

图像端到端感知质量的快速估测方法*

袁飞^{1,2}, 陈炜玲^{1,2}, 张籍³, 程恩^{1,2}

- (1. 厦门大学 信息科学与技术学院通信工程系 厦门 361005;
2. 厦门大学 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门 361005;
3. 中国电子科技集团第二十六研究所 微声事业部 重庆 404100)

摘要: 本文介绍了一种新型的利用图像活动性 (IAM) 快速估计水下图像端到端体验质量的方法。首先引入结构相似度 (SSIM) 作为图像感知服务质量 (PQoS) 参数评价图像质量, 将图像初始活动性 (IAM) 作为区分图像内容的本征参数; 随后基于质量向量 (QV) 的概念, 分别分析了非压缩图像的结构相似度、图像初始活动性与无条件丢失概率 (SSIM-IAM-ulp) 之间的联合特性, 以及压缩图像的结构相似性、压缩率与无条件丢失概率 (SSIM-IAM-ulp) 之间的联合特性。最后, 在上述联合特性的基础上提出了劣化图像 SSIM 的预测算法。测试实验证明, 该类算法有较高的预测准确率, 预测误差最低可达 0.8%。

关键词: 感知服务质量; 曲线拟合; 空域活动性; 服务质量向量

中图分类号: TN911.73 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Quick estimation of end to end PQoS of image

Yuan Fei^{1,2}, Chen Weiling^{1,2}, Zhang Ji³, Cheng En^{1,2}

- (1. Department of Communication Engineering, School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. Microsonic Department, Institute No. 26, China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 404100, China)

Abstract: This paper introduces a novel method for quick estimating the end to end Perceived Quality of Service (PQoS) of underwater image based on image activity measure (IAM). Structure Similarity (SSIM) is first introduced as the evaluation standard of image PQoS parameter to evaluate the quality of image, while the IAM of original image is utilized as an intrinsic parameter to discriminate the image contents. Then, based on the concept of quality vector (QV), the SSIM-ulp-IAM₀ features for non-compressed picture are analyzed, and the SSIM-CR-ulp features for compressed picture are analyzed as well. On this basis, the prediction algorithm based on SSIM for the degraded image is proposed. Test experiment result shows that this kind of prediction algorithm has high accuracy rate, and the lowest prediction error reaches to 0.8%.

Keywords: perceived quality of service (PQoS); curve fitting; image activity measure (IAM); QoS vector

1 引言

近年来, 图像等多媒体业务逐渐成为水下通信领域研究的热点, 评估水下多媒体业务的服务质量成为研究重点之一^[1]。服务质量 (quality of service, QoS) 通常用网络参数 (如丢包率、延迟、抖动等) 来反映传输的多媒体

业务 (如语音、图像、视频) 的质量, 但这些网络参数并不能直观反映用户感受^[2]。从用户角度来感知多媒体业务的通信质量是当前发展的趋势。当前, 基于终端用户感知质量 (perceived QoS, PQoS) 的研究已逐渐在无线通信领域开展。从用户感知质量的角度对多媒体业务进行监控能更加精确地描述业务的服务水平, 并为调整提供依据。由于水声信道带宽窄、速率低, 要实现水下多媒体

收稿日期: 2015-01 Received Date: 2015-01

* 基金项目: 国家自然科学基金面上 (61571377, 61471308) 项目资助

通常需耗费较大的信道资源和能量开销。相比无线通信而言,水声通信的误码率偏高。因此,单纯采用误码率、丢包率、抖动延迟等传统 QoS 方法的链路性能估计往往会导致付出很高的链路开销和能量开销。而实际上,水下图像通信中,在误码不影响观看和理解的时候,并不需要采用自适应措施^[3],因为这些自适应措施往往是从误码率等角度评估业务性能,并不符合用户终端感受,消耗大量的带宽和能量资源却未必能换取相对应的用户体验改善。因此在水声通信环境中需要从用户感知的角度来评估质量好坏,并据此进行自适应调整。

目前图像通信中的用户服务质量主要依靠对接收数据的主观评价或客观评价。主观评价方法由于没有建立服务质量关于其影响因素的函数模型等缺陷所以没有得到广泛应用。客观评价方法分为全参考、半参考以及无参考3种^[4]。客观评价方法具有快捷方便、通用性强的优势,缺点是有时不能真实反映图像质量,与人的真实感受存在偏差^[5-8]。客观评测方法大多以全参考模式为主^[9],如文献[10]提出的基于注意转移机制的质量评价,在结构相似度图像质量评价方法(structural similarity, SSIM)^[11]的基础上,进一步考虑由视觉特征显著和失真严重引起的注意转移对视觉感知图的影响,由于全参考方法无法在发射端基于图像的自身特点进行传输效果的预判,阻碍了其在水下多媒体通信中的应用,因此一种可靠的非全参考的服务质量评价方式对于水声通信系统来说具有很大的意义^[12]。目前的半参考图像质量评价方式主要通过对比水印或特征参数在传输前后的变化,来评价接收图像质量^[13-15],这类方案大部分都没有考虑图像本身的特性对人眼感受的影响以及人眼本身的生理特性,所以评测的效果与人眼的主观感受会有一定的差异。

针对水声信道的特点,建立信道丢包模型,引入图像活动性检测,并基于 SSIM 作为图像感知质量评价体系,与人眼的主观感受相关度高。文中分别针对非压缩图像和压缩图像提出质量预测算法,利用质量向量(quality vector, QV)方法将三维质量预测模型分解为若干个与原图像空域活动性(image activity measure, IAM)相关的二维关系式的组合,基于该模型实现对用户体验质量的部分参考估计。

2 感知质量评测方案与原理

2.1 图像质量评测方案

目前已有一些客观图像质量评价算法,如峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)、SSIM 等,能够以相对较小的开销进行图像质量评价,但是他们不可避免地都具有如下缺陷:属于全参考的形式,对于无法获悉原

始图像的水声环境来说实用价值并不高。本文引入了图像的空域活动性(IAM₀)作为区分不同图像的特征,利用 IAM₀实现对劣化图像的客观质量评价参数 IPSNR 以及 SSIM 的预测。实现流程框图如图 1 所示。

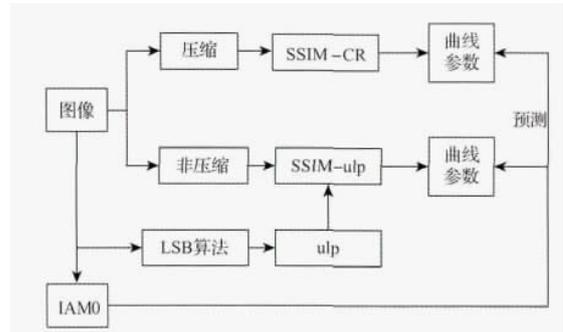


图 1 利用 IAM₀ 预测图像客观质量流程框图

Fig. 1 The flow diagram for using IAM₀ to forecast objective image quality

如图 1 所示,经过预实验,压缩图像的 SSIM-CR 曲线,非压缩图像的 SSIM-ulp 曲线与图像自身 IAM₀ 具有较高的相关度,所以分别对压缩图像与非压缩图像构建 SSIM 与图像压缩率(compression ratio, CR)以及无条件丢包率(unconditional loss probability, ulp)之间的函数关系,并将对应函数关系中的相关曲线参数提取出来,构建 IAM₀ 与这些参数的函数关系。这样只要知道图像 IAM₀ 与图像劣化的参数(ulp 或 CR)就能通过模型评测出图像的客观质量,实现了利用 IAM₀ 对图像客观质量进行非全参考预测的目的。图中,LSB(least significant bit)表示最低有效位算法,基于读信息隐藏方案可以在,不过多增加探测素材的情况下实现误码率统计。

2.2 结构相似度 SSIM

基于人类视觉系统更适宜于提取可视区域中的结构信息这一假设,Wang ZH 等人提出了一种评价图像质量的新概念,即结构相似度(SSIM)。SSIM 包含了原图像与失真图像在亮度、对比度及结构信息方面的比较,这 3 部分由单独的函数表示,分别为:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (1)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (2)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (3)$$

式中: μ_x 及 μ_y 分别为原图像与失真图像中局部像素块的平均亮度值, σ_x 与 σ_y 则分别为两幅图像中局部像素块的亮度标准差, σ_{xy} 为两幅图像中对应像素块的亮度相关系数。数值较小的正常数 C 是为了避免式(1)~(3)中分母值较小时引起的不稳定而增加的常量。以上 3 个比

较函数组成了模型的评判方法,如下:

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma \quad (4)$$

式中 α 、 β 及 γ 定义了 3 个比较函数的相对重要性。通常假定 3 个比较函数是同等重要的 ($\alpha = \beta = \gamma$), 因此最终的 SSIM 指数公式如下:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (5)$$

综上所述,图像 SSIM 值可以作为图像质量评价的依据,且评价结果与人眼的主观感受相对较接近,是目前使用比较广泛的图像质量评价方式,故本文将图像的 SSIM 值作为图像的 PQoS 参数。根据图像的 SSIM 值,可以将图像按照其感知质量进行分等级。如考虑将图像感知质量分为 3 个等级的情况:低质量、中等质量以及高质量图像可以分别对应图像 SSIM 值为 5~7、8~9 以及 9~10 的情况。

2.3 图像空域活动性

为描述图像的结构特点,引入图像空域活动性 (IAM) 的概念。将图像中边缘、纹理明显的区域定义为图像的活跃区域,图像的活跃区域越多越复杂,则称该图像的活性越高。在本文中,利用图像 IAM_0 作为区分图像的特征,将 IAM_0 作为预测模型的输入以获取对应图像的预测质量。

计算活性主要有对比方差检测法、图像梯度检测法、边缘信息检测法和小波系数检测法等^[16]。文献[17]认为,图像梯度检测法的 IAM 参数变化范围更广,有利于区分更多不同的图像,检测分辨率、检测性能较为突出。

图像梯度检测法通过对图像的水平 and 垂直梯度利用对数或者平方根之类的方程,其定义如下:

$$IAM = \frac{1}{M^* N} (A - B) \quad (6)$$

$$A = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N \left| \sqrt{I(i, j)} - I(i+1, j)} \right|$$

$$B = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} \left| \sqrt{I(i, j)} - I(i, j+1)} \right|$$

为简化计算,将式(6)改写如下:

$$IAM = \frac{1}{M^* N} [A' + B'] \quad (7)$$

$$A' = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N |I(i, j) - I(i+1, j)|$$

$$B' = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} |I(i, j) - I(i, j+1)|$$

图像的 IAM 值越大,表示其活性越好。设一幅图像的初始活性值为 IAM_0 。通常对于一幅图像而言,其初始活性值 IAM_0 是事先可测的常数,它反映了图像劣化前最初的结构信息,因此本文将图像的 IAM_0 作为区分

图像内容的本征参数。选用了按数字编号为 ~18 的 18 幅图像作为实验素材,如图 2 是素材库 1~18 号图像的 IAM_0 柱状图。结构复杂,纹理边缘较多的图像其 IAM_0 较高,本文选取的实验素材具有较广的 IAM_0 范围,其取值范围在 (7, 40) 之间。

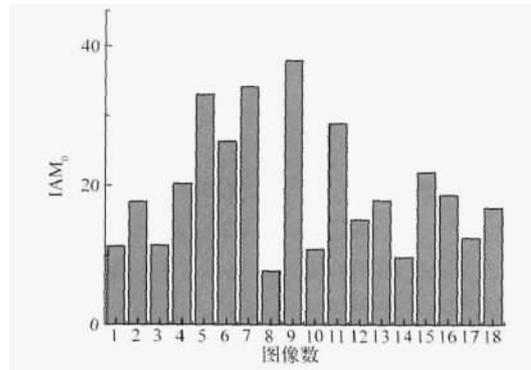


图 2 所选素材库各图像的 IAM_0

Fig. 2 The IAM_0 of the images in selected material library

3 水声劣化图像平台构建

3.1 水声图像劣化平台

水下光学图像的劣化大致有以下几类:水体波动导致图像产生自阴影、假纹理、假轮廓等假细节;水体及悬浮物对光的吸收、散射导致图像亮度非均匀、模糊和色彩降维;非均匀照明光、有限可视距离导致成像灰度不均和边缘平滑,这些现象都给后续目标辨识和图像处理造成了困难^[18]。这些影响因素大多是由于水声信道的恶劣条件造成的,但是要完全描述清楚一个水声信道几乎是不可能的。若将其看作一个随机过程,那么在有限时间内,其变化规律是有迹可循的。将水声信道看作随机过程,有限时间内其变化规律是平稳的。1960 年由 Gilbert E. N. 提出的 Gilbert 模型^[19]从丢包特性的角度描述水声信道,忽略了信道物理特性、系统制式等因素,而只把信道特性简化为数学统计模型,该模型只关注信道的统计特点。在进行水声实验后,可计算出真实水声信道的条件丢包概率 (conditional loss probability, clp) 与无条件丢包概率 (ulp),用以修正 Gilbert 丢包模型基本参数,仿真出丢包特性的水声网络。

3.2 基于 LSB 算法的信道丢包率估计

在实际的传输中,对于非压缩图像网络丢包是引起传输图像质量下降的一个原因,本文采用 Gilbert 水声信道丢包模型对 ulp 与图像 PQoS 的关系进行研究。由于信道丢包率无法直接测量得出,本文采用了一种

统计像素最低位误差的方法 (LSB 算法) 来计算 ulp, 以此观察预测出的 ulp 与图像 PQoS 的关系。LSB 算法是空域中的常见算法, 基本方法是用待嵌入的秘密信息取代载体图像的最低比特位, 原来图像的高 7 位与代表秘密信息的最低位组成含隐蔽信息的新图像。在传输过程中, 设像素的第 i 个码元受到攻击发生改变的概率是 p , 从概率的角度来讲, 各个码元发生改变的概率互相独立并相等。由于像素最低位的改变对图像的影响最小, 本文对所有像素的最低位做统一设置, 经过信道后, 只需统计最低比特位的改变总数, 即得到相关信道丢包率。如表 1 所示为对 p_1 、 p_2 两幅图像采用将图像最后一位全部置 0 的方法, 利用 LSB 算法预测的 ulp 值与实际 ulp 值的对比:

表 1 预测 ulp 值与实际 ulp 值的对比

Table 1 The comparison between the predicted ulp and actual ulp

实际 ulp	预测 ulp	
	P_1	P_2
0.03	0.014 1	0.014 5
0.09	0.040 7	0.047 9
0.15	0.072 6	0.065 5
0.18	0.083 3	0.092 6
0.24	0.119 4	0.126 3
0.30	0.149 1	0.143 6

由表 1 可以看出, 预测的 ulp 不受图像内容的影响, 且变化趋势与实际 ulp 的变化趋势相近, 可以用如下拟合公式进行实际 ulp 的预测:

$$ulp = 1.9876 \times ulp + 0.0044 \quad (8)$$

4 图像感知质量预测方案方法研究

4.1 基于 SSIM-ulp-IAM₀ 关系的非压缩图像质量

第 3 节介绍了利用 LSB 算法预测图像 ulp 的方法, 现就劣化图像的 ulp 与 PQoS 参数进行探究, 本文采用图像 SSIM 作为 PQoS 参数, 从素材库中选取 *img3*、*img6*、*img9* 以及 *img16* 这 4 副素材进行图像 SSIM-ulp 曲线的绘制, 这 4 幅图像的 IAM₀ 分别为 11.43、18.67、26.37 以及 37.94, 具有代表性, 可以作为素材库具有不同 IAM₀ 图像的代表, 如图 3 所示为不同素材的 SSIM-ulp 曲线。如图 3 所示, 可以看出 SSIM_H (最高可以达到的 SSIM 值) 以及 SSIM_L (最低可以接受的 SSIM 值), 其中 SSIM_L 与图像的 IAM₀ 有关。图像 SSIM 随 ulp 的增大递减。4 幅图的 IAM₀ 参数关系为: *img3* < *img16* < *img6* < *img9*; 4 条曲线斜率关系为: *img3* < *img16* < *img6* < *img9*, 与 IAM₀ 大小

排列相同。可见, 图像 IAM₀ 越大, 对应 SSIM-ulp 曲线斜率越大, 故 SSIM、ulp、IAM₀ 三者之间存在一定的内在联系, SSIM-ulp-IAM₀ 三维散点图如图 4 所示。

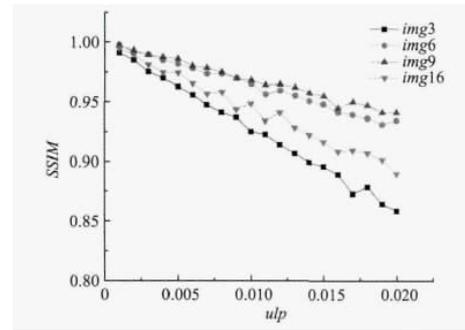


图 3 不同素材的 SSIM-ulp 曲线

Fig. 3 The SSIM-ulp curves for different materials

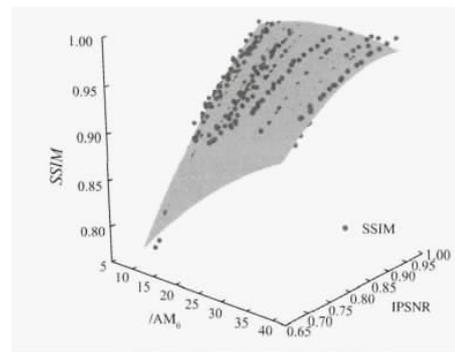


图 4 SSIM-ulp-IAM₀ 散点图

Fig. 4 The scatter diagram of SSIM-ulp-IAM₀

对 SSIM-ulp-IAM₀ 散点图进行进一步的研究, 引入服务质量向量的概念。文献 [20] 提出, 特定多媒体服务 (指图像传输) 的 PQoS 特点可以用一个质量向量 (QV) 来描述。因此, 可以将一个通信应用 Quality Vector 如一个图像传输任务, 描述为一个质量向量: $QV = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ 。质量用于决定所需的资源分配, 以达到特定等级的用户满意度。基于 Gilbert 丢包模型的图像传输用 SSIM 作为 PQoS 参数, 则质量向量 QV 可表示为:

$$SSIM(ulp) = (SSIM_H, \gamma) \quad (9)$$

式中: SSIM_H 表示图像能够达到的最高 SSIM 值, 大小接近 1, γ 是决定曲线形状的参数, 与 IAM₀ 有关。首先根据图 3 观察得 SSIM-ulp 函数关系可以用一个线性函数模型表示, 构建 SSIM-ulp 函数关系如式 (10) 所示:

$$SSIM = SSIM_H + \gamma * ulp \quad (10)$$

式 (10) 中的 SSIM_H、 γ 与 IAM₀ 的关系如图 5 所示, 图 5 中的散点是根据素材库中每幅图像的 SSIM-ulp 函数关系的相应参数进行绘制的。对应拟合公式分别如式 (11)、(12) 所示, 代入式 (10) 预测 SSIM 的平均误差为 1.17%。已知某幅图像, 计算得其 IAM₀, 通过式 (10) ~ (12) 就能

精确地确定该图的 SSIM4-ulp 特性曲线。

$$SSIM_H = 0.9942 + 1.1257 \times 10^4 \times IAM_0 \quad (11)$$

$$\gamma = -8.5349 + 0.149 \times IAM_0 \quad (12)$$

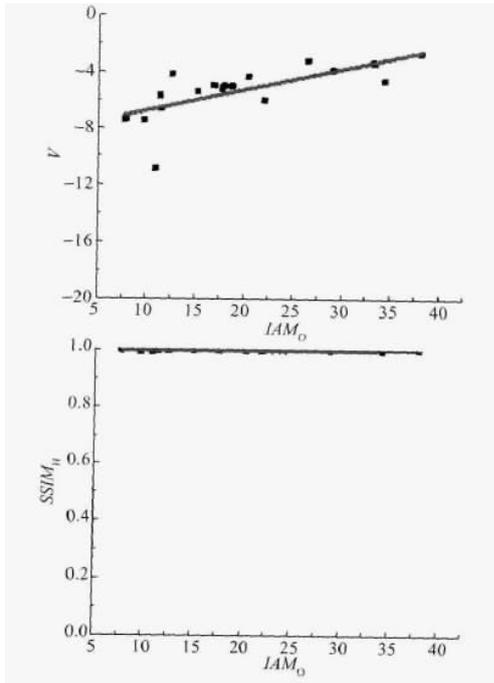


图 5 SSIM-ulp 的 QV 参数 (SSIM_H, γ)

Fig. 5 The QV parameter of SSIM-ulp (SSIM_H, γ)

4.2 基于 SSIM-CR 关系的 SPECK 压缩图像质量预

对于压缩图像来说,压缩与丢包是造成图像质量下降的主要原因,首先研究图像 PQoS 与压缩率 (CR) 的关系。同样就 img3、img6、img9 以及 img16 这 4 副素材绘制其 PQoS 参数-SSIM 与 CR 的关系,如图 6 所示。

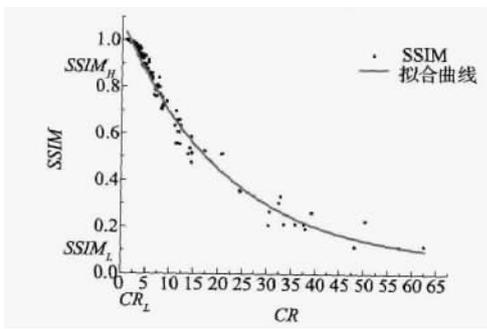


图 6 SSIM-CR 曲线拟合图

Fig. 6 The fitting curve of SSIM-CR

由图 6 可以可知,SSIM 与 CR 直接的关系可以用一个指数模型进行描述,且 SSIM-CR 曲线与图像内容没有太大的关系,即与图像 IAM₀ 没有太大联系。

由于对于压缩图像来说,图像压缩以及丢包是图像劣化的主要原因,绘制 SSIM、CR、ulp 三者的三维散点图,

如图 7 所示。

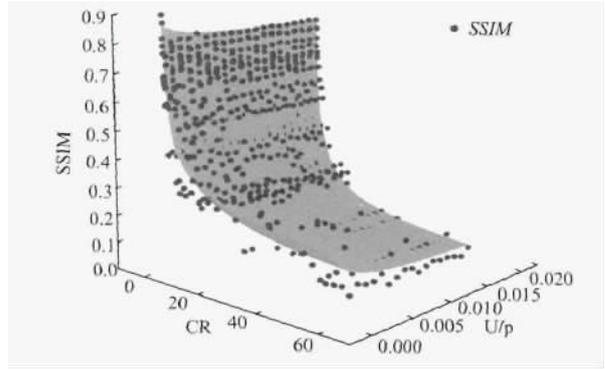


图 7 SSIM-CR-IAM₀ 散点图

Fig. 7 The scatter diagram of SSIM-CR-IAM₀

该散点图若要直接进拟合建模,所用到的模型势必非常复杂,也可能会引起拟合误差较大的问题,尝试采用第 3 节介绍的 QV 方法应用到 SSIM-CR-ulp 关系的研究中。由图 6 可知,SSIM-CR 关系可以用一个指数函数模型表示,构建 SSIM-ulp 函数关系如式 (13) 所示:

$$SSIM = [SSIM_L - SSIM_H] (1 - e^{-\alpha[CR - CR_L]}) + SSIM_H \quad (13)$$

式 (13) 中的参数拟合 α、SSIM_L、CR_L 图如图 8 所示,

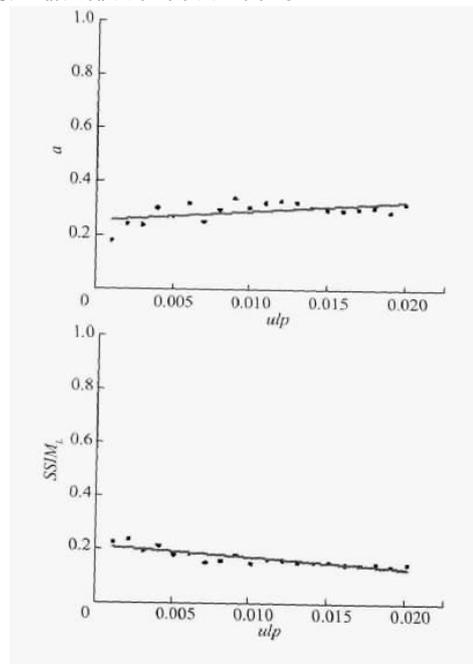
对图 8 中的曲线的拟合公式为式 (14) ~ (16) 如下所示:

$$\alpha = 0.2543 + 3.7316 \times ulp \quad (14)$$

$$SSIM_L = 0.2118 - 4.1387 \times ulp \quad (15)$$

$$CR_L = 0.6548 + 6.4660 \times ulp \quad (16)$$

QV 对 SSIM 的拟合误差为 27.82%,尤其是高压比 (CR > 20) 的拟合误差偏大,这很大程度上是因为高压比数据点较少,对拟合曲线的影响作用小得多。如果不算高压比部分拟合误差降到 15%。



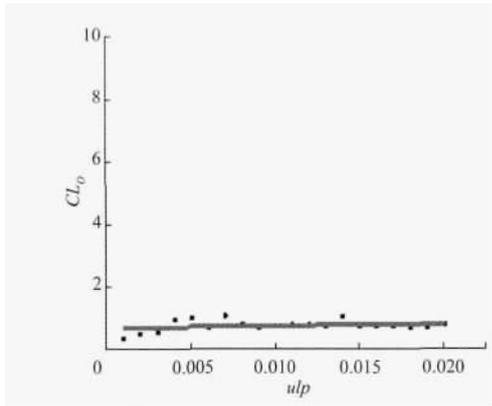


图8 SSIM-CR 的 QV 参数(α , $SSIM_L$, CR_L)

Fig.8 The QV parameters of SSIM-CR (α , $SSIM_L$ and CR_L)

5 实验结果与比较

为了验证非压缩图像质量预测模型的性能,随机选取图9两幅风景图片作为测试图像,如图7所示,用式(10)的方法预测其在 ulp 为(0.001, 0.02)范围内时图像的 SSIM 值。ulp 的选取为在(0.001, 0.02)之间,每隔 0.001 选取一个 ulp 值,可以获得共 20 组 ulp 对应的 20 副不同程度的劣化图像,将设定的 ulp 值作为参数输入 Gilbert 丢包模型获取不同丢包率下的劣化图像,采用式(10)~(12)所述的方法进行图像 SSIM 值的预测,并将预测结果与实际图像 SSIM 值进行对比。



图9 预测算法测试图像

Fig.9 The test images for the prediction algorithm

测试结果如表2所示,表2中的平均误差指的是20组劣化图像对应的平均预测误差。

表2 传输图像劣化 SSIM 预测误差分析

Table 2 The error analysis of predicted SSIM of the transmission image

参数量	图像 t1	图像 t2
IAM ₀	14.436 2	45.010 9
SSIM _H	0.995 8	0.999 3
γ	-6.383 9	-1.828 3
平均误差%	4.70	0.80

由表2可以看出,QV方法预测平均误差不到5%,说明该方法有较强的预测功能和实用性。针对素材图9右

边图,在 ulp 分别等于 0.01 以及 0.02 时预测效果图如图10所示。

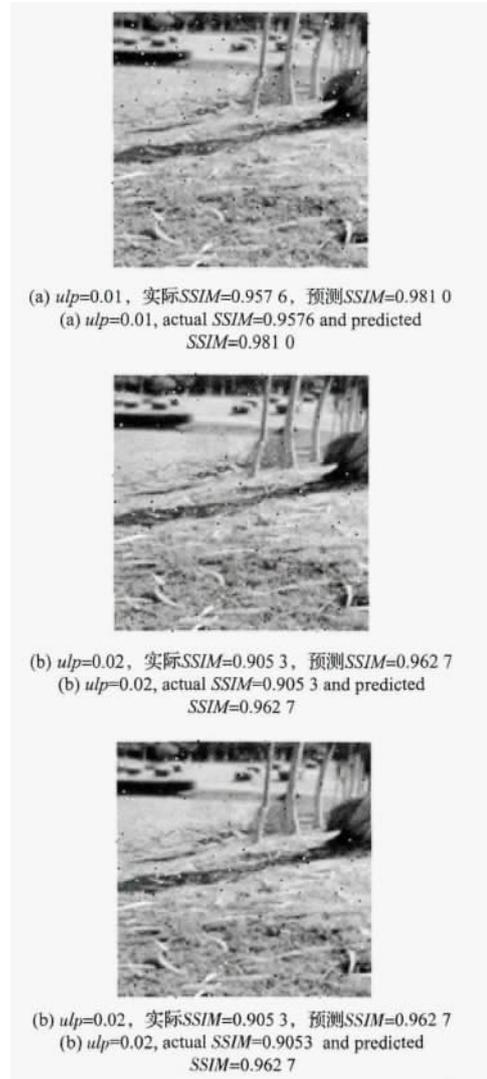


图10 QV方法预测效果图

Fig.10 The forecast effect of QV method

下面验证针对SPECK压缩的图像质量预测模型性能,选用t1作为测试图像,用QV方法式(14)~(16)预测各种等级压缩率的图像SSIM,ulp设置同上一个实验的设置,将预测SSIM与实测数据进行对比,结果如表3所示。

表3 压缩图像 SSIM 预测分析

Table 3 The SSIM prediction analysis of the compressed image

参数值	图像 t1
α	0.258 0
SSIM _L	0.207 7
SSIM _H	0.856 2
CR _L	0.661 3
平均误差(%)	21.8

QV方法能够将SSIM-CR-ulp的三维关系式分解为若干个二维关系式的组合。直接分析三维关系式比较困难,而针对单独的二维关系(如SSIM-ulp、 α -ulp等),则可以用许多比较基础的线性或非线性的公式去做拟合逼近。较曲面拟合更为简单和准确。

虽然从表3看出该方法的误差较大,但这种尝试为以后的研究打开了崭新的思路。该方法有一定的改进和提升空间,可从以下几种思路进行考虑:一是改进QV表达式,在式(13)的基础上再增加一个指数项修正拟合曲线,如式(17)所示,增加一个曲线形状因子 β ,其大小与ulp有关,修正参数拟合误差,尤其是高压压缩率($CR > 20$)部分的数据;二是增加拟合数据,特别是高压压缩率($CR > 20$)拟合数据;三是改进各参数的拟合公式,如使用多项式拟合 α -ulp曲线。

$$SSIM = [SSIM_l - SSIM_H] (1 - e^{-\alpha[CR - CR_0]} - e^{-\beta[CR - CR_0]}) + SSIM_H \quad (17)$$

5 结 论

本文在针对水声信道修订参数的GB丢包模型的基础上,首先提出将SSIM作为PQoS参数,并在此基础上研究了非压缩图像传输PQoS-ulp曲线以及SPECK压缩图像的PQoS-CR曲线。提出质量向量QV的概念,进一步解析了PQoS与丢包率ulp和压缩率CR的关系,将多项变量的关系分解为若干简单函数的集合,更有效、准确地描述了图像质量评价任务,并对算法进行了验证,结果证明该算法有较高的准确度,可以作为特点通信任务的质量预测。

参考文献

- [1] 袁飞,程恩. 水下图像传输质量的实时评测模型[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(5): 1132-1137.
YUAN F, CHENG EN. Real-time evaluation model for the transmission quality of underwater image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(5): 1132-1137.
- [2] 林闯,胡杰,孔祥震. 用户体验质量(QoE)的模型与评价方法综述[J]. 计算机学报, 2012, 35(1): 1-15.
LIN CH, HU J, KONG X ZH. Survey on model and evaluation of quality of experience[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(1): 1-15.
- [3] 袁飞,王珊红,程恩. 无线视频质量的自动测量理论及方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(2): 153-161.
YUAN F, WANG SH H, CHENG EN. Theories and methods for wireless video quality measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(2): 153-161.
- [4] GARCIA M, CANOVAS A, EDO M, et al. A QoE management system for ubiquitous IPTV devices[C]. Proceedings of the 2009 Third International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, System, Service and Technologies, 2009: 147-152.
- [5] MIYAHARA M, KOTANI K, ALGAZIV R. Objective picture quality scale (PQS) for image coding[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(9): 1215-1225.
- [6] LUBIN J, BRILL M H, DE VRIES A, et al. Method and apparatus for assessing the visibility of differences between two image sequences: U. S. Patent 5,974,159[P]. 1999-10-26.
- [7] WINKLER S. A perceptual distortion metric for digital color video[J]. Electronic Imaging 99, SPIE, 1999, 3644: 175-184.
- [8] WATSON A B. Toward a perceptual video quality metric[C]. Photonics West98 Electronic Imaging, SPIE, 1998: 139-147.
- [9] 刘姗姗,郁梅,吕亚奇. 基于联合恰可察觉失真的立体图像质量评价[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1757-1763.
LIU SH SH, YU M, LV Y Q. Stereoscopic image quality based on JJND[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12): 1757-1763.
- [10] 张桦,夏一行,周文晖. 基于注意转移机制的图像质量评价方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 2056-2061.
ZHANG H, XIA Y X, ZHOU W H. Attention shift mechanism based image quality assessment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 2056-2061.
- [11] WANG ZH, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [12] 陈炜玲,袁飞,程恩. 基于加权索引图的图像质量的半参考评测模型[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 351-359.
CHEN W L, YUAN F, CHENG EN. Reduced-reference image quality evaluation model based on visual weighted index figure[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2): 351-359.
- [13] 周武杰,郁梅,蒋刚毅,等. 基于视觉感知和零水印的部分参考立体图像质量评价模型[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(8): 1786-1792.
ZHOU W J, YU M, JIANG G Y, et al. Reduced-reference quality assessment model of stereoscopic image based on visual perception and zero-watermark[J]. Journal of Electronics &

- Information Technology ,2012 ,34(8) :1786-1792.
- [14] 侯伟龙,何立火,高飞. 部分参考型图像质量的模糊分类评价[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2013 ,40(5) :200-204.
HOU W L , HE L H , GAO F. Reduced-reference image quality assessment based on fuzzy classification[J]. Journal of Xidian University ,2013 ,40(5) : 200-204.
- [15] CHEN X , ZHENG S , ZHANG R. Reduced reference image quality assessment based on image statistics in pixel domain[M]. Advances on Digital Television and Wireless Multimedia Communications ,2012: 148-155.
- [16] SAHA S , VEMURI R. An analysis on the effect of image activity on lossy coding performance [C]. The Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems ,2000 ,3: 295-298.
- [17] SAHA S , VEMURI R. An analysis on the effect of image features on lossy coding performance [J]. IEEE Signal Processing Letters ,2000 ,7(5) : 104-107.
- [18] 陈从平,邹雷,王健. 基于清晰度评价的水下退化图像盲复原[J]. 三峡大学学报:自然科学版, 2012 ,24(4) : 86-88.
CHEN C P , ZOU L , WANG J. Underwater degraded image blind restoration based on definition measurement [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences ,2012 ,34(4) : 86-88.
- [19] GIBERT E N. Copacity of a Burst-mosie channel [J]. Bell System Technical Journal ,1960 ,39(5) :1253-1265
- [20] KOUMARAS H , KOURTIS A , MARTAKOS D , et al. Quantified PQoS assessment based on fast estimation of the spatial and temporal activity level [J]. Multimedia tools and Applications ,2007 ,34(3) : 355-374.

作者简介



袁飞,分别在 2002、2005、2008 年于厦门大学获学士、硕士和博士学位。现为厦门大学副教授。主要研究方向为水下信道多媒体信号传输及处理。
E-mail: yuanfei@ xmu. edu. cn

Yuan Fei received his B. Sc. , M. Sc. and Ph. D. degrees all from Xiamen University in 2002 ,2005 and 2008 , respectively. Now , he is an associate professor in Xiamen University. His research interest is multimedia signal transmission and processing over underwater acoustic channel.



陈炜玲 2013 年于厦门大学获得学士学位,现为厦门大学博士研究生,主要研究方向为图像处理、水声通信。

E-mail: weiling. chen@ stu. xmu. edu. cn

Chen Weiling received her B. Sc. degree in 2013 from Xiamen University; now , she is a PhD degree candidate in Xiamen University. Her main research interests include underwater image processing and underwater acoustic communication.



张籍 2014 年于厦门大学获得通信工程硕士学位,现为中国电子科技集团公司第二十六研究所微声部、任助理工程师。主要研究方向为图像处理、水声通信、射频段 LC 滤波器。

E-mail: jjspencer2013@ gmail. com

Zhang Ji received his M. E. degree from Xiamen University in 2014. He is currently working as an assistant engineer in Division of Mircosound ,NO. 26 Institute ,China Electronics Technology Group Corporation. His research interests lay in the specific area of digital image processing , underwater acoustic communication and LC filters in radio frequency.



程恩(通讯作者),分别在 1985、1988、2006 年于厦门大学获学士、硕士和博士学位。现为厦门大学教授,博士生导师。主要研究方向为水下通信、数字信号处理。

E-mail: chengen@ xmu. edu. cn

Cheng En (Corresponding author) got his bachelor ,master and Ph. D. degrees all from Xiamen University in 1985 ,1988 and 2006 , respectively. Now , he is a professor and supervisor for Ph. D. candidates in Xiamen University. His research interest is underwater acoustic communication and digital signal processing.