

中图法分类号: TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)03-0474-06

论文索引信息: 胡庆武, 李清泉. 多分辨率影像质量参数评定影像质量的方法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 474-479

多分辨率影像质量参数评定影像质量的方法

胡庆武¹⁾, 李清泉²⁾

¹⁾(武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079) ²⁾(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 人眼视觉感知对跳跃变化敏感, 提出了一种以影像多分辨率表达下质量参数相对变化模拟人眼视觉系统感知的质量评价模型。首先对影像进行基于小波变换的多分辨率表达, 计算每一级影像质量参数值。其次, 计算不同分辨率表达下影像质量参数变化, 对质量参数进行线性拟合, 以各级质量参数残差表示质量变化平滑度。最后, 提出了基于各级影像质量参数残差的影像质量评价模型。对不同压缩比的遥感影像采用传统质量评价方法和本文算法的对比实验结果表明, 本文算法能够取得绝对质量参数和主观视觉一致的效果, 符合人眼视觉感知特性。
关键词: 多分辨率; 模拟; 影像表达; 视觉系统; 质量参数; 影像质量评定

An image quality assessment approach based on quality parameter variances on multiple resolution representation

Hu Qingwu¹⁾, Li Qingquan²⁾

¹⁾ (School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079 China)

²⁾ (State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping, and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079 China)

Abstract: A new image quality assessment approach based on quality parameter variance on image multiple resolution representation is proposed to simulate the human vision system. Firstly, a district wavelet transformation is presented to obtain multiple resolution image representation. Image quality parameter is calculated on each level resolution image. Secondly, the image quality parameter variances are calculated and the remaining error of quality parameter after linear simulation is adopted to represent the smoothness of image quality variance. Finally, the image quality assessment model based on the remaining error of different resolution image representations is proposed. Applying the traditional image quality assessment method and the new model to images of different compression ratio show that the new image quality assessment model can obtain the accordant quality assessment effect both the absolute quality parameter and subjective vision. The new model is fit for human vision.

Keywords: multiple resolution; simulation; image representation; vision system; quality parameter; image quality assessment

0 引言

影像是人类认识世界的重要手段, 影像质量的好坏关系到能否正确识别影像中所有目标, 包括几

何的和非语义信息。影像质量评价是各种成像系统及传感器评价、影像解译预处理、影像智能应用的基础, 同时, 影像质量评价实际就是对影像成像、传输、编码、存储及处理技术的评价^[1-2]。经典影像质量评价方法有均方差、加权均方差、平均梯度、清晰度、

收稿日期: 2009-04-02; 修回日期: 2010-01-14

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2008AA121305); 国家创新团队基金项目(40721001); 博士点基金项目(20070486001)。

第一作者简介: 胡庆武(1975—), 男, 副教授。2007年于武汉大学获摄影测量与遥感博士学位, 主要研究方向为传感器集成及遥感。E-mail: qwhu@263.net。

信噪比、峰值信噪比、信息熵、模糊熵、调制传递函数(MTF)等。近年来,研究人员提出了基于人眼视觉系统(HVS)的影像质量评价方法,使评价结果比经典评价方法更符合主观感受^[3-6]。由于目前人类对视觉机理的理解未有突破性进展,已有的HVS模型只是对人类视觉生理的简单模拟,没有从成像物理过程进行分析,也没有融入人类感知环境时的心理因素,基于HSV的影像质量评价方法有待更深入地研究^[5-8]。本文提出了一种基于小波变换的影像多分辨率表达来表征人眼视觉感知特性,通过计算在不同分辨率下影像质量参数的变化值来模拟人眼视觉感知的变化过程,并以此来评价影像质量。

1 影像质量评价存在的问题

通常采用影像逼真度(fidelity)和影像可懂度两个参数评价影像质量。逼真度用来表示评价影像相对参考影像几何失真程度。可懂度表示影像为人或机器提供信息的能力,如美观、清晰、层次丰富分明、目标突出、特征体现等方面,不仅与影像应用需求有关,而且与人眼视觉的主观感觉有关,一般采取均方误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)、清晰度(EAV)(或平均梯度)和边缘保持指数(EPI)等定量参数^[9-10]。通常,影像逼真度高,可懂度越大,影像质量越高。但以上影像质量评价的参数是统计值,虽然精确严格,兼具客观性和科学性,但没有考虑影像观测者的视觉心理因素,致使某些情况下的评价结果与影像实际观察质量不相吻合,与主观评价结果脱节,且无法形成统一标准,如图1所示。

图1中,计算出来的影像质量参数相同,但目视效果相差明显。相同信噪比的噪声,平均分布在影像上(图1(b)),与集中分布(图1(c))或在纹理特征丰富区域分布(图1(d)),对影像目视、分类、解译等应用造成的影响不同。可见影像质量参数没有考虑噪声的空间分布特性,与实际主观视觉质量不符。

人眼主观感知评价结果虽然较全面,符合影像实际观察质量,但受观察者、影像类型和观测环境等因素影响较大,评价过程繁琐,且视觉心理因素难度量,致使评价结果不够精确,人为因素大。因此,影像质量评价方法必须考虑客观质量参数与主观视觉感知相结合,对影像进行符合人眼视觉特性的分解表达,在此基础上计算多维质量参数,建立符合人眼视觉敏感特性的影像质量评价模型。

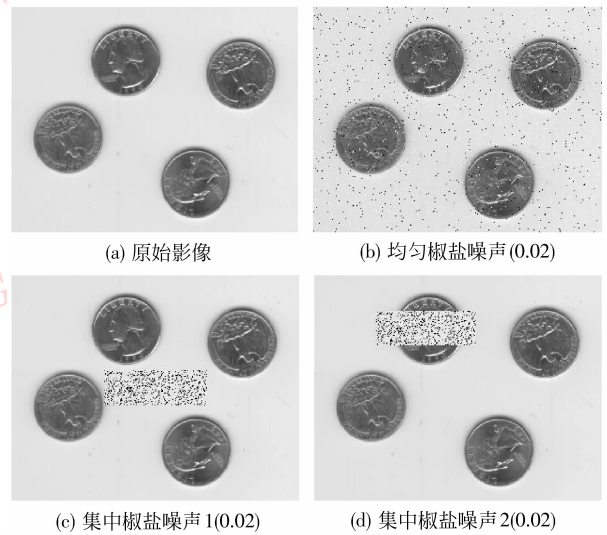


图1 不同分布相同噪声对影像质量的影响

Fig. 1 Image quality to different salt & pepper noise distribution

2 基于质量参数变化的质量评价方法

2.1 评价模型

假定人眼视觉感知特性分析过程满足:

1)人眼视觉感知对跳跃变化最敏感 人眼亮度视觉对被观察物体绝对亮度判断力差但相对差异判断力较强,即人眼主观亮度感觉与人眼对亮度差异感觉密切相关。视觉系统反应依赖对比度而不是绝对亮度值,因此,人眼视觉感知对各种模式差异变化敏感。影像质量参数是亮度的函数,质量参数的变化直接影响人眼主观对影像质量的评价。

2)小波多分辨率可模拟人眼视觉感知过程 影像多级离散小波变换(DWT)可视为一系列相互独立、对应不同空间位置和方向的空间频率通道,与HVS的低级信息处理机制(自动调节聚焦过程)类似。因此,小波多分辨率分析可模拟人眼视觉感知调节过程,不同级别小波域中计算质量参数变化可表征计算人眼视觉感知的平滑度。

基于以上假定,提出一种基于多分辨率影像质量参数变化的质量模型,将质量参数变化引入质量评价体系,通过计算质量参数在不同分辨率下的变化来评价影像质量。首先对影像进行基于小波变换的多分辨率表达,计算每一级影像质量参数值;其次,计算不同分辨率表达下影像质量参数变化,对质量参数进行线性拟合,以各级质量参数残差表示质量变化平滑度;再次,对各级分辨率下质量参数残差

加权构建质量评价模型,该模型将客观质量参数与人眼主观视觉感知相结合,符合人眼视觉敏感特性。

影像多分辨率表达中,多级 DCT(离散余弦变换)得到低频影像和 高频影像,应选取不同质量参数。对低频影像,人眼视觉感知为整体噪声水平,本文选择清晰度作为评价参数;对高频影像,分别表示水平、竖直和对角特征,人眼视觉敏感为细节特征^[11],选择对特征敏感的边缘保持指数作为评价参数。图 2 为基于多分辨率影像质量参数变化的影像质量评价模型技术流程。

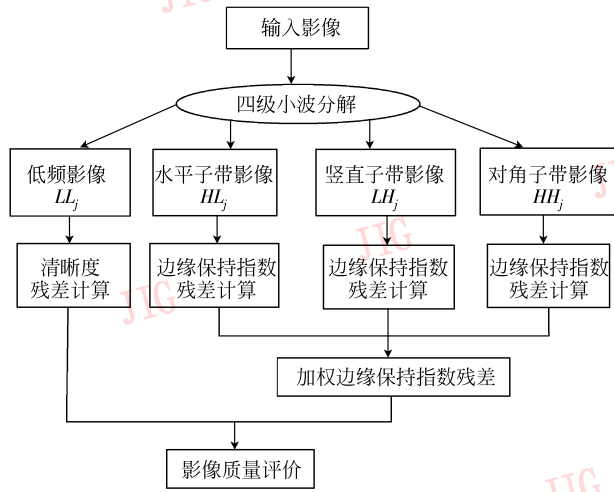


图 2 多分辨率影像质量参数变化的影像质量评价模型

Fig. 2 Image quality assessment model based quality parameter variance

2.2 评价算法

包括影像多分辨率分解表达、各分辨率下质量参数计算、质量参数变化量计算和质量评价。

1) 影像多分辨率分解表达

对影像 f 进行多级小波变换分解,得到不同分辨率下的多通道影像。影像 f 的 J 级 DWT 为 2^{-J} 分辨率下的离散逼近子影像和不同方向、不同分辨率 2^j ($-J \leq j \leq -1$) 下的离散细节子影像的组合(共 $3J + 1$ 个子影像),即

$$(A_{2^j}^d f, (D_{2^j}^1 f)_{-J \leq j \leq -1}, (D_{2^j}^2 f)_{-J \leq j \leq -1}, (D_{2^j}^3 f)_{-J \leq j \leq -1}) \quad (1)$$

式中, $A_1^d f = f$, 对于 $\forall f(x, y) \in L(\mathbf{R}^2)$ 有:

$$A_{2^j}^d f = (\langle f(x, y), \varphi_{2^j}(x - 2^j n) \varphi_{2^j}(y - 2^j m) \rangle)_{(n, m) \in \mathbf{Z}^2} \quad (2)$$

$$D_{2^j}^1 f = (\langle f(x, y), \Psi_{2^j}^1(x - 2^{-j} n, y - 2^{-j} m) \rangle)_{(n, m) \in \mathbf{Z}^2} \quad (3)$$

$$D_{2^j}^2 f = (\langle f(x, y), \Psi_{2^j}^2(x - 2^{-j} n, y - 2^{-j} m) \rangle)_{(n, m) \in \mathbf{Z}^2} \quad (4)$$

$$D_{2^j}^3 f = (\langle f(x, y), \Psi_{2^j}^3(x - 2^{-j} n, y - 2^{-j} m) \rangle)_{(n, m) \in \mathbf{Z}^2} \quad (5)$$

其中, $A_{2^j}^d f$ 表示 f 的 J 级小波分解低频信息; $D_{2^j}^1 f$ 为垂直高频(水平边缘)信息; $D_{2^j}^2 f$ 为水平高频(垂直边缘)信息; $D_{2^j}^3 f$ 为对角线方向的高频边缘信息。对 $\forall J > 1$, 重复以上算法, 可得影像 f 的 J 级 DWT 子带影像, 即获得不同分辨率 r_j ($j \in \mathbf{Z}$) 的影像细节序列。这种基于小波变换的多分辨率分析与 HVS 多通道滤波机制类似, 可用多级 DCT 构建的序列影像表征符合 HVS 的多分辨率表达。

一般认为 4 级小波变换是一种兼顾计算复杂性和精确性的折中方案。对影像 f 按照式(1)进行 4 级小波分解, 得到如图 3 所示的 16 幅影像, 构成在 4 级分辨率下的 4 组影像序列, 即低频影像序列 LL_j 、水平细节影像序列 HL_j 、竖直细节影像序列 LH_j 和对角细节影像序列 HH_j , j 分别取 1、2、3、4。

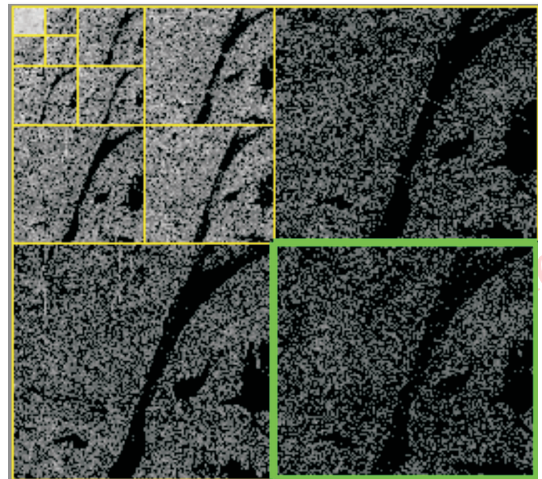


图 3 武汉地区 SPOT 影像 4 级小波分解示例

Fig. 3 Four level wavelet decomposition of SPOT Image

基于 DWT 影像多分辨率表达的关键是小波基选取, 根据视觉感知特性, 影像小波分解后 3 个边缘子图高度局部相关, 故选择紧支集正交或双正交小波基, 还要有很好的能量集中特性和精确重构特性, 本文选择 Haar 小波, 滤波器长度为 2。

2) 不同分辨率下影像质量参数计算

对低频影像按照清晰度计算质量参数, 对高频影像以边缘保持指数计算质量参数。每一分辨率下低频影像的清晰度为

$$EAV_j = EAV(LL_j) \quad j = 0, 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

式中, j 表示分辨率级别, EAV_0 为原始影像清晰度。按4级小波分解,低频影像可计算出5个清晰度参数。

每一级分辨率下各方向高频影像的边缘保持指数为

$$EPI_k^1 = EPI \left(\frac{HL_{k+1}}{HL_k} \right) \quad k = 1, 2, 3 \quad (7)$$

$$EPI_k^2 = EPI \left(\frac{LH_{k+1}}{LH_k} \right) \quad k = 1, 2, 3 \quad (8)$$

$$EPI_k^3 = EPI \left(\frac{HH_{k+1}}{HH_k} \right) \quad k = 1, 2, 3 \quad (9)$$

式中, EPI_k^1 、 EPI_k^2 、 EPI_k^3 分别表示水平、垂直和对角线方向不同级别的质量参数。对于4级小波分解,每个方向高频影像可边缘保持指数按照下式^[12]计算出4个边缘保持参数。

$$EPI = \frac{\sum |p_s(i, j) - p_s(i+1, j)| + |p_s(i, j) - p_s(i, j+1)|}{\sum |p_o(i, j) - p_o(i+1, j)| + |p_o(i, j) - p_o(i, j+1)|} \quad (10)$$

式中, $p_s(i, j)$ 是滤波影像边缘区域像元, $p_o(i, j)$ 是原始影像边缘区域像元, i 是行数, j 是列数。 EPI 的取值范围为0~1。 EPI 值为1时影像边缘得到完全保持, EPI 值为0时,影像变为一个平面。可见, EPI 值越大,边缘保持能力越强,影像质量越高。由于不同分辨率下高频影像大小不同,计算边缘保持指数时,相邻两级边缘数量需要进行归一化处理。

3) 多分辨率下质量参数变化计算

对不同分辨率下低频影像清晰度值(j, EAV_j)进行最小二乘直线拟合,计算质量参数拟合残差为

$$\sum EAV = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{j=0}^4 (EAV_j - EAV_j')^2} \quad (11)$$

式中, EAV_j' 为清晰度的估值, $\sum EAV$ 为不同分辨率下清晰度参数基于最小二乘直线变化的残差,即清晰度在不同分辨率下的变化率,可刻画人眼视觉感知过程的平滑程度,残差越大,存在的跳变越大,影像质量越差。

同理,对不同分辨率下不同方向高频影像边缘保持指数(j, EPI_j^k)进行最小二乘拟合,计算该质量参数拟合残差为

$$\sum EPI^k = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 (EPI_j^k - EPI_j^k')^2} \quad (12)$$

式中, k 表示不同方向, $k=1, 2, 3$ 分别表示水平、垂直和对角线方向, EPI_j^k 表示 k 方向边缘保持指数的估值, $\sum EPI^k$ 为不同分辨率下边缘保持指数基于最

小二乘直线变化的残差,实质上反映的是边缘保持指数在不同分辨率下的变化率,也可刻画人眼视觉感知过程的平滑程度,残差越大,存在的跳变越大,影像的质量越差。

4) 影像质量评价

DWT得到4组影像序列,可计算4个质量变化参数。根据小波变换特性,同一级影像低频子图能量最多,对于影像观测和应用,低频影像最重要,其次是水平、垂直方向的高频子带影像,而对角方向高频子带影像最不重要,这一点与人眼视觉感知过程的敏感(兴趣点)一致。本文提出的影像质量评价模型采取以下策略:

(1)先比较清晰度残差,越大质量越差;

(2)若清晰度残差相近,按照水平、垂直方向边缘保持指数残差的权为对角方向2倍计算综合边缘保持指数残差,残差越大,质量越差。

3 实验分析

为了验证本文质量评价模型的合理性,设计采用标准JPEG2000压缩算法得到不同质量的影像进行实验分析。对两幅SPOT影像,按照JPEG2000压缩,并采用常用的影像质量参数计算不同压缩比下影像质量,其结果如表1。

由表1可见,采用逼真度、峰值信噪比、方差和(信息)熵等质量参数基本上可反映不同压缩比影像质量的差异,但方差在部分压缩比下出现异常,如表中黑体部分所示,影像逼真度指标在反映影像质量方面的灵敏度方面显然不如其他质量参数。不同压缩比下质量参数变化关系如图4所示。

由图4可见,压缩比大幅度提高时,影像质量参数变化曲线平缓,常用的统计质量参数如逼真度、峰值信噪比、方差、熵等无法很好地描述影像质量变化。按照本文提出的多分辨率影像质量参数变化评价模型,计算两幅影像在不同压缩比下的清晰度残差和边缘指数残差,结果如表2。

由表2可见,两种质量参数在不同分辨率下的变化率和残差可较好地反映压缩比大小,如图5所示。压缩比越大,不同分辨率下的清晰度和边缘保持指数变化越快,说明影像质量越差,人眼观察时需通过显著调焦去适应这种变化。可见,不同分辨率下质量参数变化可较好地与人眼视觉特性相符合,从而可建立起主观评价和客观评价关系。同时,对于低频部分质量参数,采用清晰度残差评价质量时

表 1 不同压缩比下质量参数对比
Tab. 1 Quality comparison in different compression ratio

NSP1					NSP2				
逼真度	PSWR/dB	方差	熵	压缩比	逼真度	PSWR/dB	方差	熵	压缩比
0.889	31.772	10.287	4.843	50.949	0.944	34.906	8.306	3.562	69.569
0.889	32.03	10.313	4.991	43.677	0.944	35.231	8.413	3.859	62.044
0.89	32.496	10.334	5.164	31.207	0.942	35.506	8.365	4.272	47.034
0.89	33.031	10.504	5.232	20.192	0.943	36.075	8.469	4.417	30.807
0.891	33.301	10.513	5.252	16.524	0.944	36.439	8.484	4.493	25.264
0.891	33.484	10.495	5.277	13.295	0.944	36.64	8.500	4.561	20.053
0.892	33.623	10.522	5.290	11.615	0.944	36.827	8.475	4.573	17.135
0.892	33.788	10.534	5.300	10.058	0.945	37.012	8.487	4.588	14.678
0.893	33.908	10.535	5.301	8.413	0.944	37.151	8.487	4.590	12.013
0.893	34.062	10.543	5.303	6.458	0.944	37.334	8.496	4.592	8.983
0.893	34.221	10.553	5.306	4.747	0.945	37.512	8.498	4.594	6.347
0.893	34.317	10.555	5.307	3.240	0.945	37.633	8.503	4.599	4.061
0.893	34.38	10.557	5.308	2.364	0.945	37.72	8.509	4.606	2.746
1.0	48	11.420	5.392	1.000	1.0	48	9.193	4.725	1.000

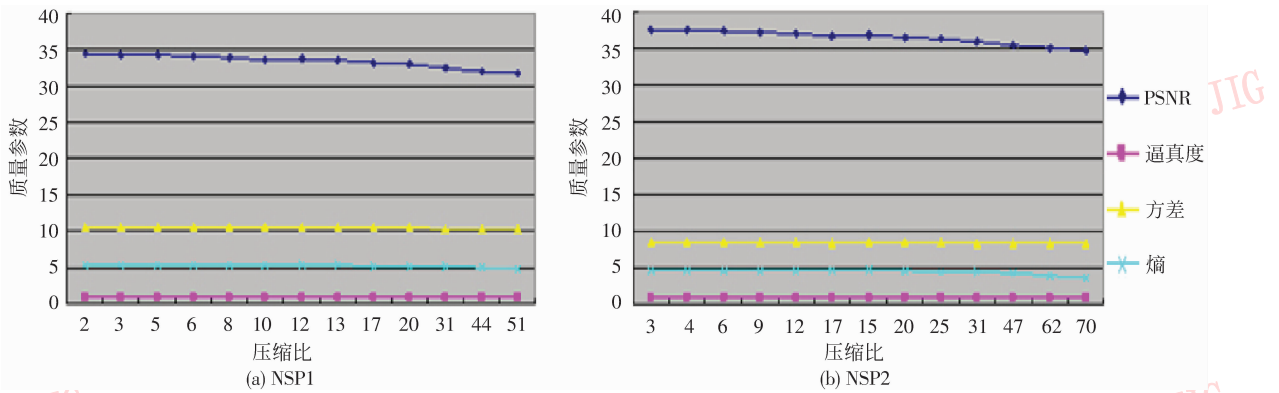


图 4 影像压缩比与常用的质量参数关系

Fig. 4 Relationship of Compression ratio and quality parameter

表 2 不同压缩比下参数变化评价模型的质量对比

Tab. 2 Quality comparison based on the proposed model

NSP1					NSP2				
EAV 变化率	EPI 变化率	EAV 残差	EPI 残差	压缩比	EAV 变化率	EPI 变化率	EAV 残差	EPI 残差	压缩比
11.43	11.56	5.800	5.164	50.949	11.91	12.13	7.061	6.968	69.569
5.67	6.12	5.511	4.390	43.677	6.31	7.09	6.616	6.264	62.044
3.73	3.84	3.626	3.205	31.207	3.49	3.52	4.766	4.730	47.034
2.75	2.81	3.425	2.045	20.192	2.48	2.39	3.209	3.147	30.807
2.14	2.09	2.836	1.670	16.524	2.05	2.12	2.707	2.550	25.264
1.73	1.86	2.742	1.347	13.295	1.66	1.70	2.460	2.076	20.053
1.43	1.56	1.560	1.227	11.615	1.48	1.49	2.118	1.744	17.135
1.19	1.30	2.165	1.097	10.058	1.15	1.20	1.720	1.507	14.678
0.84	0.90	1.016	0.873	8.413	0.87	0.91	1.338	1.229	12.013
0.70	0.83	0.871	0.647	6.458	0.71	0.74	0.980	0.941	8.983
0.58	0.60	0.484	0.573	4.747	0.57	0.61	1.109	0.672	6.347
0.47	0.49	0.710	0.324	3.240	0.47	0.46	0.539	0.428	4.061
0.36	0.38	0.330	0.256	2.364	0.37	0.32	0.294	0.310	2.746
0.27	0.30	0.453	0.167	1.000	0.18	0.20	0.305	0.183	1.000

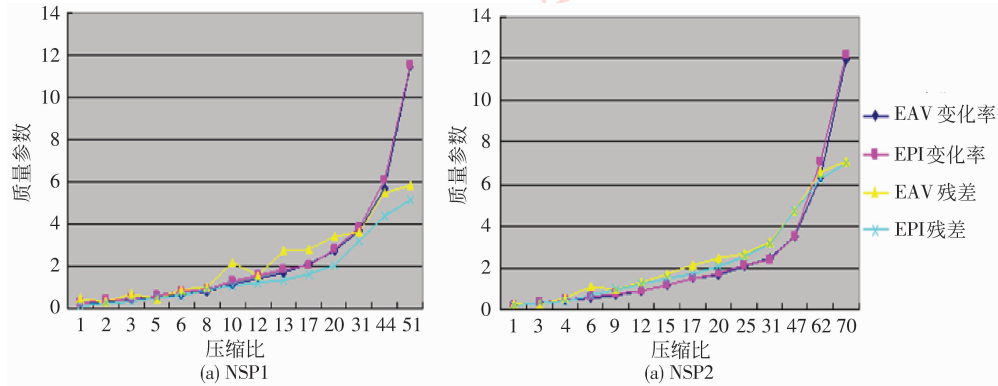


图5 影像压缩比与质量参数变化关系

Fig. 5 Image compression ratio and quality parameter variance

有时会有异常,与采用的压缩算法有关,但用边缘保持指数残差则可较好的反映影像质量变化。由此可以推断,JPEG2000 压缩算法在压缩比和质量兼顾方面更多的是考虑边缘特征保持。

4 结论

对影像质量的评价既应客观准确,又应符合人眼的视觉效果。人眼视觉感知机理对变化过程敏感,变化过程的变化率直接影响到视觉感知。本文提出采用多分辨率影像的质量参数变化评价影像质量,将影像中最重要质量参数的变化率引入质量评价体系,通过计算质量参数指标在不同级别下的变化率来评价影像质量,更符合人眼的视觉感知特性,并且较传统的影像质量评价方法对质量变化灵敏,可广泛应用于各种成像系统及传感器评价、影像解译预处理以及影像质量检查验收工程。需要进一步研究构建评价过程中多分辨率影像表达及质量参数计算的快速算法。

参考文献 (References)

- [1] Hu Qingwu, Li Qingquan. Image quality related processing and applications based on Retinex wavelet theory [C]//The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Istanbul, Turkey: ISPRS, 2004, XXXV (B5):962-967.
- [2] Li Qingquan, Hu Qingwu. 3D wavelet compression to multiple band remote sensing images based on edge reservation [C]//The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Istanbul, Turkey: ISPRS, 2004, XXXV (B7):60-65.
- [3] Wang Kongqiao, Shen Lansun, Xing Xin. A quality assessment method of image based on visual interests [J]. Journal of Image and Graphics, 2000, 5 (4):300-303. [汪孔桥,沈兰荪,邢昕.一种基于视觉兴趣性的图象质量评价方法 [J].中国图象图形学报,2000,5 (4):300-303.]
- [4] Wang Nannan, Li Guiling. Video quality evaluation models based on human visual properties [J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6 (6):523-527. [王楠楠,李桂苓.符合人眼视觉特性的视频质量评价模型 [J].中国图象图形学报,2001,6 (6):523-527.]
- [5] Naranjan D, Thomas D K, Wilsons S G. Image quality assessment based on a degradation model [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9 (4):636-650.
- [6] Taylor. Image quality assessment based on a human visual system mode [D]. West Lafayette, USA: Purdue University, 1998.
- [7] Yang Bo, Lei Liang, Yang Junling. HVS-based structural image quality assessment model [C]//Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, China: Chongqing University, 2008:8497-8500.
- [8] Fliegel Karel. Optimization of HVS-based objective image quality assessment with eye tracking [J]//Proceedings of SPIE, 2008, 7075: 6-12.
- [9] Xiong Xinghua. Overview on digital image quality assessment [J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29 (1):68-71. [熊兴华.数字影像质量评价方法评述 [J].测绘科学,2004,29 (1):68-71.]
- [10] Sheikh H R, Sabir M F, Bovik A C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15 (11):3440-3451.
- [11] Zhai Guangtao, Zhang Wenjun, Yang Xiaokang, et al. Image quality assessment metrics based on multi-scale edge presentation [C]//IEEE Workshop on Signal Processing Systems, Design and Implementation. Athens, Greece: IEEE Signal Processing Society, 2005:331-336.
- [12] Han Chunming, Guo Huadong, Wang Changlin, et al. Edge-preserving filter for SAR images [J]. High Technology Letters, 2003 (7):11-15. [韩春明,郭华东,王长林,等.保持边缘的 SAR 图像滤波方法 [J].高技术通讯,2003 (7):11-15.]