

一种基于灰度预测误差统计的影像质量评价方法

熊兴华¹⁾ 张丽^{1),2)}

¹⁾(西安测绘研究所, 西安 710054) ²⁾(长安大学研究生部, 西安 710054)

摘要 受二维差分脉冲编码调制(DPCM)影像压缩编码技术的启发,为了更好地运行影像质量评价,从影像像素相关性的角度探讨了一种基于灰度预测误差统计的影像质量评价方法。该方法首先利用线性预测算子和最小二乘估计来计算影像像素的灰度,然后统计整幅影像内的估计像素灰度值与对应像素点的实际灰度值的累计平均平方误差。该误差反映了影像像素间的相关性大小,其值越大,表明像素间的相关性越小,影像的反差与清晰度越好。试验结果表明,该方法对影像质量的变化敏感度明显高于传统的均方差、平均梯度和信息熵法,因而特别适合评估通过不同降噪方法处理的影像质量。不足的是该方法的计算效率不如传统的方差和信息熵方法快。

关键词 影像质量评价 灰度预测误差 最小二乘估计 线性预测

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)03-0302-06

An Image Quality Evaluation Method Based on Gray Prediction Error

XIONG Xing-hua¹⁾, ZHANG Li^{1),2)}

¹⁾(Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054)

²⁾(Department of Postgraduate, Chang'an University, Xi'an 710054)

Abstract Enlightened the image compression technique based on 2-D Differential Pulse Code Modulation (DPCM), and taken the correlation between pixel and its neighbors into consideration, a new image quality evaluation method is discussed by adding up the gray errors between every pixel of image and its predictions in the paper. The basic principles are that each pixel of image is first predicted by using linear prediction operator and least square estimate technique and then the mean square root of the difference between pixels' gray and their predictions are added up. This difference reflects the relativity of pixels each other. The larger the difference is, the smaller the relativity of pixels is, and the better the contrast and the definition of image are. The experiment results show that the discussed method is first more sensitive to the change of image quality than traditional mean square error(MSE) method, average gradient method and information entropy method, and then more suitable to the quality evaluation of the images processed by the different denoise methods removing noise. The shortcoming of this method is but that its efficiency is slightly inferior to that of the traditional MSE and information entropy.

Keywords image quality evaluation, gray prediction error, least square estimate, linear prediction

1 引言

影像质量的正确评价是一项很有意义但又较难实施的研究课题,这是因为一方面影像质量的好坏直接关系到后续的影像判读、分析、量测和有效利用;另一方面目前还难以用一种客观且完备的数学

模型来模拟人类视觉生理和心理对客观世界的感知能力,现有的一些模型仅仅只是对视觉感知能力的一些肤浅的和不成熟的模拟。

目前对影像质量的评价还主要是靠人的主观判断,人工评价方法不但受人为因素的影响明显,而且也不便于计算机自动监控。

为了克服主观评价方法的不足,研究人员已提

出了一些有针对性的影像质量客观评价方法,如均方差法、平均梯度法、信息熵法和基于人类视觉感知的方法等^[1~7]。在本文中,笔者受差分脉冲编码调制(DPCM)影像压缩编码思想的启发,探讨了一种基于灰度预测误差统计的影像质量评价方法。

2 几种基本的质量评价方法

基本的质量评价方法主要有方差法、平均梯度法和信息熵法,其实质就是分别通过计算影像的方差、平均梯度和信息熵的数值来评价影像的质量。

(1) 方差法 方差是反映影像整体灰度分布的统计量,其值越大,表明影像的对比度越大,反之亦然。求解方差的基本表达式如下

$$\sigma^2 = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (f(i, j) - \mu)^2 \quad (1)$$

其中, M 和 N 是影像的行列数, $f(i, j)$ 是像点 (i, j) 的灰度值, μ 为整幅影像的灰度平均值。

由于上面直接计算方差的公式较繁琐,故实际应用中多采用下式

$$\sigma^2 = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f^2(i, j) - \left[\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j) \right]^2 \quad (2)$$

另外,方差也可以根据影像的直方图统计结果求得,其计算表达式如下:

$$\sigma^2 = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{k=0}^{L-1} (k - \mu)^2 h(k) \quad (3)$$

其中, $h(k)$ 是灰度为 k 的像素的数量, L 是图幅内像素的最大灰度级,其他符号同上。

(2) 平均梯度法 平均梯度是指能够反映出影像细微反差的程度,其计算公式为

$$\overline{\nabla f} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{\nabla_x^2 f(i, j) + \nabla_y^2 f(i, j)}{2}} \quad (4)$$

式中, $f(i, j)$ 、 $\nabla_x f(i, j)$ 和 $\nabla_y f(i, j)$ 分别为像点 (i, j) 的灰度及其在行、列方向上的梯度, M 和 N 分别为影像的行、列数。一般来说,平均梯度越大,表明影像越清晰,反差越好。

(3) 信息熵法 熵是从信息论角度反映影像信息丰富程度的一种度量方式,根据香农(Shannon)信息论原理,影像的熵定义为

$$H(X) = - \sum_{k=0}^{L-1} P_k \log(P_k) \quad (5)$$

式中, L 为影像 X 的最大灰度级, P_k 为影像 X 上像元灰度值为 k 的统计频率。

信息熵具有如下特点:

① 当影像中的像素在各个灰度级均匀分布,即各个灰度级出现的频率均为 $P_k = 1/L$ 时,则熵 $H(X)$ 具有最大值 $\log(L)$ 。此时影像的信息量最丰富,灰度分布最均匀,层次最多。

② 当影像中的所有像素只有某一灰度级,而没有其他灰度级时,熵 $H(X)$ 具有最小值 0。此时影像实际上无信息。

③ 影像中灰度级减少时,熵 $H(X)$ 也减少。

3 本文探讨的方法

为了定量评价影像的质量,本文探讨了一种新的基于影像灰度预测误差均方差的影像质量评价方法,其基本原理如下:

众所周知,差值脉冲编码调制(DPCM)系统是一种经典的影像线性编码系统^[1,8,9]。它的基本前提是(1)影像可以视为具有各态历经性的平稳随机场,其相关函数与像元位置无关;(2)影像在局部区域内具有高度相关性。这样,影像中某点的灰度值即可用相邻的已扫描影像的灰度值估计得出。DPCM 的基本原理就是对像点的实际值与估计值之差进行编码压缩。本文将这一差值不用于编码,而用于评价影像的质量。显然,分辨率越高、清晰度越好的影像,其像点间的灰度相关性越小,像点的预测值与实际值之差越大,反之亦然。

设 $\hat{f}(m, n)$ 为像元 $f(m, n)$ 的估计值, $e(m, n)$ 为估计偏差(像素位置如图 1 所示)。若采用 3 邻域像素进行线性预测(事实上,采用更多邻域像素的线性预测并不会明显减少预测误差^[8]),则

$$\hat{f}(m, n) = a_1 f(m, n-1) + a_2 f(m-1, n-1) + a_3 f(m-1, n) \quad (6)$$

$$e(m, n) = f(m, n) - \hat{f}(m, n) \quad (7)$$

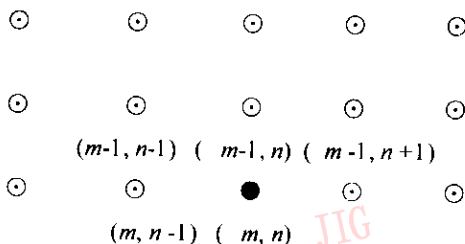


图 1 像元 (m, n) 及其邻近像元位置

根据最小二乘估计原理,为使估计值与实际值之间的误差最小,应有

$$E\{[e(m,n)]^2\}=E\{[f(m,n)-\hat{f}(m,n)]^2\}\rightarrow\min \quad (8)$$

将式(6)代入式(8)得

$$E\{[f(m,n)-a_1f(m,n-1)-a_2f(m-1,n-1)-a_3f(m-1,n)]^2\}\rightarrow\min$$

为使上式最小,则应有

$$\frac{\partial E}{\partial a_1}=0, \quad \frac{\partial E}{\partial a_2}=0, \quad \frac{\partial E}{\partial a_3}=0$$

即有

$$E[f(m,n-1)(f(m,n)-a_1f(m,n-1)-a_2f(m-1,n-1)-a_3f(m-1,n))]=0$$

$$E[f(m-1,n-1)(f(m,n)-a_1f(m,n-1)-a_2f(m-1,n-1)-a_3f(m-1,n))]=0$$

$$E[f(m-1,n)(f(m,n)-a_1f(m,n-1)-a_2f(m-1,n-1)-a_3f(m-1,n))]=0$$

亦即

$$E[f(m,n-1)f(m,n)]=a_1E[f(m,n-1)f(m,n-1)]+a_2E[f(m,n-1)f(m-1,n-1)]+a_3E[f(m,n-1)f(m-1,n)]$$

$$E[f(m-1,n-1)f(m,n)]=a_1E[f(m-1,n-1)f(m,n-1)]+a_2E[f(m-1,n-1)f(m-1,n-1)]+a_3E[f(m-1,n-1)f(m-1,n)]$$

$$E[f(m-1,n)f(m,n)]=a_1E[f(m-1,n)f(m,n-1)]+a_2E[f(m-1,n)f(m-1,n-1)]+a_3E[f(m-1,n)f(m-1,n)] \quad (9)$$

由于相关函数 $R(m,n;p,q)=E\{f(m,n)f(p,q)\}$,且对于平稳随机场有

$$R(m,n;p,q)=R(m-p,n-q)=R(p-m,q-n)=R(\alpha,\beta)$$

因此有

$$E[f(m,n)f(p,q)]=R(m-p,n-q)=R(p-m,q-n)=R(\alpha,\beta) \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),并整理得

$$\begin{cases} R(0,1)=a_1R(0,0)+a_2R(1,0)+a_3R(1,1) \\ R(1,1)=a_1R(1,0)+a_2R(0,0)+a_3R(0,1) \\ R(1,0)=a_1R(1,1)+a_2R(0,1)+a_3R(0,0) \end{cases} \quad (11)$$

又根据大量的实践表明,影像的自相关系数近似为指数型,而且是可分离的^[1,9],即有

$$R(\alpha,\beta)=R(0,0)\exp\{-c_1|\alpha|-c_2|\beta|\}$$

于是有

$$R(0,1)=R(0,0)e^{-c_2} \quad (12)$$

$$R(1,0)=R(0,0)e^{-c_1} \quad (13)$$

$$R(1,1)=R(0,0)e^{-c_1}e^{-c_2}=\frac{R(1,0)R(0,1)}{R(0,0)} \quad (14)$$

在顾及式(12~14)的情况下,解方程组式(11)得

$$a_1=\frac{R(0,1)}{R(0,0)}; a_2=\frac{R(1,1)}{R(0,0)}; a_3=\frac{R(1,0)}{R(0,0)}$$

有了估计函数的系数 a_1, a_2 和 a_3 ,即可求得影像灰度的预测偏差 $e(m,n)$ 。这一偏差的累积均方差即可用来评价影像的质量,其计算公式如下

$$\hat{\sigma}_e=\sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1}[e(m,n)]^2} \quad (15)$$

4 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性,笔者分别用航空影像和 Lena 影像进行了质量评价试验。图 2(a)是原始 Lena 影像,图 2(b)~图 2(k)分别是用高斯低通滤波器对图 2(a)进行一系列平滑滤波的结果,高斯平滑滤波器的窗口宽度 $W=6\sqrt{2}s$,其中, s 为高斯滤波的空间尺度因子($s=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, \dots, 5.0$),图 2(l)是对图 2(a)进行直方图增强的结果,图 2(m)和图 2(n)分别是对图 2(a)增加均值为 0、均方差为 0.002 的高斯噪声的影像及其对该加噪影像进行高斯除噪滤波的结果,图 2(o)和图 2(p)分别是对图 2(a)增加强度为 0.01 椒盐噪声的影像及其对该加噪影像进行中值滤波的结果。上述 16 种影像的质量评价结果列于表 1 中,而影像处理前后的质量评价结果的相对变化数值列于表 2 中。图 3(a)是上述一系列高斯平滑影像的均方差、平均梯度、信息熵和灰度预测均方差测度变化曲线。

针对航空影像,笔者也进行了同样的试验,不同方法的质量评价结果分别如表 1 和图 3(b)所示。

另外,笔者还用邻域平均法对航空影像进行了一系列平滑处理,然后分别用均方差法、平均梯度法、信息熵法和灰度预测均方差法对其结果影像进行了质量评价。各种评价方法的质量测度值的变化曲线如图 3(c)所示,其中平滑滤波窗口的大小分别为 $l \times l$ ($l=2, 3, \dots, 11$) 共 10 种。

为了比较本文方法与传统方法的时间复杂性,笔者分别对 5 幅幅面尺寸为 $256 \times 256, 512 \times 512, 1024 \times 1024, 2048 \times 2048$ 和 4096×4096 像素的航空影像进行了评价试验。试验统计结果如表 3 所示。

表 1 对实验影像的质量评价数值

影像序号	Lena 影像				航空影像			
	均方差	平均梯度	信息熵	灰度预测均方差	均方差	平均梯度	信息熵	灰度预测均方差
a	52.281	14.794	7.560	25.989	49.090	25.805	7.600	31.722
b	51.748	11.399	7.532	14.458	46.493	18.316	7.529	17.941
c	47.143	7.344	7.413	4.143	40.389	8.544	7.344	4.183
d	44.714	5.922	7.362	2.271	38.150	5.535	7.259	1.894
e	42.531	5.017	7.302	1.482	36.697	4.032	7.196	1.147
f	40.551	4.361	7.246	1.102	35.617	3.188	7.147	0.863
g	38.739	3.850	7.203	0.896	34.757	2.651	7.105	0.736
h	37.073	3.434	7.159	0.787	34.029	2.277	7.063	0.670
i	35.541	3.086	7.105	0.718	33.404	2.003	7.030	0.633
j	34.132	2.794	6.955	0.675	32.856	1.794	7.005	0.614
k	32.833	2.539	6.894	0.654	32.362	1.631	6.980	0.602
l	74.722	21.471	3.227	37.917	74.757	39.451	3.791	48.949
m	53.651	22.544	7.678	34.148	50.338	30.216	7.635	38.259
n	50.881	14.899	7.583	17.721	45.704	19.892	7.522	20.331
o	53.735	17.630	7.574	37.123	50.378	28.017	7.614	40.578
p	50.831	9.059	7.470	14.472	46.390	16.399	7.506	18.269

注:表中“影像序号”列中的字母序列所代表的影像为图 2 中对应的各子图影像,对航空影像也是作相应的滤波和增强处理。



(a) 原始 Lena 影像



(b) 图 2(a) 高斯低通滤波结果
($s=0.5$)



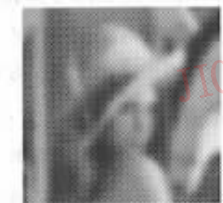
(c) 图 2(a) 高斯低通滤波结果
($s=1.0$)



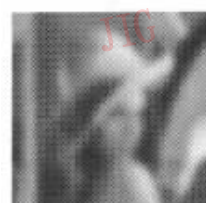
(d) 图 2(a) 高斯低通滤波结果
($s=1.5$)



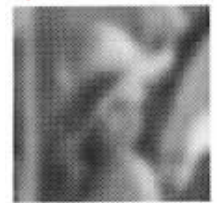
(e) 图 2(a) 高斯低通滤波结果
($s=2.0$)



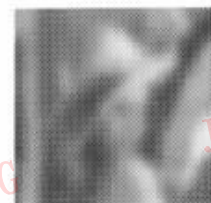
(f) 图 2(a) 高斯低通滤波结果
($s=2.5$)



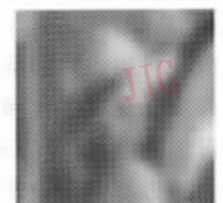
(g) 图 2(a) 高斯低通滤波结果
($s=3.0$)



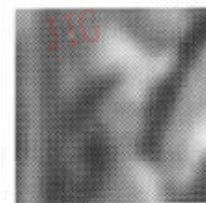
(h) 图 2(a) 高斯低通滤波结果
($s=3.5$)



(i) 图 2(a) 高斯低通滤波结果
($s=4.0$)



(j) 图 2(a) 高斯低通滤波结果
($s=4.5$)



(k) 图 2(a) 高斯低通滤波结果
($s=5.0$)



(l) 图 2(a) 直方图均衡化增强图像



(m) 图 2(a) 加均值为 0, 均方差为 0.002 的高斯噪声影像



(n) 图 2(m) 高斯平滑滤波结果



(o) 图 2(a) 加强度为 0.01 椒盐噪声影像



(p) 图 2(o) 中值滤波结果

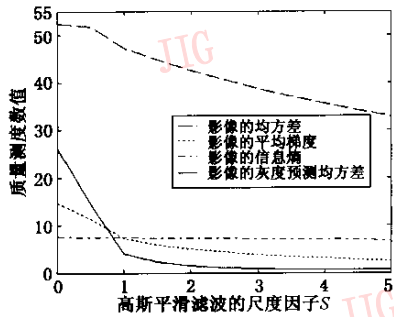
图 2 对 Lena 影像进行处理的视觉效果

表2 对实验影像进行增强和加减噪声前后的质量评价数值变化增幅

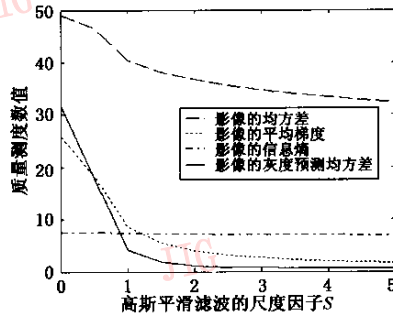
(%)

影像序号	Lena 影像				航空影像			
	均方差	平均梯度	信息熵	灰度预测均方差	均方差	平均梯度	信息熵	灰度预测均方差
1	42.9	45.1	-57.3	45.9	49.9	52.9	-50.1	54.3
2	2.6	52.4	1.6	31.4	2.5	17.1	0.5	20.6
3	-5.2	-33.9	-1.2	48.1	-9.2	-34.2	-1.2	-46.8
4	2.8	19.2	0.2	42.8	2.6	8.6	0.2	27.9
5	-5.4	-48.6	-1.4	-61.0	-7.9	-41.4	-1.4	-55.0

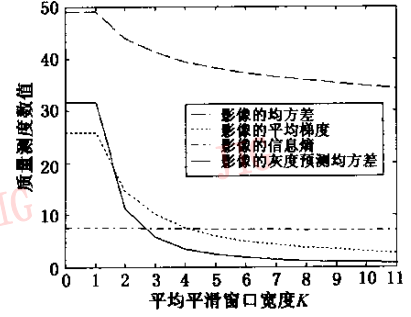
注:表中序号依次代表对原始影像进行直方图增强前后、对原始影像增加高斯噪声前后、对增加高斯噪声的影像进行高斯滤波前后、对原始影像增加椒盐噪声前后和对增加椒盐噪声的影像进行中值滤波前后的影像。



(a) 高斯平滑后的 Lena 影像质量测度曲线



(b) 高斯平滑后的航空影像质量测度曲线



(c) 平均平滑后的航空影像质量测度曲线

图3 4种质量测度曲线变化比较

表3 几种质量评价方法的计算时间 单位:s

序号	像幅	均方差法	平均梯度法	信息熵法	灰度预测误差统计法
1	256×256	0.000	0.016	0.000	0.016
2	512×512	0.015	0.063	0.000	0.062
3	1024×1024	0.063	0.219	0.031	0.250
4	2048×2048	0.250	0.812	0.110	0.906
5	4096×4096	0.984	2.922	0.469	3.687

从表1和图2和图3可以看出,随着影像平滑程度的增大,影像的分辨率、清晰度和反差越来越小,4种质量评价方法的质量测度曲线都随之下降,其中灰度预测均方差质量测度曲线的变化梯度最大,下降速度最快,特别是表现在连续的小尺度平滑部分,即高斯平滑滤波的尺度因子 $s < 2.0$ 和平均平滑滤波窗口尺寸 $k < 5$ 的部分。其原因是由于这部分影像的分辨率和清晰度相对较好,灰度差异明显,每一次平滑都会明显减小像素间的灰度差异,所以其质量测度曲线的变化较大。相反,在连续的大尺度平滑部分,即高斯平滑滤波尺度因子 $s > 2.0$ 和平均平滑窗口尺寸 $k > 5$ 的部分,由于像素间的相关性已非常强,相对灰度差异很小,所以平滑不会使像素间的相对灰度差异产生大的变化,从而表现出4种质量测度曲线均趋于平缓。

从表1和表2的数据可以看出:(1)就常用的影像直方图增强结果而言,本文方法的测度增幅在上

述4种质量测度中也是最大的,如航空影像增强前后的均方差、平均梯度、熵和灰度预测误差均方差增幅分别为52.3%,52.9%,-50.1%和54.3%;(2)本文方法对高斯噪声和椒盐噪声都很敏感,且对降噪结果更为敏感,如对Lena影像,虽只增强了方差为0.002的高斯噪声,但增噪前后的变化幅度却为31.4%,而降噪前后的变化幅度则为-48.1%;增加椒盐噪声(强度仅1%)前后的变化幅度为42.8%,而降噪前后的变化幅度则为-61.0%,对航空影像也类似;(3)与其他3种测度方法相比,总体上讲,本文方法对加噪特别是降噪结果非常敏感。

表3反映了4种质量评价方法的计算效率,从中可以看出,该方法不及其他3种方法快,这主要是因为该方法需要遍历影像两次且乘法数量要多,而其他3种方法只需遍历1次。

5 结论

本文从影像像素间的相关性角度探讨了一种新的影像质量评价方法。试验的比较结果表明:与传统的方差法、平均梯度法和信息熵法相比,本文方法对影像质量的变化更为敏感,评价精度更高,但也存在与传统方法相同的缺陷,即它不能区分含噪声影像与高分辨率、高清晰影像间的相对质量,因为对于这

两种影像,方法的计算值都较高。另外,从上面的实验比较结果还可以看出,对不同的降噪方法,本文方法对降噪结果的敏感性都比传统方法高得多,因此可初步认为该方法特别适合于比较不同降噪方法和降噪效果的影像质量。该方法的不足是计算时间较传统方法,特别是方差法与信息熵法要长。

数字影像质量的正确评价是一项艰辛而又很有意义的研究工作,而本文仅仅只是对前人的工作做了一点补充和新的发现,真正探讨一种能全面反映影像实际质量的客观评价方法仍需广大科研工作者付出艰辛的劳动。

参 考 文 献

- 1 Rosenfeld A, Kak A C. Digital picture Processing[M]. New York: Academic press, 1976:127~138,153~154.
- 2 Saghri J A, Cheatham P S, Habibi H. Image quality measure based on a human visual system model[J]. Optical Engineering, 1989,28(7): 813~818.
- 3 Eskicioglu A M, Fisher P S. Image quality measures and their performance[J]. IEEE Transactions on Communication, 1995, 43(12): 2959~2965.
- 4 魏政刚,袁杰辉,蔡元龙. 图象质量评价方法的历史、现状和未来[J]. 中国图象图形学报,1998,3(5):386~389.
- 5 Janssen T J W M, Blommaert F J J. A computational approach to image quality[J]. Displays, 2000,21(4): 129~142.

- 6 Grigoryan A M, Aghaian Sos S, Panetta K. A new measure of image enhancement[EB/OL]. <http://www.cs.tufts.edu/~karen/publication.html>
- 7 王昱. 数字影像质量评价方法的研究[硕士学位论文][D]. 郑州: 解放军信息工程大学测绘学院,2001.
- 8 Jain A K. Fundamentals of digital image processing[M]. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc, 1989: 491~492.
- 9 沈庭芝,方子文. 数字图像处理及模式识别[M]. 北京:北京理工大学出版社,1998:86~89.



熊兴华 1965年生,2003年获解放军信息工程大学摄影测量与遥感专业博士学位,副研究员,硕士生导师。主要研究领域为遥感影像处理、分析与理解、遗传算法及其应用等。公开发表学术论文30篇,获部级科技进步一、二、三等奖共6项。



张丽 1973年生,工程师,硕士研究生,1996年获解放军测绘学院摄影测量与遥感专业学士学位。主要研究领域为数字摄影测量、遥感影像质量分析等。公开发表学术论文6篇。