一种基于量子力学的遥感图像滤波方法研究

张 智[1,2],林栩凌[1],何红艳[1]

(1. 北京空间机电研究所,北京 100094; 2. 南京理工大学 计算机科学与技术学院,江苏 南京 210094)

摘 要:提出了一种基于量子空间的光学遥感图像滤波方法。根据量子力学特性,对量子遥感成像建模。首先进行平移不变小波变换后将图像信息分层,将图像信息转换为量子叠加态信息,然后将图像信息转换成不同量子面,在每个量子面下依据量子计算理论进行信息的范数优化约束。之后将所有优化后的各个面上的量子信息转换为图像信息,最后进行信息重构。实验证明这种方法能够有效提高图像的质量,图像评价指标均有所提高。与传统滤波方法相比,该方法能够更加有效地对遥感图像进行滤波。

关键词:量子滤波; 图像处理; 遥感; 量子比特

中图分类号:TP751 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.S226001

Filtering method for remote sensing image based on quantum mechanics

Zhang Zhi[1,2], Lin Xuling[1], He Hongyan[1]

(1. Beijing Institute of Space Mechanic & Electricity, Beijing 100094, China;
2. School of Computer Science and Technology, Nanjing Universityof Science&Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In this paper, the method for optical remote sensing image in the quantum space was present. The model of quantization remote sensing image was formulated, based on the theory of quantum mechanics. The image was firstly transformed into different scale information by shift invariant wavelet. Secondly, the image was transformed to the quantum superposition state form. The further step leaded to the information being decomposed into different quantum bit (Qubit) planes. And the information was optimized by norm on every Qubit plane, following the quantum computational theorem. Finally, the remote sensing image was reassembled in the procedure of reconstruction. The experimental result shows that evaluation index of the restored image is improved, which means that processed image has better quality than conventional filtering methods.

Key words: quantum filtering; image processing; remote sensing; Qubit

收稿日期:2016-08-05; **修订日期**:2016-09-03

基金项目:民用航天项目(2013669)

作者简介:张智(1978-),男,高级工程师,博士,主要从事模式识别与智能图像处理、新型光学遥感器设计及在轨数据处理与研发等方面的研究。Email: dazhicast@163.com

0 引 言

卫星在轨工作时会有很多因素造成光学相机成像质量下降,例如环境热梯度变化、部件在轨老化、元器件固有瑕疵等原因[1-2]。这些因素导致焦面探测器上产生很多噪声,诸如散粒噪声、随机噪声等。采用传统空域滤波方法可以在一定程度抑制噪声,但是在抑制噪声的同时丢失了遥感地物的细节信息。

若能考虑将信息转化到量子空间后再对量子信息进行滤波,会更加精细的抑制噪声。因此,由 Edlar 和 Oppenheim 提出了量子信号处理方法[3]。随后,Tseng 将量子理论应用到图像处理领域[4]。国内方面比较突出的是谢可夫[5]和付晓薇[6]分别提出将量子理论应用到图像滤波领域。目前,将量子理论应用到图像处理领域已是图像处理领域发展的一个新趋势,因为量子力学特性包含很多有用的特性,如参考文献[7-10]所述。但是很多新技术正处于起步阶段,需进一步深入研究。

一般来讲,传统图像滤波方法对航天工程中的复杂噪声抑制效果较差。针对这一问题,文中将量子力学、信号小波分解和范数优化理论结合成一种新型的量子衍生图像处理方法,首先采用平移不变小波将图像信息分尺度表示,在每一尺度上根据量子计算理论,将图像信息转换到量子叠加态信息,像素被量子比特单元取代,将图像信息分层投影到量子面上。然后将量子比特信息进行范数优化估计,最后将信息重建后得到更“干净”的图像,能够更好的消除传统图像滤波方法难去掉的噪声,同时完整的保留图像中的有用特征。

1 量子信息处理原理与框架

1.1 量子力学原理

(1) 波函数假设:任何系统的状态均可用波函数$|\Psi>$来完全描述,并把$|\Psi>$称为量子体系的状态波函数(又称为量子态)。

(2) 量子比特:“比特”是经典信息中最基本的概念,可称之为量子比特(Qubit)。量子比特常写成$|0>$和$|1>$的形式。量子比特不仅仅是$|0>$和$|1>$两种状态,还可以是这两种状态的任意线性组合,所以量子态又称为“叠加态”,表示为:

$$|\Psi> =\alpha|0>+\beta|1>$$

量子比特态$|0>$和$|1>$分别表示为图像量子比特中的两个基态。如果 α 和 β 代表量子基态下的概率幅,且满足 $\alpha^2+\beta^2=1$。

1.2 量子信息处理框架

量子信息处理框架主要是借助量子力学理论解决信息处理领域的问题,包括将输入信号转换为量子叠加态形式、量子测量和将测量塌缩态转化为输出信息。同理对于灰度图像处理,将输入灰度图像转化为线性叠加态子系统,输出则是将测量塌缩态转化为输出灰度或二值化图像。

2 处理算法

如图 1 所示,量子滤波器的流程图。算法的输入数据是光学遥感灰度图,其所含丰富的地物信息。

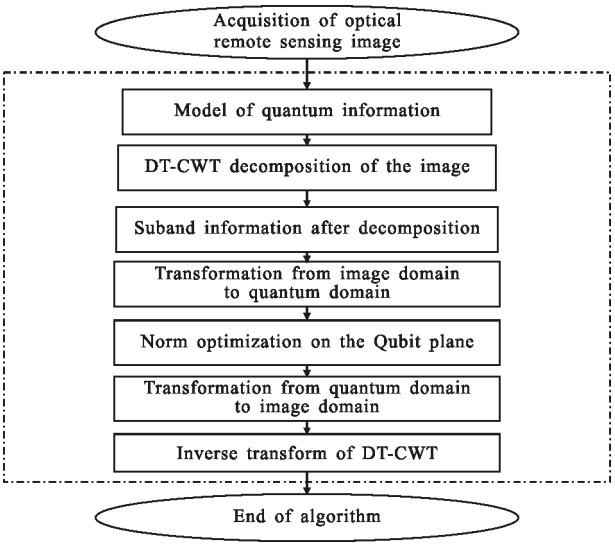


图 1 量子滤波方法流程图

Fig.1 Block diagram of quantum filtering method

算法流程中具体可展开为如下:

第一,对光学遥感成像系统进行数学建模,在轨成像系统标识为线性系统,那么模型可表示如下:

$$f(m,n)=I(m,n)\otimes H+n \tag{1}$$

第二,退化图像进行平移不变小波分解。

$$\vec{f}=\phi_j A_j+\sum_{d\in A}\sum_{j\geqslant J}\psi_j^d B_j^d \tag{2}$$

式中:$\vec{f}$代表图像在平移不变小波域的变换;ϕ_j 为尺度函数,$\phi_j=\phi_{jx}\otimes\phi_{jy}$ 为二维 DT-CWT 的尺度函数矩

阵，ϕ_{jx} 为 x 方向的尺度函数，ϕ_{jy} 为 y 方向的尺度函数。A_j 为尺度系数；ψ_j^d 为小波函数；B_j^d 小波系数，d 为分解的 6 个方向，j 为分解的层数，这里 j 取 4。$H=\sum_{d\in A}\sum_{j\geqslant J}\psi_j^d B_j^d$，则可以分别表示复数小波在 6 个方向上的高频信息。这里，各方向上的二维 DT-CWT 小波函数为：

$$\Psi_j^{+15°}=\Phi_{jx}\otimes\Psi_{jy}、\Psi_j^{+45°}=\Psi_{jx}\otimes\Psi_{jy}、\Psi_j^{+75°}=\Psi_{jx}\otimes\Phi_{jy}$$
$$\Psi_j^{-15°}=\Phi_{jx}\otimes\overline{\Psi}_{jy}、\Psi_j^{-45°}=\Psi_{jx}\otimes\overline{\Psi}_{jy}、\Psi_j^{-75°}=\Psi_{jx}\otimes\overline{\Phi}_{jy} \quad (3)$$

因此，有如下展开式：

$$\psi_j^d=\{\Psi_j^{+15°},\Psi_j^{+45°},\Psi_j^{+75°},\Psi_j^{-15°},\Psi_j^{-45°},\Psi_j^{-75°}\}=\{\Phi_{jx}\otimes\Psi_{jy},\Psi_{jx}\otimes\Psi_{jy},\Psi_{jx}\otimes\Phi_{jy},\Phi_{jx}\otimes\overline{\Psi}_{jy},\Psi_{jx}\otimes\overline{\Psi}_{jy},\Psi_{jx}\otimes\overline{\Phi}_{jy}\} \quad (4)$$

第三，在量子空间下，高频信息 H 可表达为：

$$|H(m,n)\rangle=\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle=\sqrt{1-f(m,n)}\,|0\rangle+\sqrt{f(m,n)}\,|1\rangle \quad (5)$$

这里，$|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 分别表示量子态[11]，α 和 β 表示基态下 $\alpha^2+\beta^2=1$ 的事件发生概率，定义如下：

$$|H(m,n)\rangle=\sqrt{1-H(m,n)}\,|0\rangle+\sqrt{H(m,n)}\,|1\rangle=e^{i\xi}\left(\cos\frac{\theta}{2}|0\rangle+e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle\right)=\cos\frac{\theta}{2}|0\rangle+e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle \quad (6)$$

这里，因子 $e^{i\xi}$ 对最终处理效果并没有大的影响，因此可以忽略。θ 代表向量与 Z 轴夹角，ϕ 代表向量在 xy 面投影与 X 轴夹角。

第四，图像信息与量子态信息之间的转换关系如下：

$$H(m,n)=\sum_{m=1\cdots n}p_m(\mu,v)|\psi_m(\mu,v)\rangle\langle\psi_m(\mu,v)| \quad (7)$$

式中：m 代表量化位数，p_m 代代表事件的发生概率，其作用在第 m 比特面内，$|\psi_m(\mu,v)\rangle$ 表示第 m 面的量子向量。

第五，量子比特面滤波。首先采用量子面内采用范数优化方法进行滤波，其优化模型可表示为：

$$\operatorname{argmin}\sum_{m=1}^{n}\|\psi_m(\mu,v)\rangle-|\psi_m(\mu_0,v_0)\rangle\|_2^2+\lambda_m D_m \quad (8)$$

式中：λ_m 为第 m 量子面内的调整因子，从 0~1 分布；$\operatorname{argmin}\sum_{m=1}^{n}\|\cdot\|_2^2$ 代表 2 范数的最小化约束。通过优化计算可得新的 $|\psi_m'(\mu,v)\rangle$。D_m 为梯度值，且公式如下：

$$D_m=\sqrt{(|F_m(\mu+1,v)\rangle-|F_m(\mu,v)\rangle)^2+(|F_m(\mu,v+1)\rangle-|F_m(\mu,v)\rangle)^2} \quad (9)$$

量子滤波器在各个比特面内被采用来做范数优化设计，而量子计算遵循如下定理。

若 $|\psi_1\rangle=\begin{pmatrix}c_1\\d_1\end{pmatrix}$ 且 $|\psi_2\rangle=\begin{pmatrix}c_2\\d_2\end{pmatrix}$，则有 $|\psi_1\rangle+|\psi_2\rangle=\begin{pmatrix}c_1\\d_1\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}c_2\\d_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}c_1+c_2\\d_1+d_2\end{pmatrix}$、$|\psi_1\rangle-|\psi_2\rangle=\begin{pmatrix}c_1\\d_1\end{pmatrix}-\begin{pmatrix}c_2\\d_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}c_1-c_2\\d_1-d_2\end{pmatrix}$、$|\psi_1\rangle\times|\psi_2\rangle=\begin{pmatrix}c_1\\d_1\end{pmatrix}\times\begin{pmatrix}c_2\\d_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}c_1c_2\\d_2c_2\\c_1d_2\\d_1d_2\end{pmatrix}$ 和 $|\psi_1\rangle/|\psi_2\rangle=\begin{pmatrix}c_1\\d_1\end{pmatrix}/\begin{pmatrix}c_2\\d_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}c_1/c_2\\d_2/c_2\\c_1/d_2\\d_1/d_2\end{pmatrix}$ 的计算法则。

第六，整个去噪后量子态转换为图像高频信息，可表示为：

$$H'(m,n)=\sum_{m=1}^{n}p_m|\psi_m'(\mu,v)\rangle\langle\psi_m'(\mu,v)| \quad (10)$$

而滤波后的高频信息又可表示为 $H'=\sum_{d\in A}\sum_{j\geqslant J}\psi_j'^d B_j'^d$。

最后，进行平移不变小波逆变换，利用处理后的高频信息与低频信息重构出图像信息。

$$\vec{f}'=\phi_j A_j+\sum_{d\in A}\sum_{j\geqslant J}\psi_j'^d B_j'^d \quad (11)$$

3 实验与结果分析

实验中计算机配置为 Intel Core2/2.33 GHz/1.98 GB，采用 Matlab 进行仿真分析。选取图 2 光学遥感图像为例，图像具备纹理丰富、景物边界明显的特征，图像中噪声类型为随机分布噪声和散粒噪声组成的混合噪声(噪声方差分别为 0.02 和 0.05)。

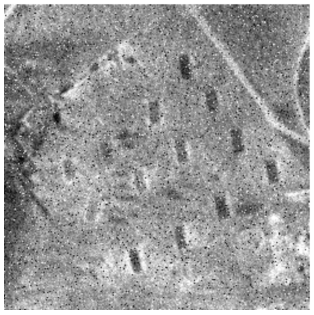


图 2 退化的图像

Fig.2 Degraded image

图 3 是经平移不变小波分解后的图像在各个方向的信息分布。由图 3 可见,虽然通过小波分解能够分解出不同稀疏程度的各个方向的信息，但是由于噪声的影响地物特征没有明显体现出来。

如图 4 所示，各个子图为图 3 在某一方向上(以−75°为例) 分解后经过 8 个量子比特面后的分解结果，所有该方向的地物纹理信息都以塌缩的方式分解到 0 和 1。可见经过量子比特面分解后的图像比传统图像可以分解的更加精细，能够有效的将噪声与信号分开。

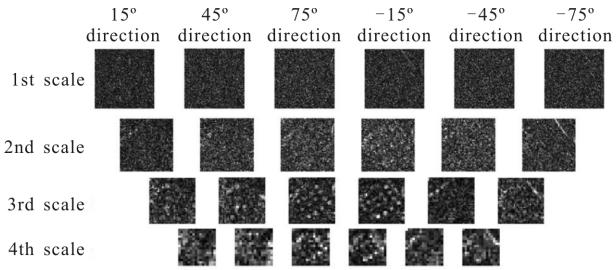


图 3 平移不变小波分解图

Fig.3 Decomposition of shift invariant wavelet

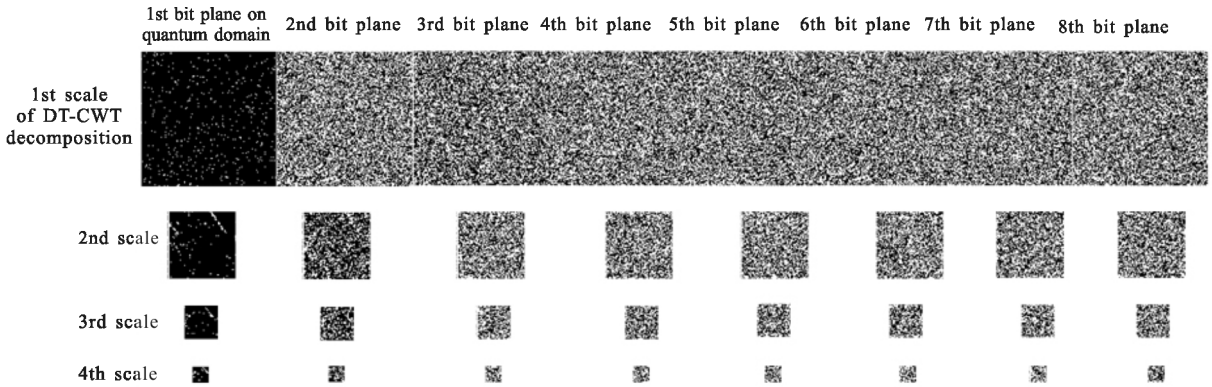


图 4 在一个方向(以−75°为例)小波分解后在 Qubit 各个面上的投影

Fig.4 Projections on the Qubits for −75°direction decomposition of shift invariant wavelet

图 5 中的子图为图 3 中分解结果经过量子滤波后每层的结果，与图 3 相比能够明显看出各个方向的地物纹理信息分布。由图 6 可见,文中所提的量子滤波方法比传统滤波(中值滤波)和量子均值滤波去除噪声效果更加明显，同时保持地物的边缘和纹理信息。

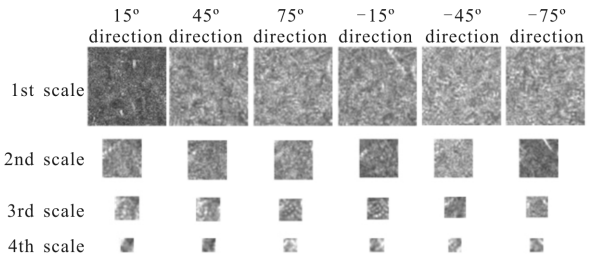
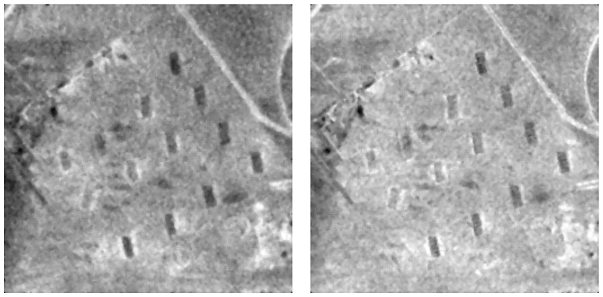


图 5 对小波分解信息进行量子空间滤波后结果

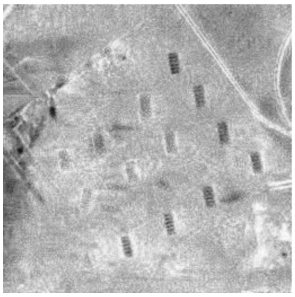
Fig.5 Quantum filtering after decomposition of shift invariant wavelet

实验结果分析:由图 6 可见,采用均值滤波在对噪声抑制的同时也损害图像中的有用信息，影响到景物的边缘纹理信息；而文中所提方法由于对量子化信息进行范数优化处理因而比量子均值滤波效果还要好,可以更充分抑制噪声。从表 1 可见,采用量子处理的方法后可提高图像的信噪比、对比度、信息熵。与传统方法相比,能够最大程度的保留图像中景物边缘和纹理信息。表 1 中所提方法的计算时间相比前两种方法略长，在工程上考虑采用并行算法会缩短时间,以便增强算法的工程应用。



(a) 传统均值滤波方法 (b)量子均值滤波结果

(a) Conventional median filtering result (b)Quantum filtering result



(c) 文中所提滤波方法

(c) Quantum TV filtering result

图 6 量子滤波与传统滤波方法结果比较

Fig.6 Comparison between result of quantum filtering and conventional median filtering

表 1 评价指标

Tab.1 Evaluation index of image quality

Filtering method	Index					
	Mean value	Vari-ance	SNR	Contrast ratio	Entropy	Calcula-tion time/s
Conventional median filtering	148.81	31.36	4.74	22.65	6.98	7.08
Quantum median filtering	176.17	28.14	6.26	19.58	7.32	5.07
The proposed filtering	176.07	25.40	6.92	22.74	7.41	9.34

4 结 论

文中构建了量子图像处理的数学模型，将图像信息分层转换为量子叠加态信息，然后在量子空间上进行滤波处理，即文中所提方法将图像信息分解到不同的量子面，在各量子面上进行变差与范数优化约束,去除噪声且改善图像像质。实验结果显示所提方法比传统方法更能够有效提高像质评价指标。未来我们将继续将这种方法扩展到盲复原领域,同时为了加强在轨实时处理能力，将其扩展到在轨实时的大规模图像处理流程中,也是未来发展的方向。

参考文献：

[1] Liu Zhaojun, Zhang Zhi, Zhou Feng, et al. A Geometrical mapping method optical imaging for space push-broom system[J]. ***Spacecraft Recovery & Remote Sensing***, 2012, 33 (1): 39-45. (in Chinese)
刘兆军, 张智, 周峰, 等. 一种空间推扫型光学成像系统几何映射方法[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(1): 39-45.

[2] Richard W Tarde, Eric Donley, James L Carr. Modeling and optimal design of optical remote sensing payloads [C]//Earth Observing Systems XII. Proc. of SPIE, 2007, 6677: 1G1-1G12.

[3] Eldar Y C, Oppenheim A V. Quantum signal processing [J]. ***IEEE Trans on Signal Processing***, 2002, 19(6): 12-32.

[4] Tseng C C, Tsung M. Quantum digital image processing algorithm [C]//The 16th IPPR Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing. Kinmen: ROC, 2003: 827-834.

[5] Xie Kefu. Research on the quantum-inspired method for image processing [D]. Shangsha: Zhongnan University, 2007. (in Chinese)
谢可夫. 量子衍生图像处理方法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.

[6] Fu Xiaowei. Research on image processing methods based on quantum mechanics [D]. Shangsha: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
付晓薇. 基于量子力学的图像处理方法研究[D]. 长沙: 华中科技大学, 2010.

[7] Venegas-Andraca S, Bose S, Storing. Processing and retrieving an image using quantum mechanics[C]//in Proc. of the SPIE Conf. Quantum Information and Computation, 2003: 137-147.

[8] Le P, Dong F, Hirota K. A flexible representation of quantum images for polynomial preparation [C]//Image Compression, and Processing Operations. Quantum Inf. Process, 2011: 63-84.

[9] Nielsen M, Chuang I. Quantum Computation and Quantum Information[M]//Cambridge University Press, 2000.

[10] Caraiman S. Towards quantum computer graphics [C]// Proceedings of the 14th International Conference on System Theory and Control, 17-19 October, Sinaia, Romania, 2010: 127-132.

[11] Fu X, Ding M, Zhou C, et al. Multi-threshold image segmentation with improved quantum-inspired genetic algorithm [C]//Proceedings of SPIE Sixth International Symposium on Multiband Image Processing and Pattern Recognition, Yichang, 2009, 7495: 7495181-7495187.