

文章编号 1004-924X(2015)增-0677-08

## 用于多光谱影像完整性认证的感知哈希算法

丁凯孟<sup>1,2,3</sup>, 朱长青<sup>2</sup>, 苏守宝<sup>1,3\*</sup>, 王少平<sup>1,3</sup>

(1. 金陵科技学院 网络与通信工程学院, 江苏 南京 211169;

2. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023;

3. 金陵科技学院 江苏省智慧软件与云服务工程重点实验室, 江苏 南京 211169)

**摘要:**提出一种综合多光谱影像各波段内容特征的感知哈希算法,以实现基于感知内容的多光谱影像完整性认证,并将认证的粒度精确到具体波段。首先,对多光谱影像进行预处理,根据各波段信息丰富程度的不同,选择不同的特征提取方式;然后,分别基于边缘提取算法和离散余弦变换(DCT)变换提取各波段内容特征;最后,对提取的特征进行压缩与归一化处理,得到多光谱影像的感知哈希序列。多光谱影像的认证过程则是通过比较待认证波段的感知哈希序列和原始感知哈希序列之间的差异来实现的。实验证明,该算法能够有效实现多光谱影像的完整性认证,并能够将篡改定位到具体的波段,克服了现有感知哈希算法没有顾及多光谱影像数据特征的缺陷,为多光谱影像的有效利用提供了保障。

**关键词:**多光谱影像;遥感影像;感知哈希;完整性认证

**中图分类号:**TP75 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0677

## Perceptual hash algorithm for integrity authentication of multispectral remote sensing images

DING Kai-meng<sup>1,2,3</sup>, ZHU Chang-qing<sup>2</sup>, SU Shou-bao<sup>1,3\*</sup>, WANG Shao-ping<sup>1,3</sup>

(1. School of Networks and Tele-communication Engineering,  
Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China;

2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of the Ministry of Education,  
Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

3. Jiangsu Key Laboratory of Smart Software & Cloud Service Engineering,  
Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

\* Corresponding author, E-mail: showbo@jit.edu.cn

**Abstract:** A perceptual hashing algorithm for multispectral remote sensing images based on the synthetic characteristics of each band content was proposed to realize the authentication of multispectral images and to locate the tamper at the concrete band. Firstly, the multispectral remote sensing image was preprocessed and the feature extraction method for each band was determined by the information richness of the band. Then, the content feature of each band was extracted by edge extraction method and Discrete Cosine Transformation(DCT). Finally, the extracted feature was constructed based on

收稿日期:2015-06-05;修订日期:2015-06-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61375121, No. 41301413);国家社科基金重大项目(No. 11&ZD162);群体计算与智慧软件南京市科技创新团队、金陵科技学院人才引进基金(No. jit-rcyj-201505)

the further compressed and normalized features, and the final perceptual hash value for the multispectral remote sensing image was obtained. The authentication was realized by comparing the difference between the recomputed perceptual hash value and the original hash value. The experiments indicate that the proposed algorithm can realize content integrity authentication for multispectral remote sensing images, and can locate the tamper at the concrete band of the image, which overcomes the defects of the existing perceptual hash algorithm without considering the feature of multispectral remote sensing images, and guarantees the effective utilization of multi-spectral images.

**Key words:** multispectral image; remote sensing image; perceptual Hash; integrity authentication

## 1 引 言

相对于单波段影像和 RGB 图像而言,多光谱遥感影像多兼具成像和光谱探测的优点,其能够提供更多的对地观测信息。因此在国土、测绘等行业获得广泛应用。信息技术的发展使得多光谱影像的传输、处理与存储变得十分便利。但是,多光谱影像在传输与处理过程中很容易遭受无意或有意的攻击,使其完整性受到威胁,进而影响其使用价值。因此,多光谱影像的认证问题具有重要的理论与现实意义。

认证技术是通过验证数据的完整性、数据来源的可靠性与真实性来保护数据。传统的认证方法一般采用 Hash 函数、数字签名等现代密码学技术实现数据认证。密码学技术对于数据的变化十分敏感,即使数据发生一个比特的变化,都无法通过认证。但是,当多光谱影像进行数据压缩、水印嵌入等操作后,其承载的有效内容并没有发生变化,只是内容的载体发生了变化。所以,传统的基于密码学的认证无法区分多光谱影像的有效内容信息是否遭到篡改,在多光谱影像的认证中存在明显不足。感知哈希(Perceptual Hashing)则为多光谱影像的认证提供了新的可行方法。

感知哈希是多媒体数据集到感知摘要集的一类单向映射,即具有相同感知内容的多媒体数字表示将唯一地映射为一段数字摘要,其具有鲁棒性、安全性、摘要性和可区分性等特征<sup>[1-2]</sup>。根据多媒体对象的不同,感知哈希包括图像感知、音频感知和视频感知等。与全色图像相比,多光谱影像有着较高的光谱分辨率<sup>[3]</sup>,但鲜有学者进行多光谱影像的感知哈希相关研究。

目前,已经有许多学者展开感知哈希的相关研究<sup>[4-12]</sup>。早期的感知哈希算法主要包括基于图

像统计特征的方法<sup>[4-5]</sup>、基于 DCT(Discrete Cosine Transform)变换的方法<sup>[6]</sup>、基于 DWT 变换方法<sup>[7]</sup>和基于 SVD(Singular Value Decomposition)分解的方法<sup>[8]</sup>等。近些年,一些新颖的感知哈希算法相继被提出。Zhenjun Tang 等人<sup>[9]</sup>提出一种彩色图像的感知哈希算法,该算法将图像从 RGB 颜色空间转换到 HSI 和 YCbCr 颜色空间,然后提取每个图像分块的统计特征,进而生成感知哈希序列。Sun R 等人<sup>[10]</sup>提出一种基于压缩感知和傅立叶-梅林变换的图像感知哈希算法,该算法基于压缩感知理论有效压缩图像的特征信息,对旋转、噪声等均具有较好鲁棒性。文振焜等人<sup>[11]</sup>提出一种新的视频感知哈希算法,该算法融合视觉感知及时空域特征,具有较好的鲁棒性与区分性,可以实现视频数据的篡改检测及定位。文献<sup>[12]</sup>针对遥感影像对认证精度具有较高要求的特点,提出一种基于边缘特征的遥感影像感知哈希算法,该算法基于自适应策略提取遥感影像不同区域的边缘特征,进而构造感知哈希序列,具有较高的认证精度,能够有效识别影像的局部细微篡改,但是只能用于三波段或单波段的影像认证。

多光谱影像的不同波段反映不同的地物信息,不同波段有着明确的物理意义。但是现有感知哈希算法本质上没有顾及多光谱影像这种波段较多的特性。本文考虑遥感影像具有光谱分辨率的特点,提出一种综合多光谱影像各波段内容特征的感知哈希算法,实现了多光谱影像基于感知内容的认证,并将认证的粒度精确到各个波段,为多光谱影像的有效利用提供完整性保障。

## 2 算法原理

### 2.1 多光谱影像特征分析

由于地物在不同波谱下的辐射特性有所不

同,多光谱遥感图像间往往存在较大的灰度差异,尤其在可见光和红外图像之间<sup>[13]</sup>。对于遥感影像而言,在一定波长范围内,被分割的波段数越多,也就是波谱取样点越多,越接近于连续波谱曲线。但波段越多,各波段之间的冗余信息也同样会增多。

相比于全色图像,多光谱图像(影像)的空间分辨率一般较低,但具有较高的光谱分辨率,且各波段的物理意义较为明确,能为不同地物的识别提供有利条件。多波段的遥感影像,不同波段对不同的地物敏感,不同的波段进行组合能够反映不同的地物信息。例如,Landsat TM 影像的 7 个波段中,Band 5(第 5 波段)处于水的吸收带之间,对地表湿度反应敏感;Band 3 与 Band 4 能够反映植被信息,分别对应叶绿素强吸收与植物高反射;Band 6 则是反映温度信息的热红外波段,与土壤水分信息密切相关。此外,不同波段的组合包含的信息量也往往大不相同。例如,Band 1、Band 2 和 Band 3 的组合为真彩色组合,但信息量相对较少;Band 7、Band 5 和 Band 3 的波段组合能够很好地反映土壤信息;Band 4、Band 5 和 Band 7 的波段组合则常用于地质构造的研究。本文试验中,以 TM 影像数据为例验证提出的多光谱影像感知哈希认证算法。

## 2.2 感知哈希概述

感知哈希的思想源于密码学 Hash 函数,能够将任意长度的输入信息转换为简短的输出序列。与密码学 Hash 函数类似,感知哈希技术能够将任意长度的输入信息转换为简短的输出序列。但感知哈希基于多媒体数据的内容构造哈希序列,内容相同的数据即使发生二进制级别的变化(如格式转换)也将输出完全相同或者极为相似的哈希序列,只有在多媒体数据的内容发生变化的情况下,输出的感知哈希序列才发生变化。感知哈希能够用尽可能少的信息表征多媒体数据的内容信息,而且能够满足安全性要求,因此感知哈希技术为多媒体数据的识别、认证、检索等应用提供了可靠的技术实现途径。

感知哈希算法的一般步骤是:预处理、特征提取、特征量化、压缩编码等。图像预处理,一般是为了去除冗余的信息,并使原始图像更便于特征提取;特征提取采取一定方法提取能够反映图像内容的特征信息;特征量化则是通过一定方法使

提取的特征更便于进一步处理,并大大压缩特征的数据量,同时一定程度上对特征进行模糊化(增强鲁棒性);压缩编码是为了使量化后的特征进一步“摘要化”,这是因为,提取的特征经过量化处理后,有可能依然数据量较大而不适合作为序列输出。最终得到的简短序列就是最终的感知哈希序列。其中,特征提取是感知哈希算法的关键。

## 2.3 算法思想

顾及多光谱影像的光谱特性,最直接的方法就是分别提取多光谱影像各个波段的感知内容,继而生成感知哈希序列。尽管多光谱影像各波段之间的灰度和纹理差异较大,但相互之间的轮廓和局部形状具有较高的相似性,采用相同的特征提取方式必然使得提取的特征冗余度大大增加。而且,由于多光谱影像自身特征的复杂性与使用过程的多样性,不同的波段提取方法更能有效提取信息,多种特征的综合也更容易满足多光谱影像认证过程中的需求。例如,边缘信息丰富的波段更适合基于边缘特征的方法构造感知哈希序列;纹理信息丰富的区域则不宜采用基于边缘特征的感知哈希构造方法,否则计算复杂度大大增加。所以,这里的关键问题在于如何确定各个波段的特征提取方式。

综合考虑算法复杂度和波段内容特征多样性、特征冗余以及不同波段的应用侧重点等因素,根据各个波段影像信息丰富程度的不同,本文提出采用不同的特征提取方法:对于信息量丰富的波段采用计算复杂度较高、篡改更为敏感的边缘特征提取方法;相对平滑的区域则采用计算复杂度较低的特征提取方法。

## 3 算法描述

本节算法总体流程如图 1 所示,主要包括影像预处理、波段特征提取、特征融合与编码等部分。其中,预处理部分决定具体波段的特征提取方式。

### 3.1 预处理

首先对原始影像进行波段分解,并对分解后的波段进行预处理。对每个波段进行  $W \times H$  的隐形格网划分后,再计算每个格网单元的信息熵,并对格网单元进行预处理,即通过插值算法将其大小统一为  $m \text{ pixel} \times m \text{ pixel}$ ,此举旨在统一最后

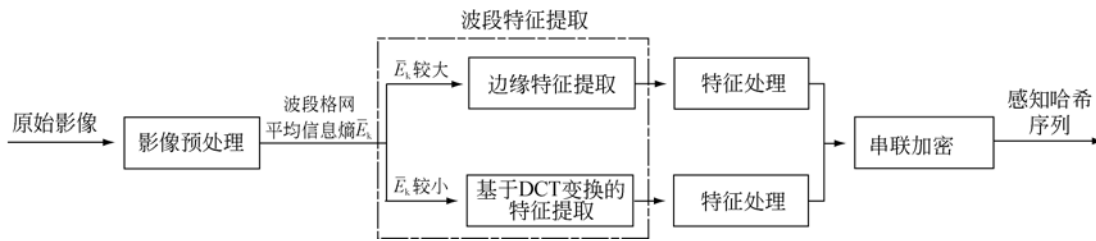


图 1 算法流程图

Fig. 1 Process of proposed algorithm

的感知哈希序列长度,并提高算法实时性。预处理之后的影像格网单元记为  $G_k(i, j)$  ( $i$  与  $j$  分别标识格网单元的行列坐标,  $k$  表示所在的波段,且  $1 \leq i \leq W, 1 \leq j \leq H, 1 \leq k \leq L$ , 其中,  $L$  为波段数)。

格网划分的粒度应当综合考虑计算复杂度、认证精度以及篡改定位粒度等各方面要求。结合算法流程并通过反复实验,格网单元不宜大于  $512 \times 512$ , 但也不宜小于  $64 \times 64$ 。由于多光谱遥感影像各个波段实际上反映的是不同类型地物的反射率、辐射率及透射率,因此原始的多波段影像分解后,各个波段的特征往往差异较为明显。图 2 与图 3 分别为某地区不同类型区域(山区与城市)的 TM 影像数据的第 1 波段和第 4 波段对比实例,山区与城市在相同的波段下差异较为明显。

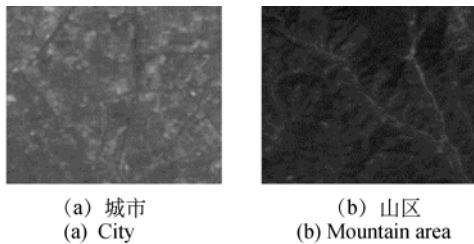


图 2 TM 影像第 1 波段不同类型的地物对比实例  
Fig. 2 Contrast of different types of landmarks for band 1 in TM image

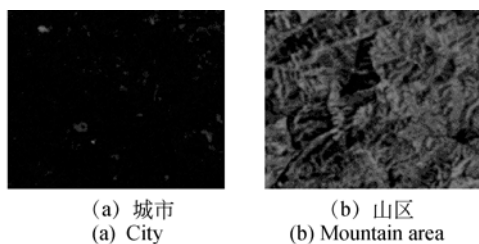


图 3 TM 影像第 4 波段不同类型地物对比实例  
Fig. 3 Contrast of different types of landmarks for band 4 in TM image

而且,相同的地物特征在不同波段下信息量往往差别较大,如图 2(a)和图 3(a)。本文算法基于“自适应策略”,根据具体波段的格网单元的信息熵的平均值决定波段的特征提取方式。

设  $E_k(i, j)$  表示第  $k$  个波段的第  $(i, j)$  个格网单元的信息熵。设  $\bar{E}_k$  表示具体波段的格网单元平均信息熵,即:

$$\bar{E}_k = \frac{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H E_k(i, j)}{W \times H} \quad (1)$$

本文算法中,各波段  $\bar{E}_k$  的大小决定了波段特征的提取方式,亦即根据波段的格网单元平均信息熵的大小决定特征提取方式。根据波段信息的丰富程度选择不同的特征提取方式,不仅可以降低特征信息的冗余,更重要的是可以降低算法复杂度,克服单一特征提取方法对不同类型的内容篡改识别的局限。

### 3.2 波段的特征提取

特征提取是感知哈希算法的关键步骤,直接关系到感知哈希算法的鲁棒性与精度特性。本节算法分别采用基于边缘特征和 DCT 变换提取各波段内容特征:对于  $\bar{E}_k$  较大的波段,在文献[12]的方法基础上,采用 Canny 算子与 SVD 提取格网单元的鲁棒边缘特征;对于  $\bar{E}_k$  较小的波段,则采用 DCT 变换提取内容特征。

(1) 设  $\bar{E}_{k_1}, \bar{E}_{k_2}, \bar{E}_{k_3}$  是最大的 3 个格网信息熵均值,那么对于相应的波段  $I_{k_1}, I_{k_2}, I_{k_3}$ ,分别采用 Canny 算子提取格网单元的边缘特征,然后通过 SVD 解决感知哈希鲁棒性与边缘特征敏感性之间的矛盾,进而选择较大的奇异值作为格网单元特征,并采用 Hash 函数进行归一化。具体步骤如下:

- a. 采用 Canny 算子提取  $G_k(i, j)$  的边缘特

征,并对边缘提取结果进行序列化:从左到右、从上到下扫描边缘提取的结果,如果是边缘点,相应的矩阵元素记为 1,否则记为 0。序列化之后得到 0-1 矩阵,记为  $E_k(i, j)$ 。

b. 对边缘特征矩阵  $E_k(i, j)$  进行 SVD 分解。SVD 分解是常用的矩阵数值分析工具,得到的矩阵奇异值能够反映矩阵的代数本质。

c. 选择前  $k$  个较大的奇异值作为格网单元的内容特征,并采用 Hash 函数(本文实验中采用 MD5(Message-Digest Algorithm 5, MD5))进行归一化,得到固定长度的序列,记为  $H_k(i, j)$ 。

波段的所有格网单元感知哈希组合起来,构成该波段的感知哈希序列,记为  $PH^k$ 。

(2)  $I_{k1}$ 、 $I_{k2}$ 、 $I_{k3}$  之外的波段则采用基于 DCT 变换的方法进行特征提取。

基于 DCT 变换的特征提取方法能够很好地满足鲁棒性、摘要性、唯一性等要求,是感知哈希经典的特征提取方式<sup>[6,14-15]</sup>。更重要的是,相对于边缘特征,基于 DCT 变换的特征提取的计算复杂度较低。此外,相对于全色影像,多光谱影像的空间分辨率较低,DCT 变换的方法能够在保持认证波段完整性的基础上,具有更高的鲁棒性。因此,本文算法采用 DCT 变换的方法提取平均信息熵  $E_k$  较小的波段内容特征。具体步骤如下:

a. 将预处理之后的格网单元  $G_k(i, j)$  分成  $n \times n$  (本实验中  $n=8$ ) 的分块,并对每个分块进行 DCT 变换,选取分块变换后的一个 DC 系数和 7 个 AC 系数作为该格网单元的内容特征。

b. 提取的系数量化为二值序列:AC 系数如果为正,则置 1,如果为负,则置 0;DC 系数如果大于均值,则置 1,反之置 0。

c. 量化后的二值序列,采用对称加密算法进行加密。考虑到本文算法并未限定预处理后格网单元的大小,所以这里采用密钥长度可变的 RC4 算法,得到最终的感知哈希序列,记为  $PH^k$ 。

各波段的感知哈希综合起来记为原始多光谱影像的感知哈希序列  $PH$ ,即:

$$PH = \{PH^1, PH^2, PH^3, \dots, PH^L\}, \quad (2)$$

其中: $L$  表示多光谱影像的光谱数。例如,7 波段的 TM 影像, $L=7$ 。

### 3.3 多光谱影像的完整性认证过程

多光谱影像的认证过程,通过比较待认证波

段格网单元和原始的感知哈希序列间是否匹配来实现。感知哈希序列的匹配方式包括阈值匹配与精确匹配。其中,精确匹配与密码学 Hash 函数的匹配过程类似,哈希序列要完全一致才能通过认证;而基于阈值的匹配过程,只要两个哈希序列之间的距离小于设定的阈值就能够通过认证<sup>[16-17]</sup>。

针对不同波段,本文算法分别采用精确匹配与阈值匹配相结合的方法,对于基于边缘特征生成的哈希序列,采用精确匹配;对于基于 DCT 变换生成的哈希序列,采用阈值匹配。其中,阈值匹配采用“归一化 Hamming 距离”来衡量感知哈希序列间的差异。归一化 Hamming 距离计算公式如下:

$$Distance = \left( \sum_{i=1}^L |h_1(i) - h_2(i)| \right) / L, \quad (3)$$

其中: $h_1$  和  $h_2$  为长度是  $L$  的感知哈希序列。如果归一化 Hamming 距离高于预先设定的阈值  $T_h$ ,说明相应的区域的内容发生了改变;反之,可以认为相应区域的内容没有发生明显变化。

## 4 实验与分析

为了验证本文算法的有效性,选取 2006 年的南京地区 7 波段 Landsat TM 影像为例进行测试,各波段大小均为  $1\ 536\ \text{pixel} \times 1\ 024\ \text{pixel}$ 。实验硬件平台为:3.1 GHz 主频的 CPU,可用内存为 2.99G;软件平台为 Visual Studio 2010 和 C++,并基于 GDAL 库函数实现多光谱遥感影像的读取。

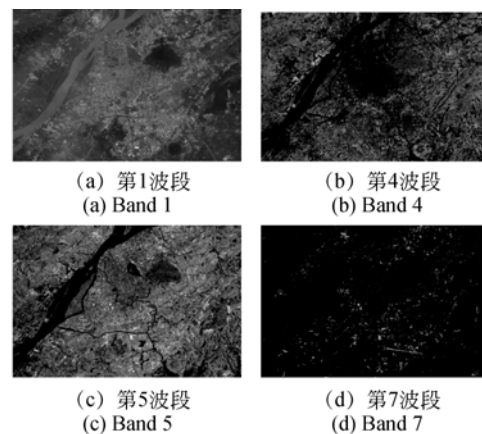


图 4 测试的 TM 影像不同波段

Fig. 4 Different bands of TM image for testing

图 4 所示为该测试影像分解后的第 1、第 4、第 5 与第 7 波段。影像各个波段进行  $12 \times 8$  的隐形格网划分,划分后每个波段的格网单元大小均为  $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 。

将原始的 TM 影像分解为 7 个独立波段之后,根据格网单元的平均信息熵,基于 Canny 算子与 SVD 分解对波段  $I_5$ 、 $I_1$ 、 $I_7$  进行边缘特征提取与处理;波段  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_6$  则采用 DCT 变换的方式提取内容特征。

本节算法的首要目标就是从“光谱分辨率”的角度对篡改进行定位,也就是将篡改定位精确到具体的波段。多波段的遥感影像在实际应用中多根据不同波段对不同地物的敏感性,采用相应的波段组合以反映不同的地物信息,如将波段  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  分别赋予红色、绿色、蓝色,并对其进行组合即为真彩色组合,将波段  $I_7$ 、 $I_5$ 、 $I_3$  分别赋予红色、绿色、蓝色并对其进行假彩色组合,该组合则主要反映土壤信息。图 5 所示为对 TM 影像真彩色合成后的篡改前后对比结果,图 6 所示为波段  $I_7$ 、 $I_5$ 、 $I_3$  假彩色合成之后的篡改前后对比结果。

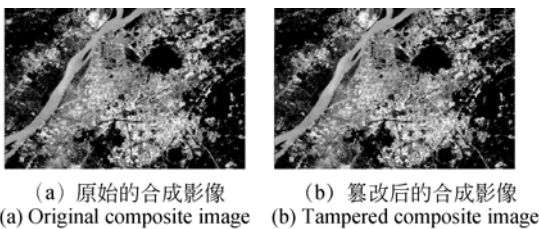


图 5 真彩色合成影像篡改示例

Fig. 5 Tamper examples of true color synthesis images

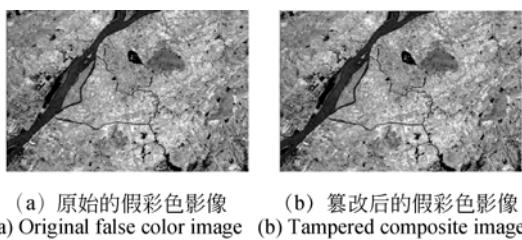


图 6 波段  $I_7$ 、 $I_5$ 、 $I_3$  假彩色合成的影像篡改示例

Fig. 6 Tamper example of false color composite images

对于上述篡改实例,常规的图像感知哈希算法和文献[12]所提出的遥感影像感知哈希算法无法确定具体的波段篡改情况,本文算法则能够实现具体波段的完整性认证。图 7 为真彩色合成影像的篡改定位结果,其中,图 7(a)为合成影像全

局的篡改定位结果,图 7(b)则是具体波段的篡改定位,也就是说,实际发生篡改的为第 1 波段,第 2 与第 3 波段内容并未发生剧烈变化。现有的感知哈希算法能够识别出影像遭到某种恶意篡改,却无法识别具体发生在哪个波段。

图 8 为波段  $I_7$ 、 $I_5$ 、 $I_3$  假彩色合成影像的篡改定位结果,其中图 8(a)为合成影像全局的篡改定位结果,图 8(b)和图 8(c)则分别是波段  $I_5$  和波段  $I_7$  的篡改定位结果,同时证明波段  $I_3$  内容没有发生剧烈变化。

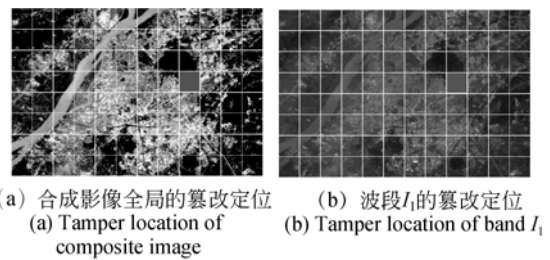
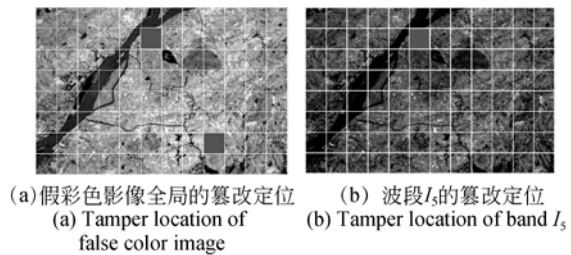


图 7 真彩色合成影像篡改示例

Fig. 7 Tamper locations of true color synthesis image



(c) 波段  $I_7$  的篡改定位  
(c) Tamper location of band  $I_7$

图 8 波段  $I_7$ 、 $I_5$ 、 $I_3$  假彩色合成影像篡改定位结果

Fig. 8 Tamper locations of false color composite images

相对于密码学 Hash 函数,感知哈希最重要的特点在于能够对不改变波段内容的操作保持鲁棒性。本文采用格式转换(原始 Tiff 格式的影像波段转为 BMP 格式)与数字水印嵌入(最低有效位嵌入)为例来测试算法鲁棒性。实验结果显示:影像各波段所有格网单元的感知哈希序列均没有发生变化。由此可见,本文算法能够实现多光谱

影像认证,同时,还保持了较好的算法鲁棒性。

本文算法的安全性依托于 Hash 函数与 RC4 算法的安全性。Hash 函数与 RC4 算法的安全性早已获得了广泛认可,所以,本文算法具有足够的安全性保障。

本文算法在实验过程中虽然以 7 波段的 TM 为实验对象,但理论基础同样适用于全色影像和波段数更多的光谱影像。

## 5 结 论

本文提出了一种多光谱影像感知哈希算法,

该算法克服了现有感知哈希算法没有考虑多光谱影像具有较多波段的特点。鉴于遥感影像自身特征的复杂性与使用过程的多样性,综合考虑算法复杂度、影像内容特征多样性以及多光谱影像实际应用过程等方面因素,本文采用根据波段格网平均信息熵决定特征提取方法,进而生成各波段的感知哈希序列。实验证明,该算法不仅能够有效识别多光谱影像的内容篡改,而且能将篡改定位到具体的波段,并对不改变多光谱影像内容的操作保持鲁棒性,达到了预期的结果。

### 参考文献:

- [1] 龚卫国,张旋,李正浩. 基于改进局部敏感散列算法的图像配准[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1375-1383.  
GONG W G, ZHANG X, LI ZH H. Image registration based on extended LSH[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1375-1383. (in Chinese)
- [2] 牛夏牧,焦玉华. 感知哈希综述[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1405-1411.  
NIU X M, JIAO Y H. An overview of perceptual hashing [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(7): 1405-1411. (in Chinese)
- [3] 汤毅,辛勤,李纲,等. 基于内容的高光谱图像无损压缩[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 668-674.  
TANG Y, XIN Q, LI G, *et al.*. Lossless compression of hyperspectral images based on contents [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 668-674. (in Chinese)
- [4] VENKATESAN R, KOON S M, JAKUBOWSKI M H, *et al.*. Robust image hashing[C]. *IEEE*, 2000, 3: 664-666.
- [5] KAILASANATHAN C, NAINI R S. Image authentication surviving acceptable modifications using statistical measures and k-mean segmentation [C]. *IEEE-Eurasip Workshop Nonlinear Signal and Image*, Baltimore, Maryland, USA, 2001: 1-13.
- [6] LU C S, LIAO H Y M. Structural digital signature for image authentication; an incidental distortion resistant scheme[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2003, 5(2): 161-173.
- [7] SWAMINATHAN A, MAO Y, WU M. Robust and secure image Hashing [J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2006, 1(2): 215-230.
- [8] KOAZAT S S, VENKATESAN R, MIHCAK M K. Robust perceptual image Hashing via matrix invariants [C]. *Proceedings of 2005 ICIP, Genova, Italy*, 2005, 3443-3446.
- [9] TANG ZH J, ZHANG X Q, DAI X, *et al.*. Robust image Hash function using local color features [J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2013, 67(8): 717-722.
- [10] SUN R, ZENG W J. Secure and robust image hashing via compressive sensing [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2014, 70: 1651-1665.
- [11] 文振焜,高金花,朱映映,等. 融合时空域变化信息的视频感知哈希算法研究[J]. 电子学报, 2014, 42(6): 1163-1167.  
WEN ZH K, GAO J H, ZHU Y Y, *et al.*. Video perceptual hashing fusing spatio temporal change detection [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(6): 1163-1167. (in Chinese)
- [12] 丁凯孟,朱长青. 一种用于遥感影像完整性认证的感知哈希算法[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2014, 44(4): 723-727.  
DING K M, ZHU CH Q. Perceptual Hash algorithm for integrity authentication of remote sensing image [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2014, 44(4): 723-727. (in Chinese)
- [13] 叶沅鑫,单杰,彭剑威,等. 利用局部自相似的多光谱遥感图像自动配准 [J]. 测绘学报, 2014, 43

- (3):268-275.
- YE Y X, SHAN J, PENG J W, *et al.*. Automated multispectral remote sensing image registration using local self-similarity [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43 (3): 268-275. (in Chinese)
- [14] 张维克,孔祥维,尤新刚. 安全鲁棒的图像感知哈希技术[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2008, 37(1):188-192.
- ZHANG W K, KONG X W, YOU X G. Secure and robust image perceptual Hashing [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2008, 37(1):188-192. (in Chinese)
- [15] FRIDRICH J, GOLJAN M. Robust hash functions for digital watermarking[C]. *IEEE*, 2000: 178-183.
- [16] 赵玉鑫,刘光杰,戴跃伟,等. 一种新的视觉 Hash 算法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3):551-557.
- ZHAO Y X, LIU G J, DAI Y W, *et al.*. A novel perceptual image Hash algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):551-557. (in Chinese)
- [17] 王俊文,刘光杰,张湛,等. 基于小波变换和 Zernike 矩的图像区域复制篡改鲁棒取证[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7):1686-1693.
- WANG J W, LIU G J, ZHANG ZH, *et al.*. Robust forensics for image regional duplication and forgery based on DWT and Zernike moment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7):1686-1693. (in Chinese)

#### 作者简介:



丁凯孟(1985—),男,山西长治人,博士,讲师,2009年于淮海工学院获得学士学位,2015年于南京师范大学获得博士学位(硕博连读),主要从事地理数据安全、数据认证的研究。E-mail: dingkaimeng@foxmail.com

#### 导师简介:



朱长青(1961—),男,江苏阜宁人,博士,教授,博士生导师,1982年于解放军测绘学院获得学士学位,1992年于郑州大学获得硕士学位,1997年于解放军测绘学院获得博士学位,主要从事地理数据安全、数据不确定性等研究。