

失真代价动态更新的自适应彩色图像隐写算法

汤光明 姜明明* 孙艺

(解放军战略支援部队信息工程大学 郑州 450001)

摘要: 基于灰度图像隐写算法直接应用于彩色图像引起的安全性问题, 该文针对彩色分量提出一种动态更新失真代价的空域隐写算法。首先, 分析了彩色分量内容特性与通道间相关性的关系, 提出中心元素的失真更新准则。随后, 考虑到隐写过程中邻域分量嵌入修改产生的交互影响, 得到维持邻域相关性的最优修改方式。最后, 提出彩色分量的失真代价动态更新策略(CCMS), 并应用该策略设计实现了一种彩色图像的空域自适应隐写算法。实验表明, 在5种嵌入率下HILL-CCMS, WOW-CCMS算法对彩色隐写特征CRM, SCCRM的抗检测能力明显高于HILL和WOW算法。

关键词: 信息安全; 自适应隐写; 失真代价更新; 彩色通道相关性

中图分类号: TP309

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)03-0656-10

DOI: 10.11999/JEIT180388

Adaptive Color Image Steganography Based on Dynamic Distortion Modification

TANG Guangming JIANG Mingming SUN Yi

(PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Considering the possible security problems of directly extending steganographic schemes for gray-scale images to color images, an adaptive distortion-updated steganography method is put forward based on the Modification Strategy for Color Components (CCMS). First, the correlation between color components and RGB channels is analyzed, and the principle of distortion cost modification is proposed. Moreover, the optimal modification mode is conducted to maintain the statistical correlation of adjacent components. Finally, color image steganography schemes called CCMS are proposed. The experimental results show that the proposed HILL-CCMS and WOW-CCMS make great improvement over HILL and WOW methods under 5 embedding rates in resisting state-of-the-art color steganalytic methods such as CRM and SCCRM.

Key words: Information security; Adaptive steganography; Distortion modification; Color channel correlation

1 引言

数字图像自适应隐写技术是信息隐藏领域内的一个重要研究方向, 利用图像载体的冗余性进行秘密消息的嵌入^[1], 能够在公开信道中的隐蔽通信。为提高抗隐写检测能力, 目前的空域自适应隐写算法主要基于最小化失真理论进行设计, 即通过定义的失真函数分配元素的失真代价并利用隐写编码生成载密体^[2]。近年来, 大部分空域隐写算法研

究主要关注灰度图像, 默认针对灰度图像的隐写算法可以直接扩展应用于彩色图像^[3], 未考虑彩色图像的通道间相关性对失真代价分配的影响。

文献^[4]提出的HUGO算法受到隐写分析SPAM特征的启发, 根据隐写前后特征矢量的变化量衡量失真代价, 在图像纹理复杂及边缘区域实现嵌密。WOW算法^[5]基于方向滤波器分配失真, 减少了在图像清晰边缘处的嵌入修改, 抗SRM^[6]检测性优于HUGO。S-UNIWARD^[7]算法对文献^[5]中设计的失真函数进行了微调, 与WOW算法性能基本相似。文献^[8]提出的HILL算法, 通过高、低通滤波器将复杂纹理区域像素的较小失真代价向其邻域扩散, 改进了WOW中定义的失真函数, 使得嵌入修改更加聚集在难以被检测到的复杂区域。

目前的彩色图像自适应隐写研究, 通常利用图像处理技术将原始载体分解为R, G, B通道上的灰

收稿日期: 2018-04-26; 改回日期: 2018-09-26; 网络出版: 2018-11-01

*通信作者: 姜明明 jiangmingming1994@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61601517), 信息保障技术重点实验室开放基金(KJ-15-106)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61601517), The Foundation of Science and Technology on Information Assurance Laboratory (KJ-15-106)

度图像，直接利用灰度图像的隐写算法进行嵌密^[3]，默认通道图像之间是相互独立的，未考虑相邻颜色分量的嵌入修改对通道间相关性的破坏。然而，彩色载体的各幅通道图像之间具有紧密的统计相关性，在分配失真代价时要同时考虑隐写修改对通道内和通道间相关性造成的影响。实际上，相比于灰度图像，彩色图像的多通道性为隐写分析者提供了更为丰富的检测特征。彩色隐写分析方法CRM^[9]，SCCRM^[10]，GCRM^[11]，均提取了通道间相关性特征来进行检测。因此，直接将灰度图像隐写算法应用于彩色载体密体生成的做法，难以有效抵抗现有彩色隐写分析检测。为解决这一问题，文献^[3]受单通道灰度图像失真更新策略CMD^[12]的启发，首次提出了一种针对彩色图像的自适应更新的隐写方案CMD-C。该方案根据邻域内R, G, B通道上6个分量的修改方式聚类对中心元素的初始失真进行更新调整，使其修改方向能够更好地维持原图像的通道间相关性，在一定程度上提高了算法的安全性。该方案的待改进之处是，在更新时认为每个邻域分量对中心元素产生的影响作用是完全一致的，未能根据邻域分量的相关性强弱自适应分配权重。

为更好地解决灰度图像隐写算法直接应用于彩色隐写造成的通道相关性破坏这一问题，本文在文献^[3,12]的研究基础上，进一步研究了邻域相关性与彩色分量隐写修改安全性间的相互影响，对CMD-C方案进行了改进与拓展，提出了一种针对彩色分量的失真代价更新策略(Modification Strategy for Color Components, CCMS)，并利用该策略设计了彩色图像的自适应隐写算法。该策略依据邻域分量的修改方向对中心元素的失真进行动态调整，使失真代价的计算兼顾了元素修改对通道内和通道间相关性的影响，从而更好地维持彩色原图像的统计特性，以实现提高算法安全性的目标。

2 预备工作

设彩色图像 $\mathbf{I}^{(RGB)} = \{\mathbf{I}^{(R)}, \mathbf{I}^{(G)}, \mathbf{I}^{(B)}\}$ ，其中 $\mathbf{I}^{(R)}, \mathbf{I}^{(G)}, \mathbf{I}^{(B)}$ 分别表示红、绿、蓝通道图像。为便于分析与表述，设彩色像素 $I_{ij}^{(RGB)} = \{I_{ij}^{(R)}, I_{ij}^{(G)}, I_{ij}^{(B)}\}$ 的绿色分量 $I_{ij}^{(G)}$ 为中心分量， $I_{ij}^{(R)}, I_{ij}^{(B)}$ 为其邻域分量。设颜色分量的嵌入修改方式为 $\delta_{ij}^{(p)}$ ($\delta \in \{0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm k | k \in N_+\}$)，隐写后的颜色分量值可表示为 $I_{ij}^{(p)'} = I_{ij}^{(p)} + \delta_{ij}^{(p)}$ 。本文讨论三元隐写，只考虑载体元素的3种嵌入修改情况 $\{0, +1, -1\}$ ，并将分量 $+1, -1$ 修改对应的失真代价分别记为 $\rho_{i,j,+}^{(p)}, \rho_{i,j,-}^{(p)}$ 。

3 基于彩色分量邻域相关性的失真代价更新策略(CCMS)

3.1 彩色邻域相关性准则

为更好地描述彩色载体邻域像素之间相关性，首先建立彩色载体的邻域像素集合，并根据位置关系系划分为垂直与水平邻域集两部分。

定义1 定义中心分量 $I_{ij}^{(G)}$ 的彩色邻域系统为 $U(I_{ij}^{(p)}) = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ ($|n| = 6$)，其中包括4个相同通道颜色分量和2个相邻通道颜色分量，如图1所示。根据位置关系，将 $U(I_{ij}^{(p)})$ 分为垂直邻域集 $N_{\text{ver}} = \{I_{i,j}^{(R)}, I_{i,j}^{(B)}, I_{i,j}^{(G)}\}$ 和水平邻域集为 $N_{\text{hor}} = \{I_{i-1,j}^{(G)}, I_{i+1,j}^{(G)}, I_{i,j-1}^{(G)}, I_{i,j+1}^{(G)}\}$ 。

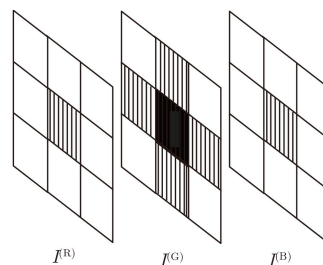


图1 彩色邻域系统示意图

定义2 设任意两幅通道图像间的相关性系数 $C(I_1, I_2)$ 依据式(1)计算得出。相关性系数^[13]值越大表示两幅通道图像间的相关性越强，反之则表示相关性较弱。

$$C(I_1, I_2) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_1^2(i, j) - \mu_1^2] [I_2^2(i, j) - \mu_2^2]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_1^2(i, j) - \mu_1^2]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_2^2(i, j) - \mu_2^2]^2 + \varepsilon_0}} \quad (1)$$

其中， μ_1^2, μ_2^2 为分别表示通道图像 I_1, I_2 的均值。 ε_0 是控制参数用于保持分母稳定，一般取 $\varepsilon_0 = 0.01$ 。

定理1 彩色图像的R, G, B通道图像之间具有紧密联系，但位于不同区域颜色分量的通道间相关性具有一定差异性：边缘区域分量的通道间相关性波动较大，而非边缘区域分量的通道间相关性相对稳定。

证明 将图2(a)所示的原图像分解为如图2(b), 2(c), 2(d)所示的3幅通道图像。观察可知，3幅通道图像具有基本相似的边缘和内容特征，仅在灰度值上略有不同，因而相关性紧密。

为进一步探究通道间相关性与彩色分量内容性

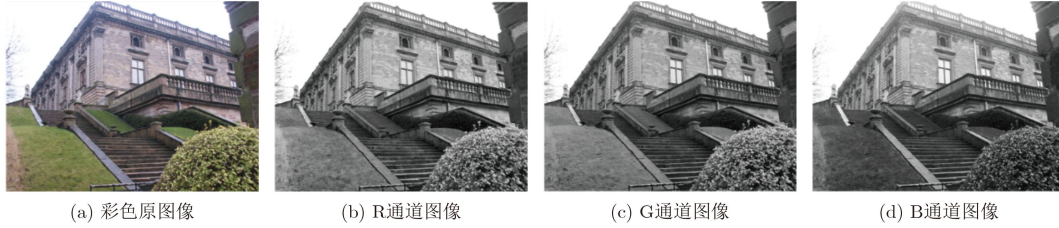


图2 彩色原图像及其各通道图像

质之间的关系,从UCID^[14]图像库中随机选取1000幅图像作为实验样本。首先,将彩色样本的R, G, B通道图像剪裁至 256×256 大小,并分解为HH, HL, LH, LL4个子带。然后,根据定义3分别计算R/G, R/B, G/B通道对应子带的相关性系数。选取UCID图像库中人工建筑、自然景观、动植物等15幅代表性图像(如图3)的实验结果列举如表1。

相关性系数的幅值变化反映了图像间的相关性强弱, C 值越大说明通道间相关性越强,反之则较弱。通过分析表1的实验结果可知,95%以上的

R/G, R/B, G/B通道的高、低频区域相关性系数均高于0.9,说明彩色图像R, G, B通道图像之间相关性紧密。但高、低频区域的相关性系数具有一定差异:高频子带(LH, HL, HH)的 C 值全部高于0.95;而低频子带(LL)的 C 值分布区间为0.45~0.95,明显低于高频子带。这种差异性主要是由图像的内容特性引起的。高频成分反映了图像噪声及内容细节,低频成分描述了图像的边缘区域。由于边缘区域灰度值变化剧烈,故 C 值波动较大,而高频区域图像相对平滑则 C 值相对稳定,定理1得证。



图3 UCID图像库中的4幅图像示例

表1 UCID图像库中4幅图像的相关性系数值

序号	HH			HL			LH			LL		
	R/G	R/B	G/B	R/G	R/B	G/B	R/G	R/B	G/B	R/G	R/B	G/B
1	0.986	0.985	0.983	0.990	0.962	0.994	0.995	0.990	0.995	0.837	0.955	0.941
2	0.941	0.945	0.943	0.934	0.973	0.988	0.927	0.974	0.927	0.479	0.869	0.972
3	0.982	0.978	0.968	0.989	0.983	0.985	0.927	0.975	0.927	0.885	0.909	0.891
4	0.948	0.953	0.939	0.980	0.991	0.976	0.978	0.974	0.978	0.823	0.907	0.904

根据定理1可推知,在隐写过程中进行失真代价更新时,需要结合中心分量的内容特性自适应地分配邻域分量的更新权重。

定义3 设邻域分量的嵌入修改对中心元素 $I_{ij}^{(p)}$ 产生的相关性影响度为 ϕ ,计算公式为

$$\phi(I_{ij}^{(G)}) \approx \sum \omega_k \delta(I_{ij}^{(q)}), I_{ij}^{(q)} \in U(I_{ij}^{(G)}) \quad (2)$$

其中, $I_{ij}^{(q)}$ 是中心元素 $I_{ij}^{(p)}$ 的邻域系统中的分量, n 表示邻域分量总数。 ω_k ($0 < \omega_k \leq 1$)为影响度权值。

定理2 在实际隐写过程中,应尽可能地保持邻域相关性,使邻域中 n 个分量嵌入修改的交互影响最小化,即满足 $\min \phi(I_{ij}^{(G)})$,可推导出中心元

素的近似最优修改方式为

$$\min \phi(I_{ij}^{(G)}) \approx \sum_{k=1}^n \omega_k \delta(I_{ij}^{(q)}), I_{ij}^{(q)} \in U(I_{ij}^{(G)}) \quad (3)$$

证明 按定义3计算中心元素 $I_{ij}^{(p)}$ 的相关性影响度为

$$\begin{aligned} \phi(I_{ij}^{(G)}) = & \omega_1 \left| \delta_{i,j}^{(R)} - \delta_{i,j}^{(G)} \right| + \omega_2 \left| \delta_{i,j}^{(B)} - \delta_{i,j}^{(G)} \right| \\ & + \omega_3 \left| \delta_{i-1,j}^{(G)} - \delta_{i,j}^{(G)} \right| + \omega_4 \left| \delta_{i+1,j}^{(G)} - \delta_{i,j}^{(G)} \right| \\ & + \omega_5 \left| \delta_{i,j-1}^{(G)} - \delta_{i,j}^{(G)} \right| + \omega_6 \left| \delta_{i,j+1}^{(G)} - \delta_{i,j}^{(G)} \right| \quad (4) \end{aligned}$$

从隐写安全性角度出发,尽可能减小相邻分量

嵌入修改操作对彩色邻域相关性的破坏，应保持 $\phi(I_{i,j}^{(G)})$ 最小化，即满足式(5)

$$\begin{aligned} \min \phi(I_{i,j}^{(G)}) &\Leftrightarrow \omega_1 (\delta_{i,j}^{(R)} - \delta_{i,j}^{(G)})^2 + \omega_2 (\delta_{i,j}^{(B)} - \delta_{i,j}^{(G)})^2 \\ &+ \omega_3 (\delta_{i-1,j}^{(G)} - \delta_{i,j}^{(G)})^2 + \omega_4 (\delta_{i+1,j}^{(G)} - \delta_{i,j}^{(G)})^2 \\ &+ \omega_5 (\delta_{i,j-1}^{(G)} - \delta_{i,j}^{(G)})^2 + \omega_6 (\delta_{i,j+1}^{(G)} - \delta_{i,j}^{(G)})^2 \\ &= \delta_{i,j}^{(G)2} - 2\delta_{i,j}^{(G)} (\omega_1 \delta_{i,j}^{(R)} + \omega_1 \delta_{i,j}^{(B)} \\ &+ \omega_3 \delta_{i-1,j}^{(G)} + \omega_4 \delta_{i+1,j}^{(G)} + \omega_5 \delta_{i,j-1}^{(G)} \\ &+ \omega_6 \delta_{i,j+1}^{(G)}) + C \end{aligned} \quad (5)$$

根据2次函数性质，可知当邻域相关性影响度最小时，有

$$\phi_{ij}^{(G)} = \sum_{k=1}^6 \omega_k \delta(I_{ij}^{(q)}), I_{ij}^{(q)} \in U(I_{ij}^{(G)}) \quad (6)$$

由于对彩色分量的修改方式为正整数，因此需对式(6)取整，可得式(7)，定理2得证。

$$\phi_{ij}^{(G)} \approx \sum_{k=1}^6 [\omega_k \delta(I_{ij}^{(q)})], I_{ij}^{(q)} \in U(I_{ij}^{(G)}) \quad (7)$$

3.2 基于通道间相关性的彩色分量更新准则

彩色图像的多颜色通道在为隐写方提供更大隐藏容量的同时，也为隐写检测者提供了更为丰富的可分析数据。由于灰度图像仅具有单一通道，隐写时只需考虑像素修改对原图通道内相关性的影响。而对于彩色图像来说，在衡量失真代价时则需要综合考虑到嵌入修改对通道内和通道间相关性造成的改变。而通道间相关性正是最新提出的彩色隐写检测方法所提取的重要特征。因此，本节从通道间相关性出发，分析位于相同坐标、不同通道的颜色分量之间嵌入修改对隐写安全性的影响，从而推导出单个彩色像素的最优修改模式。

定义4 根据彩色像素颜色分量嵌入修改的异同，将其修改方式分为同步模式(Syn)和异步模式

(Asyn)两种。如果 $I_{ij}^{(R)}, I_{ij}^{(G)}, I_{ij}^{(B)}$ 的修改方式相同则称为同步模式，反之则为异步模式。

定义5 根据 $I_{ij}^{(R)}, I_{ij}^{(B)}$ 与中心分量修改方式的异同，可将异步模式进一步分为：1-异步模式(1-Asyn)和2-异步模式(2-Asyn)，1-Asyn表示和 $I_{ij}^{(B)}$ 中仅有一个分量的修改与中心元素 $I_{ij}^{(G)}$ 不同；2-Asyn表示 $I_{ij}^{(R)}$ 和 $I_{ij}^{(B)}$ 的修改方式均不同于 $I_{ij}^{(G)}$ 。

定理3 在相同条件下，Syn模式的抗隐写检测能力优于Asyn模式，即Syn模式的安全性更高。

证明 为探究彩色像素的颜色分量在不同修改模式下的抗检测性，需控制变量：假设邻域系统内其他分量不做修改，仅讨论 $I_{ij}^{(R)}, I_{ij}^{(G)}, I_{ij}^{(B)}$ 的嵌入修改。首先，用列举法给出3种修改模式对应的彩色分量修改组合，见表2。

然后，根据定义5计算Syn, 1-Asyn, 2-Asyn 3种修改模式的 ϕ 值。其中， $\phi_{\text{Syn}} = 0$ ；1-Asyn模式的相关影响度 ϕ 值有4种取值， $\phi_{1-\text{Asyn}} = \{\omega_1, \omega_2, 2\omega_1, 2\omega_2\}$ ， $\min\{\omega_1, \omega_2\} \leq \phi_{1-\text{Asyn}} \leq \max\{2\omega_1, 2\omega_2\}$ ；2-Asyn模式的 ϕ 值同样有4种取值， $\phi_{2-\text{Asyn}} = \{\omega_1 + \omega_2, 2\omega_1 + \omega_2, \omega_1 + 2\omega_2, 2\omega_1 + 2\omega_2\}$ ，易知 $\omega_1 + \omega_2 \leq \phi_{2-\text{Asyn}} \leq 2\omega_1 + 2\omega_2$ 。

由于 $\min\{\omega_1 + \omega_2, 2\omega_1 + \omega_2, \omega_1 + 2\omega_2, 2\omega_1 + 2\omega_2\} = \omega_1 + \omega_2$ ， $\max\{\omega_1 + \omega_2, 2\omega_1 + \omega_2, \omega_1 + 2\omega_2, 2\omega_1 + 2\omega_2\} = 2\omega_1 + 2\omega_2$ ，因此 $\omega_1 + \omega_2 \leq \phi_{2-\text{Asyn}} \leq 2\omega_1 + 2\omega_2$ 。可得， $\phi_{\text{Syn}} < \phi_{1-\text{Asyn}}, \phi_{\text{Syn}} < \phi_{2-\text{Asyn}}$ 。

上述分析从理论角度证明了同步嵌入修改模式对载体图像的相关性的破坏影响最小，能够更好地保持原图的统计特性。下面通过实验对定理3进行验证。从未压缩的彩色空域图像库UCID^[4]中随机选择1000张图像作为彩色载体集。利用WOW和HILL两种典型算法分别按Syn, 1-Asyn, 2-Asyn模式进行嵌入。利用SRM^[6], CRM^[9], SCCRM^[10], GCRM^[11] 4种隐写特征对彩色载体进行检测。隐写嵌入共包括5组实验，嵌入率为0.1~0.5 bpc，间

表2 3种修改模式的颜色分量修改组合

序号	1	2	3	4	5	6
Syn	(0, 0, 0)	(+1, +1, +1)	(-1, -1, -1)	-	-	-
1-Asyn	(+1, 0, 0)	(-1, 0, 0)	(0, 0, +1)	(0, 0, -1)	(0, +1, +1)	(-1, +1, +1)
2-Asyn	(+1, 0, +1)	(+1, 0, -1)	(-1, 0, +1)	(-1, 0, -1)	(0, +1, 0)	(-1, +1, -1)
序号	7	8	9	10	11	12
Syn	-	-	-	-	-	-
1-Asyn	(+1, +1, 0)	(+1, +1, -1)	(0, -1, -1)	(+1, -1, -1)	(+1, -1, -0)	(-1, -1, +1)
2-Asyn	(-1, +1, 0)	(0, +1, -1)	(0, -1, 0)	(+1, -1, 0)	(0, -1, +1)	(+1, -1, +1)

隔为0.1, 单位为bit/channel pixel。实验环境为MATLAB R2012b平台, 硬件为Intel Core TM2 CPU6320@1.86 GHz。0.4 bpp嵌入率下的实验结果如表3所示。

表3 彩色分量不同修改模式下的抗隐写检测能力

抗检测性(%)	Syn	1-Asyn	2-Asyn
SRM	31.5290	31.0850	30.9980
CRM	35.9320	19.8730	2.9473
SCCRM	30.4530	19.9450	3.0272
GCRM	37.7660	21.6840	5.7357

实验结果表明, 3种模式的抗SRM检测性基本相似, 这是由于SRM仅提取了图像的空域通道内特征。而对于检测彩色通道间相关性特征的CRM, SCCRM和GCRM彩色隐写检测算法, Syn模式的抗检测性明显强于1-Asyn和2-Asyn, 定理3得证。

3.3 基于邻域相关性的彩色分量更新策略

根据定理1和定理2可知, 彩色邻域系统中分量的影响度权值与像素的内容特性, 更新策略的设计思路是: 首先, 对中心元素的性质进行判断, 建立起对应的强、弱相关邻域分量集, 并为集合中的分量赋予对应的权值; 随后, 在邻域分量修改方式确定的条件下, 计算中心元素在不同修改方式下对应的邻域系统嵌入修改度总和; 最后, 依据和值的大小对失真代价进行动态调整。

定义6 设邻域分量修改度总和为 $Q = Q^{(+1)} + Q^{(-1)}$, 将正、负修改度分别记为 $Q^{(+1)}, Q^{(-1)}$, 计

算方法如式(8):

$$\left. \begin{aligned} Q^{(+1)} &= \sum_{m=1}^M \omega_m \cdot \delta_{ij}^{(q)}, \delta_{ij}^{(q)} = +1, I_{ij}^{(q)} \in U(I_{ij}^{(P)}) \\ Q^{(-1)} &= \sum_{n=1}^N \omega_n \cdot \delta_{ij}^{(q)}, \delta_{ij}^{(q)} = -1, I_{ij}^{(q)} \in U(I_{ij}^{(P)}) \end{aligned} \right\} (8)$$

其中, M, N 分别表示 $U(I_{ij}^{(P)})$ 中修改方式为+1, -1的分量统计频数, ω_k 为分量的影响度权值。

由于 $Q^{(+1)} \geq 0, Q^{(-1)} \leq 0$, 可依据邻域分量修改度总和 Q 的正负判断更新方向: Q 为正值时, 应该减小中心元素正向修改的失真代价, 增加负方向修改的失真代价; Q 为负值时, 则应增大正向修改的失真代价, 减小负方向修改的失真代价; 当 Q 为零时, 暂不更新。综合以上分析, 基于彩色邻域相关性的失真代价动态更新策略如下。

步骤1 通过Sobel算子^[15]判断中心元素的性质。将邻域系统中的元素划分为非边缘区域分量 N 、垂直边缘分量 E_v 及水平边缘分量 E_h 3类, 建立相应的强相关集 set_1 及弱相关集 set_2 。

在自然的彩色图像中, 红、绿、蓝颜色通道具有相似的内容和边缘特征, 可任选一幅通道图像将其分割为如图4(a)所示的 3×3 子块, 利用图4(b), 4(c)所示的Sobel算子计算水平和垂直方向的梯度。其中, $I_{i,j}$ 的梯度向量 $\nabla I_{i,j}$ 、角度 θ , 及其在水平和垂直方向边缘上的分布系数 e_h 和 e_v 如式(9)~式(11)所示。

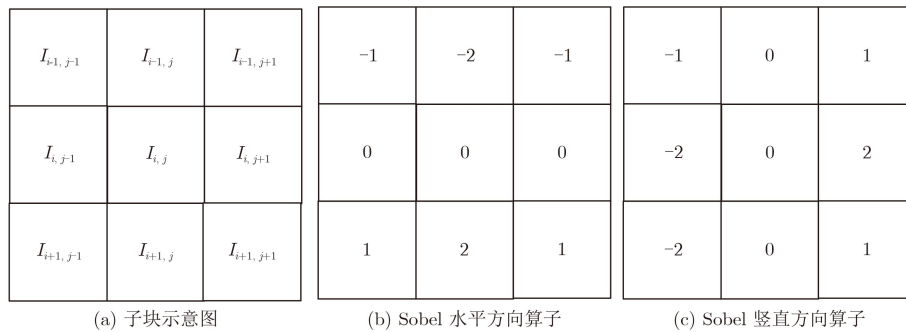


图4 Sobel算示意图

$$\nabla I_{i,j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{i,j}}{\partial h} \\ \frac{\partial I_{i,j}}{\partial v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_h \\ G_v \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\theta = \arctan \frac{G_v}{G_h} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} e_h &= \sin^2 \theta \\ e_v &= \cos^2 \theta \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

根据 e_h 和 e_v 的大小关系将 $I_{i,j}$ 分为3类: 当 $e_h = e_v$ 时为非边缘分量, $I_{i,j} \in N$; 当 $e_h \neq e_v$ 时, $I_{i,j}$ 为边缘分量: 若 $e_h < e_v$ 时为为垂直边缘分量, 即 $I_{i,j} \in E_v$; 若 $e_h > e_v$ 时为水平边缘分量, 即 $I_{i,j} \in E_h$ 。随后, 将彩色邻域集 Ner 分为强相关集 set_1 和弱相关集 set_2 两部分, 如式(12)所示。 N, E_v, E_h 对应的 Ner 划分如图5所示, 用深色区域表示强相关分量, 浅色区域表示弱相关分量。

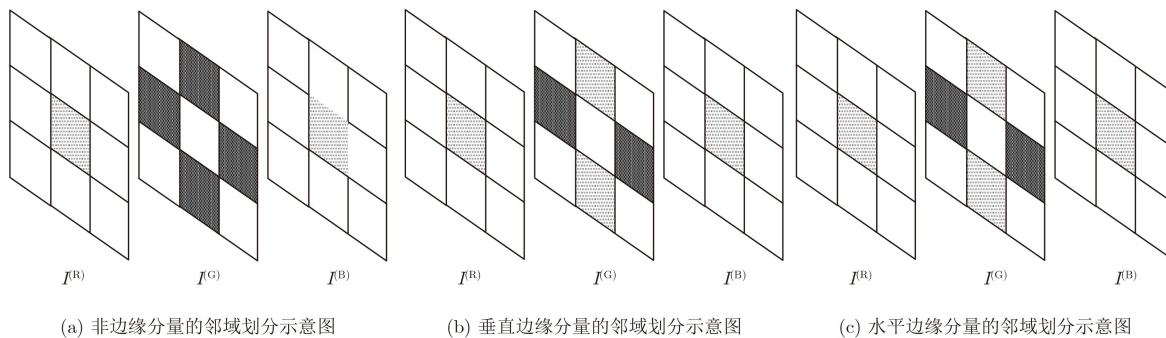


图5 3类邻域划分示意图

$$\left. \begin{aligned}
 \text{set}_1 &= \left\{ I_{i-1,j}^{(G)}, I_{i+1,j}^{(G)}, I_{i,j+1}^{(G)}, I_{i,j-1}^{(G)} \right\} \\
 \text{set}_2 &= \left\{ I_{i,j}^{(R)}, I_{i,j}^{(B)} \right\}, I_{i,j} \in N \\
 \text{set}_1 &= \left\{ I_{i,j}^{(R)}, I_{i,j}^{(B)}, I_{i,j+1}^{(G)}, I_{i,j-1}^{(G)} \right\} \\
 \text{set}_2 &= \left\{ I_{i-1,j}^{(G)}, I_{i+1,j}^{(G)} \right\}, I_{i,j} \in E_v \\
 \text{set}_1 &= \left\{ I_{i,j}^{(R)}, I_{i,j}^{(B)}, I_{i-1,j}^{(G)}, I_{i+1,j}^{(G)} \right\} \\
 \text{set}_2 &= \left\{ I_{i,j+1}^{(G)}, I_{i,j-1}^{(G)} \right\}, I_{i,j} \in E_h
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

步骤2 根据相关性分配邻域分量影响度权值 ω ，计算邻域分量修改度总和 Q ，更新中心元素的失真代价 ρ 。用 N_1, N_2 分别表示集合 $\text{set}_1, \text{set}_2$ 中的分量个数，则强、弱相关集中分量的影响度权值 ω_i, ω_j 为

$$\omega_i = \frac{\max\{e_h, e_v\}}{N_1}, \omega_j = \frac{\min\{e_h, e_v\}}{N_2} \quad (13)$$

由于 $e_h + e_v = \sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$ ，邻域分量的权值满足和为1。

用符号函数判断邻域分量修改度总和 Q 的正负，具体更新方法如下：

- (1) 如果 $\text{sgn}(Q) = 0$ ，不进行更新；
- (2) 如果 $\text{sgn}(Q) = 1$ ，则按式(14)更新中心分量的失真

$$\left. \begin{aligned}
 \rho_{i,j,+}^{(p)} &= (1 + \alpha)^{\phi_1} \rho_{i,j,+}^{(p)} \\
 \rho_{i,j,-}^{(p)} &= (1 + \alpha)^{-\phi_1} \rho_{i,j,-}^{(p)}
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中， $\alpha = 0.5, \phi_1 = -1$ 。

(3) 如果 $\text{sgn}(Q) = -1$ ，则按式(15)更新中心分量的失真

$$\left. \begin{aligned}
 \rho_{i,j,+}^{(p)} &= (1 + \alpha)^{\phi_2} \rho_{i,j,+}^{(p)} \\
 \rho_{i,j,-}^{(p)} &= (1 + \alpha)^{-\phi_2} \rho_{i,j,-}^{(p)}
 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中， $\alpha = 0.5, \phi_2 = 1$ 。

4 自适应隐写算法设计

本节在CCMS策略提出的基础上，设计实现了一种彩色图像的空域自适应隐写算法。主要步骤如下：(1)彩色载体和待嵌秘密消息的预处理，即按规定顺序扫描原图像生成对应的采样块，并将秘密消息分段；(2)计算各颜色通道内元素的初始失真代价；(3)通过初始失真结合STC编码完成采样块的预嵌入；(4)采用CCMS策略依次对彩色分量的失真进行动态调整，直至全部秘密消息嵌入完成。

4.1 秘密信息嵌入

步骤1 将大小为 $M \times N$ 的彩色载体图像 $\mathbf{X}^{(RGB)}$ 分解为通道图像 $\mathbf{X}^{(R)}, \mathbf{X}^{(G)}, \mathbf{X}^{(B)}$ 。将每幅通道图像分为 $S = \left\lfloor \frac{M \times N}{4} \right\rfloor$ 个 2×2 的子块，按图6所示的扫描顺序生成采样图像块。将秘密信息为 L 等分为3组 $L^{(R)}, L^{(G)}, L^{(B)}$ 后，利用共享密钥 K_s 生成的子密钥 K_1, K_2, K_3 对3组比特串置乱，把每组比特串均分为 S 段作为采样图像块的待嵌入秘密消息。

步骤2 结合已有的自适应隐写算法为各通道图像分量分配初始失真代价。本文中，利用WOW算法按照式(16)计算各通道图像中的分量失真代价。

$$\rho_{i,j}^{(t)} = \left(\sum_{k=1}^n \left| \xi_{ij}^{(k)} \right|^t \right)^{-t/1} \quad (16)$$

步骤3 根据本文提出的CCMS策略更新中心元素的失真代价，并结合STC编码依次在各通道图像嵌入秘密信息得到 $\mathbf{Y}^{(R)}, \mathbf{Y}^{(G)}, \mathbf{Y}^{(B)}$ ，输出彩色载密体 $\mathbf{Y}^{(RGB)}$ 。

步骤4 将 $\mathbf{Y}^{(RGB)}$ 和 K_s 一同发送至接收方。

4.2 秘密信息提取

步骤1 将彩色载密体 $\mathbf{Y}^{(RGB)}$ 得到采样图块 $\mathbf{Y}^{(R)}, \mathbf{Y}^{(G)}, \mathbf{Y}^{(B)}$ ，按图6所示扫描顺序得到采样阵列图。

步骤2 通过 $\text{Ext}(Y) = \mathbf{H}Y$ 提取每幅通道图像中的秘密消息 $L^{(R)}, L^{(G)}, L^{(B)}$ ，矩阵 \mathbf{H} 为

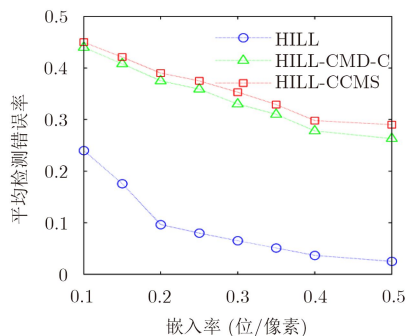


图9 HILL-CCMS抗CRM检测性能

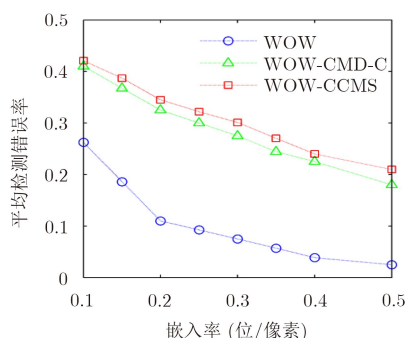


图10 WOW-CCMS抗CRM检测性能

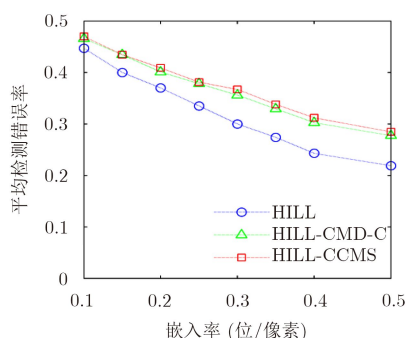


图11 HILL-CCMS抗SCCRM检测性能

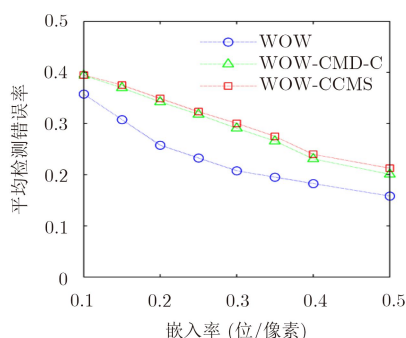


图12 WOW-CCMS抗SCCRM检测性能

由实验结果(图7—图12)知, HILL, WOW利用CCMS策略进行彩色隐写能够有效提高算法的抗隐写检测能力, 并且CCMS策略对算法安全性的提升高于CMD-C策略, 验证了所提策略的有效性。值得注意的是, CCMS策略对于隐写算法的抗SRM特征检测性能提升幅度较小, 这是由于CCMS策略是

根据彩色邻域分量的相关性进行失真代价更新的, 对于原始彩色图像的通道相关性有较好保持作用, 而SRM特征主要是针对灰度图像空域统计特性进行检测的, 因此CCMS策略对算法抵抗SRM特征检测的提高要低于CRM, SCCRM特征。从图9和图10可以看出, CRM特征对WOW, HILL算法的检测能力强于SRM, 但是对WOW-CCMS, HILL-CCMS的检测能力弱于SRM特征。这说明, 直接应用WOW, HILL算法生成的彩色载密体对彩色原始图像的统计特性破坏较大, 应用CCMS策略能够有效减小隐写修改对彩色通道间相关性特征造成的影响。从图11和图12可以分析出, HILL-CCMS抗SRM检测性优于WOW-CCMS, 但其抵抗SCCRM检测性弱于WOW-CMD-C, 这说明HILL-CCMS隐写对载体图像的空域相关性影响较小, 而WOW-CCMS对载体的彩色通道相关性保持更优。

5.3 峰值信噪比分析

为测试应用CCMS策略的自适应隐写方法对彩色图像质量的影响程度, 利用图像质量的客观标准峰值信噪比(Peak Signal Noise Ratio, PSNR)作为评价指标。PSNR定义为

$$PSNR = 10 \times \lg \left(\frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} 255^2}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (X_{i,j} - Y_{i,j})^2} \right) \quad (19)$$

PSNR是针对灰度图像计算的, 因此需要对彩色进行灰度化预处理。通过对红、绿、蓝色分量灰度值的加权平均可得到彩色图像的灰度化表示, 其中权值是由人眼对不同颜色分量的敏感程度决定的, 如式(20)所示。

$$Gray(I) = 0.299 \cdot I_{i,j}^{(R)} + 0.578 \cdot I_{i,j}^{(G)} + 0.114 \cdot I_{i,j}^{(B)} \quad (20)$$

将5.2节WOW-CMD-C, HILL-CMD-C, WOW-CCMS以及HILL-CCMS这4种隐写算法生成的载密图像作为待检测集, 对待检测图像进行灰度化处理, 计算其不同嵌入率下的平均峰值信噪比, 实验结果如表4所示。

表4 4种隐写算法隐写后彩色图像的平均峰值信噪比(dB)

嵌入率(bpc)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
WOW-CMD	39.034	37.516	35.371	33.246	30.617
HILL-CMD	38.915	37.482	35.268	32.192	29.781
WOW-CCMS	40.231	38.647	37.143	35.071	31.726
HILL-CCMS	39.873	38.534	36.894	34.735	31.084

分析表4中数据, 在不同嵌入率下, WOW-CCMS, HILL-CCMS算法的隐写图像平均峰值信噪比均高于WOW-CMD和HILL-CMD算法, 结合

CCMS策略的彩色隐写算法能够较好地保持隐写图像的图像质量。因此,结合本文CCMS策略的彩色隐写算法在抗检测性提升的同时,隐写图像的不可感知性也得到了一定提高。

5.4 算法复杂度分析

本文提出的CCMS策略可以与现有自适应隐写算法结合应用,能够在获得彩色分量的初始失真代价的基础上,根据邻域修改情况对中心元素的失真进行优化调整,从而减小隐写修改对通道间相关性的影响。由于失真代价的动态更新涉及到颜色通道图像分块和邻域分量修改度计算,因此CCMS策略会导致隐写算法的复杂度增加。为验证算法复杂度增加的幅度,统计5.2节WOW, HILL, WOW-CMD-C, HILL-CMD-C, WOW-CCMS和HILL-CCMS这6种隐写算法对一幅 256×256 大小的彩色图像在不同嵌入率下隐写的算法平均执行时间,结果如表5所示。

表5 6种算法对一幅尺寸为 256×256 的彩色图像进行隐写的平均执行时间(s)

嵌入率(bpc)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
WOW	0.4053	0.5012	0.5945	0.6931	0.8967
HILL	0.3018	0.3867	0.4733	0.5591	0.7078
WOW-CMD	0.6123	0.7108	0.8126	0.9128	1.4204
HILL-CMD	0.3742	0.4806	0.5768	0.6932	0.8974
WOW-CCMS	0.6397	0.7403	0.8431	0.9448	1.4532
HILL-CCMS	0.4027	0.5106	0.6093	0.7273	0.9356

从表5中数据可知,结合CCMS策略进行彩色隐写会引起算法复杂度在一定程度上的增加,对于隐写一幅 256×256 大小的彩色图像来说,不同嵌入率下算法的平均执行时间增加范围在 $0.2 \sim 0.6$ s之内,算法计算复杂度的增幅随嵌入率增加而略微增大。观察表5中数据可知,WOW-CCMS算法的平均执行时间均高于HILL-CCMS算法,这是由于WOW和HILL算法在分配初始失真代价时的不同计算方法导致的。由此可知,算法平均执行时间主要由初始失真代价的计算复杂度决定,CCMS策略对于算法复杂度的影响较小。

6 结束语

本文提出了一种彩色分量的失真代价更新策略CCMS,在嵌入过程中依据相邻分量修改情况对失真进行动态调整,利用该策略设计实现了一种彩色图像空域隐写算法。实验表明,该算法能够较好地维持邻域相关性,能有效提高算法的抗彩色隐写检测性能。下一步工作中考虑如何更为精准地衡量彩

色分量间的相关性的强弱,更加合理地分配失真代价。

参考文献

- [1] DENEMARK T D, BOROUHAND M, and FRIDRICH J. Steganalysis features for content-adaptive JPEG steganography[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics & Security*, 2017, 11(8): 1736–1746. doi: [10.1109/TIFS.2016.2555281](https://doi.org/10.1109/TIFS.2016.2555281).
- [2] 汤光明, 边媛, 韦大伟, 等. 一种动态更新失真代价的自适应 $\pm k$ 隐写算法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(1): 58–65. doi: [10.11999/JEIT160254](https://doi.org/10.11999/JEIT160254).
TANG Guangming, BIAN Yuan, WEI Dawei, et al. Adaptive $\pm k$ steganography based on dynamic updating distortion cost[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(1): 58–65. doi: [10.11999/JEIT160254](https://doi.org/10.11999/JEIT160254).
- [3] TANG Weixuan, LI Bin, LUO Weiqi, et al. Clustering steganographic modification directions for color components[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2016, 23(2): 197–201. doi: [10.1109/LSP.2015.2504583](https://doi.org/10.1109/LSP.2015.2504583).
- [4] PEVNÝ T, FILLER T, and BAS P. Using high-dimensional image models to perform highly undetectable steganography[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2010, 6(6387): 161–177. doi: [10.1007/978-3-642-16435-4_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-16435-4_13).
- [5] HOLUB V and FRIDRICH J. Designing steganographic distortion using directional filters[C]. *IEEE International Workshop on Information Forensics and Security*, Costa Adeje, Spain, 2012: 234–239. doi: [10.1109/WIFS.2012.6412655](https://doi.org/10.1109/WIFS.2012.6412655).
- [6] FRIDRICH J and KODOVSKY J. Rich models for steganalysis of digital images[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics & Security*, 2012, 7(3): 868–882. doi: [10.1109/TIFS.2012.2190402](https://doi.org/10.1109/TIFS.2012.2190402).
- [7] FRIDRICH J. Digital image steganography using universal distortion[C]. *ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security*, Montpellier, France, 2013: 59–68. doi: [10.1145/2482513.2482514](https://doi.org/10.1145/2482513.2482514).
- [8] LI Bin, WANG Ming, HUANG Jiwu, et al. A new cost function for spatial image steganography[C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, Quebec City, Canada, 2015: 4206–4210. doi: [10.1109/ICIP.2014.7025854](https://doi.org/10.1109/ICIP.2014.7025854).
- [9] GOLJAN M, FRIDRICH J, and COGRANNE R. Rich model for steganalysis of color images[C]. *IEEE International Workshop on Information Forensics and Security*, Roma, Italy, 2015: 185–190. doi: [10.1109/WIFS.2014.7084325](https://doi.org/10.1109/WIFS.2014.7084325).
- [10] ABDULRAHMAN H, CHAUMONT M, MONTESINOS P, et al. Color image steganalysis using correlations between RGB channels[C]. *International Conference on Availability*,

- Reliability and Security, Toulouse, France, 2015: 448–454. doi: [10.1109/ARES.2015.44](https://doi.org/10.1109/ARES.2015.44).
- [11] ABDULRAHMAN H, CHAUMONT M, MONTESINOS P, *et al.* Color image steganalysis based on steerable Gaussian filters bank[C]. ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security, Vigo, Spain, 2016: 109–114. doi: [10.1145/2909827.2930799](https://doi.org/10.1145/2909827.2930799).
- [12] LI Bin, WANG Ming, LI Xiaolong, *et al.* A strategy of clustering modification directions in spatial image steganography[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics & Security*, 2015, 10(9): 1905–1917. doi: [10.1109/TIFS.2015.2434600](https://doi.org/10.1109/TIFS.2015.2434600).
- [13] GUNTURK B K, ALTUNBASAK Y, and MERSEREAU R M. Color plane interpolation using alternating projections[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(9): 997–1013. doi: [10.1109/TIP.2002.801121](https://doi.org/10.1109/TIP.2002.801121).
- [14] SCHAEFER G and STICH M. UCID - An uncompressed colour image database[J]. *Storage & Retrieval Methods & Applications for Multimedia*, 2003, 5307: 472–480. doi: [10.1117/12.525375](https://doi.org/10.1117/12.525375).
- [15] DING Yong, ZHAO Yang, and ZHAO Xinyu. Image quality assessment based on multi-feature extraction and synthesis with support vector regression[J]. *Signal Processing Image Communication*, 2017, 54(3): 81–92. doi: [10.1016/j.image.2017.03.001](https://doi.org/10.1016/j.image.2017.03.001).
- [16] KODOVSKY J, FRIDRICH J, and HOLUB V. Ensemble classifiers for steganalysis of digital media[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics & Security*, 2012, 7(2): 432–444. doi: [10.1109/TIFS.2011.2175919](https://doi.org/10.1109/TIFS.2011.2175919).
- 汤光明：女，1963年生，教授，博士生导师，研究方向为网络安全、信息隐藏。
- 姜明明：女，1994年生，硕士生，研究方向为信息隐藏。
- 孙 艺：女，1993年生，硕士生，研究方向为信息隐藏。