



DOI: 10.12086/oe.2021.200327

用于水下单光子视频通信的联合编码研究

戴伟辉, 鄢秋荣*, 王明, 洪珠, 杨程

南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031



摘要: 为了实现有效与可靠的视频传输, 针对水下单光子通信系统, 提出了一种基于字典学习和 LT 码级联 LDPC 码的视频联合编码方案。通过字典学习稀疏编码, 极大地压缩了视频数据量。根据水下单光子信道存在的删除特性, 利用 LT 码级联 LDPC 码的信道级联编码方法, 同时克服了 LT 码译码开销过大的缺点。由于 LT 码存在译码失败概率的问题, 提出了译码成功双反馈机制。实验结果表明, 当信道误码率处于 10^{-2} 数量级、视频压缩率为 75.6% 时, 可以实现平均峰值信噪比 (PSNR) 为 37.4921 dB 重建视频帧。

关键词: 水下单光子视频通信; 字典学习; 联合编码; LT 编码; LDPC 编码

中图分类号: TN929.14

文献标志码: A

戴伟辉, 鄢秋荣, 王明, 等. 用于水下单光子视频通信的联合编码研究[J]. 光电工程, 2021, 48(5): 200327

Dai W H, Yan Q R, Wang M, et al. Research on joint coding for underwater single-photon video communication[J].

Opto-Electron Eng, 2021, 48(5): 200327

Research on joint coding for underwater single-photon video communication

Dai Weihui, Yan Qiurong*, Wang Ming, Hong Zhu, Yang Cheng

School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China

Abstract: In order to achieve effective and reliable video transmission, a video joint coding scheme based on dictionary learning and the concatenation of LT code and LDPC code is proposed for underwater single-photon communication system. Sparse coding based on dictionary learning greatly compresses the amount of video data. According to the deletion characteristic of underwater single-photon channel, using the LT-LDPC channel concatenated coding method can overcome the disadvantage of excessive decoding overhead of LT code. Aiming at the problem of decoding failure probability of LT coding, a double feedback mechanism for decoding success is proposed. The experimental results show that when the channel error rate is in the order of 10^{-2} and the video compression rate is 75.6%, the video frames can be reconstructed with an average peak signal-to-noise ratio (PSNR) of 37.4921 dB.

Keywords: underwater single-photon video communication; dictionary learning; joint coding; LT coding; LDPC coding

收稿日期: 2020-09-04; 收到修改稿日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61865010, 61565012); 江西省杰出青年人才资助计划(20171BCB23007)

作者简介: 戴伟辉(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事无线光通信及其编解码方面的研究。E-mail: daiweihui@163.com

通信作者: 鄢秋荣(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事无线光通信和光电精密仪器方面的研究。E-mail: yanqiurong@ncu.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

1 引言

近年来, 水下无线光通信(underwater optical wireless communication, UOWC)在环境检测、海上勘探等领域中发挥着重要的作用, 受到越来越广泛的关注^[1-4]。它具有带宽高、速度快、抗电磁干扰能力强等优点, 但由于传输时会受到严重的吸收和散射影响, 存在通信距离受限的问题^[5]。为了实现远距离的水下无线光通信, 运用具有单光子限灵敏度的单光子探测器探测接收端的微弱光信号, 并从探测器输出的离散脉冲序列中提取通信信号^[6-10]。

视频由于可以直观地传达信息, 因此在水下无线光通信中运用广泛。要实现水下单光子视频通信, 需要经过视频压缩编码和纠错编码, 以提高传输的有效性和可靠性。传统的视频编码方法, 如 MPEG 系列或者 H.26X 系列采用预测编码和变换编码结合的混合编码方法进行视频压缩, 视频帧之间关联性较强, 一帧数据的丢失会对其他帧的解码造成很大困难^[11-12]。又由于光子效应和光子探测的随机过程, 在水下单光子通信系统中, 时隙内探测到的光子可能出现符号删除现象, 导致数据丢包。若采用传统视频编码方法, 视频恢复的效果差且复杂度极高。而利用字典学习进行视频稀疏编码, 每帧视频图像传送的是稀疏矩阵信息, 并且各视频帧之间的解码互不影响。同时, 水下单光子通信中删除符号出现的概率较大, 而由暗计数脉冲和背景光脉冲引起的错误符号非常少, 其呈现出很强的删除信道特性^[13-15]。LT 数字喷泉码是专门应对各种删除信道而设计的, 只要接收到足够的喷泉包就可还原数据。但由于译码开销很大, 通过级联 LDPC 码纠正错误码元以降低译码开销。要实现高有效性和高可靠性的水下单光子视频通信, 关键是要研究适用于水下单光子信道特点的视频压缩编码与纠错编码方法^[16-18]。

2006 年 Micha 等人提出一种用于设计稀疏表示的过完备字典的 K-SVD(K-singular value decomposition)算法, 并表示字典学习在图像增强和压缩两方面都可以成功地取代常用的表示方法^[19]。文献^[20]提出了一种基于单像素相机兼容字典学习的分布式压缩视频感知框架, 以直接获取压缩视频, 学习字典可以为视频重建提供更好的基础, 而不需要基于学习的基础。文献^[21]提出了一种基于在线字典学习的帧内视频编码方法, 该方法利用了自然图像的纹理稀疏性, 所提出的方法能够从先前的帧中学习基本的纹理元素, 从而

通过有效的字典来稀疏表示传入的帧。文献^[22]提出了一种基于自适应正则字典学习的稀疏时空表示方法和一种低比特率的视频编码方案, 选择关键帧的子集以原始分辨率进行编码, 而其余部分则通过稀疏时空近似下进行采样和重构。文献^[23]为了克服大气衰减和光强起伏对自由空间光通信性能的影响, 采用数字喷泉码抑制大气湍流的影响, 以提高自由空间光通信信道的可靠性。文献^[24]研究了 LT 喷泉码在大气无线光通信连接中的纠错性能, 从编码、译码的角度研究喷泉码的性能提高方法。文献^[25]采用低密度奇偶校验(low density parity check, LDPC)码作为信道编码应用于无线光通信中, 得出 LDPC 码在弱湍流信道具有优越的纠错能力。文献^[26]针对深空通信中对长纠错码的需求, 提出了 LT 码和 q-LDPC 码的级联编码方案, 并设计了两种短 8-LDPC 码, 并对整个级联系统的纠错性能进行分析。文献^[27]将 LDPC 码作为信道编码技术运用于大气激光通信系统中, 并给出了一种便于硬件实现的半随机 π -旋转 LDPC 码, 在 PPM(pluse position modulation)调制的情形下, 对不同的典型天气情况下的性能进行了分析。

为了在高误码率与数据易丢包的条件下, 实现水下单光子视频有效可靠的传输, 本文提出了一种基于字典学习和 LT 码级联 LDPC 码的视频联合编码方案。该方案提高了数据压缩率和数据编码效率, 实现传输质量与传输效率同步达优。

2 系统原理及实现

为了在水下单光子通信系统中实现视频传输, 设计了水下单光子视频通信实验系统方案如图 1 所示。整个系统由发送端和接收端两部分组成, 利用资源丰富、运算能力强、编程灵活的 MATLAB 软件来实现视频帧序列的联合编码、联合译码、误码率分析和数据处理; 采用具有并行高速处理能力的 FPGA 来实现基于光子时间间隔的调制解调; 计算机和 FPGA 两平台之间通过 UDP 网口协议实现数据传输。

图 2 为水下单光子视频通信系统实物图。在该系统中, 采用了长度为 1.5 m 的水管作为水下信道, 但为了模拟远距离弱链路的水下通信, 在发送端增加了多块衰减片及光阑, 并调弱光强, 使光源在极弱光下, 以单光子态进行传输。通过对系统水下信道建模, 计算出理论上可实现的水下通信距离约为 389 m^[9]。同时, 系统中反馈回路通过导线直接连接, 以确保反馈信息可靠快速传输至发送端。

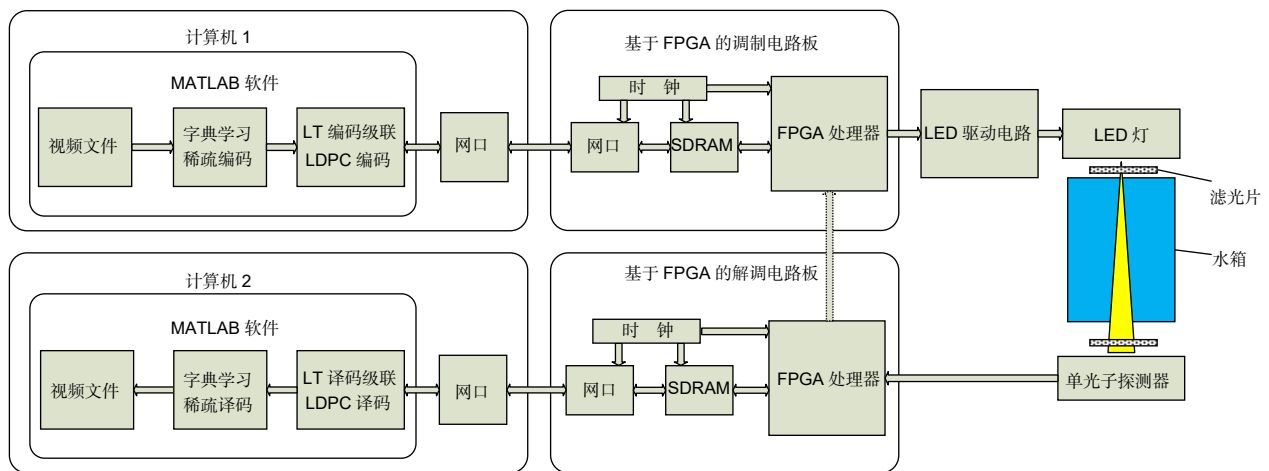


图 1 水下单光子视频通信实验系统方案

Fig. 1 Experimental system scheme of underwater single-photon video communication



图 2 水下单光子视频通信系统图

Fig. 2 Diagram of underwater single-photon video communication system

发送端计算机 1 运用 MATLAB 软件对视频流进行字典学习稀疏编码, 再进行数据帧设计和 LT 编码级联 LDPC 编码。将得到的发送数据包通过网口加载到 FPGA 电路板 1 进行 OOK 调制, 调制后的信号驱动 LED 灯亮灭闪烁表示传输的二进制比特流信息。经过水下信道衰减后, 单光子探测器接收到微弱光信号并输出离散的单光子脉冲序列, 送至 FPGA 电路板 2 进行处理和信息解调, 解调后的数据通过网口传输至计算机 2。计算机 2 利用 MATLAB 软件对接收到的信息进行 LT 译码级联 LDPC 译码, 若译码失败, 则再通过反馈回路重新进行级联编译码。最后, 通过字典学习稀疏译码重构出原始视频流。

用均方误差(mean-square error, MSE)、峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)性能指标对重构的视频帧图像与原始图像进行客观评价, 其中 MSE 表达式为^[28]

$$E_{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \|I(i, j) - K(i, j)\|^2, \quad (1)$$

其中: $I(i, j)$ 和 $K(i, j)$ 分别代表原始图像和重构后图像的像素值, 且 $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$, 则 PSNR 的表达式为^[28]

$$R_{PSNR} = 10 \lg \frac{255 \times 255}{E_{MSE}}. \quad (2)$$

3 编码基本原理

3.1 字典学习

字典学习稀疏编码方法是从数据中不断学习得到最佳稀疏表示的过程, 使字典基能够包含需要表示图像的基本信息, 本文采用的字典学习算法是 K-SVD 算法^[19]。

字典学习的主要思想是, 利用原子数为 K 的字典矩阵 $D \in R^{m \times K}$, 稀疏线性表示原始视频数据帧矩阵

$Y \in R^{m \times n}$ (其中 m, n 分别表示视频数据帧矩阵的行数与列数), 即有 $Y=DX$, 其中 $X \in R^{K \times n}$ 为稀疏矩阵, 将上述问题用数学语言描述为如下优化问题^[19]:

$$\min_{D, X} \sum_i \|x_i\|_0, \quad \text{s.t.} \quad \min_{D, X} \|Y - DX\|_F^2 \leq \varepsilon \quad (3)$$

其中: $x_i (i=1, 2, \dots, K)$ 为稀疏矩阵中的行向量, ε 为允许的误差。

3.2 LT 码

LT 码的编码由 W 个的原始数据包生成任意数量的编码包, 译码器接收编码包中的任意 Z 个, 即可高概率通过译码恢复出全部原包。其编解码实现过程如下: 首先从度分布函数 $\rho(d)$ 中随机选择一个度值 d ; 从 W 个原始数据包中随机地等概率选取 d 个不同原始数据包, 并将这 d 个原包进行模二和运算, 生成一个编码包, 重复上述过程, 即可得到任意数量编码包; 最后再利用高斯消元法即可完成 LT 码译码过程^[29]。

3.3 LDPC 码

LDPC 码是一种线性分组码, 其校验矩阵 H 的结构对码的性能有决定性影响。本文采用 Gallager 的随机构造法产生校验矩阵 H ; 然后通过矩阵换算得到生成矩阵 G , 再通过信息矩阵与生成矩阵相乘得到 LDPC 码的编码矩阵; 最后采用置信传播译码算法完成 LDPC 码的译码^[27]。

4 联合编码方案

4.1 总体方案

本文提出的一种基于字典学习和 LT 码级联 LDPC 码的视频联合编码方案如图 3 所示。发送端为了压缩视频数据, 首先将数帧背景变化不大的视频流作为一

个图像组, 并随机选取信息作为初始字典, 通过 K-SVD 算法得到图像组的字典基; 然后利用字典基、每帧图像的矩阵信息与设定的稀疏度经过正交匹配追踪(orthogonal matching pursuit, OMP)算法得到每帧图像的稀疏矩阵^[30]。假设一个图像组有 M 帧, 每帧是 $N \times N$ 大小的矩阵, 设置稀疏度为 K , 原子数为 E , 对一个图像组进行字典学习稀疏编码之后得到一个字典和 M 个稀疏矩阵, 并将非零数值作为有效信息进行传输, 则图像组的压缩率为(compression ratio, CR):

$$CR = \frac{M \times N - M \times K - E}{M \times N} \quad (4)$$

发送端为可靠的发送数据并确保接收端可以高质量恢复, 将得到的字典基和稀疏矩阵进行信道编码。采用具有很强纠删能力的 LT 码作为外码, 为了确保 LT 码的编码数据是有效的, 发送端接一级反馈回路。采用纠错能力很强的 LDPC 码作为内码, 对每次 LT 编码的编码包进行再编码。接收端进行相应的 LDPC 译码以及 LT 译码, 但为了确保级联译码的数据误码率处在较低值, 再接一级反馈回路至发送端。最后, 再进行字典学习稀疏译码, 还原出图像组, 并重建出视频流。

4.2 发送数据包格式设计

将经字典学习稀疏编码后得到的字典基和稀疏矩阵通过信道编码送入水下信道传输, 其发送数据包的帧格式设计如图 4 所示。首先字典数值在 $(-1, 1)$ 范围内, 按照符号、矩阵数值打包作为字典的数据帧; 从稀疏矩阵的数值中按符号、序号、整数部分和小数部分打包作为稀疏矩阵的数据帧; 经过 LT 编码和 CRC 校验后转成包含信息数据、度信息和校验位的帧格式; 再

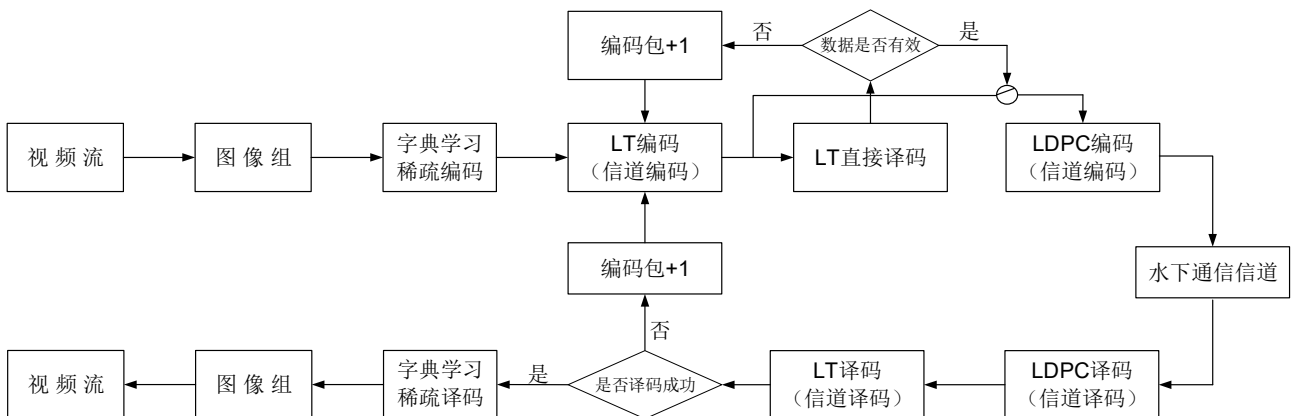


图 3 基于字典学习和 LT 码级联 LDPC 码的视频联合编码方案

Fig. 3 Video joint coding scheme based on dictionary learning and the concatenation of LT code and LDPC code

经 LDPC 编码后转成包含信息位和冗余位的帧格式；在每个发送数据包的前面加上 FF FF FF FF 的帧头，得到设计的发送数据包帧格式，按该帧格式将数据包发送至水下信道进行传输。

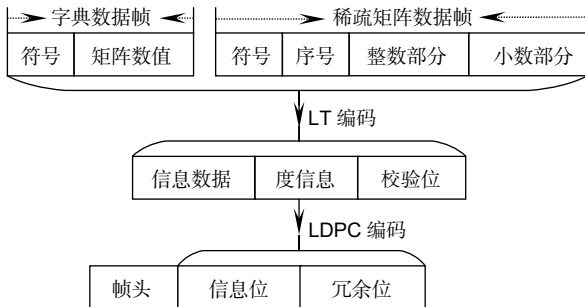


图 4 发送数据包帧格式
Fig. 4 Frame format of sending data packet

4.3 级联编码实现过程

在信道编码过程中,LT 码虽然具有显著的纠删能力,但仍然存在译码失败概率、译码开销过大等问题。针对译码失败的问题,本文提出一种 LT 码译码成功双反馈机制,即发送端不断发送编码包,第一级反馈确保发送的数据是有效数据;接收端不断译码,第二级反馈确保最终 LT 译码成功。针对译码开销过大的问题,本文采用 LDPC 码作为内码,通过纠正各编码包的误码,达到提升有效编码包数,从而实现较低译码开销下的数据传输。

图 5 展示了 LT 码级联 LDPC 码的码字设计和实现过程:首先,将数据 1 进行 LT 编码,得到 n 个编码包,并对 n 个编码包直接译码来判断是否是有效数

据,如果不是,则编码包数加 1 并重新编码,直至为有效数据,得到 $n+i$ 个编码包;将 $n+i$ 个编码包分别进行 LDPC 编码得到 $n+i$ 个级联编码包,并送入水下通信信道。其次,由于信道的删除特性,丢失 m 个数据包,只接收到 $n+i-m$ 个级联译码包,分别进行 LDPC 译码与 LT 译码。最后,判定 LT 译码是否成功,若成功,则得到数据 2;否则,编码包数加 1,重新再进行编码,直到译码成功。级联编码实现了在较低的译码开销下,抑制丢包带来的影响,将误码率降到最低且译码成功率为 1。

5 实验结果与分析

5.1 仿真实验与分析

由于 LT 编码具有较强的纠删性能,数据包的丢失对译码性能影响较小。但存在译码失败概率、译码开销较大等问题。为此,通过级联 LDPC 码,利用该码较强的纠错能力,达到提升有效编码包数和减少译码开销的目的;采用 LT 码译码成功双反馈机制,确保发送的喷泉包数据是有效数据,且使译码成功率为 1。通过仿真实验验证以 LT 码作为外码,LDPC 码作为内码的级联编码方案的可行性。

根据 LT 码的译码成功具有一定的随机性,为确定最佳的编码包数及译码开销情况,在仿真实验中,计算机运行次数设置在 10 万次,设置 LT 编码的原包数为 64,包的大小为 16 bit,译码成功判定阈值为 0.05,信道误码率为 0.005。统计了译码成功时不同编码包数出现的次数,如图 6 所示。结果显示,编码包数目出现的次数近似服从泊松分布。将出现次数最多的编码

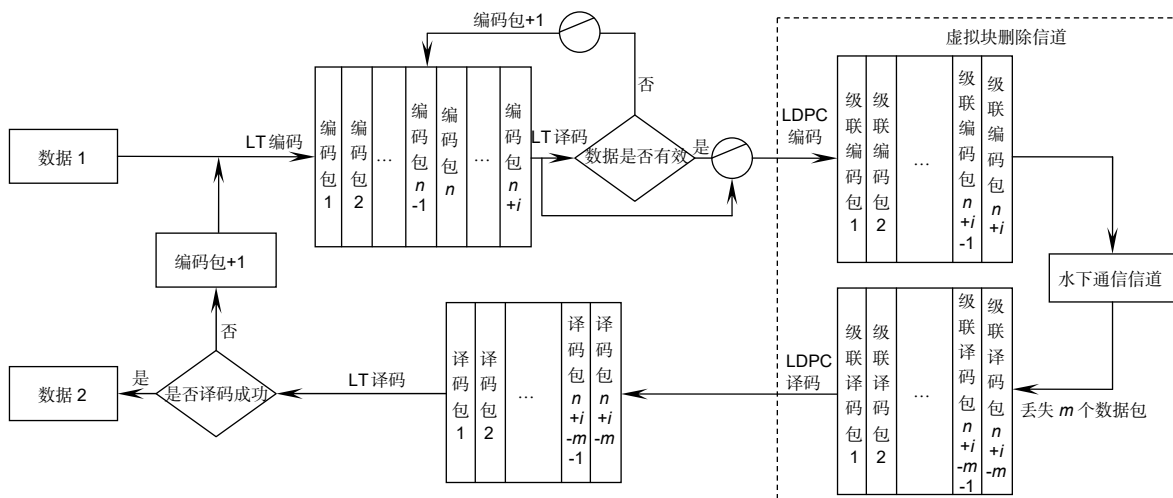


图 5 LT 码级联 LDPC 码的码字设计和实现过程
Fig. 5 Codeword design and implementation process of the concatenation of LT code and LDPC code

包数认定为最佳编码包数, 将最佳编码包数与原包数之比定义为译码开销^[30]。

图 7 为在不同信道误码率和编码方式下, 译码开销随译码成功判定阈值的变化情况。从图中可以看出, 随着译码成功判定阈值的增加, LT 码的译码开销逐渐减少, 而级联码的译码开销缓慢减少。这是因为 LT 编码方式在较小的译码成功判定阈值下, 需要花费较大的译码开销才可译码成功; 而在级联编码方式下, LDPC 码较强的纠错性能使得译码开销比较稳定。并且, 信道误码率增加 0.01, LT 码的译码开销最大增加了 5 个单位左右, 可见信道误码率是影响 LT 码译码开销的重要因素。

另外, 由于系统模拟了远距离弱链路情形, 因此系统处于高误码率条件下。而文献[31]研究了 LDPC 码级联 RS 码在光纤传输系统中的应用, 通过系统实

验得出纠错极限可以达到约 2×10^{-2} 。本文研究的水下无线光通信系统中 LT 码级联 LDPC 码以及提出的译码成功双反馈机制, 甚至可以在信道误码率为 6×10^{-2} 的条件下实现水下通信。同时, 级联编码与 LT 编码方式相比, 可显著减少译码开销, 由图 7 可知, 译码开销的数据量最大可减少 64.5%左右。文献[32]提出的基于部分信息 LT 码的修正转移鲁棒孤子分布方法, 可以实现译码开销降低 1%~2%。与该文献相比, 本文通过级联 LDPC 码的方法可以大大降低 LT 码的译码开销。

图 8 给出了在不同的视频压缩率下, 信道误码率设置为 0.06 时, 译码成功判定阈值与平均 PSNR 值关系曲线。从图中可以看出, 随着译码成功判定阈值的增加, 视频帧平均 PSNR 值逐渐降低。说明了在译码成功判定阈值较大时, 允许系统在较大误码率下还原信息, 从而导致平均 PSNR 值较小。同时, 视频压缩率越大, 平均 PSNR 值越小。这表明在视频压缩率较大时, 系统传输的信息数据量较少, 从而还原信息时平均 PSNR 值较小。

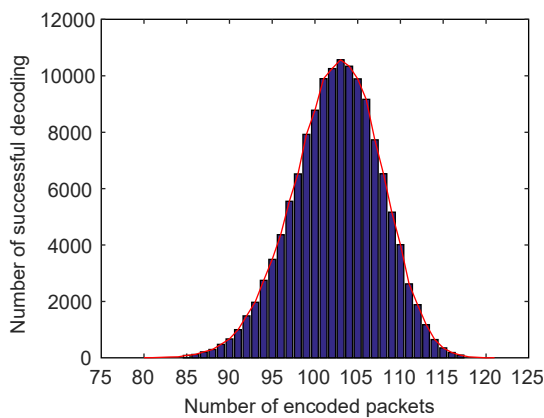


图 6 编码包数的统计分布情况
Fig. 6 Statistical distribution of the number of encoded packets

5.2 系统实验与分析

前面已经通过仿真实验验证了以 LDPC 码作为内码克服了 LT 编码的缺点, 并提高了信道的可靠性, 表明级联编码方法的可行性。同时, 为了减少信源数据量, 通过字典学习稀疏编码可以对视频起到压缩作用, 说明了在仿真条件下水下单光子视频传输中联合编码方案的可行性。下面通过实验系统进一步验证该方案的可实施性。

在系统实验中信道误码率测得为 0.06, 波特率设置为 500 kbps。图 9(a)为视频中的四帧原图; 9(b)为未

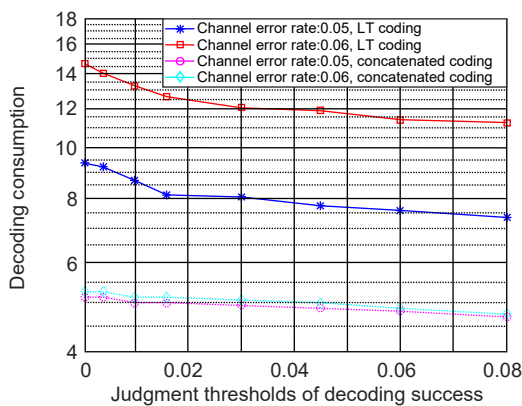


图 7 译码成功判定阈值与译码开销关系
Fig. 7 The relationship between the judgement thresholds of decoding success and the encoding consumption

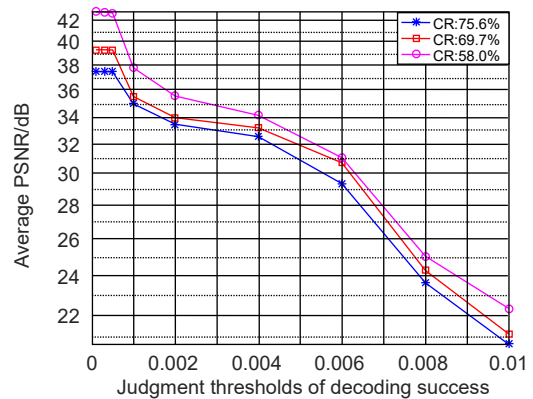


图 8 译码成功判定阈值与平均 PSNR 关系
Fig. 8 The relationship between the judgement thresholds of decoding success and the average PSNR

加信道编码单光子视频传输结果; 9(c)为级联编码时无反馈电路的单光子视频传输结果; 9(d)为一级反馈下的单光子视频传输结果。图 9 显示, 无信道编码时平均 PSNR 值仅为 1.0125 dB, 直观效果很差; 级联编码后也只将 PSNR 值提升至 7.7488 dB, 效果依旧很差; 最后在发送端加入一级反馈, 图片效果提升明显, 但平均 PSNR 值也只有 15.0811 dB。上述说明, 加入级联编码以及一级反馈对单光子视频传输结果中图片质量有一定的改善, 但质量依旧不佳。

针对上述问题, 加入级联编码以及二级反馈回路, 结果如图 10 所示。该图显示了在不同视频压缩率下, 单光子视频传输结果及其图像的平均 PSNR 值。在视频压缩率分别为 75.6%、69.7%、58.0%时, 图像的平均 PSNR 值分别为 37.4921 dB、39.3372 dB、42.7223 dB, 说明了视频压缩率越大, 图像的平均 PSNR 值越小, 并且重建的图像直观效果优良。因此, 在水下单光子视频传输中, 联合编码方案可以实现在视频压缩率为 75.6%的情况下, 以图像平均 PSNR 值为 37.4921 dB 重建出优良的视频流。而文献[28]研究了一种基于分布式压缩感知的单光子视频传输系统, 该方案实现了在测量率为 66.7%(即压缩率为 33.3%)时, 以平均 PSNR 值大约 34.5 dB 重建视频帧。与该文献实验结果相比, 无论是从压缩率还是图像重建质量, 本文的技术指标都有一定的提升。

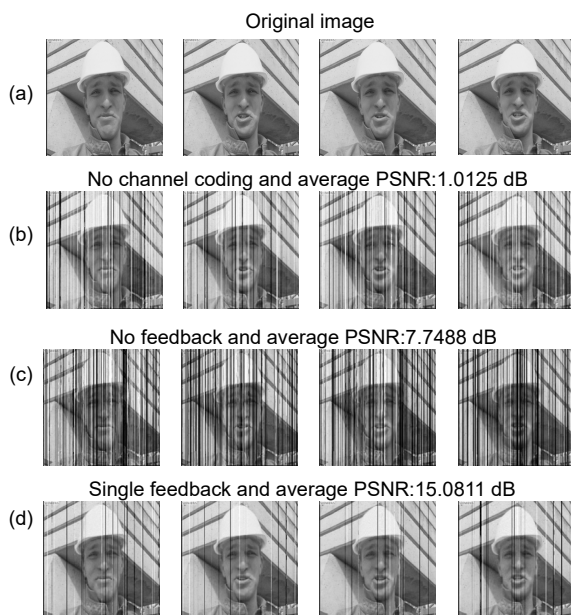


图 9 不同处理方式下的四帧图像比较
Fig. 9 Comparison of four frames of images under different processing methods

6 结论

本文搭建了水下单光子视频通信系统, 为实现高有效性和高可靠性的视频传输, 提出并验证了一种基于字典学习和 LT 码级联 LDPC 码的视频联合编码方案。采用字典学习稀疏编码方式, 极大地减少了视频数据的传输量, 提高了通信系统的有效性。实验分析了编码方式与译码成功判定阈值对译码开销的影响, 结果证明, 级联编码可以克服 LT 码译码开销过大的缺点; 同时, 译码开销随译码成功判定阈值的增加而减小。本文提出的译码成功双反馈机制, 不仅解决了 LT 码存在的译码失败概率问题, 也实现了在高误码率的通信环境下清晰恢复视频帧。实验结果表明, 随着视频压缩率增加, 平均 PSNR 越小; 当信道误码率处于 10^{-2} 数量级、视频压缩率为 75.6%时, 可以实现平均 PSNR 为 37.4921 dB 重建视频帧。

参考文献

- [1] Zeng Z Q, Fu S, Zhang H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Commun Surv Tut*, 2017, **19**(1): 204–238.
- [2] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication[J]. *IEEE Access*, 2016, **4**: 1518–1547.
- [3] Mendez P A, James R. A comparative study of underwater wireless optical communication for three different communication links[J]. *IOSR J Electron Commun Eng*, 2015, **10**(3): 40–48.
- [4] Arnon S. Underwater optical wireless communication network[J]. *Opt Eng*, 2010, **49**(1): 015001.

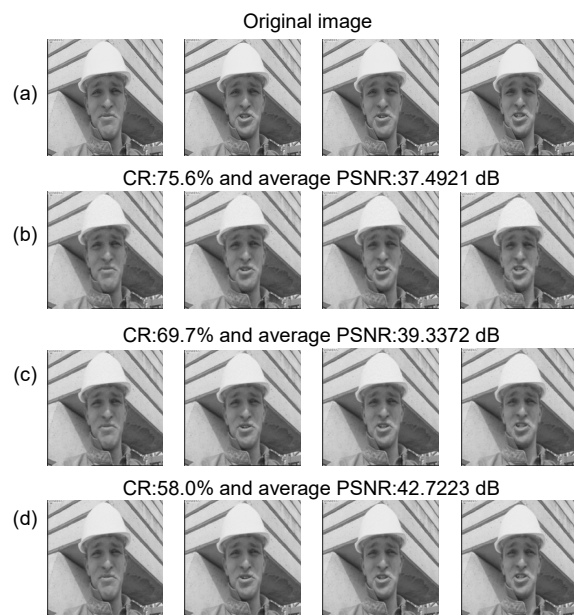


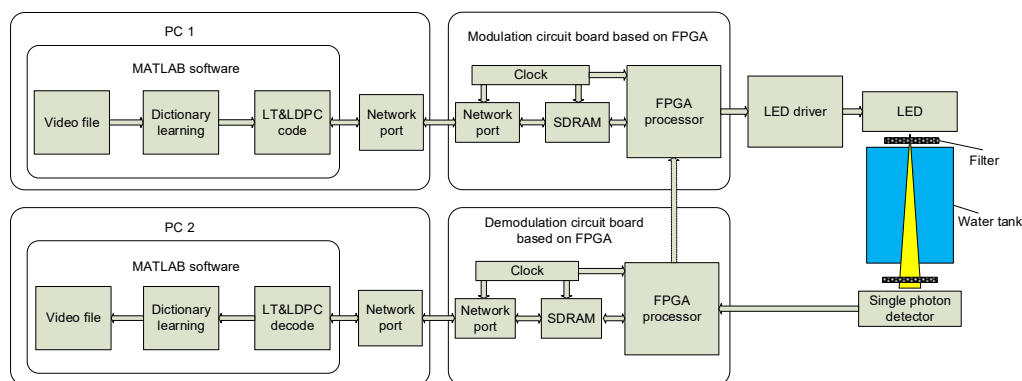
图 10 不同压缩率下的四帧图像比较
Fig. 10 Comparison of four frames of images under different compression ratios

- [5] Haltrin V I. One-parameter two-term Henyey-Greenstein phase function for light scattering in seawater[J]. *Appl Opt*, 2002, **41**(6): 1022–1028.
- [6] Zhang J, Si-Ma L H, Wang B Q, *et al.* Low-complexity receivers and energy-efficient constellations for SPAD VLC systems[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2016, **28**(17): 1799–1802.
- [7] Ji Y W, Wu G F, Wang C, *et al.* Experimental study of SPAD-based long distance outdoor VLC systems[J]. *Opt Commun*, 2018, **424**: 7–12.
- [8] Wang C, Yu H Y, Zhu Y J, *et al.* Experimental study on SPAD-based VLC systems with an LED status indicator[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(23): 28783–28793.
- [9] Yan Q R, Li Z H, Hong Z, *et al.* Photon-counting underwater wireless optical communication by recovering clock and data from discrete single photon pulses[J]. *IEEE Photon J*, 2019, **11**(5): 7905815.
- [10] Huang X X, Wang Z X, Shi J Y, *et al.* 1.6 Gbit/s phosphorescent white LED based VLC transmission using a cascaded pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(17): 22034–22042.
- [11] Zhuo L, Zhang J, Li X G. *High Efficiency Video Coding Techniques for Next Generation*[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2013: 24–33.
卓力, 张菁, 李晓光. 新一代高效视频编码技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 24–33.
- [12] Marpe D, Wiegand T, Sullivan G J, *et al.* The H.264/MPEG4 advanced video coding standard and its applications[J]. *IEEE Commun Mag*, 2006, **44**(8): 134–143.
- [13] Robinson B S, Kerman A J, Dauler E A, *et al.* 781 Mbit/s photon-counting optical communications using a superconducting nanowire detector[J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(4): 444–446.
- [14] Hiskett P A, Lamb R A. Underwater optical communications with a single photon-counting system[J]. *Proc SPIE*, 2014, **9114**: 91140P.
- [15] Han B, Zhao W, Wang W, *et al.* Modified photon counting communication method for underwater application[J]. *Acta Opt Sin*, 2016, **36**(8): 0806004.
韩彪, 赵卫, 汪伟, 等. 面向水下应用的改进型光子计数通信方法[J]. 光学学报, 2016, **36**(8): 0806004.
- [16] He X M, Li X F, Zhang D Y, *et al.* Performance for efficient error correction coding in wireless optical communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2427–2429.
何小梅, 李晓峰, 张冬云, 等. 高效纠错编码技术在无线光通信中的性能分析[J]. 光子学报, 2008, **37**(12): 2427–2429.
- [17] Irannejad M, Mahdavi-Nasab H. Low bit-rate SNR scalable video coding based on overcomplete dictionary learning and sparse representation[J]. *Multidimens Syst Signal Proc*, 2020, **31**(2): 465–489.
- [18] Guo J C, Jin M H J. Dictionary learning-based compressive video sensing codec model[J]. *J Data Acquisit Proc*, 2015, **30**(1): 59–67.
郭继昌, 金卯亨嘉. 一种基于字典学习的压缩感知视频编解码模型[J]. 数据采集与处理, 2015, **30**(1): 59–67.
- [19] Aharon M, Elad M, Bruckstein A. K-SVD: An algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation[J]. *IEEE Trans Signal Proc*, 2006, **54**(11): 4311–4322.
- [20] Chen H W, Kang L W, Lu C S. Dictionary learning-based distributed compressive video sensing[C]//*28th Picture Coding Symposium*, Nagoya, Japan, 2010: 210–213.
- [21] Sun Y P, Xu M, Tao X M, *et al.* Online dictionary learning based intra-frame video coding via sparse representation[C]//*The 15th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, Taipei, Taiwan, 2012: 16–20.
- [22] Xiong H K, Pan Z M, Ye X W, *et al.* Sparse spatio-temporal representation with adaptive regularized dictionary learning for low bit-rate video coding[J]. *IEEE Trans Circuits Syst Video Technol*, 2013, **23**(4): 710–728.
- [23] Rong Z L, Jing S Q, Hong J S. Research on digital fountain code method of free space optical communication[J]. *J Hunan Univ Sci Technol (Nat Sci Ed)*, 2017, **32**(4): 54–60.
荣子莉, 井帅奇, 洪劲松. 自由空间光通信中的数字喷泉码方法[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2017, **32**(4): 54–60.
- [24] Prakash G, Kulkarni M, Sripati U, *et al.* Performance analysis of free space optical Links Encoded Using Luby Transform code[C]//*2012 International Conference on Communication, Information & Computing Technology (ICCICT)*, Mumbai, India, 2012: 1–6.
- [25] Chen D, Ke X Z. Analysis on error rate of wireless optical communication using subcarrier modulation on LDPC code[J]. *Laser Technology*, 2011, **35**(3): 388–390, 402.
陈丹, 柯熙政. 基于 LDPC 码的无线光通信副载波误码性能分析[J]. 激光技术, 2011, **35**(3): 388–390, 402.
- [26] Lin Y Z, Wu C K, Liu W. Application of the concatenation of q-LDPC and luby transform codes in deep communications[J]. *J Electron Inform Technol*, 2010, **32**(8): 1898–1903.
林永照, 吴成柯, 刘薇. LT 码和 q-LDPC 码级联方案在深空通信中的应用[J]. 电子与信息学报, 2010, **32**(8): 1898–1903.
- [27] Ke X Z, Yin Z Y. *Coding Theory in Wireless Laser Communication System*[M]. Beijing: Science Press, 2009: 188–226.
柯熙政, 殷致云. 无线激光通信系统中的编码理论[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 188–226.
- [28] Hong Z, Yan Q R, Li Z H, *et al.* Photon-counting underwater optical wireless communication for reliable video transmission using joint source-channel coding based on distributed compressive sensing[J]. *Sensors*, 2019, **19**(5): 1042–1053.
- [29] Wang X Z. Research on LT codes degree distribution optimization and decoding algorithms[D]. Xi'an: Xidian University, 2014: 1–75.
王新泽. LT 码的度分布设计及译码算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 1–75.
- [30] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Trans Inform Theory*, 2007, **53**(12): 4655–4666.
- [31] Li Y Z. Applications and research on SFEC for 100Gb/s WDM system[D]. Wuhan: Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, 2012: 1–67.
李艳子. 超强前向纠错技术在 100Gb/s WDM 系统中的应用与研究[D]. 武汉: 武汉邮电科学研究院, 2012: 1–67.
- [32] Zhang X, Cao Y, Peng X F, *et al.* Research on coding technology of LT code in free space optical communication[J]. *Semicond Optoelectron*, 2017, **38**(2): 242–245.
张勋, 曹阳, 彭小峰, 等. 自由空间光通信中 LT 码的编码技术研究[J]. 半导体光电, 2017, **38**(2): 242–245.

Research on joint coding for underwater single-photon video communication

Dai Weihui, Yan Qiurong*, Wang Ming, Hong Zhu, Yang Cheng

School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China



Experimental system scheme of underwater single-photon video communication

Overview: In recent years, underwater wireless optical communication has played an important role in environmental inspection, marine exploration fields, etc., and has received more and more attention. It has the advantages of high bandwidth, fast speed, strong anti-electromagnetic interference ability, etc. Because the video can convey information intuitively, the transmission of video in underwater wireless optical communication has become a research hotspot. In order to achieve effective and reliable video transmission, a video joint coding scheme based on dictionary learning and concatenation of LT code and LDPC code is proposed for underwater single-photon communication system. The scheme improves the data compression rate and data coding efficiency, and achieves the optimal synchronization of transmission quality and transmission efficiency. Aiming at the problem of large amount of video data, the dictionary learning sparse coding method is used, and each frame of video image transmits the sparse matrix information, and the decoding of each video frames does not affect each other. This method greatly reduces the amount of video data and improves the effectiveness of the communication system. In view of the deletion characteristic of underwater single-photon channel, LT-LDPC channel concatenated coding method is used. LT digital fountain code is specially designed to deal with various deletion channels. As long as enough fountain packets are received, the data can be restored. However, since the decoding overhead is too large, erroneous symbols are corrected by cascading LDPC codes to reduce the decoding overhead. Through experiments, the influence of encoding method and decoding success judgment threshold on decoding overhead is analyzed. The results prove that cascaded coding can overcome the disadvantage of excessive decoding overhead of LT code. At the same time, the decoding overhead decreases with the increase of the judgment threshold of decoding success. Aim to solve the problem of decoding failure probability of LT code, a double feedback mechanism for decoding success is proposed, which can also realize the clear recovery of video frames in a communication environment with a high bit error rate. Experimental results show that as the judgment threshold of decoding success increases, the average PSNR of video frames gradually decreases. As the video compression rate increases, the average PSNR value becomes smaller. When the channel error rate is in the order of 10^{-2} and the video compression rate is 75.6%, the video frames can be reconstructed with an average peak signal-to-noise ratio (PSNR) of 37.4921 dB.

Dai W H, Yan Q R, Wang M, *et al.* Research on joint coding for underwater single-photon video communication[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(5): 200327; DOI: 10.12086/oe.2021.200327

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61865010, 61565012) and Funding Scheme to Outstanding Young Talents of Jiangxi Province (20171BCB23007)

* E-mail: yanqiurong@ncu.edu.cn