

文章编号: 1007-4619(2005)04-0486-08

海啸地区遥感图像空间分辨率定量评价研究

季统凯¹, 赵忠明²

(1. 北京宇视蓝图信息技术有限公司, 北京 100096; 2. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘 要: 图像空间分辨率是图像质量评价的一项关键性指标,也是图像应用中举足轻重的一个参数。由于图像的成像方式不同,同一幅图不同方向的空间分辨率是变化的。由于影响图像空间分辨率的因素非常复杂,所以迄今为止尚无统一、有效的定量评价图像空间分辨率的理论和方法。该文基于熵理论和图像信息的特点,提出了变率信息熵的概念和算法,并进行了相关的特性分析。经过对模拟生成的条形码靶标图像和2004年印尼海啸地区的DMC等卫星遥感图像的处理和实验,验证了此方法可以客观、定量地评价一幅图像在水平和垂直方向的空间分辨率,实验结果证明了算法的有效性。

关键词: 海啸;变率信息熵;图像;空间分辨率;质量评价

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

图像获取 (forming)方式可分为扫描 (scanning)方式和非扫描 (如成帧 framing)方式两大类。一般说来,非扫描方式获取图像的空间分辨率在横、纵两个方向上是相同的。扫描方式获取的图像由于其在一条扫描线上对两个点的最小可分辨距离和两条扫描线之间对应目标的距离一般是不同的,因而其空间分辨率在横、纵两上方向上一般也是不相等的。

图像分辨率简单说是成像细节分辨能力的一种度量,也是图像中目标细微程度的指标,表示景物信息的详细程度^[1]。图像的空间分辨率是图像的质量评价关键性的一项指标,也是图像应用中举足轻重的一个参数。如何从图像本身来定量评价图像空间分辨率一直是图像处理领域的一个难题,目前没有统一的解决方法。

影响图像空间分辨率的因素有:被观测景物的对比度、形状、数目及成像系统的镜头、焦距、瞬时视场 (instantaneous field of view, IFOV)、辐射光波长、成像孔径、成像姿态以及成像系统设计等等。其中主要影响因素是光的衍射决定的分辨极限,成像系统的调制传递函数、信噪比和成像系统设计等方面。

本文在信息论的基础上,结合图像信息的特点,

提出了变率信息熵的基本原理;给出了变率信息熵的概念、定义、计算公式和特性分析。经对靶标图像和实际图像的实验证明:对于细节变化信息分布均匀的图像,此方法能准确定量检测出图像的横向空间分辨率和纵向空间分辨率,为定量评价图像的空间分辨率提供了一种崭新的思路。

2 变率信息熵的概念和算法

图像分辨率表示的是图像细节的变化情况,即差异信息的反映。因此,如果图像的空间分辨率越高,那么细节体现越明显,变化越剧烈。对一幅数字图像来讲,像素 (Pixel)反映了每个像元所对应的瞬时视场角大小的地物光谱特性,是给定图像中不可再分的最基本的地物信息单元,因此图像的整体信息量是由像元信息量组合而成。但是,单一像元的数值是明确和固定的,不存在信息不确定性或不肯定性,因而单一像元是没有信息量的。我们认为每一个像元与临近像元的变化是图像细节信息丰富程度和空间分辨率的主要体现,在此基础上我们借用熵函数的形式,定义变率信息熵。

将数字图像的空间分辨率定义为表征在数字图像上的细节状况,一幅 $M \times N$ 大小图像表示为 $X(i, j)$,其中 $i \in [1, M]$, $j \in [1, N]$ 。图像的变率信息熵

收稿日期: 2005-03-02 修订日期: 2005-04-12

基金项目: “十五”国家科技攻关重大专项“高性能对地观测微小卫星技术与应用研究”。

作者简介: 季统凯 (1972—),男,博士,主要研究方向是遥感图像信息融合和处理。

分为水平和垂直两个方向,表示 $B_H(X)$ 和 $B_V(X)$, 计算公式如下:

$$B_H(X) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} U_H(X_{(i,j)})}{M * (N-1)} \quad (1)$$

$$B_V(X) = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N U_V(X_{(i,j)})}{(M-1) * N}$$

其中, $U_H(X_{(i,j)})$ 表示图像上的点 $X_{(i,j)}$ 在水平尺度上的细节变化信息, $U_V(X_{(i,j)})$ 表示图像上的点 $X_{(i,j)}$ 在垂直尺度上的细节变化信息。 $U_H(X_{(i,j)})$ 和 $U_V(X_{(i,j)})$ 的定义如下:

$$U_H(X_{(i,j)}) = - \sum_{i=j}^{i+1} P_H(X_{(i,j)}) \log_2 P_H(X_{(i,j)}) \quad (2)$$

$$U_V(X_{(i,j)}) = - \sum_{i=i}^{i+1} P_V(X_{(i,j)}) \log_2 P_V(X_{(i,j)})$$

$P_H(X_{(i,j)})$ 表示图像上的点 $X_{(i,j)}$ 在水平尺度上的概率信息, $P_V(X_{(i,j)})$ 表示图像上的点 $X_{(i,j)}$ 在垂直尺度上的概率信息。 $P_H(X_{(i,j)})$ 和 $P_V(X_{(i,j)})$ 定义如下:

$$P_H(X_{(i,j)}) = \begin{cases} 1/2, & (X_{(i,j)} - X_{(i,j+1)}) > \theta \\ 1, & (X_{(i,j)} - X_{(i,j+1)}) \leq \theta \end{cases} \quad (3)$$

θ 是图像细节信息变化判定域值,可根据具体图像选择。

变率信息熵的单位沿用信息熵的比特,但是其物理概念有明确的变化。变率信息熵不仅与随机变量 X 的总体结构(或信源的总体统计特性)有关,而且与局部像对的细节变化情况有关。它表示图像整体在水平和垂直两个方向上平均每个像对的变化概率。其对应图像空间分辨率 $D(X)$ 的关系为:

$$D_H(X) = D_p(X) / B_H(X) \quad (4)$$

$$D_V(X) = D_p(X) / B_V(X)$$

其中 $D_H(X)$, $D_V(X)$ 表示图像的水平 and 垂直方向的空间分辨率, $D_p(X)$ 表示图像的地面像元分辨率。

3 变率信息熵的特性

变率信息熵具有以下主要特性:

(1) 变率信息熵具有方向性。即一幅图像的水平方向和垂直方向的变率信息熵 $B_H(X)$ 和 $B_V(X)$ 往往是不同的,并且可以定义其它方向的变率信息熵,如 45° 和 135° 方向等。

(2) 变率信息熵非负,也就是:

$$B(X) \geq 0 \quad (5)$$

根据式(3)可知: $0 \leq P(X_{(i,j)}) \leq 1$, $\log_2 P(X_{(i,j)})$

≤ 0 , 所以 $-P(X_{(i,j)}) \log_2 P(X_{(i,j)}) \geq 0$, 由式(1), (2) 可知变率信息熵必然是非负的。

(3) 像对之间没有变化或变化范围在规定域值内的图像点 $X(i,j)$ 的信息量为零。根据式(3), 可知如果满足上述条件, 则:

$$U(X) = 0 \quad (6)$$

即在这种情况下, 像对之间没有变化, 对应的也不会反映细节信息的变化或空间分辨率, 其变率信息熵显然为零。

(4) 变率信息熵有极值性。以水平变率信息熵 $B_H(X)$ 为例, 根据式(1)、(2)、(3), 当所有 $P_H(X_{(i,j)}) = 1/2$ 时 ($i \in [1, M-1]$, $j \in [1, N]$), $B_H(X)$ 具有最大值 1, 即:

$$B_H(X) \leq 1 \quad (7)$$

同理可得: $B_V(X) \leq 1$

式(7)表明, 图像像对是最基本的细节变化单元, 图像最大的细节丰富程度为每个像对都产生变化, 又根据式(4), (7)可知, 图像空间分辨率必然不大于图像的地面像元分辨率, 即:

$$D_p(X) \leq D_H(X); D_p(X) \leq D_V(X) \quad (8)$$

4 实验与结果分析

4.1 靶标图像生成

为了检验算法的有效性, 仿真生成不同分辨率水平和垂直方向的黑白条图像, 图像大小为 $256 * 256$ (像元), 详见图 1 和图 2。

4.2 针对于海啸周边地区实际遥感图像的实验(图 3)

4.3 实验结果分析

4.3.1 靶标图像实验结果分析

假定图像像元分辨率是 $5m$, 通过传统熵和变率信息熵对图像空间分辨率作评价, 所得结果如表 1 所示。同样, 针对中国的真实卫星影像和信息融合后的结果图像, 应用变率信息熵进行评价研究, 所得结果如表 2 所示。

由表 1 可知, 变率信息熵完全真实、准确地反映了条形码靶标图像的空间分辨率, 而传统熵函数对上述所有图像的计算结果是一样的, 完全反映不出空间分辨率的变化。

由表 2 可知, 应用信息融合算法后, 图像空间分辨率平均提高 30%, 与目视解译效果吻合。

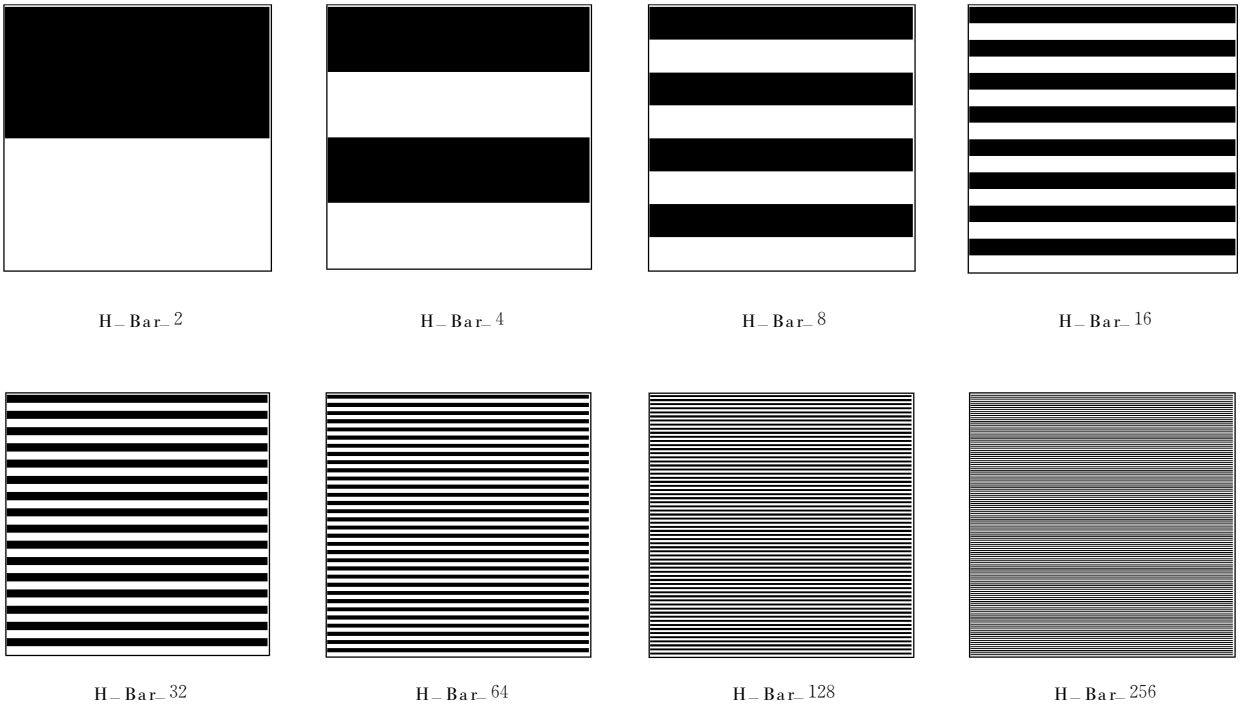


图 1 水平黑白条靶标图像

Fig 1 Black White Horizontal Stripe Drone Image

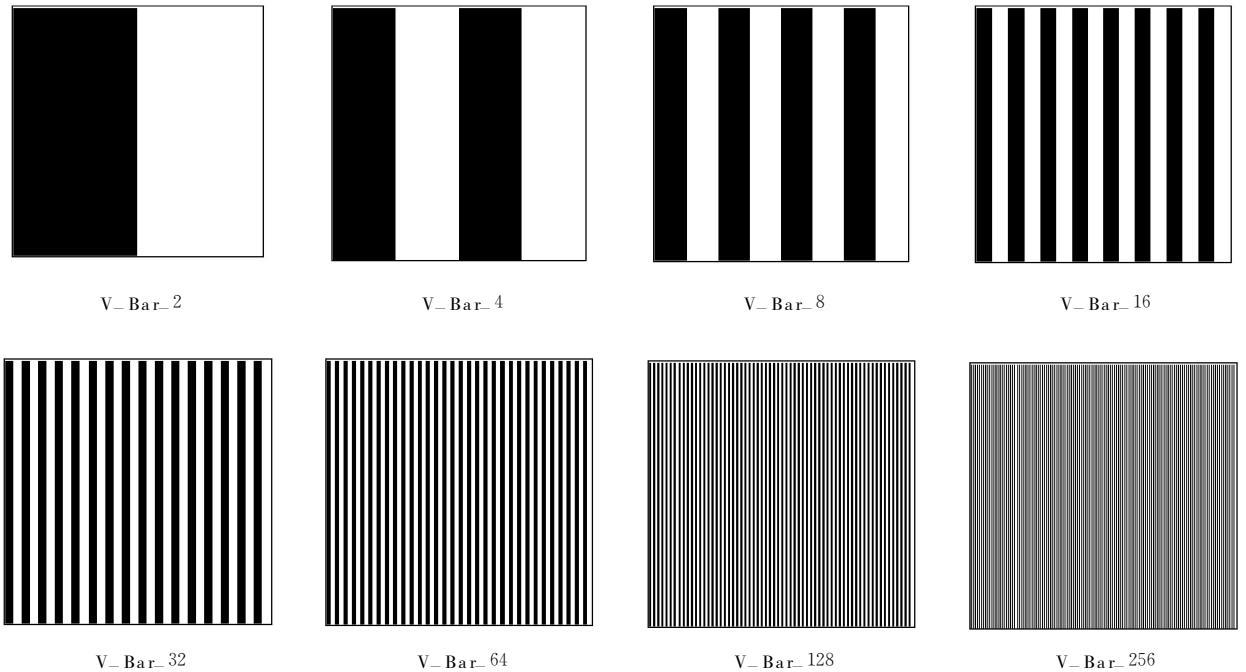


图 2 竖直黑白条靶标图像

Fig 2 Black White Vertical Stripe Drone Image

4.3.2 DMC 等海啸卫星遥感图像的实验结果分析

对于实际遥感图像的图像空间分辨率评价结果如表 2 所示,由原始图像和表 2 的数据分析可知:在

海啸发生前后,地面的景物产生了很大的变化,这必然对图像空间分辨率定量评价造成很多干扰。但是如果采用变率信息熵的评价方法,可以看到对于同一遥感源,尽管地面物体变化很大,但对同一种遥感

表 1 对于条形码靶标图像的图像空间分辨率评价结果

Table 1 The Evaluation Spatial Resolution of Horizontal Stripe Drone Image

图像 (X)	黑白线条对数 (线对/图像)	像元 分辨率 /m	真实图像空间 分辨率 /m	传统熵 H(X) (Bit)	水平方向变率 信息熵 $B_H(X)$	由变率信息熵 导出的水平方向 空间分辨率	垂直方向变率 信息熵 $B_V(X)$	由变率信息熵 导出的垂直方向 空间分辨率
H_Bar_2	1	3	384	1	0	0	0.0078	384
H_Bar_4	2	3	192	1	0	0	0.0156	192
H_Bar_8	4	3	96	1	0	0	0.0313	96
H_Bar_16	8	3	48	1	0	0	0.0625	48
H_Bar_32	16	3	24	1	0	0	0.125	24
H_Bar_64	32	3	12	1	0	0	0.25	12
H_Bar_128	64	3	6	1	0	0	0.5	6
H_Bar_256	128	3	3	1	0	0	1	3
V_Bar_2	1	3	384	1	0.0078	384	0	0
V_Bar_4	2	3	192	1	0.0156	192	0	0
V_Bar_8	4	3	96	1	0.0313	96	0	0
V_Bar_16	8	3	48	1	0.0625	48	0	0
V_Bar_32	16	3	24	1	0.125	24	0	0
V_Bar_64	32	3	12	1	0.25	12	0	0
V_Bar_128	64	3	6	1	0.5	6	0	0
V_Bar_256	128	3	3	1	1	3	0	0

表 2 实际遥感图像的图像空间分辨率评价结果

Table 2 The Actual Spatial resolution of Remote Sensing Image

图像名称	时间	地点	像元 分辨率 /m	横向变率 信息熵	纵向变率 信息熵	横向空间 分辨率 /m	纵向空间 分辨率 /m
lknos_a(1)	2003-01-10	Aceh Province Sumatra	4	0.4665	0.469016	8.57449089	8.528493697
lknos_a(2)	2004-12-26	Aceh Province Sumatra	4	0.462346	0.466017	8.651529374	8.58337786
lknos_b(1)	2005-01-01	Diego Garcia Indian Ocean	1	0.436506	0.417555	2.290919254	2.394894086
lknos_b(2)	2005-01-02	Diego Garcia Indian Ocean	4	0.50688	0.427261	7.891414141	9.361959084
lknos_c(1)	2003-01-10	Aceh Province Sumatra	4	0.46997	0.48732	8.511181565	8.20815891
lknos_c(2)	2004-12-29	Aceh Province Sumatra	4	0.483861	0.483597	8.266836964	8.271349905
lknos_d(1)	2003-01-13	Khao Lak Thailand	4	0.461444	0.4794	8.668440808	8.343763037
lknos_d(2)	2004-12-29	Khao Lak Thailand	4	0.476761	0.479112	8.389948003	8.348778574
lknos_e(1)	2003-01-10	Lhoknga Aceh Province Sumatra	4	0.473211	0.483206	8.45288888	8.278042905
lknos_e(2)	2004-12-29	Lhoknga Aceh Province	4	0.486896	0.484854	8.21530676	8.249906157
lknos_f(1)	2003-01-10	Aceh Province Sumatra	4	0.477547	0.48524	8.376138893	8.2433435
lknos_f(2)	2004-12-29	Aceh Province Sumatra	4	0.483736	0.478564	8.268973159	8.358338697
Spo5_a(1)	2004-07-09	海啸周边地区	30	0.437294	0.415609	68.60373113	72.18322991
Spo5_a(2)	2004-12-28	海啸周边地区	30	0.422138	0.441732	71.06680754	67.91448208
Spo5_b(1)	2004-12-08	海啸周边地区	30	0.417345	0.460988	71.88297452	65.0776159
Spo5_b(2)	2004-12-29	海啸周边地区	30	0.257923	0.352228	116.3137836	85.17210443
Spo5_c(1)	2004-02-25	海啸周边地区	30	0.456404	0.391298	65.73123811	76.66791039
Spo5_c(2)	2004-12-28	海啸周边地区	30	0.471843	0.471027	63.58047062	63.69061646
DMC_all	2005-01-07	苏门答腊	32	0.334628	0.343264	95.6285786	93.22270905
ETM_a(1)	2005-01-07	海啸周边地区	28.5	0.451886	0.449886	63.06900413	63.34938184
DMC_a(1)	2005-01-07	海啸周边地区	32	0.433059	0.448613	73.89293376	71.33096901
ETM_a(2)	2005-01-07	海啸周边地区	28.5	0.337322	0.417235	84.48900457	68.30682948
DMC_a(2)	2005-01-07	海啸周边地区	32	0.397243	0.408749	80.5552269	78.2876533



Iknos_a(1)



Iknos_a(2)



Iknos_b(1)



Iknos_b(2)



Iknos_c(1)



Iknos_c(2)



Iknos_d(1)



Iknos_d(2)



Iknos_e(1)



Iknos_e(2)



Iknos_f(1)



Iknos_f(2)

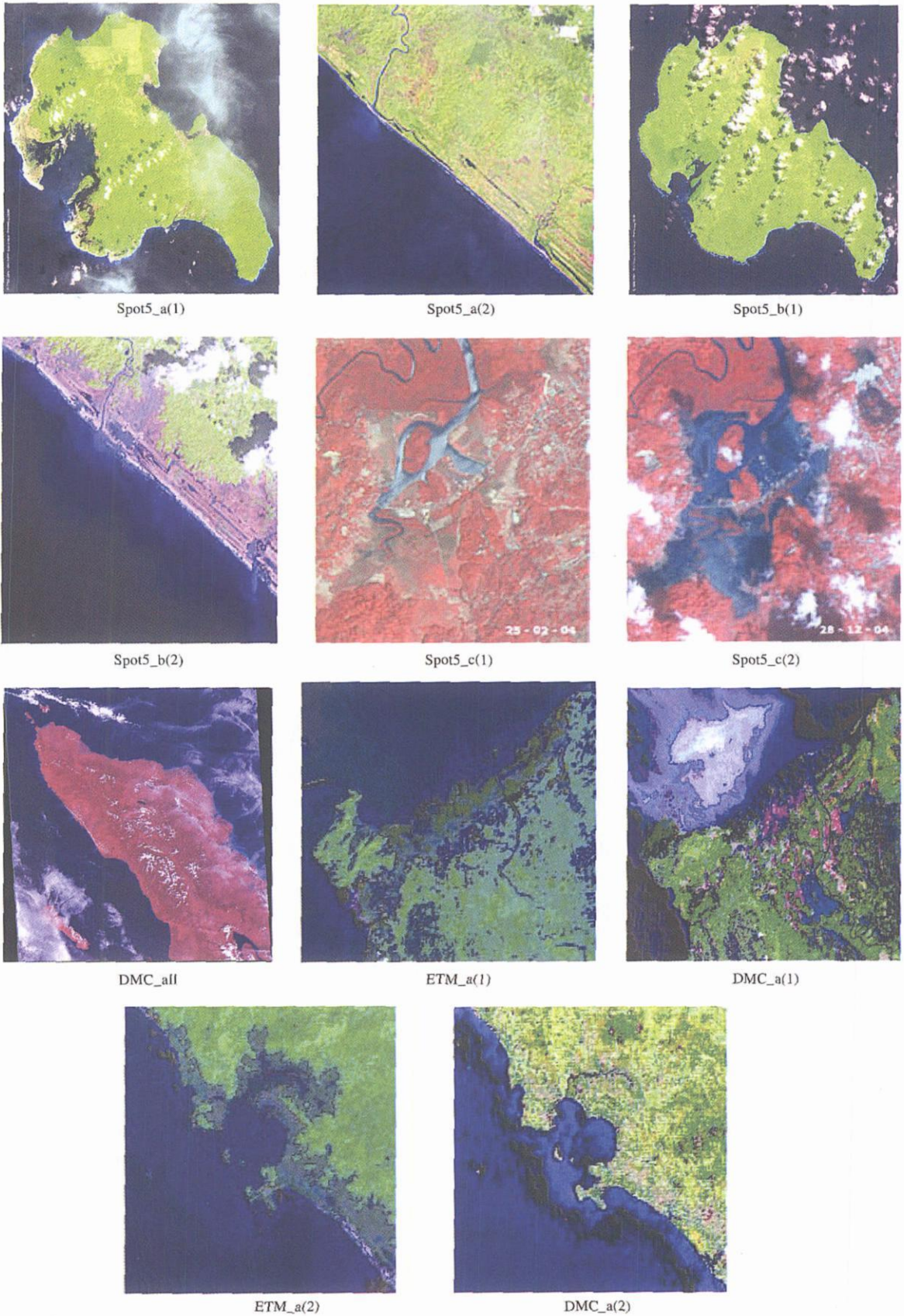


图 3 海啸周边地区实际遥感图像

源的空间分辨率的定量评价是非常稳定的(特别是 Ikonos 卫星)。同时,我们得出的空间分辨率与传感器像元分辨率的数值比基本上是 2:1 至 3:1 的范围,这符合遥感领域的实践经验。

5 结 论

本文首先提出了变率信息熵的概念、定义和计算方法,然后推导和总结了变率信息熵的特性,最后应用模拟影像和实际图像的处理实验验证了变率信息熵的可用性和有效性。

经对靶标图像和实际图像的实验证明:对于细节变化信息分布均匀的图像,此方法能准确定量检测出图像的横向空间分辨率和纵向空间分辨率,为定量评价图像的空间分辨率提供了一种崭新的思路。

变率信息熵评价算法需要在以下的方面进行发展和完善:

(1)计算过程中域值的智能化动态选择。域值的选择在变率信息熵的计算过程中非常关键,每幅图像的真实域值是变化的,如何定量监测这种变化。并确定合理域值是需要深入研究的问题。

(2)图像噪声影响的评估。图像的噪声是影响变率信息熵域值选择的主要考虑重点。并且噪声的影响是加性的,如何消除这种影响是工程应用中的重点课题。

(3)变率信息熵适用于细节变化信息分布均匀的图像。这是由它的理论基础决定的,所以它有明确的应用范围的限定。

致 谢 在进行论文写作、实验和应用研究期间,得到了迟耀斌研究员悉心指导和大力支持,特此感谢!

参 考 文 献 (References)

- [1] Ikram E. Abdou-Nicolas J. Dusaussoy. SURVEY OF IMAGE QUALITY MEASUREMENTS [J], CH2345-7/86/0000/0071 \$01.00@ 1986 IEEE. 1986, 71-78
- [2] Estes J.E. Simonett D.S. Fundamentals of Image Interpretation [J]. Chapter 14 in Manual of Remote Sensing R. G. Reeves ed. Falls Church VA: American Society of Photogrammetry. 1975.
- [3] Campbell J.B. Introduction to Remote Sensing [A]. The Guilford Press. 1987.
- [4] den Dekker A. J. A. van den Bos. Resolution: a Survey [J]. J. Opt. Soc. Am. A. 1997, 14(3): 547-557.
- [5] Tao Chunkan. Tao Chunkuang. The Theory of Optics Information [M]. Science Press. 1999. [陶纯堪, 陶纯匡. 光学信息论 [M]. 科学出版社, 1999.]
- [6] Jiang Jingshan. Wang Wenkui. Space Science and Application [M]. Science Press. 2001. [姜景山, 王文魁等. 空间科学与应用 [M]. 科学出版社, 2001.]
- [7] K. R. Castleman. Digital Image Processing [M]. Electronic Industry Press. 1998. [K. R. Castleman 著, 朱志刚, 林学闫, 石定机等译. 数字图像处理 [M]. 电子工业出版社, 1998.]
- [8] Thomas M. Lillesand. Ralph W. Kiefer. Remote Sensing and Image Interpretation. Fourth Edition. ISBN 0-471-25515-7, John @ Sons. Inc. 2003-08-20.
- [9] Yi M. Optics [M]. High Education Press. Second Edition. 2000. [易明. 光学 [M]. 高等教育出版社, 第二版, 2000.]

The Theory to Evaluate the Image Spatial Resolution Quantitatively

Ji Tong-kai¹, ZHAO Zhong-ming²

(1. Beijing Landview Mapping Information Technology Co., Ltd., Beijing 100096, China;

2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The spatial resolution is a measurement of the image details and is also an indicator for the objects details. It appears the degree of the scene details. But up to now, there are no effective approaches to be quantifiable evaluating the image resolution.

The manner of forming an image can be in two ways: scanning manner and non-scanning manner (for example: framing). In normal forming an image by non-scanning manner has the same spatial resolution in the vertical and horizontal directions. But an image by scanning manner has the different spatial resolution in the two directions.

The factors that influence the image spatial resolution exist: the contrast, shape, number of the scene which was observed and the lens focus and instantaneous field of view (IFOV) of imaging system, the wavelength of radiation, aperture of imaging model of image and the design of the imaging system, and so on. The main effective factors are distinguishing limit decided by the diffraction of the light, MTF (Modulate Transfer Function) of the imaging system, NSR (Noise Signal Ratio) and the design of imaging system.

This paper is based on the entropy theory and the property of image information, bring forward the principle theory of varied information entropy, provided the conception, definition, method and character analysis. The experiment for bar images and remote sensing images of tsunami area approved that the method can be qualified to measure the spatial resolution in horizontal and vertical directions for the varied information equally, and provide a new method for the qualified measuring the image spatial resolution.

Key words: varied information entropy; images; spatial resolution; quality evaluation