

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)06-1094-08

论文索引信息: 王兰, 耿则勋, 陈路, 汪平. 高辐射分辨率遥感影像可逆信息隐藏算法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(6): 1094-1101

高辐射分辨率遥感影像可逆信息隐藏算法

王兰^{1),2)}, 耿则勋¹⁾, 陈路¹⁾, 汪平¹⁾

¹⁾(信息工程大学测绘学院, 郑州 450052) ²⁾(69027 部队, 乌鲁木齐 830042)

摘要: 高辐射分辨率 (≥ 10 bit) 航空航天数字遥感影像已经逐渐成为空间地理信息获取的主要数据源。针对高辐射分辨率遥感影像的特性, 提出了一种基于整数 DCT 变换的可逆信息隐藏算法, 通过对整数 DCT 变换后的高频系数进行修改来实现待隐藏信息的调制嵌入, 并提出了相应的容量提升和失真控制方案, 且能够在精确提取隐藏信息的同时实现原始数据的完全无损恢复。实验结果表明, 该算法具有较好的不可感知性, 可以有效抵抗线性拉伸攻击, 并且对于剪切、旋转、噪声、滤波等攻击都具有较强的鲁棒性。

关键词: 遥感影像; 高辐射分辨率; 可逆信息隐藏; 整数 DCT 变换

Reversible information hiding algorithm for remote sensing image with high radiometric resolution

Wang Lan^{1),2)}, Geng Zexun¹⁾, Chen Lu¹⁾, Wang Ping¹⁾

¹⁾ (Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052 China)

²⁾ (Troops 69027, Urumqi 830042 China)

Abstract: High radiometric resolution (≥ 10 bit) digital remote sensing image obtained by aeronautics and astronautics technology has gradually been the main data source of spatial geographic information. Focusing on the characteristic of high radiometric resolution digital remote sensing image, this paper presents a reversible information hiding algorithm based on integer DCT (discrete cosine transform), which uses a high frequency coefficient modification technique in the integer DCT domain to modulate the information, the corresponding embedding capacity increase scheme and distortion control scheme are also proposed. During the information extraction process, the original image can be perfectly restored with the embedded information accurately extracted at the same time. The results of experiment proved that this algorithm is invisible, can efficiently against linear stretching attack, and has better robustness to crop, rotation, noise or filter attack.

Keywords: remote sensing image, high radiometric resolution, reversible information hiding, integer DCT

0 引言

高辐射分辨率 (≥ 10 bit) 航空航天数字遥感影像已经逐渐成为空间地理信息获取的主要数据源。

目前, 主流的航空航天数字传感器, 如 IKONOS、ALOS、IRS、QuickBird, 以及 Leica 的 ADS 系列获取的数字遥感影像的辐射分辨率都在 11 bit 甚至 14 bit 以上^[1]。高辐射分辨率遥感影像能够更精细地分辨各类地物的细节, 降低混合像元对于定量分

收稿日期: 2010-01-22; 修回日期: 2010-04-14

第一作者简介: 王兰 (1983—), 女, 信息工程大学测绘学院硕士研究生, 主要研究方向为遥感图像处理及信息隐藏。

E-mail: wanglan1983@163.com。

析的影响,提高遥感分析的准确度,具有广阔的应用前景,因此,对其数据安全的保护显得尤为重要。近年来,随着对基于网络分发传输的数据或信息安全性的提高,信息隐藏技术得到了广泛的研究。将信息隐藏技术应用于高辐射分辨率遥感影像,可以为其版权保护、安全分发、攻击检测、授权访问、责任追究等提供有效的技术支持,更好地促进地理空间信息基础设施的建设。

由于遥感影像对数据精度的要求很高,往往需要在提取隐藏信息之后,能够精确地恢复原始载体数据,因此可逆信息隐藏或无损信息隐藏技术对于遥感影像具有更好的适用性。目前,可逆信息隐藏技术在辐射分辨率 ≤ 8 bit 的遥感影像及多媒体影像中的应用已经得到了较深入的研究。例如,Fridrich 等人^[2-3]利用图像的冗余性,对图像空域的某一位平面进行无损压缩后隐藏信息;Awrangjeb 等人^[4]提出了一种基于视觉感知模型的可逆数据嵌入方法;Ni 等人^[5]提出了一种基于直方图调整的无损信息隐藏方法;Tian^[6]提出一种基于整数小波变换的可逆数据嵌入方法;Celic 等人^[7]提出了广义的空域 LSB 无损信息隐藏算法等。由于高辐射分辨率遥感影像在数据结构、存储格式、应用环境及可能的攻击行为等多方面都与一般的 8 bit 遥感影像有明显区别,因此,其信息隐藏技术与一般图像相比,也存在很多差异:如技术要求、算法设计、嵌入容量,抗攻击性强度等。对上述针对 8 bit 图像的算法进行适应性调整后,虽然具有一定的适用性,但由于高辐射分辨率遥感影像的量化比特数 ≥ 10 bit,数据量比一般 8 bit 图像大得多,而许多用户在使用高辐射分辨率数据时,为了便于处理和应,可能会将其变换为 8 bit 格式,因此高辐射分辨率遥感影像最易受到的攻击就是线性拉伸,这也是其不同于普通 8 bit 数据的重要特点,在进行算法设计时必须考虑这一因素,而上述算法对这种攻击的鲁棒性普遍不强。

针对上述问题,提出了一种基于整数 DCT 变换的可逆信息隐藏算法,利用遥感影像中相邻像点之间的高相关性,通过对整数 DCT 变换后的高频系数进行修改来实现待隐藏信息的调制嵌入,并提出了相应的容量提升和失真控制方案,能够在精确提取隐藏信息的同时实现原始数据的完全无损恢复。实验结果表明,该算法可以有效抵抗线性拉伸的攻击,

嵌入容量较大,隐蔽性较好,并且对于剪切、旋转、噪声,滤波等攻击都具有较强的鲁棒性。

1 方法概述

针对高辐射分辨率遥感影像的信息隐藏算法,其技术要求除了满足近无损性,不可感知性和鲁棒性之外,还须兼顾其抗线性拉伸性,运算效率以及稳定性。DCT 变换对于高相关性数据具有较好的能量集中特性,能够将空域信号的大部分能量集中在少数几个变换系数上。通过 DCT 变换,空间信号可变换为一个代表信号加权平均值的直流分量和多个代表信号谐波的交流分量,且将数据作线性拉伸处理后再进行 DCT 变换,各系数之间的相对比值保持不变,即能够有效抵抗线性拉伸。采用 8 点整数 DCT 变换来实现整数到整数的变换,其不但具有和浮点 DCT 变换类似的特性,而且运算速度快,编码效率高且不存在精度误差问题,能够实现信息嵌入与提取的完全可逆性。首先,对原始载体影像进行分块,子块大小 $m \times n = 8$,即每个子块包含 8 个像素点,组成矢量 r ,然后对每一矢量 r 进行第 2 节所阐述的 8 点整数 DCT 变换,对待隐藏信息进行置乱处理后,按照 3.1 节的所述方法进行信息隐藏。提取隐藏信息时,首先对含隐藏信息的遥感影像进行分块,进行 8 点整数 DCT 变换,然后按照 3.1 节的方法提取隐藏信息,恢复原始影像,并对隐藏信息进行反置乱变换,具体流程如图 1 所示。

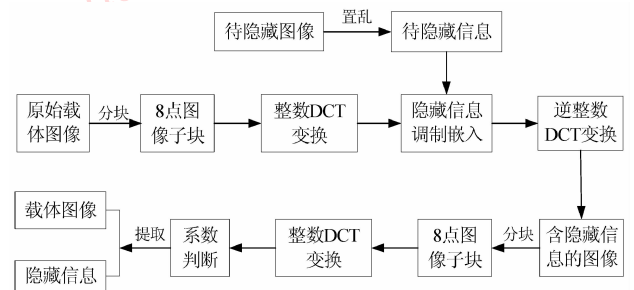


图 1 可逆信息隐藏框图

Fig. 1 Block diagram of reversible information hiding

2 整数 DCT 变换

对于一个长度为 N 的序列 $f(n)$, 其 1 维离散余

弦变换 (1D-DCT) 为

$$\begin{cases} F(0) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \\ F(k) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cos \frac{(2n+1)k\pi}{2N} \end{cases} \quad (1)$$

$F(k)$ 的 1 维离散余弦反变换 (1D-IDCT) 可表示为

$$f(n) = \sqrt{\frac{1}{N}} F(0) + \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) \cos \frac{(2n+1)k\pi}{2N} \quad (2)$$

由上述公式可以看出,在 1 维离散余弦变换中, $\cos(k\pi/2N)$ 项是浮点数据,这也就导致 DCT 变换是一个复杂浮点运算。浮点运算存在精度误差,反变换后不能实现完全可逆,运算量大且占用系统资源较多,而整数 DCT 变换能够同时解决计算精度误差和编码效率低的问题,实现整数一整数的完全可逆变换^[8]。

Hao 等人^[9]提出:对于一个 $N \times N$ 的非奇异矩阵,除了排列矩阵外,其分解形式可以是不超过 3 个的单位三角矩阵,或者是不超过 $N+1$ 个的单行基本可逆矩阵 (single file essential reversible matrix)。利用该原理对 8×8 浮点 DCT 的变换矩阵 M 进行分解,可以得到除排列矩阵外的 9 个单行基本可逆矩阵分解,形如

$$M = P_L S_8 S_7 S_6 S_5 S_4 S_3 S_2 S_1 S_0 P_R \quad (3)$$

式中, P_L 和 P_R 为排列矩阵,单行基本可逆矩阵 S_n 为

$$\begin{cases} S_0 = E + e_8 s_0^T \\ S_n = E + e_n s_n^T \end{cases} \quad n = 1, 2, \dots, 8 \quad (4)$$

式中, E 为 8 阶单位矩阵, $e_n (n = 1, 2, \dots, 8)$ 为 E 的第 n 个列向量, $s_n (n = 1, 2, \dots, 8)$ 是第 n 个元素为 0 的 8 维列向量, s_0 是第 8 个元素为 0 的 8 维列向量。下面证明由这种分解矩阵导出的变换是整数可逆的。设 $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ 是一个长度为 N 的整数序列,则线性变换 $Y = S_n X$ 可展开为

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ s_{n,1} & \cdots & 1 & \cdots & s_{n,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$y_k = \begin{cases} x_k & k \neq n \\ x_n + \sum_{i=1}^{n-1} s_{n,i} x_i + \sum_{i=n+1}^N s_{n,i} x_i & k = n \end{cases} \quad (6)$$

对上式进行取整运算 $Y^* = [S_n X]$,即可得到相

应的整数变换结果:

$$y_k^* = \begin{cases} x_k^* & k \neq n \\ x_n^* + \left[\sum_{i=1}^{n-1} s_{n,i} x_i + \sum_{i=n+1}^N s_{n,i} x_i \right] & k = n \end{cases} \quad (7)$$

式中, $[\cdot]$ 表示取整,上标 * 表示该元素为取整后的值,由此得到的变换结果 Y^* 也为整数序列。对整数序列 Y^* 进行逆变换,即 $\tilde{X} = S_n^{-1} Y^*$,其中 S_n^{-1} 为 S_n 的逆矩阵,将该式展开为

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \vdots \\ \tilde{x}_n \\ \vdots \\ \tilde{x}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ -s_{n,1} & \cdots & 1 & \cdots & -s_{n,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1^* \\ \vdots \\ y_n^* \\ \vdots \\ y_N^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\tilde{x}_k = \begin{cases} y_k^* & k \neq n \\ y_n^* - \sum_{i=1}^{n-1} s_{n,i} y_i^* - \sum_{i=n+1}^N s_{n,i} y_i^* & k = n \end{cases} \quad (9)$$

由式(7)得,当 $k \neq n$ 时, $y_k^* = x_k^* = x_k$,对上式进行取整运算 $\tilde{X}^* = [S_n^{-1} Y^*]$:

$$\tilde{x}_k^* = \begin{cases} x_k & k \neq n \\ y_n^* - \left[\sum_{i=1}^{n-1} s_{n,i} x_i + \sum_{i=n+1}^N s_{n,i} x_i \right] & k = n \end{cases} \quad (10)$$

由式(7)(10)可证,原始输入序列 X 和变换后序列 \tilde{X}^* 完全相等,因此可得出结论,由矩阵 S_n 导出的变换是整数可逆的。

3 可逆信息隐藏方案

3.1 信息嵌入/提取方案

对原始载体图像进行分块,每个图像子块由 8 个相邻的像点组成,对每一图像子块进行整数 DCT 变换,得到相应的 8 个系数,包括一个直流系数 DC 和 7 个交流系数 AC_1, AC_2, \dots, AC_7 。在通常情况下,只要每一图像子块中 8 个相邻像点的像素值大小较为相近,则具有高相关性,最高频率系数 AC_7 的绝对值就会非常小,并且不大于其余高频系数 AC_1, AC_2, \dots, AC_6 的绝对值之中的最大值,即满足如下条件:

$$|AC_7| < AC_{\max} = \max\{|AC_1|, |AC_2|, \dots, |AC_6|\} > 0 \quad (11)$$

在进行待隐藏信息调制嵌入时,可以通过将 AC_{\max} 加在 AC_7 上来调制信息比特位“1”,或保持所有系数不变来调制信息比特位“0”,如图 2 所示。

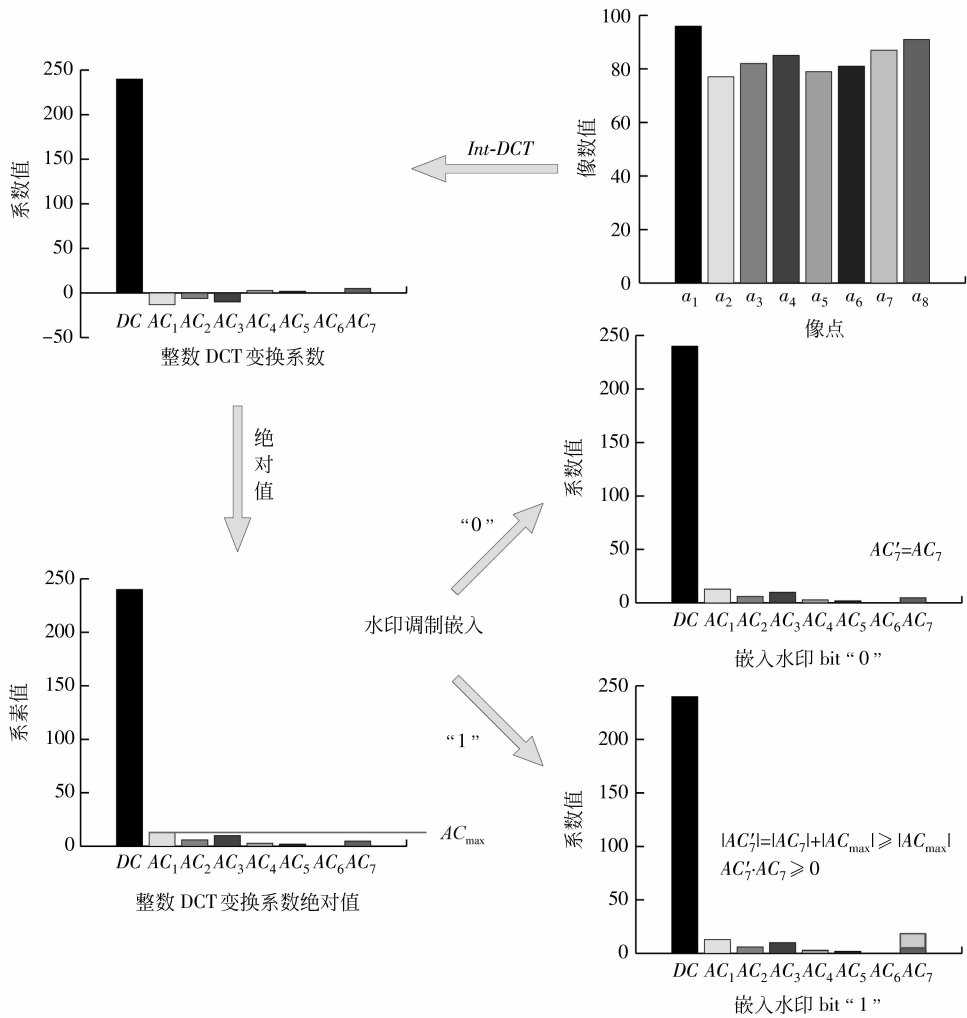


图 2 高频系数修改方案

Fig. 2 High frequency coefficient modification scheme

当嵌入的信息为“1”时,有

$$|AC_7'| = |AC_7| + AC_{max} \geq AC_{max}$$

$$AC_7' \cdot AC_7 \geq 0 \quad (12)$$

当嵌入的信息为“0”时,有

$$AC_7' = AC_7 \quad (13)$$

以上阐述的是正常情况下的嵌入过程,即满足式(11)时的嵌入过程,而对于特殊情况,即当 $|AC_7| \geq AC_{max}$ 时,如何处理,使其区别于含嵌入信息的数据,从而保证隐藏信息的精确提取,需要进一步考虑。目前可获取的高分辨率遥感影像的辐射分辨率主要为 11 bit ~ 14 bit 之间,而计算机的存储单元是字节,对于高辐射分辨率遥感影像,一般按照 16 bit 来存储,其灰度值范围为 $[0, 65535]$,而当系数修改后,还可能会出现灰度值溢出现象,这样就无法实现原始图像的完全恢复,因此,对于系数修改后

会导致灰度值溢出的图像子块,也不能进行信息嵌入。为了解决上述问题,将信息嵌入的位置序列作为密钥,以实现隐藏信息调制嵌入和精确提取。

首先对所有图像子块进行 8 点整数 DCT 变换,然后对系数进行判断,若 $|AC_7| \geq AC_{max}$ 或 $AC_7 = AC_{max} = 0$,则不符合嵌入条件,其位置信息用“0”表示;当 $|AC_7| < AC_{max}$, $AC_{max} > 0$ 时,根据隐藏信息进行调制,若信息比特为“0”,调制嵌入信息并保持系数不变,位置信息用“1”表示,若信息比特为“1”,修改系数并进行判断,若灰度值溢出,则保持系数不变,位置信息用“0”表示,若灰度值没有溢出,修改系数调制嵌入信息,位置信息用“1”表示,这样就得到了一个记录信息嵌入位置的序列,将其作为密钥,授权给遥感影像的使用者,就可以实现原始影像的无损恢复和隐藏信息的精确提取。具体流

程如图 3 所示。

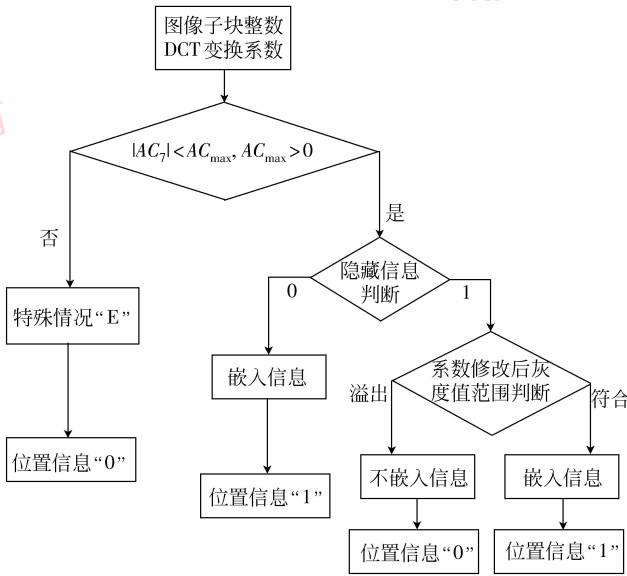


图 3 信息调制嵌入

Fig. 3 Information modulate embedding

在提取隐藏信息的过程中,首先利用密钥对图像子块进行区分,位置信息为“0”,则没有嵌入信息,保持系数不变;若位置信息为“1”,则表示嵌入了隐藏信息,若

$$|AC'_7| < AC_{max} \quad (14)$$

式中 $|AC'_7|$ 为含隐藏信息的图像子块的最后一位高频系数的绝对值,则原始系数

$$AC_7 = AC'_7 \quad (15)$$

且嵌入的信息 bit 为“0”。若

$$|AC'_7| \geq AC_{max} \quad (16)$$

则原始系数

$$\begin{aligned} |AC_7| &= |AC'_7| - AC_{max} \\ AC'_7 \cdot AC_7 &\geq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

且嵌入的信息 bit 为“1”。这样,就实现了原始载体数据的无损恢复和隐藏信息的精确提取。

3.2 视觉失真控制及隐藏容量提升方案

分析可知,引起含隐藏信息图像视觉失真的主要因素是整数 DCT 域的最大交流系数绝对值 AC_{max} ,可以通过调整系数选取的范围,对 AC_{max} 进行控制,以减小视觉失真。将式(11)变成一般化表达式,即

$$\begin{aligned} |AC_7| &< AC_{max} = \max\{|AC_i|\} \\ |AC_{i+1}|, \dots, |AC_j| &> 0 \end{aligned} \quad (18)$$

式中, $i, j = 1, 2, \dots, 6$,且 $i \leq j$,很明显,当 i 的值增大

或者 j 的值减小,相应的最大系数绝对值的选取范围减小,则新确定 AC_{max} 的值将会减小或者至少与原来的值相等,当 $i = 1, j = 6$ 时,式(18)与式(11)等效,即为原始方案。

最简单的容量提升方法就是增加可修改的系数个数,比如同时修改最后两个高频系数 AC_6 和 AC_7 ;然而,鉴于增加的 AC_{max} 的值相对来说较大,直接应用这种方法必然会造成更大的视觉失真,因此,可以考虑将上述视觉失真控制方法同容量提升方法结合应用,在视觉失真与隐藏容量之间达到一个较好的平衡。

3.3 误差控制方案

由于信息的调制嵌入是通过系数修改完成的,因此会造成含隐藏信息图像在一定程度上退化。考虑设计一个误差估计模型,在信息嵌入之前预测由最大系数 AC_{max} 直接引起的失真,以达到控制误差的目的。假定信息嵌入引起的实际误差为 D ,自定义的误差阈值为 TH ,如果 $D > TH$,则不在该图像子块中嵌入信息,保持系数不变;如果 $D \leq TH$,则执行上一节提出的可逆信息隐藏方案。关键问题是如何确定 D ,对于浮点 DCT 变换,误差估计非常简单,由于浮点 DCT 变换是线性变换,因此含隐藏信息数据的变化值可以直接由下式得出

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_{in} &= (d_1, \dots, d_8)^T = \\ &IFltdCT(AC_{max} \cdot \mathbf{V}) \end{aligned} \quad (19)$$

式中, $IFltdCT$ 表示浮点 DCT 的逆变换; \mathbf{V} 表示系数位置向量,对应于准备嵌入隐藏信息的系数位置为“1”,其余为“0”,例如,如果只在高频系数 AC_7 上调制嵌入,则 $\mathbf{V} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)^T$; $D = \max\{|d_1|, |d_2|, \dots, |d_8|\}$ 。

但是,由于本文所采用的 8 点整数 DCT 变换是非线性变换,不能像浮点 DCT 变换一样直接估计出由隐藏信息嵌入引起的误差,因此不能用式(19)来计算最大系数绝对值 AC_{max} 引起的失真。采用与 Yang 等人^[10]所提出的误差估计类似的方法确定 D 。如图 4 所示,设 $\mathbf{K} = (k_1, k_2, \dots, k_8)$ 为原始图像子块的整数 DCT 变换系数; $\mathbf{I} = (I_1, I_2, \dots, I_8) = IIntDCT(\mathbf{K})$, $IIntDCT$ 表示整数 DCT 变换的逆变换; \mathbf{I}_f 是原始系数 \mathbf{K} 的浮点 DCT 逆变换, $\mathbf{I}_f = (I_{f1}, I_{f2}, \dots, I_{f8}) = IFltdCT(\mathbf{K})$; \mathbf{I}_{wf} 是含隐藏信息数据系数 \mathbf{K}_w 的浮点 DCT 逆变换, $\mathbf{I}_{wf} = (I_{wf1}, I_{wf2}, \dots, I_{wf8}) = IFltdCT(\mathbf{K}_w)$ 。令:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_N &= (E_{N1}, E_{N2}, \dots, E_{N8}) = \\ &(|I_1 - I_{f1}|, |I_2 - I_{f2}|, \dots, |I_8 - I_{f8}|) \end{aligned} \quad (20)$$

$$E_L = (E_{L1}, E_{L2}, \dots, E_{L8}) = (|I_{f1} - I_{wf1}|, |I_{f2} - I_{wf2}|, \dots, |I_{f8} - I_{wf8}|) = IFhDCT(AC_{max} \cdot V) \quad (21)$$

则原始数据 I 和含隐藏信息数据 I_w 之间的误差可以由下式进行预测:

$$d_{int} = E_L + 2E_N \quad (22)$$

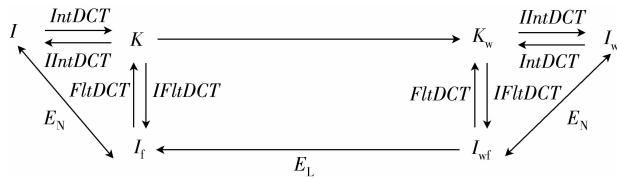


图 4 误差估计

Fig. 4 Error estimation

该误差估计方案能够较为精确地估计出调制嵌入信息时因系数修改引起的误差,通过对阈值的控制,达到限制误差的目的。

除了上述方案外,还可以采用一种较为简单的方法在整数 DCT 变换之前进行误差估计,减少计

算量。由分析可知, AC_{max} 的大小是引起含隐藏信息数据误差大小的直接因素,而 AC_{max} 的大小与同一图像子块中相邻点像素值的相关性有关,相邻点的像素值越接近,相关性越高, AC_{max} 越小;像素值差异越大,相关性越低,则 AC_{max} 越大。设图像子块的均值为 \bar{I} ,与每一像点的像素值之差的绝对值的最大值为

$$E_d = \max\{|\bar{I} - I_1|, |\bar{I} - I_2|, \dots, |\bar{I} - I_8|\} \quad (23)$$

自定义阈值 TH ,若 $E_d > TH$,不进行变换;若 $E_d \leq TH$,则执行可逆信息隐藏方案。对于高辐射分辨率遥感影像, TH 的取值范围一般在 2 500 ~ 3 500 时,子块平均误差 \bar{E} 为 480 ~ 660。

4 实验结果

图 5 给出对一幅 512 × 512 的 16 bit 灰度遥感影像采用原始方案的进行信息隐藏的结果,即最大系数绝对值 AC_{max} 的选取范围为 AC_1, AC_2, \dots, AC_6 ,并且只在系数 AC_7 上调制嵌入隐藏信息。

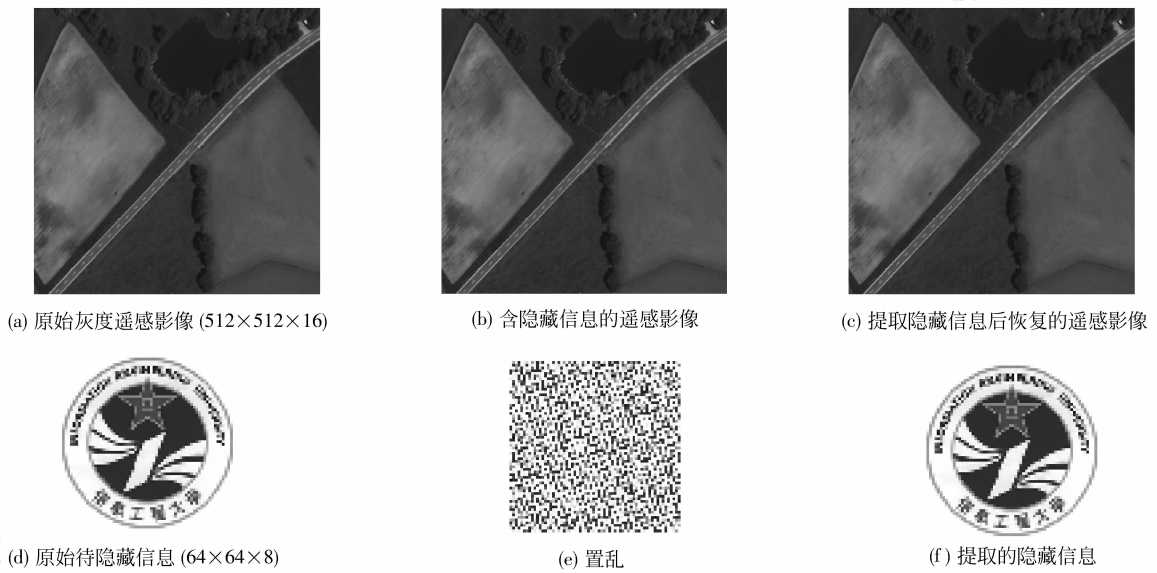


图 5 原始可逆信息隐藏方案实验结果

Fig. 5 Experimental results of original reversible information hiding scheme

经检测,提取的隐藏信息与原始信息的相似度为 1,恢复的影像与原始影像的相似度也为 1,即实现了隐藏信息的精确提取和载体数据的无损恢复。

利用 3.2 节提出的失真控制方案对图 5(a) 所示的 16 bit 遥感影像进行测试,调整系数范围, $AC_{max} = \max\{|AC_i|, |AC_{i+1}|, \dots, |AC_j|\} > 0$,令 $j=6, i=1, 2, \dots, 6$ 。

表 1 列出了当 i 取不同值时的实验结果。其中, Cap 表示隐藏容量, D_{avg} 和 D_{max} 分别表示含隐藏信息图像像素值的平均误差和最大误差, R_E 表示不符合嵌入条件的图像子块的比率。由表 1 可以看出,当 j 固定, i 值增大,致使最大系数绝对值的选取范围减小时, R_E 增大,嵌入容量减少,但嵌入隐藏信息后的数据与原始数据在空间域上的差异明显减小。

表 1 视觉失真控制实验结果

Tab.1 Experimental results of vision distortion control

i	Cap/bit	D_{avg}	D_{max}	$R_E/\%$
1	28 619	71.257 4	4 863	12.66
2	27 936	68.658 3	4 596	14.75
3	27 103	68.005 2	4 503	17.29
4	26 369	53.667 9	3 927	19.53
5	23 135	42.371 6	2 868	29.40
6	16 972	29.167 7	1 907	48.21

表 2 给出了利用 3.1 节的原始方案和 3.2 节的改进方案分别对图 5(a) 所示的 16 bit 图像进行实验的结果。表 3 为本文方法与其他方法的实验结果比较。

表 2 原始可逆信息隐藏方案与改进后方案实验结果比较

Tab.2 Comparison between original reversible information hiding scheme and improved scheme

i	C_{mod}	Cap/bit	D_{avg}	D_{max}	$R_E/\%$
1~6	AC_7	28 619	71.257 4	4 863	12.66
4~5	AC_6, AC_7	52 786	57.313 8	2 514	19.48

表 3 本文方法与其他方法的实验结果比较

Tab.3 Comparison between other methods and our proposed method on standard test image

方法	标准测试图像 Peppers(512 × 512 × 8)	
	嵌入容量/bit	含隐藏信息图像的 PSNR/dB
文献[3]方法	1 024	没有说明
文献[4]方法	7 288	25.75
本文方法	51 386	50.827 3

表 2 及表 3 所示的实验结果表明,改进后的可逆信息隐藏方案具有更高的嵌入容量且有效减小了视觉失真,理论上其容量应该是原始方案的两倍,但由于不可嵌入信息的图像子块的比率 R_E 的增加,达不到这个目标。

利用 3.3 节提出的第 2 种误差控制方案对图 5(a) 所示的图像进行测试,信息隐藏算法为改进后方案,图 6 为选取不同的阈值 TH 时的实验结果。

对图 5(b) 所示的嵌入隐藏信息后的图像数据进行线性拉伸、剪切、旋转、拉普拉斯滤波、椒盐噪声等攻击,然后进行隐藏信息提取,结果如图 7 及表 4 所示。

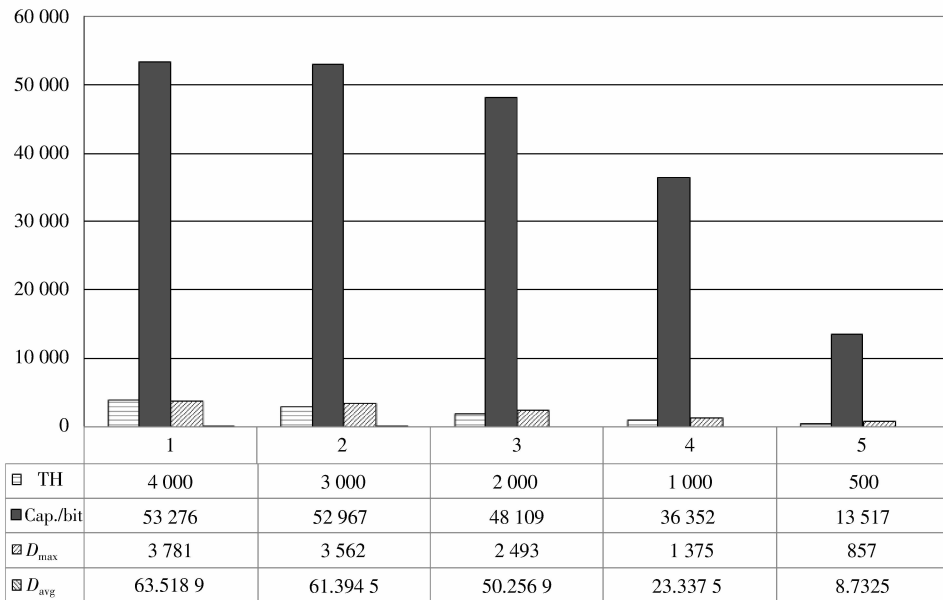


图 6 误差控制方案实验结果

Fig.6 Experimental results of error control scheme

其中,PSNR 表示含隐藏信息图像的峰值信噪比,PMSE 表示隐藏信息提取后恢复的载体图像与

原始图像的中误差,Sim 表示提取的隐藏信息与原始待隐藏信息的相似度。

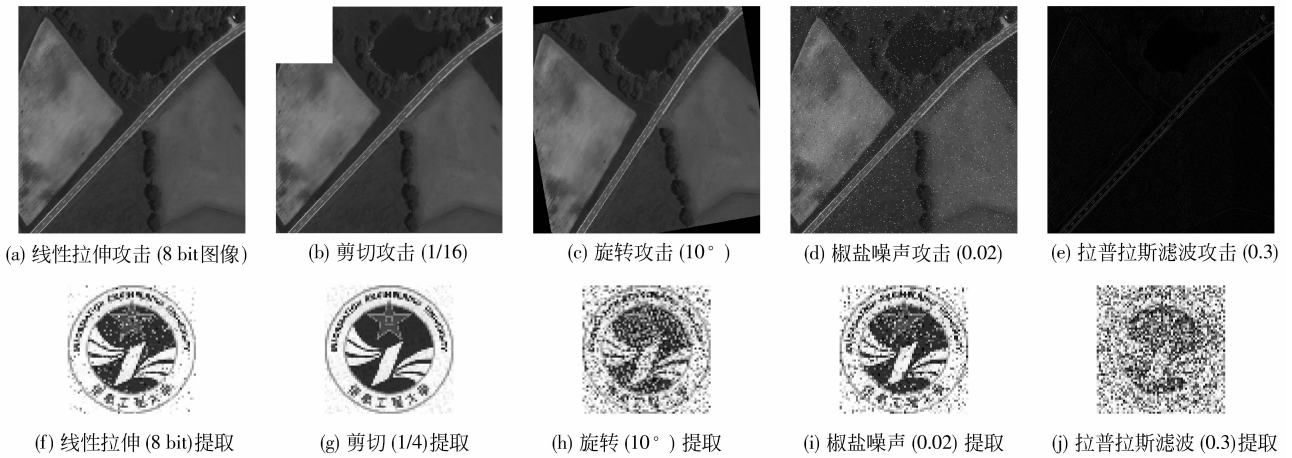


图 7 对含隐藏信息的图像进行各种攻击并提取隐藏信息

Fig. 7 Attacking embedded image then extract the hiding data

表 4 鲁棒性测试结果

Tab. 4 Test results of robustness

攻击	PSNR	PMSE	Sim
无攻击	53.865 8	0	1
线性拉伸为 8 bit 图像	10.985 5	18 501	0.988 8
剪切 1/16	14.490 4	12 358	0.952 5
剪切 1/4	8.693 2	24 089	0.834 6
旋转 10°	23.658 1	4 301	0.892 8
椒盐噪声 (0.02)	22.260 4	5 051	0.912 7
拉普拉斯滤波 (0.3)	11.380 8	17 687	0.832 8
锐化 (0.5)	26.666 7	3 042	0.974 6

5 结 论

首先分析高辐射分辨率遥感影像信息隐藏算法的技术要求,在此基础上提出一种基于整数 DCT 域高频系数修改的可逆信息隐藏方案,并对该算法进行改进,提出了隐藏容量提升和误差控制方案。实验结果表明,该算法具有很好的不可感知性,能够在精确提取隐藏信息的同时完全恢复原始遥感影像;并且对线性拉伸、剪切、旋转、噪声、滤波等攻击均具有较强的鲁棒性,能够实现高辐射分辨率遥感影像的版权保护、来源认证、秘密信息的安全传输等目的。

参考文献 (References)

[1] Guan Yuanxiu, Cheng Xiaoyang. High Resolution Satellite Images Processing Guidelines [M]. Beijing: Science Press, 2008:87-90. [关元秀,程晓阳.高分辨率卫星影像处理指南 [M].北京:科学出版社,2008:87-90.]

[2] Fridrich J, Goijan M, Du R. Lossless data embedding-new paradigm in digital watermarking [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, Special Issue on Emerging Applications of Multimedia Data Hiding, 2002, 2002 (2): 185-196.

[3] Fridrich J, Goijan M, Du R. Invertible authentication [C]// Proceedings of the SPIE, Security and Watermarking of Multimedia Contents. Washington, Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2001, 4314: 197-208.

[4] Awrangjeb Mohammad, Kankanhalli Mohan S. Reversible watermarking using a perceptual model [J]. SPIE, Journal of Electronic Imaging, 2005, 14(1): 1-8.

[5] Ni Z C, Shi Y Q, Ansari N, et al. Reversible data hiding [C]// IEEE Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and System. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003, 2: 912-915.

[6] Tian J. Wavelet-based reversible watermarking for authentication [C]// Proceeding of SPIE, Security and Watermarking of Multimedia Contents. Washington, Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2003, 4675: 679-690.

[7] Celik M U, Sharma G, Tekalp A M, et al. Lossless generalized-LSB data embedding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 12(2): 157-160.

[8] Zeng Yonghong, Cheng Lizhi, Bi Guoan, et al. Integer DCT and fast algorithms [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(11): 2774-2782.

[9] Hao Pengwei, Shi Qingyun. Matrix factorization for reversible integer mapping [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(10): 2314-2324.

[10] Yang B, Schmucker M, Funk W, et al. Integer DCT-based reversible watermarking for images using companding technique [C]// Proceedings of the SPIE, Security and Watermarking of Multimedia Contents. Washington, Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2004, 5306: 405-415.