

基于多尺度 Retinex 的非下采样 Contourlet 域 图像增强

吴一全^{1,2,3,4,5} 史骏鹏¹

¹南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 210016

²江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122

³东华理工大学 江西省数字国土重点实验室, 江西 南昌 330013

⁴中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

⁵兰州大学 甘肃省西部矿产资源重点实验室, 甘肃 兰州 730000

摘要 针对部分遥感图像和高光谱图像中存在的对比度不足、整体偏暗等问题,提出了一种基于多尺度 Retinex (MSR)和混沌小生境粒子群优化(NCPSO)的非下采样 Contourlet 变换(NSCT)域图像增强方法,用于改善图像质量。对图像进行 NSCT 分解,得到一个低频分量和多个不同方向的高频分量;在低频分量上进行混合灰度函数的多尺度 Retinex 增强;同时利用非线性增益函数调整高频分量系数,将兼顾对比度和信息熵的定量综合评价函数作为 NCP-SO 的适应度,寻找非线性增益函数所涉及的最优参数。大量实验结果表明,与双向直方图均衡方法、NSCT 方法、多尺度 Retinex 方法、平稳小波变换和 Retinex 方法等 4 种增强方法相比,提出的方法能更有效地提高图像的对比度和信息熵,增强图像的整体视觉效果。

关键词 遥感;高光谱图像;图像增强;非下采样 Contourlet 变换;多尺度 Retinex;混沌小生境粒子群优化

中图分类号 TP751 文献标识码 A

doi: 10.3788201535.0310002

Image Enhancement in Non-Subsampled Contourlet Transform Domain Based on Multi-Scale Retinex

Wu Yiquan^{1,2,3,4,5} Shi Junpeng¹

¹College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

²Jiangsu Province Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

³Jiangxi Province Key Laboratory of Digital Land, East China Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China

⁴MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

⁵Gansu Province Key Laboratory of Western China's Mineral Resources, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China

Abstract Aiming at the problem of contrast deficiency and low luminance in some remote sensing images and hyperspectral images, an enhancement method in non-subsampled contourlet transform (NSCT) domain based on multi-scale Retinex (MSR) and niche chaotic mutation particle swarm optimization (NCPSO) is proposed to

收稿日期: 2014-09-30;收到修改稿日期: 2014-10-30

基金项目:国家自然科学基金(60872065)、江南大学江苏省食品先进制造装备技术重点实验室开放基金项目(FM-201409)、江西省数字国土重点实验室开放基金项目(DLLJ201412)、国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室开放基金(ZS1406)、兰州大学甘肃省西部矿产资源重点实验室开放基金项目(WCRMGS-2014-05)、江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 吴一全(1963—),男,博士,教授,主要从事遥感图像处理与理解、红外目标检测与识别、视觉检测与图像测量、数字全息等方面的研究。E-mail: nuaaimage@163.com

improve the quality of images. Firstly, an image is decomposed through NSCT. A low-frequency component and several high-frequency components in different directions are produced. Then the low-frequency component is enhanced by the multi-scale Retinex algorithm with hybrid intensity transfer function. While the coefficients of high-frequency components are adjusted to enhance the edges by nonlinear gain function. The optimal parameters in the nonlinear gain function are searched by the niche chaotic particle swarm optimization algorithm, whose fitness is the integrated quantitative evaluation function considering both contrast and information entropy. A large number of experimental results show that, compared with four enhancement methods such as histogram double equalization method, non-subsampled contourlet transform method, multi-scale Retinex method and stationary wavelet transform and Retinex method, the proposed method can improve the contrast and information entropy more efficiently, and enhances the whole visual effects.

Key words remote sensing; hyperspectral image; image enhancement; non-subsampled contourlet transform; multi-scale Retinex; niche chaotic particle swarm optimization

OCIS codes 280.4788; 100.2980; 100.7410; 100.4145

1 引 言

在遥感图像的成像过程中,传感器性能下降、大气扰动等诸多因素会导致某些遥感图像出现对比度较低、整体偏暗、视觉效果较差等问题。对于高光谱图像而言,成像仪器的参数设置不当或拍摄物体的外观、颜色、光泽等因素,会导致所需波段的图像质量偏差,对后续的进一步处理如食品损伤检测、小目标分类等造成影响。为了克服这些缺陷,人们提出了各种图像增强方法,通过提高对比度、增强边缘和细节特征、调节动态范围、抑制噪声等手段,改善图像质量,使之更适合人类的视觉观察与分析或计算机的处理与识别^[1-2]。

现有的图像增强方法可以分为空域处理和变换域处理两大类^[3]。传统的基于空域处理的增强方法主要包括灰度变换、反锐化掩模、直方图均衡化^[4-5]等。这类增强方法直接对图像进行处理,虽然速度较快,但是会在增强图像对比度的同时放大噪声,导致其视觉效果的弱化。相比之下,基于变换域处理的增强方法以其良好的信号与噪声分离特性,在图像增强领域得到了人们的广泛关注。与傅里叶变换增强方法相比,离散小波变换增强方法^[6-9]在噪声抑制、细节表达上有很大的改进。但离散小波变换仅能表示点奇异性,其方向选择性较为有限,无法以最有效的稀疏方式来表示图像轮廓及边缘信息。为了获得更好的方向选择性以便更精确地表示图像的边缘和细节信息,人们又提出了基于非下采样 Contourlet 变换(NSCT)的增强方法^[10-13]。NSCT具有近似平移不变性,不存在频谱混叠现象,能够抑制增强过程中出现的伪 Gibbs 失真。然而这些基于 NSCT 的增强方法在对光照不均匀的图像进行增强时,其视觉效果无法达到令人满意的程度。Retinex 增强方法^[14-18]能有效地显示出不同光照条件下隐藏在阴影区域中的图像内容,增强图像的细节对比度,改善图像的视觉效果。另一方面,人们也试图利用遗传算法^[19]、粒子群优化^[20-22]等算法改善增强方法的自适应性,提高其性能。为此,将混沌小生境粒子群优化(NCPSO)算法引入图像增强,可提高搜索增益函数最优参数的速度和精确度,使图像的视觉效果更佳^[23]。

为了进一步增强图像的对比度,改善其视觉效果,本文提出了一种基于多尺度 Retinex(MSR)和 NCPSO 的 NSCT 域图像增强方法。首先通过 NSCT 将图像分解成一个低频分量和多个不同方向的高频分量;然后在低频分量上利用混合灰度函数的多尺度 Retinex 方法进行调整,以提升图像的整体对比度和视觉效果;同时通过非线性增益函数对高频分量进行自适应增强。为了获得更好的增强效果,利用 NCPSO 方法进行优化,搜寻非线性增益函数涉及的最优参数。NCPSO 算法的适应度函数由图像质量评价函数确定,而图像质量评价目前仍以人们的主观评价为主,客观定量评价尚无统一标准,适应度函数兼顾了对比度和信息熵。为了验证增强方法的性能,给出了该方法和双向直方图均衡方法、NSCT 方法、多尺度 Retinex 方法、平稳小波变换和 Retinex 方法等 4 种增强方法的实验结果,并根据主观视觉效果以及对比度、信息熵等客观定量指标进行了比较分析。

2 基于 NSCT 和 Retinex 的图像增强方法

2.1 非下采样 Contourlet 变换

Contourlet 变换虽然克服了小波变换方向表示性差的局限性,但对图像进行下采样时会产生频谱混淆现

象,非下采样 Contourlet 变换则克服了 Contourlet 变换中的频谱混淆问题。NSCT 由非下采样塔式分解和方向滤波器组共同构成,其具体步骤是:先利用塔式分解获得图像中的奇异点,再通过方向滤波器将这些不连续的奇异点连接成周线结构,并以此来逼近原始图像。NSCT 的结构如图 1 所示。

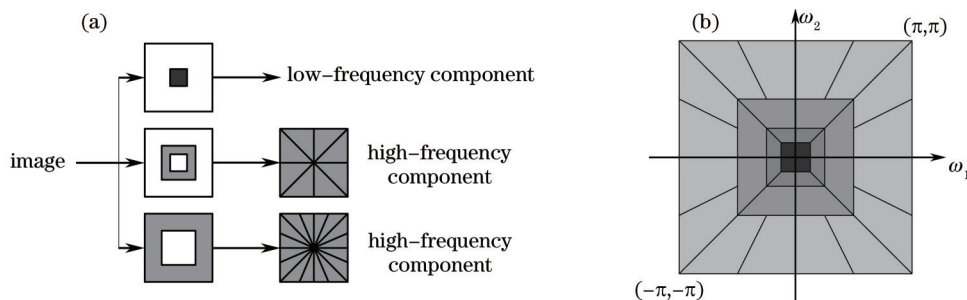


图 1 NSCT 的结构。(a) NSCT 滤波器; (b) 方向滤波器组频率分解

Fig.1 Structure of NSCT. (a) NSCT filter; (b) frequency decomposition of directional filter banks

NSCT 注重相位信息和幅值信息,具有良好的时频局部化特征、近似的平移不变性,能更清晰、准确地描述图像的细节。在图像 NSCT 域中,能量信息集中在低频分量上,噪声和边缘信息集中在高频分量上。分别对各分量系数进行不同程度的调整,不仅可以实现图像的细节增强,还能避免过增强现象的产生。

2.2 低频分量的 Retinex 增强

Retinex 作为一种人眼感知亮度和色度的视觉模型^[24],其基本原理是用环境照明亮度和物体表面反射来表示人眼感知物体的亮度,即用一幅图像用照射光分量和反射光分量的乘积表示为

$$I(x,y) = L(x,y) \cdot R(x,y), \quad (1)$$

式中 $I(x,y)$ 表示原始图像, $L(x,y)$ 表示图像的照射光分量,它决定了一幅图像的动态范围, $R(x,y)$ 表示图像的反射光分量,它携带了图像的细节信息。

基于 Retinex 理论的增强方法有两个优点:1)具有非常好的色感一致性,能保证物体的色彩不受光照非均匀性的影响;2)可针对感兴趣图像内容进行对比增强,实现动态范围的压缩。根据上述优点,Retinex 增强方法通过改变照射图像和反射图像在原图像中所占的比例实现图像低频分量的动态压缩,从而达到增强图像、改善整体视觉效果的目的。色感一致性对于灰度图像这种单通道颜色图像而言,可以体现为在不同亮度情况下对物体灰度级的分辨能力,因此 Retinex 方法也适用于灰度图像。

单尺度 Retinex(SSR)是一种较为常用的图像增强方法,其数学表达式为

$$r(x,y) = \lg[R(x,y)] = \lg[I(x,y)] - \lg[F(x,y) * I(x,y)], \quad (2)$$

式中 $r(x,y)$ 表示增强处理后的输出图像, $*$ 表示卷积运算符, $F(x,y)$ 表示低通滤波函数,通常选用高斯滤波函数为

$$F(x,y) = K \exp[-(x^2 + y^2)/\delta], \quad (3)$$

式中 K 为归一化因子,满足 $\iint F(x,y) dx dy = 1$ 。 δ 是高斯滤波器的尺度参数,控制着高斯曲面的形状,当其取值较小时,能较好地实现图像动态范围的压缩,但是易造成色彩失真;其取值较大时,色感一致性较好,但是易损失图像的细节信息。

为了较好地实现动态范围压缩和色感一致性之间的平衡,采用 MSR 方法对图像低频分量进行增强。MSR 的数学形式可以看作多个 SSR 的加权平均,表达式为

$$r(x,y) = \sum_{i=1}^N w_i \{ \lg[I(x,y)] - \lg[F_i(x,y) * I(x,y)] \}, \quad (4)$$

式中 N 表示环绕尺度的个数, w_i 和 $F_i(x,y)$ 分别表示对应尺度的权值和高斯滤波函数,且满足 $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ 。

MSR 方法同时包括了多个尺度的特征,结合了小尺度的卷积核能实现动态范围压缩的优点,以及大尺度的卷积核能保证图像色感一致性的优势,尽可能地增强图像的视觉效果。

在 MSR 中,灰度变换函数一般使用对数函数,对图像细节的增强往往注重阴影部分,而忽略光照部分。因此将一种混合灰度变换函数引入 MSR,其对应的数学表达式为

$$r(x,y) = \sum_{i=1}^N w_i \{h_{\log}[I(x,y)] - h_{\log}[F_i(x,y)*I(x,y)]\}, \quad (5)$$

式中 h_{\log} 函数即为混合灰度变换函数为

$$h_{\log}(I) = \lambda \cdot I^+ + (1 - \lambda) \cdot I^-, \quad (6)$$

$$I^+ = \lg(I + 1), \quad (7)$$

$$I^- = \lg(D) - \lg(D - I), \quad (8)$$

式中 D 表示图像的动态范围,一般取 256, λ 用于调节图像光照部分 I^+ 和阴影部分 I^- 增强的比例,可以依据图像的特性按(9)式自适应地选择:

$$\lambda = \frac{1}{M} \sum_{(x,y) \in \Omega} \left[\frac{s^+(x,y)}{s^+(x,y) + s^-(x,y)} \right], \quad (9)$$

式中 M 表示图像像素个数, Ω 表示像素点位置的集合, $s^+(x,y)$ 和 $s^-(x,y)$ 分别表示 I^+ 和 I^- 在点 (x,y) 处的局部标准差。

将图像经过 NSCT 后的低频分量系数作为输入,按(5)式进行增强。由于增强后图像的系数会出现负值,使整个图像变得灰暗,严重影响视觉效果,因此需要对其进行截断拉升处理,表达式为

$$\bar{r}(x,y) = \begin{cases} 0, & r(x,y) < T_{\text{low}} \\ \frac{r(x,y) - r_{\text{min}}}{r_{\text{max}} - r_{\text{min}}}, & T_{\text{low}} \leq r(x,y) \leq T_{\text{high}}, \\ 255, & r(x,y) > T_{\text{high}} \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\bar{r}(x,y)$ 表示截断拉升之后的输出图像, r_{min} 和 r_{max} 分别表示输入图像 $r(x,y)$ 的最小值和最大值; T_{low} 和 T_{high} 分别表示截断点的上限和下限,由正态分布的特性决定。 $T_{\text{low}} = m_T - d \cdot \sigma$, $T_{\text{high}} = m_T + d \cdot \sigma$, 式中 m_T 和 σ 分别表示输入图像的均值和标准差, d 可根据图像的具体特征进行调整,一般取值 2~3。

2.3 高频分量的非线性增强

图像的高频分量包含了边缘细节信息和噪声,可分为三类:强边缘、弱边缘和噪声。调整高频分量系数是为了突出弱边缘,抑制噪声。现设定阈值来对高频分量系数进行分类,阈值为

$$T_k^l = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [P_k^l(x,y) - P_{\text{mean}}]^2}, \quad (11)$$

式中 T_k^l 表示第 l 个尺度上第 k 个分量中选取的阈值, $P_k^l(x,y)$ 表示该分量在位置 (x,y) 的系数, P_{mean} 表示该分量系数的均值, $m \times n$ 表示该分量大小。对小于阈值的系数,可以看成是图像噪声,进行抑制;而对大于阈值的系数,则视为模糊的边缘,利用(12)式进行相应的调整^[10]:

$$\bar{P}_k^l(x,y) = a P_{k_{\text{max}}}^l \left\{ s_{\text{igm}} \left\{ c \left[\frac{P_k^l(x,y)}{P_{k_{\text{max}}}^l} - b \right] \right\} - s_{\text{igm}} \left\{ -c \left[\frac{P_k^l(x,y)}{P_{k_{\text{max}}}^l} + b \right] \right\} \right\}, \quad (12)$$

式中 $a = \frac{1}{s_{\text{igm}}[c(1-b)] - s_{\text{igm}}[-c(1+b)]}$, $s_{\text{igm}}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$, \bar{P}_k^l 表示调整后的系数, $P_{k_{\text{max}}}^l$ 表示该分量系数的最大值。 b 和 c 分别控制系数增强的范围和增强的强度,可通过非线性方程得出 b 的值^[10];而为了尽可能地提高增强效果,可将不同方向分量中的 c 作为待定参数,利用 NCPSO 算法进行自适应地寻优。

将 Retinex 增强后的图像低频分量和经非线性增益函数调整后的图像高频分量,通过非下采样 Contourlet 反变换重构得到增强后图像。

3 基于 NCPSO 优化的增强方法实现

3.1 混沌小生境粒子群优化算法

在 n^* 维解空间中,为每个粒子 i 设定一个位置集和速度集。位置集 $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$ 用来表示优化问

题的解,并可用相应的适应度函数来判断粒子的优劣程度。速度集 $V_i=(V_{i1},V_{i2},\dots,V_{in})$ 则用来表示粒子的当前位置与下一步目标位置之间的迭代位移。对粒子群初始化后,通过不断迭代的方式寻找问题的最优解,并根据代表粒子最优的个体极值 p_{best} 和代表整个粒子群最优的全局极值 g_{best} ,迭代更新速度和位置为

$$V_i(q+1)=\omega V_i(q)+s_1 r_1 [p_{best}(q)-X_i(q)]+s_2 r_2 [g_{best}(q)-X_i(q)], \quad (13)$$

$$X_i(q+1)=X_i(q)+V_i(q+1), \quad (14)$$

式中 q 表示当前的迭代次数, s_1 和 s_2 表示学习因子,取值均为 2, r_1 和 r_2 表示满足(0,1)上均匀分布的随机数, ω 表示惯性因子,可以通过设定一个最大惯性因子 ω_{max} 和最小惯性因子 ω_{min} 来实现迭代更新, $\omega=\omega_{max}-(\omega_{max}-\omega_{min})q/q_{max}$, q_{max} 表示总迭代次数。在整个迭代寻优过程中,粒子的位置和速度均需要限定在一个允许范围内,并将全局最优解作为最后的输出值。

上述为基本粒子群优化算法,能在一定程度上改善优化内容的自适应性,但是往往因为陷入局部极值而导致搜索精度不够高。现将混沌迭代变异的理论和小生境的思想引入基本粒子群算法。

采用的混沌映射 Logistic 迭代方程可以表示为

$$\beta_d^{j+1}=\mu\beta_d^j(1-\beta_d^j), \quad j=1,2,\dots, \beta_d \in (0,1), \beta_d \neq 0.25, 0.5, 0.75. \quad (15)$$

在迭代寻优的过程中,对所有小生境子种群中的最优个体 $g_{best}=[X_1, X_2, \dots, X_d, \dots, X_n]$ 均进行混沌迭代变异为

$$\begin{cases} p_c = X_{d,\min} + \beta_d^{j+1}(X_{d,\max} - X_{d,\min}) \\ X_d^{j+1} = (1 - \eta_q)X_d^j + \eta_q p_c \end{cases}, \quad (16)$$

式中 η_q 是收缩因子,它决定了变量 X_d 的变化空间,可表示为

$$\eta_q = 1 - [(q-1)/q]^u, \quad (17)$$

式中 u 是控制收缩速度的参数,取为 2。

3.2 增强效果的定量评价及适应度函数

为了能客观准确地评价增强方法的优劣,必须有可靠的质量度量准则。由于人眼的视觉强度不同,对于细节过多的图像的认知不够准确,带有一定的主观性,因此还需采用定量指标进行评价。选用对比度和信息熵两种指标对增强后的图像进行定量评价。

图像的对比度评价函数 E_1 定义为

$$E_1 = \frac{1}{M_c \times N_c} \sum_{c,x=1}^{M_c} \sum_{y=1}^{N_c} I_E^2(x,y) - \left[\frac{1}{M_c \times N_c} \sum_{c,x=1}^{M_c} \sum_{y=1}^{N_c} I_E(x,y) \right]^2, \quad (18)$$

式中 $M_c \times N_c$ 为图像大小, $I_E(x,y)$ 为增强后的图像。

信息熵表示图像中含有信息量的多少,其值越大则说明图像所含有的信息量越多,细节越丰富,图像质量越好。图像的信息熵评价函数 E_2 定义为

$$E_2 = - \sum_{i=0}^{L-1} P_e(i) \text{lb}[P_e(i)], \quad (19)$$

式中 $P_e(i)$ 表示灰度值为 i 的像素占有所有像素的比例, L 表示图像的灰度级数目,取为 256。

为了实现图像的自适应增强,并综合考虑对比度和信息熵评价指标,NCPSO 算法的适应度函数表达式为

$$F_{\text{fitness}} = E_1 \cdot E_2. \quad (20)$$

3.3 基于 NCPSO 优化的增强方法步骤

基于 NCPSO 优化的增强方法的步骤:

- 1) 对图像进行分解层数为 1,方向为 4 的非下采样 Contourlet 变换,得到高频分量系数和低频分量系数。
- 2) 根据(5)式和(10)式对图像的低频分量系数进行 MSR 增强,试验中尺度分别取 20, 80, 250, 权值均为 1/3,根据(11)式和(12)式对图像的高频分量系数进行非线性增益调整,对调整后的低频分量和高频分量进行非下采样 Contourlet 反变换,重构图像。

3) 初始化小生境粒子种群,随机产生多个子种群,每个子种群中有4个粒子,分别代表不同高频分量中 c 的取值,并记为 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 。其搜索位置和速度分别在 $[0,100]$ 和 $[-10,10]$ 内随机产生。

4) 根据(18)式和(19)式计算4个粒子的对比度和信息熵评价函数,并利用(20)式获得其适应度函数值,然后结合步骤1)和步骤2)获得所有小生境子种群的最优粒子位置,选出全局最优粒子位置。

5) 计算任意2个子种群最优个体 $g_{best,i}$ 与 $g_{best,j}$ 之间的距离 d_{ij} ,并设定小生境半径 R_{niche} 为30。若满足 $d_{ij} < R_{niche}$,则比较这2个小生境最优个体的适应度函数值,并使数值较高者保持不变,较低者为0。然后在置零后最优个体所在的小生境种群中对最优个体重新进行初始化筛选,直到任意2个小生境最优个体之间的距离 $d_{ij} \geq R_{niche}$ 。

6) 按(16)式对小生境种群中最优个体的位置进行变尺度混沌变异,可以避免算法早熟,提高搜索精度。

7) 计算得到每个粒子新的位置和速度。

8) 如果达到最大迭代次数 q_{max} ,则停止寻优过程,输出最佳增强参数用以高频分量系数的非线性调整,并和Retinex增强后的低频分量通过非下采样Contourlet反变换重构图像,实现图像的增强处理,否则转步骤2)。

4 实验结果及分析

采用上述提出的基于多尺度Retinex和NCPSO优化的NSCT域图像增强方法对大量高光谱食品图像、遥感土地图像和遥感探矿图像进行了增强处理实验,得到了相应的增强图像并依据对比度和信息熵评价函数进行了定量评价。为了进行比较和分析,同时给出了双向直方图均衡方法^[4]、NSCT方法^[11]、MSR方法^[24]、平稳小波变换和Retinex方法^[17]的增强结果,包括增强后的图像以及相应的对比度和信息熵。实验结果表明,提出的增强方法能很好地提高图像的对比度,增强视觉效果,性能优于对比的4种增强方法。图2~4分别给出了420 nm波段的高光谱食品图像、遥感土地图像和遥感探矿图像的原始图像,采用双向直方图均衡方法、NSCT方法、MSR方法、平稳小波变换和Retinex方法以及提出的增强方法增强后所得到的图像。所有方法的实验平台与运行环境为Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU 2 GHz/2 GB内存、Matlab2012b。

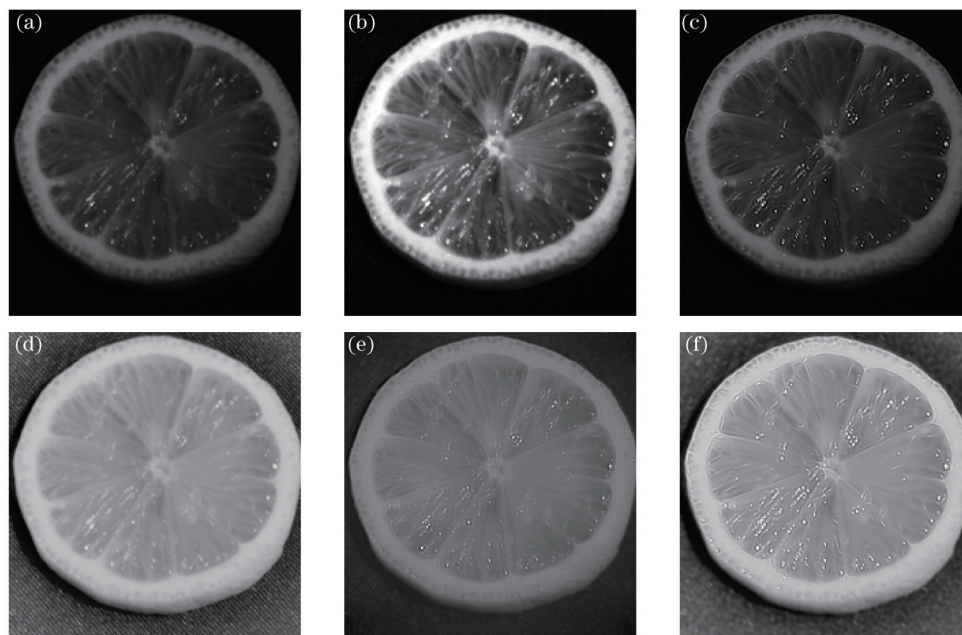


图2 高光谱食品图像的5种增强方法结果比较。(a)原始图像;(b)双向直方图均衡方法;(c)NSCT方法;(d)MSR方法;(e)离散小波变换和Retinex方法;(f)提出的增强方法

Fig.2 A comparison of results of five enhancement methods on hyperspectral food image. (a) Original image; (b) histogram double equalization method; (c)NSCT method; (d)MSR method; (e)stationary wavelet transform and Retinex method; (f)proposed method

由图2可以看出,双向直云图均衡方法增大了图像对比度的同时也放大了噪声,导致了食品图像的过增强。NSCT方法虽然使图像的纹理变得更为清晰,但并未提高图像的整体对比度,增强效果不佳。MSR方法和离散小波变换和Retinex方法对食品图像的整体进行增强,能较为清楚地表示出食品、阴影和背景部分,但是MSR方法无法突出食品的细节特征,导致增强后的图像比较模糊;而离散小波变换和Retinex方法虽然增强了食品的纹理细节,却存在图像整体偏暗、对比度不高的缺点。提出的增强方法很好地提升了图像对比度,不仅能较好地表示出食品、阴影和背景部分,而且能非常清晰地描述食品的纹理细节,整体视觉效果最优。

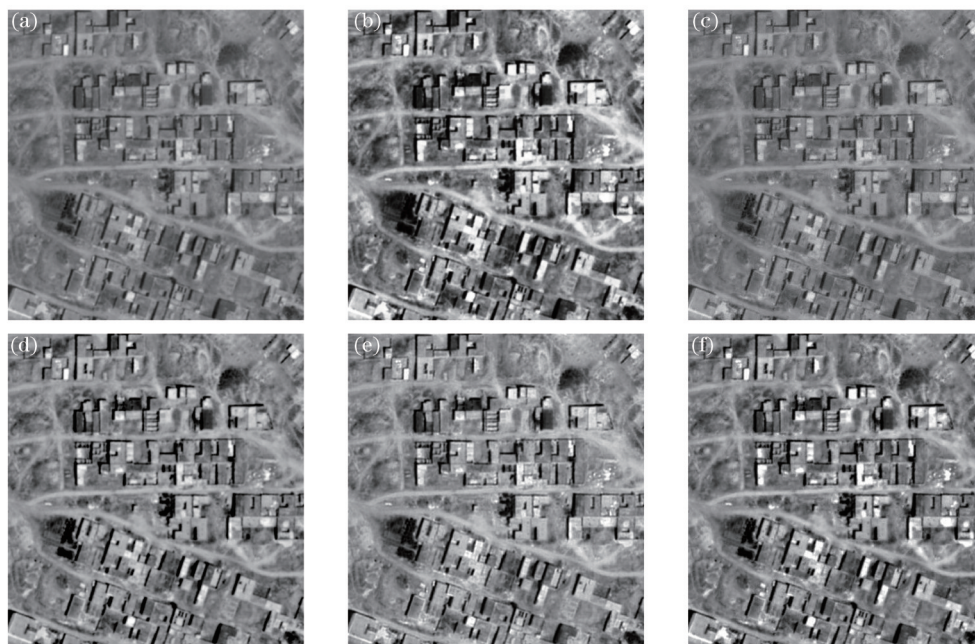


图3 遥感土地图像的5种增强方法结果比较。(a)原始图像;(b)双向直方图均衡方法;(c) NSCT方法;(d) MSR方法;(e)离散小波变换和Retinex方法;(f)提出的增强方法

Fig.3 A comparison of results of five enhancement methods on remote sensing land image.(a) Original image;(b) histogram double equalization method;(c) NSCT method;(d) MSR method;(e) stationary wavelet transform and Retinex method;(f) proposed method

在图3中,双向直方图均衡方法、MSR方法和离散小波变换和Retinex方法均不同程度地提升了图像的对比度,使原本灰暗的图像变得明亮。其中双向直方图均衡方法的拉伸程度最大,但也导致图像中偏暗细节的丢失,且同时噪声也被一起放大;MSR方法和离散小波变换和Retinex方法虽然兼顾了图像的对比度和视觉效果,但增强效果并未达到最优。NSCT方法无法有效提升图像的整体对比度,增强效果表现不佳。提出的增强方法在有效提升图像的整体对比度的同时,还能够对图像中房屋、道路和土地进行清晰的描述,具有更好的图像质量。

通过图4的增强效果发现,双向直方图均衡方法,离散小波变换和Retinex方法极大程度地拉伸了图像的灰度分布,增强图像的对比度,但也会导致地表背阴面细节的丢失。NSCT方法增强了地貌的沟壑纹理细节,但在整体对比度的提升上作用不明显。MSR方法和提出的增强方法对图像中的遥感区域地形有不错的增强效果,但MSR方法对部分细节的描述能力不足,导致增强图像的部分细节变得模糊;而提出的增强方法不仅能清晰地描述地貌纹理细节,而且在提升对比度方面表现的更好。

根据(18)式和(19)式计算了原始图像和5种增强方法所得增强图像的对比度以及信息熵,作为客观定量评价指标,如表1所示。由表1可以看出:双向直方图均衡方法的对比度被过度提升,且信息熵下降,说明出现了过增强现象,导致视觉效果降低。与之相比,NSCT方法对图像的边缘、纹理细节增强效果很好。然而NSCT方法相对原始图像,在对比度和信息熵上的增益仅仅略大于1,不能说是一种理想的增强方法。MSR方法能较大程度地提升图像的对比度和信息熵,但是却无法突出图像的细节,导致增强后图像变得模糊。采用平稳小波变换和Retinex方法进行增强时,对比度和信息熵的提升介于其他几种增强方法之间,说明增强效果没有达到最优。采用提出的增强方法在大幅度提升图像的对比度的同时不会放大图像中的噪声,并

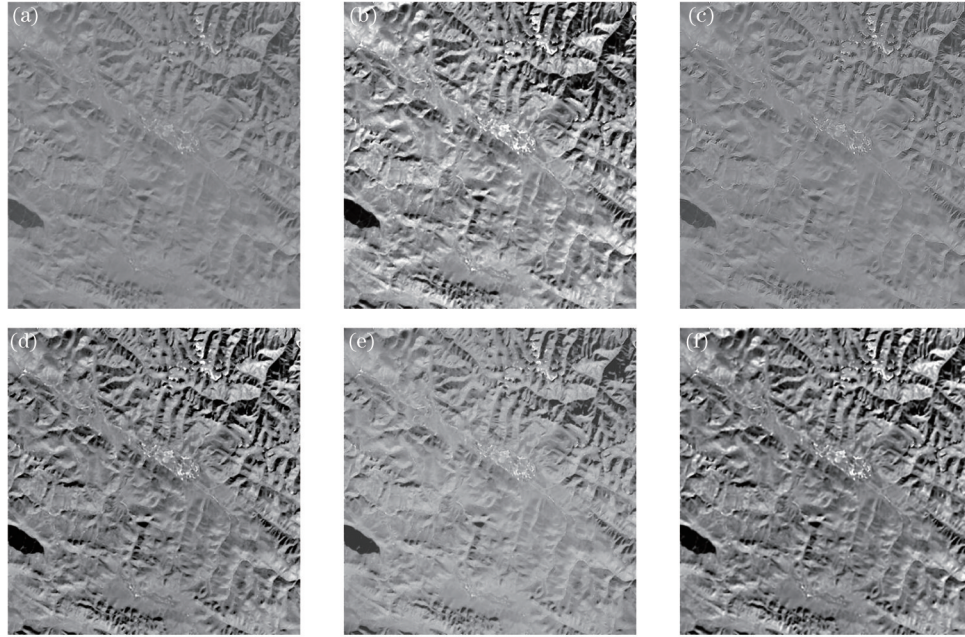


图4 遥感探矿图像的5种增强方法结果比较。(a)原始图像;(b)双向直方图均衡方法;(c)NSCT方法;(d)MSR方法;(e)离散小波变换和Retinex方法;(f)提出的增强方法

Fig.4 A comparison of results of five enhancement methods on remote sensing prospect image.(a)Original image;(b)histogram double equalization method;(c)NSCT method;(d)MSR method;(e)stationary wavelet transform and Retinex method;(f)proposed method 且能进一步增强信息熵,使图像的细节更为丰富,视觉效果更好。与其他几种增强方法相比,提出的增强方法在综合性能上更为优越。

表1 5种增强方法的定量评价指标

Table 1 Quantitative evaluation indices of five enhancement methods for three images

Three images	Evaluating indicator	Original image	Histogram double equalization method	NSCT method	MSR method	Stationary wavelet transform and Retinex method	Proposed method
Hyperspectral food image	Contrast	1.0132×10^3	4.9636×10^3	1.0687×10^3	2.6010×10^3	1.3210×10^3	2.7106×10^3
	Information entropy	4.1388	4.0556	4.1918	4.9993	4.3600	5.0743
Remote sensing land image	Contrast	0.8499×10^3	3.2677×10^3	0.8755×10^3	2.0913×10^3	2.1049×10^3	2.3573×10^3
	Information entropy	4.7726	4.6425	4.7871	5.0727	5.1639	5.1978
Remote sensing prospect image	Contrast	0.3885×10^3	2.8724×10^3	0.4729×10^3	2.2829×10^3	1.1424×10^3	2.4665×10^3
	Information entropy	4.3305	4.2539	4.4201	5.1053	4.7663	5.2277

5 结 论

提出了一种基于多尺度Retinex和NCPSO优化的NSCT域图像增强方法。它结合了NSCT对图像良好的细节保留性和方向表示性,将图像分为低频分量和多个不同方向的高频分量;然后利用混合灰度变换函数的多尺度Retinex有效地显示出不同光照条件下隐藏在阴影区域中的图像内容的优势,对低频分量系数进行调整,可以有效地增强图像的整体对比度和改善图像的视觉效果;同时,利用带阈值的非线性增益函数对高频分量的边缘进行增强、对噪声进行抑制,并利用兼顾对比度和信息熵的定量综合评价函数作为NCPSO的适应度函数,寻找非线性增益函数涉及的最优参数,进一步提升增强方法的性能。利用高光谱食品图像、遥感土地图像和遥感探矿图像对增强方法进行实验,并与双向直方图均衡方法、NSCT方法、多尺度Retinex方

法、平稳小波变换和 Retinex 方法 4 种增强方法进行了比较。结果表明:提出的增强方法能提高图像的对比度和信息熵,增强图像的整体视觉效果,为后续准确地进行图像分割和识别奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 L Meylan, S Susstrunk. High dynamic range image rendering with a retinex-based adaptive filter [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(9): 2820-2830.
- 2 J Jung, H Park, S Kang, *et al.*. Measurement of initial motion of a flying golf ball with multi-exposure images for screen-golf [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, 56(2): 516-523.
- 3 A Buades, B Coll, J M Morel. Nonlocal image and movie denoising [J]. International Journal of Computer Vision, 2008, 76(2): 123-139.
- 4 Chen Qian, Bai Lianfa, Zhang Baomin. Histogram double equalization in infrared image [J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2003, 22(6): 428-430.
陈 钱, 柏连发, 张保民. 红外图像直方图双向均衡技术研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(6): 428-430.
- 5 Zhao Wenda, Zhao Jin, Zhao Fan, *et al.*. Variable infrared image enhancement of bimodal Gaussian function specification [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0309002.
赵文达, 赵 建, 赵 凡, 等. 双峰高斯函数规定化的变分红外图像增强[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0309002.
- 6 H Demirel, G Anbarjafari. Image resolution enhancement by using discrete and stationary wavelet decomposition [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(5): 1458-1460.
- 7 H Demirel, C Ozcinar, G Anbarjafari. Satellite image contrast enhancement using discrete wavelet transform and singular value decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(2): 333-337.
- 8 Gao Shibo, Cheng Yongmei, Zhao Yongqiang, *et al.*. Infrared image denoising based on stationary wavelet transform using tensor [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1818-1823.
高仕博, 程咏梅, 赵永强, 等. 基于张量的平稳小波变换红外图像去噪 [J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1818-1823.
- 9 Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Shangqian, *et al.*. Nonlinear enhancement algorithm for infrared image based on second generation wavelet transform [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 353-356.
秦翰林, 周慧鑫, 刘上乾, 等. 基于二代小波变换的红外图像非线性增强算法 [J]. 光学学报, 2009, 29(2): 353-356.
- 10 Zhang Lin, Zhu Zhaoda. A novel nonlinear method for image enhancement based on non-subsampled contourlet transform [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(8): 1786-1790.
张 林, 朱兆达. 基于非降采样 Contourlet 变换的非线性图像增强新算法 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 1786-1790.
- 11 Liang Dong, Yin Bing, Yu Mei, *et al.*. Image enhancement based on the non-subsampled contourlet transform and adaptive threshold [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3): 527-530.
梁 栋, 殷 兵, 于 梅, 等. 基于非抽样 Contourlet 变换的自适应阈值图像增强算法 [J]. 电子学报, 2008, 36(3): 527-530.
- 12 Wu Yiquan, Yin Jun, Zhu Li, *et al.*. Method for improve reconstructed image quality of digital hologram based on SRAD and NSCT [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209024.
吴一全, 殷 骏, 朱 丽, 等. 基于 SRAD 和 NSCT 的数字全息再现像像质改善方法 [J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209024.
- 13 Shi Dan, Li Qingwu, Fan Xinnan, *et al.*. Underwater image enhancement algorithm based on contourlet transform and multi-scale retinex [J]. Laesr & Optoelectronics Progress, 2010, 47(4): 041001.
石 丹, 李庆武, 范新南, 等. 基于 Contourlet 变换和多尺度 Retinex 的水下图像增强算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(4): 041001.
- 14 J H Jang, S D Kim, J B Ra. Enhancement of optical remote sensing images by subband-decomposed multiscale retinex with hybrid intensity transfer function [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(5): 983-987.
- 15 J H Jang. Contrast-enhanced fusion of multisensor images using subband-decomposed multiscale retinex [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(8):3479-3490.
- 16 Fang Zhijun, Liu Xinyun, Wu Shiqian, *et al.*. The multi-scale retinex algorithm for image enhancement based on sub-band weighting fusion [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2013, 48(11): 93-98.
方志军, 刘心韵, 伍世虔, 等. 基于子带加权融合的多尺度 Retinex 图像增强算法 [J]. 山东大学学报 (理学版), 2013, 48(11): 93-98.
- 17 Zhan Bichao, Wu Yiquan, Ji Shouxin. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet transformation and retinex [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2788-2794.

- 占必超, 吴一全, 纪守新. 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法 [J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2788-2794.
- 18 Wang Longzhi, Yao Xiaotian, Meng Zhuo, *et al.*. An optical coherence tomography attenuation compensation algorithm based on adaptive multi-scale retinex [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1204001.
王龙志, 姚晓天, 孟 卓, 等. 基于自适应多尺度 Retinex 的光学相干层析图像衰减补偿算法 [J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1204001.
- 19 Li Guo, Gong Zhihui, You Hui, *et al.*. Application of improved adaptive genetic algorithms in image fuzzy enhancement [J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(2): 77-79.
李 国, 龚志辉, 尤 辉, 等. 改进的自适应遗传算法在图像模糊增强中的应用 [J]. 测绘科学, 2012, 37(2): 77-79.
- 20 Li Linyi, Li Deren. Research on particle swarm optimization in remote sensing image enhancement [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2010, 27(2): 116-119.
李林宜, 李德仁. 粒子群优化算法在遥感影像增强中的应用 [J]. 测绘科学技术学报, 2010, 27(2): 116-119.
- 21 Li Dan, Wang Hongtao. Fuzzy image enhancement based on dual chaotic quantum particle swarm algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 101102.
李 丹, 王洪涛. 基于双混沌量子粒子群算法的模糊图像增强研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 101102.
- 22 Wu Yiquan, Yin Jun. Reconstructed image enhancement of digital holography in contourlet domain based on particle swarm optimization [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0809002.
吴一全, 殷 骏. 粒子群优化的 Contourlet 域数字全息再现像增强 [J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0809002.
- 23 Jia Dongli, Zhang Jiashu. Niche particle swarm optimization combined with chaotic mutation [J]. Control and Decision, 2007, 22(1): 117-120.
贾东立, 张家树. 基于混沌变异的小生境粒子群算法 [J]. 控制与决策, 2007, 22(1): 117-120.
- 24 E H Land. Recent advances in retinex theory and some implications for cortical computations: color vision and the natural image [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1983, 80(16): 5163-5169.

栏目编辑: 何卓铭