

基于 HVS 结构相似度的极化 SAR 图像质量评价方法*

刘锦帆^{1,2} 徐浩煜³ 梁兴东¹ 李炎磊¹

(1. 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100190;
3. 中国科学院上海高等研究院 上海 201210)

摘要: 通过人工解译对极化 SAR 图像进行地物分类,可提高测绘产品的生产效率。极化 SAR 图像质量评价是一项重要工作,然而传统的评价方法在针对极化 SAR 图像时未能充分考虑极化 SAR 图像的伪彩色特征与边缘信息特征,也未能满足人眼视觉系统(HVS)的特殊需求。因此,提出了一种基于 HVS 结构相似度(SSIM)的极化 SAR 图像质量评价方法。该方法对传统算法进行了改进,综合考虑了 HVS 特性与极化 SAR 图像的特点。实验证明该方法符合 HVS 的特性,而且能够针对极化 SAR 图像的特点给出准确的评价结果。

关键词: 极化 SAR; 图像质量评价; 结构相似度; 人眼视觉系统(HVS); Canny 算子

中图分类号: TN959.74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Improved method of polarimetric SAR image quality assessment based on human visual system and structural similarity

Liu Jinfan^{1,2} Xu Haoyu³ Liang Xingdong¹ Li Yanlei¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 3. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

Abstract: To improve the efficiency of surveying and mapping production, manual interpretation of polarimetric synthetic aperture radar (SAR) images have been widely used in the classification of surface features. Polarimetric SAR image quality assessment has become a significant study field. However, ordinary image quality assessment methods failing to take full account of the characteristics of pseudo-color and edge detection in polarimetric SAR images, neither takes account of the special needs of human visual system (HVS). Thus we advance a method of polarimetric SAR image quality assessment based on HVS and Structural Similarity (SSIM). It is improved by the ordinary image quality assessment and combines the feature of HVS and polarimetric SAR images. It is demonstrated by the experiments that this method could fit the features of HVS and provide an accurate image quality assessment focusing on the characteristics of polarimetric SAR images.

Keywords: polarimetric SAR; quality assessment of image; structural similarity; human visual system(HVS); Canny operator

1 引言

合成孔径雷达^[1]因其全天时、全天候的工作特点和一定的地物穿透能力,被广泛地应用于测绘、侦察等诸多领域。目标散射特性与电磁波的极化方式有关,极化 SAR 可以获取目标的全部极化信息,从而极大地提高了对目标特征信息的获取能力^[2]。极化伪彩合成图像可用于地物分类,在测绘产品生产过程中可辅助人工解译,从而降低了外

业的工作量,提高了生产效率。为了降低人工解译的误判率和虚警率,方便在使用极化 SAR 图像之前对其质量进行把关,基于人眼视觉^[3]的极化 SAR 图像质量评价方法具有重要的应用价值。

自国际电信联盟(international telecommunications union, ITU)于1974年发布了第一个关于电视图像主观评价方法的建议书 ITU-R BT. 500-11^[4]以来,人们对 HVS 的认识逐渐加深,许多基于 HVS 模型的图像质量评价方法相继

收稿日期:2015-05

* 基金项目:上海市科学技术委员会(13511503200)资助课题

涌现。1974年 Mannos J 和 Sakrison D 提出的对比度敏感函数(contrast sensitivity function, CSF)的显式表达式^[6]开启了基于 HVS 图像质量评价的先河。随后建立的基于 HVS 的评价模型包括 Daly 的基于皮层变换通道分解的 VDP(visible differences predictor)模型^[6], Lubin 的 Sarnoff JND 模型(just noticeable difference)等^[7-8]。

随着光学图像评价方法的不断发展, SAR 图像质量评价方法的研究也逐渐开展起来。通用的评价指标主要有均方误差(mean square error, MSE)^[9]和峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)^[1]。此外, Brown, LMJ 和 Smith, D J 提出了基于均匀区域相关函数对 SAR 的复杂背景区域进行评价的方法, Chen Y 等人的则是利用自动目标识别(automatic target recognition, ATR)的性能指标来评估 MSTAR(moving and stationary target acquisition and recognition)^[10-11]。值得一提的是, 2004 年, Wang Zhou 和 Alan Bovik 针对 SAR 图像的实际识别能力进行建模, 提出了结构相似度(SSIM)的图像质量评价方法^[12]。2010 年刘阳等人提出了基于对比敏感度函数(contrast sensitivity function, CSF)的小波域 SSIM 方法^[13], 2011 年, 韩国强等人利用梯度算子对 SSIM 算法进行了修正^[14], 这些方法进一步提高了 SSIM 算法在 SAR 图像评估方面的应用价值。

虽然近年来涌现了各种面向光学图像^[4-8]与单极化 SAR 图像的质量评价方法^[9-16], 但是全极化 SAR 图像质量评价方法的发展却相对较慢。全极化 SAR 数据经过处理得到的伪彩色图像具备更丰富的目标特征信息, 其视觉质量的评价在测绘领域有着重要的应用价值, 但是传统的单极化 SAR 图像质量评价方法未能充分考虑到全极化 SAR 伪彩色图像所具有的 HVS 特性^[17], 因此, 亟需对传统方法进行改进, 使其能够在满足人眼视觉需求前提下对极化 SAR 图像进行准确的评价。

提出了一种基于 HVS 结构相似度的极化 SAR 图像质量评价方法。这种评价方法首先将极化 SAR 伪彩图像进行分块处理, 划分为简单区域与复杂区域; 简单区域直接利用结构相似度的评价方法进行评价, 复杂区域使用基于小波分解^[18]的结构相似度评价方法进行评价^[19]; 最后根据极化 SAR 伪彩图像的特征, 对色彩丰富度与边缘特征进行分析, 确定块状区域的权重因子, 将分块区域的评价结果进行加权求和获得最终评价。仿真实验与实测数据均表明, 提出的评价方法符合 HVS 特性, 并且能够针对极化 SAR 图像具有伪彩信息的特点给出准确的评价结果。

2 SSIM 评价方法及其局限性

传统的基于图像像素的评价方法(如 MSE^[9]、PSNR^[1])虽然能够较好的度量图像的质量, 但是此类方法

很少考虑到人眼视觉对亮度、敏感度、对比度等参数的主观认知。近年来图像质量的评价方法研究取得了重大的进展, 其中 Wang Zhou 和 Alan Bovik 等人^[12]提出基于图像结构相似度(Structural Similitary, SSIM)的方法受到广泛的关注。本节对 SSIM 算法的原理进行了简述, 说明了极化 SAR 图像的特点, 并根据极化 SAR 图像的特点, 指出了 SSIM 算法在对极化 SAR 伪彩色图像进行评价时所具有的局限性。

2.1 SSIM 评价方法原理

图像质量评价方法一般以原始图像作为参考, 对同区域的待评价图像或者失真图像进行评价。假设 $\{\alpha_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 表示原始图像像素点集合, $\{\beta_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 表示待评价图像像素点集合。邻域期望值与邻域方差^[12]为:

$$\mu_\alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i \quad (1)$$

$$\mu_\beta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i \quad (2)$$

$$\sigma_\alpha^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \mu_\alpha)^2 \quad (3)$$

$$\sigma_\beta^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\beta_i - \mu_\beta)^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{\alpha\beta}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \mu_\alpha)(\beta_i - \mu_\beta) \quad (5)$$

用均值 (μ_α, μ_β) 来度量图像的亮度, 用标准差 $(\sigma_\alpha, \sigma_\beta)$ 来度量图像的对比度, 协方差 $\sigma_{\alpha\beta}$ 来度量图像的相似程度; 联合上述 3 种测度, 定义它们的亮度 $l(\alpha, \beta)$ 、对比度 $c(\alpha, \beta)$ 和结构信息 $s(\alpha, \beta)$ 如下^[12]:

$$l(\alpha, \beta) = \frac{2\mu_\alpha\mu_\beta + C_1}{\mu_\alpha^2 + \mu_\beta^2 + C_1} \quad (6)$$

$$c(\alpha, \beta) = \frac{2\sigma_\alpha\sigma_\beta + C_2}{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2 + C_2} \quad (7)$$

$$s(\alpha, \beta) = \frac{\sigma_{\alpha\beta} + C_3}{\sigma_\alpha\sigma_\beta + C_3} \quad (8)$$

式中: $C_i = (K_i L)^2$, L 为像素点灰度范围, 一般 $L = 255$, 且 $K_i \leq 1$ 为较小的常数, C_i 的作用是为了保证亮度、对比度和结构函数的分母接近零的时候结果的稳定性, 最后结合上述 3 种测度, 考虑 HVS 中量化而来的参考因素, 定义结构相似度 SSIM 为^[12]:

$$SSIM(\alpha, \beta) = [l(\alpha, \beta)]^p [c(\alpha, \beta)]^q [s(\alpha, \beta)]^r \quad (9)$$

一般情况下取 $p = q = r = 1$, 则 SSIM 可以简化为:

$$SSIM(\alpha, \beta) = l(\alpha, \beta) \cdot c(\alpha, \beta) \cdot s(\alpha, \beta) \quad (10)$$

2.2 极化 SAR 图像的特点

极化 SAR 图像在实际应用中有着重要的价值, 图 1 展示了一张 C 波段的伪彩色图像, 相比普通光学遥感图像与单极化 SAR 图像而言, 极化 SAR 图像具备以下两个非常重要的特征:

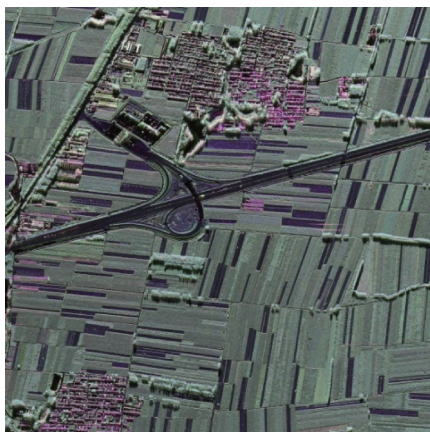


图1 C波段机载极化 SAR 图像

首先,极化 SAR 图像是伪彩色图像^[1-2]。由于极化 SAR 图像是利用多通道收发的工作方式,因此具备更加完整的目标散射特征信息。这种信息反映在 HH、HV、VH、VV 4 个通道的回波数据中。利用 Pauli 分解等方法,可以将不同通道的数据进行处理,从而获得伪彩色的图像^[1-2]。图像中色彩可以直接反映出目标的散射特征,通过色彩的对照,可以提高了测绘、识别的工作效率。因此,色彩的丰富程度是极化 SAR 图像最明显的重要特征之一。

其次,极化 SAR 图像中边缘特征信息十分重要。由于极化 SAR 图像和普通的光学遥感图像在色彩上存在着人眼认知的根本差异(例如光学图像农田是绿色的,其于图 1 中所展示的目标颜色并不相同)。因此,针对人眼视觉系统而言,其在判图过程中,目标的边缘信息更加符合人眼对目标的认知本能,而色彩信息则是方便颜色对照以便识别目标的材质、含水量等信息^[2]。

因此,极化 SAR 图像的色彩丰富程度越高,越可以提高图像中目标的识别能力;极化 SAR 图像的边缘特征越清晰,则越符合 HVS 的认知本能,提高人工解译的效率。对于极化 SAR 图像而言,这两点特征也是反映极化 SAR 图像质量的重要因素。

2.3 SSIM 算法的局限性

虽然近年来 SSIM 评价方法因其考虑到人眼视觉对亮度、敏感度、对比度等参数的主观认知而得到了深度的研究与广泛的应用,但是 SSIM 评价方法对于极化 SAR 图像的评价却存在一定的局限性,根据极化 SAR 图像的特点,该局限性主要表现在以下两个方面:

1) 色彩信息的局限性:极化 SAR 图像具备相当丰富的色彩信息,这种信息可以反映出目标的散射特性以便于识别。由于色彩信息是极化 SAR 图像区别于其他图像的重要方面,因此综合图像中不同区域的色彩丰富度分布^[20-21]对 SSIM 算法进行改进,可以使质量评价方法更加适应极化 SAR 图像的特征。

2) 边缘特征信息的局限性:极化 SAR 图像一般覆盖较为广阔的区域,边缘特征信息对于图像的识别来说起到

了决定性作用^[22]。因此,对于边缘特征信息而言:一方面需要更加关注极化 SAR 图像边缘特征的分布状况,对边缘特征信息分布较多的复杂区域与较少的简单区域进行不同的评价;另一方面对上述复杂区域的处理过程中,需要考虑高频与低频信息对 SSIM 算法各个分量的不同贡献,以便得到更加符合 HVS 特性的评价方案。

综上所述,只有综合了色彩丰富度以及边缘信息丰富程度两个特征,才能得到符合极化 SAR 图像特点的并且满足 HVS 特性的质量评价方法。

3 基于 HVS 结构相似性的极化 SAR 图像质量评价

基于 HVS 结构相似度的极化 SAR 图像质量评价方法的流程如图 2 所示。该方法针对传统 SSIM 算法的局限性进行了改进。

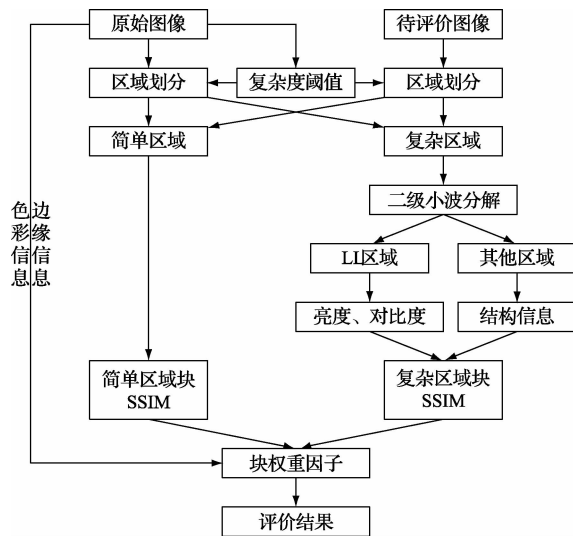


图2 本文评价方法流程

首先对图像进行了分块处理,划分为简单区域与复杂区域;其次,为了让评价方法更加符合 HVS 特性,对简单区域进行 SSIM 评价,对复杂区域进行小波分解并对不同频段区域进行分别评价,然后利用小波能量系数进行综合得到复杂区域的评价结果;再次,针对彩色信息的局限性采用了计算色彩丰富度的方法,针对边缘分布信息的局限性采用了 Canny 算子边缘提取的方法,将色彩信息与边缘信息进行综合得到块权重因子。最后,利用权重因子对每个区域的评价结果进行综合,得到最终的评价结果。

本节从 3 个方面阐述了基于 HVS 结构相似度的极化 SAR 图像质量评价方法原理,包括图像分块处理、基于 HVS 的块区域质量评价以及满足极化 SAR 图像特征的权重因子的确定。

3.1 图像分块处理

针对原始极化 SAR 图像和待评价图像进行预处理,将图像划分为若干区域,每两个相邻的块区域处于半重叠的状态。这种分块处理的方法:一方面能够对整片区域进

行一定程度的宏观区域划分,降低后期评价中出现的块效应;另一方面也能够降低算法的复杂度,提高计算效率。

假设共有 M 个大小为 $2n \times 2n$ 块状区域,块与块之间的间距为 n ,如此半重叠的分块方式可以降低块效应带来的区域局限性。我们想区分不同块区域的复杂程度,而复杂程度很大程度上取决于该区域灰度值的离散程度。所以类比信道容量的定义方式,定义第 k 个块状区域局部复杂度:

$$C_k = \log(1 + \sigma_k^2) \quad (11)$$

式中: $k = 1, 2, \dots, M$, σ_k 为第 k 块区域灰度值的标准差。

设定被分块之前的整幅图像的复杂度 C 为阈值,将 C_k 与 C 进行比较:复杂度 $C_k \geq C$ 的块状区域组成复杂区域, $C_k < C$ 的区域组成简单区域,以方便对不同的区域使用不同的评价方法。

3.2 基于 HVS 的块区域质量评价

考虑到 HVS 对图像质量评价的影响,利用改进的 SSIM 算法对图像质量进行评价。HVS 对高频复杂区域具有高敏感度的特性,结构信息特征主要通过高频信息得以体现。对极化 SAR 图像经过分块处理划分成简单区域与复杂区域之后,对不同的块状区域使用不同的质量评价方法:

对于简单的块状区域,由于其细节信息相对较弱,采用基于结构相似度的图像质量评价方法^[12] 计算 $SSIM_{simple}$ 。

对于复杂的块状区域:一方面该区域具备较多的细节信息,在实际的应用中起着主导地位;另一方面人类视觉对细节信息的关注程度较高,结构特性很大程度上依赖于复杂区域的细节信息。小波变换^[18] 同时具有多尺度、多方向性和空间局部特性,因此使用基于小波变换的 SSIM 算法^[19] 进行评价。

首先利用小波分解^[18-19] 将复杂区域分为不同频段:高频子带(HL、LH、HH)较好的表征了图像在不同的空间空间频率与方向上的细节结构信息 $s(x, y)$;低频子带(LL)则保留了图像的亮度 $l(\alpha, \beta)$ 与对比度 $c(\alpha, \beta)$ 信息。

基于上述的分析,利用 2 级小波分解后的不同子带对极化 SAR 图像的不同块区域进行质量评价。用 $\{\alpha_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 表示原始块状区域的像素点集合, $\{\beta_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 表示待评价块状区域的像素点集合。经过 2 级小波分解后,得到其子带序列:

$$\{\alpha_{LL}, \alpha_{LH_1}, \alpha_{HL_1}, \alpha_{HH_1}, \alpha_{LH_2}, \alpha_{HL_2}, \alpha_{HH_2}\} \quad (12)$$

$$\{\beta_{LL}, \beta_{LH_1}, \beta_{HL_1}, \beta_{HH_1}, \beta_{LH_2}, \beta_{HL_2}, \beta_{HH_2}\} \quad (13)$$

利用 2 级分解后的子带中的高频子带计算计算 $s(\alpha_H, \beta_H)$,改进该算法^[19] 中高频子带的结构失真度,考虑到小波分解后的非低频区域分布特征,定义此时的结构失真表达式为:

$$s(\alpha_H, \beta_H) = \sum_{j=1}^2 (\lambda_{LH_j} \cdot s(\alpha_{LH_j}, \beta_{LH_j}) + \lambda_{HL_j} \cdot s(\alpha_{HL_j}, \beta_{HL_j}) + \lambda_{HH_j} \cdot s(\alpha_{HH_j}, \beta_{HH_j})) \quad (14)$$

式中各个高频子带的权重系数可由每个高频子带能量的分布^[23] 情况决定。

以 λ_{LH_1} 的计算方法为例,原始图像区域经过一级小波

分解后, LH 分量的小波系数总能量为^[23]:

$$E_{LH_1} = \sum_{i=1}^{N/4} W_{LH_1}(i)^2 \quad (15)$$

式中: $W_{LH_1}(i)$ 为一级小波分解的 LH 分量中第 i 个像素点的小波分解高频系数。利用上式分别计算每级小波分解中水平、垂直和对角 3 个方向的高频分量的总能量:

$$\{E_{LH_1}, E_{HL_1}, E_{HH_1}, E_{LH_2}, E_{HL_2}, E_{HH_2}\} \quad (16)$$

定义图像高频区域总能量 E 为:

$$E = \sum_{j=1}^2 (E_{LH_j} + E_{HL_j} + E_{HH_j}) \quad (17)$$

利用 E 得出归一化的高频子带的权重系数 λ_{LH_1} :

$$\lambda_{LH_1} = E_{LH_1} / E \quad (18)$$

其他高频子带的权重系数可以通过同样的方式计算得出。最后利用低频子带计算 $l(\alpha_{LL}, \beta_{LL})$ 和 $c(\alpha_{LL}, \beta_{LL})$, 结合式(14),得到复杂块状区域的 SSIM:

$$SSIM_{complex}(\alpha, \beta) = l(\alpha_{LL}, \beta_{LL}) \cdot c(\alpha_{LL}, \beta_{LL}) \cdot s(\alpha_H, \beta_H) \quad (19)$$

3.3 极化 SAR 图像特征与权重因子的确定

经过图像分块处理与块状区域质量评价之后,得到了划分的简单块状区域与复杂块状区域的质量评价结果矩阵。但是仍然需要对原始图像中各个块状区域在整幅极化 SAR 图像质量评价中的权重加以确定以便获得准确的评价结果。

3.3.1 伪彩色影响因子

极化 SAR 图像经过处理合成一般得到伪彩色图像,伪彩色图像色彩的丰富性正是其用来区分地不同地物信息的优势所在,而 HVS 在接受彩色图像信号时更会关注色彩的丰富程度。彩色图像一般通过 RGB 三通道的数据进行合成得到^[20],需要利用这 3 个通道的数据将色彩丰富程度信息进行量化。

Hasler 和 Susstrunk 提出了一种在 RGB 空间计算色彩丰富程度的方法^[21]。假设原始图像第 k 个块状区域的红色、绿色、蓝色分量分别为 $R(k), G(k), B(k)$, 则色彩的丰富程度可定义为^[21]:

$$M_k = \sqrt{\sigma_{a(k)}^2 + \sigma_{\beta(k)}^2} + \lambda_s \sqrt{\mu_{a(k)}^2 + \mu_{\beta(k)}^2} \quad (20)$$

式中: $a(k) = R(k) - G(k), \beta(k) = (R(k) + G(k))/2 - B(k), \lambda_s = 0.37$ 为影响因子, μ 代表均值, σ 代表方差。

归一化可得到伪彩色影响因子 m_k :

$$m_k = \frac{M_k}{\max_k \{M_k\}} \quad (21)$$

式中: m_k 越接近 1,代表该区域的色彩丰富程度越高,反之其色彩越单调。

3.3.2 边缘信息影响因子

极化 SAR 图像与普通光学图像不同,人眼在观察后者的时候会根据图像的纹理进行分类,纹理在理解图像区域信息中起着重要作用。但是,在极化 SAR 图像的应用中,纹理信息并不能对分辨区域起到决定性作用。例如,极化 SAR 图像中 HVS 无法直接根据农田的色彩与灰度

信息直接判断目标农田是否种植农作物,相比较之下图像的边缘特征信息却在工作人员进行解析与判别时起到了重要的作用。因此极化 SAR 图像中边缘信息量越大,其区域相对而言越重要。

利用微分算子等进行边缘提取是目前较为常用的方法^[24]。考虑到对边缘的准确定位、边缘线性特征以及算法的复杂程度等因素,利用 Canny 算子^[22]提取极化 SAR 图像的边缘信息。极化 SAR 图像的边缘有方向和幅度两个特性,一般认为沿边缘走向的灰度变化平缓而垂直于边缘走向的灰度变化剧烈。而边缘提取的本质就是在灰度变化较为剧烈的方向上求一阶导数(微分算子)^[24]。

对图像进行 Canny 算子边缘提取,首先,对经过处理后的图像利用梯度算子在方位、距离向进行分量计算得到每个像元的梯度幅值和方向;然后,对梯度幅值进行“非极大抑制”,通过 4 个方向角的梯度幅值的比较,将中心点不大于最大幅值方向的点置零,此步之后宽屋脊的区域被细化为只有单像素点宽。

假设一共有 M 个块状区域,将原始图像第 k 个块状区域的 Canny 边缘提取结果进行求和,并进行均值归一化处理,可以得到边缘信息归一化影响因子 e_k :

$$e_k = \frac{n_{k-canny}}{\max_k \{n_{k-canny}\}} \quad (22)$$

3.3.3 权重因子与评价结果

以上对原始图像分块区域的伪彩色影响因子、边缘信息影响因子进行了分析逐一分析,这些影响因子共同决定了每个块状区域在总体上对整幅图像的影响权重。定义权重因子 $\bar{\omega}_k$ 为:

$$\bar{\omega}_k = \left(\frac{m_k^{-1} + e_k^{-1}}{2} \right)^{-1} \quad (23)$$

对 $\bar{\omega}_k$ 进行归一化处理得到最终的权重因子 ω_k :

$$\omega_k = \frac{\bar{\omega}_k}{\sum_{k=1}^M \bar{\omega}_k} \quad (24)$$

最后利用权重因子 ω_k ,对块区域的评价结果进行加权,得到最终的极化 SAR 图像质量评价指标:

$$Q = \sum_{k=1}^M [\omega_k \cdot SSIM_k(\alpha, \beta)] \quad (25)$$

Q 为最终的评价结果,其数值越大表示极化 SAR 图像信息越丰富,质量越高。

上述评价方法中图像的简单区域和复杂区域通过不同方式的计算得出了各自的图像结构相似度,融合得到了最终的质量评价指标,这种方法考虑了 HVS 特性中伪彩信息与边缘信息对极化 SAR 图像质量评价的影响,可以对极化 SAR 伪彩色图像进行符合 HVS 特性的评价。

4 实验结果与分析

4.1 仿真实验与分析

实验数据采用 C 波段机载极化 SAR 系统采集的全极

化数据,图像尺寸为 4096×4096 。数据经过定标、滤波、分解等预处理后,获得如图 1 所示的极化伪彩合成图像。图像中明显能看到中间的高速公路,中上方和左下方有明显的集中村落区域,其他部分除少数树林区域外,均为耕地区域(主要作物为花生与玉米)。在仿真实验中对原始图像进行符合 SAR 图像降质特点的处理,得到待评价图像,评价图像质量并对结果进行分析。

1) 对原始图像进行分块处理,划分为 256×256 大小的半重叠块,块与块之间的距离为 128,共将图像分为 32×32 个块状区域。对块区域进行复杂度计算,划分简单区域与复杂区域。

2) 对原始图像不同块的权重因子进行计算,先计算出各个区域块的色彩丰富度信息,得出伪彩色影响因子;然后根据 Canny 算子进行边缘提取,得出边缘影响因子。最后计算出权重因子。图 3 展示了原始图像(图 1)中上述因子的分布特征信息。

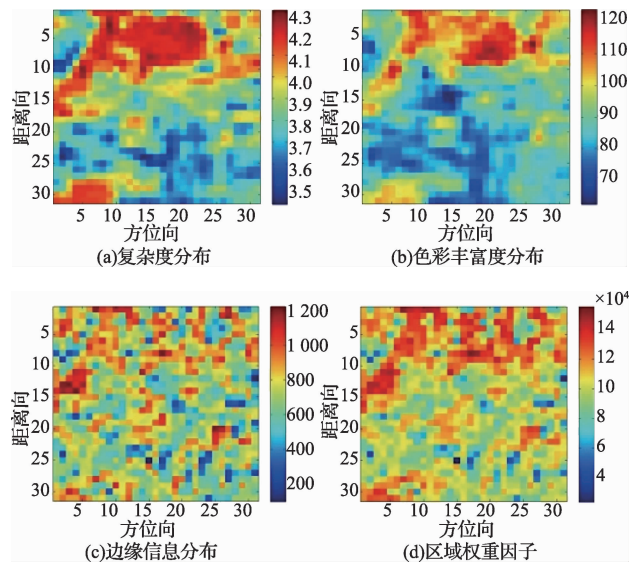


图 3 极化伪彩图像分布特征信息

3) 对原始伪彩图像进行相关失真操作,得到具备典型特征各个类型的降质图像^[25-27]。利用对本文实验方法进行验证,并对实验结果进行分析。(实验中由于 SSIM 3 个分量的分母均不接近零,因此实验中取 $K_i = 0$)

为了验证本文方法,共设计了如下 3 个实验。

1) 实验 1: 评价方法有效性验证

极化 SAR 图像降质的原因有很多,例如数据的相干斑噪声、运动补偿等因素均可以导致其质量降低。根据典型的 SAR 图像降质模型,利用仿真的方法对图像进行不同程度的降质^[25]。假设回波数据的线性退化降质较轻,但是收到斑点噪声污染较重。对原始图像先位移 r 个像素、运动角度固定为 20° 的运动模糊降质^[26]并参入标准差为 σ 的随机噪声。然后被方差为 σ_s^2 的 speckle 噪声污

染^[27]。分别取不同的降质参数值如图4所示,验证本文方法的有效性。

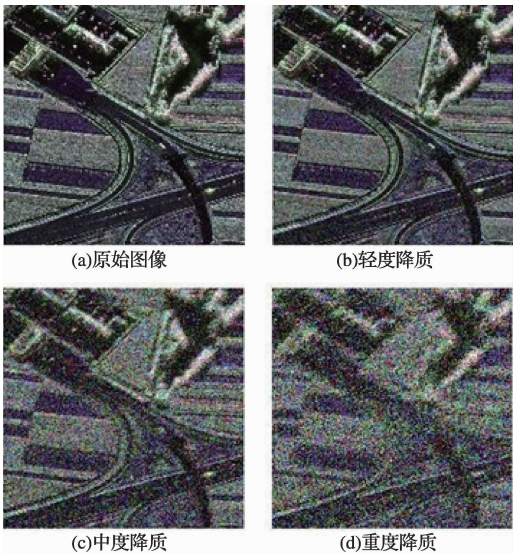


图4 原始图像以及降质图像图像切片

根据仿真实验得到的对照表(如表1所示)可以看出,本文方法得到的结果符合其他客观评价的结果趋势,并且该方法具备更高的质量数值跨度。

表1 仿真实验1的图像评价结果

参数指标	原始图像	轻度降质	中度降质	重度降质
平移量	0	5	20	40
随机噪声	无	0.01	0.03	0.05
标准差				
Speckle	无	0.01	0.05	0.1
噪声方差				
MSE	0	0.017 3	0.020 8	0.039 8
PSNR	无穷	27.32	22.71	17.69
SSIM	1.000	0.928	0.873	0.802
本文算法	1.000	0.858	0.672	0.481

2)实验2:评价方法分块优势验证

为了更好地验证本文的方法较之传统方法更加具有关注复杂区域的优势,截取了目标图像(图1)中的部分区域。对这一区域的不同部分分别进行降质处理,处理方法同实验1的中度降质方法与参数。得到图5所示的特定区域降质的图像切片。其中,图5(b)对左上角高频复杂区域进行了降质处理,而图5(c)对右上角同等面积大小的低频简单区域进行了降质处理。利用MSE、PSNR、SSIM和本文算法对这组图像进行评价,可以得到表2的实验结果。通过表2可以看出,传统的算法缺乏对具有边缘细节信息的复杂区的敏感度,而本文分块加权的处理方法更符合HVS对该典型区域的敏感特性,与其他方法相比具有一定的优势。

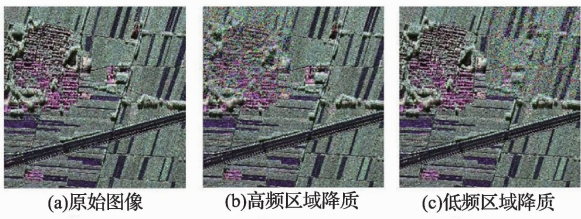


图5 不同复杂度区域降质处理后的图像切片

表2 仿真实验2的图像评价结果

评价方法与指标	原始图像	高频区域降质图像	低频区域降质图像
MSE	0	0.019 2	0.018 8
PSNR	无限大	24.32	24.33
SSIM	1.000	0.892	0.899
本文算法	1.000	0.563	0.724

3)实验3:评价方法的伪彩色优势验证

全极化SAR数据经过处理后得到的伪彩色图像是区别于单极化SAR图像的重要特征。伪彩色信息表征了目标的散射特征信息,为图像解译提供了更加准确的信息。因此,针对极化SAR的伪彩色特性,进行了仿真实验。图6(a)表示原始的图像切片,对其进行中度降质(见实验1),得到图6(c)中的待测伪彩色图像。再将极化SAR数据中单通道数据(HH)进行相同的降质处理,得到图6(b)。利用MSE、PSNR、SSIM和算法对这组图像进行评价,可得到表3的实验结果。通过表3可以看出,本文提出的方法与传统方法相比充分地考虑到极化SAR图像的伪彩色因素,评价的结果更加全面地反映出极化SAR图像质量的水平。

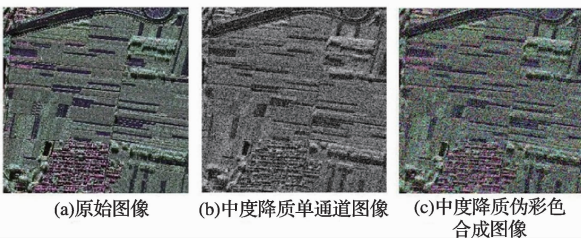


图6 经相同降质处理后的单通道图像与伪彩色合成图像

表3 仿真实验3的图像评价结果

评价方法与指标	原始图像	单通道降质图像	伪彩色降质图像
MSE	0	0.020 2	0.020 7
PSNR	无限大	22.53	22.59
SSIM	1.000	0.862	0.867
本文算法	1.000	0.398	0.663

4.2 实测数据评价与分析

利用 C 波段实测数据图像为原始图像,相同区域的 L 和 P 波段图像为待评价图像如图 7 所示,使用不同的评价方法并对这些方法的评价结果表 4 进行分析。

1) 以 C 波段的分辨能力与图像质量作为参考标准,相同大小目标区域的 P 与 L 波段图像质量有:C 波段图像最佳,P 波段图像次之,L 波段图像最差。通过表 4 的评价结果可以看出,基于 SSIM 的算法比传统的 PSNR 等指标更加切实的反映出图像的质量等级,质量差异也有更为明显的体现。

2) 对第 1、2 两组切片 P 波段图像进行纵向比较,即算法内部的比较。根据表 4 数据,比较 A1 (图 7(b)) 和 B1 (图 7(e)) 的数据,可以看出 SSIM 给出的结果是 A1 优于 B1 (即图 7 中(b)质量优于图 7(e)),;而本文的评价方法给出了相反的评价结果(即图 7 中(b)质量劣于图 7(e))。观察图像切片可以看出,虽然 A1 中包含了众多目标信息,但是也有部分复杂区域(如公路旁的村庄、树木)边缘辨识度和色彩辨识度不高的问题。而 B1 图像即使目标为村庄农田的简单信息,但是边缘信息清楚可见,色彩辨识度也相对较高。表 4 中本文的评价结果更符合极化伪彩色图像色彩与边缘的实际情况。

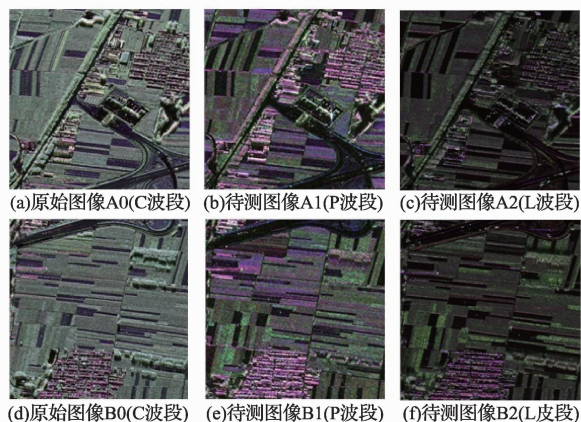


图 7 实测数据中原始图像与待测图像切片

表 4 C、P、L 波段实测数据评价结果

图像名称	MSE	PSNR	SSIM	本文算法
原始图像	0.000 0	无穷大	1.000	1.000
待测图像 A1	0.055 4	12.56	0.400	0.280
待测图像 A2	0.109 6	9.60	0.060	0.053
待测图像 B1	0.041 7	13.80	0.365	0.308
待测图像 B2	0.085 1	10.70	0.024	0.029
待测图像 C1	0.059 8	12.23	0.338	0.274
待测图像 C2	0.122 5	9.12	0.051	0.047
待测图像 D1	0.045 4	13.43	0.270	0.198
待测图像 D2	0.090 5	10.43	0.061	0.064

3) 对第 2 两组切片 L 波段与 P 波段图像进行横向比较,即算法之间的比较。B1 (图 7(e)) SSIM 算法和本文算

法的评价结果分别为 0.365 与 0.308,本文算法数值偏低; B2 (图 7(f)) 给出的结果则分别是 0.024 与 0.029,本文算法给出的结果偏高。整体观察 B1 (图 7(e)) 和 B2 (图 7(f)), 可以看到 B2 的图像边缘比较清晰,而且没有较多的色彩混叠区域,整体视觉效果相对 L 波段的平均水平较好;但是 B1 图像左上方色彩较为模糊,而且左上方与右侧部分区域的边缘信息不太明显,整体视觉效果相对 P 波段的平均水平较差。所以表 4 中本文给出的评价结果更符合 HVS 的主观感受。

5 结 论

提出了基于 HVS 结构相似度的极化 SAR 图像质量评价方法。分析了传统 SSIM 评价方法的局限性,提出了符合 HVS 特性并适用于极化 SAR 图像的评价方法。该方法首先利用分块处理与小波分解对极化 SAR 图像进行预处理;然后对不同的块区采用不同方式的 SSIM 评价方法;最后根据极化 SAR 图像的伪彩色因子与边缘信息因子计算块区域权重,得出符合 HVS 特性的极化 SAR 图像质量评价结果。仿真与实测数据均表明该方法符合 HVS 特性,能够根据极化 SAR 数据的色彩丰富度、边缘信息特征等因素,对极化 SAR 图像质量进行有效的、准确的评价。

参 考 文 献

- [1] CUMMING I G, WONG H C. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation [M]. 北京:电子工业出版社,2007:2-11.
- [2] 张锐,洪峻,明峰,等. 基于极化相似度的全极化 SAR 自动目标识别算法[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(5):24-27.
- [3] 臧艳军,李素梅,卫津津,等. 影响立体图像舒适度的亮度范围测定[J]. 电子测量技术,2012,35(2):59-64.
- [4] ITU. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures, ITU-RREC. BT. 500-12[S]. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, 2009:11-32.
- [5] MANNOS J, SAKRISON D. The effects of a visual fidelity criterion of the encoding of images[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, 20(4):525-536.
- [6] 雷斌,丁赤飏. 一种基于 SAR 图像视觉特征的改进像素掩蔽方法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(11):37-41.
- [7] LUBIN J, FIBUSH D. Sarnoff JND Vision Model [R]. G-2.1.6 Compression and Processing Subcommittee, 1997:2-33.
- [8] 王欣,洪峻,明峰,等. 机载 ATI-SAR 基线定标方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(5):23-27.
- [9] 连学强,丁兴号,闫敬文. 基于无下采样 Contourlet 变换的 SAR 图像去噪[J]. 仪器仪表学报,2008, 29(3):512-516.

- [10] 李文臣,陆洪涛,宋胜利,等. SAR 图像质量外场试验与评估技术[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(6): 613-617.
- [11] CHEN Y, CHEN G, BLUM R S, et al. Image quality measures for predicting automatic target recognition performance[C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2008:1-9.
- [12] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4):600-612.
- [13] 刘阳,代大海,王雪松. 基于小波域加权结构相似度的 SAR 干扰效果评估[J]. 信号处理, 2010, 26(10): 1577-1582.
- [14] 韩国强,李永祯,王雪松,等. 基于修正 SSIM 的 SAR 干扰效果评估方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3):711-716.
- [15] 韩征,苏志刚,韩萍,等. 基于样本正交子空间的 SAR 目标识别方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(11):2581-2584.
- [16] 刘爱平,付琨,尤红建,等. 基于 MAR-MRF 的 SAR 图像分割方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(11): 2557-2562.
- [17] 杨杨,明军. 色度参数计算方法的研究[J]. 国外电子测量技术, 2006, 25(12):12-15.
- [18] ANTONINI M, BARLAUD M, MATHIEU P, et al. Image coding using wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, 1(2): 205-220.
- [19] YANG C, GAO W, PO L. Discrete wavelet transform-based structural similarity for image quality assessment[C]. IEEE International Conference on Image Processing, 2008(1):377-380.
- [20] 余磊,靳国旺,徐青,等. 基于非线性编码和 $l\alpha\beta$ 变换的 SAR 图像伪彩色增强[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 2(3):192-195.
- [21] HASLER D, SUESSTRUNK S E. Measuring colorfulness in natural images[J]. Human Vision & Electronic Imaging VIII, 2003:87-95.
- [22] 杨丽雯,曾朝阳,张永继. 一种基于数学形态学的灰度图像边缘检测方法[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(2):27-30.
- [23] 李鑫. 小波分析在滚动轴承故障信号处理中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(6):65-67.
- [24] 余松煜,周源华,张瑞. 数字图像处理[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2007.
- [25] 闫河,巫茜. 劣质 SAR 图像退化模型研究[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(24):5351-5354.
- [26] 张金良,鲁昌华,杨道莲. 曲波变换域的 SAR 图像相干斑去噪[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(12):1108-1112.
- [27] 郭海涛,方金,王泽洋. 利用改进的 P-M 模型抑制声呐图像散斑噪声[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1): 82-87.

作者简介

刘锦帆, 1989 年出生, 2012 年获上海交通大学学士学位, 在读硕士研究生。主要研究方向为基于 HVS 的极化 SAR 数据质量评价。

E-mail: liujinfansjtu@hotmail.com

梁兴东, 1973 年出生, 研究员, 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室主任。主要研究方向为高分辨率合成孔径雷达系统、干涉合成孔径雷达系统、成像处理及应用和实时数字信号处理。

E-mail: xqliang@mail.ie.ac.cn

李焱磊, 1983 年出生, 助理研究员。主要研究方向为机载差分干涉 SAR 信号处理。

E-mail: ylllee@mail.ie.ac.cn