

# 量子遥感图像数据增强算法研究

毕思文\*, 柯余仙

中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

**摘 要:** 针对目前由于传感器性能或外界因素影响造成的遥感图像对比度及亮度偏低, 细节特征不明显等不足, 本文提出了基于量子衍生和反锐化掩膜相结合的方法进行遥感图像数据的增强。在算法实验中, 选择了薄雾天气状态下的实测遥感航拍图、机场遥感航拍图两种遥感航拍图像和街景雾霾实测图像、直接数字化 X 线摄影系统 DR 医学图像两种非遥感图像进行实验。首先, 在  $3 \times 3$  窗口中利用量子叠加态思想构造量子增强算子, 增强图像的对比度, 然后对量子增强算子处理后的图像利用反锐化掩膜的方法增强图像边缘与细节, 从而使图像质量整体上得到改善。遥感图像和非遥感图像 4 个实验测试结果表明, 利用量子遥感图像增强算法得到的图像对比度及亮度适中, 图像熵和峰值信噪比较优。

**关键词:** 量子遥感; 图像增强; 反锐化掩膜; 量子衍生; 量子叠加态

**DOI:** 10.3974/geodp.2018.04.01

## 1 前言

自毕思文提出量子遥感理论、量子遥感信息、量子遥感实验、量子遥感成像、量子光谱成像、量子遥感计算和量子遥感探测<sup>[1-3]</sup>和量子遥感图像数据去噪算法研究<sup>[4]</sup>之后, 进一步提出量子遥感图像数据增强算法研究。这一组研究成果包括量子图像数据的去噪、增强和分割的理论算法、技术实现与实验检测等。

遥感图像增强是图像预处理的一个过程, 其增强效果在后期遥感图像分割和图像分类识别中有着至关重要的作用。图像增强技术可分为空间域技术和变换域技术<sup>[5]</sup>。空间域是直接对图像的像素点和像素值做运算。经典的有直方图均衡化及其改进方法、线性拉伸、反锐化掩膜等<sup>[6]</sup>。直方图均衡化是一种全局的图像增强方法, 忽略了局部信息, 无法保持图像的平均亮度级别, 这可能导致选定区域过度饱和或欠饱和<sup>[7]</sup>。反锐化掩膜在增强图像细节的过程中会增强图像噪声。将图像转换到频域并处理转换后的系数, 这种方法称为变换域处理。经典的遥感图像频域增强算法有基于小波变换的图像增强、基于非下采样剪切波-对比度变换 (Non-Subsampled Shearlet-Contrast Transform, NSSCT) 的图像增强、同态滤波等<sup>[8]</sup>。这些变换域的方法要优于空间域, 但是耗时较长, 算法复杂度较高。为了解决这些问题, 提高图像质量, 就需要改进已有算法或提出新的算法。

收稿日期: 2018-11-21; 修订日期: 2018-12-14; 出版日期: 2018-12-24

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2015-06-2019-08)

\*通讯作者: 毕思文 R-8205-2018, 中国科学院遥感与数字地球研究所, bisw@radi.ac.cn

作者 ID: 毕思文 R-8205-2018, 柯余仙 Y-5344-2018

引用格式: 毕思文, 柯余仙. 量子遥感图像数据增强算法研究[J]. 全球变化数据学报, 2018, 2(4): 367-376. DOI: 10.3974/geodp.2018.04.01.

量子衍生思想是受人工神经网络、遗传算法等自然规律衍生出来的算法的启发,利用量子力学的概念、原理以及公理化数学体系对已有的算法或者开发新算法进行改进,应用在经典计算机上<sup>[9]</sup>。2007年,谢可夫等<sup>[10]</sup>基于量子力学、量子信息等理论与概念,提出了量子衍生形态学边缘检测。2008年,周日贵等<sup>[11]</sup>提出了量子 Hopfield 神经网络,该量子 Hopfield 神经网络的存储矩阵元素基于概率分布,将存储容量或记忆容量提升到了神经元个数的  $2^n$  倍,相比于传统的 Hopfield 神经网络有指数级提高。2010年,付晓薇等<sup>[12]</sup>提出了基于量子统计概率的医学图像增强算法,该算法结合医学图像的特点,在  $3 \times 3$  窗口中构造量子增强算子。2011年,高静波等<sup>[13]</sup>将量子增强算法应用在了彩色图像上,算法首先将图像的 RGB 彩色模型转换为 HSV 模型,对亮度分量进行量子增强,最后再将增强后的 HSV 图像模型转换为 RGB 彩色图像。

2014年,毕思文研究员带领其团队首次提出了量子遥感图像处理研究这一概念,并利用 Matlab 仿真软件实现了量子遥感图像去噪、量子遥感图像增强、量子遥感图像分割等量子遥感图像处理技术<sup>[14]</sup>。目前毕思文团队已完成量子遥感原理样机的研制工作。为了完善量子遥感图像处理体系,实现量子遥感图像处理系统与量子遥感原理样机硬件的结合,进一步提高遥感图像质量,本文提出了基于量子衍生与反锐化掩膜结合的量子遥感图像增强算法,在 Visual Studio 2013 集成开发环境里利用 C++ 与 openCV 实现了该算法,并验证了算法的优越性。

## 2 量子增强算法研究

### 2.1 图像数据的量子比特表示

#### 2.1.1 量子比特和量子系统

在量子计算中,量子状态用量子比特来表示,一个量子比特是一个有两个基态的双态量子系统。如果一个量子比特可能处在  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  表达的两个基态中,则这个量子比特处在线性叠加态,也是系统的一个可能态,并由下列式子表示:

$$|\phi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle \quad (1)$$

式中,  $a$ 、 $b$  为满足归一化  $|a|^2 + |b|^2 = 1$  的复数,称之为概率幅,  $|a|^2$ 、 $|b|^2$  分别为两个基态  $|0\rangle$  态和  $|1\rangle$  态出现的概率。

如果一个量子系统处于基态的叠加之中,则称此量子系统是相干的。当一个相干的量子系统以某种方式与其所处环境发生相互作用,线性叠加就会被破坏,由此引起的相干的消失称为消相干或坍缩。如果一个量子系统由  $n$  个量子位构成,则第  $i$  个量子位的状态为  $|\phi_i\rangle = a_i|0\rangle + b_i|1\rangle$ 。该量子系统的状态可用  $n$  个单量子比特的直积态表示:

$$\begin{aligned} |\phi\rangle &= |\phi_1\rangle \otimes |\phi_2\rangle \otimes \cdots \otimes |\phi_n\rangle \\ &= a_1 a_2 \cdots a_n |000 \cdots 0\rangle + a_1 a_2 \cdots a_{n-1} b_n |00 \cdots 1\rangle + b_1 b_2 \cdots b_n |11 \cdots 1\rangle \\ &= \sum_{i=0}^{2^n-1} \omega_i |i_b\rangle \end{aligned} \quad (2)$$

式中,“ $\otimes$ ”表示张量积;态矢  $|i\rangle$  表示  $n$  个量子比特系统  $|\phi\rangle$  的第  $i$  个基态;  $i_b$  表示对应十进制数  $i$  的  $n$  位二进制数;  $\omega_i$  为相应基态出现的概率幅;  $|\omega_i|^2$  为相应基态出现的概率。由

于函数描述的是一个真实的物理系统, 则必然会坍缩到一个基态, 因此概率幅  $\omega_i$  所决定的概率之和为 1, 它亦满足归一化条件  $\sum_{i=0}^{2^n-1} |\omega_i|^2 = 1$ 。

### 2.1.2 图像灰度的量子比特表示

设  $g(m, n)$  为一幅数字图像, 其中  $g(m, n) \in [0, 1]$ ,  $(m, n) \in Z^2$ , 在进行了灰度级归一化处理后表示图像在位置  $(m, n) \in Z^2$  处像素的灰度值。显然  $g(m, n)$  和  $1-g(m, n)$  可以分别视为像素点  $(m, n)$  灰度取值为“1”和“0”的概率。如果这里以  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  分别表示灰度值“0”和“1”, 则可以将图像  $g(m, n)$  表示为如下两种量子比特形式:

$$|g(m, n)\rangle = \sqrt{1-g(m, n)}|0\rangle + \sqrt{g(m, n)}|1\rangle \quad (3)$$

$$|g(m, n)\rangle = \cos\left[g(m, n) \times \frac{\pi}{2}\right]|0\rangle + \sin\left[g(m, n) \times \frac{\pi}{2}\right]|1\rangle \quad (4)$$

借用量子系统中的两个基态  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  来表示灰度值为“0”和“1”, 分别对应二值图像中的黑点和白点。其中:  $\sqrt{g(m, n)}$  (或  $\cos\left[g(m, n) \times \frac{\pi}{2}\right]$ ) 和  $\sqrt{1-g(m, n)}$  (或  $\sin\left[g(m, n) \times \frac{\pi}{2}\right]$ ) 分别表示为该像素点的灰度值为“0”和“1”的概率幅,  $|g(m, n)\rangle$  称之为图像  $g(m, n)$  的量子比特表示。

如图 1 所示, 以图像  $3 \times 3$  窗口为例, 设中间像素的值为  $(m, n)$ , 邻近像素值为  $f_{i,j}$ ,  $m-1 \leq i \leq m+1$ ,  $n-1 \leq j \leq n+1$ 。

$f_{m-1,n-1}$	$f_{m-1,n}$	$f_{m-1,n+1}$
$f_{m,n-1}$	$f_{m,n}$	$f_{m,n+1}$
$f_{m+1,n-1}$	$f_{m+1,n}$	$f_{m+1,n+1}$

图 1 图像  $3 \times 3$  窗口像素关联表示图

以水平方向为例, 按照公式(2)和(3), 可得如下三量子位的复合系统:

$$\begin{aligned} |f_{m,n-1} f_{m,n} f_{m,n+1}\rangle &= |f_{m,n-1}\rangle \otimes |f_{m,n}\rangle \otimes |f_{m,n+1}\rangle = \sqrt{1-f_{m,n-1}} \sqrt{1-f_{m,n}} \sqrt{1-f_{m,n+1}} |000\rangle \\ &+ \sqrt{1-f_{m,n-1}} \sqrt{1-f_{m,n}} \sqrt{f_{m,n+1}} |001\rangle + \sqrt{1-f_{m,n-1}} \sqrt{f_{m,n}} \sqrt{1-f_{m,n+1}} |010\rangle \\ &+ \sqrt{f_{m,n-1}} \sqrt{1-f_{m,n}} \sqrt{1-f_{m,n+1}} |100\rangle + \sqrt{f_{m,n-1}} \sqrt{f_{m,n}} \sqrt{1-f_{m,n+1}} |110\rangle \\ &+ \sqrt{1-f_{m,n-1}} \sqrt{f_{m,n}} \sqrt{f_{m,n+1}} |011\rangle + \sqrt{f_{m,n-1}} \sqrt{1-f_{m,n}} \sqrt{f_{m,n+1}} |101\rangle \\ &+ \sqrt{f_{m,n-1}} \sqrt{f_{m,n}} \sqrt{f_{m,n+1}} |111\rangle = \sum_{i=0}^7 w_i |i\rangle \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2 基于量子比特与量子叠加态的增强算子构造

在  $3 \times 3$  窗口中, 噪声的方向性较弱, 关联性差, 而边缘像素关联性强, 与附近的像素点联系紧密, 因此我们可以利用式(5)来构造量子增强算子。基态  $|1 \times 0\rangle$  和  $|0 \times 1\rangle$  表示了图像边缘斜坡渐变信息, 基态  $|1 \times 1\rangle$  表示了图像的平滑区域, 分别统计  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  这四个方向上六个基态出现的概率和  $S_i$ , 最后取这几个方向上的加权平均值, 作为最终的量子增强算子  $E$ , 即考虑到中心像素点与邻近像素点的距离对中心像素值的影响, 水平方向上的  $0^\circ$  和垂直方向上的  $90^\circ$  乘以权值  $\sqrt{2}$ 。本文采用式(4)来表示灰度图像, 则增强算子表达式如下:

$$S_{0^\circ} = 1 - \cos^2\left(f_{m,n-1} \times \frac{\pi}{2}\right) \times \cos^2\left(f_{m,n+1} \times \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

$$S_{45^\circ} = 1 - \cos^2\left(f_{m+1,n-1} \times \frac{\pi}{2}\right) \times \cos^2\left(f_{m-1,n+1} \times \frac{\pi}{2}\right) \quad (7)$$

$$S_{90^\circ} = 1 - \cos^2(f_{m-1,n} \times \frac{\pi}{2}) \times \cos^2(f_{m+1,n} \times \frac{\pi}{2}) \quad (8)$$

$$S_{135^\circ} = 1 - \cos^2(f_{m+1,n+1} \times \frac{\pi}{2}) \times \cos^2(f_{m-1,n-1} \times \frac{\pi}{2}) \quad (9)$$

$$E(m,n) = \frac{\sqrt{2}}{4} \times (S_{0^\circ} + S_{90^\circ}) + \frac{1}{4} \times (S_{45^\circ} + S_{135^\circ}) \quad (10)$$

在构造量子增强算子之前需要将图像像素值归一化到区间[0, 1], 定义如下归一化变换公式:

当  $g(m,n) \leq T$  时

$$f(m,n) = \frac{\lambda \times [g(m,n) - \min]}{T - \min} \quad (11)$$

当  $g(m,n) \geq T$  时

$$f(m,n) = \lambda + \frac{(1-\lambda) \times [g(m,n) - T]}{\max - T} \quad (12)$$

式中,  $g(m,n)$  表示原图像,  $f(m,n)$  表示归一化处理后的图像, 像素值取值范围为[0, 1],  $\min$  和  $\max$  分别为原图像像素值的最小值和最大值, 系数  $\lambda \in [0, 1]$ , 不同的图像归一化系数  $\lambda$  最优取值不同, 经过实验, 发现  $\lambda = 0.5$  适用于大多数遥感图像,  $T$  为归一化阈值,  $T \in [\min, \max]$ , 本文通过图像熵最大化原则来确定阈值  $T$ , 图像熵的算法如下:

$$H(E) = -\sum_{i=0}^{255} p(i) \log p(i) \quad (13)$$

式中,  $p(i)$  表示在最终量子增强图像中, 灰度值  $i$  出现的概率。

### 2.3 反锐化掩膜原理

上述量子增强算子增强后的图像对比度和亮度得到改善, 但边缘有点模糊, 因此我们采用线性反锐化掩膜的方法增强图像的边缘与细节。反锐化掩膜公式如下:

$$y_{mask}(m,n) = f(m,n) - \bar{f}(m,n) \quad (14)$$

$$y(m,n) = f(m,n) + k \times y_{mask}(m,n) \quad (15)$$

式中,  $f(m,n)$  为原图像,  $\bar{f}(m,n)$  是原图像  $f(m,n)$  经过低通滤波器处理后得到的近似图像, 经过式(14)得到的  $y_{mask}(m,n)$  是原图像  $f(m,n)$  的细节图, 保留了原图像的细节部分, 将细节图像乘以一个增益因子  $k$ , 再加上原图像  $f(m,n)$  就得到了最终的增强图像  $y(m,n)$ 。

### 2.4 算法步骤:

- (1) 对原图像  $g(m,n)$  进行间隔点采样, 得到采样图  $\hat{g}(m,n)$ 。
- (2) 利用式(11)、(12)对图像  $\hat{g}(m,n)$  进行阈值归一化处理, 得到归一化图像  $\hat{f}(m,n)$ 。
- (3) 利用式(6)-(10)对图像  $\hat{f}(m,n)$  进行量子增强处理, 得到增强后的图像  $\hat{E}(m,n)$ , 利用式(13)计算  $\hat{E}(m,n)$  的图像熵  $H$ , 判断是否最大。
- (4) 不断的更新阈值  $T$ ,  $T = T + 1$ , 重复步骤(2)和(3), 直到  $T = \max$ , 得到最大图像熵时所对应的阈值  $T_{opt}$ 。

(5) 令  $T = T_{opt}$ , 利用式(11)、(12)对原图像  $g(m,n)$  采取阈值归一化处理, 得到归一化图像  $f(m,n)$ , 再通过式(6)-(10)得到增强图像  $E(m,n)$ 。

(6) 利用反锐化掩膜式(14)、(15), 再结合原图像  $g(m,n)$  图像和增强图像  $E(m,n)$  得到最终的增强图像  $y(m,n)$ 。

2.5 评价函数

为了客观的说明算法的优越性，本研究使用图像熵、文献<sup>[20]</sup>图像质量测量函数（Calculate Entry, CE）这两种客观评价指标来分析图像增强效果。图像熵可以表示一幅图像的信息丰富程度，图像增强效果越好，展示的内容越多，其图像熵就越大。图像熵的算法见式(13)，图像质量测量函数如下：

$$CE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f^2(i, j) - \left[ \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j) \right]^2 \tag{16}$$

式中， $M$ 、 $N$  表示图像的分辨率，即图像的高度和宽度； $f(i, j)$  是增强图像的像素值。

3 量子图像数据增强算法仿真实验及其结果

本文在 Visual Studio 2013 集成开发环境下利用 C++与 openCV 对算法进行实验仿真，并采用基于量子概率统计的方法、基于小波变换的直方图均衡化、同态滤波这几种算法与本文的量子方法进行对比。本文分别对航拍遥感图像和非遥感图像进行仿真实验，实验结果如下。

3.1 第一组实验结果

第一组实验由两次实验组成：一是薄雾天气状态下的实测遥感航拍图（图 2a）的图像增强实验，二是机场遥感航拍图（图 3a）的图像增强实验。

3.1.1 薄雾天气状态下实测遥感航拍图的图像增强实验

薄雾天气状态下实测遥感航拍图的图像增强实验采取四种算法对比，分别是：小波变换算法<sup>[15]</sup>（图 2b）、同态滤波算法（图 2c）、量子概率统计算法（图 2d）和量子增强算法（图 2e）。在实验中，分别检测了四种不同算法的图像熵和质量测量函数，检测结果见表 1。从表 1 可以看出，图像熵和质量测量函数这两个参数的量子算法结果都高于其他三种算法。高于百分比为量子方法结果与其他方法结果的差值与其他方法结果的比值（下同）。该实验检测结果表明，采用量子增强算法处理的图像信息与内容更加丰富，且增强后的图像灰度分布均匀，图像质量较好。量子方法的图像熵高于量子概率统计算法 3.72%（表 1，图 2d，图 2e），质量测量函数高于量子概率统计算法 15.26%（表 1，图 2d，图 2e）。其中，高于百分比=（量子方法结果-其他方法结果）/其他方法结果<sup>[4]</sup>（下同）。

表 1 四种不同图像增强实验结果评价参数比较表

处理方法	图像熵	高于百分比（%）	质量测量函数	高于百分比（%）
量子方法	7.710,0	—	3,622.9	—
小波变换	7.341,2	5.02	2,789.5	29.87
量子概率统计	7.433,0	3.72	3,142.2	15.26
同态滤波	6.970,6	10.60	2,028.3	44.01

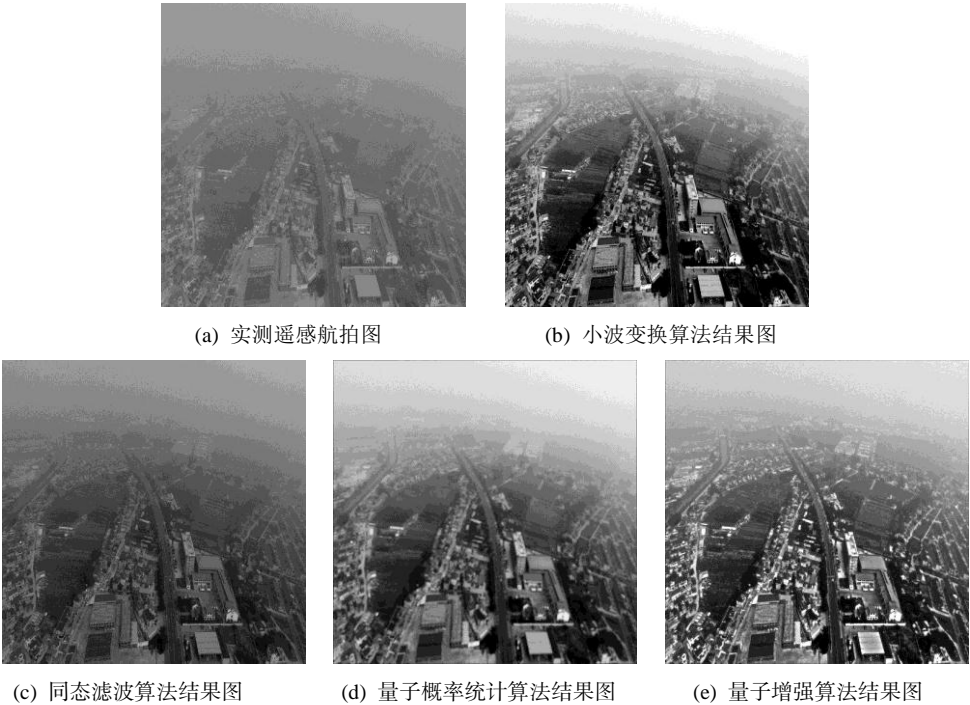


图 2 薄雾天气遥感航拍图像增强实验结果：量子方法与其他方法的比较

3.1.2 机场实测遥感航拍图图像增强实验

机场实测遥感航拍图的图像增强实验采取四种算法对比，分别是：小波变换算法（图 3b）、同态滤波算法（图 3c）、量子概率统计算法（图 3d）和量子增强算法（图 3e）。

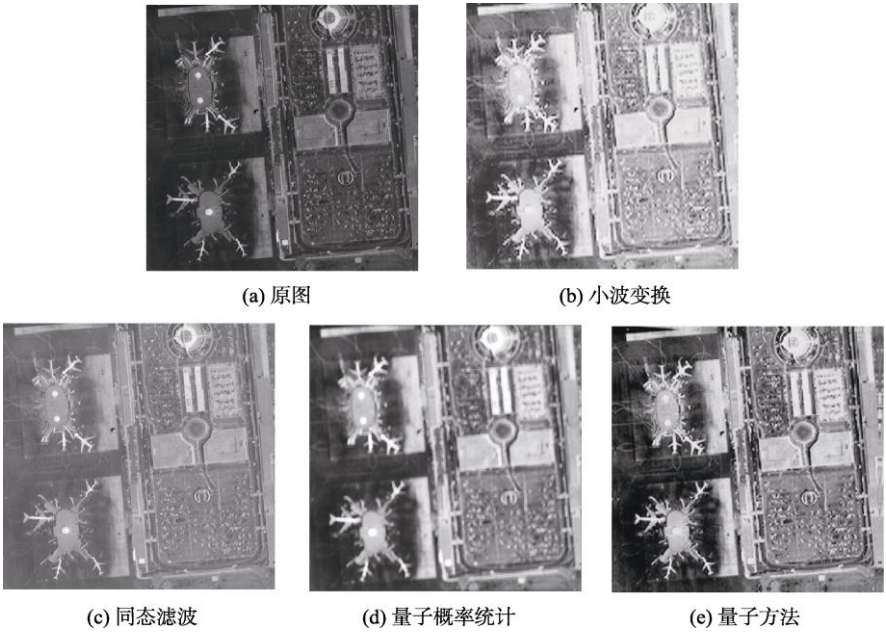


图 3 机场遥感航拍图像增强实验结果：量子方法与其他方法的比较

表 2 列出了这几种算法增强效果评价参数。量子算法的图像熵和质量测量函数结果都高于其他算法（表 2），说明用本文的量子算法增强图像后，图像的信息与内容更加丰富，且增强后的图像灰度分布均匀，图像质量较好。其中，量子方法的图像熵高于小波变换算法 1.48%（表 2，图 3b，图 3e），质量测量函数高于小波变换算法 33.84%（表 2，图 3b，图 3e）。

表 2 图 3 不同处理方法增强效果评价参数比较表

处理方法	图像熵	高于百分比（%）	质量测量函数	高于百分比（%）
量子方法	7.592,1	—	2,810.8	—
小波变换	7.480,9	1.48	2,100.0	33.84
量子概率统计	7.438,8	2.06	2,350.0	19.60
同态滤波	6.623,4	14.62	1,792.4	56.81

3.2 第二组实验结果

第二组实验主要测试非遥感类图像数据的增强效果，由两次实验组成，一是街景雾霾实测图像（图 4a）的增强实验，二是直接数字化 X 线摄影系统 DR 医学图像（图 5a）的增强实验。

3.2.1 街景雾霾实测图图像增强实验

雾霾图像是一类非常具有代表性的图像，它的特点是图像的灰度值分布较集中，整体灰度变化很小，因而图像中物体的辨识度极低。雾霾实测图像增强实验采用四种算法进行对比，分别是：小波变换算法（图 4b）、同态滤波算法（图 4c）、量子概率统计算法（图 4d）和量子增强算法（图 4e）。

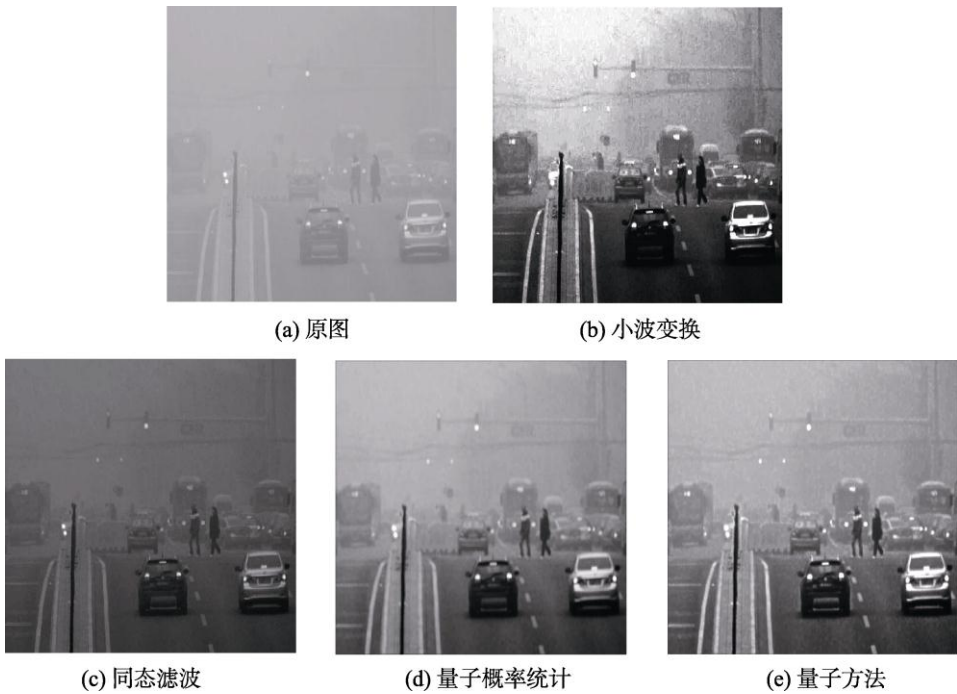


图 4 街景雾霾图像增强实验结果：量子方法与其他方法的比较



表 3 列出了这几种算法增强效果评价参数。量子增强算法的图像熵和质量测量函数都高于其他算法（表 3），表明用本文的量子增强算法处理后，图像的信息与内容更加丰富，且增强后的图像灰度分布均匀，图像质量较好。其中，图像熵高于量子概率统计算法 6.60%（表 3，图 4d，图 4e），质量测量函数高于量子概率统计算法 8.48%（表 3，图 4d，图 4e）。

表 3 图 4 不同处理方法增强效果评价参数比较表

处理方法	图像熵	高于百分比（%）	质量测量函数	高于百分比（%）
量子方法	7.188,9	—	1,755.5	—
小波变换	5.928,5	21.26	1,552.1	13.10
量子概率统计	6.743,5	6.60	1,618.2	8.48
同态滤波	5.475,7	31.28	1,365.0	28.60

3.2.2 直接数字化 X 线摄影系统 DR 医学图像增强实验

直接数字化 X 线摄影系统（DR）是由电子暗盒、扫描控制器、系统控制器、影像显示器等组成，是直接将 X 线光子通过电子暗盒转换为数字化图像。直接数字化 X 线摄影系统 DR 医学图像增强实验采取四种算法对比，分别是：小波变换算法（图 5b）、同态滤波算法（图 5c）、量子概率统计算法（图 5d）和量子增强算法（图 5e）。

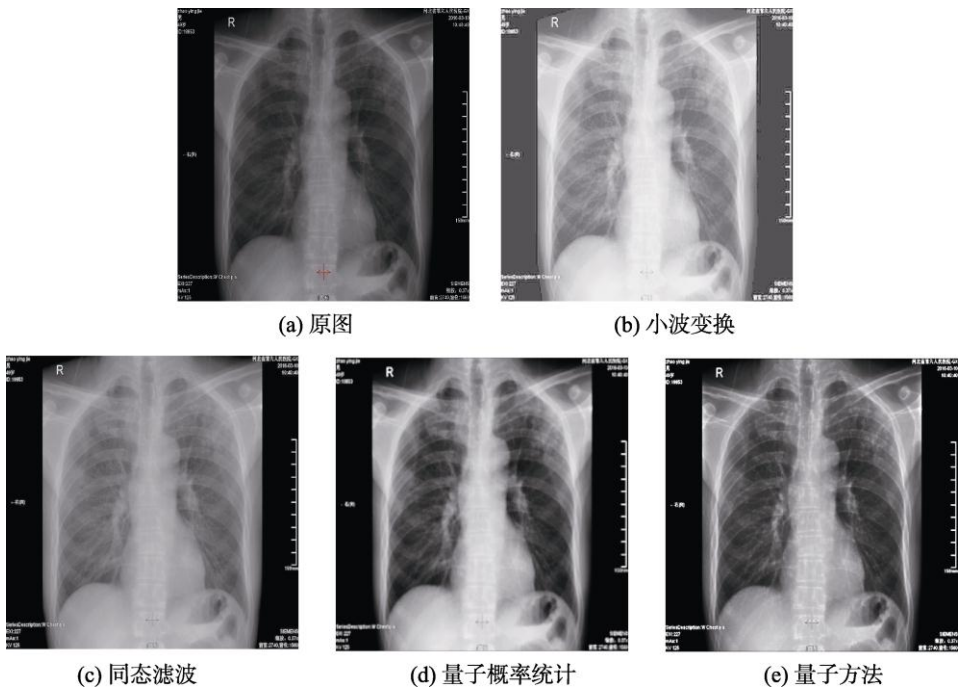


图 5 DR 胸透图像增强实验结果：量子方法与其他方法的比较

表 4 列出了几种算法增强效果评价参数对比。图像熵和质量测量函数这两个参数法的量子算法结果都高于其他算法（表 4），这表明用本文的量子算法增强图像后，图像的信息与内容更加丰富，且增强后的图像灰度分布均匀，图像质量较好。其中，图像熵高于小



波变换算法 0.67%（表 4，图 5b，图 5e），质量测量函数高于其他三种算法最好的基于量子概率统计算法的 21.22%（表 4，图 5d，图 5e）。

表 4 图 5 不同处理方法增强效果评价参数比较表

处理方法	图像熵	高于百分比（%）	质量测量函数	高于百分比（%）
量子方法	7.730,4	—	4,801.3	—
小波变换	7.678,6	0.67	3,345.6	43.51
量子概率统计	7.634,0	1.26	4,265.7	21.22
同态滤波	6.970,6	10.90	3,053.7	57.22

3.3 两组实验结果平均统计

通过两组实验结果综合统计，量子图像数据增强算法在图像熵和图像质量测量函数两个指标上全部高于基于小波变换的直方图均衡化算法、量子概率统计算法和同态滤波算法。其中，遥感类图像处理的图像熵中高于其他算法 3%–12%，图像质量测量函数高于其他算法 17%–68%（表 5）；非遥感类图像在图像熵中高于其他算法 3%–19%，在图像质量测量函数中高于其他算法 17%–48%（表 6）。

表 5 遥感类图像量子图像数据增强算法高于其他方法两次实验平均百分比（%）

处理方法	图像熵	图像质量测量函数
小波变换	3.23	31.58
量子概率统计	2.92	17.14
同态滤波	12.56	68.39

表 6 非遥感类图像量子图像数据增强算法高于其他方法两次实验平均百分比（%）

处理方法	图像熵	图像质量测量函数
小波变换	12.96	33.86
量子概率统计	3.76	17.53
同态滤波	19.87	48.39

4 结论

根据四组实验，对比各种算法的仿真实验结果，可以看出本文所提出的算法增强效果要优于其他几种增强算法。图 2 和图 3 是遥感航拍类图像，图 4 是街景雾霾图，图 5 是 DR 医学图像。基于小波变换的直方图均衡化方法使得增强图像偏亮或忽略了局部信息，如图 2b 的右上角过亮，不利于地物的识别，而其他地方亮度偏暗，图 4b 也是如此。图 3b 和图 5b 则是增强后的图像整体偏亮。同态滤波的方法增强效果不明显，而且参数选取消耗时间。基于量子概率统计的方法在增强图像对比度与亮度的过程中也使得图像边缘模糊化。本文基于量子衍生和反锐化掩膜结合的算法在减弱偏亮像素的灰度变化，增强偏暗像素的灰度变换的同时，也加强了边缘与细节，使得图像轮廓更加清晰。本文选取的几种图像来自不同的领域，分别是遥感类图像、医学图像以及街景雾霾图，证明了本文算法鲁棒性较好，适用于大多数图像，具有一定的普适性。

5 前景展望

图像数据增强处理是遥感类与非遥感类图像处理应用的普遍要求，遥感图像增强算法也是遥感图像数据分析重点研究领域。本文提出的量子遥感图像数据增强算法在遥感图像数据的图像熵和图像质量测量函数两个指标上与目前较为成熟的图像增强算法（如小波变

换算法、同态滤波算法、量子概率统计等)相比具有明显的优势。该算法不仅可以应用于遥感图像数据增强(包括航空遥感和航天遥感),也可以用于非遥感类图像数据的增强处理(例如相机照片、医学影像等)。由于通用量子计算机物理设备尚未面世等原因,本文的研究仅限于基于经典电子计算上的量子衍生图像数据增强实验,借鉴了量子力学的基本理论与实验,并没有涉及到量子计算机物理设备。但是,可以有理由预测,当量子计算机问世并以其强大的计算能力被应用之时,也是量子遥感图像数据增强和数据可视化在各个领域广泛应用之日。

## 参考文献

- [1] 毕思文. 量子遥感的概念、框架与内涵研究探索[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22: 1-9.
- [2] 毕思文, 韩继霞. 量子遥感的中远红外实验研究[C]. 北京: 第十五届全国遥感会议论文集, 2005: 8-15.
- [3] 毕思文, 韩继霞. 量子遥感信息机理研究[J]. 科技导报, 2006, 9(11): 38-42.
- [4] 毕思文, 陈浩. 量子遥感图像数据去噪算法研究[J]. 全球变化数据学报, 2018, 2(3): 256-270. DOI: 10.3974/geodp.2018.03.03.
- [5] Rafael, C. G. Digital Image Processing [M]. 阮秋琦译. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [6] 姜柏军, 钟明霞. 改进的直方图均衡化算法在图像增强中的应用[J]. 激光与红外, 2014, 44(6): 702-706.
- [7] Suresh, S., Lal, S. Modified differential evolution algorithm for contrast and brightness enhancement of satellite images [J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 61: 622-641.
- [8] Sha, Y. H., Liu, F., Jiao, L. C. SAR image enhancement based on nonsubsampling contourlet Transform [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(7): 1716-1721.
- [9] 谢可夫. 量子衍生图像处理方法的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [10] 谢可夫, 罗安, 周心一. 量子衍生形态学边缘检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(11): 87-90.
- [11] 周日贵, 姜楠, 丁秋林. 量子 Hopfield 神经网络及图像识别[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(1): 119-123.
- [12] 付晓薇, 丁明跃, 蔡超. 基于量子概率统计的医学图像增强算法研究[J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1591-1596.
- [13] 高静波, 吴成茂, 田小平. 基于清晰度的彩色图像量子增强算法[J]. 西安邮电学报, 2011, 16(2): 5-8.
- [14] 张莹. 基于量子衍生的遥感图像处理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 1-67.
- [15] 汪祖辉, 孙刘杰, 邵雪. 一种小波域的图像增强算法[J]. 包装学报, 2017, 9(1): 22-25.