

引用格式: 张健. 基于 SPIHT 和视觉显著性检测的彩色图像水声信道传输[J]. 声学技术, 2024, 43(2): 205-212. [ZHANG Jian. Color image transmission in underwater acoustic channel based on SPIHT and visual saliency detection[J]. Technical Acoustics, 2024, 43(2): 205-212.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2024.02.007

# 基于 SPIHT 和视觉显著性检测的 彩色图像水声信道传输

张健

(深圳信息职业技术学院, 广东深圳 518055)

**摘要:** 在学术和工程领域, 如何在带宽严重受限的水声信道中获取具有一定可用性的彩色图像一直是一个备受关注的问题。文章提出了一种新的水下彩色图像传输方法, 利用基于分级树集合分裂(Set Partitioning in Hierarchical Trees, SPIHT)算法的图像渐进传输和视觉显著性检测, 在复杂多变、带宽严重受限的水声信道中获得可用性较好的水下彩色图像。该方法根据信噪比动态调整数据传输方案, 并使用红色通道补偿来提高频域中显著性检测的准确性。然后使用 SPIHT 渐进传输图像, 并在接收端通过导向滤波解决高降采样率引起的块效应, 以获得高质量的水下图像。实验结果表明, 所提出的方法在压缩水下彩色图像方面具有一定的适用性。

**关键词:** 水下图像传输; 水下图像压缩; 分级树集合分裂(SPIHT)算法; 视觉显著性

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2024)-02-0205-08

## Color image transmission in underwater acoustic channel based on SPIHT and visual saliency detection

ZHANG Jian

(Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

**Abstract:** In both the academic and engineering fields, the pursuit of obtaining color images with certain availability in severely bandwidth-constrained underwater acoustic channels is a matter of great interest and attention. In this paper, a new method for underwater color image transmission is proposed, which utilizes the set partitioning in hierarchical trees (SPIHT) algorithm based progressive image transmission and visual saliency detection to achieve underwater color images with better availability in complex and highly bandwidth-constrained underwater acoustic channels. The method dynamically adjusts the data transmission scheme based on the signal-to-noise ratio and employs red channel compensation to enhance the accuracy of saliency detection in the frequency domain. Subsequently, the SPIHT is used for progressive image transmission, and the block artifacts caused by high down sampling rates are addressed by using guided filtering at the receiver end to obtain high-quality underwater images. Experimental results demonstrate the applicability of the proposed method in compressing underwater color images.

**Key words:** underwater image transmission; underwater image compression; set partitioning in hierarchical trees (SPIHT) algorithm; visual saliency detection

## 0 引言

21 世纪是海洋的世纪, 随着陆地资源的匮乏和人类日益激增的物质需求, 海洋探索以及资源开采受到了各国以及各前沿学科的高度关注。近年来, 作为代替人类、前往深海探索的自主式水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV), 在航行性

能以及通信能力上都有着显著的提升。

作为 AUV 获取环境信息的主要途径, 光学视觉和声学视觉在设备避障、图像采集、海底探测等任务中起着关键的作用。目前, AUV 配备水声通信机已成为常态, 通过水声远程控制 AUV 执行水下作业任务已取得了显著成果。和控制信息相比, 由于水声信道固有特性的影响, 以大数据量为代表的水声图像传输发展缓慢, 实用性较差。

水声信道存在带宽窄、噪声大和强多径效应等问题, 是除深空通信外最复杂的信道<sup>[1]</sup>, 高频的声波信号在水中的衰减较大, 其衰减系数与声波频率的平方成正比。Stojanovic<sup>[2]</sup>指出, 中距离通信系统

收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2023-03-08

作者简介: 张健(1981—), 男, 广东深圳人, 博士, 高级工程师, 研究方向为通信编解码、模式识别等。

通信作者: 张健, E-mail: zpower007@163.com

的带宽被限制在 10 kHz 的量级上, 对于一幅像素点量化为 8 bit 的  $256 \times 256$  的灰度图像, 数据量为 524 288 bit, 设水声信道的传输数据率为  $10 \text{ kb} \cdot \text{s}^{-1}$ , 如果不经数据压缩, 传输需要 52.4 s, 无法满足运动状态下 AUV 数据采集任务的刷新频率。在保证图像可用性的前提下, 如何有效利用图像压缩策略, 提高图像的压缩比(Compression Ratio, CR), 是水声图像传输的关键。

图像压缩分为有损压缩和无损压缩, 由于水体和水中悬浮颗粒的影响, 水下图像多存在严重的色偏、浑浊问题和大量的视觉冗余, 采用有损压缩能够在保护有用信息的同时实现高压缩比压缩。常见的有损图像压缩方法有: 预测编码、变换编码和模型编码等, 其中最常用的为基于变换的压缩编码。基于变换的压缩编码可分为基于离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)的压缩编码和基于离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)的压缩编码。联合图像专家小组(Joint Photographic Experts Group, JPEG)基于 DCT 技术, 算法复杂度低, 实时性较好, 但不支持多分辨率渐进传输(Progressive Transmission), 且在 CR 较高时, 易出现图像块失真; JPEG2000 和多级树集合分裂(Set Partitioning in Hierarchical Trees, SPIHT)均基于 DWT 技术, 随着 CR 的增大, 都显示出平滑稳定的性能<sup>[3]</sup>, 前者算法复杂, 实时性差, 后者实时性较好, 且支持多分辨率渐进传输。

小波变换是一种时频局部化的信号处理方法, 该方法是在多分辨率或多尺度上分析信号<sup>[4]</sup>。1993 年 Shapiro<sup>[5]</sup>在小波变换的基础上引入零树结构和嵌入式编码的概念, 提出了嵌入式零树小波编码(Embedded Zerotree Wavelet, EZW)算法, 根据压缩比率按重要性优先编码和渐进传输小波系数, 以精确控制传输码流。在 EZW 的基础上, 1996 年 Said 等<sup>[6]</sup>提出了编码效率和压缩性能更加优异的 SPIHT 算法。

Hoag 等<sup>[7]</sup>的研究表明小波变换技术适用于水下图像高 CR 压缩, 渐进传输在水下图像传输中起到了重要的作用。高春仙等<sup>[8]</sup>提出基于位平面的水下图像传输渐进方法, 在较低接收信噪比下表现优秀。韩硕等<sup>[9]</sup>的研究表明渐进传输能提高水下图像通信的可靠性。陈鑫等<sup>[10]</sup>在 SPIHT 算法中嵌入感兴趣区域(Region Of Interest, ROI), 并通过位平面移动的方式优先解码 ROI, 得到了优于 SPIHT 的结果。上述方法多从灰度图出发, 而未关注水下彩色图像的特点。Ahn 等<sup>[11]</sup>提出了一套可实用的 AUV 水声图像传输系统, 通过基于 Retinex 的增强算法预处理图像, 利用显著性图(Saliency Map, SM)获取图像的兴趣

区域, 并使用基于颜色深度的方法进行图像压缩后传输, 但该算法没有渐进传输的能力。

本文基于水下彩色图像, 利用红色通道补偿有效去除了水下图像的色偏问题, 提高了显著性图提取的精度, 通过彩色模型转换、下采样以及导向滤波联合处理, 在基于 SPIHT 的渐进传输过程中, 降低了彩色图像的数据量, 进一步提高了压缩图像的质量。实验结果表明, 本文方法具有一定的优越性。

## 1 基本原理

### 1.1 水下图像视觉显著性检测

在水下图像采集中, 由于数据交互的实时性较差, 采集过程中对目标物体的跟踪以及持续性观测能力不足, 获取的数据中, 相较于任务执行者感兴趣的目标区域, 背景区域占比较大。因此在图像传输过程中, 需要提高目标区域的数据量占比, 从而提高水声信道的带宽利用率。

视觉显著性检测指利用数学建模等方式模拟人类的视觉注意力机制, 提取视觉中重要信息的方法, 被广泛应用于图像压缩、目标检测、图像检索等领域<sup>[12]</sup>。目前视觉显著性检测方法多以陆地上的自然图像为主, 提取多尺度图像的颜色信息、方向信息以及像素强度等, 通过融合的方式获得最终的显著图<sup>[13]</sup>。和陆地上的图像不同, 水下图像多存在信噪比低、色偏、模糊不清等问题<sup>[14]</sup>, 因此陆上的图像处理算法无法直接应用于水下图像。

红色通道补偿<sup>[15]</sup>方法可以有效解决白平衡算法造成的水下图像的红色伪影问题, 将其结果作为白平衡方法的输入, 可以有效解决水下图像的色偏问题。首先, 对图像红色通道的各像素点进行补偿:

$$I_m(x) = I_r(x) + \alpha(\bar{I}_g - \bar{I}_r)[1 - I_r(x)]I_g(x) \quad (1)$$

式中:  $I_m(x)$  表示补偿后像素点  $x$  的红色通道的值;  $\alpha$  表示补偿操作的强弱程度, 本文通过对第 3 节采用的水下图像数据集的增强结果进行分析, 这里给出的参考值为 1.2;  $\bar{I}_g$  和  $\bar{I}_r$  分别表示图像的绿色通道和红色通道的平均值。在近海以及湖泊中, 大量的浮游生物吸收蓝色光进行光合作用, 导致图像的蓝色通道衰减强烈, 此时需要对蓝色通道进行补偿:

$$I_{bm}(x) = I_b(x) + \alpha(\bar{I}_g - \bar{I}_b)[1 - I_b(x)]I_g(x) \quad (2)$$

式中:  $I_{bm}(x)$  表示补偿后的蓝色通道的值;  $\bar{I}_b$  表示图像的蓝色通道的平均值。对补偿后的图像进行直方图归一化处理, 获取无色偏的水下图像。

基于频域高斯融合多尺度差异的快速视觉显著性检测算法<sup>[16]</sup>通过振幅谱分析可以快速找到对象的

尺度空间,降低了频域法检测显著性的时间成本。水下环境复杂多变,拍摄目标的体积以及拍摄距离的远近相差较大,因此快速定位目标的尺度空间在节能以及提高算法效率等方面都非常重要。

### (1) 彩色模型转换

彩色模型是描述图像的基础,合适的模型能够提高显著性检测中相关信息的占比。CIELAB彩色模型覆盖了人类可见的全部颜色,广泛应用于显著性检测,利用 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 三个坐标轴,指示颜色在几何坐标图中的位置,本文在显著性检测时采用该彩色模型。

### (2) 特征图获取

采用频域对比度增强法生成特征图,利用二维傅里叶变换获取图像 $L$ 、 $a$ 和 $b$ 三个分量的频谱图。通过能量谱,调节自适应参数,生成频域特征滤波器。对各分量的频谱图进行滤波,并利用二维傅里叶反变换法获得特征图,并为其添加中心遮罩,以凸显图像的中心区域。

### (3) 生成显著图

计算特征图的二维离散余弦变换,并将其作为输入,利用高斯差分带通滤波器处理,最后通过二维逆离散余弦变换获得最终的显著图。

水下图像的显著图以及增强水下图像的显著图的对比如图1所示。水下图像的色偏问题缩小了图像中鲸鱼和背景的差异,此时获得的显著图仅对鲸鱼身体的亮色区域有响应,因此后续提取的感兴趣区域并不能很好地包括鲸鱼的整个身体。如图1(d)所示,增强后的水下图像视觉效果较好,色偏和浑浊问题均得到了明显改善,获得的显著图对鲸鱼的身体区域也出现了明显的响应,因此后续提取的感兴趣区域包括了鲸鱼的整个身体。

## 1.2 YCbCr彩色模型

彩色模型的目的是在某些标准下用通常可以接

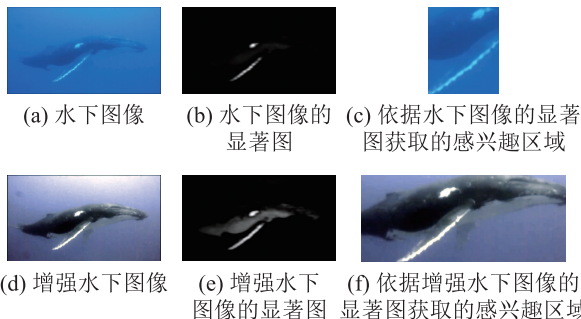


图1 水下图像的显著图以及增强水下图像的显著图的对比实验结果

Fig.1 Comparison experimental results of underwater image saliency maps and the enhanced underwater image saliency maps

受的方式方便地对彩色加以说明<sup>[4]</sup>。YCbCr彩色模型考虑到人类视觉对亮度的敏感度远大于色彩细节,将true-color颜色空间编译为明度( $Y$ )和色度( $C_b$ 表示蓝和绿的色度, $C_r$ 表示红和绿的色度)的组合,以实现明度和色度的不同CR压缩,而不引起压缩前后的图像在人眼中出现较大的差异。RGB与YCbCr的转换关系为<sup>[17]</sup>

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_r \\ C_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2990 & 0.5870 & 0.1140 \\ 0.5000 & -0.4190 & -0.0810 \\ -0.1690 & -0.3310 & 0.5000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3)$$

常用的YCbCr采样方式有:4:4:4、4:2:2、4:2:0,其中4:4:4表示色度分量未进行下采样,4:2:2表示每个色度分量进行2倍的下采样,4:2:0表示每个色度分量进行4倍的下采样,即4个 $Y$ 分量和1组 $C_b$ 、 $C_r$ 分量对应。由于水下图像通常面临着色偏和浑浊问题,因此图像存在大量的视觉冗余,本文将原始图像转换到YCbCr颜色模型,将明度和色度分离,在保证图像质量的前提下,对 $C_b$ 和 $C_r$ 分量进行16倍的下采样,并在图像重构时采用最近邻插值法对两个分量进行上采样。图像压缩实验如图2所示,可以看出,通过上述方法压缩后的图像和原始图像的差异较小,压缩后图像与原始图像的结构相似性(Structural Similarity, SSIM)为0.9897。



(a) 原始图像 (b) 压缩图像

图2 图像压缩实验结果的对比

Fig.2 Comparison of image compression experimental results

## 1.3 SPIHT算法

小波变换作为一种变换域的信号处理方法,在图像压缩、去噪、融合等方面发挥着重要的作用。小波变换将强相关的空间像素阵映射为能量紧凑分布的小波系数阵,图像的主要能量集中在少量的大值小波系数中,其他非重要的细节则分布在大量的小值小波系数中。因此小波变换可以实现用少量的小波系数恢复出图像的大部分内容,进而实现高CR压缩。三级二维离散小波变换如图3所示。一级小波分解:系数按照从低频到高频的顺序呈树形结构,整幅图像分成4个子带:低频子带( $LL_1$ )、 $LH_1$ 、 $HL_1$ 和 $HH_1$ ,其中 $LL_1$ 包含了图像的主要结构和全局特征,而 $LH_1$ 、 $HL_1$ 、 $HH_1$ 分别为水平、垂直和对角线上的高频子带,包含了图像的细节信息。二级小波分解:将 $LL_1$ 子带进一步分解为4个子带,

得到  $LL_2$ 、 $LH_2$ 、 $HL_2$  和  $HH_2$ 。三级小波分解：将  $LL_2$  子带再次分解为 4 个子带，得到  $LL_3$ 、 $LH_3$ 、 $HL_3$  和  $HH_3$ 。三级二维离散小波变换示意图如图 3 所示。从图 3 中可以看出，图像的主要信息多集中在小波分解的低频子带中。



图3 三级二维离散小波变换示意图

Fig.3 Schematic diagram of three-level two-dimensional discrete wavelet transform

EZW 算法采用零树量化方法<sup>[18]</sup>，依据不同尺度小波系数的空间相似性构造零树，按比特平面有限传输重要系数，为保证重要信息优先输出，从低频子带逐步向高频子带“之”字型扫描。SPIHT 在 EZW 的基础上，采用空间方向树分割的方法，消去树间冗余，修改 EZW 中重要系数的排序先后，简化集合的表达。SPIHT 算法中判断小波系数重要性的公式<sup>[19]</sup>为

$$S_n(\mathbf{X}) = \begin{cases} 1, & \max_{(i,j) \in \mathbf{X}} \left\{ |c(i,j)| \right\} \geq 2^n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\mathbf{X}$  为小波系数坐标集合； $c(i,j)$  为位于  $(i,j)$  处的小波系数。

SPIHT 算法需要定义 4 种集合：所有根节点的坐标集合  $\mathbf{H}(i,j)$ ；位置  $(i,j)$  处的小波系数的直接后代的坐标集合，集合中包含 4 个后代或 0 个后代  $\mathbf{O}(i,j)$ ；位置  $(i,j)$  处的小波系数的所有后代的坐标集合  $\mathbf{D}(i,j)$ ；位置  $(i,j)$  处的小波系数的所有非直接后代的坐标集合  $\mathbf{L}(i,j)$ ，即  $\mathbf{D}(i,j) - \mathbf{O}(i,j)$ 。

引入 3 个有序列表用于储存系数值的坐标位置：重要系数列表  $\mathbf{L}_{sp}$  (List of Significant Pixels, LSP)、非重要系数列表  $\mathbf{L}_{ip}$  (List of Insignificant Pixels, LIP)、非重要集合列表  $\mathbf{L}_{is}$  (List of Insignificant Sets, LIS)。SPIHT 算法的主要流程为初始化阈值和列表、排序扫描、精细扫描。

#### (1) 初始化阈值和列表

算法通过一系列阈值  $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{N-1}$  确定小波系数关于各阈值的重要性，初始化阈值  $T=2^n$ ，式中  $n = \lfloor \log_2 \max \{ |c(i,j)| \} \rfloor$ ， $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整。各列表初始化为

$$\begin{cases} \mathbf{L}_{sp} = \emptyset \\ \mathbf{L}_{ip} = \{ (i,j) | (i,j) \in H \} \\ \mathbf{L}_{is} = \{ D(i,j) | (i,j) \in H \} \end{cases} \quad (5)$$

#### (2) 排序扫描

按照 EZW 零树的 Morton 扫描顺序 (Z 字扫描)，对 LIP 中的每个小波系数进行扫描，如果  $S_n(i,j) = 1$ ，则输出 1 和一个符号位 ( $c(i,j) \geq 0$ ，符号位为 1， $c(i,j) < 0$ ，则符号位为 0)，并将该位置存入 LSP 末端，其他情况输出 0，且不存入列表内。

对 LIS 中每个元素进行扫描：①若元素属于  $\mathbf{D}$  集合，则进一步检查元素的 4 个后代系数，若为重要系数则输出 1，并将其位置转移到 LSP 中，若为非重要系数则输出 0，并将其位置转移至 LIP 中。最后将元素从 LIS 中删除。②若元素属于  $\mathbf{L}$  集合，则判断集合是否为重要集合，若为重要集合则输出 1，并在 LIS 中删除该元素，同时将集合中的 4 个坐标加入 LIS 中，若为非重要集合，则输出 0，并将该元素保留在 LIS 中。

#### (3) 精细扫描

依次扫描 LIP 中元素 (不包括本次扫描产生的元素)，输出元素小波系数的第  $n$  个高位。若  $n=0$ ，则过程终止，否则执行  $n=n-1$ ，循环过程 (2) 和 (3)。

### 1.4 导向滤波

在图像压缩过程中，采用  $C_b$ 、 $C_r$  分量进行 16 倍下采样虽然可以有效地降低图像传输过程中的数据总量，但在图像进行大 CR 处理时， $C_b$ 、 $C_r$  的图像质量较差，恢复后的彩色图像容易出现质量严重低于  $Y$  分量的情况。YCbCr 彩色模型各分量的图像结构具有相似性，因此可以将质量较好的  $Y$  分量作为参考，增强  $C_b$  分量和  $C_r$  分量。

导向滤波最初被用于解决暗通道先验算法中透射率的块效应问题<sup>[20]</sup>，在保持图像边缘细节的同时，提高图像的平滑度，之后广泛应用于细节增强、深度图修整及图像去雾等研究领域。本文在水声通信接收端，将小波反变换获得的  $Y$  分量图作为导向图，将上采样 16 倍的  $C_b$  和  $C_r$  分量图作为被导图，获得增强边缘和纹理细节的  $C_b$  和  $C_r$  分量图，并将  $Y$  分量和增强后的  $C_b$  和  $C_r$  进行组合，通过 YCbCr 彩色模型向 RGB 彩色模型转换，获得最终的水下图像。导向滤波增强分量图对比实验结果如

图4所示,由 $C_b$ 和 $C_r$ 的分量图和增强分量图中的红框放大图可以看出,加入导向滤波后,图像高倍率上采样造成的块效应得到了明显的改善,从重构图可以看出,增强后图像的边缘过渡更加自然。

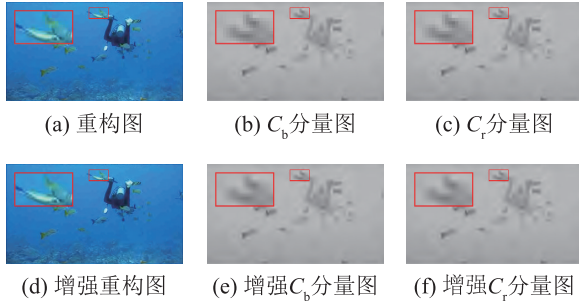


图4 导向滤波增强分量图对比实验结果

Fig.4 Comparison experimental results of guided-filtering enhanced component images

## 2 图像渐进传输

水声信道属于窄带通信,具有高延迟、高动态、多径效应严重、环境噪声大等特点,造成了水声信道数据传输速率低,误码率高等问题。因此水下数据传输必须充分考虑环境问题,保证数据的可用性以及可传递性。

水下彩色图像传输算法流程图如图5所示。本文的图像渐进传输方法主要关注AUV或水下潜标作为载体的图像采集系统,这些系统具备一定的数据处理能力,但能源有限,不能持续性地自主、高频率地回传图像。在图像采集后,本文利用红通道补偿的方法,解决图像的色偏和浑浊问题,并通过快速视觉显著性检测算法,定位图像中的感兴趣区域,然后通过彩色模型转换和下采样的方式,初步

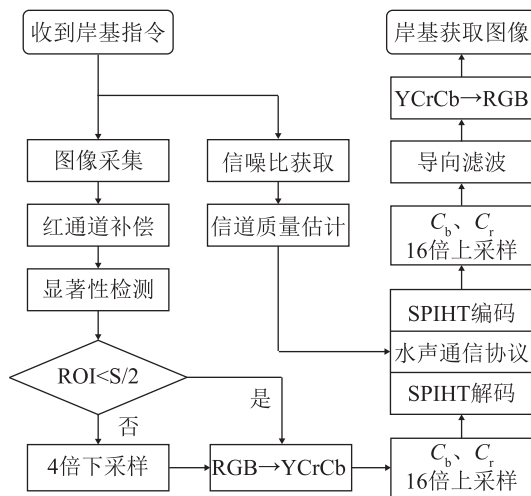


图5 水下彩色图像传输算法流程图

Fig.5 Flow chart of underwater color image transmission algorithm

降低图像的总数据量,最后采用SPIHT算法实现图像的渐进传输。当显著性检测时,若ROI大于或等于图像面积 $S$ 的一半,则表示当前图像比较复杂。考虑到数据量的增大,会显著造成水声信道的长时间占用,因此这里对图像进行4倍的下采样以应对水下图像传输的实际需求。

渐进传输过程中,岸基收到一个数据包后,就可以绘制出整张图像,后续接收到的每个数据包,都会进一步提高图像的清晰度。当图像质量达到可使用的标准时,岸基会下发终止渐进传输指令,以停止水下设备对水声信道的占用。

目前,针对渐进传输的水声通信协议并没有规范性的设计,因此本文依据实际使用过程中的需求,对该过程进行说明。由于水声通信多为半双工传输模式,因此需要考虑通信冲突的问题,水下设备在渐进传输过程中需要设计接收岸基终止渐进传输指令的停止等待协议。停止等待时隙 $t_d$ 计算公式为

$$t_d = t_a + 2R/c \quad (6)$$

式中: $t_a$ 为处理时延,代表基站接收到水下设备的图像数据后,到决定是否下达终止传输指令的最短时间; $R$ 表示从水下设备到基站的斜距,该信息可以通过接收信号的强度指示进行粗略估计; $c$ 表示声信号在水下的传播速度。在水下无线传感器网络中,网络协议充分考虑了数据的交互,因此不需要单独为图像渐进传输设置停等协议。在点对点连续数据传输时,需要在多个包之间停等岸基回传的终止指令。

由于本文主要针对岸基发送数据采集指令,水下设备收到指令并执行图像传输任务的应用场景,因此图像传输设备可以通过接收到指令信号的信噪比信息,估计信道质量,进而选择不同的单包数据长度和传输次数,以应对水声信道的多变性。当岸基收到图像后,利用SPIHT算法还原 $Y$ 分量图像, $C_b$ 分量图像和 $C_r$ 分量图像,并通过导向滤波,进一步提高图像的质量。为了便于后文对本文算法流程中的各处理步骤的作用进行对比,将图5所述的全算法流程命名为本文算法3;将不包含感兴趣区域获取的本文算法3命名为本文算法2;将不包含导向滤波过程的本文算法2命名为本文算法1。

## 3 结果与分析

为了验证本文方法的有效性,在公开的数据集UIEB<sup>[21]</sup>上进行实验。该数据集包括两个子集:890张原始水下图像和60张质量较差的水下图像。数据集中图像的分辨率范围为 $183 \times 275$ 至 $1350 \times$

1 800, 涵盖了大部分水下图像清晰化方法中常用的测试图像。对比实验中采用的图像评价方法有峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)和结构相似性(Structural Similarity Index Measurement system, SSIM)。PSNR 表示信号最大可能功率与影响信号表示精度的破坏性噪声功率的比。在图像质量评价中, PSNR 越大, 表示压缩后图像与未退化图像越接近, 压缩算法的性能越好。SSIM 是衡量图像相似性的全参考指标, 包括了图像的亮度、对比度和结构三个因素, SSIM 越接近于 1, 表示图像相

似度越高, 压缩算法的性能越好。

### 3.1 水下图像压缩实验

为验证本文提出算法的有效性, 在 UIEB 数据集的 60 张图像质量较差的水下图像上, 对比 JPEG2000、RGB+SPIHT(RGB 图像加后续的 SPIHT 压缩算法)、本文算法 1 和本文算法 2 的结果。图像的压缩结果如图 6 所示, 图像的 SSIM、PSNR 结果如表 1、2 所示。

从图 6 可以看出, 当压缩比  $R_c$  的倒数  $1/R_c$  较低

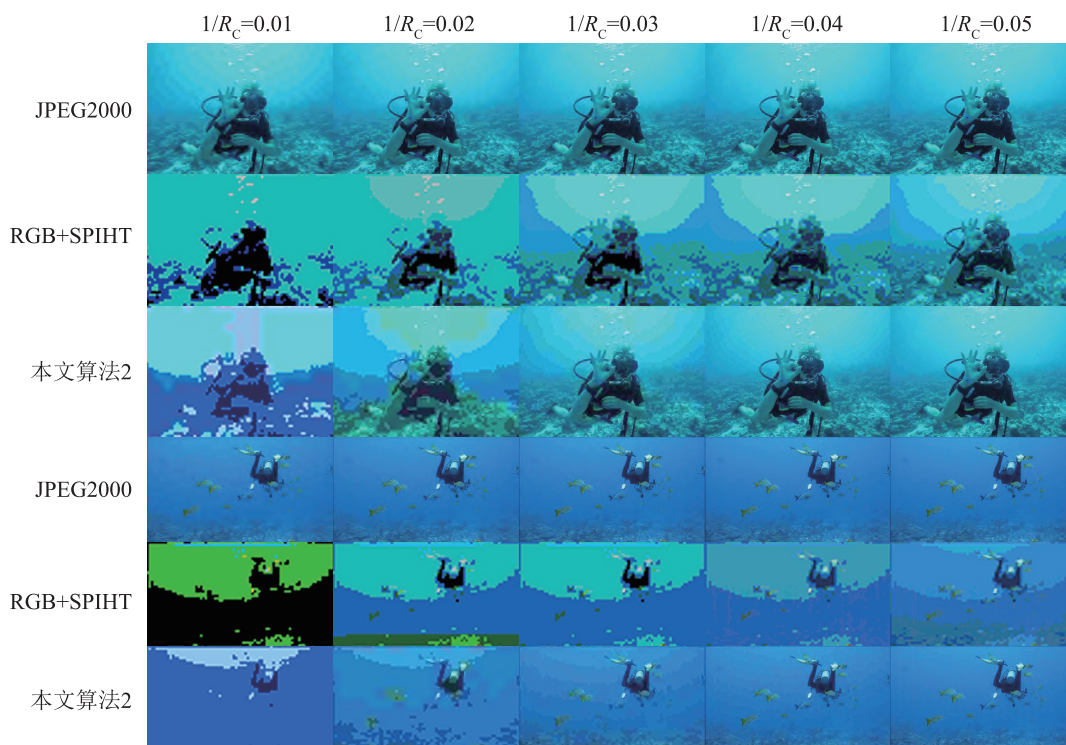


图 6 不同压缩算法的图像压缩实验结果的对比

Fig.6 Comparison of image compression experimental results for different compression algorithms

表 1 压缩图像的 SSIM 对比

Table 1 SSIM comparison of compressed images

压缩算法	SSIM								
	$1/R_c=0.01$	$1/R_c=0.02$	$1/R_c=0.03$	$1/R_c=0.04$	$1/R_c=0.05$	$1/R_c=0.06$	$1/R_c=0.07$	$1/R_c=0.08$	$1/R_c=0.12$
JPEG2000	0.756 5	0.825 2	0.868 8	0.897 9	0.914 0	0.931 0	0.941 1	0.996 6	0.994 9
RGB+SPIHT	0.194 2	0.460 7	0.476 5	0.633 8	0.726 4	0.748 9	0.809 7	0.986 1	0.931 6
本文算法 1	0.477 7	0.675 8	0.797 2	0.876 8	0.920 0	0.941 0	0.951 9	0.967 7	0.965 8
本文算法 2	0.481 8	0.680 1	0.800 1	0.880 4	0.924 3	0.945 8	0.956 8	0.972 3	0.970 8

表 2 压缩图像的 PSNR 对比

Table 2 PSNR comparison of compressed images

压缩算法	PSNR								
	$1/R_c=0.01$	$1/R_c=0.02$	$1/R_c=0.03$	$1/R_c=0.04$	$1/R_c=0.05$	$1/R_c=0.06$	$1/R_c=0.07$	$1/R_c=0.08$	$1/R_c=0.12$
JPEG2000	25.70	27.62	29.49	31.08	32.02	33.43	34.52	53.43	51.70
RGB+SPIHT	13.71	19.67	20.21	24.98	28.04	28.84	31.29	41.78	37.80
本文算法 1	18.96	25.96	31.38	35.18	37.91	39.41	40.20	41.23	41.15
本文算法 2	18.96	25.96	31.38	35.18	37.91	39.42	40.22	41.24	41.16

时, JPEG2000算法性能良好。本文算法2在 $1/R_c$ 为0.02时, 可以获得具有一定可用性的水下图像, 而RGB+SPIHT在 $1/R_c$ 为0.04时, 才获得类似图像。从表1和表2可以看出, 在60张图处理结果的平均值中, 当 $1/R_c$ 较低时, JPEG2000获得了较大的SSIM值和PSNR值, 但是随着 $1/R_c$ 增加到0.04之后, 本文算法2获得了较大的SSIM值和PSNR值, 从图6的第4列, 第5列和第6列可以看出, 本文算法2压缩后图像的清晰度以及图像细节要优于JPEG2000压缩后的结果。

从图像传输角度分析, 例如, 当岸基对水下图像的清晰度有一定要求时, 需要通过水声通信传递5个图像数据包。当接收到第一个数据包时, 本文算法2压缩的数据已经可以显示图像, 且受误码的影响较小, 并随着剩余数据包的到达, 图像将逐渐清晰。而JPEG2000压缩的数据则需要等5个数据包均收到且无误码时, 才能成功显示完整的图像。

### 3.2 水下图像传输实验

为了验证本文提出算法的适用性, 以深圳市智慧海洋科技有限公司的水声通信机为例<sup>[22]</sup>, 在距离

为4.8 km时、中等水文条件、水深为10 m, 以模式4进行通信, 单次通信的包长为19 680 bit, 通信速率为 $3\ 184\ \text{bit}\cdot\text{s}^{-1}$ , 按照接收信号的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)可以将水声信道的质量分为好、中、差, 当SNR不小于7 dB时为好, 信噪比SNR为4~7 dB时为中, SNR小于4 dB时为差。固定数据量下不同图像压缩算法的对比实验结果如图7所示。当信道为好时, 可以满包长通信, 一次通信的数据量为19 680 bit, 通信时延为传输时延加传播时延, 设水中声速为 $1\ 500\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 即9.38 s; 当信道质量为中时, 将包长缩小到2/3, 即13 120 bit, 通信时延为7.32 s; 当信道质量为差时, 将包长缩小到1/3, 即6 560 bit, 通信时延为5.26 s。

当信道的质量较好时, 上述水声通信设备可以在发送时间间隔为10 s的水声通信网络下完成图像传输, 当信道的质量较差时, 可以在发送时间间隔为6 s的水声通信网络中, 占用3个时隙完成图像传输。从图7可以看出, 本文算法在数据量达到19 680 bit时, 便可获得可用性以及视觉效果较好的水下彩色图像。

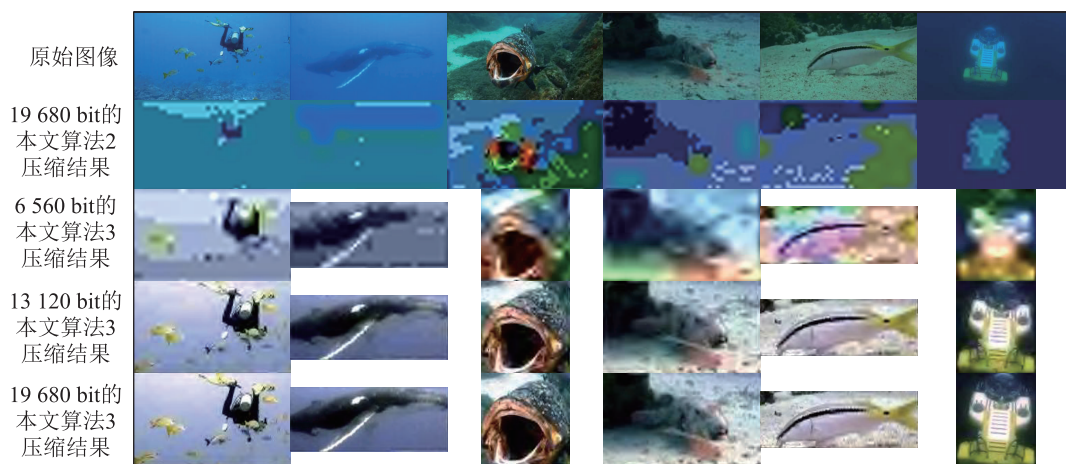


图7 固定数据量下不同图像压缩算法的对比实验结果

Fig.7 Comparison experimental results of different image compression algorithms under fixed data amount

## 4 结论

如何利用带宽严重受限的水声信道获取具有一定可用性的彩色图像一直是一个非常有挑战性的问题。本文基于SPIHT算法提供的图像渐进传输能力, 在前端采用红通道补偿的方式增强频域法检测水下图像显著性的能力, 利用彩色模型转换结合下采样的方式在前端降低水下彩色图像的数据量, 在后端通过导向滤波以Y分量图为参考, 解决大倍率上采样后的 $C_b$ 和 $C_r$ 分量块效应的问题, 以获得高

质量的水下图像。经实验结果分析, 本文方法优于传统的SPIHT方法, 且相较于JPEG2000算法更适用于水下彩色图像的压缩, 满足水下彩色图像传输的实际使用需求。

### 参 考 文 献

- [1] VACCARO R J. The past, present, and the future of underwater acoustic signal processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1998, 15(4): 21-51.
- [2] STOJANOVIC M. Recent advances in high-speed underwater acoustic communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1996, 21(2): 125-136.

- [3] DHAWAN S. A review of image compression and comparison of its algorithms[J]. *International Journal of electronics & Communication technology*, 2011, **2**(1): 22-26.
- [4] 冈萨雷斯. 数字图像处理(MATLAB版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [5] SHAPIRO J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, **41**(12): 3445-3462.
- [6] SAID A, PEARLMAN W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, **6**(3): 243-250.
- [7] HOAG D F, INGLE V K. Underwater image compression using the wavelet transform[C]//*Proceedings of OCEANS'94. Brest, France. IEEE*, 2002: II/533-II/537.
- [8] 高春仙, 刘慧. 基于位平面的渐进水声图像传输的研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2008, **47**(2): 172-177.  
GAO Chunxian, LIU Hui. The research of underwater image progressive transmission based on bit planes[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2008, **47**(2): 172-177.
- [9] 丁翠环. 渐进传输在水下图像通信中的应用研究[C]//*中国声学学会水声学分会 2013 年全国水声学学术会议论文集. 湛江*, 2013: 331-333.
- [10] 陈鑫, 陈晓, 蔡婷婷. 基于 SPIHT 算法的 ROI 编码研究[J]. *软件*, 2015, **36**(2): 112-117.  
CHEN Xin, CHEN Xiao, CAI Tingting. Research on ROI coding based on SPIHT algorithm[J]. *Computer Engineering & Software*, 2015, **36**(2): 112-117.
- [11] AHN J, YASUKAWA S, SONODA T, et al. An optical image transmission system for deep sea creature sampling missions using autonomous underwater vehicle[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2020, **45**(2): 350-361.
- [12] BYLINSKII Z, RECASENS A, BORJI A, et al. Where should saliency models look next? [M]//*Computer Vision - ECCV 2016. Cham: Springer International Publishing*, 2016: 809-824.
- [13] BORJI A, CHENG M M, HOU Q B, et al. Salient object detection: a survey[EB/OL]. 2014: arXiv: 1411.5878. <https://arxiv.org/abs/1411.5878>.
- [14] 王国霖, 田建东, 李鹏越. 基于双透射率水下成像模型的图像颜色校正[J]. *光学学报*, 2019, **39**(9): 16-25.  
WANG Guolin, TIAN Jiandong, LI Pengyue. Image color correction based on double transmission underwater imaging model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(9): 16-25.
- [15] ANCUTI C O, ANCUTI C, DE VLEESCHOUWER C, et al. Color balance and fusion for underwater image enhancement [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, **27**(1): 379-393.
- [16] LI W P, YANG X G, LI C X, et al. Fast visual saliency based on multi-scale difference of Gaussians fusion in frequency domain[J]. *IET Image Processing*, 2020, **14**(16): 4039-4048.
- [17] International Telecommunication Union Radio communications Sector (ITU-R). Studio encoding parameters of digital television for standard 4 : 3 and wide-screen 16 : 9 aspect ratios BT.601-5 [S]. 1995.
- [18] RUI X P. An improved EZW algorithm for image compression [C]//*Proceedings of 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Seoul, (South)Korea. IEEE*, 2005.
- [19] KAMARGAONKAR C, SHARMA M. Hybrid medical image compression method using SPIHT algorithm and Haar wavelet transform[C]//*2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). Chennai, India. IEEE*, 2016: 897-900.
- [20] HE K M, SUN J A, TANG X O. Guided image filtering[M]//*Computer Vision - ECCV 2010. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg*, 2010: 1-14.
- [21] LI C Y, GUO C L, REN W Q, et al. An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond[EB/OL]. 2019: arXiv: 1901.05495. <https://arxiv.org/abs/1901.05495>
- [22] WANG G L, LIU M Z, PAN X H, et al. Field experiment and analysis of underwater string networks based on PMAC[C]//*Proceedings of the 15th International Conference on Underwater Networks & Systems. Shenzhen, Guangdong, China. New York: ACM*, 2021: 1-8.