

遥感卫星图像处理中的一种新方法 ——二维 RGS 法

塔西浦拉提·特依拜

(新疆大学 乌鲁木齐 830046)

大林成行 小岛尚人

(东京理科大学遥感研究所 东京)

摘要 本文提出了一种对卫星遥感数字图像进行图质改善处理的既简单又节省时间的方法(二维 RGS 法),用此方法进行处理的结果与常用的 MTF 处理结果相比较,有以下几个优点:①操作简单,很容易地处理得到良好的图像图质改善处理效果。②不花费操作时间只调整两个参数很快就能得到理想的图质改善图像,CPU 时间也比 MTF 处理明显减少。③对不同分辨率图像也有良好的改善处理效果。

关键词 图质改善处理,二维 RGS 法,MTF 处理

由于环境条件的变化、仪器自身的精度和飞行姿态等因素的影响导致一系列误差(包括辐射误差和几何误差),使遥感数字图像变为模糊、引起图像图质退化。为了消除或减轻这种退化的影响,尽可能使图像恢复本来面貌,这就需要使用图像的复原技术。

一般对图质退化进行改善处理时是给某一成像系统数字化的原图像附加一定的噪声成分,使图像图质人为地退化,然后对它进行复原处理,最后检验复原图像接近原图像的程度,从附加噪声的条件下估计出信号。原图像和复原图像间的平均二乘估值误差^[1-3]作为定量评价指标。但是,对卫星图像进行复原处理时,因不存在作为评价标准的原图像,故卫星发射后很难计算观测系统的传递函数。因此,目前卫星遥感图像的复原处理问题多侧重于计算调制传递函数 MTF (Modulation Transfer Function) 和点像分布函数 PSF (Point Spread Function) 的研究^[4-6]。

经过图质改善处理的图像,不仅看它是否显得清晰,主要是看它在土地覆盖分类或信息提取等各种图像处理和分析方面的效果。在应用方面考虑要用既简单又节省时间的处理方法进行图像图质改善处理。为此,在本研究中提出了利用一般在数字信号处理领域中常用的一次性联立方程式的重复解析法(Gauss-Seidel Algorithm)作为对卫星遥感图像进行图质改善处理的一种简单的方法^[7,8],即 RGS 法(the image Restoration method with Gauss-Seidel algorithm)。

收稿日期:1993年11月19日;收到修改稿日期:1994年10月24日

1 图像图质改善的定义及研究范围

1.1 图像图质改善的定义

目前,关于图像的增强处理和复原处理的研究较多,提出方法也不少。图像增强处理是使图像改善其视觉形像,或使它变成一种更适于人工或机器分析的图像形式。而图像复原处理是消除或减轻图像的退化现象、尽可能使图像恢复本来面貌的一种方法,它也被认为是图像图质改善处理的一种方法。因此,在本研究中提出的图像图质改善处理被定义为消除或减轻图像各部分的模糊状态(blur)、得到视觉形象清晰的图像。

在卫星遥感图像的复原处理上,计算观测系统的调制传递函数 MTF 是一种主要方法,但在计算调制传递函数 MTF 时 难于对应标准的边缘与地表上的目标物,而且傅里叶变换很容易受到噪声的影响^[4-6],特别是各波段分别计算调制传递函数 MTF,用 Inverse Filter 或 Wiener Filter 对图像进行复原处理,最后制成彩色合成图像时,计算调制传递函数 MTF 需要反复的调整和检查,花费时间相当可观。在本研究中提出的 RGS 法是事前假设相当于点像分布函数 PSF 的传递函数对图像进行图质改善处理的方法,严格地说性质上与一般复原处理不同。

1.2 研究范围

至今退化图像的复原处理方法中大多数都需要用传递函数、噪声成分或者关于数字图像统计方面的知识,处理模型也比较难,而且计算机和操作时间耗费亦相当可观。如使用常用的伪逆复原法,需要有作为理想图像的原图像、噪声高频成分和成像系统的传递函数^[9-11]。对卫星图像来说必需从已经退化的图像上推测出以上的参数,一般确定调制传递函数 MTF 时以图像的噪声成分假设为最小^[12]。为此,本研究将 RGS 法结果与常用的伪逆复原法结果进行比较,以论述本研究中提出的新方法的良好效果。

2 本研究提出的RGS法

2.1 一次性连立方程式重复解法的利用

一般图像退化模型为

$$g(i, j) = \iint h(i, j; x, y) f(x, y) dx dy + n(i, j) \quad (1)$$

式中 $f(x, y)$ 为原图像(理想图像), $g(i, j)$ 为退化图像(观测图像), $h(i, j; x, y)$ 为传递函数, $n(i, j)$ 为附加性噪声成分。 $h(i, j; x, y)$ 是 $i - j$ 平面上点 (x, y) 的脉冲响应函数相当于点像分布函数 PSF。当排除平行移动、点的退化像不依存该点的时候,式(1)可写成如下:

$$g(i, j) = \iint h(i - x, j - y) f(x, y) dx dy + n(i, j) \quad (2)$$

这时在位置上可以说退化现象是不变的。利用这个关系式求 $f(x, y)$ 的方法有两种,一是在频率域中求解,另一是在空间域中求解。本研究使用的一次性联立方程式重复解法属于后者的处理方法。具体地说利用了从雅可比(Jacobi)法推导出的高斯-塞德尔

(Gauss-Seidel) 法, 此法以早在 1932 年 Burger 和 Cittert 提出的伪逆卷积 (Pseudo deconvolution) 为基础的, 因它在演算速度和解的收敛方面比较优越, 故在数字信号处理的领域内广泛应用^[13]。

2.2 一维 RGS 法 (1D-RGS 法)

为了使问题简单, 把退化图像和复原图像的像元排列以一维考虑, 分别作为 $X(i)$, $Y(i)$, 以它们作为要素的矢量分别用 X, Y 表示, 以 h_{ij} 作为要素的传递函数用矩阵 H 表示。对卫星图像来说, 一般可以认为式(2)中的噪声成份 $n(i, j)$ 为最小。因此, 式(2)可写成

$$Y = H \cdot X \quad (3)$$

利用重复解法求解式(3)就是一维 RGS 法, 即第 $k+1$ 的重复解 X 用式(4)和式(5)求得:

$$X_1^{(k+1)} = X_1^{(k)} + \frac{d}{h_{11}} \left(Y_1 - \sum_{j=1}^N h_{1j} \cdot X_j^{(k)} \right) \quad (4)$$

$$X_i^{(k+1)} = X_i^{(k)} + \frac{d}{h_{ii}} \left(Y_i - \sum_{j=1}^{i-1} h_{ij} \cdot X_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^N h_{ij} \cdot X_j^{(k)} \right) \quad (5)$$

式中 X_i 为 i 点的 CCT 值, k 为重复次数, h_{ij} 为传递函数最大值 (用传递函数半幅值求得, 本研究中 $h_{ij} = 1/L^2$)^[7,13], d 为加速系数, N 为一行的数据数。

以上已提到, 计算卫星传感器系统的综合传递函数矩阵 H 是很难的。为此, 在本研究中设计了图 1 所示的简单而常用的三角形传递函数, 其形状为点像分布函数 PST 的形状^[13,14]。如图 1 所示那样矩阵 H 在每行都保持以对角线要素 h_{ij} 为中心的同形状 ($h_{00} = h_{11} = h_{22} = \dots = h_{NN}$), 每行的和等于 1, 在对角线要素附近取值, 其以外取零值。此方法在有关数值分析书籍上已有介绍, 这里就不阐述了^[14,15]。

收敛完毕的判定通过反复演算残留误差二乘和来实现, 即: 利用

$$E^{(k+1)} = \sum_{i=1}^N \left(Y(i) - \sum_{j=-L}^{-1} H(N_0 + j) \cdot X^{(k+1)}(L + i + j) - \sum_{j=0}^L H(N_0 + j) \cdot X^{(k)}(L + i + j) \right)^2 \quad (6)$$

和其变化为

$$\Delta E = (E^{(k)} - E^{(k+1)}) / E^{(k+1)} \quad (7)$$

$$\text{当} \quad E^{(k)} < 0.1 * N \quad (8)$$

$$\text{或} \quad \Delta E < 0.01 \quad (9)$$

条件被满足时演算收敛完毕。

一维 RGS 法是一种只调整两个参数即传递函数的半幅值 L 和加速系数 d 以求得最适合的图像画质改善效果的有效方法。当 L 变大时, 三角形传递函数的形状变缓; 变小时反而变陡。当 d 取过分大值时, 其解趋向于发散; 取过分小值时, 则收敛速度减慢, 通常取 $h_0 \leq d \leq 2h_0$ 之间的值。严格地说在性质上它与一般的复原处理方法不同, 可以说是一种图像画质改善处理方法。

2.3 二维 RGS 法 (2D-RGS 法)

利用一维 RGS 法对图像每个行进行收敛演算。因每行的收敛演算是彼此独立的, 故在卫星移动方向上像元的连续性受到损害。因此在本研究中以一维 RGS 法为基础, 提出了适应于二维数据的演算方法即二维 RGS 法(图 2)。二维 RGS 法由以下 4 个阶段进行:

第一阶段: 对行向(与卫星移动方向相垂直方向)的数据利用一维 RGS 法进行演算求出第 n 次的反复解(式(7)的条件是必须有第 n 次的反复解, 故第一次的反复解不收敛)。

第二阶段: 第 n 次反复处理时如果有行向收敛的数据行, 其行在以后的反复处理中

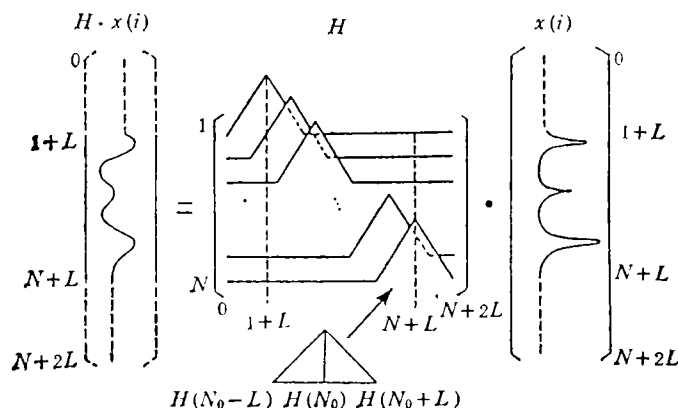


图 1 矩阵说明

Fig.1 Matrix representation

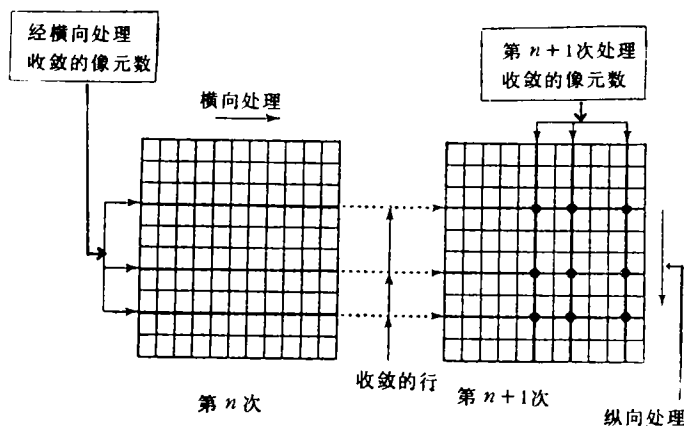


图 2 二维 RGS 法的概念

Fig.2 A concept of the 2D-RGS method

注: 方格表示图像数据的排列 ●是分别以横向及纵向收敛的像元

作为不变的数据行。

第三阶段：对所有的行向数据至第二阶段的处理完毕后，对列向数据也同样利用一维 RGS 法进行演算求出第 n 次的反复解、收敛列的数据在以后的处理中作为不变的数据列。

第四阶段：对所有列向数据处理完毕后，回第一阶段反复进行同样顺序的演算处理，图 2 所示格子点上的数据全部被收敛后，处理才完毕。

3 图像图质改善处理效果的验证

3.1 使用的图像数据及验证项目

本研究使用的卫星图像是 MOS-1·MESSR (Multispectral Electronic Self-Scanning Radiometer, PATH20-ROW69E), 成像日期为 1987 年 12 月 3 日, 实验对象领域为本人曾实地考察的日本国茨城县土浦市为中心, 其西边有筑波学园市、东边有霞浦湖, 1024 * 1024 像元的范围内。为了与一般的图质改善处理效果比较, 设定了以下 3 个验证项目:

第一项: MTF 改善处理(计算调制传递函数 MTF 的方法有 4 种, 本研究利用常用的而且效果最好的 Edge Spectrum Ratio Method)

第二项: 一维 RGS 法

第三项: 二维 RGS 法

3.2 处理图像与剖面图评价

第一项 为了确定输入边缘, 首先在霞浦湖岸选 7—8 个边缘, 确定其中最合适的边缘, 对它的剖面形状进行像元间 9 点的样条函数内插, 根据它计算出了调制传递函数 MTF (图 3), 利用其调制传递函数 MTF 进行改善处理的图像为图版 I 图 5。与图版 I 图 4 所示的原图像进行比较, 用 MTF 改善处理方法, 图像的模糊状态有所改善、线状构造也显得清晰, 但是, 图像的高频部分尖锐化过多、反而出现一些噪声。图 6 是某一行处理前后的灰度剖面图。由第一项(图 6(a))的灰度剖面图可知, 其结果与第二项(图版 I 图 7)一维 RGS 法的结果相似, 有些部分出现一些噪声。

第二项 用一维 RGS 法进行改善处理的图像如图版 I 图 7 所示, 其行向的某一行的灰度剖面图如图 6(b)。此行列达到收敛需反复演算 45 次, 与第一项相比(以箭头所示部分的形状)有所不同。可知, 用一维 RGS 法时在卫星移动方向上像元的连续性受到破坏, 故用一维 RGS 法进行改善处理的图像(图版 I 图 7)会像图像右上部分那样出现一些列状噪声。

第三项 用二维 RGS 法进行改善处理的图像如图版 I 图 8 所示, 可见, 得到的处理图像的模糊现象被改善, 与第一项和第二项处理的图像比较, 图质改善处理效果显著提高, 不仅没有出现在 MTF 改善处理中的模糊现象, 而且也没有出现在一维 RGS 法处理中的列状噪声。由图 6(c) 所示的灰度剖面图也可知, 与上述两种方法的结果相比较, 灰度峰状结构也有相应的增强。这种微妙的增强效果在卫星图像图质改善处理中是很有意义的。

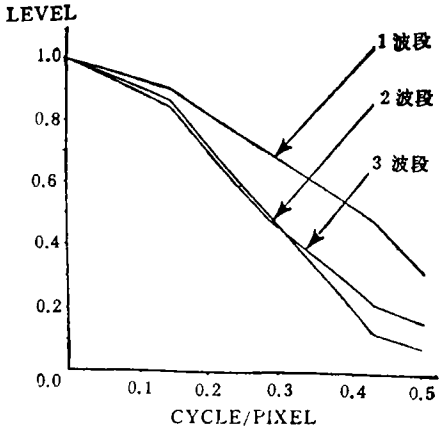


图 3 MESSR 图像的 MTF 曲线 (1, 2, 3 波段)
Fig.3 MTF curves of MESSR image
(band 1, 2 and 3)

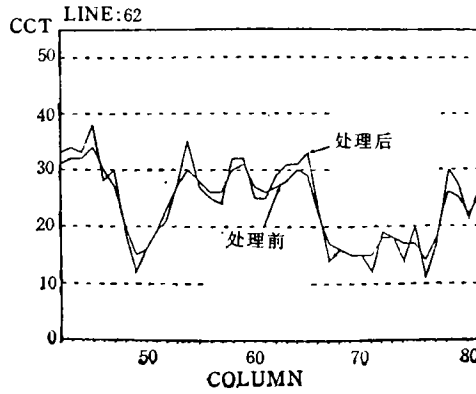


图 6(a) MTF 处理
Fig.6 (a) Correction with MTF

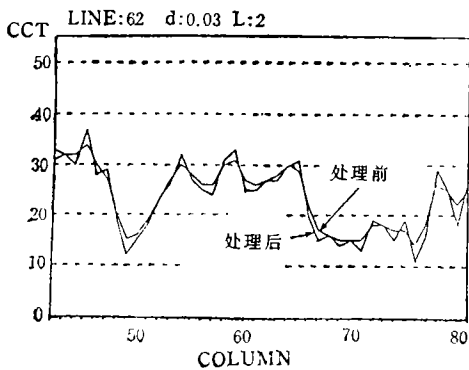


图 6(b) 一维 RGS 法处理
Fig.6 (b) Correction with 1D-RGS method

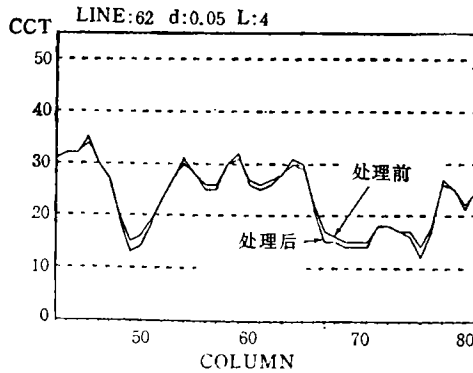


图 6(c) 二维 RGS 法处理
Fig.6 (c) Correction with 2D-RGS method

图 6 灰度剖面图的比较 (CCT 值)

Fig.6 Comparison of profile graph (CCT count values)

3.3 传递函数半值幅 L 和加速系数 d 的调整

设定 $d = 0.04, L = 2$, 由式(8)可知, 如果 d 和 L 的值设得太大, 则其解趋向于发散, 所以用此法对卫星图像进行图质改善处理时必须首先确定 d 和 L 值在何范围内为适合。为此本研究对 d 和 L 的取值范围进行了调查, 在 L 值固定、 d 值设置为图像的退化状态 ($d = 0.03$) → 清晰状态 ($d = 0.04$), 而高频噪声出现状态 (d 为 $0.05-0.08$) 等几个阶段对处理图像进行了模拟, 可以说这种模拟就象摄影时调整焦距的操作一样。经过反复试验证明, 用二维 RGS 法对卫星图像进行改善处理时 d 和 L 值分别确定为 0.04 (或 0.05) 和 2 (或 3) 能得到良好的改善效果。卫星图像由于观测时间的不同, 得到图像的图质也各种各样, 因此, 很难确定出理想的 d 和 L 值, 但是可以说只调整两个参数很快就得到较清晰的图像是二维 RGS 法的优越性之一。

表 1 图像画质改善率
Table 1 Rate of image quality correction (单位: 像元)

		MTF 处 理	1D-RGS 法	2D-RGS 法
纵 向	处理前	1.642		
	处理后	1.239	1.351	1.254
	改善率	24.5%	17.7%	23.6%
横 向	处理前	1.898		
	处理后	1.501	1.672	1.424
	改善率	20.9%	11.9%	25.0%
平均改善率		22.7%	14.8%	24.3%

3.4 图像画质的定量分析

以上已经对处理图像进行了质量分析。为了使评价更为客观,对处理图像进行了定量分析。使用的方法是常用于评价图像画质改善处理效果的指标——画质改善率 R 。表达式为

$$R = (|a - b|/b) * 100\% \quad (10)$$

式中 a 为处理后点像分布函数 PSF 的半幅值(单位: 像元), b 为处理前点像分布函数 PSF 的半幅值(单位: 像元)。

求 PSF 的公式为

$$h(x) = \frac{1}{A} \cdot \frac{df(x)}{dx} \quad (11)$$

式中 $h(x)$ 为 PSF, A 为边缘灰度的梯度变量。

利用式(10)对以上所述的 3 种方法进行定量分析结果如表 1 所示(图像的横向和纵向分别计算出了画质改善率 R),由表 1 两方向平均值可知,利用二维 RGS 法画质改善率 R 可达到 24.3%,比 MTF 处理高 1.6%。

4 作业效率的比较

4.1 CPU (Computer Processing Unit) 时间

计算调制传递函数 MTF 使用了较常用的 FFT(Fast Fourier Transformation),对 $1024 * 1024$ 像元的图像进行处理时(使用 IBM3090 大型计算机)MTF 改善处理需要 102 秒,而二维 RGS 法处理需要 78 秒,比前者少花 24 秒时间。

4.2 操作时间

计算调制传递函数 MTF 时包括图像上选定边缘、样条函数变换、FFT 等预处理,处理一个波段图像花费 20 分钟左右的时间(当然与各人差别和熟练度有关),当对 3 个波段

进行 MTF 处理制成彩色合成图像时需要花费一小时左右的时间。但用二维 RGS 法进行处理时不需要操作时间,只调整加速系数和传递函数半值幅就可得理想的改善处理图像,特别是图版 I 所示那样对各波段进行改善处理,然后制成彩色合成图像,二维 RGS 法的实用性更高。

5 结论

总结本研究的成果,可以得出以下结论:

1. 因利用二维 RGS 法反复进行处理很容易地得到理想而清晰的增强图像,故谁都可以很容易地进行处理、得到良好的图像画质改善处理效果。

2. 在本文中、只对 MOS-1·MESSR 图像的画质改善处理效果进行了验证,除此之外笔者还对 MSS、TM、HRV 等卫星图像也进行了同样的验证,证明二维 RGS 法对不同分辨率图像也有良好的效果。

3. 对 1024×1024 像元的图像进行处理时比 MTF 处理少花费 CPU 时间约 30 秒左右。

目前卫星图像在编制土地覆盖分类图、环境整治与资源合理利用、土地规划、区域规划及环境影响综合性评价等领域应用日渐增多。为了使已有的卫星图像利用率提高,应对它进行必要的增强处理措施。笔者希望在本研究中提出的新方法在卫星图像增强处理方面得到应用。

参 考 文 献

- [1] 斎藤勝,劣化画像に対する平滑化処理方式の比較,検討,信学技法, IE82-83,1981.
- [2] 高橋健一,斎藤勝,太田正光,劣化画像に対する回復処理方式の比較,検討,電子通信学会論文誌(D), J65-D, 12, 1520—1527, 1982.
- [3] 谷萩隆嗣,野口孝樹,2次元デジタルフィルタによるぼけ画像の復元,電子通信学会論文誌(D), J64-D, 2,156—163, 1981.
- [4] 中正夫,奥石肇,MESSRの空間分解能の推定,日本リモートセンシング学会誌, Vol.9, No. 1, 31—41, 1989.
- [5] 福江潔也,下田陽久,坂田俊文, MOS-1·MESSRのMTF推定と評価,平成元年度日本写真測量学会年次学術講演会論文集, 11—16,1988.
- [6] 安田嘉純,江森康文,衛星画像のMTF測定,写真測量とリモートセンシング, 28(5),12—20,1989.
- [7] 銭谷福男,南茂夫,ミニコンピュータによる分光データの分解能向上処理,応用物理,第43巻,第2号, 138—147,1974.
- [8] 谷萩隆嗣,連立1次方程式の新しい反復解法アルゴリズム,電子通信学会論文誌(D), J66-D,12,1392—1399, 1983.
- [9] Steven. A.R. Zucker, W. Rosenfeld, A. Iterative, enhancement of noisy images, IEEE, Trans. Syst. Man and Cybern, SMC-7, 6, 435—442, 1977.
- [10] Nagao.M, Matuyama. T. Edge preserving smoothing, Comput. Graphics and Image Process., 9, 394—407, 1979.
- [11] 瀬戸洋一,画質改善機能付き画像補間フィルタの提案,電子通信学会論文誌(D), J72—D11, 5, 696—706, 1989.
- [12] 南茂夫編著,化学計測における波形データ処理,計測システムにおけるマイコン/パソコン活用技術, CQ出版,1989.
- [13] 田幸敏治,辻内順平,南茂夫,光学的測定ハンドブック,朝倉書店,1981.
- [14] T.Tiyip, 小島尚人,大林成行,衛星マルチスペクトル画像分類における有効な空間情報について,日本リモートセンシング学会誌, 11(3)21—33,1991.
- [15] 日本リモートセンシング研究会編,リモートセンシング用語辞典,共立出版(株), 1989.

附录

1 雅可比法

雅可比法是解反复运算解式 $Y = HX$ 的基本方法之一。在此方法中,只考虑由传递函数矩阵 H 的对角线要素所组成的矩阵 D (对角线要素以外取零值)、且用其逆矩阵 D^{-1} 、求出第 $k+1$ 回的反复解 $X^{(k+1)}$ 如式:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + D^{-1}(y - Hx^{(k)}) \quad (1)$$

经过反复运算 $X^{(k+1)}$ 收敛于实值 X 。

D^{-1} 在其对角线要素上取 $1/h_{ii}$ 、其它要素均成为零的矩阵,故由式(1)可得:

$$\left. \begin{aligned} x_1^{(k+1)} &= x_1^{(k)} + \frac{1}{h_{11}}(y_1 - h_{11}x_1^{(k)} - h_{12}x_2^{(k)} - \dots - h_{1N}x_N^{(k)}) \\ x_2^{(k+1)} &= x_2^{(k)} + \frac{1}{h_{22}}(y_2 - h_{21}x_1^{(k)} - h_{22}x_2^{(k)} - \dots - h_{2N}x_N^{(k)}) \\ &\vdots \\ x_N^{(k+1)} &= x_N^{(k)} + \frac{1}{h_{NN}}(y_N - h_{N1}x_1^{(k)} - h_{N2}x_2^{(k)} - \dots - h_{NN}x_N^{(k)}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

一般矩阵 H 在各行具有同一的分布、其对角线要素均相等,这样式(1)变成更简单化了:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \frac{1}{h_0}(y - Hx^{(k)}) \quad (3)$$

其关系模式表现为如图1所示。

为了加快雅可比法的速度、一般用实数 d (常称加速系数),这样式(1)或式(3)可写成:

$$\begin{aligned} x^{(k+1)} &= x^{(k)} + dD^{-1}(y - Hx^{(k)}) \\ &= x^{(k)} + d/h_0(y - Hx^{(k)}) \end{aligned} \quad (4)$$

当 $d = 1$ 时,式(4)与(1)完全一致;当 $d = h_0$ 时,式(4)变成:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + (y - Hx^{(k)}) \quad (5)$$

这是于1932年 Burger 和 Cittert 初次提出的疑似逆卷积法。当 d 取过份大值时、其解趋向于发散;变小时、收敛速度减慢,通常取 $h \leq d \leq 2h$ 之间的值。

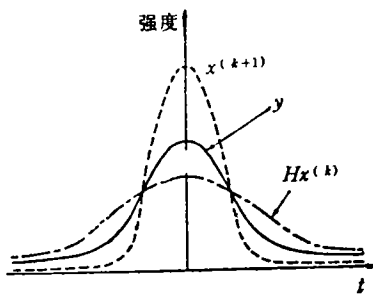


图1 雅可比法逆卷积的概念

Fig.1 Deconvolution of Jacobi method

2 高斯-塞德尔法

在用雅可比法计算 $X^{(k+1)}$ 时,为了加快收敛速度利用第1至第 $i-1$ 回的修正值 $X_l^{(k+1)}$ ($l = 1, 2, \dots, i-1$) 的方法称高斯-塞德尔法。实际上,该法的收敛速度比雅可比法快得多,而且应用广泛。

加速系数 d 与雅可比法同样取值, 这时, 式(2)可写成:

$$\left. \begin{aligned} x_1^{(k+1)} &= x_1^{(k)} + \frac{d}{h_{11}} \left(y_1 - \sum_{j=1}^N h_{1j} x_j^{(k)} \right) \\ x_i^{(k+1)} &= x_i^{(k)} + \frac{d}{h_{ii}} \left(y_i - \sum_{j=1}^{i-1} h_{ij} x_j^{(k+1)} - \sum_{j=i}^N h_{ij} x_j^{(k)} \right) \quad i = 2, 3, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

A New Method of Correction for Satellite Remotely Sensed Data——2D-RGS Method

Tashpolat Tiyp
(Xinjiang University)

Shigeyuki Obayashi Hirohito Kojima
(Remote Sensing Lab., Science University of Tokyo, Japan)

Abstract With the object of the simplicity of the algorithm, we proposed 2D-RGS (Two Dimensional Image Restoration Method with Gauss-Seidel Algorithm) method of image quality correction for satellite remotely sensed data. In comparison with the restoration method using MTF, the results of this study are as follows:

1) It was found that the 2D-RGS method is one of the most superior method in image quality correction, because everyone can easily carry out the correction and get the same results.

2) The 2D-RGS method can be easily carried out by adjusting only two parameters called the instrumental function and the dumping factor. CPU time is shorter also than correction with MTF.

3) Getting efficiently results of applying it to different resolution of satellite remotely sensed data.

Key words image quality correction, 2D-RGS method, Correction with MTF