

文章编号 1004-924X(2011)04-0922-07

适于硬件实现的无损图像压缩

王建军¹, 刘波²

(1. 中国人民武装警察部队工程学院, 陕西 西安 710086;

2. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

摘要:针对常见嵌入式小波编码算法硬件实现困难、成本较高等问题,提出了一种适用于硬件实现的无损图像压缩算法。该算法根据子带属性的不同将小波系数分为1个低频子块和3个高频子块,然后使用不同的方法分别进行量化编码。对于低频子块,首先使用脉冲差分编码调制(DPCM)方法压缩其数据动态,然后使用改进的比特位平面编码算法编码输出对应码流;对于各高频子块,则使用提出的改进集合树分裂(SPIHT)算法分别进行量化编码。在改进的SPIHT算法中,通过加入A类集合的分类优化了码流输出;通过消除链表,降低了内存需求并避免了内存的动态管理;通过使用集合极值矩阵,避免了扫描过程中的重复判断,提高了编码效率。实验结果表明,与传统SPIHT算法相比,本文算法可使各国际标准测试图像的编码比特率均降低0.14 bit/pixel以上,而编码速度提高3倍以上。该算法具有实时性高、内存需求低、适于硬件实现的特点。

关键词:图像压缩;无损压缩;小波变换;SPIHT算法;硬件实现

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111904.0922

Hardware implementation of lossless image compression

WANG Jian-jun¹, LIU Bo²

(1. *Engineer College, Chinese Armed Police Force, Xi'an 710086, China;*

2. *Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: A hardware implementation method for lossless image compression is proposed to overcome the difficulties of embedded wavelet coding methods in hardware implementation and high costs. Firstly, the algorithm divides wavelet coefficients into a low frequency block and three high frequency blocks according to sub-band properties, and then uses different methods to code respectively. In the low frequency block coding method, the Difference Pulse coding Modulation(DPCM) is firstly used to reduce coefficients' dynamic range. Then, a modified bit plane coding method is used to output the bit stream. In the high frequency block coding method, the proposed modified Set Partitioning in Hierarchical trees(MSPIHT) algorithm is used to code three high frequency blocks respectively with their thresholds. The MSPIHT optimizes the outputted bit stream by using a type of A set judge, reduces memory requirement and avoids memory dynamic management by eliminating the lists of SPIHT algorithm. Moreover, the MSPIHT avoids repeated calculation in scanning process and enhances the coding efficiency by adopting MMVS. Experiment results show that the bit-rates of all international standard

收稿日期:2010-06-11;修订日期:2010-09-03.

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z127);中国科学院空间科学与应用研究中心青年创新基金资助项目(No. O8211DA29S)

testing images have reduced more than 1.4 bit/pixel and the coding speed has increased more than three times as compared with that SPHIT. It is concludes that the proposed algorithm is super in real-time performance, low memory requirement and fit for hardware implementation.

Key words: Image compression; lossless compression; wavelet transform; SPIHT algorithm; Hardware implementation

1 引言

无损图像压缩在遥感图像与医学图像的获取、传输和存储等领域有着广泛的应用。在一些特殊的应用场合,如遥感图像的星上实时压缩、远程医学实时诊断,除了要求实现图像数据的无损精确重建外,还需要无损压缩算法具有实时性高、内存需求低和易于硬件实现的良好性能^[1-4]。

近年来,基于小波变换的图像压缩广受关注。双正交(5,3)和(9,7)小波滤波器已经被新一代图像压缩标准 JPEG2000 所采用。自小波变换引入图像压缩以来,涌现出了许多可以有效组织和压缩小波系数的嵌入式编码算法,其中以嵌入式零树编码(EZW)^[5]、集合树的分裂法(SPIHT)^[6]和嵌入式优化截断块编码(EBCOT)^[7]最为著名。EBCOT 算法虽然压缩比性能极高且已被 JPEG2000 标准采用,但由于使用复杂的率失真优化控制单元和算术编码技术,算法复杂度高,硬件实现困难且成本较高^[8-10]。而作为 EZW 改进的 SPIHT 则以简单高效而著称,其输出码流即使不经过熵编码或算数编码仍可达到很高的压缩比^[11]。由于采用了更为有效的空间方向树结构和比特平面编码方法, SPIHT 算法能够产生嵌入式码流,从而支持解码器的多码率解码与渐近传输。在压缩性能上,其不同比特率下重建图像的峰峰信噪比(PSNR)较 EZW 平均提高 0.6 dB 左右,与 EBCOT 算法接近^[7]。

SPIHT 算法虽然取得了极大的成功,但理论分析与实验结果表明,该算法在无损压缩应用中也存在着一些不足。首先,对所有子带系数统一编码的策略以及扫描过程中存在的大量重复判断严重影响了其编码效率;其次,由于使用 3 个动态链表存储编解码过程中的重要信息,内存需求量极大,且动态分配、删除节点等链表操作也不适于硬件实现。为此,本文提出了适于硬件实现的无损图像压缩算法。提出的算法根据小波系数的子带属性,将小波系数矩阵分为 1 个低频子块和 3

个高频子块,并分别采用不同算法进行量化编码。对于低频子块,首先对系数进行 DPCM 预处理,然后使用改进比特位平面编码算法输出其编码码流;对于各高频子块,则根据其量化阈值使用提出的改进 SPIHT 算法分别编码。所提出的改进 SPIHT 算法,通过对 A 类集合分类,优化了码流输出,通过消除链表和使用集合极值矩阵,不仅提高了算法的执行效率,而且有效地降低了内存需求,避免了内存的动态管理。

2 SPIHT 算法分析

2.1 SPIHT 算法

SPIHT 算法的基本思想是:伴随着一个集合的分裂,依据幅值大小对系数进行排序并且对重要的比特位数优先传输。SPIHT 算法采用如下集合定义表示层次树结构:

(1) $O(i, j)$: 结点 (i, j) 所有直接后代组成的集合;

(2) $D(i, j)$: 结点 (i, j) 所有后代系数组成的集合;

(3) $L(i, j)$: $L(i, j) = D(i, j) - O(i, j)$ 。

定义函数 $S_n(T)$ 指示集合 T 的重要性,重要其值为 1, 否则为 0。建立 3 个链表 LIP, LSP, LIS 分别存放不重要系数、重要系数和不重要集合。在 LIS 中,节点 (i, j) 代表集合 $D(i, j)$ 或 $L(i, j)$, 并分别标记为 A 类与 B 类以示区分。

对于给定阈值 T , SPIHT 算法排序过程如下:

首先,检测 LIP 中各系数的重要性,输出测试结果,如果重要则一并输出其系数正负符号;

其次,对 LIS 中的各项 (i, j) 做如下操作:

* 若为 A 类集合,输出 $S_n(D(i, j))$, 如果 $S_n(D(i, j)) = 1$, 则将 $D(i, j)$ 分裂为 $O(i, j)$ 和 $L(i, j)$, 并分别处理。对 $O(i, j)$ 中的各个系数检测其重要性并输出结果,重要则加入 LSP, 不重要则加入 LIP; 如果 $L(i, j)$ 不为空集,把 $L(i, j)$ 项移

至 LIS 表尾并标记为 B 类,若为空集,则直接将其从 LIS 中删除;

* 若为 B 类集合,输出 $S_n(L(i,j))$,如果 $S_n(L(i,j))=1$,则将 $L(i,j)$ 分裂为以 $O(i,j)$ 中各结点为根的树,并将根结点坐标加入 LIS 中标记为 A 类。

细化过程输出 LSP 中除当前排序过程得到的系数以外的各系数的当前位平面值。如果没有达到要求的码率且量化阈值大于 0,则阈值减半重复上述排序和细化过程,直到编码完成。

2.2 SPIHT 算法存在的不足

虽然 SPIHT 算法在图像压缩应用中取得了极大的成功,但也存在如下不足:

(1) 对所有频带进行了同等重要程度的编码,而实际上小波变换后,各子带小波系数之间的能量级别并不相同;

(2) 由于使用 3 个链表, SPIHT 算法不仅内存需求大,且需要动态管理内存,不易于硬件实现;

(3) SPIHT 算法在排序过程中存在大量的重复判断计算;

(4) 当一个集合重要而 4 个直接子节点为非重系数时,仍需连续输出 4 位 0, SPIHT 算法的码流输出仍有待进一步优化。

3 适于硬件实现的无损图像压缩算法

针对 SPIHT 算法存在的不足,本文提出了改进的适于硬件实现的无损图像压缩算法。

3.1 子带分块编码策略

研究发现,图像小波变换后形成的小波系数矩阵各子带能量级别并不相同,低频子带能量较高,而高频子带则较低。如表 1 所示,以各 512×512 灰度经典测试图像为例,其 3 级 D9/7 小波变换系数各子带系数绝对值极大值相差很大。由此可见,对各子带进行同等重要程度的编码,即分配单一阈值,必然降低排序扫描的有效性,影响编码的效率。

表 1 各频带小波系数绝对值极大值比较

Tab. 1 Comparison of ultimate coefficients among different subbands

	LL 子带	HL 子带	LH 子带	HH 子带
Lena	1 814	367	260	240
Barbara	1 718	404	357	153

针对 SPIHT 算法对不同子带小波系数统一编码的缺点,改进算法首先按照子带属性将小波系数矩阵分为如图 1 所示的 4 个子块:低频子块 LL(LL₃),水平边缘细节子块 HL(HL₃, HL₂ 和 HL₁),垂直边缘细节子块 LH(LH₃, LH₂ 和 LH₁),对角线边缘细节子块 HH(HH₃, HH₂ 和 HH₁),然后根据各子带的特性使用不同的方法进行量化编码。

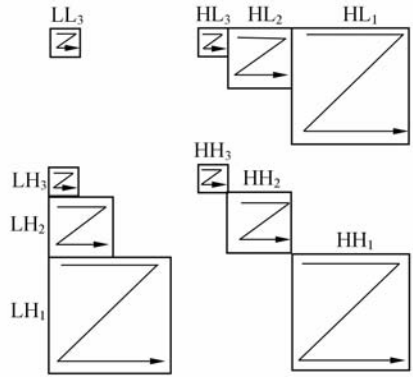


图 1 小波系数分块示意图

Fig. 1 Diagram of wavelet coefficients' block dividing

3.2 低频子带编码方法

图像经小波变换后,其最低频子带能量较高,因而系数值的动态范围较大。因此,为压缩最低频子带小波系数值的动态范围,本文算法首先利用差分脉冲编码调制(DPCM)对最低子带小波系数进行预处理。DPCM 非常适于处理相邻系数相关性强的最低频子带小波系数,且具有原理简单、运算量小、易于硬件快速实现的特点^[12]。为保证算法效率,本文使用 $X=A$ 的最为简单的预测模型。 X, A 分别代表图 2 中相应位置的像素值。 X 是当前所要预测的像素值,当遇到边界情况时,直接设置 $X=0$,并利用一维矩阵保存边界系数值,待 DPCM 预处理后作为单独码流信息输出。

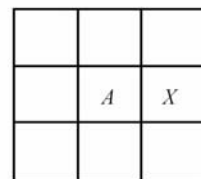


图 2 算法所用 DPCM 预测模型图示

Fig. 2 Diagram of DPCM predictive model in algorithm

利用 DPCM 编码进行预处理,有效压缩了低频子块系数数据的动态范围,如表 2 所示,各经典测试图像中采用 3 级 9/7 提升整数小波变换的 LL₃ 子带经过 DPCM 预处理后,其低频子带初始量化阈值锐减。

表 2 低频子块小波系数初始量化阈值比较

Tab. 2 Comparison of initial thresholds of low frequency coefficients

	原始小波系数	预处理后数据
Lena	1 814	966
Barbara	1 718	712

最低频子带经 DPCM 预处理后,采用如下改进比特位平面编码即可输出对应子块的编码码流。

Step1:初始化

Step1.1:分配一个与低频子块大小相等,单位矩阵元素为 1 bit 大小的二维矩阵 SMMIP,并初始化所有元素的值为 1;

Step1.2:根据系数极值求出初始量化最高比特位 n ;

Step2:遍历 SMMIP;

Step2.1:如果 $SMMIP[i][j]=1$ 且 $S_n(C(i, j))=1$,令 $SMMIP[i][j]=0$,输出一位 1 表示系数重要,并直接输出系数的二进制表示形式及其符号位;

Step2.2:如果 $SMMIP[i][j]=1$ 且 $S_n(C(i, j))=0$,输出一位 0;

Step2.3:如果 $SMMIP[i][j]=0$,不做任何操作;

Step3:量化阈值更新:令 $n=n-1$,如果 $n<0$,算法终止,否则转 Step2 开始新一轮排序。

3.3 高频子块编码方法

由于各高频子块对应初始阈值各不相同,因此,提出的改进算法分别按照不同阈值进行量化编码。针对 SPIHT 算法存在输出码流不够优化、链表操作频繁、内存需求大、不适于硬件实现的不足,本文算法使用如下改进策略对 SPIHT 算法进行了改进。

3.3.1 输出码流优化策略

在 SPIHT 算法中,如果一个 A 类集合为重

要集合,且其直接子节点的集合 $O(i, j)$ 对应的小波系数全部为非重要系数时,需要连续重复输出 4 位 0。即:在已知 $S_n(O(i, j))=0$ 的情况下,仍需对 4 个已知的非重要系数逐个编码,因此,在对 A 类集合的非重要直接节点系数编码时,SPIHT 算法消耗了大量的比特数。

因此,当 A 类集合重要时,本文加入了对直接子节点集合的判断,并根据直接子节点集合的重要性,将其分为如下两类:

S_0 :A 类集合重要,且直接子节点集合为非重要集合,即 $S_n(O(i, j))=0$;

S_1 :A 类集合重要,且直接子节点集合为重要集合,即 $S_n(O(i, j))=1$ 。

对于典型的国际标准测试图像,小波变换后各系数子块分别进行无损 SPIHT 量化编码时, S_0 与 S_1 所占的比例如表 3 所示。

表 3 各测试图像 S_0 与 S_1 所占比例

Tab. 3 S_0 and S_1 proportion in different testing images

	Lena			Barbara			Gold-hill		
	HL	LH	HH	HL	LH	HH	HL	LH	HH
S_0	45.3	44.7	46.8	41.5	42.1	41.3	31.2	31.9	32.6
S_1	54.7	55.3	53.2	58.5	57.9	58.7	69.8	68.1	67.4

在本次改进中,加入了对 A 类集合直接子节点的判断。如果集合重要,且集合属于 S_0 型,输出一位 1 用以表明集合重要,然后直接输出一位 0 用以表明 4 个直接子节点非重要,并将它们加入到 LIP 表中;如果集合重要,且集合属于 S_1 型,输出一位 1 用以表明集合重要,然后输出一位 1 表明集合属于 S_1 型,接着与 SPIHT 算法类似,输出 4 个直接子节点的重要性判断结果,如为非重要系数,则加入到 LIP 表中,如为重要系数,则加入 LSP 表中,并输出系数符号标识。

在改进算法中,虽然加入了一位数据用以判断 A 类重要集合的类型,但当集合属于 S_0 型时,只需 1 位 0 即可标识 4 个子节点的重要性,而在 SPIHT 中,需要输出 4 位 0,因此,算法节约了 3 比特的码流输出;当集合属于 S_1 型,算法较原始 SPIHT 额外输出一位 1,其它码流开销与 SPIHT 的相等。由表 3 知,对于各国际标准测试图像,各子块小波系数均满足 $3S_0>S_1$,因此,改进算法节

约的码流远大于类型判断增加的码流开销,从而使压缩比性能得到提升。

3.3.2 算法的无链表改进与扫描效率提升策略

3 个链表的使用,是制约 SPIHT 算法在实时领域应用和低内存硬件平台上实现的主要瓶颈。为此,本文提出如下无链表改进策略

* LSP 链表的消除

为消除 LSP,在本文算法中,当一个系数重要时,算法直接输该系数的二进制表示。使用这种方式,改进 SPIHT 算法将排序和细化两个过程合并,不需要分配额外的类似 SPIHT 算法中的 LSP 链表来存储重要系数的位置信息,这样既节约了内存消耗也提升了算法的效率。

* LIP 和 LIS 的消除

为了消除 LIP 和 LIS,进一步提高算法的效率和易实现性,引入 2 个固定内存大小的二维状态标识矩阵:非重要系数状态标识矩阵 SMMIP(State Mark Matrix of Insignificant Pix)和非重要集合状态标识矩阵 SMMIS(State Mark Matrix of Insignificant Set)。

SMMIP 和 SMMIS 分别用来取代 LIP 和 LIS,分别以二维矩阵的形式隐含标识非重要系数和非重要集合的位置,因此,在改进算法中,LIP,LIS 的链表遍历分别可用 SMMIP 和 SMMIS 的线性搜索取代。当计算出一个小波系数重要时,只需在 SMMIP 的相应位置设置矩阵元素值为 0 即可;而当初始化或扫描过程中计算出一个小波系数为非重要系数时,仅需将 SMMIP 相应位置的矩阵元素设置为 1 即可;当计算出一个树集合为重要集合时,只需在 SMMIS 的相应位置设置矩阵元素值为 0 即可;而当初始化或计算出一个树集合为非重要集合时,仅需将 SMMIS 相应位置的矩阵元素设置为 1 即可。

通过使用 SMMIP 和 SMMIS,算法有效地避免了内存的动态管理并显著降低了内存大小的需求。对于一幅 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的 8 bit 灰度图像,SPIHT 无损压缩算法需要用 18 bit 存储小波系数的位置信息,LIS,LIP 和 LSP 中最大的链表节点数大致为像素数的 2 倍左右,系统地址空间为 8 bit,则 SPIHT 算法的内存需求量大致为:

$$\frac{(512 \times 512 \times 18 \times 2)}{1024 \times 1024 \times 8} = 1.26 \text{ M}^{[6]}。而在改进$$

SPIHT 算法中,如果假设 MMVS 单位元素为 16 bit,则所需内存需求量仅为:

$$\frac{(512 \times 512 \times 1 + 256 \times 256 \times 1 + 256 \times 256 \times 16)}{1024 \times 8} = 168 \text{ K}。$$

针对 SPIHT 算法重复扫描频繁、效率较低的不足,本文算法引入了集合极值矩阵 MMVS(Matrix for Maximum Value of Set)来存储各零树集合的极大值。MMVS 元素值的初始化不占用算法额外时间开销,可在算法初始化确定初始化扫描阈值时,逐个遍历空间方向树,采用与空间方向树相反的由最高频向最低频的遍历顺序逐层自动填入。因此,在本文算法中,集合的重要性判断可由对应为位置 MMVS 元素值与当前阈值的比较而取代。利用 MMVS,改进算法有效减少了排序阶段的重复判断,极大地提高了算法的效率。

4 实验结果

与双正交 9-7 整数小波变换相比,双正交 5-3 整数小波变换更适合于图像的无损压缩应用,因此,实验选用对称周期延拓方式、分解级数为 3 级的双正交 5-3 整数小波变换。

在算法性能度量方面,选用编码时间(不包含小波变换与熵编码时间)作为算法实时性能的评价依据;选用比特率(不经过熵编码的输出码流)作为压缩性能评价依据。比特率的定义如下:

$$\text{比特率} = \frac{\text{原始图像单位像素表示位数}}{\text{压缩比}}, \text{其}$$

中,压缩比 = $\frac{\text{原始图像大小}}{\text{压缩后图像的大小}}$ 。

提出的改进无损图像压缩算法应用上述配置信息在 Intel Core2 Dou CPU 2.00GB Hz、1.00 Gb内存、Windows XP PC 平台上、Visual C++ 6.0 开发环境下的实验仿真结果如下:

如图 3 所示,各重建测试图像视觉效果良好;如表 4 所示,较之 SPIHT 算法,本文算法对 Lena 图像、Barbara 图像和 Gold-Hill 图像的编码比特率分别降低 0.212 3,0.179 和 0.147 5 bit/pixel,压缩比更高;由表 4 中的编码时间比较知,改进算法对各测试图像的编码速度的较原始 SPIHT 算法均提高 3 倍以上,编码效率更高。



(a) Lena 图像重建效果

(a) Lena image's recover effect



(b) Barbara 图像重建效果

(b) Barbara image's recover effect



(c) Gold-hill 图像重建效果

(c) Gold-hill image's recover effect

图 3 改进无损压缩算法重建效果图示

Fig. 3 Recover effects of proposed algorithm

参考文献:

- [1] PAN H, SIU W C, LAW N F. A fast and low memory image coding algorithm based on lifting wavelet transform and modified SPIHT [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2008, 23 (1):146-161.

表 4 本文算法与 SPIHT 算法的性能比较

Tab. 4 Performance comparison of proposed algorithm and SPIHT

	比特率/(bit · pixel ⁻¹)			编码时间/ms		
	Lena	Barbara	Gold-hill	Lena	Barbara	Gold-hill
本文算法	4.323 1	4.807 6	4.982 7	720	884	1 002
SPIHT	4.535 4	4.986 6	5.130 2	2 304	2 918	3 311

5 结 论

本文提出了一种适于硬件实现的无损图像压缩算法。提出的算法首先根据子带属性将小波系数分为 4 个子块,然后根据各子块的特性分别使用不同的方法进行量化编码。对于低频子块,首先使用 DPCM 预处理降低系数值的动态范围,然后使用改进的比特位平面算法对低频系数编码;对于各高频子块,则采用对应的不同的量化阈值对各子块分别使用提出的改进 SPIHT 算法进行量化编码。在改进 SPIHT 算法中,通过引入 A 类集合的分类,算法优化了码流输出,提高了压缩比性能;通过消除链表,降低了内存需求并避免了内存的动态管理;而通过引入 MMVS,提升了扫描效率,改进了实时性能。实验仿真结果表明,与原始 SPIHT 算法相比,各测试图像的比特率均降低了 0.14 bit/pixel 以上,编码时间均提高 3 倍以上。实验显示本文算法具有压缩比高、实时性好、内存需求低和易于硬件实现的特点。

- [2] JYOTHESWAR J, MAHAPATRA S. Efficient FPGA implementation of DWT and modified SPIHT for lossless image compression [J]. *Journal of Systems Architecture*, 2007, 53 (4): 369 - 378.
- [3] KAVITHA S, MOHAMMED S, ROOMI M, et al.. Lossless compression through segmentation

- on low depth-of-field images [J]. *Digital Signal Processing*, 2009, 19(1):59-65.
- [4] ADAMS M D, KOSENTINI F. Lossless image compression with projection-based and adaptive reversible integer wavelet transforms [J]. *IEEE Trans. Image Process*, 2003, 12(5):489-499.
- [5] SHAPIRO J M. Embedded image coding using zero-trees of wavelet coefficients [J]. *IEEE Trans. Signal Process*, 1993, 41(12):3445-3462.
- [6] SAID A, PEARLMAN W A. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees[J]. *IEEE Trans. Circ. Syst. Video Technol*, 1996, 6(3):243-250.
- [7] TAUBMAN D. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2000, 9(7):1158-1170.
- [8] 郝燕玲, 刘营. 应用于 JPEG2000 的离散小波变换并行超大规模集成结构[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(5):1181-1186.
- HAO Y L, LIU Y. Parallel VLSI architecture of discrete wavelet transform for JPEG2000 [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1181-1186. (in Chinese)
- [9] 郑启东, 刘鹏. 基于线性预测的动态阈值 JPEG2000 码率控制算法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2008, 42(8):1135-1140.
- ZHENG Q Z, LIU P. Dynamic threshold JPEG2000 rate control algorithm based on linear prediction [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, 42(8):1135-1140. (in Chinese)
- [10] 徐勇, 徐智勇, 张启衡, 等. 适于硬件实现的低复杂度图像压缩[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(9):2262-2267.
- XU Y, XU ZH Y, ZHANG Q H, et al... Low complexity image compression scheme for hardware implementation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2262-2267. (in Chinese)
- [11] BRAHIMI T, MELIT A, KHELIFIB F. An improved SPIHT algorithm for lossless image coding [J]. *Digital Signal Processing*, 2009, 19(7):220 - 228.
- [12] 孙蕾, 罗建书, 谷德峰. 基于谱间预测和码流预分配的高光谱图像压缩算法[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(4):752-757.
- SUN L, LUO J SH, GU D F. Hyperspectral image compression algorithm based on prediction between bands and rate pre-allocation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4):752-757. (in Chinese)

作者简介:



王建军(1983—),男,内蒙古呼和浩特人,讲师,博士,2004年于内蒙古科技大学获得学士学位,2007年于中国地质大学(武汉)获得硕士学位,2010年于中国科学院空间科学与应用研究中心获得博士学位,主要从事光电图像处理与编码、航天器综合电子等方面的学习和研究。E-mail: dayu504@126.com

导师简介:



刘波(1957—),男,陕西西安人,研究员,博士生导师,1983年于西安电子科技大学获得学士学位,1986年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得硕士学位,2000年于西北工业大学获得博士学位,现为中国科学院空间科学与应用研究中心副主任,主要从事计算机控制、计算机应用、图像处理与融合等方面的研究。E-mail: boliu@cssar.ac.cn