

文章编号:1004-4213(2010)12-2251-6

基于整型可逆时域交叠变换的遥感图像压缩^{*}

王磊, 吴家骥, 白静

(西安电子科技大学 电子工程学院 智能感知与图像理解教育部重点实验室; 智能信息处理研究所, 西安 710071)

摘 要:提出了一种无乘法整型可逆时域交叠变换方法,并以此为核心变换技术设计了一种新的有损到无损渐进的图像压缩系统. 利用所提出的压缩系统从一个单一的码流文件中既可以恢复出完全无损的图像,也可以在高压缩比下得到高质量的有损重构图像. 算法通过前后向滤波器改进离散余弦变换性能,并在矩阵分解基础上通过多阶提升实现完全可逆整型变换. 光学遥感图像的实验结果显示,该算法在绝大多数情况下可以达到优于图像压缩国际标准 JPEG、JPEG2000 以及新一代压缩算法 HD-Photo 的率失真性能以及高质量的主观视觉效果.

关键词:离散余弦变换;时域交叠变换;图像压缩;矩阵分解;整型可逆变换

中图分类号:TN911.73

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103912.2251

0 引言

随着航空航天及卫星探测等技术的发展,遥感图像在环境监测、国土资源调查、城市规划等领域发挥的作用日益增大;然而海量的图像数据也为有限带宽中的传输与有限空间中的存储带来困难,因此图像压缩是必不可少的技术^[1-3]. 基于离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)的图像压缩标准 JPEG^[4] 由于其优良的性能而得到广泛应用,然而其缺点是由于采用分块变换编码而导致在低码率下容易产生方块效应. 为改善压缩图像质量,联合图像专家组提出 JPEG2000 标准,其采用的离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)属于全局变换技术,克服了 JPEG 低码率下块效应的问题,同时结合高效的编码算法提高了压缩性能^[5]. 小波变换的整型实现技术也被研究且应用于有损到无损的渐进压缩中^[6]. 然而由于小波分析属全局变换,其计算复杂度随图像尺寸的增加而成线性增长^[7]. 所以当 CPU 和内存资源有限时,如实时应用或低复杂度应用的情况下,小波变换不如基于块的 DCT 有优势.

对基于 DCT 压缩算法,研究者们通过设计各种滤波器以消除其低码率下的方块效应,其中尤其以 Tran 等人^[8]的算法性能较优. 其算法——时域交叠变换可以有效消除方块效应,并且可以达到与 JPEG2000 相当的有损压缩性能,但无损压缩性能

不是很好. 在时域交叠变换的基础上,近年来微软提出一种称之为 HD-Photo 的图像压缩技术^[9],可以实现有损到无损的渐进压缩. HD-Photo 首先将图像分成 16×16 大小宏块,然后采用双正交交叠变换(Lapped Biorthogonal Transform, LBT),LBT 通过将 DCT 基矩阵和交叠滤波器分解为旋转操作并实现可逆整型变换^[10].

本文在时域交叠变换基础上通过另一种途径实现整型可逆变换,提出了整型可逆时域交叠变换(Reversible integer Time Domain Lapped Transform, RTDLT),使基于此变换的压缩算法能够适用于带宽有限、码率可精确控制的有损到无损渐进压缩. 本文算法的基本思想是首先将滤波器和 DCT 矩阵分解为转置矩阵和三角基本可逆矩阵(Triangular Element Reversible Matrix, TERM),并通过多阶提升实现完全可逆整型变换;再将变换后的系数重组为小波子带结构;然后利用嵌入式位平面编码方法进行编码,试验结果验证了本文算法在有损和无损压缩中的有效性.

1 基于多阶提升的整型可逆变换

为实现 RTDLT,需首先解决如何实现整型可逆变换的问题,本文利用两个关键技术:多阶提升和矩阵分解.

1.1 提升系统

提升系统有很多优点:易于实现完全可逆整型变换,进而应用于无损压缩;允许原位计算,对 CPU 和内存要求小,功耗低;将复杂的变换矩阵转化为容易理解的结构等. 为实现可逆整型变换,传统 DCT 及小波变换^[11]常采用如图 1 的二阶提升结构.

^{*} 国家自然科学基金(60607010、60201029)和教育部长江学者和创新团队支持计划(IRT0645)资助
Tel: 029-88209786 Email: wanglei0912@mail.xidian.edu.cn
收稿日期:2010-01-18 修回日期:2010-03-29

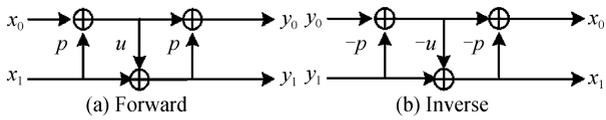


图 1 二阶提升结构
Fig. 1 Second-order lifting structure

图 1 中 x_i 和 y_i 分别代表输入和输出信号, p 和 u 分别代表预测和更新系数.

本文利用多阶提升实现整型变换. 多阶提升可以看作是二阶提升的扩展. 以 4 阶提升为例, 若 U

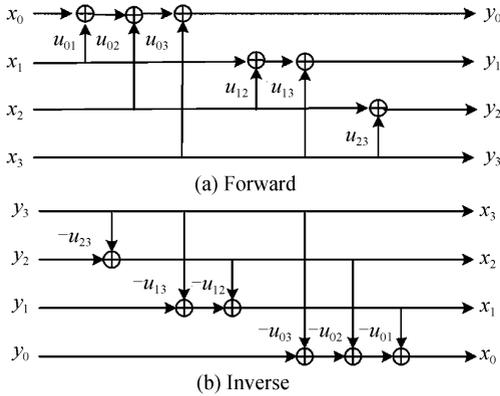


图 2 多阶提升结构
Fig. 2 Multi-order lifting structure

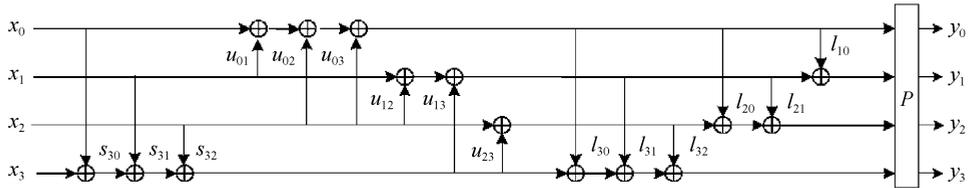


图 3 四点整型 DCT 正变换的多阶提升结构
Fig. 3 Multi-order lifting structure of 4-point forward DCT

2 整型可逆时域交叠变换的设计

为实现 RTDLT, 本文算法利用矩阵分解方法将滤波器和 DCT 矩阵分解为转置矩阵和 TERM, 然后利用多阶提升实现整型可逆变换. 本文没有利用其他不同的复杂的分解方法, 而是采用同一种分解方法以降低硬件实现复杂度; 并且实验证明这种方法可以使得整型变换很好的近似原浮点型变换.

TDLT 由前后向滤波器和 DCT 组成, 在 DCT 变换之前对输入图像进行前向滤波, 在 DCT 逆变换之后对图像进行后向滤波. 滤波器作用在相邻块的相邻系数上: 前向滤波器的作用是减小相邻块之间的相关性而提高块内像素间的相关性; 后向滤波器是前向滤波器的完全逆变换, 其作用是提高相邻块间的相关性, 进而消除相邻块之间的方块效应.

前向滤波器相当于一个平滑器, 其定义式为^[8]

$$F = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I & J \\ J & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & J \\ J & -I \end{bmatrix} \quad (1)$$

为 4×4 的对角线元素为 1 的上三角矩阵, $Y = UX$ 可由如图 2 所示的多阶提升结构实现, 其中 u_{ij} 为矩阵 U 的系数. 在正向多阶提升和逆向多阶提升过程中, 对 $\sum_{j=i+1}^{N-1} u_{ij} x_j$ 采用相同的取整运算, 以保证实现完全可逆整型变换.

1.2 矩阵分解

基于矩阵分解理论, 一个非奇异矩阵可以分解为 TERM 的乘积^[12]. 但分解过程不是唯一的, 不同的分解结果将会影响整型变换与原变换之间的误差, 以及整型变换的稳定性, 并进而影响变换的去相关性能. Galli 等人建议在分解过程中采用全局选主元法^[13]. 本文通过实验发现这种方法对消除误差和增加稳定性非常有效, 并对原浮点型变换取得了很好的整型近似, 整型变换性能良好^[14]. 由矩阵分解理论可证明, 若 $\det A = \det P = \pm 1$, 矩阵 A 可以分解为 $A = PLUS$, 其中 L 和 S 是下三角矩阵, U 是上三角矩阵, P 是转置矩阵. 通过分析发现若 L 、 U 、 S 的对角线元素等于 1, 则可以通过多阶提升实现整型到整型的完全可逆变换. 以 DCT 为例, 原浮点型变换可以按图 3 所示的多阶提升结构实现整型可逆变换. 其中 s_{ij} 、 u_{ij} 、 l_{ij} 分别为矩阵 S 、 U 、 L 的系数.

式中 I 、 J 和 V 分别是单位矩阵、反向单位矩阵、自由控制矩阵. V 的定义式为

$$V = J(C_{M/2}^{\text{II}})^T D_S C_{M/2}^{\text{IV}} J \quad (2)$$

式中 $C_{M/2}^{\text{II}}$ 和 $C_{M/2}^{\text{IV}}$ 分别代表 $M/2$ 点的第 2 类型 DCT 变换(DCT-II)矩阵、第 4 类型 DCT 变换(DCT-IV)矩阵, $D_S = \text{diag} \{s, 1, \dots, 1\}$ 为对角线矩阵, s 为尺度化因子, 算法中设置 $s = \sqrt{2}$. DCT-II 与 DCT-IV 的计算公式分别为

$$C_N^{\text{II}}(n, k) = \sqrt{2/N} \epsilon_k \cos((\pi(2n+1)k)/(2N)) \quad (n, k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (3)$$

$$C_N^{\text{IV}}(n, k) = \sqrt{2/N} \cos((\pi(2n+1)(2k+1))/(4N)) \quad (n, k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (4)$$

式(3)中 $k=0$ 时, $\epsilon_k = \sqrt{1/2}$; 否则 $\epsilon_k = 0$. 前向滤波相当于一个平滑器, 其功能是使每一个 DCT 块的输入数据趋向于同数量级. 以 2×2 滤波器为例来说明前向滤波的功能. 此时滤波器 F 的子矩阵为单元素矩阵 $I = J = C_{M/2}^{\text{II}} = C_{M/2}^{\text{IV}} = 1$, $D_S = s$. 设 $\{x_i, x_{i+1}\}$

和 $\{x'_i, x'_{i+1}\}$ 分别代表前向滤波器的输入和输出,由式(1)可以推出滤波前后像素之间的关系为

$$x'_i = \frac{1}{2}[x_i + x_{i+1} - s(x_{i+1} - x_i)] = x_i - \frac{s-1}{2}(x_{i+1} - x_i) \quad (5)$$

$$x'_{i+1} = \frac{1}{2}[x_i + x_{i+1} + s(x_{i+1} - x_i)] = x_{i+1} + \frac{s-1}{2}(x_{i+1} - x_i) \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可以看出,前向滤波器将相邻块中的相邻像素之间的差距扩大,使得原像素值较小的减小,原像素值较大的增大.较长基函数的前向滤波器不仅扩大相邻块边缘之间的差值,而且使每一个块内的像素趋于同数量级.从另一个角度讲,前向滤波器使相邻块之间的相关性降低,而块内像素间的相关性增强.时域交叠滤波器基函数矩阵 \mathbf{F} 正交但非归一化,在矩阵分解之前需修正使其满足 $|\det \mathbf{F}| = 1$,本文以 $\mathbf{F}^* = \mathbf{F} / \sqrt[|M|]{|\det \mathbf{F}|}$ 进行修正.其中 \mathbf{F} 是大小为 $M \times M$ 的原滤波矩阵, \mathbf{F}^* 是归一化矩阵.设 \mathbf{A}_F 代表滤波器矩阵,其分解形式为 $\mathbf{A}_F = \mathbf{P}_F \mathbf{L}_F \mathbf{U}_F \mathbf{S}_F$. 滤波器矩阵分解为 TERM 之后,利用多阶提升实现整型滤波.

前向滤波器在提高变换效率中起着非常重要的作用.算法中,整型滤波器代替原浮点型滤波器.以美国加利福尼亚州北岛海军航空基地(North Island NAS)图像为例说明整型滤波器的功能,如图4.由图4可以看出,整型滤波后的图像非常近似于浮点型滤波后的图像;滤波后图像中每个方块内的像素

更加平滑、趋近于同等数量级.通过前向滤波,在灰度变化剧烈的部分,高频成分被转移至方块的边缘,这样将有利于下一步的 DCT 变换,对滤波后的图像进行 DCT 变换后能量将更加集中.

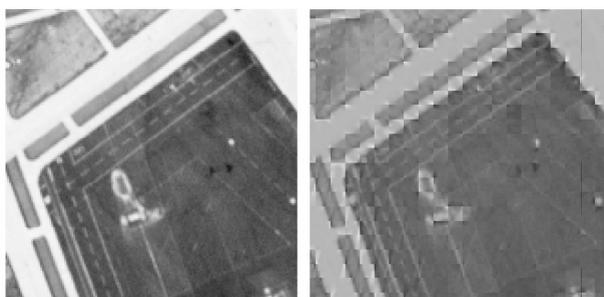
设 \mathbf{A}_{DCT} 代表 DCT 变换基矩阵,首先将其分解为转置矩阵和 TERM— $\mathbf{A}_{DCT} = \mathbf{P}_{DCT} \mathbf{L}_{DCT} \mathbf{U}_{DCT} \mathbf{S}_{DCT}$. 然后利用多阶提升实现整型 DCT 变换.整型滤波器结合整型 DCT 实现 RTDLT,以此为核心变换技术,并利用集合分裂块编码算法(Set Partitioning Embedded block, SPECK) [15],设计了一种有损到无损渐进压缩算法 RTDLT-SPECK. SPECK 是基于零块分裂的嵌入式位平面编码方法,具有渐进式传输、码率可精确控制、复杂度较低等优点.

压缩算法具体步骤为:

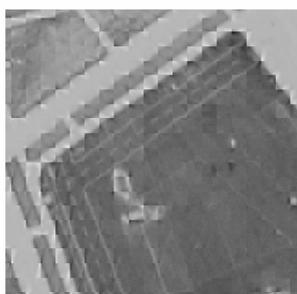
- 1) 将输入图像按滤波器长度分块,并通过 \mathbf{S}_F 、 \mathbf{U}_F 、 \mathbf{L}_F 、 \mathbf{P}_F 进行整型滤波,得到分块平滑图像;
- 2) 将分块平滑图像通过 \mathbf{S}_{DCT} 、 \mathbf{U}_{DCT} 、 \mathbf{L}_{DCT} 、 \mathbf{P}_{DCT} 进行整型 DCT 变换,得到块状分布变换系数——包括直流(DC)系数和交流(AC)系数;
- 3) 将块状分布的变换系数重组为小波子带结构,DC 系数交织在低频子带,AC 系数交织在高频子带;
- 4) 利用 SPECK 进行编码;
- 5) 输出码流文件.

3 结果与分析

为验证算法性能,对图5所示遥感图像进行测试,并与 JPEG、JPEG-LS、JPEG2000 以及 HD-Photo

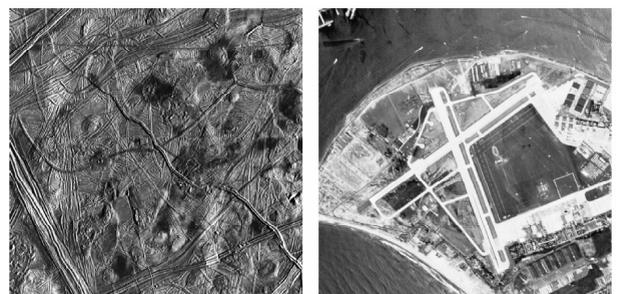


(a) Original image (b) Image after floating-point pre-filtering



(c) Image after reversible integer pre-filtering

图4 North Island NAS 图像部分细节
Fig. 4 Portion of North Island NAS



(a) Europa

(b) North Island NAS



(c) Shelter Island

(d) Washington D.C

图5 遥感图像

Fig. 5 Remote sensing images

进行对比.

其中木卫二 (Europa) 图像来自于 CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems), 其他三幅图像来自于 USC-SIPI (University of Southern California, Signal and Image Processing Institute). 实验图像中包括冰壳纹理、海湾、机场、建筑群等多种地物目标, 兼有平滑区域和细节纹理复杂的区域; 图像大小均为 512×512 . 实验中小波变换分解层数为 5 层; HD-Photo 中 LBT 为带滤波器的交叠变换. 无损压缩和有损压缩分别采用压缩后平均每像素所用比特数 (Bit Per Pixel, BPP) 和峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 作为衡量压缩质量的性能指标.

3.1 无损压缩

实验中对比了本文算法、JPEG2000 (Reversible

5/3DWT)、JPEG-LS 和 HD-Photo 的无损压缩性能, 结果如表 1. 4-RTDLT、8-RTDLT 和 16-RTDLT 分别代表滤波器和 DCT 变换基函数长度为 4、8、16 的整型时域交叠变换. 从表 1 中可以看出: 本文算法在绝大多数情况下无损压缩性能优于 JPEG2000 和 HD-Photo; 对 Europa、North Island NAS 和 Shelter Island 图像, RTDLT 的性能随变换基函数长度的增加而提高, 8-RTDLT 性能和复杂度适中; 对纹理性较差的 Washington D. C. 图像, 由于较大块内像素间相关性不强, 所以变换基函数长度增加其压缩性能反而下降; 虽然 JPEG-LS 对 Europa 之外三幅图像压缩性能最好, 但 JPEG-LS 是基于预测的方法, 只能实现无损压缩, 无法实现有损到无损的渐进压缩.

表 1 无损压缩性能 (单位: bpp)

Table 1 Lossless compression performance (bpp)

| | JPEG2000 (5/3RDWT) | JPEG-LS | HD-Photo | Ours | | |
|------------------|-----------------------|---------|----------|---------|---------|---------------|
| | | | | 4-RTDLT | 8-RTDLT | 16-RTDLT |
| Europa | 6, 489 | 6, 615 | 6, 606 | 6, 491 | 6, 321 | 6, 223 |
| North Island NAS | 5, 391 | 5, 214 | 5, 484 | 5, 359 | 5, 316 | 5, 303 |
| Shelter Island | 5, 783 | 5, 648 | 5, 804 | 5, 723 | 5, 678 | 5, 648 |
| Washington D. C. | 6, 819 | 6, 613 | 6, 88 | 6, 686 | 6, 695 | 6, 731 |
| Average | 6, 121 | 6, 023 | 6, 194 | 6, 065 | 6, 003 | 5, 976 |

3.2 有损压缩

实验中对 JPEG、HD-Photo、JPEG2000 以及本文算法的有损压缩性能进行了测试, 实验结果如表 2.

表 2 有损压缩性能 (PSNR/dB)

Table 2 Lossy compression performance (PSNR/dB)

| bpp | Irreversible | | Reversible | |
|-----------------------------|--------------|-----------------------|------------|--------------|
| | JPEG | JPEG2000 (9/7FDWT) | HD-Photo | Ours |
| Europa | | | | |
| 1 | 23.87 | 26.12 | 26.07 | 26.50 |
| 0.75 | 22.38 | 24.24 | 24.18 | 24.48 |
| 0.5 | 20.65 | 22.15 | 21.76 | 22.54 |
| 0.25 | 17.86 | 19.78 | 19.06 | 19.98 |
| North Island NAS, San Diego | | | | |
| 1 | 31.48 | 33.44 | 33.33 | 33.54 |
| 0.75 | 30.09 | 31.98 | 31.61 | 32.01 |
| 0.5 | 28.14 | 29.80 | 29.49 | 29.99 |
| 0.25 | 24.81 | 27.03 | 26.31 | 27.00 |
| Shelter Island, San Diego | | | | |
| 1 | 29.91 | 31.55 | 31.38 | 31.51 |
| 0.75 | 28.70 | 29.89 | 29.88 | 29.91 |
| 0.5 | 26.90 | 28.01 | 27.98 | 28.21 |
| 0.25 | 23.94 | 25.59 | 25.06 | 25.69 |
| Washington D. C. | | | | |
| 1 | 22.97 | 24.64 | 24.24 | 24.61 |
| 0.75 | 21.77 | 23.01 | 22.64 | 23.01 |
| 0.5 | 20.57 | 21.46 | 21.04 | 21.56 |
| 0.25 | 18.83 | 19.61 | 18.96 | 19.65 |

JPEG2000 算法中采用小波变换中性能最优的浮点型 9/7 双正交小波 (9/7FDWT), 与 JPEG 算法中所采用变换方法同属浮点型变换, 存在截断误差, 不完全可逆. HD-Photo 与本文算法所采用变换方法不存在截断误差, 可以实现整数到整数的完全可逆变换. 本文算法中采用复杂度适中的 8-RTDLT. 实验数据表明, 本文算法在绝大多数情况下性能优于 JPEG、HD-Photo 以及 JPEG2000; 尤其对纹理丰富的 Europa 图像优势较明显; 采用 9/7FDWT 的 JPEG2000 算法在个别情况下优于本文算法, 但 9/7FDWT 只能用于有损压缩, 不能实现有损到无损的渐进压缩.

图 6 为 JPEG、JPEG2000、HD-Photo 以及本文算法重构的木卫二 (Europa) 图像部分细节主观视觉效果对比. 从图中可以看出, 由 JPEG 重构图像存在明显方块效应; JPEG2000 算法不存在方块效应, 但损失部分细节信息, 在灰度变化剧烈部分有模糊现象; HD-Photo 算法重构图像保持细节信息较好, 但在 16×16 大小宏块边缘存在轻微块效应; 由于后向滤波器的作用, 本文算法重构的图像几乎不存在方块效应, 克服了基于 DCT 算法的缺点. 图像纹理经整型 DCT 变换应在频域产生的高频信息, 由于整型前向滤波器的作用被适时转移, 避免了因

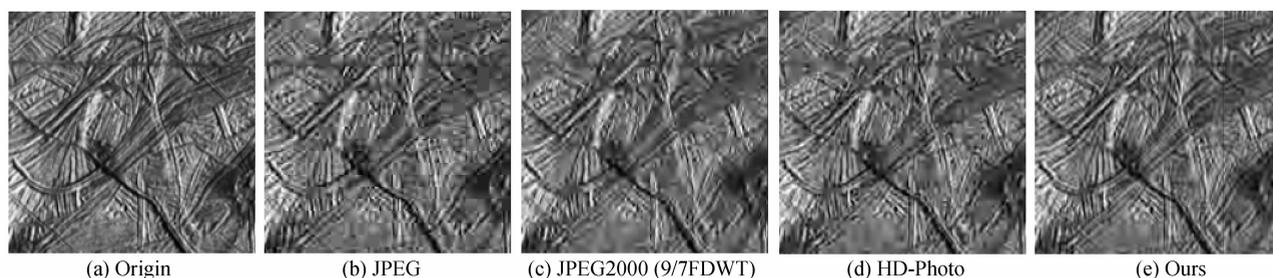


图 6 0.5 bpp 重构木卫二图像部分细节主观视觉效果对比

Fig. 6 Portion of reconstructed Europa at 0.5 bpp

量化而造成损失,并在解码端通过后向滤波器重构.

3.3 计算复杂度

本文算法计算复杂度分析如下:滤波器和 DCT 矩阵以相同的方式进行矩阵分解,而利用矩阵分解实现整型变换的复杂度为 $O(N^2)$ [12],因此 RTDLT 的计算复杂度与传统算法小波变换、HD-Photo 中的 LBT 相当,都为 $O(N^2)$. 同时 RTDLT 依然保持了块变换的优势,所以可以实现并行处理,进而保证整个图像的硬件实现复杂度并不随图像尺寸大小的增加而变化. 此外,为进一步降低复杂度,本文算法将浮点型变换系数用分母为 2^k 的分数代替,使浮点型乘法可以仅通过移位和加法实现.

4 结论

本文在矩阵分解基础上利用多阶提升提出了无乘法 RTDLT,并以此为核心变换技术设计了一种新的图像压缩系统,可以实现有损到无损的渐进压缩. 试验结果表明本文设计的压缩系统可以获得比 JPEG、JPEG2000 以及 HD-Photo 相当甚至更优的压缩性能. 此外本文算法兼容自适应分块变换及并行运算,因此与 DWT 相比具有内存要求小、硬件实现复杂度低等优势. 与本文算法相比,HD-Photo 的优点是它可以支持多种图像格式且主要针对低复杂度数字图像应用;本文目前仅对标准灰度遥感图像进行了研究,对其它格式彩色图像的实验和研究也将是一项具有实际意义的重要工作.

参考文献

[1] WANG Ke-yan, WU Cheng-ke, KONG Fan-qiang, *et al.* A novel algorithm for satellite interferential multispectral images compression [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 555-560.
王柯俨,吴成柯,孔繁锵,等. 卫星干涉多光谱图像压缩新算法 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 555-560.

[2] LEI Jie, LI Yun-song, ZHOU You-xi, *et al.* An algorithm for multi-spectral images compression based on motion estimation and ROI [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2707-2711.

雷杰,李云松,周有喜,等. 基于运动估计和 ROI 编码的干涉多光谱图像压缩[J]. *光子学报*, 2009, **38**(10): 2707-2711.

[3] LEI Jie, ZHOU You-xi, WU Cheng-ke, *et al.* A new image compression algorithm for interferential multispectral images [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1534-1538.
雷杰,周有喜,吴成柯,等. 一种新的高效干涉多光谱图像压缩算法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(6): 1534-1538.

[4] CCITT. ISO/IEC 10918-1 Information technology-digital compression and coding of continuous-tone still image: requirements and guidelines[S]. Geneva: ISO, 1994.

[5] SKODRAS A, CHRISTOPOULOS C, EBRAHIMI T. The JPEG 2000 still image compression standard[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2001, **18**(5): 36-58.

[6] PENNA B, TILLO T, MAGLI E, *et al.* Progressive 3-D coding of hyperspectral images based on JPEG 2000 [J]. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2006, **3**(1): 125-129.

[7] OLIVER J, PEREZ M M. On the design of fast wavelet transform algorithms with low memory requirements [J]. *IEEE Trans Circuits Syst Video Technol*, 2008, **18**(2): 237-248.

[8] TRAN T D, LIANG J, TU C. Lapped transform via time-domain pre- and post-processing [J]. *IEEE Trans on Signal Process*, 2003, **51**(6): 1557-1571.

[9] <http://www.microsoft.com/whdc/xps/hdphotodpk.msp>.

[10] TU C, SRINIVASAN S, SULLIVAN G J, *et al.* Low-complexity hierarchical lapped transform for lossy-to-lossless image coding in JPEG XR/HD-Photo [C]. *SPIE*, 2008, **7073**: 70730C-1-12.

[11] SONG Ping, LIU Bo, CAO Jian-zhong, *et al.* Image compression based on the combination of lifting wavelet transform and fractal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1784-1787.
宋凭,刘波,曹剑中,等. 提升小波变换与分形相结合的图像压缩[J]. *光子学报*, 2006, **35**(11): 1784-1787.

[12] HAO P, SHI Q. Matrix factorizations for reversible integer mapping [J]. *IEEE Trans on Signal Process*, 2001, **42**(10): 2314-2324.

[13] GALLI L, SALZO S. Lossless hyperspectral compression using KLT [C]. *IEEE Int Geosci Remote Sens Symposium*, 2004, **1**: 313-316.

[14] WANG L, WU J, JIAO L, *et al.* Lossy to lossless image compression based on reversible integer DCT [C]. *IEEE Int Conf Image Processing*, 2008: 1037-1040.

[15] ISALM A, PEARLMAN W A. Embedded and efficient low-complexity hierarchical image coder [C]. *SPIE*, 1998, **3653**: 294-305.

Remote Sensing Image Compression Based on Reversible Integer Time Domain Lapped Transform

WANG Lei, WU Jia-ji, BAI Jing

(*Key Laboratory of Intelligent Perception and Image Understanding (Ministry of Education); Institute of Intelligent Information Processing, School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

Abstract: A reversible non-multiplying integer time domain lapped transform was introduced, and a new progressive lossy-to-lossless compression system was designed based on this transform technique. Completely lossless compression images and high-quality lossy reconstructed images could be obtained from a single code-stream using the proposed compression system. RTDLT improved the transform efficiency of DCT by adding pre-and-post-filters, and it could realize reversible integer transform by multi-lifting based on matrix factorization. Simulation results show that RTDLT-based compression system obtains comparable or even higher compression ratio in lossless compression than that of JPEG2000 and HD-Photo, better rate-distortion performance in lossy compression in most cases, and also gratify subjective visual quality.

Key words: Discrete Cosine Transform (DCT); Time Domain Lapped Transform (TDLT); Image compression; Matrix factorization; Reversible integer transform



WANG Lei was born in 1984. He is currently pursuing the Ph. D. degree at School of Electronic Engineering, Xidian University, and his research interests focus on intelligent signal processing and image compression.



WU Jia-ji was born in 1973, and received his Ph. D. degree from Xidian University in 2005. Now he is an associate professor, and his research interests focus on remote sensing and spectral image coding and image processing.