无需频谱许可和安全性强等优点受到了人们的广泛关注。但是由于大气效应对传输光束的

影响,这种通信系统难以获得较高的吞吐量^[1,2]。为了提升系统的性能,有学者将 Spinal 码^[3]这种具备比特速率可调特性的差错控制编码引入自由空间光通信系统中。近年来,人们对自由空间光通信系统内 Spinal 码的研究主要集中在其译码算法的设计和应用实现方面^[4-6],未考虑大气湍流对通信系统性能的影响。而由大气湍流引起的长串突发错误对属于短码的 Spinal 码而言,很容易超出其纠错能力,使其无法通过译码得到正确的信息序列。

针对上述问题,本文将交织技术引入 Spinal 码的编译码过程,采取由同一条信息序列编码产生的多个数据包进行交织后再发送给接收端的方法,把较长的

收稿日期:2018-12-05。

基金项目:广西自然科学基金资助项目(2018GXNSFAA294056)资助。

作者简介:敖珺(1978-),女,教授,博士,博士研究生导师,长期从事信号与信息处理、纠错编码和光通信技术等方面的研究工作。主持和主研国家自然科学基金、863 重大专项等十余项科研项目,现任激光链路某星三代数据链路层总设计师、探索一代激光某系统项目负责人。



*通信作者:马春波(E-mail: machunbo@guet.edu.cn)。

突发错误离散成随机差错,提高 Spinal 码的译码成功率,继而提升系统的整体性能。

1 基本原理

1.1 Spinal 码的编译码基本原理

Spinal 码编码机制的核心在于哈希函数的使用。Spinal 码在编码时,首先将长度为 n 的信息序列 M 分成 n/k 组,每组的长度为 k 。然后取一个随机数种子 s_0 与第一小段的信息作为哈希函数的 2 个输入,得到 s_1 。将得到的 s_1 与第二段信息序列作为哈希函数的输入,输出为 s_2 。以此类推得到 n/k 个 $s_i(i=1, \dots, n/k)$ 。接着将 $s_i(i=1, \dots, n/k)$ 分别作为随机数生成器的输入,得到 n/k 个 $x_i(i=1, \dots, n/k)$,每个 $x_i(i=1, \dots, n/k)$ 的长度为 c bit。最终可得一个编码通道 $x_1x_2 \dots x_{n/k}$,即为编码符号序列。

Spinal 码在译码时,译码端通过复现编码端的编码方式来构造译码树,使用最大似然译码算法选择译码算法开销最小的比特序列作为正确的译码结果。由于译码开销和最小的几个分支所对应的信息序列只有后面若干个比特是不同的^[3],因此可以对译码树进行裁剪来减少计算量。

1.2 交织器的选择

通信系统中的交织器能够将影响较大的突发错误交织分散后转变为影响较小的随机差错,以达到对抗突发错误的目的。现有的交织技术可分为两大类:规则交织器和随机交织器。其中,规则交织器主要包括行列式分组交织器^[7]、分组螺旋交织器^[8,9]、循环移位交织器和 3GPP 标准交织器^[10,11]等 4 个类型;随机交织器主要指伪随机交织器^[12]和半(S-Random)随机交织器^[13]。

在以上几种交织器中,行列式分组交织器和分组螺旋交织器对交织长度的设定都是固定的,即将信息比特按照一定规则写入一个固定大小的矩阵,再将矩阵中的信息按照一定的规则读出即可得到交织后的信息序列,均具有固定的映射关系和距离属性。循环移位交织器由于其方法本身的规律性,很难将具有低码字重量大于 2 的输入序列置换为具有高码字重量的其它输入序列。伪随机交织器在交织前要先设定好交织的距离跨度 S , S 越大,随机度越大,同时构造交织的时间也越长,而且不一定能构造成功。对于 3GPP 标准下的交织器来说,它能够针对不同的帧长度,设定不同的交织参数和交织方案,包括交织矩阵中行数

与列数的设定、行内和行间的交织规则设定等。与其它固定交织矩阵大小的交织器相比,它的交织矩阵大小可以根据输入序列长度的不同做出相应改变,因此这种交织器可以在提升 Spinal 码性能的同时保障 Spinal 码无速率特性的发挥。综合以上讨论,本文选择交织长度灵活可变、映射关系不唯一的 3GPP 标准的交织器作为交织方案。

2 基于交织的 Spinal 码编译码策略

基于交织的 Spinal 码编译码策略主要针对开关键控(OOK)调制的 Spinal 码在弱湍流信道中传输的情况,把交织器引入 Spinal 码的编码和译码过程,将较长的突发错误离散成随机差错,减弱大气湍流对通信系统的影响来达到提高译码成功率、提升系统性能的目的。图 1 为基于 Spinal 码编码与数据交织的自由空间光通信链路流程图。

基于交织的 Spinal 码编译码策略描述如下:Spinal 码

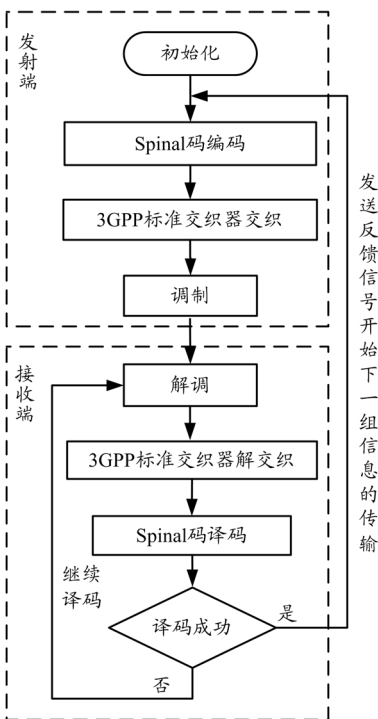


图 1 基于 Spinal 码编码与数据交织的自由空间光通信链路流程图

编码器对长度为 n 的信息序列 M 进行编码,产生多个编码通道(Pass),分别为 Pass1、Pass2、 $\dots$ 、PassN 共 N 个 Spinal 码编码符号序列,将这 N 个序列一起送入交织器进行交织,得到交织后的信息序列,该信息序列经过处理后由发射端发送给接收端;接收端对接收到的信息进行解交织,得到 N 个有噪的 Pass,按照顺序对这 N 个 Pass 进行译码,只要译码器能够对其中的一个 Pass 成功译码,接收端就可以得到信息 M 的正确译码结果;成功译码后,接收端只需要发送一个非常简单的反馈信号告知发送端译码成功即可,之后发送端停止发送此信息序列,开始发送下一组新的信息;若接收到的 N 个 Pass 全部译码失败,则接收端继续对接收到的下一组 N' 个 Pass 进行译码操作。

在本文研究的优化策略中,针对一个信息段 M ,首次设定的交织 Pass 数为 1($N_1=1$),之后依次递增,即第二次交织 10 个 Pass($N_2=10$),第三次交织 20 个 Pass($N_3=20$)。以此类推,将交织后的信息序列依次发送给接收端,直到交织数量达到上限或者编码端收到译码端的反馈信号时,结束本段信息序列的发送,开始对下一段信息序列进行传输。

参加交织的 Pass 数可表示为:

$$N = \begin{cases} 1, & l=1 \\ 10(l-1), & l>1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, l 表示进行交织的次数。由于本文的研究重点主要在 Spinal 码的交织优化策略上,因此对最优的交织 Pass 数没有进行深入探讨,文中所取的 N 值主要用于数据的对比分析。

3 Spinal 码在不同信道条件下的性能分析

我们对自由空间光通信中基于交织的 Spinal 码编译码系统进行性能仿真与分析。系统选择光电二极管(PIN)作为光电探测器,OOK 调制方式。针对 Spinal 码译码器,将 Spinal 码译码算法中译码树的路径开销在 GPU 上进行并行化计算,进一步降低译码开销的计算量。同时将传统的 Spinal 码与本文设计的改进 Spinal 码分别在加性高斯白噪声(AWGN)信道与弱湍流信道下进行性能的仿真测试。

3.1 信道模型

当发射端采用 OOK 调制且接收端使用 PIN 光电二极管时,接收端接收到的光信号经过光电转换后产生的光电子计数统计特性用服从 (m_x, σ_x^2) 的高斯分布进行近似,其中, $x=0$ 或 $x=1$ ^[14]。

由湍流引入的信道衰落 $p(h)$ 的分布用对数正态分布表示为^[15]:

$$p(h) = \frac{1}{h\sqrt{2\pi\sigma_{\ln l}^2}} \exp\left[-\frac{(\ln h + 0.5\sigma_{\ln l}^2)^2}{2\sigma_{\ln l}^2}\right] \quad (2)$$

其中, $\sigma_{\ln l}^2 = \ln(1 + \sigma_l^2)$ 为光强起伏方差, σ_l^2 为闪烁指数, h 为衰落系数。

在本文的仿真中,信道模型参数设置如下:时隙 $T_s = 5 \times 10^{-10}$ s,背景光强度 $P_b = 3 \times 10^{-14}$ W,响应度 $R' = 0.875$,噪声带宽 $W = 2.2 \times 10^9$ Hz,负载阻抗 $R_L = 380 \Omega$,开尔文温度 $T = 300$ K,暗电流 $i_s = 2.0 \times 10^{-9}$ A,闪烁指数 $\sigma_l^2 = 0.1$ 。

3.2 编译码参数选择与仿真结果分析

测试在 Windows XP SP3 操作系统下基于 GPU 的仿真平台上进行,处理器为 Nvidia GTX650ti,使用软件为 VS2008+CUDA5.5。

3.2.1 保留译码路径条数的选择

有效信息长度 $n=64$,每个分段比特数 $k=8$,编码符号长度 $c=12$ 时,在保留不同数量的译码路径条件下 Spinal 码的性能比较如图 2 所示。从图 2(a)可以看出,在不同的信噪比条件下,译码端保留路径条数越多,译码成功时一共传输的数据包数量越少,这与理论结果相一致;保留译码路径条数越多,正确的译码路径在进行分支裁剪后被保留下来的概率越大。在 $SNR=70$ dB 时,保留不同译码路径数量条件下,译码成功平均用时的比较如图 2(b)所示。可以看出,Spinal 码的译码时间随着保留路径条数的增加而明显增大。综合图 2 可知,译码器的性能随着译码路径条数的增

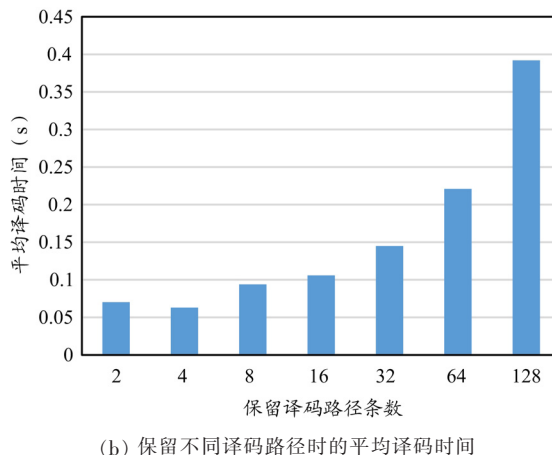
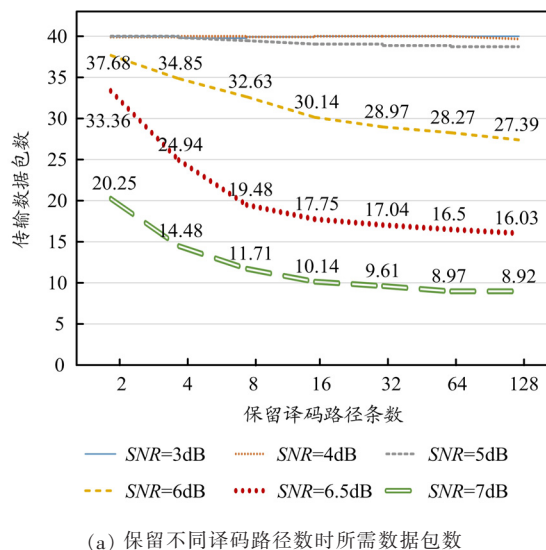


图2 保留不同译码路径条数时的 Spinal 码性能比较

加得到提升,但同时译码的空间复杂度和时间复杂度也会随之增加。考虑到计算资源消耗和硬件配置,本文选择的保留译码路径条数为 32。

3.2.2 编码符号长度 c 的选择

有效信息长度 $n=64$, 每个分段比特数 $k=8$, 裁剪保留译码路径条数取 32, 设置不同编码符号长度 c 时, Spinal 码译码成功所用通道数的比较如图 3 所示。在本文的性能仿真中,做出了发送端源源不断发送编码包的假设。实际上,当传输通道数在 1000 以上时,可视为此段信息译码失败,编码端放弃此段信息,开始下一段信息的传输。因此参数 c 的取值对 Spinal 码的性能有很大影响; c 的取值越大, Spinal 码表现出的性能越优秀。但是随着 c 的增大,译码器译码时占用的系统资源也会增大,因此要根据系统的计算能力和编码效率折中选择合适的 c 值。

3.2.3 仿真结果分析

我们将 Spinal 码编译码参数分别设置为: n 依次取 32、64、128 和 256, $k=8$, $c=12$, 保留路径条数为 32。由于码率 $RATE=k/N''$ (bit/symbol), 其中 N'' 表示一共发送的通道数。所以,当 $N''=1$ (即接收端只需接收 1 个通道就能译码成功)时,可以达到最大码率^[1]。

不同编码长度条件下,有交织和未交织 2 种类型的 Spinal 码在 AWGN 信道与弱湍流信道下的性能比较如图 4 所示。I(Interleave)&NT(No Turbulence)表示有交织且光束在 AWGN 信道下传输的情况;I&T 表示基于交织的 Spinal 码在弱湍流信道下传输的情况;NI&NT 表示未交织的 Spinal 码在 AWGN 信道下传输的情况;NI&T 表示未交织的 Spinal 码在弱湍流信道下传输的情况。可以看出,当 Spinal 码的码长大于 120 时,经过交织的 Spinal 码在弱湍流信道和 AWGN 信道中的性能均要好于没有经过交织的 Spinal 码,并且随着发射光强度的增大,经过交织的 Spinal 码性能表现越来越好。

在 AWGN 信道下,4 种长

度的 Spinal 码在交织后的性能均要远远好于没有经过交织的 Spinal 码。同时,在发射光强度相同的条件下, Spinal 码的码字越长,仿真测试得到的码率越低。这是由其树搜索译码算法本身的特点导致的:码字越长,丢失正确路径的概率越大^[3]。所以在确定 Spinal 码编译码参数时要折中选择信息长度 n 、每个分组的长度 k 和编码符号长度 c 。

在弱湍流信道下,由于大气湍流对传输光束的影

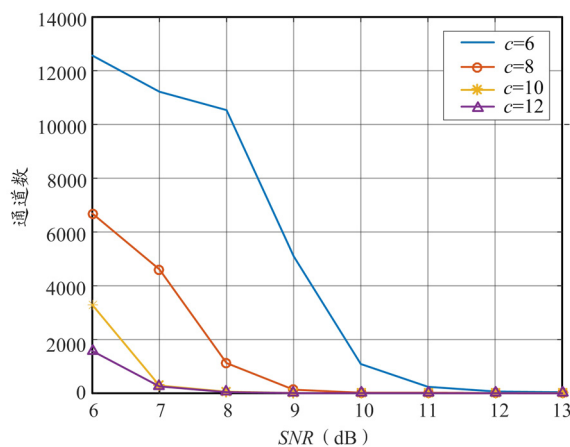
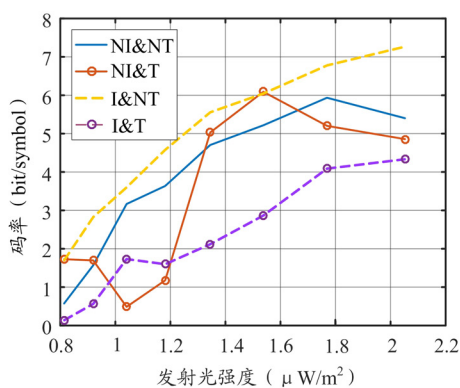
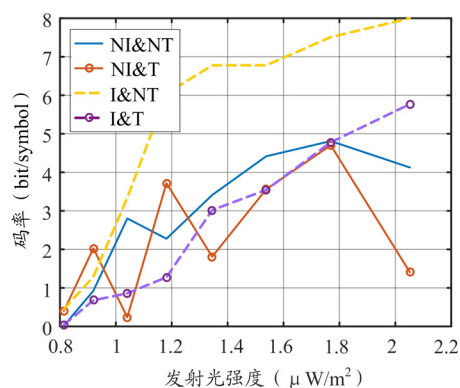


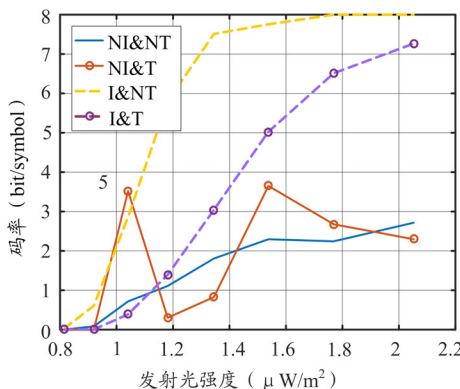
图3 选择不同编码符号长度时的 Spinal 码性能比较



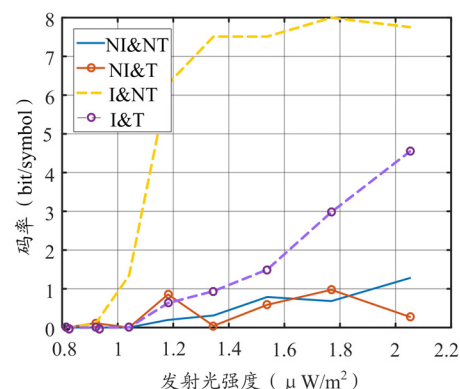
(a) Spinal 码长为 72



(b) Spinal 码长为 120



(c) Spinal 码长为 216



(d) Spinal 码长为 408

图4 不同条件下 Spinal 码的性能比较

响,原Spinal 码的码率并不会随着发射光强度的增加而增大,而是表现出了一定的上下波动,这种波动比基于交织的 Spinal 码大了一倍左右。在此条件下,即使增大发射光功率,也无法有效缓解由大气湍流所引起的系统性能下降的问题。而基于交织的 Spinal 码可以将大气湍流造成的连续突发错误离散成随机差错,从而增大译码的成功概率。其码率随着发射光功率的增大而稳步增长,直至达到最大值。交织与不交织的 Spinal 码平均码率差值比较结果如图 5 所示。结合图 4 可知,当发射光强度大于 $1.2 \mu\text{W}/\text{m}^2$,即信噪比大于 8 dB 时,经过交织的 Spinal 码平均码率开始大于没经过交织的 Spinal 码,比后者高约 0.4~3.8 bit/symbol。因此,本文提出的基于交织技术的 Spinal 码能够有效解决原 Spinal 码遇到突发差错导致系统性能下降的问题,达到了提升系统性能的目的。

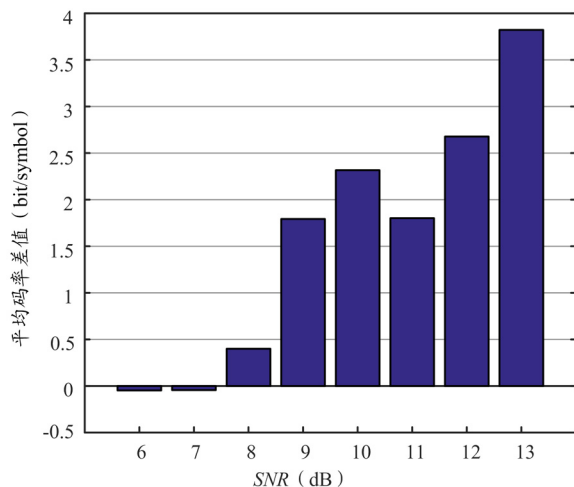


图 5 交织与不交织的 Spinal 码平均码率差值比较

4 结束语

Spinal 码在弱大气湍流信道下传输时,易产生连续的长串突发错误,译码器无法对这种连续性的长串突发差错进行纠正来得到正确的译码结果。在这种情况下,接收端会不断对信息进行接收和译码操作,直到满足终止条件。大气湍流的存在导致接收端往往需要接收大量的通道来完成 Spinal 码的正确译码,因此 Spinal 码的码率变低,系统的性能也会下降。针对这种现象,本文提出了将 Spinal 码进行多通道交织后再发送的策略来提高系统的抗突发差错能力,提升系统性能。通过仿真对比分析,在湍流信道和 AWGN 信道下,本文提出的 Spinal 码优化策略的性能优于原 Spinal 码,在一定程度上缓解了大气湍流对传输信号的干扰

作用。本文仅对 Spinal 码在信号衰落服从对数正态分布的湍流信道中的性能进行了讨论,在进一步工作中可对服从 Gamma-Gamma 分布的大气湍流信道中 Spinal 码的性能进行研究。

参考文献:

- [1] RICKLIN J C, HAMMEL S M, EATON F D, et al. Atmospheric channel effects on free-space laser communication [J]. Journal of Optical & Fiber Communications Reports, 2006, 3(2): 111-158.
- [2] MAJUMDAR A K. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel [J]. Journal of Optical & Fiber Communications Reports, 2005, 2(4): 345-396.
- [3] PERRY J, IANNUCCI P A, FLEMING K E, et al. Spinal codes[J]. Acm Sigcomm Computer Communication Review, 2012, 42(4): 49-60.
- [4] 李娟. 无速率 Spinal 码译码算法研究及复杂度分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [5] 于晓璞. 不等错误保护 Spinal 码的设计与研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [6] 范召. 无速率 Spinal 码的 FPGA 实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [7] KARIM S M, CHAKRABARTI I. Design of pipelined parallel turbo decoder using contention free interleaver [C]//ENCON 2011-2011 IEEE Region 10 Conference, Nov. 21-24, 2011, Bali, Indonesia. Piscataway: IEEE, 2011.
- [8] BARBULESCU AS, PIETROBON SS. Terminating the trellis of turbo codes in the same state[J]. Electronics Letters, 1995, 31(6): 22-23.
- [9] 苏鹤禄, 蒋宇中. Turbo 码交织器的设计 [J]. 舰船电子工程, 2006, 26(1): 157-160.
- [10] WANG X, POOR H V. Iterative (turbo) soft interference cancellation and decoding for coded CDMA[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(7): 1046-1061.
- [11] 朱志辉, 游敏惠. 3GPP Turbo 解码器解交织矩阵的硬件实现[J]. 电子设计应用, 2006(5): 82-84.
- [12] GAZI O. Prunable Collision Free Random Interleaver Design [J]. Wireless Personal Communications, 2012, 65(3): 555-566.
- [13] LI X, CHEN Z. A design of improved flexible-length S-random interleaver [C]// International Conference on Computer Research & Development, March 11-13, 2011, Shanghai, China. Piscataway: IEEE, 2011.
- [14] 敖珺, 梁积卫, 马春波, 等. 自由空间光通信中基于 Q 学习算法的 Raptor10 码译码策略 [J]. 中国激光, 2017(9): 227-235.
- [15] XARCHA V, STASSINAKIS A N, NISTAZAKIS H E, et al. Wave-length diversity/or Free Space Optical Systems: Performance evaluation over log normal turbulence channels[C]// International Conference on Microwave Radar & Wireless Communications, May 21-23, 2012, Warsaw, Poland. Piscataway: IEEE, 2012.