

基于气象数据估计大气 MTF 的遥感影像去模糊算法

王振国^①, 陈波^②, 李少敏^①, 白向华^③

(^① 解放军 96669 部队, 北京 102208; ^② 北京大学 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871;

^③ 解放军 96361 部队, 西宁 810100)

摘要: 针对直接解卷积算法没有充分利用影像成像过程中模糊函数先验信息的缺陷, 利用成像时刻局部区域的气象参数来估计大气 MTF, 并用估计的大气 MTF 对直接解卷积算法进行了改进。利用中巴资源卫星所获取的遥感影像, 及其对应区域成像时刻的气象数据, 对改进后直接解卷积算法进行了验证, 各种影像质量评价指标均表明, 改进后直接解卷积算法性能相对原有算法有了大幅度提高, 进而验证了论文改进思路的可行性与合理性。

关键词: 大气 MTF 估计; 直接解卷积; 遥感影像恢复; 湍流 MTF; 气溶胶 MTF

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2012.01.006

中图分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1000-3177(2012)119-0025-06

Direct Deconvolution Algorithm of Remotely Sensed Image Based on Atmosphere MTF Estimated by Meteorological Data

WANG Zhen-guo^①, CHEN Bo^②, LI Shao-min^①, BAI Xiang-hua^③

(^① *The 96669 Troops of PLA, Beijing 102208;*

^② *Institute of RS & GIS, Peking University, Beijing 100871;*

^③ *The 96361 Troops of PLA, Xining 810100)*

Abstract: As the direct deconvolution algorithm is lack of the utilization of priori knowledge about blurring function, this paper estimates the atmospheric MTF using the local area meteorological parameters, and than, the direct deconvolution algorithm is improved with the estimated atmospheric MTF. Take advantage of the remote sensing images obtained by CBERS and the meteorological data, corresponding to the image area, the improved direct deconvolution algorithm is validated. Various image quality evaluation criterions show that the performance of direct deconvolution algorithm is greatly improved relative to the original one. So, the feasibility and reasonability of improved way of the paper are verified.

Key words: atmosphere MTF estimation; directly deconvolution; remote sensing images restoration; turbulence MTF; aerosol MTF

1 引言

随着光电成像和计算机技术的发展, 通过大气进行成像的技术已取得了长足的发展。但大气的存在, 限制了各种光电成像设备的性能和所观测数据的质量。大气所造成影响可以通过技术途径来补偿或减轻: 如可以通过自适应光学成像技术, 对由大气

湍流引起的波前倾斜进行补偿, 起到纠正湍流影响的作用; 在获取观测数据的同时, 利用波前传感器获取成像焦平面上的相位分布, 然后根据灰度和相位对影像进行准确的恢复^[1], 但是, 这种影像恢复方法的成本高, 技术复杂, 不能满足影像实时恢复处理的需要。所以, 需要探索研究其他的实用算法对大气模糊影像进行去大气模糊处理。

收稿日期: 2010-12-13 修订日期: 2011-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41001237)。

作者简介: 王振国(1980~), 男, 河南安阳人, 博士, 主要从事遥感技术与应用、数字图像处理等方向研究。

E-mail: shaoyaoren0@126.com

大气所造成影像的扭曲和失真,主要是由大气湍流和气溶胶对光线的扰动和散射造成的,而利用气象统计模型,可以更合理地估计大气 MTF (Modulation Transfer Function)。在长曝光情况下,大气湍流介质的主要影响是,造成影像高空间频率成分的减少和辐射光线波前的倾斜变形,进而在成像焦平面内造成影像的扰动与模糊。该技术实现的关键则是准确的估计大气的整体 MTF,特别是对气溶胶 MTF 曲线的准确估计。在大气 MTF 的估计过程中,不可避免的会存在各种误差,但是,利用估计的大气 MTF 仍可得到比较准确的影像恢复结果^[2]。

论文在利用气象数据估计大气 MTF 的基础上,针对直接解卷积算法不能包含成像时刻气象信息的限制,提出了一种改进的遥感影像直接解卷积恢复算法。实验结果表明,改进后算法的性能要比原有算法更有效。

2 大气湍流 MTF 估计模型

大气湍流主要对影像的空间高频信息和辐射光线的波前产生影响,对长曝光情况来说,这种影响可利用下式所示的长曝光 MTF 模型来表示^[3]:

$$MTF_{lc} = \exp\{-57.53v^{5/3}C_n^2\lambda^{1/3}R\} \quad (1)$$

其中, MTF_{lc} 表示长曝光情况下的湍流 MTF, v 表示角空间频率, C_n^2 是折射率结构常数(Refractive Index Structure Coefficient), R 表示光程, λ 为辐射光线的波长。在短曝光情况下,大气湍流 MTF 估计模型则变为:

$$MTF_{sc} = \exp\left\{-57.53v^{5/3}C_n^2\lambda^{1/3}R\left[1-\mu\left(\frac{\lambda v}{D}\right)^{1/3}\right]\right\} \quad (2)$$

其中, MTF_{sc} 为短曝光 MTF,当进行近景成像时 μ 取值为 1,当进行远景成像时, μ 取值为 0.5。 D 是光学成像系统的光瞳直径。

对如何利用气象数据估计大气 MTF,人们已经作了大量的研究工作,为了对 C_n^2 进行估计,美国陆军大气科学实验室的科学家们开发出了诸如 IM-TURB 和 PROTURB 的专用计算机软件^[4]。此外,美国陆军夜视实验室的研究人员通过实验证明:以相对小时(relative hours)的概念为基础,利用实际观测的标准气象数据和一个估计 C_n^2 的简单经验模型^[4]也得到了比较好的试验结果。在文献^[5]中对利用该经验模型计算 C_n^2 的方法进行了详细介绍,篇幅所限,此处不再赘述。

3 大气气溶胶 MTF 估计模型

除了大气湍流,气溶胶中的微小粒子对辐射光线的散射和吸收作用,也会对各种成像系统造成严重的影响;散射会造成点目标辐射光线的扩散,引起光线相位函数的扩散,使得光线到达角的偏差变大,进而造成成像焦平面上影像的模糊。需要对记录在影像中的散射光线采取一些实际的限制措施^[6];入射光线的扩散角度可以达到衍射极限 λ/a 的水平,其中, a 表示气溶胶中大多数微粒的直径, λ 为辐射光线的波长。

根据文献^[6],大气中所含气溶胶对成像系统性能的影响,可用下面的气溶胶 MTF 计算公式来概括为:

$$MTF_a(v) = \begin{cases} \exp[-A_a R - S_a R (v/v_c)^2], & v \leq v_c \\ \exp[-(A_a + S_a)R], & v > v_c \end{cases} \quad (3)$$

其中, $MTF_a(v)$ 表示实际的气溶胶 MTF, S_a 和 A_a 表示气溶胶对辐射光线的有效散射和吸收系数,由于大气对辐射光线的散射和吸收作用还受到硬件设备性能的影响,所以说 S_a 和 A_a 特指气溶胶所引起的对辐射光线的有效散射和吸收系数, v_c 是气溶胶截止频率;对于颗粒直径较大的气溶胶成分,如雾气或霾等, S_a 和 A_a 主要取决于气溶胶的尺寸分布(Size Distribution),而非成像设备的性能参数^[7];在这种情况下, $v_c \approx a/\lambda$,其中 a 表示大气中主要气溶胶粒子的半径。另外, S_a 、 A_a 和 v_c 的详细求解过程可以参考文献^[8]所介绍的计算过程。当然,也可根据实际测量得到的气溶胶 MTF,再对这些参数进行反演^[9]。对气溶胶 MTF 有影响的成像系统参数主要有角空间频谱带宽、动态域和视场范围等。

方程(3)说明,对于高空间频率而言,实际的气溶胶 MTF 主要受到大气传输的影响。事实上,气溶胶 MTF 的高频部分的值要比大气传输系数还略高。因此,成像系统性能的限制导致了该部分频谱的升高。且在任何情况下,气溶胶 MTF 曲线在截止频率 v_c 处都有一个突出的拐点。且在整个大气 MTF 曲线上,这个拐点也非常明显。论文采用文献^[10]中提出的,采用 MODTRAN 软件来估计直径较小微粒的尺寸分布,而对于直径较大微粒的尺寸分布,则采用一种新的计算模型来估计。

对于直径较大微粒的尺寸分布模型,采用一种幂律分布模型,即:

$$\frac{dn}{dr} = A e^{-a} \quad (4)$$

其中, r 表示微粒半径, n 为数值浓度 (number concentration)。对于比较干旱的区域, 参数 A 和 α 可以根据气象参数进行估计^[10]:

$$A = 1.1917 - 0.128RH + 4.61 \times 10^{-3}RH^2 + 6.85 \times 10^{-5}RH^3 + 3.73 \times 10^{-7}RH^4 \quad (5)$$

$$\alpha = 2.68 + 2.3 \times 10^{-3}RH + 8.16 \times 10^{-5}RH^2 - 2.64 \times 10^{-2}WS \quad (6)$$

其中, RH 表示相对湿度, 无量纲, WS 表示风速, 单位为 m/s 。

对于非干旱的区域,

$$\ln A = -0.497 + 0.0255RH - 0.00198 \overline{RH}_{24} - 0.0000986 \overline{RH}_{24}^2 - 0.0144WS - 0.331 \overline{WS}_{24} + 0.0489 \overline{WS}_{24}^2 + 0.0823T - 0.402SF \quad (7)$$

$$\alpha = 3.934 + 0.00831RH - 0.0172 \overline{RH}_{24} + 0.000117 \overline{RH}_{24}^2 - 0.0239WS - 0.179 \overline{WS}_{24} + 0.00961 \overline{WS}_{24}^2 - 0.0291T - 0.0201SF \quad (8)$$

其中, \overline{RH}_{24} 和 \overline{WS}_{24} 分别表示 24 小时内的平均相对湿度和风速, SF 表示太阳辐射通量。

因此, 在得到湍流 MTF 和气溶胶 MTF 后, 就可以通过基于气象数据估计 MTF 的模型(10)来得到大气 MTF 。

$$MTF_{\text{大气}} = MTF_{\text{湍流}} \times MTF_{\text{气溶胶}} \quad (9)$$

(9)式说明, 整个成像系统的 MTF 可以通过各个子系统 MTF 的乘积得到, 由于每个子系统 MTF 的值都小于 1, 所以, 整体 MTF 的值要小于任何一个子系统的 MTF 值。

4 直接解卷积算法

4.1 算法简介

直接解卷积算法是一种针对单帧图像的非迭代盲解卷积技术, 可以准实时地完成图像的高分辨率恢复与重建。该算法利用傅立叶变换在频率域完成, 已经成功地应用于多种不同的成像环境和领域, 包括核磁共振成像 (MRI)、脑部断层扫描成像和电子扫描显微镜成像等领域^[11~13]。论文就该算法在遥感影像恢复中的应用进行了实验, 以中巴资源卫星 CBERS-02 所观测的真实遥感影像为实验数据, 对该算法的性能进行了验证; 并针对该算法缺少影像降质过程中模糊函数先验信息的缺陷, 基于成像时刻所记录的气象数据对该算法进行了改进, 利用

真实遥感影像数据和气象数据对改进后算法进行了验证和对比分析。

直接解卷积算法是基于一种重要的径向对称空间不变模糊函数, 该函数可用高斯函数和 Lorentzian 分布加以概括, 即式子(10)中所示的 G 类点扩散函数。直接解卷积算法的目标是恢复图像中精细的细节信息, 而这些信息更容易受到常见模糊因素的平滑或影响, 如成像过程中存在的大气湍流长曝光、镜头形变、图像获取和记录过程中光电设备所产生的径向对称模糊等。下面对 G 类点扩散函数进行详细说明。

对于大多数光电成像设备的光学传递函数 OTF (Optical Transfer Function) 来说, 可以采用多种不同的经验模型来确定其数学模型。函数 $h(x, y)$ 的傅立叶变换形式 $F(h)$ 可用下式表示:

$$F(h) = H(\xi, \eta) = \int_{\mathcal{R}} h(x, y) \exp[-2\pi i(\xi x + \eta y)] dx dy \quad (10)$$

当 $h(x, y)$ 表示成像系统 PSF 时, 则为非负的单位矩阵, 所以, 从概率统计的角度来说, 该函数对应于一个概率密度函数。而光学传递函数 $H(\xi, \eta)$ 对应于该密度函数的特征函数。显然, 大多数光电成像设备的 OTF 可以表示为:

$$H(\xi, \eta) = \exp[-\alpha(\xi^2 + \eta^2)^\beta], \alpha > 0, 0 < \beta \leq 1 \quad (11)$$

其中, 常数 α 和 β 跟成像设备和成像环境相关。

4.2 算法实现步骤

由于直接解卷积算法的原理比较复杂, 且受到论文篇幅限制, 此处就不详细阐述, 具体可以参考文献^[14], 下面只给出该算法的具体实现步骤。

根据直接解卷积算法原理, 其具体实现过程可以概括为:

①对观测数据进行傅立叶变换, 并进行中心化, 得到 $G(\epsilon, \eta)$;

②对 $G(\epsilon, \eta)$ 进行采样, 得到 $G(\epsilon, 0)$ 上的采样数据值;

③利用第二步中的采样值, 对式子 $-\alpha|\epsilon|^{2\beta} - A$ 进行最小二乘拟合, 得到参数 α, β 的值, 进而根据假设, 点扩散函数为 G 类点扩散函数, 可以根据(12)式得到整个成像系统的光学传递函数 $H(\epsilon, \eta)$;

④根据得到光学传输函数利用式子 $F^*(\xi, \eta) = \frac{\overline{H}(\xi, \eta)G(\xi, \eta)}{|H(\xi, \eta)|^2 + K^{-2}|1 - H^s(\xi, \eta)|^2}$ 进行计算, 式子中的参数 K 需要根据实际情况进行调节;

⑤对结果 $F^*(\xi, \eta)$ 进行逆傅立叶变换, 得到恢复图像 $f(x, y)$

⑥输出得到的恢复图像结果。

5 改进的直接解卷积算法

从(11)式中可以发现, $H(\epsilon, \eta)$ 作为整个成像系统的光学传递函数, 只是基于观测的模糊图像数据经最小二乘拟合后得到的, 并未包含遥感影像获取过程中大气状态的任何先验信息, 所以, $H(\epsilon, \eta)$ 不能准确的描述整个系统在成像过程中所受到的模糊, 而利用该光学传递函数得到的恢复影像肯定不够准确。因此, 本文利用气象数据估计的大气 MTF, 对该传递函数进行修正, 得到更符合实际成像物理过程的光学传递函数, 这样, 改进的直接解卷积算法的恢复结果更加准确。所以, 直接解卷积的计算公式可以改进为:

$$F(\epsilon, \eta) = \frac{H_{new}^*(\epsilon, \eta)G(\epsilon, \eta)}{|H_{new}(\epsilon, \eta)|^2 + (\xi/M)^2 + k^{-2} |1 - H_{new}(\epsilon, \eta)|^2} \quad (12)$$

$$\text{其中, } |H_{new}(\epsilon, \eta)| = \frac{|H(\epsilon, \eta)| + MTF_{mete}}{2}$$

MTF_{mete} 表示利用成像时刻局部区域气象数据估计的大气 MTF。

根据上面分析的算法改进思路, 改进后直接解卷积算法如流程图所示:

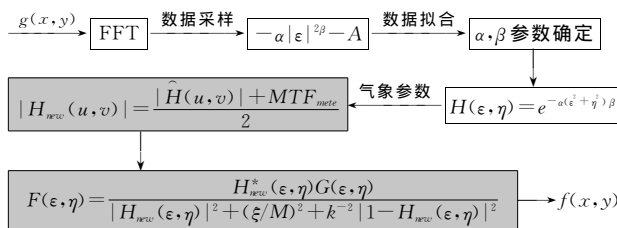


图 1 改进后的直接解卷积算法流程图(暗框中显示的即是其改进模型)

改进后直接解卷积算法的具体实现过程可以概括为如下:

- ①对观测数据进行傅立叶变换, 并进行中心化,

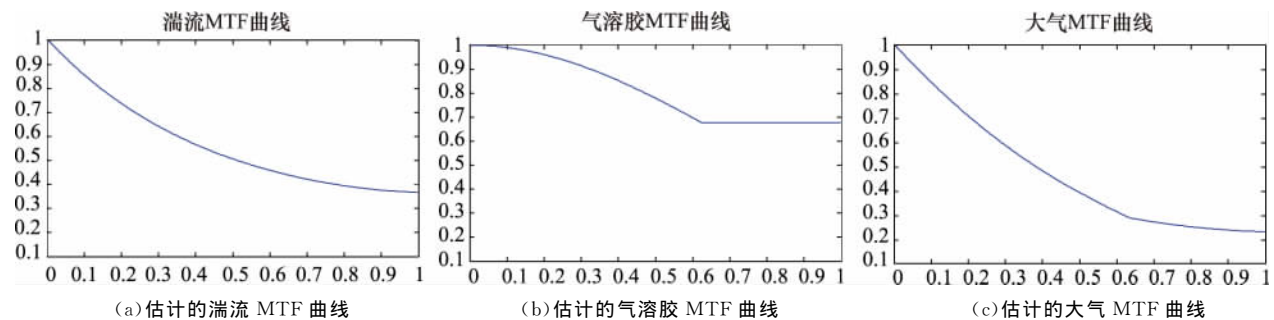


图 2 基于气象数据估计的湍流、气溶胶和大气 MTF 曲线

图 3 中左边一列分别为模糊影像、直接解卷积恢复影像和改进后直接解卷积恢复影像, 右边一列为相应影像 MTF 曲线, 利用 MTF 曲线下所覆盖的

得到 $G(\epsilon, \eta)$, 根据气象数据估计 MTF_{mete} ;

- ②对 $G(\epsilon, \eta)$ 进行采样, 得到 $G(\epsilon, 0)$ 出的采样值;

③利用②中的采样值, 对式子 $-\alpha|\epsilon|^{2\beta} - A$ 进行最小二乘拟合, 得到参数 α, β 的值, 进而根据要求, OTF 为 G 类光学传递函数, 得到估计的系统光学传递函数 $H(\epsilon, \eta)$;

- ④利用式子 $|H_{new}(\epsilon, \eta)| = \frac{|H(\epsilon, \eta)| + MTF_{mete}}{2}$

对光学传输函数 OTF 进行纠正;

⑤根据改进的光学传输函数利用(12)式进行计算;

⑥对结果 $F^*(\xi, \eta)$ 进行逆傅立叶变换, 得到恢复图像 $f(x, y)$;

- ⑦输出得到的影像恢复结果。

6 试验结果与分析

为了验证改进后直接解卷积算法的性能, 论文采用中巴资源卫星遥感影像来进行实验, 其对应区域成像时刻的气象参数如表 1 中所示, 图 2 中影像为算法改进前后的恢复结果。根据(2)、(3)式, 本文对基于气象数据估计 MTF 的算法进行了实验, 得到了利用气象数据估计出的大气 MTF 曲线(如图 2)。

表 1 气象数据参数

日出时间	5:50	日落时间	18:15
日平均温度(°C)	20.1	遥感影像成像时间	11:57
风速(m/s)	1	相对湿度(%)	60
太阳辐射照度(kw/m ²)	0.5	能见距离(m)	10000
波长(m)	5×10^{-7}	区域	成都市区
成像日期	2006年5月19日		

归一化面积可以衡量影像质量的好坏。图 3 中三幅影像所对应的 MTF 曲线的覆盖面积呈逐渐递增的态势, 这就说明这三幅影像的质量也是逐渐地提高。

从表 2 中的各种质量评价参数也可以看出,经过直接解卷积算法和改进直接卷积算法恢复后遥感影像的各项参数指标均有了不同程度的提高,而从人眼视觉的角度也可以看出,经过恢复后影像的清晰度

要比原始影像有较大的改善,这就充分地说明恢复后影像的整体质量确实得到了提高,证明了文中改进算法的有效性。

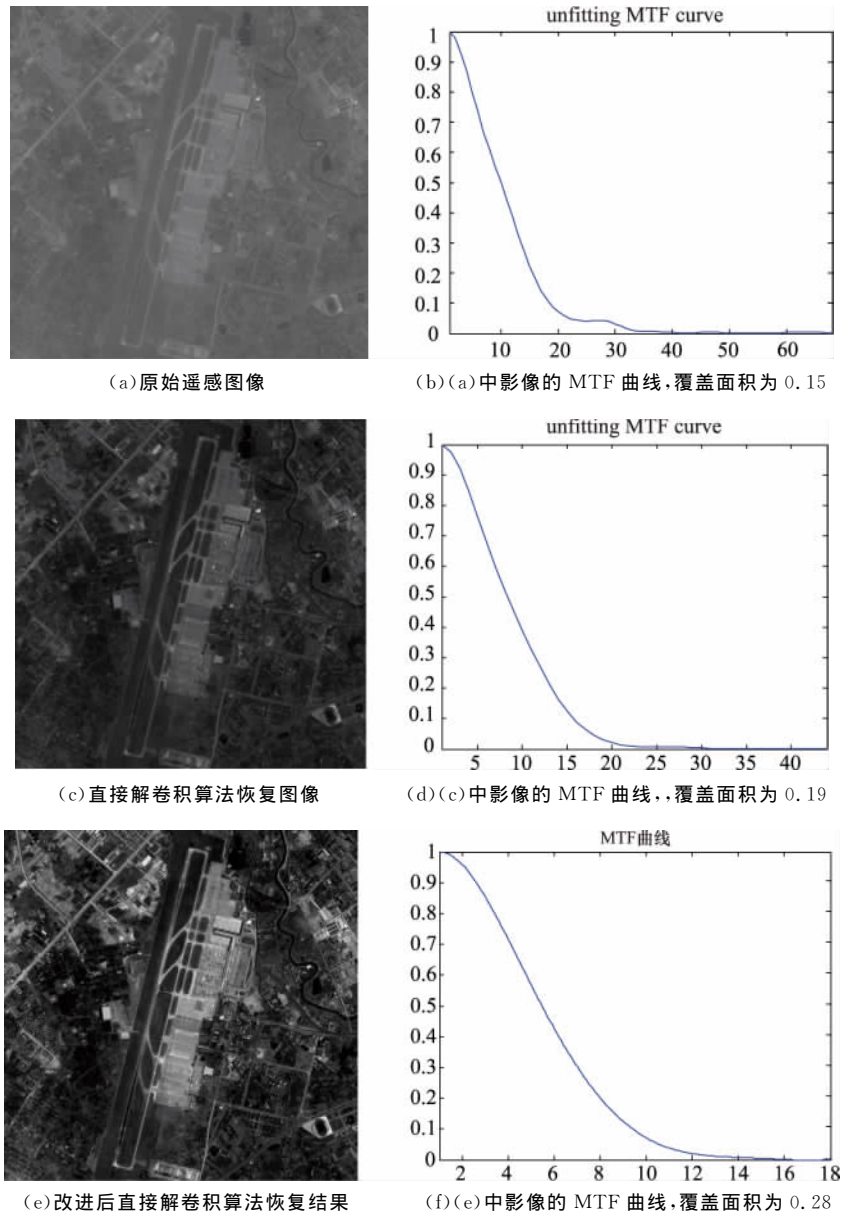


图 3 直接解卷积算法恢复结果对比

表 2 图 3 中不同影像的质量评价参数表

	灰度均值	灰度方差	对比度	角二阶矩	熵	功率谱	清晰度	信噪比	陡度	细节能量	边缘能量	MTF 曲线覆盖面积
模糊遥感影像	35.23	342.14	17.27	0.021	5.43	0.041	4.15	0.35	4.21	2075.45	12.86	0.15
直接解卷积算法恢复图像	38.69	427.58	25.17	0.025	5.98	0.057	5.37	0.44	4.95	2445.19	18.53	0.19
改进后直接解卷积恢复图像	42.30	618.25	36.78	0.034	6.64	0.073	7.49	0.53	5.76	2743.52	25.46	0.28

参考文献

- [1] J. Primot, G. Rousset, J. C. Fontanella. Deconvolution from wavefront sensing: A new technique for compensating turbulence-degraded images[J]. J. Opt. Soc. Am. ,1990, A 7(9):1598-1608.
- [2] D. Sadot, G. Lorman, R. Lapardon, N. S. Kopeika. Restoration of the thermal images distorted by the atmosphere using predicted atmospheric modulation transfer function[J]. Infrared Phys and Technol. ,1995, 36(2):565-576.
- [3] J. W. Goodman. Statistical Optics[M]. New York, 1985.
- [4] D. Sadot, N. S. Kopeika. Forecasting optical turbulence strength on the basis of macroscale meteorology and aerosols: Models and validation[J]. Opt. Eng. ,1992, 31(2):200-212.
- [5] 王振国, 耿则勋, 赵振磊, 隋雪莲, 王兰. 气象数据估计大气 MTF 的遥感影像恢复[J]. 光电工程, 2009, 36(3):110-114.
- [6] D. Sadot, N. S. Kopeika. Practical instrumentation-based theory and verification of aerosol MTF[J]. J. Opt. Soc. Am. , 1993, A 10(1):172-179.
- [7] L. R. Bissonnette. Imaging through fog and rain[J]. Opt. Eng. ,1992, 31(5):1045-1052.
- [8] N. S. Kopeika, D. Sadot. Imaging through the atmosphere: Practical instrumentation-based theory and verification of aerosol MTF; reply to comment[J]. Opt. Soc. Am. ,1995, A 12(5):1017-1025.
- [9] I. Dror, N. S. Kopeika. Experimental comparison of turbulence MTF and aerosol MTF through the open atmosphere[J]. J. Op. Soc. Am. ,1995, A 12(5):970-980.
- [10] I. Dror, N. S. Kopeika. Statistical models for the desert aerosol size distributions and comparison to MODTRAN models [C]//SPIE. 1995(2375):61-71.
- [11] S. Carasso. Direct blind deconvolution[J]. SIAM J. Appl. Math. ,2001(61):1980-2007.
- [12] A. S. Carasso. The APEX method in image sharpening and the use of low exponent Lévy stable laws[J]. SIAM J. Appl. Math, 2002(63):593-618.
- [13] A. S. Carasso, D. S. Bright, A. E. Vladár. APEX method and real-time blind deconvolution of scanning electron microscope imagery[J]. Opt. Eng. , 2002(41):2499-2514.
- [14] Alfred S. Carasso. APEX blind deconvolution of color Hubble space telescope imagery and other astronomical data[J]. Optical Engineering, 2006, 45(10):107004.

全景打造新技术 影像工程化快速解译应用风起云涌

2011年10月18日,由北京全景天地科技有限公司与美国 Trimble 公司联合举办,中国遥感应用协会环境遥感分会和 eCognition 中国技术服务中心协办的“第二届 eCognition(易康)中国用户大会”暨“首届工程化影像快速解译技术交流会”在北京隆重召开,这也标志着国内影像工程化解译应用进入了全新的时代,为我国遥感技术进一步应用开辟了新的技术道路。

会上业内专家介绍,遥感影像是空间地理信息系统数据的重要组成部分,以它为基本数据源,实现计算机并行化对海量遥感数据进行快速的自动/半自动解译一直是行业中的重大技术难关。目前全景天地公司倡导的面向对象的工程化影像智能解译技术在实际项目中的切实应用,大大提高了图像解译能力,增加了结果的客观性,避免人机交互式采集时人工判读的主观性和不同人判读时的一致性,缩短了影像解译周期,提高了工作效率,值得大力推广应用。据了解,北京全景天地科技有限公司作为国内最专业的影像分析公司,自2005年至今秉承“发掘影像最大潜能”的使命,一直默默耕耘,积极推动我国遥感和影像分析技术的发展和运用,已在土地、环境、减灾、农业、林业、国防等领域实现“影像工程化智能快速解译”应用,重点推出了海量图像数据的快速解译流程和技术方案,得到了行业内资深院士和行业专家的充分认可。

本次大会上,美国 Trimble 公司 Christian Weise 先生带来了最新的 eCognition8.7 版本,从介绍中我们看到 eCognition8.7 功能得到全面创新设计,包括 Lidar 点云 3D 分析功能,采用先进的机器学习分类技术,大大增加了规则集开发中的扩展性和灵活性。与会者对此表现出浓厚的兴趣,8.7 新功能成为大会另一个亮点。

在本次用户大会上,美国 Trimble 公司正式授予北京全景天地科技有限公司为“Trimble 公司 GeoSpatial 解决方案及软件产品中国区服务商”。这是截至目前,Trimble 公司在国内唯一授权的 eCognition 全面解决方案及软件产品技术服务商。