

一种检测与校正 JPEG 数据传输错误的新方法

杨 进 刘定生

(中国科学院中国遥感卫星地面站,北京 100086)

摘 要 无线传输 JPEG 数据时,由于信道存在噪音,经常会发生偶然性错误或突发性错误,因此错误检测与恢复在无线传输 JPEG 图像中有着举足轻重的作用。由于 JPEG 图像对传输错误非常敏感,一个 bit 位的传输错误就会影响后续位的解码,从而造成图像质量的严重下降。传统的处理 JPEG 传输错误是采用错误掩藏与编码自同步方法。其中错误隐藏是使用插值的方法来恢复数据,但其会在一定程度上降低传输图像的质量;编码自同步方法则会影响传输数据的通用性。为了更好地检测与校正 JPEG 数据传输错误,提出了一种新的 JPEG 编码数据传输错误检测与恢复方法。该方法以图像相关性作为判别依据,使用全搜索的方法来恢复数据。通过对该方法可行性进行的理论分析和仿真的实验表明,该方法可以更好地恢复偶然性传输错误,并可极大提高无线传输 JPEG 图像的质量。

关键词 JPEG 图像 传输错误检测与恢复 图像相关性 位反转

中图分类号: TN919.81 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)03-0435-06

A New Method for Detection and Correction Transmission Errors in JPEG Image

YANG Jin, LIU Ding-sheng

(China Remote Sensing Satellite Ground Station Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086)

Abstract As Wireless communication channels exist noise, single-bit error and burst error containing N successive error bits may occur during JPEG-coded transmitting image over wireless communication system. Therefore error detection and correction play a very important role in transmission joint photographic experts group (JPEG) images. JPEG image is sensitive to transmission error. A single transmitting error in codeword will affect subsequent codeword and may result in a significant degradation. Error concealment and self-synchronizing codes are traditional methods to cope with this problem. The basic theory of error concealment method is interpolation. So it will degrade image quality in some measure. On the other hand self-synchronizing codes need a specific coder. It will reduce the compatibility of JPEG images. For the sake of better decoding performance this paper proposed a novel algorithm for transmission error detection and correction. Base on image correlation, the proposed algorithm correct transmissive error with full search method. The paper also analysed the practicability of the algorithm. Based on the simulation results obtained in this study, the proposed approach is able to fit all the single-bit transmission error and improve the quality of JPEG image greatly.

Keywords JPEG image, error detection and correction, image correlation, bit inversion

1 引言

随着无线通信技术的发展,使用无线传输图像

的应用日益普及。无线信道在传输图像数据时,由于图像数据的数据量比较大以及无线带宽比较小,因此通常要将图像压缩后再进行传输。JPEG (the joint photographic expert group) 是一种非常通用的

基金项目:科技部和北京市奥运重点项目(2002BA104A03)

收稿日期:2004-11-07;改回日期:2005-06-15

第一作者简介:杨进(1974~),男。2003年于中国科学院中国遥感卫星地面站获硕士学位,现为该单位助理研究员。主要研究方向为图像处理、图像处理并行计算。E-mail:jyang@ne.rsgs.ac.cn

图像编码压缩标准。JPEG 图像不仅压缩比高,而且压缩失真小。由于其在 1.5 ~ 2.0bpp 压缩率下,压缩后图像在视觉上几乎同原始图像相同,可以看作是视觉无损压缩^[1],而且 JPEG 的算法相对简单,易于通过硬件实现数据的压缩与解压缩,因此 JPEG 编码在无线传输领域得到了广泛应用。

JPEG 是一种基于离散余弦变换 (discrete cosine transform, DCT) 的图像编码标准。它是按照 8 × 8 单位先将图像数据分为小块,再进行 DCT 变换。尽管 JPEG 标准中采用了霍夫曼 (Huffman coding, HC) 编码,但 HC 编码是一种可变长 (variable length code, VLC) 编码,由于 VLC 编码对传输错误非常敏感,因此会引起所谓的解码丢失同步现象与错误传递现象,也就是说,在一个 8 × 8 块中出现的传输错误不仅影响到本块数据解码,还影响到后续一系列数据块的正确解码。在不进行任何错误限制处理的情况下,一个比特位的传输错误就会造成整个图像传输失败。图 1 的 Lena 测试图像显示了传输错误对 JPEG 图像的影响。同有线传输相比,由于无线传输信道的误码率比较高,通常在 10^{-4} 以上,而有线传输信道的误码率一般仅在 10^{-6} 以下^[2],因此在无线传输领域, JPEG 数据传输受到很大限制。



图 1 Lena 测试图像, BER = 0.01%
Fig. 1 The test image of lenna with BER = 0.01%

常用解决 JPEG 传输错误的方法有以下两种:一种是错误隐藏;另一种是编码数据的自同步,其中错误隐藏的基本原理是根据图像的相关性,用出错数据周围图像块来重采样发生错误的图像块^[3],而且这种错误隐藏在频域内和时域内都可以进行^[4],由于错误隐藏的核心算法是重采样,因此虽然用不同错误隐藏算法处理后图像的峰值信噪比 (peak signal noise ratio, PSNR) 值不同^[5],但由于它们都会在一定程度上降低图像质量,即会造成图像的模糊,致使不能完全恢复图像,因此在一些对图像质量要求较高的应用中,错误隐藏不能满足需要。

编码自同步方法的原理是在编码中插入同步字,当发生错误时,再利用这些同步字重新在 JPEG 流中定位,以便尽快恢复解码流的同步,例如可自同步的霍夫曼编码 (resynchronizing Huffman code, RHC)^[6]就是一种编码自同步的应用。但 RHC 编码也有缺点:首先,使用 RHC 需要设计专门的编码和解码器,这就影响了 JPEG 数据的通用性;其次在一些情况下,很难找到最优的同步码,这就造成编码后数据的压缩比降低。

由于上述两种方法都有各自的缺点,因此在一些对图像质量要求非常严格的领域,如卫星侦察、遥感等领域,这两种方法的使用中就受到一定限制。本文在 JPEG 编码自同步的基础上,利用图像数据的相关性,提出一种新方法,实验证明,该方法可以提供更好的数据恢复性能。

2 JPEG 编码

JPEG 标准规定,对一幅图像进行编码主要需要 DCT 编码、量化、霍夫曼编码 3 个步骤 (见图 2)。

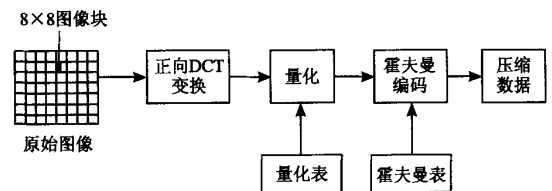


图 2 JPEG 编码流程

Fig. 2 The produce of JPEG encoding

JPEG 编码是首先按照 8 × 8 将图像分割为若干小块,再进行 DCT 变换。DCT 变换后,低频信息集中在 8 × 8 矩阵的左上角,而高频信息则集中在右下角。由于人的视觉对高频信息不敏感,因此对高频信息进行若干省略,不会引起视觉上明显改变。高频信息的去除可通过量化这一步骤实现。经过 DCT 变换与量化后,图像数据仍按照 8 × 8 为单位组织。这种 8 × 8 的单位在 JPEG 标准中称为最小编码单元 (minimum coded unit, MCU)。

量化后, JPEG 标准按照 MCU 为单位来对数据进行重组,并进行霍夫曼编码。大家知道,霍夫曼编码属于熵编码,同时也是可变长编码。这种霍夫曼编码长度不固定,在 JPEG 标准中,霍夫曼编码的长度为 2 ~ 16bit。如数值 7 的霍夫曼编码为 11110,码

长为 5bit;数值 3 的霍夫曼编码为 100,码长为 3bit。正是由于 JPEG 标准引入了霍夫曼这种可变长编码,才使得 JPEG 数据对传输错误极其敏感。比如数值 7 和 3 的传输数据流为 11110100。如果数值 7 传输时,最后一位产生错误,变为 11111,则数据流变为 11111100;而 1111110 是数值 9 的霍夫曼编码,其解码时,首先将 1111110 解码为数值 9,后面的 00 在 JPEG 标准中则认为是一个 MCU 结束的标志。由于解码器错误地认为该 MCU 解码结束,因此后续的 MCU 解码就会产生定位错误,这种情况被称为解码的同步丢失。由此可见,一个 MCU 中发生的错误不仅可能会影响到后续的 MCU 正确解码,而且会造成错误传播现象。

3 JPEG 传输错误检测

由于传输错误会造成 MCU 解码错误,因此根据错误对 MCU 解码的影响,传输错误可以分为以下 3 种类型:(1)错误发生在 MCU 块内部,没有传播到其他 MCU;(2)传输错误造成 MCU 错误地分裂;(3)传输错误造成数据块错误地融合^[7]。

由于第 1 类错误没有改变 MCU 的大小,不会影响后续 MCU 的解码,因而对整个图像的质量影响不大;而后两种错误发生时,MCU 大小则发生了变化,即 MCU 有可能比正确的 MCU 大或小。这是由于解码时没有识别正确的 EOB(end of block)标志造成的。当发生这种情况时,则有可能造成 MCU 的错误拆分,或 MCU 的错误混淆。当把后续的 MCU 数据当作本 MCU 的数据进行解码时,则会造成解码的 MCU 总个数小于正常的 MCU 个数,这种情况就是 MCU 的混淆。另外,传输错误也可能造成数据流中添加了额外的 EOB 标志,这样就会使最后解码的总 MCU 个数大于正常的 MCU 个数。这种情况就是 MCU 的拆分。因此错误检测的重点应放在后两种类型的错误上。

错误检测方法主要有参数检验法、频域检测法和空间域检测法 3 种类型^[3],由于参数法是利用 JPEG 编码规律来检测数据流的正确性,其不但具有运算量小、不改变编码结构、通用性强的特点,而且可以迅速检测出 JPEG 数据中的错误,因此本文采用参数法来检测 JPEG 传输错误。

JPEG 标准为了增强数据传输的健壮性,在数据中插入了一种可选择的重置标志码(restart marker,

RST_m),这样就可以利用 JPEG 标准中的 RST_m 标志来检测传输错误。RST_m 是 JPEG 标准为增强数据传输的健壮性而设计的一种标志,它规定在若干个 MCU 之间插入某一标志,即 RST_m,*m* 从 0 递增至 7 循环往复。RST_m 标志之间的 MCU 块组成 ECS (entropy-coded data segment)。多个 ECS 与 RST_m 共同组成一个扫描行(scan)。RST_m 与 MCU 的组织关系如图 3 所示。

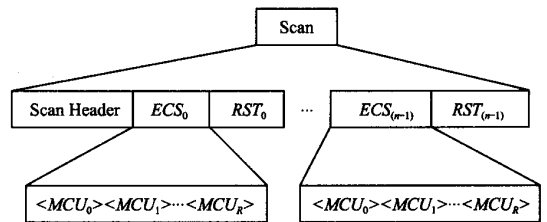


图 3 JPEG 图像组织结构

Fig. 3 The JPEG image structure

这样在每一个 MCU 后插入 RST_m 标志就可以有效地检测 JPEG 解码中的错误,例如在检测 MCU 解码后的后续 RST_m 标志时,如果 MCU 数据后紧跟着 RST₃ 标志,并且上一个检测出的 RST_m 标志是 RST₂,那么本块的 MCU 解码正确;如果 RST_m 之间的差不等于 1 或者 MCU 解码后没有找到相应的 RST_m 标志,那么本块数据解码错误。当发现一块数据解码错误后,则回溯到上一个正确解码的 MCU 数据块。例如假设某一 MCU 解码错误,其前一个 MCU 的同步码是 RST₁,则从 RST₁ 向后过滤数据流,寻找 RST₂ 标志,并计算 RST₂ 与 RST₁ 之间的数据流长度,以便得出发生错误 MCU 数据块的正确长度。

4 JPEG 传输错误恢复

4.1 算法原理

确定编码数据发生错误的准确位置后,还需要对错误块进行进一步的处理。错误隐藏法是利用出错误块周围正确数据块进行插值来进行错误校正,但是无论采用何种插值算法,都会造成图像信息的丢失。因为错误隐藏法是利用周围图像与出错图像的相关性来进行插值运算的,它没有利用传输错误块中的数据信息,而是把这部分信息丢弃,所以这样就会造成恢复图像的模糊。

本文利用发生错误的信息块的信息来对图像进

行恢复处理。通过对无线信道的分析可以得知无线传输时,会产生以下两种类型的传输错误:一种是偶然性无线传输错误;一种是突发性无线传输错误,其中偶然错误是指在数据传输中随机发生的位翻转,即 0,1 翻转,比如误码率(bit error ratio, BER)为 10^{-4} 的偶然性传输错误是指平均每传输 10^4 位数据就会出现一位传输错误;突发性错误是指数据传输中出现连续传输一串错误的 1 或 0 的情况。

从上述分析可以看出,在很多情况下,JPEG 的传输数据流中只有极少数的位出现错误。如果可以修正这些位错误,那么就可以恢复原始图像。下面以 BER 为 10^{-4} 为例来进行说明,在压缩比为 4 的情况下,一个 MCU 块中出现多于 1bit 错误的概率为 0.0001。由于 MCU 中出现错误的位很少,因此可以用穷尽法来对数据流中的数据进行逐位反转,并以图像的相关性和 JPEG 参数作为判断恢复图像正确性的依据。

大家知道,图像的相关性可以作为判断恢复数据是否正确的一个依据。这种图像的相关性是指图像在空间域上的变化具有一定的连续性,且相邻的像素的变化符合一定的空间规律。一个像素点同它四周的像素的相关性可以用灰度值的欧几里德距离来衡量。像素同它四周像素的欧氏距离越小,则它们的相关性就越大。

为了更好地利用图像的相关性,本文按照隔行的方式将图像分为两组,并且按照图像的纹理规律将图像纹理分为平坦纹理、横向纹理、纵向纹理 3 类。由于 JPEG 标准对图像编码前首先按照连续方式以 8×8 大小将图像分为若干图像块,因此在每个 8×8 图像块中,只有块边界的像素点会同其他图像块重点像素点相接,这样每个图像块中只有 30 个像素点同周边图像块的像素点相接,而且由于隔行编码后,图像块中的每一行数据都和相邻数据块中的数据相接,因此按这种方法组织图像,就增加了 MCU 图像块之间的相关性。图 4 显示了图像隔行分块像素组织方法。

对图像进行纹理分类也是要利用图像的相关性来判断恢复图像的正确性。由于图像块是按照隔行顺序排列的,因此相邻图像块的纹理类型通常也是一样的。比如图像块 A 是平坦块,则图像块 B 也是平坦块,而如果图像块 A 是垂直纹理块,则图像块 B 也应是垂直纹理块。图像块的分类可通过梯度法进行:如设 G_H 为图像的水平梯度平均

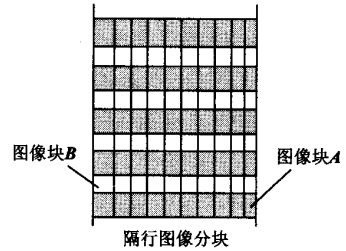


图 4 图像隔行分块方法

Fig. 4 The different method of image splitting

值, G_V 为垂直梯度平均值。如果 $G_H < T$, 并且 $G_V < T$, 则图像块是平坦图像; 如果 $G_H > T_H$, 则图像块为横向条纹块; 如果 $G_V > T_V$, 则图像块为纵向条纹块。 T, T_H, T_V 分别是梯度、水平梯度和垂直梯度的阈值, 其可以根据经验调节。

根据图像类别, 图像恢复的判别公式如下:

$$\begin{aligned} \text{Cof} = & w_1 \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 |G_A^H(x, y) - G_B^H(x, y)| + \\ & w_2 \sum_{y=0}^7 \sum_{x=0}^7 |G_A^V(x, y) - G_B^V(x, y)| \quad (1) \end{aligned}$$

式中, $G_A^H(x, y)$ 表示发生错误的图像块 A 水平方向的梯度值; $G_B^H(x, y)$ 表示图像块 A 相邻图像块 B 的水平方向梯度值; $G_A^V(x, y)$ 与 $G_B^V(x, y)$ 分别代表图像块 A 与 B 的垂直梯度。 w_1 与 w_2 是调节系数。 B 图像块是平坦块时, $w_1 = w_2 = 0.5$; 当 B 为水平纹理块时, $w_1 = 0.8, w_2 = 0.2$; 图像块 B 是垂直纹理块时, $w_1 = 0.2, w_2 = 0.8$ 。公式(1)实际上是计算相邻图像块水平与垂直方向梯度的差。如果相邻图像块按式(1)计算的结果小于阈值 T , 则认为与该次数据反转对应的图像是一个可能的恢复图像。

4.2 数据恢复步骤

根据上面的分析, JPEG 数据恢复步骤如下:

(1) 将接收的数据进行霍夫曼解码, 并检测相应的 RSTm 标志;

(2) 如果 RSTm 标志正确, 则进行标准 JPEG 解码, 同时统计图像块的水平与垂直梯度, 并对数据块进行分类;

(3) 当发现 RSTm 标志错误时, 则退回到数据流中上一个正确的 RSTm 标志处, 然后沿着数据流向后搜索 RSTm 标志, 并记录 RSTm 标志之间的大小;

(4) 对 RSTm 标志之间的数据进行逐位反转, 每反转一次需重新进行霍夫曼解码, 并检查 RSTm 标志, 如果 RSTm 标志正确, 则按照公式(1)进行计算,

并记录计算结果,如果存在多个可能的图像恢复结果,则比较公式(1)的计算结果,然后选取与梯度差数值最小的一次对应的图像作为最终恢复的图像;

(5)如果逐位反转后没有符合要求的结果,则进入错误隐藏流程。

错误检测与恢复流程如图5所示。

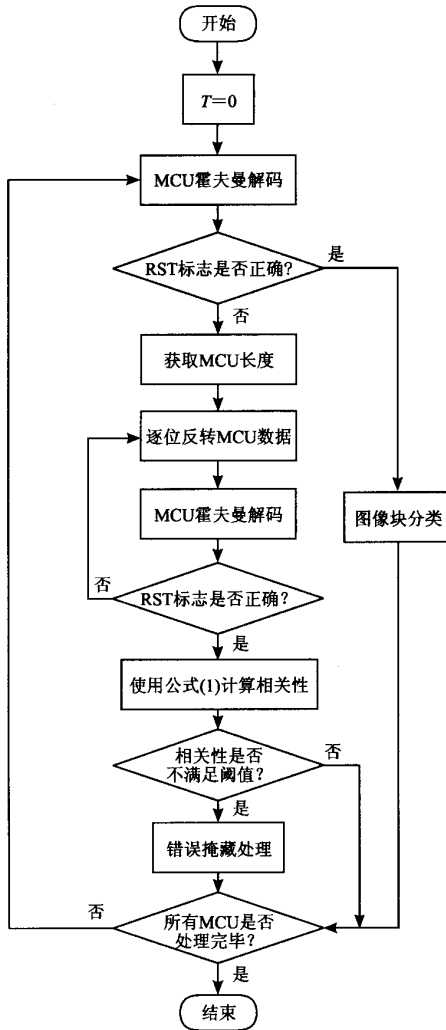


图5 JPEG 传输错误检测与恢复流程图

Fig.5 The procedure of detection and correction of JPEG image

4.3 可行性分析

本文对 JPEG 数据传输错误的检测是建立在每个 MCU 后插入 RSTm 同步标志的基础上,RSTm 标志是 JPEG 标准规定的同步标志,由于它占用两个字节的长度,因此在每一个 MCU 数据块后插入该标志会使 JPEG 图像略微增大。由于本文的方法主要是针对高质量图像的情况,因此本文以1:4压缩比的

图像为例来进行统计。1:4压缩比时,每个 MCU 大约包含 16Byte 的压缩数据。加上 2Byte 的同步字,图像大约扩大 12%。对 3 种类型的图像进行测试的结果如表 1 所示。

表 1 对 3 幅测试图像加入 RSTm 后字节增加的比较

Tab. 1 Total number of bytes for the three test image with/Without the RSTm

图像名称	图像大小(Byte)		图像大小增加百分比(%)
	无 RST	加入 RST	
Lena 测试图像	74712	81680	9.32
医学图像	3182015	3576585	12.4
遥感图像	770323	858139	11.5

从表 1 测试结果可以看出,在1:4的压缩比下,虽然增加 RSTm 同步标志会使压缩后的图像增大 10%左右,但这是可以接受的。

本文提出的数据恢复需要在 MCU 块内以穷尽法搜索,这会增加 JPEG 解码时间。如果完全穷尽所有的组合,则势必会使计算时间增长到不可容忍的程度。假设对 MCU 解码的时间复杂度为 N ,则理论上一个 M bit 长度的 MCU 块做 1bit 穷尽的时间复杂度为 $M \times N$,而做 2bit 穷尽的时间复杂度为 $M \times (M - 1) \times N$,由于做不同 bit 穷尽的时间复杂度相差很大,所以在做穷尽时,为避免计算量过大,要设置一个阈值,当穷尽 2bit 后仍没有找到最适合的图像,则以错误掩藏的方式来代替错误恢复。在进行 JPEG 解码时,由于 DCT 反变换最占用 CPU 时间,因此使用本算法恢复图像时,应通过参数法过滤掉一部分图像反转结果,这样就使得进行 DCT 反变换的次数远远小于数据流反转的次数。下面以 BER 是 10^{-4} 、压缩比为1:4的 Lena 测试图像为例来进行图像恢复,图像恢复时间如表 2 所示。

表 2 图像恢复时间比较

Tab. 2 The time comparison of image correction

错误情况	理论 MCU 解码次数	实际 MCU 解码次数	实际 DCT 反变换次数
无错误	4096	4096	4096
MCU 中有 1bit 错误	10977	8721	5437
MCU 中有 2bit 错误	818990	533243	10253

5 试验结果

为了验证本文方法的效果,以一幅 256×256 的遥感图像作为原始图像,以 10^{-3} 随机产生的脉冲信号作为加性噪声进行了实验。实验中,分别对原始图像进行添 0 处理、错误掩藏处理与错误恢复处理。

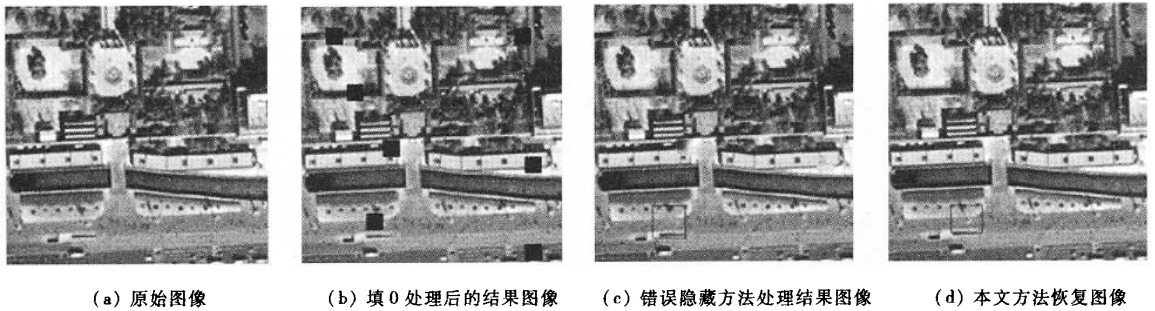


图 6 JPEG 数据恢复方法比较

Fig. 6 The comparison results between different JPEG correction method

6 结论

由于 JPEG 编码数据错误恢复是一个复杂的过程,而且不同的应用对复原图像质量要求不同,为此本文提出一种用逐位反转的数据流,并利用图像相关性作为判别依据来恢复 JPEG 传输错误的新方法。利用 JPEG 标准的 RSTm 同步码标志来对 JPEG 错误进行检测,不仅没有对标准 JPEG 图像进行改变,而且具有很好的通用性。通过试验测试,在同一个 MCU 中,错误位小于 2bit 时,本文提出的图像恢复方法可以有效地对传输错误的数据进行恢复。与图像错误掩藏法、图像编码自同步方法相比,本文提出的方法不仅能快速检测 JPEG 的传输错误,而且提高了传输图像的质量。

本文方法的缺点是使用 RSTm 标志来检测传输错误时,有一部分错误不能检测出来,并且当 MCU 中的误码多于 2bit 时,由于数据恢复方法会占用大量的计算时间,因此在实际应用时,应该结合图像隐藏的方法来对数据进行恢复。

图 6 是各种处理方法的处理比较结果图像。图 6 (d) 为本文算法恢复的图像,图中黑方框处显示两种不同处理方法的效果。从图 6 (b) 中黑方块部位可以看出,使用错误掩藏方法会造成图像模糊,而用本文方法恢复的图像则没有模糊的现象。可见,使用本文方法恢复的图像质量优于用错误掩藏方法处理后的图像。

参考文献 (References)

- Wallace G K. The JPEG still picture compression standard [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1992, 38(1): 30 ~ 44.
- HAN Yi-huang, LEOU Jin-jang. Detection and correction of transmission errors in JPEG images [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1998, 8(2): 221 ~ 231.
- Abdat Mourad, Kachouh Ziad Al, Bellanger Maurice G. Transmission error detection and concealment in JPEG images processing signal [J]. Image Communication, 1998, 13(1): 45 ~ 64.
- SUN Hui-fang, Kwok Wilson. Concealment of damaged block transform coded images using projections onto convex sets [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1994, 4(4): 47 ~ 53.
- Park Joog Wook, Kim Jong Won, Lee Sang Uk. DCT coefficients recovery-based error concealment technique and its application to the MPEG-2 bit stream error [J]. IEEE Transactions on Circuits Systems for Video Technology, 1997, 7(6): 845 ~ 854.
- Ferguson T J, Rabinowitz J H. Self-synchronizing huffman codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1984, 30(4): 687 ~ 693.
- Lam W M, Reibman A R. Self-synchronization variable-length codes for image transmission [A]. In: Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, Signal Processing [C], San Francisco, CA, USA, 1992: 477 ~ 480.