

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.11.001

引用格式:刘娟妮,周詮,李小军,等.多光谱图像变换域统计量移位鲁棒无损信息隐藏[J].电讯技术,2015,55(11):1187-1193.[LIU Juanni, ZHOU Quan, LI Xiaojun, et al. Multispectral Image Robust Lossless Data Hiding Based on Transform Domain Statistical Quantity Shifting[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(11):1187-1193.]

多光谱图像变换域统计量移位鲁棒无损信息隐藏^{*}

刘娟妮^{**},周 詮,李小军,方 海

(西安空间无线电技术研究所 空间微波技术国家级重点实验室,西安 710100)

摘 要:为了提高鲁棒无损信息隐藏算法容量,利用多光谱图像谱段间的相关性及其小波变换高频系数分块均值的稳定性,提出一种变换域统计量移位的鲁棒无损信息隐藏算法。首先,在光谱方向采用 Karhunen Loève 变换(KLT)去相关,然后对得到的 KLT 本征子图像进行离散小波变换,将小波 HH 高频系数分块均值作为统计量,通过其直方图移位来隐藏秘密信息,最后将浮点数变换和像素溢出引起的误差嵌入含密图像中以便对恢复的载体图像进行误差补偿。实验结果表明:在图像质量和以往算法相当的情况下,该算法的隐藏容量增加了 1 倍,并且能抵抗噪声攻击;而与最新算法相比,在隐藏容量相同时,该算法抗 JPEG2000 压缩倍数平均提高 23.9%,误码率平均降低了 44.8%。

关键词:多光谱图像;鲁棒无损信息隐藏;Karhunen-Loève 变换;离散小波变换;直方图移位

中图分类号:TN918 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)11-1187-07

Multispectral Image Robust Lossless Data Hiding Based on Transform Domain Statistical Quantity Shifting

LIU Juanni, ZHOU Quan, LI Xiaojun, FANG Hai

(National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to improve the hiding capacity, a transform domain statistical quantity shifting-based robust lossless data hiding scheme is proposed, which exploits the correlation between different bands of multispectral images and the stability of the block mean values of their wavelet transform coefficients. Firstly, Karhunen Loève transform (KLT) is carried out to reduce the correlation between different bands, then discrete wavelet transform is conducted in the KLT obtained images, after that the HH coefficients are divided into blocks to calculate the block mean values, which are used as the statistical quantity, then their values are shifted to embed the secret data. Finally, the error values are embedded in the stego-image to compensate the loss caused by float transform and overflow. The comparison results indicate that the proposed scheme can embed twice the amounts of secret bits of that embedded in the previous methods when having the same image quality, additionally the proposed method can resist noise attack. Compared with the newest scheme by embedding the same bits of secret data, the proposed method achieves not only 23.9% increase of JPEG2000 resist compression ratio but also 44.8% reduction of bit error rate.

Key words: multispectral image; robust lossless data hiding; Karhunen-Loève transform; discrete wavelet transform; histogram shifting

^{*} 收稿日期:2015-04-02;修回日期:2015-07-24 Received date:2015-04-02;Revised date:2015-07-24
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372175);国家重点实验室基金项目(9140C530403130C53192)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61372175); The National Key Laboratory Foundation of China (9140C530403130C53192)

^{**} 通讯作者:liujuanni0@126.com Corresponding author:liujuanni0@126.com

1 引言

目前,信息隐藏技术主要应用于多媒体信息认证、知识产权保护及隐蔽传输等信息安全领域,其载体包括静止图像、音频、视频、文本等多种媒介。多光谱图像作为卫星遥感的主要数据,具有广泛的应用,以多光谱图像为载体的信息隐藏技术越来越受到关注。

现有多光谱图像信息隐藏技术以水印为主^[1-2],存在隐藏容量小,嵌入信息不能盲提取以及载体图像不能无损恢复等问题。虽然已有一些无损方法可以实现这种可逆性^[3],但是这些方法无损恢复的前提是含密图像不能遭受任何攻击,否则信息就不能正确提取。实际中多光谱图像的传输很可能受到噪声干扰或者被压缩,例如 SPOT 4 和 IKONOS 卫星在数据传输前进行了有损压缩^[4]。因此多光谱图像信息隐藏不仅要求对载体图像的破坏要小,还要考虑对压缩以及噪声的鲁棒性。为了解决这个问题,提出了鲁棒无损信息隐藏方法,即在含密图像未受到攻击时,载体图像和秘密信息都可以精确恢复;当载体图像在传输过程中遭受有损压缩或噪声干扰时,秘密信息仍然可以正确提取。

Ni 等人^[5]基于 patchwork 理论提出了一种基于统计量的鲁棒无损信息隐藏方法,能够抵抗 JPEG 和 JPEG2000 压缩攻击,但是该方法嵌入容量较小。Zeng 等^[6]对 Ni 的方法进行改进,提出一种基于图像块算术差的统计量,通过统计量直方图移位将信息嵌入到图像块内。该方法可以抵抗 JPEG 压缩攻击,和 Ni 的方法相比,Zeng 的方法在嵌入容量和鲁棒性上均有很大改进。李晓博和周詮^[7]使用与文献^[6]相同的统计量,通过引入一些阈值进一步改进了 Zeng 方法的性能。朱厉洪和周詮^[8]通过图像预处理实现整数离散余弦变换(Discrete Cosine Transform,DCT)域的鲁棒无损信息隐藏,获得了较好的图像质量。An 等^[9]也提出了一种基于统计量的方法,并引入 K 均值聚类方法来确定嵌入区域,提高了鲁棒性。然而,An 的方法采用属性启发式像素调整的方法来防止溢出,需要将改变的像素作为边信息进行传输,因此该方法不能盲提取嵌入信息。Yang 和 Lin^[10]通过系数移位提出了一种大容量的鲁棒无损隐藏算法,在信息嵌入过程中需要用定位图来记录像素是否移动,这也是一个非盲算法。

上述鲁棒无损信息隐藏方法在鲁棒性和不可见性上已有很大提高,但这是建立在非盲提取的基础上,现有盲提取算法嵌入容量仍然较小,给实际应用造成困难。因此,本文联合卡洛南-洛伊变换(Karhunen Loève Transform,KLT)和离散小波变换(Discrete Wavelet Transform,DWT),以小波 HH 系数分块均值为统计量进行信息隐藏,实现秘密信息盲提取,并利用误差补偿的方法无损恢复载体。

2 统计量移位鲁棒无损信息隐藏

2.1 统计量

设载体多光谱图像的大小为 $N_x \times N_y \times Z$,其中 Z 为频段数。在数据嵌入前先进行光谱方向 KLT 变换,获取多光谱图像 KLT 本征子图像。设 $V^{(KLT,z)}$ 是多光谱图像第 z 个 KLT 本征子图像, $V^{(DWT,z)}$ 是 $V^{(KLT,z)}$ 的 DWT 变换, $1 \leq z \leq Z$ 。将 $V^{(DWT,z)}$ 的 HH 高频子带分成大小为 $m \times n$ 不重叠的块(m,n 为偶数),则频段 z 内 HH 高频子带各块均值 α 为

$$\alpha_k^{(z)} = \left\lceil \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_k^{(DWT,z)}(i,j) \right\rceil. \quad (1)$$

式中, k 是块索引, $1 \leq k \leq N_x \times N_y / (2 \times m \times 2 \times n)$, $V_k^{(DWT,z)}(i,j)$ 是位置 (i,j) 处的小波变换系数值,符号 $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整。在有损压缩或者噪声攻击下, $\alpha_k^{(z)}$ 是一个比较稳定的值,变化量很小,因此可以将 $\alpha_k^{(z)}$ 作为统计量,利用 $\alpha_k^{(z)}$ 的稳定性来嵌入信息。

KLT 是统计意义上去相关性的最优变换^[11]。由于多光谱图像各谱段间相关性很强,对其进行 KLT 变换可以将大部分信号能量集中分布在前几个本征子图像,然后进行 DWT 变换又将 KLT 本征子图像的能量集中在低频子带。因此,在小波变换 HH 高频子带中隐藏信息对载体的影响很小,保证含密图像具有较好的视觉质量。同时,将 HH 高频子带分块均值作为统计量,是由于不同图像其取值基本保持不变,而且即使含密图像在传输过程中受到压缩和噪声攻击时,该统计量的值也变化很小,所以该统计量具有较强的鲁棒性。

图像“Robinson Farm”的统计量 α 直方图分布如图 1 所示,其中, $m=2,n=2,z=6$;X 轴代表 α 的值,Y 轴是 α 的数量。从图 1 中可知, α 取值集中于 $[-4,3]$,可以通过将统计量 α 左右移位来嵌入秘密信息。

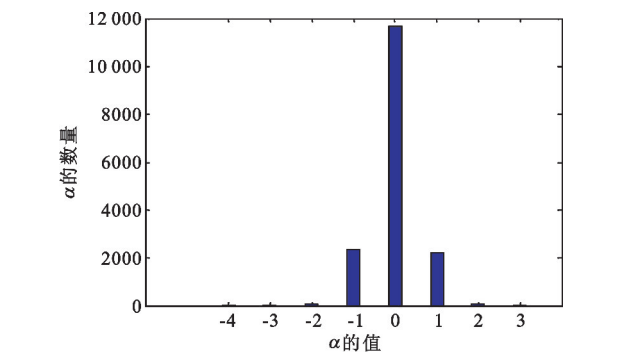


图 1 α 的直方图分布
Fig. 1 Histogram of α

2.2 数据嵌入过程

对载体多光谱图像,按 KLT 本征子图像分别嵌入信息。对各本征子图像,计算上述统计量,然后统计其直方图分布,并确定公式(4)中参数 T 。

依次扫描小波高频系数各分块,在每个分块中嵌入 1 b 秘密信息。对于各个分块,如果嵌入的秘密信息为 0,则块内元素保持不变;如果嵌入的秘密信息为 1,通过调整 α 来嵌入,规则如下:

$$V_k^{(DWT,z)}(i,j)' = \begin{cases} V_k^{(DWT,z)}(i,j) + \beta^{(z)}, & \text{if } \alpha_k^{(z)} \geq 0 \\ V_k^{(DWT,z)}(i,j) - \beta^{(z)}, & \text{if } \alpha_k^{(z)} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, z 表示 KLT 本征子图像的序号;

$$\beta^{(z)} = T^{(z)} + R, \quad (3)$$

$$T^{(z)} = \max(\text{abs}(\alpha^{(z)})), \quad (4)$$

R 为引入的正整数参数,称之为鲁棒空间。 R 是嵌入秘密信息为 0 的区域(简称“嵌入 0 区”)和嵌入秘密信息为 1 的区域(简称“嵌入 1 区”)的间隔, R 越大意味鲁棒性越强。

将各 $V_k^{(DWT,z)}$ 通过逆 DWT 和逆 KLT 变换来生成含密图像,嵌入过程如图 2(a) 所示。

秘密信息依次嵌入到从 KLT 本征子图像 B 到本征子图像 Z 的小波 HH 高频子带的每个分块中,且每个分块嵌入信息数为 1 b,因此,对于大小为 $N_x \times N_y \times Z$ 的多光谱图像,若分块大小为 $m \times n$,则嵌入容量为

$$C = \frac{N_x \times N_y}{4 \times m \times n} \times (Z - B + 1)。 \quad (5)$$

2.3 数据提取过程

含密图像在传输过程中可能被压缩或者受到噪声攻击,此种情况 α 的分布会发生变化,嵌入 1 区和嵌入 0 区可能有所交叠,使信息在提取时出现误码。为了正确的提取数据,本文采用文献[6]的方法并做了适当修改。

数据提取和图像恢复过程如下:

首先对含密图像进行 KLT 变换,生成含密图像的 KLT 本征子图像。对嵌入数据的 KLT 本征子图像进行 DWT 变换,获取 DWT 系数矩阵 $V_k^{(DWT,z)'}$,计算 HH 高频子带的统计量 α ,统计 α 的直方图分布,并获取参数 T' 。新的嵌入 0 区的边界 T' 可以用嵌入 0 的数目 N_0 来确定,即保证在 $[-T', T']$ 区间内 α 的数目 N_α 等于 N_0 ,即 $\{N_\alpha = N_0 \mid -T' \leq \alpha \leq T'\}$ 。

使用式(6)从 α 的统计直方图中提取嵌入数据:

$$w = \begin{cases} 1, & \text{if } \alpha_k^{(z)} > T' \text{ or } \alpha_k^{(z)} < -T' \\ 0, & \text{if } -T' \leq \alpha_k^{(z)} \leq T' \end{cases} \quad (6)$$

移位 $V_k^{(DWT,z)'}$ 来重建小波系数矩阵:

$$V_k^{(DWT,z)}(i,j) = \begin{cases} V_k^{(DWT,z)}(i,j)' - \beta^{(z)}, & \text{if } \alpha_k^{(z)} > T' \\ V_k^{(DWT,z)}(i,j)' + \beta^{(z)}, & \text{if } \alpha_k^{(z)} < -T' \\ V_k^{(DWT,z)}(i,j)', & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

将 $V_k^{(DWT,z)}$ 进行逆小波变换,得到所有 KLT 本征子图像后,再进行 KLT 逆变换来重建载体多光谱图像,整个提取过程如图 2(b) 所示。

2.4 载体误差补偿

KLT 和 DWT 均为浮点数变换,正变换和反变换是不可逆的。在含密多光谱图像未受到攻击时,为了达到载体无损恢复的目的,将浮点数变换以及像素值溢出引起的误差用文献[12]的方法嵌入含密图像中,用于对载体图像进行误差补偿。具体过程如图 3 所示:首先利用 2.2 节方法嵌入秘密信息得到含密图像 1,然后利用 2.3 节方法恢复载体多光谱图像,将恢复图像和原始载体多光谱图像的差

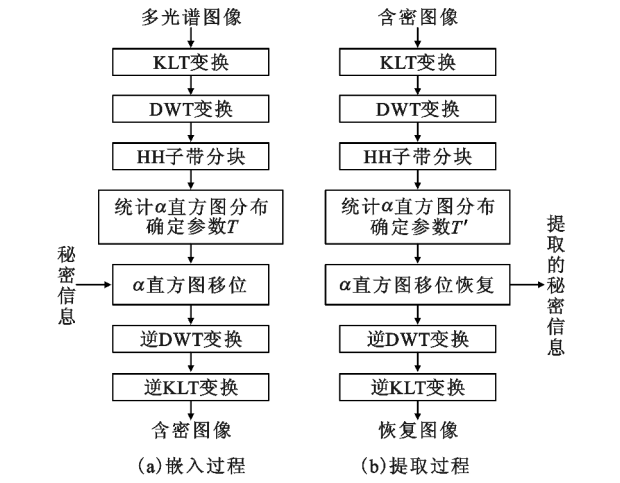


图 2 信息嵌入和提取过程
Fig. 2 Flowchart of data embedding and extracting process

值图像采用行程编码压缩。由于差值图像绝大部分像素值为0,压缩码流数据量很小,将压缩码流以无损信息隐藏的方式嵌入含密图像1中得到含密图像2,将其作为最终输出的含密图像。

在接收端,首先提取误差压缩后的码流并得到含密图像1,对压缩码流解码得到误差图像,然后进行秘密信息提取和载体图像恢复,最后将恢复的载体图像与误差图像相加重构原始载体图像。

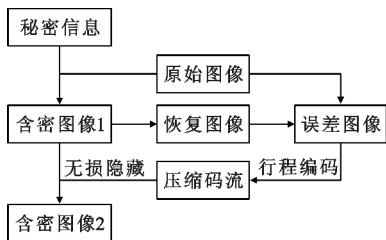


图3 误差隐藏过程
Fig.3 Process of error embedding

3 实验结果

实验采用美国马里兰大学公开的 Landsat 卫星多光谱图像 (<http://glcf.umd.edu/data/>) 来测试本文算法性能。实验平台为 Matlab R2011a, 主频为 2.50 GHz, 内存大小为 2 GB。测试图像包含 6 个频段, 空间分辨率 30 m, 每一个频段包括 512×512 个像素, 每个像素 8 b 精度。测试图像的频段 3 如图 4 所示。实验中的秘密数据为二进制伪随机数序列, HH 子带矩阵分块大小为 2×2 。秘密数据的嵌入是从第 B (B 为 4、5、6) 频段到第 6 频段, B 的大小决定隐藏容量 C , R 影响鲁棒性和视觉质量。

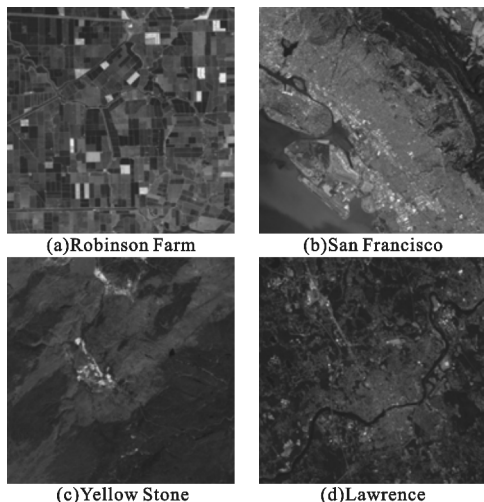


图4 测试图像
Fig.4 Test images

3.1 不可见性

用各频段峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 的平均值来度量多光谱图像的失真。频段 z 的 PSNR 如式 (8) ~ (9) 所示:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left(\frac{255^2}{\text{MSE}} \right), \quad (8)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{N_x \times N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (I_{i,j,z} - I'_{i,j,z})^2 \quad (9)$$

式中, $I_{i,j,z}$ 和 $I'_{i,j,z}$ 分别表示多光谱图像 I 和含密多光谱图像 I' 第 z 频段位置 (i,j) 处的像素值。

鲁棒空间 R 影响图像质量, 图像“Robinson Farm”的 PSNR 和鲁棒空间 R 的关系如图 5 所示。在 $R=9, B$ 分别为 4、5、6 时, 图像的 PSNR 分别为 38.42 dB、40.23 dB、45.69 dB, 这说明在鲁棒空间 R 相同时, 嵌入容量越小, 图像 PSNR 越高。另外, 3 条曲线的分布规律均表明, PSNR 会随着鲁棒空间 R 的增加而减小。其他测试图像也得到类似的结果。

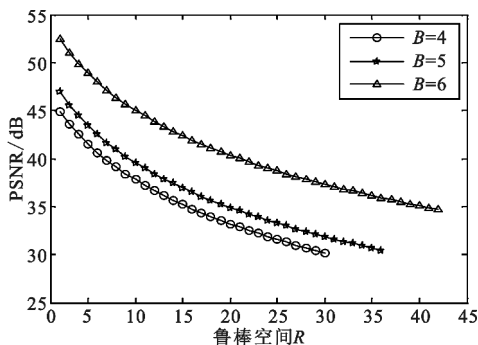


图5 鲁棒空间 R 和 PSNR 的关系 (Robinson Farm)
Fig. 5 Relationship between robust space R and PSNR (Robinson Farm)

用平均光谱角 (Mean Spectral Angle, MSA) 来衡量光谱失真, 平均光谱角是光谱角制图 (Spectral Angle Mapper, SAM) 的平均值。光谱角制图是像元原始光谱矢量和含密光谱矢量之间的夹角^[13]:

$$\text{SAM}(i,j) = \arccos\left(\frac{\sum_z I_{i,j,z} I'_{i,j,z}}{\sqrt{\sum_z I_{i,j,z}^2 \sum_z I'_{i,j,z}^2}}\right), \quad (10)$$

$$\text{MSA} = \frac{1}{N_x \times N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \text{SAM}(i, j) \quad (11)$$

图像“Robinson Farm”的 MSA 和鲁棒空间 R 的关系如图 6 所示。在三种容量条件下,MSA 均随着 R 的增加而增加,也即鲁棒空间 R 越大,光谱失真也越大。

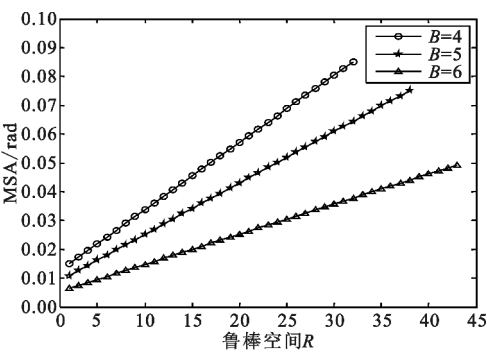


图 6 鲁棒空间 R 和 MSA 的关系 (Robinson Farm)
Fig. 6 Relationship between robust space R and MSA (Robinson Farm)

3.2 无损恢复

为了能够无损恢复原始图像,本文将因浮点数变换以及像素溢出造成的误差用游程编码压缩后用无损隐藏的方法嵌入到含密图像中,在含密图像没有遭受攻击时误差信息可以无失真地提取,从而补偿恢复载体的误差。

表 1 给出了不同嵌入容量下误差图像经过行程编码后的比特数 (Prediction Error Bits, PEB)。在嵌入容量较低时,各测试图像 PEB 均小于 100;在嵌入容量较大时 ($B=4$),各测试图像的 PEB 有所增加,其中图像“Lawrence”和“San Francisco”增加比较明

显。这也说明随着嵌入容量增加,图像的不可见性会变差,但是本文方法即使嵌入容量较大时 ($B=4$),含密图像 PSNR 仍可达到 38 dB 左右。

表 1 嵌入容量和 PEB 的关系 ($R=20$)
Table1 Relationship between hiding capacity and PEB ($R=20$)

嵌入容量	PEB			
	Robinson Farm	San Francisco	Yellow Stone	Lawrence
$B=4$ (49 152 b)	64	8905	22	13 378
$B=5$ (32 768 b)	22	106	22	22
$B=6$ (16 384 b)	22	22	22	64

3.3 鲁棒性测试

3.3.1 压缩攻击

JPEG2000 是多光谱图像常用的压缩方法。为了测试算法抗压缩性能,采用 JASPER 软件,通过逐渐增加 JPEG2000 压缩比来压缩测试图像。表 2 和表 3 给出了满足误比特率 (Bit Error Rate, BER) 小于 1% 和 PSNR 大于 38 dB 条件时,分别将 HH 子带系数划分为 2×2 和 4×4 不重叠的块时,本文算法的隐藏性能。压缩比 R_c 是满足这些条件时可以获得的 JPEG2000 最大压缩比。

表 2 本文算法在不同容量时的性能 (2×2 , BER<1% ,PSNR>38 dB)
Table 2 Performance of the proposed method with different capacity (2×2 , BER<1% ,PSNR>38 dB)

容量	PSNR/dB				R				R_c				BER/%			
	Robinson Farm	San Francisco	Yellow Stone	Lawrence	Robinson Farm	San Francisco	Yellow Stone	Lawrence	Robinson Farm	San Francisco	Yellow Stone	Lawrence	Robinson Farm	San Francisco	Yellow Stone	Lawrence
$B=4$ (49 152 b)	38.42	38.57	38.22	38.40	9	8	11	9	6	6	9	6	0.37	0.92	0.53	0.11
$B=5$ (32 768 b)	38.42	38.32	38.30	38.41	12	12	19	16	11	6	21	11	0.84	0.09	0.55	0.61
$B=6$ (16 384 b)	38.15	38.15	38.07	38.16	27	45	61	41	29	31	35	22	0.06	0.87	0.00	0.15

表 3 本文算法在不同容量时的性能 (4×4 , BER<1% ,PSNR>38 dB)
Table 3 Performance of the proposed method with different capacity (4×4 , BER<1% ,PSNR>38 dB)

容量	PSNR/dB				R				R_c				BER/%			
	Robinson Farm	San Francisco	Yellow Stone	Lawrence	Robinson Farm	San Francisco	Yellow Stone	Lawrence	Robinson Farm	San Francisco	Yellow Stone	Lawrence	Robinson Farm	San Francisco	Yellow Stone	Lawrence
$B=4$ (12 288 b)	38.47	38.65	38.82	38.69	13	12	12	12	10	7	16	10	0.72	0.70	0.34	0.68
$B=5$ (8192 b)	38.69	38.35	38.63	38.08	15	16	20	20	15	9	32	19	0.82	0.32	0.28	0.37
$B=6$ (4096 b)	38.36	38.26	38.27	38.29	29	46	61	43	51	50	66	37	0.00	0.00	0.00	0.00

系数矩阵分块大小对算法的性能有影响。由表 2 和表 3 对比可见,在保证图像视觉质量相当的情况下,图像分块越大,秘密信息抗 JPEG2000 的压缩比越大,然而,随着分块大小的增加,隐藏容量会降低。因此,在实际使用时可根据具体要求进行分块大小的选择。为了获得较大隐藏容量,本文后续实

验选择分块大小为 2×2 。

3.3.2 噪声攻击

采用不同噪声密度的椒盐噪声攻击来测试算法对噪声的鲁棒性,结果如图 7 所示。随着 R 的增加,提取信息的误比特率不断降低。调整 R 取值可以使提取的秘密信息误比特率控制在 0.05 以内。

在实际应用中,可以根据需要调整参数 R 和 B 达到 PSNR、隐藏容量以及鲁棒性之间的均衡。

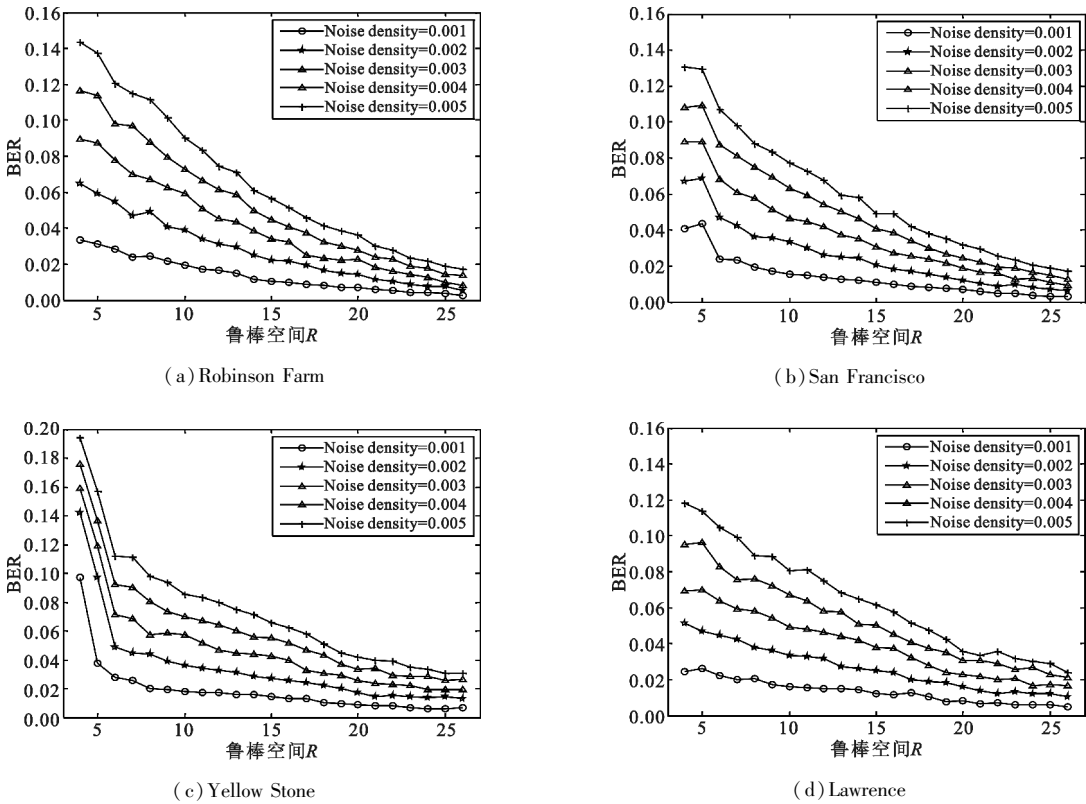


图 7 不同椒盐噪声密度下 BER 和鲁棒空间 R 的关系
Fig. 7 Relationship between BER and robust space R with different salt and pepper noise density

3.4 和当前算法比较

表 4 和表 5 分别给出了以多光谱图像和自然图像为载体进行信息隐藏时本文算法和现有算法的对比结果。与 Zeng 等人^[6]算法和李等人^[7]算法相比,

在同等不可见性条件下,本文算法的嵌入容量是对比算法的 2 倍。另外,本文算法不仅在对抗 JPEG2000 压缩的鲁棒性方面具有优势,而且对噪声干扰也具有鲁棒性,而文献[6-7]没有讨论对噪声的鲁棒性。

表 4 和现有方法的性能对比——多光谱图像 (BER<1%)

Table 4 Performance comparison between the proposed method and existing algorithms for multispectral images (BER<1%)

方法	PSNR/dB				C				R_c				BER/%			
	Robinson Farm	San Francisco	Yellow Stone	Lawrence	Robinson Farm	San Francisco	Yellow Stone	Lawrence	Robinson Farm	San Francisco	Yellow Stone	Lawrence	Robinson Farm	San Francisco	Yellow Stone	Lawrence
文献[6]	38.48	38.48	38.49	38.49	24 576	24 576	24 576	24 576	6	4	6	4	0.61	0.47	0.60	0.55
文献[7]	38.92	38.33	38.22	38.72	24 576	24 576	24 576	24 576	6	5	8	5	0.02	0.53	0.02	0.69
文献[8]	38.56	38.62	38.27	38.39	49 152	49 152	49 152	49 152	6	4	9	6	0.70	0.94	0.35	0.71
本文	38.42	38.57	38.22	38.40	49 152	49 152	49 152	49 152	6	6	9	6	0.37	0.92	0.53	0.11

表 5 和现有方法的性能对比——自然图像 (BER<1%)

Table 5 Performance comparison between the proposed method and existing algorithms for natural images (BER<1%)

方法	PSNR/dB						C						R_c						BER/%					
	Lena	Baboon	Boat	Airplane	Goldhill	Peppers	Lena	Baboon	Boat	Airplane	Goldhill	Peppers	Lena	Baboon	Boat	Airplane	Goldhill	Peppers	Lena	Baboon	Boat	Airplane	Goldhill	Peppers
文献[6]	38.34	35.24	37.93	38.11	37.78	37.56	24 576	24 576	24 576	24 576	24 576	24 576	7	2	6	8	5	6	0.22	0.85	0.44	0.46	0.68	0.29
文献[7]	38.77	36.01	38.66	38.29	38.40	37.72	24 576	24 576	24 576	24 576	24 576	24 576	13.5	4.5	10	11	9.5	14	0.20	0.34	0.17	0.10	0.10	0.27
文献[8]	38.58	35.12	38.51	38.54	38.25	37.65	49 152	49 152	49 152	49 152	49 152	49 152	13	3	10	11	9	9	0.65	0.87	0.68	0.34	0.51	0.83
本文	38.96	36.21	38.46	38.28	38.22	37.84	49 152	49 152	49 152	49 152	49 152	49 152	15	5	12	12	10	15	0.42	0.33	0.17	0.15	0.15	0.28

同时,该算法与文献[8]对比结果表明,在隐藏容量相同的情况下,本文算法抗 JPEG2000 压缩倍数平均比文献[8]高 23.9%,误码率平均低 44.8%,说明本文算法鲁棒性更好。

4 结束语

本文提出一种变换域统计量移位的多光谱图像鲁棒无损信息隐藏算法,将信息嵌入多光谱 KLT 本征子图像的 DWT 高频分块系数中,利用小波 HH 高频系数分块均值的稳定性实现对压缩和噪声的鲁棒性。实验结果表明:在图像质量与文献[6-7]相当的情况下,该算法隐藏容量是对比算法的 2 倍;在隐藏容量与文献[8]算法相同的情况下,该算法抗压缩倍数更高,鲁棒性更好。此外,该算法利用误差补偿使载体图像无损恢复的同时可以盲提取秘密信息,且隐藏容量固定可预知,因此具有较高的实用价值。在实际应用中可以根据需要通过调整参数 R 、 B 以及分块大小来达到含秘图像质量、隐藏容量以及鲁棒性之间的均衡。如何在保证算法同等鲁棒性和不可见性的前提下进一步提高信息隐藏容量,还有待继续研究。

参考文献:

- [1] KAARNA A, PARKKINEN J. Multiwavelets in watermarking spectral images [C]// Proceedings of 2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anchorage, AK: IEEE, 2014: 3225-3228.
- [2] FANG H, ZHOU Q, LI K J. Robust watermarking scheme for multispectral images using discrete wavelet transform and Tucker decomposition [J]. Journal of Computers, 2013, 8(11): 2844-2850.
- [3] ZHANG X P. Reversible Data hiding with optimal value transfer [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2013, 15(2): 316-325.
- [4] PENNA B, TILLO T, MAGLI E, et al. Transform coding techniques for lossy hyperspectral data compression [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(5): 1408-1421.
- [5] NI Z C, SHI Y Q, ANSARI N, et al. Robust lossless image data hiding designed for semi-fragile image authentication [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(4): 497-509.
- [6] ZENG X T, PING L D, PAN X Z. A lossless robust data hiding scheme [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(4): 1656-1667.
- [7] 李晓博,周詮. 统计量移位的鲁棒无损图像信息隐藏 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(11): 1359-1366.

- LI Xiaobo, ZHOU Quan. Robust lossless image data hiding with statistical quantity shifting [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(11): 1359-1366. (in Chinese)
- [8] 朱洪洪,周詮. 卫星遥感图像的鲁棒无损数据隐藏传输算法 [J]. 宇航学报, 2015, 36(3): 315-323.
- ZHU Lihong, ZHOU Quan. A robust lossless data hidden transmission method for satellite remote sensing image [J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(3): 315-323. (in Chinese)
- [9] AN L L, GAO X B, LI X L, et al. Robust reversible watermarking via clustering and enhanced pixel-wise masking [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(8): 3598-3611.
- [10] YANG C Y, LIN C H. High-quality and robust reversible data hiding by coefficient shifting algorithm [J]. ETRI Journal, 2012, 34(3): 429-438.
- [11] 方凌江,粘永健,王迎春. 基于分类 KLT 的高光谱图像压缩 [J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(11): 82-85.
- FANG Lingjiang, NIAN Yongjian, WANG Yingchun. Hyperspectral images compression based on classified KLT [J]. Computer Technology and Development, 2013, 23(11): 82-85. (in Chinese)
- [12] 方海,周詮. 多层嵌入的多光谱图像可逆信息隐藏算法 [J]. 计算机应用, 2013, 33(6): 1622-1645.
- FANG Hai, ZHOU Quan. Multilevel reversible information hiding algorithm for multispectral images [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(6): 1622-1645. (in Chinese)
- [13] MIGUEL A, RISKIN E, LADNER R, et al. Near-lossless and lossy compression of imaging spectrometer data: comparison of information extraction performance [J]. Signal, Image and Video Processing, 2012, 6(4): 597-611.

作者简介:



刘娟妮(1985—),女,陕西西安人,2010 年获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为图像处理;

LIU Juanni was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1985. She received the M. S. degree in 2010. She is currently working toward the Ph. D. degree. Her research concerns image

processing.

Email: liujuanni0@126.com

周詮(1965—),男,陕西西安人,1992 年于西安电子科技大学获博士学位,现为研究员、博士生导师,主要研究方向为数据传输和图像处理。

ZHOU Quan was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1965. He received the Ph. D. degree from Xidian University, in 1992. He is now a senior engineer of professor and also the Ph. D. supervisor. His research interests include data transmission and image processing.