

基于传递模型的光学遥感图象数字仿真

刘凯龙 孙向军

(太平路24号二所,北京 100850)

摘要 遥感图象分析往往受时间、设备、经费以及环境等条件的限制。为了解决这些问题,利用系统“黑箱化”研究方法,确定统计意义下的应用条件,建立模拟运算公式和传递模型,探索实现了遥感图象的数字仿真。

关键词 图象模拟,传递函数,模型,数字仿真

1 系统“黑箱化”

遥感图象的形成过程涉及探测、记录和处理技术及大气传递等诸多方面^[1],不但有多种随机因素,而且包含着复杂的模糊因素。如,大气环境的成分、浓度、传递特性随时间和空间位置不同而异^[2],目前还没有能够广泛适用的模型来表征;记录载体的性能、处理工艺的水平、甚至操作人员的素质等环节都存在着难以确定的模糊因素。要将这种复杂大系统中的所有因素全部量化、精确建模,在现有条件下是难以实现的。

实际上,我们关心的是整个系统的信息从输入到输出所发生的变化,而非系统内的所有细节。从应用角度出发,就可以把遥感过程看做一个“黑箱”,只需对系统输入和输出的信息进行研究,而不必受“黑箱”中那些未知细节的羁绊。图1描述了遥感系统“黑箱化”分析的基本关系。

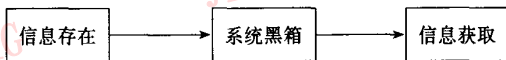


图1 系统“黑箱化”

系统“黑箱化”的研究思路是不考虑“黑箱”内的具体因素和机制,只把“黑箱”当作系统信息输入输出的变换器。对研究目的所涉及的实际系统,用一个具有与其输入输出信息变化特性等效的“黑箱”来代替。这样就可能以经济便捷的新途径研究复杂大系

统的整体规律和特点,解决应用技术问题。

根据信息光学理论,任何光学系统都有特定的信息传递特性。理论上可由一个相应的传递函数表示系统对输入输出光学信息的影响能力^[3]。

系统的输入是需要成像的地面实际场景,它的光学信息为 $S(J, K)$;而通过遥感系统所获得的图象信息就是系统的输出,用 $D(J, K)$ 表示。如果用 $H(f)$ 代表对应于该系统的传递函数,则图1所示的系统“黑箱”既可表达成图2的形式。

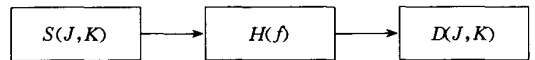


图2 “黑箱”的数学关系

系统传递函数反映系统输出光学信号 $I_o(f)$ 与系统输入光学信号 $I_i(f)$ 随空间频率 f 变化的特征。

$$H(f) = \frac{I_o(f)}{I_i(f)}$$

经过这种关系映射,系统黑箱已经转化为 $H(f)$,模拟问题也就成为寻找与系统“黑箱”作用等效的传递函数 $H(f)$ 了。

2 传递函数模型

2.1 统计意义下的可行性

虽然理论上任何遥感系统都具有特定的传递函数,但要实际获得这些传递函数却并非易事。构成传递介质的大气,随时随地都在变化。要想准确地提供

任何时刻、任何光程中大气的传递函数,还有待更深入的研究工作。在没有通用大气动态模型的情况下,考虑到课题在专业检测方面的应用特点,可以通过时间与地理因素的统计分布,及其所反映的大气随机变化规律,以应用条件的分级来限定相关大气统计参量,再对各种确定的大气参量找出对应的传递函数。这种方法的可行性在于:可利用已有的大气统计分布测量结果,将大气参量对应于检测条件分成若干个不同的等级。每个等级的参量都是确定的,而且所需等级数量是很有限的。在这样的统计意义上,获得相应的传递函数便有了可以实现的途径。

2.2 计算工具的等效性

建立传递函数模型的关键是寻找反映实际传递特性与系统参量之间联系的等效数学关系。光学传递函数 OTF 的完整形式是:

$$H(f) = T(f)\exp[i\theta(f)]$$

$T(f)$ 是 $H(f)$ 的模,代表调制传递函数。 $\theta(f)$ 是 $H(f)$ 的幅角,代表相位传递函数。

在实际应用中,对象均为高性能光学系统,其点扩散函数 PSF 是对称的,因而 OTF 的虚部为零, MTF 就是 OTF 实部的绝对值。因此只需分析调制传递函数 MTF 。

传递函数的计算依赖傅立叶变换和卷积工具。

基于遥感成像系统二维点扩散函数的空间不变性前提,有: $g(x,y) = f(x,y) * h(x,y)$

解决傅立叶变换和卷积的复杂运算可利用计算机的快速运行能力。将系统输入的原始光学信息 $I(x,y)$ 经过 FFT,形成空间频率域函数 $F(u,v)$,而点扩散函数 $h(x,y)$ 经傅立叶变换得传递函数的变换算子 $H(u,v)$,用所需模拟的 $H(u,v)$ 对 $F(u,v)$ 进行积运算,获得传递函数 MTF 对原始光学信息 $I(x,y)$ 的空间滤波,实现传递过程的处理。再经对应于 FFT 的傅立叶反变换 IFFT,恢复 $I(x,y)$ 退化后的原始信息形式 $I'(x,y)$,获得与 MTF 等效的传递过程模拟运算结果。实现上述光学传递等效计算机图象模拟过程的数学关系如图 3 所示。

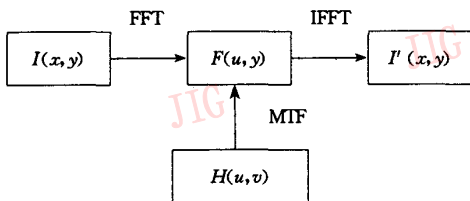


图 3 系统“黑箱”模拟运算

2.3 模拟参量分析

光学变换中,傅立叶函数是连续的;而在计算机数字图象处理中函数是非连续的。数字图象最基本的运算单元是象素。所以,模拟的基本单位也是象素。因此,传递函数 MTF 就可用以象素为单位的变换算子 $H(u,v)$ 来表示,它在空间域上描述图象退化的性质。对点源(象素)输入的情况,可将 MTF 的傅立叶反变换产生的点扩散函数 $h(u,v)$ 视为由系统几何分辨率决定所需模拟的图象变换算子 $H(u,v)$ 的对应性能,表示由 H 引起图象退化的一种测度,用于在空间域上直接处理图象的几何分辨率。相当于点源信号能量分布经系统变换后,产生的扩散效果。因为所选 H 等效于系统 MTF 的作用,且反映了整个图象中不同频率(空间尺度)目标的可识别程度,所以它较之分辨率单值测度模拟要全面得多。

严格地讲,在图象中目标与背景的亮度对比和形状尺寸不同的情况下,其相应的可识别性也是不同的。因为传递函数值是随空间频率等因素变化的。所以在模拟过程中,单值分辨率不能反映系统图象退化的全面情况,必须用传递函数来反映。

经过对多种测试结果的分析,实际光学成像系统和大气介质均非理想成像系统。在有限局部区域内,传递函数呈小于 1 的延展形状,各向异性因素可以忽略。根据本领域的应用特点,进入计算机处理的每幅图象都是有限局部区域,可满足空间均匀性;并可定义二维图象模拟的传递函数各向同性。

为探索模拟系统传递函数,对点源的各种传递特性进行了大量实验,并编制了应用测试软件,将测出的几百万组数据绘制成相应的变换曲线。经光学传递函数的综合^[3],解决变换曲线的反演。通过聚类分析,找出对应的规律。根据参量分布与变换结果的非线性关系,选择了最佳取值方案。可在模拟过程中以最少的参量取值,获得足够的间隔密度和较大的模拟范围。从而大大减少了计算机的模拟运算量。

对典型的传递函数测试结果,条形图案的图象退化如图 4 所示,是一钟型曲线。

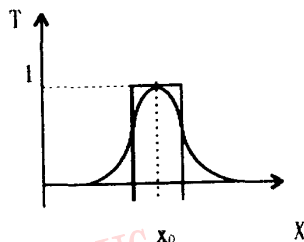


图 4

系统中不同参量的传递特性可得多族不同的钟型曲线。

3 模拟模型的构造

在本领域的遥感应用中,认为一般地面背景满足漫射条件。根据漫射面反射系数、表面亮度与光照能量的关系,需模拟的场景亮度与实际场景亮度的比率为:

$$b = \frac{r'}{r''} = \frac{r'}{Tr}$$

式中: r 表示现地场景亮度

r' 表示原始图象场景亮度

r'' 表示模拟结果图象场景亮度

T 表示传递介质总透率

其中: $r'' = Tr$

对大气散射形成的气幕亮度,则根据成像和模拟大气的条件,计算出气幕亮度差,在图象上附加相应亮度值。随着现代遥感成像记录技术的发展,上述问题已得到相应解决。如卫星照片的最佳处理参量配比已选择为 1.6~2.6,可消除一定气幕亮度影响,获得更佳的图象对比度。因此,在开发的模拟系统应用界面上,将该过程的影响因素建立了一个选择项,可在使用中最佳处理效果模拟。

获得大量传递函数与图象变换算子的关系后,即可从中选择所需模拟的条件,确定相应的算子。

设满足所需模拟情况下图象退化要求的图象变换算子是 H ,经傅立叶变换后可得其点扩展函数 h 。则所需模拟的图象就是原始图象与该点扩散函数的卷积。

$$I(x,y) = \iint I(x-u,y-v)h(u,v)dudv$$

卷积的计算由 FFT 来实现。满足数学积分条件的傅立叶变换式为:

$$F(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-iut}dt$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(u)e^{iut}du$$

计算机模拟时采用离散型的 DFT 完成卷积的快速算法^[4]。

$$f(m) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f(k)e^{-2\pi kmi/n}$$

$$(m = 0,1,2,\dots,n-1)$$

$$f(k) = \sum_{m=0}^{n-1} f(m)e^{-2\pi kmi/n} \quad (k = 0,1,2,\dots,n-1)$$

$\{F(m)\}(m=0,1,2,\dots,n-1)$ 是 $\{f(k)\}$ 的离散傅立叶变换。

其离散傅立叶逆变换为 IDFT。

模拟大气效应的能见度公式为:

$$L_\theta = 18.42 \sec\theta \log \frac{8}{8 - H_\theta \cos\theta}$$

L_θ 是观察角为 θ 时的成像距离。

根据大气垂直分布规律和地面层的条件,有等效压缩厚度:

$$H_\theta = \sec\theta [8 - 8 \times 10^{(-L_\theta \cos\theta/18.42)}] = 8 \sec\theta [1 - 10^{(-L_\theta \cos\theta/18.42)}]$$

由大气光学水平能见度与透射系数的关系可推导出:

$$T = \exp(-3.912R/S_1)$$

其中 R 表示样本图象拍摄距离; S_1 表示气象能见度。代入等效压缩厚度公式可得倾斜条件下的关系式:

$$T_\theta = \exp(-3.912H_\theta/S)$$

式中 S 表示模拟图象的大气能见度; H_θ 表示 L_θ 等效于地面水平能见度时的压缩距离。

在实际应用中,还要考虑样本图象的影响因素。所以在编制计算机模拟运算程序中采用

$$T_\theta = T_{\theta_1} - T_{\theta_2}$$

$$T_{\theta_1} = \exp\left\{-\frac{31.296}{S_1 \cos\theta} [1 - 10^{-(R_0 \cos\theta/18.42)}]\right\} \quad (\theta \leq 85^\circ)$$

$$T_{\theta_2} = \exp\left\{-\frac{31.296}{S \cos\theta} [1 - 10^{-(L_0 \cos\theta/18.42)}]\right\} \quad (\theta \leq 85^\circ)$$

而对 MTF 的选择则由 $\{T_\theta, n, d\}$ 参量组确定。模拟过程通过人机交互界面来实现。只要将一幅最易获得的样本图象及已知条件,连同需模拟的参量条件一并按提示输入计算机,图象处理系统既可自动完成相应遥感图象的模拟。

4 应用分析

在实际检测应用中,对本课题研究的光学遥感图象数字仿真技术进行了实测验证。以实拍航空光学源图象(图 5)为依据,以同地点不同高度、不同季节和气象条件的航空光学图象为参照,经图象处理系统采用上述数字仿真技术,对源图象按参照图象的拍摄条件进行仿真,模拟结果图象(图 6)与实拍参照图象(图 7)对比,其分辨率、能见度等主要因素

逼真,满足实际应用要求。通过多次工程应用,解决了实际工作中的难题,取得了显著的社会和经济效益。并获科技进步奖。

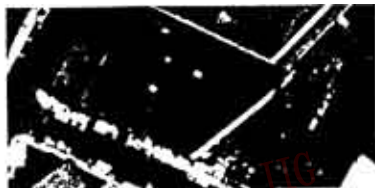


图5 实拍源图象



图6 模拟结果图象



图7 实拍参照图象

5 结论

(1) 对复杂的大系统问题,采用“黑箱化”研究方法,可克服系统内大量未知或未详知因素的限制,解决受研究手段限制的难题。

(2) 传递函数不仅是光学成像系统的一种有效测度,而且是用计算机进行遥感图象模拟的得力工具。

(3) 推导出的能见度计算公式,经应用检验符合实际,有广泛的使用价值。

(4) 在遥感图象应用研究中,计算机模拟是一种经济、有效的技术途径。它不但能解决应用研究中的技术需求,而且可以迅速获得需要巨额经费、长期实验才能在不同条件下拍到的大量图象,为深入开展遥感应用研究提供便利条件。

(5) 本文提出的模拟方法,模拟精度受聚类间隔和曲线参量控制范围等因素影响,对效果要求不十分苛刻的领域适用。

参考文献

- 1 kohl C. Technology transfer in image understanding. SPIE 1406, 1990:18~29.
- 2 killinger D k et al. Atmospheric transfer and system analysis. Optical and Laser Remote Sensing, 1983,4.
- 3 罗曼 A W. 光学信息处理. 虞祖良、金国藩译. 北京:清华大学出版社,1987.
- 4 有本卓. 信号、图象数字处理. 历森梁译,北京:电子工业出版社,1988.

刘凯龙 1982年毕业于南京工程兵工程学院,留校任教。1986年任讲师,1993年任高级工程师。现在北京科研二所从事与图象处理领域相关的研究工作,任北京图象图形学会理事。撰写编审图书3册,发表论文20余篇,主持完成的国防及863课题获多项科技进步奖。享受政府特殊津贴。



Transfer-Model-Based Digital Imagery Emulation for Optic Remote Sensing

Liu Kailong, Sun Xiangjun

(24 Taiping Road, Beijing 100850)

Abstract The analyses of images from remote sensing system are usually limited by the conditions such as time, equipment, fund and environment. In order to solve these problems, we determine the applicable conditions by means of statistics, set up the transfer model and simulated calculation formulas, explore and realize digital emulation for the remote-sensing image, by regarding the system as a “black box”.

Keywords Imagery simulation, MTF model, Digital emulation