

空间激光通信系统中的信道纠错编码技术

张金刚¹, 罗煜缤¹, 于思源², 耿 驰²

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;

2. 哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 由于空间激光通信系统的信道状态和链路捕获跟踪的不确定性, 多种形式的信道纠错编码技术正被广泛发展研究。结合空间激光通信链路中误码性能的主要影响因素, 分别选择合适的编码方案进行分析。通过仿真实验可知, 对于在大气结构参数为 $1.5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 、风速为 20 m/s 的空地激光链路的环境下, 在系统数据速率为 2 Gbit/s、要求误码率为 10^{-6} 时, LDPC 码结合交织码相对未编码系统有 3 dB 的等效编码增益, LT 码相对未编码系统有 3.8 dB 的等效编码增益。提供了一种能快速生成、扩展和校验的编码和交织实现方法, 以抵抗大气湍流的快速变化对系统性能产生的影响。

关键词: 空间激光通信; 信道纠错编码; 交织; 编码增益

中图分类号: V475.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2021) 05-0036-08

Channel Coding Technology in Space-Based Laser Communication

ZHANG Jingang¹, LUO Yubin¹, YU Siyuan², GENG Chi²

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Because of the channel state of the space laser communication system and the uncertainty of link capture and tracking, many kinds of channel coding techniques are being studied extensively. In this paper, the main influence factors of error code performance in space laser communication link are considered and appropriate coding schemes are analyzed. The simulation experiment shows that, for the space-ground laser link with atmospheric structure parameters of $1.5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ and wind speed of 20 m/s, when the data rate is 2 Gbit/s and bit error is 10^{-6} , LDPC code combined with interleaved code has an equivalent coding gain of 3dB compared with the uncoded system. LT code has an equivalent coding gain of 3.8 dB compared with the uncoded system. This paper presents a coding implementation method that can generate, expand and verify rapidly to resist the influence of atmospheric turbulence on system performance.

Key words: Space laser communication; Channel error-correcting code; Interleave; Coding gain

0 引言

对于空间激光通信系统来说, 由于大气湍流、

指向误差、飞行器振动等环境因素引起的光波动会导致系统性能的恶化, 因此在信道中进行传输的光信号对信道环境的变化十分敏感。由于空间

收稿日期: 2020-06-28; 修订日期: 2020-12-28

基金项目: “十三五” 航天领域预研专用技术 (305060512)

作者简介: 张金刚 (1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为火箭测控技术。E-mail: zhangjg2009@126.com

激光通信系统传输的高速信息时隙远小于光信道变化时长,光信道中的信号衰落会导致接收信号比特产生大量的随机错误和连续突发错误,降低系统通信性能。为了缓解各种环境因素对系统性能造成的恶劣影响,对传输信息进行信道纠错编码是常用的方法之一。随着激光链路瞄准捕获跟踪技术的发展和成熟,针对空间激光通信系统的信道纠错编码技术成为研究热点,进一步提高系统对大气湍流和指向误差等环境因素导致通信性能恶化的抵抗能力。

早期的无线激光通信实验没有使用有效的信道纠错编码,因此由各种环境因素导致系统通信性能不稳定。例如,1988年 Davidson 等做了采用卷积码的无线激光通信系统分析,卷积码在对抗突发差错时,纠错能力很有限。近年来,空间光通信中的信道纠错编码技术逐渐成为重点研究方向,主要集中在各种编码性能的理论研究及分析方面。国内外有研究人员提出用卷积码作为内码的级联编码方案,以及将不同信道纠错编码应用在自由空间光通信系统中的设想^[1-7],运用仿真分析的方法,使系统性能有了一定得改善;在此基础上,进一步研究了将信道纠错编码与正交频分复用(OFDM)等其他通信技术相结合的系统。研究表明,信道纠错编码及其与不同技术的结合均对系统有良好的性能改善。这些研究结果证明了针对空间激光通信系统设计和构建信道纠错编码技术的必要性和有效性。

本文从不同信道纠错编码技术的原理出发,针对空地激光链路中突出的实际问题,分别讨论不同编码技术可实现的功能,并分析选择适宜的编码技术方案。通过仿真比较各编码技术对系统的误码性能的影响,得到保证空间激光通信系统最优可靠性和时效性的编码技术方案。为了在空间光通信系统中实现信道纠错编码技术,本文提出一种编码和译码的广泛设计构建流程,使其具有快速生成和扩展编码的功能,提高对环境因素快速变化的适配性。

1 编码技术原理和发展现状

信道纠错编码是为了提高信息在信道中传输的可靠性。信道纠错编码可以克服光信道中的噪声、辐射和干扰并提高接收信号质量,是一类在保证一定系统可靠性的同时可减少发射功率的差

错控制技术。信道纠错编码通过在信息码中增加冗余码元的方式,使信息具备检测纠正错误码元的能力,同时可以抵抗其他信号造成的干扰,因此信道纠错编码又称为抗干扰编码。信息在传输过程中有来自包括信道和设备本身等各个方面的干扰,同时还包括设备中各个器件的内部噪声和设计缺陷,如信号衰减、散射噪声、波前畸变、光电器件的暗电流等。所有这些噪声、畸变和干扰都会影响信号传输的可靠性,导致系统误码性能下降。因此,未进行信道纠错编码的信息进入信道时则没有检错、纠错能力,导致系统接收端无法正确判断接收信息的准确性,也不能对错误的信息进行纠正。

为了克服噪声、畸变和干扰,并增加光通信信号的传输可靠性,系统中通常使用信道纠错编码技术。为了明确信道纠错编码的作用,本文假设信道纠错编码技术的空间激光通信系统结构框图如图 1 所示。其中编码器和译码器为本文重点讨论内容;信源产生了原始信息,经过信源编码器编码和加密器进行信息加密,再经过光调制后进入信道;信道包括大气湍流及光学调制解调器件,光信号在信道中会受大气湍流、光电器件影响产生波动及畸变;信宿包括光学接收孔径以及信号解调器、译码器与解密器。设计信道纠错编码的主要目标是在相同编码效率条件下,尽可能提高编码信号的检错、纠错能力;是在保证有效检、纠错能力条件下尽可能提高信息的编码效率。

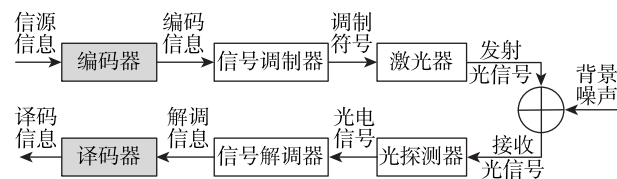


图 1 激光通信结构框图

Fig. 1 Structure diagram of laser communication

纠错编码技术可以提高通信系统性能,不同的纠错编码机制包括里所码(RS码)、级联卷积码(Turbo码)、卷积码、网格编码调制(TCM码)和低密度奇偶校验码(LDPC码)。不同纠错编码技术的误码性能已被研究多年。这些编码技术在发送信息中加入冗余信息,并使冗余码元与信息码元之间以某种确定的规则相互关联,在接收端按照既定的规则检验出关联关系,以达到检

测和纠正由环境因素引起的随机性误码的目的。

Moision 等^[2]提出应用 RS 编码的方案,但是只给出了算法的理论推导,基于脉位调制 (PPM) 调制方式的无噪声泊松信道中提出了 RS 码,其性能较无编码方式的系统提高了 5.23 dB。在月球轨道的激光测距实验中,RS 码可为长距离的卫星激光通信系统提供良好的误码纠错能力^[3],图片传输中产生的 12.5% 以下的误码可以被全部纠正。此外,RS 码还在有大气湍流和指向误差影响的地月激光通信实验系统中得到应用^[4],该系统利用 RS 码实现了与运行高度为 380 000 km 的月球轨道勘测卫星的 200~300 bit/s 无误码数字数据传输。

对于强大气湍流的空间激光通信系统,Turbo 码、TCM 码、LDPC 码具有广泛的应用背景。其中,Turbo 码可以在并行级联卷积码、串行级联卷积码和混合级联卷积码等 3 种不同编码结构中。并行级联卷积码是使用最广泛的结构,它通过交织器将多个递归卷积编码器级联在一起,仿真结果表明当误码率为 10^{-4} 时,并行级联型 Turbo 码对系统有 1 dB 的误码性能提高^[5]。然而,Turbo 码的主要缺点在于其译码复杂度较高,目前只能应用于数据速率较低的光通信系统。

LDPC 编码相对于 Turbo 码更适用于高数据速率的传输系统,它可以降低编码复杂度节省计算时间,不同码率的 LDPC 码可以进一步提高信道容量提高良好的编码增益。在误码率同为 10^{-12} 的条件下,LDPC 码空间光通信系统相比于无编码系统有 10~20 dB 的编码增益^[6]。同时,LDPC 码还可以为系统带来低时延性能。此外,Djordjevic^[6]提出的比特交织编码调制 (BICM) 技术在使用 LDPC 编码时也有 20 dB 的编码增益,而且具有 3 bit/符号的高频谱效率。结果证明,交织码技术结合合适的纠错编码也可为空间光通信系统提供可靠性和有效性。

数字喷泉码是一种无编码速率的约束码,它的自适应链路速率适配、无码率属性使它不需要收发双方确知任何信道状态信息就能自动消除干扰的影响,动态适配通信链路的变化。Ando 等^[7]研究了 3 种星地激光链路中无率码的性能比较,包括鲁比变换码 (LT 码)、快速旋风编码 (Raptor 码)、快速旋风 Q 编码 (RaptorQ 码),得到 RaptorQ 码是三者中信息恢复性能最好的编码方式,研究表明在信源划分帧数较大的条件下,RaptorQ

码的传输失败率较 LT 码降低 3 dB。此外,快速旋风 10 编码 (Raptor10 码) 通过在 LT 码前端级联预编码矩阵,可有效提高源数据译码成功概率,并降低译码开销和译码复杂度。Raptor10 码可以进一步提升系统在大气激光环境下的性能,有效对抗由湍流引起的时域扰动,其应用层链路吞吐量可达 0.348 Gbit/s。目前 Raptor10 码已被多项国际标准采纳,成为近年来编码领域的研究热点。

在系统接收端有多种随机错误纠错码的译码算法被提出。其中,最大似然译码算法在理论上拥有最强的数据恢复能力,但是由于其实现复杂度高,在实际中的应用很少。逐符最大后验 (MAP) 译码算法同样是计算复杂的算法,不适合在硬件中实现。与之相比,使用 Turbo 码的 MAP 算法^[8]和软输出维特比算法 (SOVA)^[9]是较易实现的译码算法。两者中使用 Turbo 码的 MAP 算法性能更好但计算复杂度较高。Sadjadpour^[10]提出了简化 log-MAP 算法,其性能相较 MAP 算法只有 0.1 dB 的损耗,而其实现复杂度大大降低,适于在硬件中实现。

此外,还有可用于深空通信系统的脊髓码 (Spinal 码)。Spinal 码也是无速率码的一种,是由 Perry 等^[11]在 2012 年提出的一种全新的无速率编码方式。与 LDPC 码、Turbo 码等具有固定编码速率的信道编码相比,Spinal 码能够根据信道状况的改变连续适配码率,并且在二进制对称信道 (BSC) 和加性高斯白噪声 (AWGN) 信道下都能实现近信道容量传输;Spinal 码相比传统的高增益固定速率编码,在极宽的信噪比范围内均获得了更好的性能,与漫步者码 (Strider 码) 相比,Spinal 码在 20 dB 信噪比时具有 13%~20% 的性能增益^[11]。Lannucci 等^[12]设计了一个有效高速的 Spinal 码译码器并对其进行了硬件实现。Spinal 码具有多个优良特性:1) Spinal 码在低信噪比条件下,相比固定效率码的性能更优;2) Spinal 码的编译码复杂度与信息长度呈线性关系,适用于传输短字信息且载荷资源受限的机载、舰载和星载光通信系统;3) Spinal 码的无码率特性使其可自适应信道变化,适用于反馈重传效率极低的长距离传输的光通信系统。这些特点显示出 Spinal 码具有应用于空间光通信的巨大潜力。

此外,受到大气信道湍流和云层遮挡的影响,链路会突发中断,使光通信系统产生不稳定性,

这种现象在信号上表现为系统接收端信号的长串误码和突发误码。通信系统中的交织技术可使传输过程中发生成串差错的信息，在接收端也可恢复成单个或长度很短的差错。因此，将交织编码技术引入到光通信系统中可以补偿链路连接不稳定性对系统性能造成的影响，大大提高光链路下信息传输的可靠性。信道交织编码与信道纠错编码的不同之处在于，信道纠错码是通过增加信息冗余以提高传输可靠性，抵抗随机噪声和干扰导致的误码；而信道交织编码是通过改造信源进入信道的方式来降低链路中断的影响，交织编码适合抵抗突发干扰造成的连串误码且不增加信息冗余。国内外在结合信道纠错编码与交织技术也展开了相关研究，包含以下方面：

1) 应用于无线光信道中的数字视频传输系统的结合 LDPC 码与信道交织技术，深度分析了系统允许时延与交织长度的关系^[13]；

2) 空间激光通信系统中 LDPC 码与交织技术结合方案，如图 2 所示，通过仿真证明了在误码率

为 10^{-4} 的条件下，将码长为 648 的 LDPC 码和长度为 350 的块交织技术结合的卫星光通信系统比只用 LDPC 码的光通信系统具有 5 dB 增益，同时证明了块交织技术会降低数据处理时间^[14]；

3) RS 码结合信道交织技术能有效纠正空间光通信中的突发错误，仿真实验证明了交织 RS 码较 RS 码调高 1~2 dB 编码增益^[15]；

4) 应用于大气激光通信中的 Turbo 码结合分组交织技术，当闪烁系数为 0.1 时，交织技术结合 Turbo 码会为系统带来 5dB 的性能提升^[16]；

5) 结合 LDPC 码和信道交织的差错控制方案，在弱湍流条件下误码率为 10^{-5} 时，基于遗传算法的交织器较 Logistic 映射混沌交织器具有 0.87 dB 的性能优势^[17]。然而，在大气激光链路模型的构建过程中，上述交织技术的交织深度大多采用短交织方式。一般而言，交织深度越大系统的抗突发错误能力越强，但随着交织深度的增大，时延和存储容量也会相应增大，导致系统性能降低。

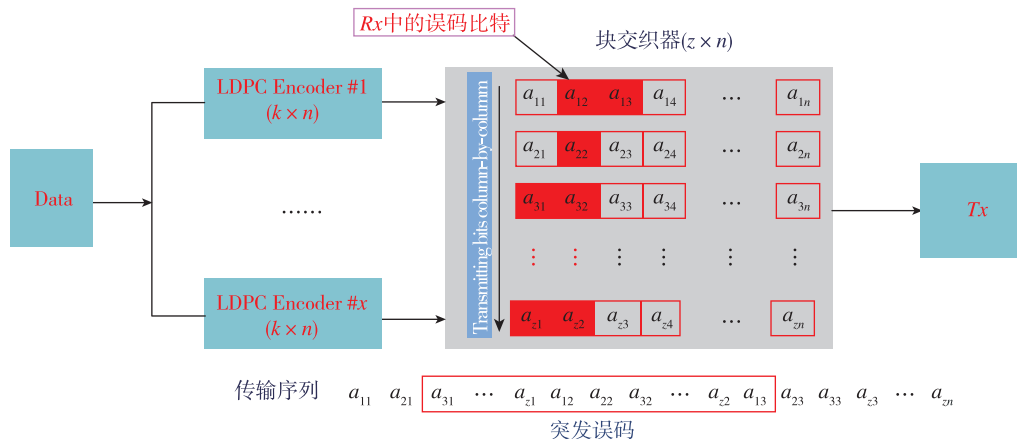


图 2 一种 LDPC 编码与交织技术结合方案

Fig. 2 LDPC coding and interleaving schemes

2 适用于空间光通信的编码技术

在实际空地激光通信链路中，大气湍流层是空地激光通信信道的一部分，大气湍流对通信性能造成的影响是一个动态的过程，它不仅与光束的传输参数、大气湍流状态有关，而且与激光链路的动态特性相关。当光束在湍流大气层的传输过程中，将产生种种湍流效应，包括大气闪烁、光束漂移、光束扩展等。上述影响大气环境的因素可能会导致空地链路的信噪比恶化，使用 LDPC 码、Turbo 码等信道纠错编码可以补偿这些环境因

素对系统性能的影响。

然而当大气环境进一步恶化时，接收机译码后会形成长串的突发连续错误，称为突发误码群。这种突发误码群超出一般信道纠错编码的纠错能力。为了纠正由各种大气湍流效应产生的突发连续误码，空地激光通信系统还会使用交织编码技术。交织编码通过置换，能够将突发差错离散，转化为纠错编码能够处理的随机差错或突发差错。对于交织编码，交织深度越深，系统抗突发差错能力越强。然而交织深度越深，系统的通信时延也越长，占用内存空间也越大，那么高交织深度

就势必造成不必要的通信时延和内存占用。因此有必要采用自适应交织技术,根据信道特点实时动态调整交织深度,保证误码率性能要求的前提下,减少通信时延,节省内存。

此外,还可以考虑使用喷泉码来同时保证空地激光通信系统的可靠性和时效性。喷泉码的编码过程是随机的,并不依赖固定的生成矩阵,这就使喷泉码可以产生任意数量的输出符号,而译码端只要接收到足够数量的输出符号就可以完成译码。由于喷泉码没有固定码率,其相比于传统的前向纠错(FEC)编码更容易获得高效传输的特性,因而被广泛的称作无率码(Rateless Codes)。相比于传统的FEC编码,喷泉码编码参数灵活,使其可以提供分级传输的能力;而无固定码率的特点又使喷泉码可以在通信链路信噪比不稳定的条件下确保数据的可靠高效传输。相比于传统的基于反馈信息的自动重传请求(ARQ)机制,喷泉码可以灵活应对,且对反馈信息的依赖性很小,这使得喷泉码具备了在复杂大气湍流环境中高效可靠传输数据的潜力。

综上所述,对于空地激光通信系统,由于大气湍流是对激光链路信道信噪比产生影响的主要因素,因此一种方案是采用RS码、Turbo码、LDPC码等信道纠错编码和交织编码相结合的技术,为最优化系统误码性能的同时降低编码和交织技术对系统时延性能和存储计算性能的影响,需要对纠错编码的类型、计算复杂度和交织深度进行权衡。第二种方案是采用LT码、Raptor10码、Spinal码等喷泉码来实时保障星地激光链路的可靠性和时效性。

3 编码技术性能比较

由上述分析可知,对于空地激光通信链路,信道受到大气湍流影响,接收信号质量降低。假设大气湍流信道参数 h_a 服从Gamma-Gamma分布的随机变量,其概率密度函数为

$$p_{h_a}(h) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} J_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h}), h > 0 \quad (1)$$

式中, $J_a(\cdot)$ 是以为级数的第二类修正贝塞尔函数, $1/\alpha$ 和 $1/\beta$ 分别为大气湍流环境下小尺度和大尺度湍流参数。大气湍流瞬时功率谱密度可表示为

$$W_c^2(f) = \frac{0.033C_n^2 \tau_r^2 D^2}{4V^2} \int_0^\infty \frac{J_1^2(\pi D \sqrt{\kappa^2 + f^2/V^2})}{\kappa^2 + f^2/V^2} \times$$

$$\frac{\exp[-(\kappa^2 + f^2/V^2)/\kappa_m^2]}{(\kappa^2 + f^2/V^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} d\kappa \quad (2)$$

式中, C_n^2 为大气结构参数, V 为地表风速, τ_r 为光学损耗, D 为接收孔径直径, $J_1(\cdot)$ 为第一类贝塞尔函数, κ 为空间频率向量, f 为接收频率分量, $\kappa_m = 5.92/l_0$, $\kappa_0 = 2\pi/L_0$, l_0 和 L_0 分别为大气湍流内外尺寸。

由式(2)可以看出,大气湍流造成的加性噪声和突发连续错误会使光信号质量严重恶化,甚至会导致信号完全丢失、不能获得译码。因此,需要采用信道纠错编码与交织技术相结合的方式抵抗大气湍流和突发连续误码对通信性能的影响。本文通过仿真实验比较不同编码方式和交织深度对系统性能的影响,设置环境参数如下:信号调制方式为OOK,传输数据速率为2 Gbit/s,载波激光波长为1 550 nm,地表风速为20 m/s,每秒发送的比特数为 2×10^9 ,空间高度为200 km,大气结构参数 C_n^2 为 $1.5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,大气湍流内外尺寸分别为5 mm和1.5 m,孔径直径为30 cm。不同信道纠错编码的码参数如表1所示。

表1 信道纠错编码参数

Tab. 1 Parameter of channel error-correcting		
编码类型	参数	参数值
LDPC 码	尺寸	1 000 × 2 000
	码率	0.5
	迭代次数	5
Turbo 码	编码结构	并行级联卷积码
	码率	0.5
交织码	交织深度	100

不同湍流尺寸和风速会影响大气湍流的结构参数,会直接影响系统性能。假设大气湍流是产生突发错误的主要因素,SNR定义为信号功率与高斯加性白噪声(AWGN)功率的比值。图3展示了上述空地激光通信链路的环境参数的LDPC码、Turbo码以及分别结合交织码得到的误码性能蒙特卡洛仿真图,并与未编码条件的系统误码率曲线形成比较。可以看出,虽然一般在无衰落信道环境中LDPC码和Turbo码可以明显改善性能,然而,当在大气湍流导致的衰落信道中,LDPC码和Turbo码对误码性能的改善并不明显。这是由于大气湍流导致光信号强度的随机波动,使接收端产生突发连续错误,降低系统误码性能。此外,

对于误码率为 5.6×10^{-2} 的未编码空地激光通信系统，可以看出将 LDPC 码、Turbo 码与交织码结合之后，可以使误码率由 1.7×10^{-2} 和 3.3×10^{-2} 分别降低至 3.0×10^{-6} 和 4.6×10^{-5} 。在系统数据速率为 2 Gbit/s、要求误码率为 10^{-6} 时，LDPC 码结合交织码相对未编码系统有 3 dB 的等效编码增益，Turbo 码结合交织码相对于未编码系统有 2.5 dB 的等效编码增益。

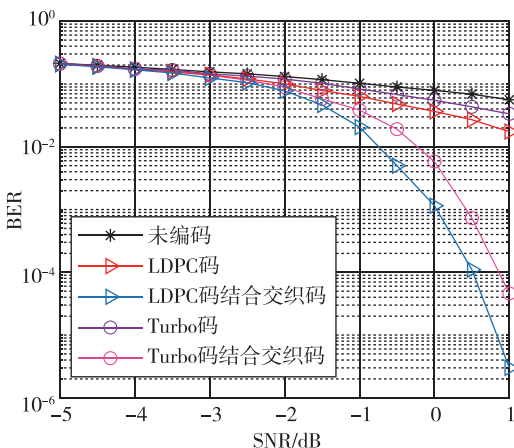


图 3 结合交织技术的 LDPC、Turbo 码误码率比较

Fig. 3 Bit-error comparison of LDPC and turbo codes combing with interleaving

图 4 展示了空地激光通信链路的环境参数下的 LT 码、Raptor10 码和 Spinal 码的误码性能蒙特卡洛仿真图，并与未编码条件的系统误码率曲线形成比较。可以看出，在大气湍流导致的衰落信道中，喷泉码的性能略优于结合交织技术 LDPC 码性能。在低信噪比条件下，由于连续误码的发生概率更大，因此喷泉码可以更好地对连续误码进

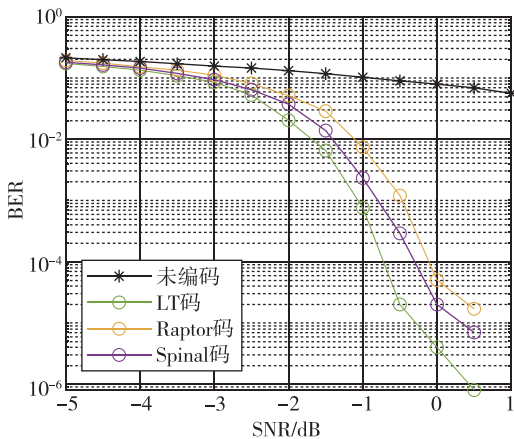


图 4 LT 码、Raptor10 码和 Spinal 码与未编码误码率比较

Fig. 4 Bit-error comparison of LT, Raptor10 and Spinal codes combing with interleaving

行补偿。可以看出，3 种喷泉码中，LT 码性能优于其他两种喷泉码。在大气湍流衰落导致的低信噪比环境下，与未编码系统相比，喷泉码系统接收机接收性能改善约 1 dB。对于误码率为 6.8×10^{-2} 的未编码空地激光通信系统，在使用 LT 码后误码率降低至 4.2×10^{-6} ，在系统数据速率为 2 Gbit/s、要求误码率为 10^{-6} 时，LT 码相对未编码系统有 3.8 dB 的等效编码增益，而 Spinal 码有 3.2 dB 的等效编码增益。

4 编码技术实现方法

一般来说，通信系统中信道编码的纠错能力越强，编码的复杂程度就越高，实现起来就越难。因此，要在数字信号处理 (DSP) 等嵌入式系统或现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 等硬件平台中实现编码技术，往往会在诸多限制条件下折中选择编码参数。虽然空间激光通信领域已有大量的编码技术在不同嵌入式硬件平台上得到应用，但其中大部分的实现方法和构建流程是针对具体特定信道环境所设计的，很少具有广泛性。

为降低系统整体复杂度，本文考虑已广泛应用的强度调制/直接检测 (IM/DD) 的空间激光通信系统，激光信号强度由发射信息决定。发射端信源信息是独立同分布的二进制随机序列，即等概率的 0 和 1 取值。接收端的接收光信号聚焦在光探测器上，经光电转换后向信号解调器输出有限带宽的电信号。信号解调器将光电信号进行判决估计，输出判决信息。其中编码器和译码器是空间激光通信系统中实现信道纠错编码的运行平台，因此它们的设计和配置是实现编码技术的重点。

为了在系统硬件中实现信道纠错编码技术，需要着重考虑构建编码器和译码器的硬件设计流程。为确保纠错码、编码器和译码器成为协调统一的构建体系，需要对其进行协同设计，在编码器和译码器与纠错码的构建过程中同时进行一系列约束，设计流程如图 5 所示。

以 LDPC 码编码器为例，结合硬件约束条件和提高系统纠错性能的要求，可以概括编码的构建步骤：

- 1) 根据硬件性能选择合适的码参数，包括码长、码率、深度等；
- 2) 根据计算选择最优的编码维度分布；
- 3) 根据编码维度分布伪随机地进行宏矩阵的

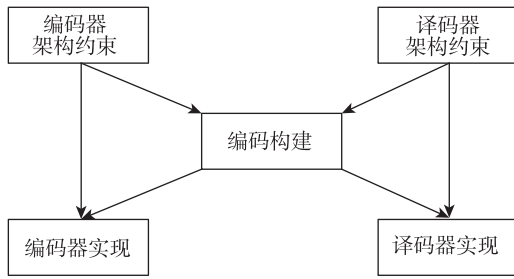


图5 编码器、译码器和信道纠错编码的协同设计流程

Fig. 5 Collaborative design process of encoder, decoder and error-coding

非零计算；

4) 基于近似外信息度 (ACE) 标准进行扩展；

5) 进行近似下三角编码 (ALT) 转换；

6) 检查宏矩阵的可逆性；

7) 存储宏矩阵的 ALT 形式。

对于喷泉码来说，其实现思路与 LDPC 码相似但存在区别。由于喷泉码包括生成预编码符号和编码符号两个阶段，因此需要先将信息分组，设置预编码符号的数量参数并生成预编码符号，而后使用预编码符号进行喷泉编码，对每组编码信息添加码字识别，最后添加冗余校验并组帧。

使用该流程构建编码的主要优点是宏矩阵的尺度小，可以快速生成、扩展目标编码并校验编码的适配性。如果硬件中发现某个编码不符合系统要求，系统可以舍弃并快速生成另一个编码进行取代。由于上述步骤会使编码具有典型的维度分布和扩展因子，因此系统可以在极短时间内生成合适的编码，以抵抗大气湍流的快速变化对编码性能产生影响。

对于交织编码技术的实现方法为，首先将信源信息进行分组，每组进行编码，然后送入交织器，将交织器设计为按列写入按行取出的阵列存储器，该过程为信息序列的交织操作。交织器的操作过程如图6所示，其中 M 为交织深度， N 为交织列数且 N 等于码长，信道衰落周期为 T ，信息速率为 r ，由于 T 小于满存储的所需时间，因此对于码率为 R 的交织编码，若要纠正 t 时间内的连续突发错误，则其深度要满足 $M = (Tr)/(tR)$ 。

5 结论

本文介绍了空间激光通信系统中的信道纠错编码技术对系统性能的影响，分析了空间激光链

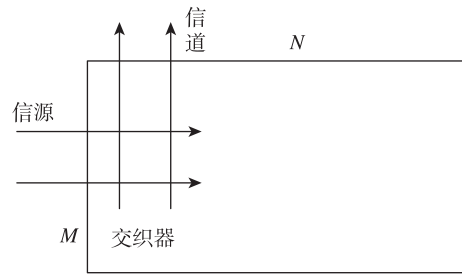


图6 交织器结构

Fig. 6 The structure of the interleaver

路中适用的编码技术，给出了使用信道纠错编码结合交织码技术和使用无码率编码技术两种空地激光链路方案。本文通过仿真实验对比了 LDPC 码、Turbo 码分别结合交织码技术在空地激光通信系统的误码性能表现，同时对比了 LT 码、Raptor10 码和 Spinal 码 3 种不同喷泉码的误码性能，证明了在大气结构参数为 $1.5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 、风速为 20 m/s 的空地激光链路环境下，LDPC 码结合交织码技术相比其他编码方案拥有良好的误码性能，LT 码具有最佳的抵抗连续码元错误的性能。最后，本文提供了一种通用的编码架构的构建流程，给出交织技术的实现方式，使空间激光通信系统在编码构建过程可以抵抗大气湍流的快速变化对系统性能产生影响。

参考文献

- [1] Djordjevic I B, Vasic B, Neifeld M A. LDPC coded OFDM over the atmospheric turbulence channel[J]. Optics Express, 2007, 15(10):6336-6350.
- [2] Moision B, Hamkins J, Cheng M. Design of a coded modulation for deep space optical communications[C]. Processing Infor Theory Appl. (ITA) Workshop, San Diego, CA, USA, 2006.
- [3] Sun X, 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-The International Society for Optical Engineering, 2013, 8610(3):1-12.
- [4] Sun X, Skillman D R, Hoffman E D, et al. Free space laser communication experiments from Earth to the Lunar Reconnaissance Orbiter in lunar orbit[J]. Optics Express, 2013, 21(2):1865-1871.
- [5] Kumar N, Jain V K, Kar S. Evaluation of the performance of FSO system using OOK and M-PPM modulation schemes in inter-satellite links with turbo

- codes[C]. International Conference on Electronics, IEEE, 2011;59-63.
- [6] Djordjevic I B. LDPC-coded MIMO optical communication over the atmospheric turbulence channel using Q-ary pulse-position modulation.[J]. Optics Express, 2007,15(16):10026-10032.
- [7] Andò A, Pernice R, Curcio L, et al. Fading mitigation coding techniques for space to ground free space optical communications [C]. 2014 Euro Med Telco Conference (EMTC), Naples, Italy, 2014:12-15.
- [8] Benedetto S, Montorsi G, Divsalr D, et al. Soft-output decoding algorithm in iterative decoding of turbo code [C]. JPL TDA Progress Report 42124, 1996.
- [9] Hagenauer J. Source-controlled channel decoding[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43 (9):2449-2457.
- [10] Sadjadpour H R. Maximum a posteriori decoding algorithms for turbo codes[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2000, 4045:73-83.
- [11] Perry J, Lannucci P A, Fleming K, et al. Spinal codes[J]. Acm Sigcomm Computer Communication Review, 2012, 42(4):49-60.
- [12] Iannucci P A, Fleming K E, Perry J, et al. A hardware spinal decoder[C]. ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems, USA, 2012:151.
- [13] Cvijetic N, Wilson S G, Zarubica R. Performance evaluation of a novel converged architecture for digital-video transmission over optical wireless channels[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25 (11): 3366-3373.
- [14] Nguyen D T, Park Y. Performance analysis of interleaved LDPC for optical satellite communications[J]. Optics Communications, 2019, 442:13-18.
- [15] 姜晓峰, 赵尚弘, 李勇军, 等. 星地光通信交织 RS 码设计及性能研究[J]. 半导体光电, 2011, 32(3):401-404.
- [16] Han Y Q, Dang A H, Ren Y X, et al. Theoretical and experimental studies of turbo product code with time diversity in free space optical communication[J]. Optics Express, 2010, 18(26):26978-26988.
- [17] 周建国, 郝士琦, 刘加林, 等. 大气激光通信中基于遗传算法的交织器设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6):214-219.

引用格式:张金刚,罗煜缤,于思源,等.空间激光通信系统中的信道纠错编码技术[J].宇航总体技术,2021,5(5):36-43.

Citation: Zhang J G, Luo Y B, Yu S Y, et al. Channel coding technology in space-based laser communication [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(5): 36-43.