# 基于免基向量的EMD(*n*, *m*)嵌入模型及其在图像密写上的应用

## 张洋, 邵利平\*, 任平安

(陕西师范大学计算机科学学院西安 710119)   
(slpmaster@163.com)

摘要: 传统EMD嵌入方法通常只能利用0为起始的连续组合数作为秘密信息表达范围, 同时也仅能给出有限的几种EMD嵌入方法, 对于简单EMD、EMD-2和EMD-3, 只能通过*n*个载体数据中调整1个、2个和*n*个来嵌入1个秘密信息, 不仅限制了秘密信息的表达范围也限制了EMD的适用面. 针对以上问题, 结合无权值向量, 提出了一种EMD(*n*, *m*)嵌入模型, 所提模型通过计算*n*个载体数据中最多调整*m*个数据的秘密信息组合来形成嵌密元素调整表, 通过选取嵌密元素调整表行来对载体数据进行调整以嵌入秘密像素信息. 为进一步提高安全性, 给出了一种基于EMD(*n*, *m*)的数字图像密写方法, 首先将载体图像扫描为1维序列, 通过用户密钥结合混沌映射来随机指派嵌密元素数量和最多调整的嵌密元素数量并生成秘密信息组合数和嵌密元素调整表；然后依据嵌密元素数量和秘密组合数分别从载体元素序列和2进制秘密信息序列截取载体元素和2进制秘密信息比特；最后通过对秘密信息比特所映射的置乱嵌密元素调整表行来对截取的载体元素进行调整以嵌入秘密信息. 理论和实验表明, 与传统的EMD嵌入方法相比, 改进的EMD(*n*, *m*)模型避免了权值向量设置的有限性所导致的嵌入容量受限, 并可最大化嵌入容量提高EMD嵌入方法的适用面, 同时可通过与载体和密钥相关的嵌入提取环节来进一步增强嵌入信息的安全性.

### 关键词: EMD; 无权值向量; 嵌密元素调整表; EMD(*n*, *m*)模型; 数字图像密写; 嵌入容量; 图像信息安全 中图法分类号: TP309. 7

#### Free-basisVector BasedEMD(*n*, *m*) Model and Its Application in Image Steganography

##### Zhang Yang, Shao Liping\*, and Ren Ping’an

(School of Computer Science, Shannxi Normal University, Xi’an710119)

**Abstract**: Traditional EMD methods only use 0 and the continuous figure combinations from 1 as the expression range of secret information. There are only several limited kinds of EMD methods such as simple EMD, EMD-2, EMD-3, these embedding methods can only adjust 1, 2 or all at most for *n* carrier data to embed one secret information which limit not only expression range of secret information but also EMD’s application. To address these problems, an EMD model EMD(*n*, *m*) based on non-weight vector was proposed. This model firstly formed the embedding adjustment table of secret information by calculating all *m* out of *n* carrier data combinations and then selected one row from the embedding adjustment table of secret information to embed the corresponding secret information. To further increase security, this paper also proposed an image steganographymethod based on EMD(*n*, *m*) model. First this method scanned each carrier into 1D sequence and randomly generated *m* out of *n* carrier data combinations to form the embedding adjustment table by user key and chaotic map. Second this method truncated all carrier sequence elementsand secret information bits respectively according to the carrier number and the number of secret information combinations. Finally secret information was embedded by adjusting carrier elements according to the mapped row by secret information of the scrambled embedding adjustment table. Theory and experiments show, by compared with traditional EMD methods, the improved EMD (*n*, *m*) model avoids the limited embedding capacity brought by the limited scope of the weight vector and it can maximize the application of the EMD method and also further enhance the embedding safety by adding carrier and user key related the embedding- extraction procedures.

###### **Key words:** EMD; non-weight vector; the embedding adjustment table of secret information; EMD(*n*, *m*) model; digital image steganography; embedding capacity; image information security.

（方正书宋10磅）(正文开始双栏排版)

1. **引言**

图像隐写是利用图像冗余和人类视觉掩蔽特性来将秘密信息隐藏于非相关的掩体图像中, 使得非法攻击者难以从海量的公开传输图像中提取出隐蔽的秘密信息, 从而最大可能性地保障传输中机密信息的安全.

针对图像隐写, 人们已提出了多种数字图像密写嵌入方法. 例如致力于提升秘密信息嵌入容量的BPCS方法[1]和PVD方法[2]以及致力于提高图像视觉质量的EALSBMR方法[3]等.

现有的图像密写方法通常分为两类, 变换域密写和空域密写方法. 比较典型的变换域密写方法有F3密写, F4密写和F5密写方法等[4], 他们都是在掩体图像量化后的非零DCT系数上进行嵌密, 但由于量化后的DCT系数中零值较多, 因此秘密信息的嵌入量极低. 相对于变换域密写方法, 空域密写方法不仅能提供较大的嵌入容量, 也能较大地保持嵌密图像的视觉质量.

最早期的空域密写方法为LSB密写嵌入方法[5], 即用秘密信息替换载体图像的最低比特位, 由于载体图像最低比特位全部携带秘密信息, 而图像的最低比特位对图像视觉质量影响极小, 因此LSB密写的秘密信息嵌入量大, 密写图像视觉质量较高, 但秘密信息易改变低位信息比特的统计特性, 因此安全性不高. 对LSB密写方法的改进, 引入了LSBM方法[6], 即LSB匹配方法, 相对于LSB密写方法, LSB匹配方法的策略是, 当秘密信息和载体图像的最低比特位相同时不做改变, 否则随机地对载体图像像素值, 由于像素值整体增加或减少的概率相等, 因此可抵抗简单LSB密写分析, 但其秘密信息的嵌入容量相比于LSB密写并未实质地提高. 为减轻对载体的影响, 后续又提出了LSBMR密写方法[7], 即LSB匹配重访方法, 其原理是在两个连续的像素中最多只对其中一个从而嵌入2比特秘密信息, 由于LSBMR方法不是直接用秘密信息替换载体图像的最低比特位且明显降低了对载体图像的修改率, 因此LSBMR方法在提高密写图像质量的基础上提高了其安全性. 为了进一步提高图像的嵌入质量, EALSBMR方法[3]被提出, 即边缘自适应LSB匹配重访方法, 可根据秘密信息长度和载体图像自身平滑程度自适应的嵌入秘密信息并优先选择图像较粗糙区域进行嵌入, 避免了对载体图像平滑区域的修改, 因此EALSBMR密写方法下的密写图像质量较之前的LSBMR更好.

LSBMR方法最独特的地方是对两个载体数据中至多改变一个便可嵌入2比特秘密信息. 这也为后面进行更大容量嵌入的EMD方法[8]提供了很多借鉴. EMD方法, 即全方向扩展方法, 是对载体进行微小修改以进行大容量嵌入的一种有效的嵌入方法, 由于EMD嵌入方法第载体的视觉质量影响较小, 且能进行大容量的嵌入, 目前已得到了普遍重视, 例如: 文献[9]给出了基于EMD和差值扩展的可逆信息隐藏方法; 文献[10]采用插值扩展的方法将掩体图像的水平和垂直分辨率拓展为原图像的2倍, 在未拓展像素上进行秘密信息EMD嵌入并利用差值扩展像素恢复载体图像. 文献[11]在文献[9]的基础上, 进一步给出了利用掩体图像中未拓展像素的高位比特和边缘图像进行秘密比特调整嵌入, 然后在调整嵌入后像素的高位比特进行EMD嵌入的可逆信息隐藏方法. 结合EMD, 文献[12]将秘密信息按序号的奇偶分别嵌入到2幅同样的掩体图像中, 并通过比较嵌入后掩体图像对应像素的差异来对掩体图像进行可逆恢复. 文献[13]将哈夫曼编码的秘密信息字符通过EMD方法嵌入到随机选取的2个或3个连续的掩体像素中进行传输.

经典的EMD方法是通过对*n*个载体数据最多进行1次来嵌入一个进制的数, 由于在嵌入时只对*n*个载体数据中的1个数据进行调整, 因此具备较高的视觉嵌入质量. 为提高EMD方法的嵌入容量, 文献[14]给出了基于矩阵的MEMD嵌入方法, 通过构造规模特殊矩阵且满足矩阵元素所在的任意一个规模的矩阵小块包含中的所有元素, 从而可将像素对作为位置坐标, 按坐标调整最小原则改变像素对值来嵌入1个进制的数. 文献[15]中给出了EMD-2方法, 即对*n*个载体数据最多进行2个而嵌入一个更大进制的数, 其基本思路是EMD方法中的基向量由调整为, 其中, 从而可利用基向量组合出范围内的的所有整数, 将EMD方法的嵌入容量由提高为. 沿着文献[15]的思路, 文献[16]将基向量由拓展为, 并将对每个载体像素的调整由拓展为, 从而可组合出范围内的所有整数, 从而将嵌入容量拓展为. 在文献[16]工作的基础上, 文献[17]将每个载体像素的调整量拓展为, 从而可嵌入1个进制数. 文献[18]将*n*个载体像素的最多元素调整数量约束为*n*,将基向量设置为, 考虑到对嵌入掩体视觉质量的影响, 将每个载体元素的调整量控制为. 文献[19]通过约定每个像素的调整方式数, 将基向量设置为, 从而可嵌入一个进制数.

对EMD方法还可进行有效的组合以提供更大的嵌入容量. 例如文献[15]给出的2EMD方法, 即分别对和个数据连续使用2次EMD方法嵌入, 可嵌入1个进制的数. 文献[20]将2*k*+1个连续像素和第*k*个像素构成2*k*个像素分组, 对每个分组采用EMD方法嵌入1个5进制数. 文献[21]将对像素调整的EMD嵌入方法转换为对像素低位比特位的调整嵌入, 从而可在更大范围内进行嵌入.

在上面所给出的EMD嵌入方法中, 对于2个像素的调整上, MEMD方法相对于传统的EMD和EMD-2算法具有较大的嵌入容量, 但MEMD方法很难拓展为多个像素, 一方面高维矩阵的构造规则较为复杂, 在计算机中难以有效得存储, 而另一方面, 通常取值较小, 当=3时, 对图像像素的最大修改量已经为, 当取值较大, 会对嵌入载体产生较大影响, 从而降低安全性. 对于文献[16-17, 19], 其嵌入容量提升取决于对载体像素的修改量, 文献[16]的修改量为, 文献[17]的修改量为, 文献[19]中, 若*c*大于2, 则修改量则会大于1, 因此文献[16-17, 19]都会对嵌入掩体视觉质量产生较大影响. 文献[11, 15-19]的基本出发点是选取特殊的基向量, 从而通过特定的基向量组合来构造出0为起始的连续组合数, 而特定的嵌入策略会降低密写的安全性; 对于文献[15-17, 19], 由于基向量不能充分有效地组合, 从而限制了秘密信息的表达范围, 使得嵌入容量十分有限; 而对于文献[11, 18], 尽管能达到嵌入范围内的最大容量, 但仅能提供有有限的几种调整方案, 对于文献[11], 仅能对*n*个载体数据调整1个嵌入, 对于文献[18]仅能对所有的像素进行调整和不调整嵌入, 导致现有的EMD嵌入方法适用面较窄, 从而不能在图像视觉嵌入质量和嵌入容量上进行较好地折中.

同以上文献不同, 本文提出了一种免基向量的EMD(*n*, *m*)嵌入模型, 所提模型通过计算*n*个载体数据中最多调整*m*个数据的秘密信息组合来形成嵌密元素调整表, 通过选取嵌密元素调整表行来对载体数据进行调整以嵌入秘密信息. 避免了文献[8-13,15-21]中基向量对应的权值向量只能组合出连续正整数而导致的可嵌入的秘密信息范围较小这一缺陷, 同时避免了文献[14-19,21]中基向量对应的权值向量绝对值较大时密写图像视觉质量不高这一缺陷. 为进一步提高安全性, 给出了一种基于EMD(*n*, *m*)的数字图像密写方法, 首先将载体图像扫描为1维序列, 通过用户密钥结合混沌映射来随机指派嵌密元素数量和最多调整的嵌密元素数量并生成秘密信息组合数和嵌密元素调整表; 然后依据嵌密元素数量和秘密组合数分别从载体元素序列和2进制秘密信息序列截取载体元素和2进制秘密信息比特; 最后通过对秘密信息比特所映射的置乱嵌密元素调整表行来对截取的载体元素进行调整以嵌入秘密信息. 理论和实验表明与传统的EMD嵌入方法相比, 改进的EMD(*n*, *m*)模型避免了基向量设置的有限性所导致的嵌入容量受限, 并可最大化嵌入容量提高EMD嵌入方法的适用面, 同时可通过与载体和密钥相关的嵌入提取环节来进一步增强嵌入信息的安全性.

以下本文第2节给出经典的EMD嵌入模型, 第3节给出基于免基向量EMD(*n*, *m*)嵌入模型；第4节给出一种基于EMD(*n*, *m*)的数字图像密写方法；第5节实验; 第6节对本文的工作进行总结, 并给出下一步的研究工作.

1. **EMD经典模型**

文献[8]给出了EMD的经典嵌入模型, 包括*n*个载体数据组成的向量, 基向量, 取模参数*X*, 秘密信息为*d*, 以及由定义的函数*f*, 如式(1),

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

式(1)中符号表示求内积. 根据与*d*的关系式调整对应的从而嵌入1个*X*进制的秘密信息.

EMD[8]算法中, , 基向量, 因此为式(2),

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

EMD算法原理是 *n*(*n*>1)个载体数据中最多一个从而嵌入一个进制的数. 假设待嵌入的秘密信息为*d*, 若, 则不改变, 否则记*s*为式(3),

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

根据*s*与*n*的关系将对载体数据的调整分为以下两种情况, 如式(4):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

提取秘密信息时, 取*n*个载体数据, 根据式(2)计算出的即为进制的秘密信息.

举例:假设, , , 进制的秘密信息, , , 根据式(2)计算得到. 在上嵌入时, 由于, 根据式(3)计算得到, 由式(4)知, , 因此, 即, 调整后的；在上嵌入时, 由于, 因此不调整, 密写后的；在上嵌入时, 由于, 计算得, 因此, , 即, 调整后的. 提取时, 将, , 分别代入式(2), 得到3个分别为5, 1, 2即为提取出的7进制下的秘密信息, , .

EMD算法相比于早期的LSB算法在对载体数据修改较少的情况下极大的提升了秘密信息的嵌入容量, 然而, EMD算法的嵌入容量仍被其基向量和一组载体数据中最多能被调整的数据个数限制.

文献[15-18]为提高EMD算法的嵌入容量, 对EMD算法的基向量和对载体数据的最多调整个数进行扩展. 同时, 文献[15-18]沿用式(1)中的EMD算法基本模型.

文献[15]中的EMD-2算法将对*n*(*n*>1)个载体数据的最大调整个数扩展为2, 即最多2个载体数据,其基向量表示如式(6), , 表示如式(7),

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |
|  | (7) |

因此, EMD-2算法的计算如式(8),

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

EMD-2算法嵌入秘密信息时, 根据计算*n*个载体数据对应的权值向量集, 并将的序号记为, , 按式(9)计算*s*并按式(10)调整, 从而嵌入1个进制的数, 得到嵌密元素. 提取秘密信息时, 将密写数据代入式(8)计算出即为进制的的秘密信息.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |
|  | (10) |

EMD-2算法举例: 时, 基向量为[1,3], 表示在2个载体数据中最多对2个数据可嵌入一个9进制的数, 对应的权值向量如表1.

表1 EMD-2算法时的权值向量

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *i* | 1 | 3 |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |
| 2 | -1 | 1 |
| 3 | 0 | 1 |
| 4 | 1 | 1 |
| 5 | -1 | -1 |
| 6 | 0 | -1 |
| 7 | 1 | -1 |
| 8 | -1 | 0 |

当时, 假设载体数据, 待嵌入的秘密信息为, 根据式(8)计算得到, 由式(9)知, , 为表1中*i*=1对应的[1,0], 因此, 密写后的数据, 提取秘密信息时，按式(8)计算即为9进制下的秘密信息.

E-MD-2算法相比于EMD算法, 将对载体数据的调整由最多1个扩展为最多2个, 嵌入率由提升为.但同EMD算法一样, 若得知*n*的值, 则很容易提取出秘密信息. 因此EMD-2算法的安全性不高.

文献[16]中, 基向量, , 文献[17]中, 基向量按式(11)计算,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

, 文献[16]和文献[17]分别可在*n*个载体数据上嵌入1个和进制的数, 将EMD算法的嵌入率提升为由提升为和. 但其对载体数据的调整分别为和, 相比于文献[8,14-15], 密写图像的视觉质量可能会受影响.

文献[18]中的EMD-*n*算法, 基向量, , 因此如式(12),

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

若进制的秘密信息, 则不改变的值, 否则根据式(13) (14) (15)计算, 的值, 并按照式(16)对进行调整.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |
|  | (14) |
|  | (15) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (16) |

EMD-*n*中每个载体数据都可能被修改, 因此嵌入率较之EMD的提升为, 但其对载体数据的修改个数没有具体上限, 密写图像的视觉质量可能会受影响.

MEMD[14]算法通过构造特殊矩阵并将载体像素直接替换为矩阵中对应的元素即可. MEMD算法首先将载体图像扫描为不重叠的像素对, , 并对应的矩阵***M***的坐标, 对应的坐标上的值按照式(5)计算,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

式(3-1)中,根据提前确定好的值进行约束. 假设, 则矩阵的一部分如表1;

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 9 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 0 |
| 8 | 6 | 7 | 8 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 7 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 6 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 0 |
| 5 | 6 | 7 | 8 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 4 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 3 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 0 |
| 2 | 6 | 7 | 8 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 0 |
|  | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

表1

嵌入进制的秘密信息时, 将载体像素对替换为中以载体像素对对应的坐标元素为中心的范围内与秘密信息相等的值对应的坐标.

假设, 载体像素对为, 秘密信息序列为, 由于中以坐标对应的元素6为中心的范围内值为的元素对应的坐标为. 因此密写后的像素值为.

**EMD(*n*, *m*)模型**

EMD算法中基向量必须生成连续正整数, 因此基向量组合情况有限, 组合出的非连续正整数未得到利用, 因此限制了可嵌入的秘密信息序列长度, 本文提出EMD(*n*, *m*)算法无基向量且可充分利用嵌密元素个数和最多可改变发的嵌密元素个数生成秘密信息组合数和嵌密元素调整表, 根据秘密信息组合数求得可嵌入的秘密信息序列长度, 进而转换为十进制数*d*, 取嵌密元素调整表的第*d*行和载体元素序列进行设定的计算即可得到嵌密元素序列, 根据嵌密元素序列和载体元素序列的差值序列即可得到秘密信息. EMD(*n*, *m*)充分利用嵌密元素个数和最多可改变发的嵌密元素个数的组合情况, 达到最大嵌入容量.

EMD(*n*, *m*)算法中直接给定*n*和*m*, 按式(4)计算*n*个嵌密元素最多改变*m*个嵌密元素所能嵌入的秘密信息组合数,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

式(4)中, 表示*n*个嵌密元素仅改变*i*个元素所对应的组合数, 表示被改变的*i*个元素进行调整的全部情况.

将中的数按顺序用3进制数表示三进制数中的0, 1, 2分别取-1, 0, 1, 将转换后的-1, 0, 1序列中非零元素个数不大于*m*的序列添加到维嵌密元素调整表中. 按式(5)计算应截取的秘密信息的长度,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

式(5)中, 为剩余秘密信息序列长度, 从载体图像对应的一维序列中取*n*个元素作为载体序列, 取嵌密元素调整表的第*d*行(*tdi*)*n*, 按式(6)计算嵌密元素序列.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

式(6)中, 为溢出避免函数, 用于避免, , 具体执行的功能如式(7)所示:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

根据*n*, *m*计算嵌密元素调整表, 取载体图像和嵌密图像对应的*n*个元素, 计算其差值序列, 在中找到此序列对应的行号即为嵌入的秘密信息十进制形式.

1. **EMD(*n*, *m*)模型安全性增强策略**

由于EMD算法存在安全隐患, 即得到载体图像和嵌密图像就可根据嵌密元素个数和最多可改变的嵌密元素个数顺利求出秘密信息, 因此EMD(*n*, *m*)算法的安全性需得到提升.

首先, 动态生成嵌密元素个数和最多可改变的嵌密元素个数, 用户给定系统参数, , 初始值和消除暂态效应的迭代次数参数*IT*, 以及嵌密元素数量*n*的最大值*nmax*, 由和按式(6)生成随机数, 抛弃前*IT*个随机数;

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

取式(8)连续生成的4个随机数和, 按式(9), 式(10) 生成截取的嵌密元素个数和最多可改变的嵌密元素个数

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |
|  | (10) |

式(9)和式(10)中, “”为向下取整函数; 其次, 置乱嵌密元素调整表, 按式(11)将第*i*行作为第行,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

式(11)中同余参数的具体生成规则为将按式(12)映射为, 将按式(13)映射为, 将和分别作为式(8)的系统参数和初始值, 将式(8)产生的随机数*R*式(14)量化为, 反复执行式(8)直至和互质, 将作为*a*, 为消除暂态效应, 将式(8)迭代产生的前, 个随机数抛弃.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (14) |

1. **实 验**

实验测试环境为Windows 10操作系统, CPU为Inter(R) Core(TM) i5-6600, 主频为3.31GHz, 内存为8.00GB,, 实验编码语言为Java jdk1.8.0\_65, 测试图像为的256色灰度图像Lena, Man, Pepper, Women, 如图1(a)-图1(f)所示,



a. Women b. Lena



c. Pepper d. Man

图1

**4.1**不同用户密钥下EMD(*n*,*m*)模型的正确嵌入和正确提取实验

为为验证EMD(n,m)算法的可行性, 分别在3组密钥即, , 及、, , 及、, ,及下进行实验,对应的嵌密元素数量*n*和最多可改变的嵌密元素数量*m*分别为*nmax=3*时, *m*=1, *nmax*=6时, *m*=2 *nmax*=10时, *m*=4, 由于实验中针对不同载体图像每次嵌入时都随机生成不同二进制秘密信息序列, 将秘密信息输出为二值图像, 如图2所示,

12副秘密信息二进制图像B

图2

首先验证正确嵌入, 按EMD(*n*,*m*)模型将图2对应的秘密信息序列分别嵌入图1对应的载体图像中后得到的密写图像如图3所示,

12副密写图像C’

图3

其次验证正确提取, 根据正确的用户密钥按EMD(n,m)模型提取算法分别从图3中的密写图像中提取秘密信息, 并将提取出的秘密信息输出为二值图像, 如图4所示,

12副正确密钥提取出的秘密信息图像B’

图4

最后验证根据错误密钥提取出的秘密信息序列. 随机指定用户密钥为,,及, 分别从图3中的密写图像中提取秘密信息, 并将提取出的秘密信息输出为二值图像, 如图5所示,

12副错误密钥提取出的秘密信息图像B’

图5

由此可见, EMD(*n*,*m*)模型在不同密钥下的正确嵌入和在正确用户密钥下的正确提取与在错误密钥下的错误提取,可见EMD(*n*,*m*)模型可在正确密钥下正确完整的提取秘密信息，且在错误密钥下不能正确提取秘密信息.

**4.2** EMD(*n*,*m*)模型视觉质量对比实验

衡量密写图像视觉质量的重要指标是峰值信噪比PSNR, 当密写图像的峰值信噪比PSNR>38dB时，说明图像的视觉质量较高, 不易引起察觉. 式(15)为峰值信噪比的计算公式,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (15) |

式(15)中, MSE表示两幅图像的均方误差, 计算公式如式(16),

|  |  |
| --- | --- |
|  | (16) |

式(16)中, 和分别表示载体图像和载体图像修改后的图像.

表1分析了4.1节3组密钥下不同载体图像嵌密后得到密写图像的PSNR,

表1 EMD(*n*,*m*)模型在不同密钥下的PSNR对比

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| PSNR | 密钥1 | 密钥2 | 密钥3 |
| Lena | 12.123 | 12.123 | 12.123 |
| Man |  |  |  |
| Women |  |  |  |
| Pepper |  |  |  |

由表1可见，EMD(*n*,*m*)模型在不同密钥下的密写图像视觉质量较高。。。, 为了将EMD(*n*,*m*)模型和部分参考文献中的算法进行比较, 在同等嵌密元素数量和嵌入同等秘密信息数量下实现文献[8,15-19]算法, 并将实现的文献[8,15-19]中算法的PSNR和EMD(*n*,*m*)算法的PSNR进行比较, 如表2.

表2EMD(*n*,*m*)模型和其他算法的PSNR对比

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| PSNR | Lena | Man | Women | Pepper |
| 文献8 | 12.123 | 12.123 | 12.123 | 12.123 |
| 文献15 |  |  |  |  |
| 文献16 |  |  |  |  |
| 文献17 |  |  |  |  |
| 文献18 |  |  |  |  |
| EMD(*n*,*m*) |  |  |  |  |

数据分析。。。

**4.3** EMD(*n*,*m*)模型秘密信息嵌入率ER分析

秘密信息嵌入率根据每个载体数据携带的秘密信息比特数进行衡量, 假设在*n*个载体数据中嵌入*s*比特的秘密信息, 则秘密信息嵌入率ER计算公式如式(17) ,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (17) |

经典EMD[8]算法在*n*个载体数据中最多将1个而嵌入1个2*n*+1进制的数, 因此经典EMD[8]算法秘密信息嵌入率如式(18)所示,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (18) |

本文所提EMD(*n*,*m*)模型在*n*个载体数据中最多将*m*个而嵌入1个进制的数, 因此EMD(*n*,*m*)模型秘密信息嵌入率如式(19)所示,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (19) |
| 分析文献[14]-[19]的秘密信息嵌入率。。。 |  |

1. **结 语**

参考文献**(References):**

1. Kawaguchi E, Eason R O. Principle and Applications of BPCS-Steganography[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1999, 3528:464-473.
2. Wu D C, Tsai W H. A steganographic method for images by pixel-value differencing[J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(9-10):1613-1626.
3. Huang F, Zhong Y, Huang J. Improved Algorithm of Edge Adaptive Image Steganography Based on LSB Matching Revisited Algorithm[M]// Digital-Forensics and Watermarking. Springer Berlin Heidelberg, 2014:201-214.
4. 王朔中. 数字密写和密写分析[M]. 清华大学出版社, 2005.67-73
5. Andrew D. Ker. Improved Detection of LSB Steganography in Grayscale Images[C]// International Conference on Information Hiding. Springer-Verlag, 2004:97-115.
6. Ker A D. Improved Detection of LSB Steganography in Grayscale Images[C]// International Conference on Information Hiding. Springer-Verlag, 2004:97-115.
7. Mielikainen J. LSB matching revisited[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2006, 13(5):285-287.
8. Zhang X P, Wang S Z.Efﬁcientsteganographic embedding by exploiting modiﬁcation direction. IEEE Communication Letter, 2006, 10(11):781-783.
9. Shen S Y, Huang L H. A data hiding scheme using pixel value differencing and improving exploiting modification directions[J]. Computers & Security, 2015, 48:131-141.
10. [CF Lee](http://xueshu.baidu.com/s?wd=author%3A%28ChinFeng%20Lee%29%20&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dperson), [KC Chen](http://xueshu.baidu.com/s?wd=author%3A%28KaiChin%20Chen%29%20&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dperson), Reversible Data Hiding by Reduplicated Exploiting Modification Direction Method[C],// International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing,2011
11. Lee C F, Weng C Y, Chen K C. An efficient reversible data hiding with reduplicated exploiting modification direction using image interpolation and edge detection[J]. Multimedia Tools & Applications, 2016:1-24.
12. Qin C, Chang C C, Hsu T J. Reversible data hiding scheme based on exploiting modification direction with two steganographic images[J]. Multimedia Tools & Applications, 2015, 74(15):5861-5872.
13. Ali M. Ahmad/ Ghazali Sulong/ / Mohammed Hazim Alkawaz/ Tanzila Saba, / Ghazali Sulong, / Mohammed Hazim Alkawaz, et al. Data Hiding Based on Improved Exploiting Modification Direction Method and Huffman Coding[J]. Journal of Intelligent Systems, 2014, 23(4):451-459
14. [CC Chang](http://xueshu.baidu.com/s?wd=author%3A%28Chin-Chen%20Chang%29%20&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dperson" \t "_blank), [KN Chen](http://xueshu.baidu.com/s?wd=author%3A%28Kuo-Nan%20Chen%29%20&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dperson), [HC Lin](http://xueshu.baidu.com/s?wd=author%3A%28Huang-Ching%20Lin%29%20&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dperson).Novel Magic Matrices Generation Method for Secret Messages Embedding[J].International Journal of Computer Sciences and Engineering Systems,2011,3(5):0973-4406
15. Kim H J, Kim C, Choi Y, et al. Improved modification direction methods[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2010, 60(2):319-325.
16. Kim C, Shin D, Shin D, et al. Improved Steganographic Embedding Exploiting Modification Direction in Multimedia Communications[J]. Secure & Trust Computing Data Management & Applications, 2010, 186:130-138.
17. Kim C. Data hiding by an improved exploiting modification direction[J]. Multimedia Tools & Applications, 2014, 69(3):569-584.
18. Niu X, Ma M, Tang R, et al. Image Steganography via Fully Exploiting Modification Direction[J]. International Journal of Software Engineering & Its Applications, 2015, 9(5):243-254.
19. Lee C F, Chang C C, Pai P Y, et al. Adjustment hiding method based on exploiting modification direction[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 2015, 33(7):A302.
20. Wang Z H, The D, Kieu, et al. A novel information concealing method based on exploiting modification direction[J]. Journal of Information Hiding & Multimedia Signal Processing,2010,1(1):1-9.
21. Lee C F, Chang C C, Wang K H. An improvement of EMD embedding method for large payloads by pixel segmentation strategy[J]. Image & Vision Computing, 2008, 26(12):1670-1676.