

文章编号 1004-924X(2007)11-1796-06

# 基于 EBCOT 的平衡多小波航空图像压缩编码

赵秀影<sup>1,2</sup>, 商玉凤<sup>2</sup>, 翟林培<sup>1</sup>, 傅德友<sup>2</sup>, 刘红<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 空军航空大学, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 鉴于预滤波有可能造成多小波的正交性、对称性的“丢失”及基函数支撑的增加, 提出了多小波“平衡”算法, 使得多小波基有与单小波基相同的性质。充分利用平衡多小波分解系数的结构, 采用 EBCOT 图像编码算法, 对平衡多小波系数进行压缩处理。当压缩比为 32 时, 峰值信号比为 31.3427。实验结果表明: 基于 EBCOT 的平衡多小波算法同时具有图像压缩所需要的正交性、对称性、短支撑和较大的消失矩等多个良好特性, 是一种比较有效的航空图像压缩方法。

**关键词:** 平衡多小波; EBCOT; 航空图像; 图像压缩

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A

## Balanced multiwavelet aviation image compression coding based on EBCOT

ZHAO Xiu-ying<sup>1,2</sup>, SHANG Yu-feng<sup>2</sup>, ZHAI Lin-pei<sup>1</sup>, FU De-you<sup>2</sup>, LIU Hong<sup>1,2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China*)

**Abstract:** Since pre-filter is more likely to cause the orthogonality and symmetry "losses" of multiwavelet, and to cause the increase of the compact support of the base function, a multiwavelet "balanced" algorithm is proposed to make multiwavelets have the same properties with single wavelets. Taking full advantages of the structures of balanced multiwavelet decomposition coefficients, the Embedded Block Coding with Optimal Truncation (EBCOT) image coding algorithm is used to compress the coefficients of balanced multiwavelet. When the compressed ratio reaches 32, the PSNR is 31.3427. The experimental results show that the balanced multiwavelet algorithm based on EBCOT has many good characteristics, such as orthogonality, short support, high vanishing moments, etc., which is a more effective method for aviation image compression.

**Key words:** balanced multiwavelet; EBCOT; aviation image; image compression

## 1 引言

局部化性能, 有效地克服了傅立叶变换在处理非平稳的复杂信号时所存在的局限性<sup>[1-6]</sup>。随着小波理论研究的不断深入, 基于小波的图像压缩应用也取得了许多成果, 其中部分算法已经融入到

在图像压缩领域, 小波变换以其良好的时-频

JPEG2000 的压缩标准中。同时,随着应用领域的扩深,更多的小波基被设计出来,其中多小波就是小波理论发展的成果之一<sup>[7-10]</sup>。

多小波之所以受到世人瞩目,主要原因是它既保持了单小波的诸多优点,又克服了单小波的缺陷,在实际应用中可以把十分重要的光滑性、正交性、对称性、紧支性等完美地结合在一起<sup>[11-13]</sup>。众所周知,在图像处理应用中,正交性能保持能量;对称性(线性相位)既适合于人眼的视觉系统,又使信号在边界易于处理;紧支撑的小波对应的滤波器是有限脉冲响应(FIR)的滤波器,使得相应的快速小波变换的和是有限的。小波的光滑性在数据压缩中也起着重要作用,如一幅图像,如果用作小波变换的小波不是光滑的,则小波变换所带来的误差很容易从视觉中检查出来<sup>[14]</sup>。这就意味着多小波不但可以对信号提供一种更新的分析手段,而且对信号的逼近性质更好,重构信号在边界位置的性能也将更完善。理论上,多小波比单小波更具吸引力,但在实际应用中却不尽然。文献<sup>[15]</sup>中发现,为了对离散多小波变换有一个合理的分解,有必要进行预滤波。尽管预滤波能减缓多小波应用中的某些问题,但有如下理由认为设计时还是避免预滤波为好<sup>[16-17]</sup>:(1)若预滤波步骤不构成一个正交变换,则多小波的正交性将“丢失”。(2)如果预滤波不是对称的,则多小波的对称性将“丢失”。(3)如果预滤波有多个非零系数,则使用预滤波有效地增加了基函数的支撑。所以,实际设计工作中还是积极设计具有与单小波基相同性质的多小波基<sup>[18-20]</sup>,以避免预滤波。Lebrun 和 Vetterli 提出了这样的多小波,并将之命名为“平衡”多小波。

本文将充分利用平衡多小波的分解系数的结构,采用 EBCOT 图像压缩算法,对多小波系数进行压缩处理,得到一种比较有效的多小波航空图像压缩方法。

## 2 平衡多小波的理论

单小波与一个尺度函数相联系,而多小波有多个相应的尺度函数,这些尺度函数可以用一个向量  $\boldsymbol{\varphi}(x) \equiv [\varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots, \varphi_r(x)]^T$  表示,把  $\boldsymbol{\varphi}(x)$  称为多尺度函数。类似地可以定义多小波函数  $\boldsymbol{\psi}(x) \equiv [\psi_1(x), \psi_2(x), \dots, \psi_r(x)]^T$ ,他

们可以用重数为  $r$  的多尺度分析产生。当  $r = 1$  时为通常的小波,即单小波。多小波的研究主要集中在  $r=2$  的情形。对多小波也有双尺度方程:

$$\boldsymbol{\varphi}(x) = \sum_k \mathbf{P}_k \boldsymbol{\varphi}(2x - k), \quad (1)$$

其中  $\mathbf{P}_k$  是  $r$  阶矩阵。多小波  $\boldsymbol{\psi}$  可以用多尺度函数表示为:

$$\boldsymbol{\psi}(x) = \sum_k \mathbf{Q}_k \boldsymbol{\varphi}(2x - k), \quad (2)$$

其中  $\mathbf{Q}_k$  也是  $r$  阶矩阵。

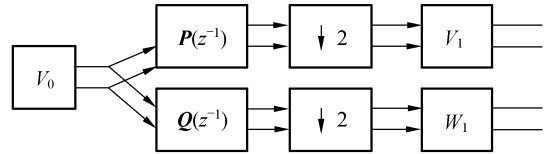


图 1  $r=2$  的多小波分解示意图

Fig. 1 Multiwavelet decomposition filter bank for  $r=2$

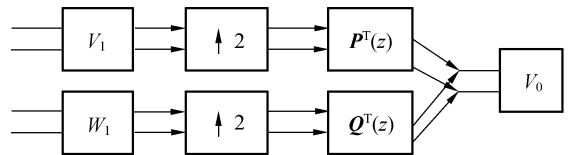


图 2  $r=2$  的多小波重构示意图

Fig. 2 Multiwavelet reconstruction filter bank for  $r=2$

设  $x(t)$  为给定信号,  $x(t) \in V_0$  则  $x(t) = \sum \mathbf{v}_{0,k}^T \boldsymbol{\varphi}(t-k)$  有快速分解(结构如图 1)算法:

$$\mathbf{v}_{j,k} = \sum_m \mathbf{P}_{m-2k} \mathbf{v}_{j-1,m}, \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{j,k} = \sum_m \mathbf{Q}_{m-2k} \mathbf{v}_{j-1,m}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, N$$

及重建(结构如图 2)算法:

$$\mathbf{v}_{j-1,k} = \sum_m (\mathbf{P}_{k-2m}^T \mathbf{v}_{j,m} + \mathbf{Q}_{k-2m}^T \boldsymbol{\omega}_{j,m}), \quad j = N, N-1, \dots, 1. \quad (4)$$

称一个正交多小波系统是  $p$  阶平衡的当且仅当低通合成算子  $\mathbf{L}$  和高通合成算子  $\mathbf{H}$ :

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \cdots & P_0 & P_1 & P_2 & P_3 & 0 & 0 \\ \cdots & 0 & 0 & P_0 & P_1 & P_2 & P_3 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \cdots & Q_0 & Q_1 & Q_2 & Q_3 & 0 & 0 \\ \cdots & 0 & 0 & Q_0 & Q_1 & Q_2 & Q_3 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix}.$$

保持  $\mathbf{u} = [\dots, (-2)^n, (-1)^n, 0, 1^n, 2^n, \dots]^T$ , 其中  $n=0, \dots, p-1$ , 即:

$$\mathbf{L}^T \mathbf{u} = 2^{-n} \mathbf{u}, \quad n=0, \dots, p-1. \quad (5)$$

类似于前面的情形,由(5)可以得到  $\mathbf{L}\mathbf{u} = 2^n \mathbf{u}$  和  $\mathbf{H}\mathbf{u} = 0, n=0, \dots, p-1$ 。这说明低通支流系数可使信号的多项式达到  $p-1$  阶。

### 2.1 多小波平衡算法

由上述条件可以推出当  $n=0, r=2$  时下列命题是等价的:

- (1)  $\mathbf{L}^T \mathbf{u} = \mathbf{u}$ ;
- (2)  $[1, 1]$  是特征值为 1 的  $\mathbf{P}_1$  的左特征向量;
- (3)  $\hat{\phi}(0) = [1, 1]^T$

因此要构造平衡正交滤波器,关键是使  $\mathbf{u} = [1, 1]$  成为特征值为  $\mathbf{P}_1$  的左特征向量。要由  $\mathbf{P}_k$  构造出低通平衡滤波器,必须找到一个酉矩阵  $\mathbf{R}$ , 使其满足

$$[1, 1] \mathbf{R}^T \mathbf{P}_1 \mathbf{R} = [1, 1]. \quad (6)$$

通过  $\mathbf{P}^b(\omega) = \mathbf{R}^T \mathbf{P}(\omega) \mathbf{R}$  可构造相应的低通平衡滤波器,相应的尺度方程为

$$\hat{\phi}(\omega) = \mathbf{P}^b\left(\frac{\omega}{2}\right) \hat{\phi}^b\left(\frac{\omega}{2}\right). \quad (7)$$

构造平衡滤波器因采用正交变换,  $\mathbf{P}^b(\omega)$  将保持  $\mathbf{P}(\omega)$  的大部分性质,平衡处理方式还保持了滤波器组的正交性,尽管失去了尺度函数的对称性,但通过构造相应的高通平衡滤波器  $\mathbf{Q}^b(\omega) = \mathbf{R}^T \mathbf{Q}(\omega) \mathbf{R}$ , 能保持小波函数的对称/反对称性。

很显然,  $\mathbf{R}$  满足  $\mathbf{R}\mathbf{R}^T = \mathbf{I}$ , 对称/反对称正交平衡滤波器组可得到  $\mathbf{P}_k^b = \mathbf{R}\mathbf{P}_k \mathbf{R}^T, \mathbf{Q}_k^b = \mathbf{R}\mathbf{Q}_k \mathbf{R}^T$ 。

使用平衡正交多小波,只须把原信号分为偶数项和奇数项,然后合并构成初始向量,就可以进行多小波变换,无需做复杂的预处理。

### 2.2 当 $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 时的两个平衡多小波

(1) CL 平衡多重小波:

$$\mathbf{P}_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{\sqrt{7}}{2\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{\sqrt{7}}{2\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_2 = \begin{pmatrix} \frac{3}{2\sqrt{2}} & \frac{1}{2\sqrt{2}} \\ \frac{1}{2\sqrt{2}} & \frac{3}{2\sqrt{2}} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{P}_3 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{2+\sqrt{7}}{2\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{2-\sqrt{7}}{2\sqrt{2}} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_1 = \begin{pmatrix} \frac{3}{2\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{1}{2\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Q}_2 = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{7}-2}{2\sqrt{2}} & \frac{-2-\sqrt{7}}{2\sqrt{2}} \\ \frac{-2-\sqrt{7}}{2\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{7}-2}{2\sqrt{2}} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_3 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{3}{2\sqrt{2}} \end{pmatrix}.$$

(2) GHM 平衡多重小波:

$$\mathbf{P}_1 = \begin{pmatrix} \frac{3\sqrt{2}-15}{20} & \frac{9\sqrt{2}+17}{20} \\ \frac{9\sqrt{2}-17}{20} & \frac{3\sqrt{2}+15}{20} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{P}_2 = \begin{pmatrix} \frac{16\sqrt{2}-9}{20} & \frac{-4\sqrt{2}-9}{20} \\ \frac{-4\sqrt{2}+9}{20} & \frac{16\sqrt{2}+9}{20} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{P}_3 = \begin{pmatrix} \frac{-9-3\sqrt{2}}{20} & \frac{-9+3\sqrt{2}}{20} \\ \frac{9+3\sqrt{2}}{20} & \frac{9-3\sqrt{2}}{20} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{P}_4 = \begin{pmatrix} \frac{1}{20} & \frac{1}{20} \\ \frac{-1}{20} & \frac{-1}{20} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{Q}_1 = \begin{pmatrix} \frac{2\sqrt{2}+5}{20} & \frac{-4\sqrt{2}-7}{20} \\ \frac{4\sqrt{2}-7}{20} & \frac{-2\sqrt{2}+5}{20} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_2 = \begin{pmatrix} \frac{19\sqrt{2}+9}{20} & \frac{-\sqrt{2}+9}{20} \\ \frac{\sqrt{2}+9}{20} & \frac{-19\sqrt{2}+9}{20} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_3 = \begin{pmatrix} \frac{-6\sqrt{2}+3}{20} & \frac{-12\sqrt{2}+15}{20} \\ \frac{12\sqrt{2}+15}{20} & \frac{6\sqrt{2}+3}{20} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_4 = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}-1}{20} & \frac{\sqrt{2}-1}{20} \\ \frac{-\sqrt{2}-1}{20} & \frac{-\sqrt{2}-1}{20} \end{pmatrix}.$$

## 3 EBCOT 编码

Embedded Block Coding with Optimal Truncation(EBCOT)编码方法主要由 Taubman 与 Marcellin 等人于 1999 年提出,与 Embedded Zero-tree Wavelet(EZW), Set Partitioning in Hierarchical Trees(SPIHT)等编码方法类似的是它

也是采用小波进行子带采样,然后对小波系数进行量化和编码,不同的是它对每一个图像片进行独立的编解码操作。

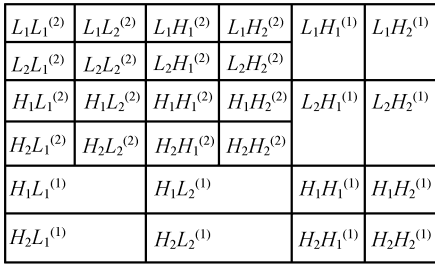


图 3 2 级多小波分解示意图

Fig. 3 2-level multiwavelet decomposition subband structure

EBCOT 的独立码块编码与 SPIHT 和 EZW

编码不同的是它不能利用一个子带内的不同块之间或者不同子带之间的相关性<sup>[10-12]</sup>,而是利用子带内部编码块各个位平面或片段化位平面之间的相关性进行压缩编码,这种没有利用子带间相关性的较简单的方法通常能够获取很高的压缩效率。在多小波变换域(如图 3),使用 EBCOT 对每一个图像片进行独立的编解码处理,并使用编码块 CodeBlock,在编码过程中采用压缩后率失真优化(PCRD-opt)算法产生码流。用它进行图像编码不仅能够实现对图像的有效压缩,避免使用 SPIHT 与 EZW 所进行的系数重排产生零树的计算复杂性,而且产生的码流具有分辨率的可伸缩性、随机访问和处理等。基于多小波和 EBCOT 压缩编码的算法流程如图 4。

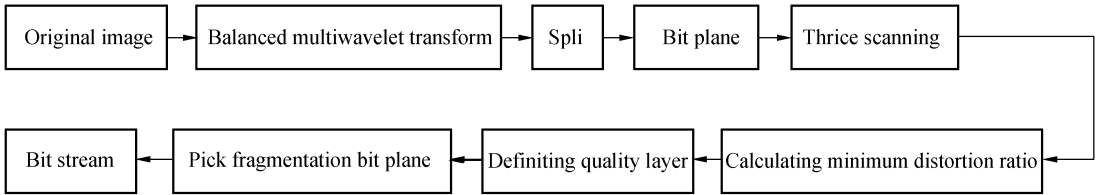


图 4 多小波变换域 EBCOT 编码流程图

Fig. 4 Flow chart of EBCOT code in multiwavelet domain

### 4 实验结果

$PSNR = 10 \lg(255^2 / MSE)$ , 单位 dB, MSE 为均方误差,对 camera 图像进行压缩如图 5,结果见表 1。

同样的方法对航空图像进行压缩和解压缩,当压缩比为 32 时,主观效果如图 6 所示。

表 1 PSNR 的对照

Tab. 1 Contrast of PSNR

Compression ratio	16	32	64
PSNR (CL Balanced multi-wavelet)	40.519 6	31.342 7	25.226 1
PSNR (GHM Balanced multiwavelet)	34.442 5	21.712 1	14.287 0
PSNR (9/7 in JPEG2000)	25.817 1	25.505 0	24.475 1

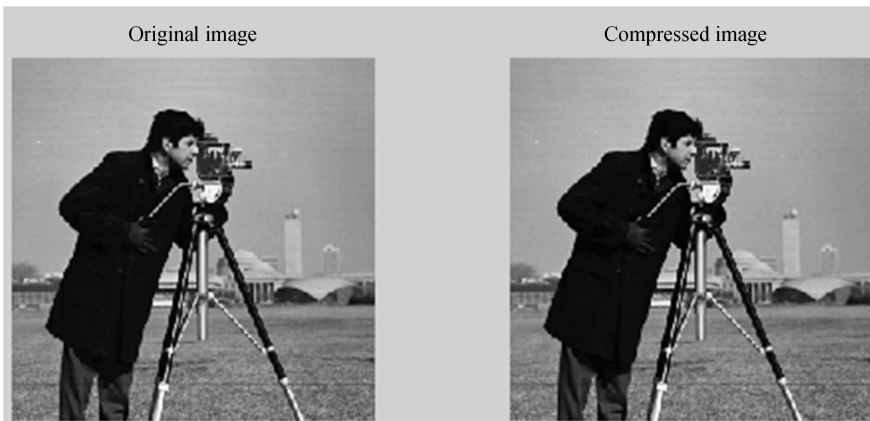


图 5 CL 平衡多小波压缩 32 倍图像与原图像

Fig. 5 Compressed image of 32 times by CL balanced multiwavelet and its original image

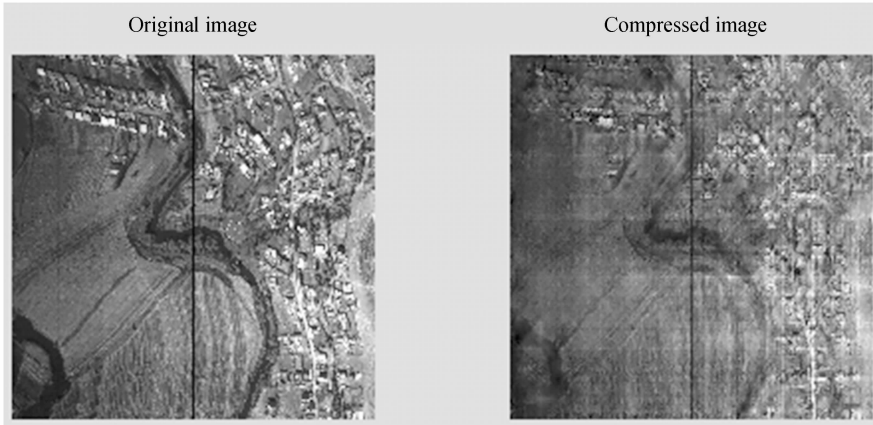


图 6 CL 平衡多小波压缩 32 倍的航空图像与原图像

Fig. 6 Compressed aviation image of 32 times by CL balanced multiwavelet and its original image

## 5 结 论

从表 1 中可以看出在压缩比不高时平衡多小波要优于 JPEG2000, 尤其是 CL 平衡多小波。与传统小波相比, CL 平衡多小波具有更为优良的属性: CL 平衡多小波的尺度函数和小波函数均具有紧支撑特性, 使其具有良好的局域性; 尺度

函数分别与小波函数对称和反对称, 保证其具有线性相位; 正交性使其变换后能保持能量恒定等。对其进行平衡处理后不仅可使两个低通滤波器和两个高通滤波器的响应分别重合, 还可较好地改善系统本身的低通、高通滤波器的响应性能。从一定的角度来说, 基于 EBCOT 的平衡多小波压缩编码方法是一种比较有效的压缩方法。

## 参考文献:

- [1] LIAN J A, CHARLES K C. Analysis-ready multiwavelets (armllets) for processing scalar-valued signals [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, 11(2): 205-208.
- [2] JIANG Q T. Orthogonal multiwavelets with optimum time-frequency resolution [J]. *IEEE Trans. on Signal Proc.*, 1998, 11(46): 830-844.
- [3] KIM J H, KIM H J, KWON K R. Multiwavelet image watermarking using perceptually tuned model [J]. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2006, 6(12): 75-78.
- [4] 赵秀影, 翟林培, 魏静元, 等. 整数双正交小波图像压缩及其 DSP 实现 [J]. *红外技术*, 2005, 27(6): 458-462.  
ZHAO X Y, ZHAI L P, WEI J Y, *et al.*. Integer biorthogonal wavelet transform on image compression [J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(6): 458-462. (in Chinese)
- [5] XIA X G, GERONIMO J S, HARDIN D P, *et al.*. Design of prefilters for discrete multiwavelet transforms [J]. *IEEE*, 1996, 44: 25-35.
- [6] LEBRUN J, VETTERLI M. Balanced multiwavelets theory and design [J]. *IEEE*, 1998, 46: 1119-1124.
- [7] LEBRUN J, VETTERLI M. Balanced multiwavelets [C]. *IEEE*, 1997, 3: 2473-2476.
- [8] LEBRUN J, VETTERLI M. High-order balanced multiwavelets: theory, factorization and design [J]. *IEEE*, 2001, 49(9): 1918-1929.
- [9] LIAN J A, CHUI CH K. Balanced multiwavelets with short filters [J]. *IEEE*, 2004, 11(2): 75-78.
- [10] STRELA V, HELLER P N, STRANG G, *et al.*. The application of multiwavelet filter banks to image processing [J]. *IEEE*, 1999, 8: 548-563.

- [11] 郝志成,朱明. 智能目标检测与跟踪系统的设计与实现[J]. 光电工程, 2007,34(1): 27-31.  
HAO ZH CH,ZHU M. Design and implementation of target intelligent detecting and tracking [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007,34(1):27-31. (in Chinese)
- [12] 郭强生,靳卫国,周庆亚. 集成电路粘片机视觉检测技术研究[J]. 电子工业专用设备, 2005, 34(7):34-40.  
GUO Q SH, JIN W G, ZHOU Q Y. Vision inspection technology of IC die bonder [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2005, 34(7):34-40. (in Chinese)
- [13] 张雷,黄廉卿,赵唯佳. 一种超光谱图像分层压缩方法[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 478-484.  
ZHANG L ,HUANG L Q , ZHAO W J. A multilayered decomposition of hyperspectral image compression[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 478-484. (in Chinese)
- [14] 张雷,杨润魁,黄廉卿. 数字 X 光医学影像压缩技术[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6): 632-637.  
ZHANG L ,YANG R K ,HUANG L Q. Computed X radiography image compression[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(6): 632-637. (in Chinese)
- [15] 同武勤,凌永顺,黄超超,等. 数学形态学和小波变换的红外图像处理方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 138-144.  
TONG W Q, LING Y SH, HUANG CH CH, *et al.*. Processing method of IR image based on mathematical morphology and wavelet transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 138-144. (in Chinese)
- [16] 蔡昌金,朱明. 基于 DSP 的自动调焦系统[J]. 电子器件, 2007, 30(1):297-299.  
CAI CH J , ZHU M. Auto focusing system based on DSP[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2007, 30(1): 297-299. (in Chinese)
- [17] 吴晓波,安问斗,杨钢. 图像测量系统中的误差分析即提高测量精度的途径[J]. 光学精密工程, 1997, 5(1):133-141.  
WU X B, AN W D, YANG G. Error analysing and approaches of improving measuring precision in image measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(1): 133-141. (in Chinese)
- [18] 邓家先. 基于重要系数提升的遥感图像压缩[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5):910-916.  
DENG J X. A remote-sensing image coding algorithm based on significant coefficients lifting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):910-916. (in Chinese)
- [19] ZHAO X Y, ZHAI L P. Wavelet packet and neural network based medical image compression [J]. *SPIE*, 2005, 6047: 60471O-1- 60471O-8.
- [20] ZHAO X Y, ZHAI L P. Wavelet-fractal based compression of ophthalmic image [J]. *SPIE*, 2005, 6027: 60271C-1-60271C-8.

**作者简介:**赵秀影(1972—),女,辽宁铁岭人,空军航空大学讲师,博士后,主要从事机械电子与信息处理的研究工作;E-mail: yingzi9906@yahoo.com.cn

翟林培(1945—),男,吉林长春人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,主要从事机械电子与信息处理的研究工作。E-mail: zxy923101@yahoo.com.cn