

文章编号 1004-924X(2024)20-3112-15

面向引信天线罩形变图像的图像压缩算法

张浩洋¹, 王 凡^{1*}, 邵森木², 田 会¹, 陈 瑞¹

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021;

2. 西安机电信息技术研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:为了实现在弹载遥测电台低带宽的条件下引信天线罩形变图像的传输,提出了一种压缩图像质量高且算法复杂度低、易于硬件实现的图像压缩算法。该算法采用空间数据系统咨询委员会(CCSDS)推荐的9/7M小波基对图像进行四级分解,减少图像数据冗余。根据图像特点改进传统的权重分配策略,减少失真信息,确保重构图像的质量。采取并行像素扫描方式,显著缩减多级树集合分裂编码(SPIHT)中多级树结构划分的时间开销。此外,针对图像本身特征引入改进型游程编码(RLE)算法,优化图像数据分类方式,在不损失图像质量的前提下,提高了整体压缩倍率。试验结果表明:与SPIHT及CCSDS标准相比,本算法在结构相似性指数(SSIM)和峰值信噪比(PSNR)方面分别实现了6.92%, 16.45%和11.12%, 22.56%的增长,而压缩时间相比SPIHT仅增加0.06 s,算法复杂度增幅较小。与主流图像压缩算法相比,在相同的压缩倍率下,本算法在压缩引信天线罩形变图像时,压缩图像质量与JPEG2000算法相近,但压缩时间节省高达35.35%。综上所述,该算法具有复杂度低的特性,其压缩性能可满足弹载系统压缩需求,解压缩图像质量达到主流算法水平。

关键词:图像压缩;引信天线罩形变图像;多级树集合分裂编码;游程编码;低带宽传输

中图分类号:TP391;TN911.73 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243220.3112

Image compression algorithm for fuze radome deformation images

ZHANG Haoyang¹, WANG Fan^{1*}, SHAO Senmu², TIAN Hui¹, CHEN Rui¹

(1. School of Opto-electronical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Xi'an Institute of Electromechanical Information Technology, Xi'an 710065, China)

* Corresponding author, E-mail: wangfan@xatu.edu.cn

Abstract: To realize the transmission of fuze radome deformation images under low bandwidth condition of the missile-borne telemetry radio, an image compression algorithm with high-quality compressed images, low algorithmic complexity and easy to implement in hardware was proposed. The 9/7M wavelet basis recommended by the Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) was used to decompose the image at four levels, thereby reducing data redundancy. The traditional weight allocation strategy was improved according to the image characteristics to reduce the distortion information, ensuring the quality of the reconstructed image. A parallel pixel scanning approach was adopted, which significantly reduced the time associated with the multi-resolution tree-structured partitioning in Set Partitioning In Hierarchical Trees (SPIHT). Furthermore, for the specific features of the images, an enhanced Run-Length Encoding (RLE) algorithm was introduced, the image data classification method was optimized, achieving

收稿日期:2024-05-21;修订日期:2024-08-14.

基金项目:陕西省自然科学基金(No. 2023-JC-QN-0679);陕西省教育厅重点科研计划项目(No. 22JY027)

increased overall compression ratios without compromising image quality. Experimental results show that in comparison with SPIHT and CCSDS standards, the proposed algorithm achieves 6.92%, 16.45% and 11.12%, 22.56% increases in Structural Similarity Index (SSIM) and Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), respectively, while the compression time increases by only 0.06 s compared with SPIHT, and the increase in algorithmic complexity is not much. Compared with the mainstream image compression algorithms, under the same compression multiplier, this algorithm compresses the fuze radome deformation images with similar compressed image quality as the JPEG2000 algorithm, but the compression time saving is up to 35.35%. In summary, the algorithm has the characteristics of low complexity, its compression performance can meet the compression requirements of the ballistic system, and the decompression image quality reaches the level of mainstream algorithms.

Key words: image compression; fuze radome deformation images; Set Partitioning in Hierarchical Trees (SPIHT); Run-Length Encoding (RLE); low-bandwidth transmission

1 引 言

火箭弹高速飞行时,其弹头部分的引信天线罩首先与空气接触摩擦,导致其迅速升温 and 烧蚀,从而引发热透波效应,进而致使聚四氟乙烯圆锥形罩体外表变形,挤压内部通信装置空间,直接干扰无线电引信的电磁性能,影响信号传输稳定性。因此,亟需动态监测火箭弹飞行中引信天线罩形变情况,以测量出天线罩飞行过程中产生的形变量^[1-3]。

目前所采用的形变量测量方法为非接触式测量。将图像采集设备置于引信天线罩内,在火箭弹飞行过程中,持续采集内部图像,并经弹载遥测电台即时传输至地面站^[1]。利用专用形变分析算法分析形变图像,测算出形变量。但弹载遥测电台传输带宽小,而图像采集设备每秒采集的数据量大,要在低带宽的条件下,稳定高速的传输图像数据,则必须对图像数据做压缩处理。此外,考虑到火箭弹电气设备总功率有限,部署的图像压缩算法需在有限的硬件资源下实现最优的压缩效率和压缩质量,对算法的复杂度提出了要求。

目前常见的图像压缩标准有 JPEG2000 (Joint Photographic Experts Group 2000), SPIHT (Set Partitioning in Hierarchical Trees), CCSDS (Consultative Committee for Space Data System) 和 RLE (Run Length Encoding)^[4]。其中, JPEG2000 作为 JPEG 的改进型算法抛弃了离散余弦变换 (Discrete Cosine Transform, DCT), 采

用小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT) 分解图像,将图像主要信息集中在低频系数上,缩短了码流长度的同时提升了图像质量^[5-6]。在编码量化环节,采用了性能极高的优化截断嵌入式块编码 (Embedded Block Coding with Optimized Truncation, EBCOT), 但算法复杂度很高,编解码速度较慢^[7-8]。此外,对不同类型的图像需要调整小波系数量化表以提高压缩效率和图像质量^[9]。SPIHT 作为嵌入式零树小波编码 (Embedded Zerotree Wavelets, EZW) 的改进算法,采用空间方向树结构和三个链表来组织数据,代替了 EZW 的零树结构。并且在编码时不需要遍历每个系数的所有后代,提升了编码效率与压缩性能^[10-11]。SPIHT 在编码时,不需要对数据做复杂的排序和构建上下文模型,使得算法复杂度远低于 JPEG2000 的同时,性能差距不大^[12]。但该算法对噪声信息较为敏感,当图像包含较多噪声时,对解码后图像的质量影响较大。CCSDS 算法是一种用于星载图像压缩的标准,通过 5/3M 或 9/7M 小波变换分解图像,并对分解的小波子带加权,最终经过 RICE 编码形成压缩码流,由于用于星载设备,算法复杂度很低,所以压缩性能与 SPIHT 和 JPEG2000 存在一定差距^[13-17]。RLE 游程编码是一种简单的数据压缩技术,通过将连续重复的数据存储为单个数据值和它们的计数值来实现数据压缩,是一种简单易用的无损压缩算法,但压缩倍率的大小完全取决于压缩对象连续重复数据的多少,不适用于大量连续随机数据^[18-21]。总而言之,针对引

信天线罩形变图像压缩问题,目前主流算法存在以下问题:JPEG2000算法性能优越但算法复杂度高,硬件部署困难;SPIHT与CCSDS算法在高压比情况下,图像质量较差;RLE对图像的压缩幅度有限。

综上所述,本文面向动态测量引信天线罩形变任务的图像压缩需求,提出一种压缩图像质量高且计算复杂度低、易于硬件实现的图像压缩算法。该算法基于多级DWT小波变换分解天线罩内部形变图像,并对各级小波子带做权重提升,减少噪声信息,对SPIHT算法引入并行像素扫描方式,提高编码效率,并优化RLE编码规则,进一步提升算法压缩倍率。

2 基于图像遥测的形变测试原理

为获取火箭弹高速飞行过程中引信天线罩的形变量,根据其实际工作环境,采用CMOS图像传感器直接采集引信天线罩的形变信息,并借助无线遥测装置将形变图像实时传输至地面,以便做后端形变误差分析,实现对形变误差的非接触式测量。该测试方法可在高、低温、高过载、强震动等恶劣的弹载使用条件下达到2 mm的测试精度。测试系统框图如图1所示,包括光学镜头、图像传感器、照明光源、无线遥测装置、RS422通信串口、FPGA控制芯片、高速存储芯片与电源芯片。

图2为实际采集的天线罩内部图像,内部预先等间距刻划多条同心圆环作为形变测量基准。在飞行过程中,引信天线罩罩体受外力作用发生形变,上述形变会直接传递至天线罩内部,使得同心圆环刻线发生形变。通过板载光源照明天线罩内部圆环刻线,相机与FPGA主控芯片配合实时采集天线罩内部圆环图像并存储部分图像数据于高速存储芯片中,经过图像压缩算法压缩,输出压缩码流,通过RS422通信串口传输码流给弹载遥测电台,地面站接收图像压缩数据码流后解码,利用专用分析算法对圆环图像进行计算,最终计算出天线罩的形变量与形变位置。

图2(a)中,R1圆环表示内壁某个方向上蚀化严重,预制圆某个区域发生严重变形的图像;R2圆环表示内壁受热膨胀后预制圆轮廓发生外

扩,采集到的圆直径变大的图像;R3圆环表示内壁发生蚀化现象,预制圆变粗的图像;R4圆环表示内壁发生非圆周变形,预制圆某个方向变形相对严重的图像。图2(b)中,在R5,R6,R7三个半径的圆环上粘贴了不同尺寸的专用形变测试块来模拟天线罩发生不同程度形变后内部的变形情况。通过分析形变圆环图像的角点、偏移量、位置等参数可以计算出天线罩的形变量。

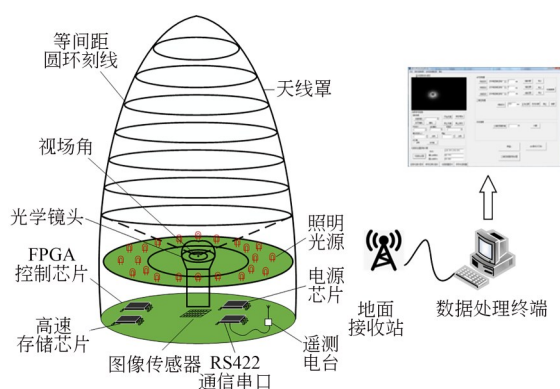
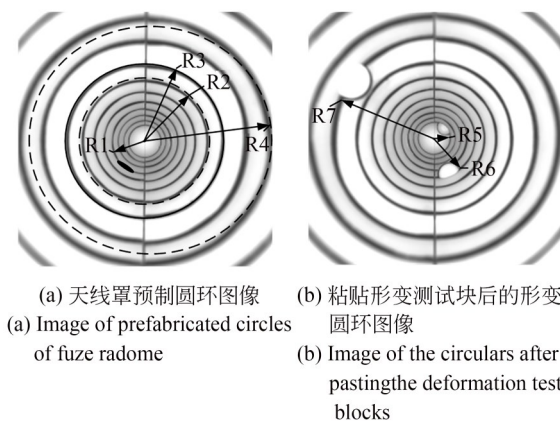


图1 测试系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of the test system



(a) 天线罩预制圆环图像
(b) 粘贴形变测试块后的形变圆环图像

图2 天线罩内部图像

Fig. 2 Interior image of fuze radome

由于形变量是依赖于对比初始圆环与形变圆环的轮廓变化得到的,则轮廓越清晰整体的检测精度就越高,但相应的图像数据量也会更大。而遥测电台的通信带宽仅有2 Mb/s,但每幅灰度图像的分辨率为1 024×1 024,其数据量为8 Mb,帧率为2 FPS。为确保传输通畅,图像的压缩倍率应不低于8。

3 基于多级树分裂编码与游程编码的图像压缩算法

图3为本文图像压缩算法的整体流程框图,分为压缩编码和解压重构两个环节,包括以下四个步骤:(1)对图像数据做四级二维小波变换,本文所使用的小波基函数为CCSDS 122.0-B-1标准推荐的9/7M整数小波,该小波基函数相比于JPEG2000标准使用的Daubechies9/7浮点小波基,计算公式简单,计算量小;(2)经过9/7M小波变换后,各个小波子带系数的增益不均匀。为了

改善解压缩图像的整体质量,可根据不同像素子带包含的图像信息特点,赋予相应的权重,减少噪声信息,获得更优的图像质量;(3)对赋予权重后的各级小波子带系数做SPIHT编码,以减少图像数据量,获取图像压缩码流。SPIHT编码相比CCSDS标准的RICE编码,在相同图像质量的前提下可以提供更高的压缩倍率,且无需JPEG2000标准EBCOT编码的反馈操作,便于降低整体算法复杂度;(4)结合图像特点,对经过SPIHT编码的图像压缩码流再进行RLE编码,最终输出图像压缩码流。下面对每一个步骤进行详细介绍。

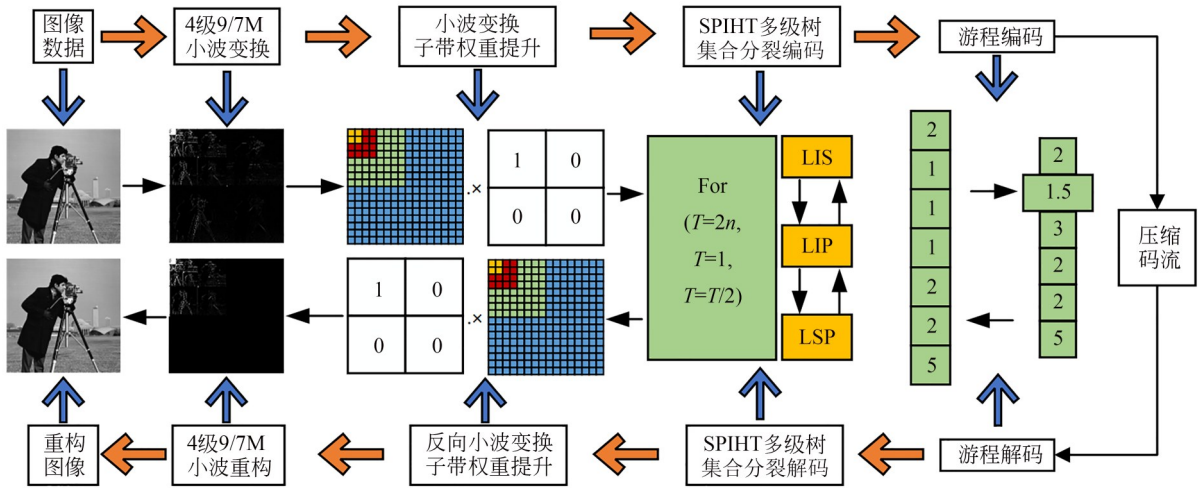


图3 本文图像压缩算法整体流程框图

Fig. 3 Overall flowchart of image compression algorithm in this paper

3.1 9/7M整数小波变换

本算法采用了CCSDS标准推荐的9/7M整数小波基,对图像进行四级小波变换^[22]。

该小波变换包含高通 $g(z^{-1})$ 与低通 $h(z^{-1})$ 两个滤波器,其正变换计算公式见式(1)和式(2):

$$\begin{cases} D_0 = X_1 - \left[\frac{9}{16}(X_0 + X_2) - \frac{1}{16}(X_0 + X_2) + \frac{1}{2} \right] \\ D_p = X_{2p+1} - \left[\frac{9}{16}(X_{2p} + X_{2p+2}) - \frac{1}{16}(X_{2p-2} + X_{2p+4}) + \frac{1}{2} \right], \quad p = 1, 2, \dots, N-3 \\ D_{N-2} = X_{2N-3} - \left[\frac{9}{16}(X_{2N-4} + X_{2N-2}) - \frac{1}{16}(X_{2N-6} + X_{2N-2}) + \frac{1}{2} \right] \\ D_{N-1} = X_{2N-1} - \left[\frac{9}{8}X_{2N-2} - \frac{1}{8}X_{2N-4} + \frac{1}{2} \right] \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_0 = X_0 - \left[-\frac{D_0}{2} + \frac{1}{2} \right] \\ C_p = X_{2p} - \left[-\frac{D_{p-1} + D_p}{4} + \frac{1}{2} \right], \quad p = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases}, \quad (2)$$

其中: N 为像素总数, p 为当前变换像素,将正

变换公式输入输出对调即为反变换公式。该

小波变换的尺度为 2^a , a 为小波分解级数, 每一级分解都有其对应的小波变换尺度。原始二维图像信号 X_i 经过水平方向的低通与高通滤波器滤波后, 图像灰度信息被分解为水平方向上的低频小波系数 C 与高频小波系数 D , 分别对应 L 与 H 两个小波系数子带。对于数字图像等二维信号, 则需要在竖直方向上再做一次小波变换, 从而可以得到四个小波系数子带: LL, LH, HL, HH 。图 4 为 9/7M 二维小波分解

滤波器结构。

本算法对一次小波变换后的 LL 子带再重复进行三次小波变换, 共得到 13 个小波系数子带, 将图像的主要能量集中在了数量更少的 LL_4 低频子带上, 更有利于图像的压缩。表 1 为各个小波子带的欧几里得范数, 其可代表小波子带所包含的能量, 分析数据可以得到图像能量主要集中在 LL_4 低频子带的结论。各个子带的位置具体分布见图 8。

表 1 不同小波分解级别子带能量分布图

Tab. 1 Energy distribution of subbands at different wavelet decomposition levels

小波子带	LL_4	HL_4	LH_4	HH_4	HL_3	LH_3	HH_3	HL_2	LH_2	HH_2	HL_1	LH_1	HH_1
Energy	21 813	4 799	4 716	1 066	3 295	3 304	429	2 279	2 293	167	0	0	0

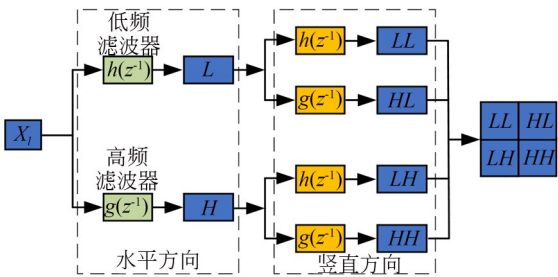


图 4 9/7M 二维小波滤波器结构图

Fig. 4 Structure of 9/7M 2D wavelet filter

3.2 小波变换子带权重提升

二维图像经过四级小波变换后, 其图像绝大部分能量都集中在 LL_4 低频子带中, 图像的细节信息则集中在其余的水平 and 垂直高频子带中。由于小波变换的增益作用, 高频子带中包含了噪声信息, 且噪声信息对图像解压时的影响权重存在差异。如果对包含较少噪声信息的小波系数子带赋予较高权重, 对包含较多噪声信息的小波系数子带赋予较低权重, 那么在 SPIHT 编码时, 包含较少噪声信息子带的优先级将会提高, 从而提升解压图像的质量。本文算法在确定图像权重方面进行了大量试验, 结果如图 5~图 7 所示。

由于天线罩材质透光率较高, 致使图像背景的亮度偏高。因此, 不能使用传统算法或 CCSDS 标准推荐的权重对各级小波子带进行加权。否则, 会导致图像过曝, 细节信息丢失严

重, 如图 5 所示。也尝试了仅对包含主要图像信息的 LL_4 子带进行加权处理, 赋予 1.2 的权重, 效果如图 6 所示。可以观察到, 背景图像整体过曝, 损失了部分细节信息, 并且在对角线方向上出现了连续的点状亮斑。因此, 本算法最终对所有高级小波分解子带的权重均取 1, 以获得正常的背景图像。

经过多次试验, 发现天线罩形变图像在压缩倍率为 12.65, 13.89, 15.38, 17.85, 19.23 等大压缩倍率时, 一级高频子带所赋权重为 1 时, 解压缩图像沿对角线方向, 圆环图像边缘区域会出现明显的毛刺, 这说明一级高频子带包含大量噪声信息。将该区域的权重调整为 0, 可以观察到圆环

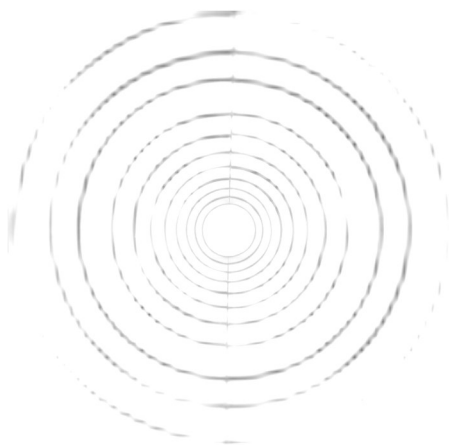


图 5 LL_4 子带权重 2 图像

Fig. 5 LL_4 subband weighted 2 image

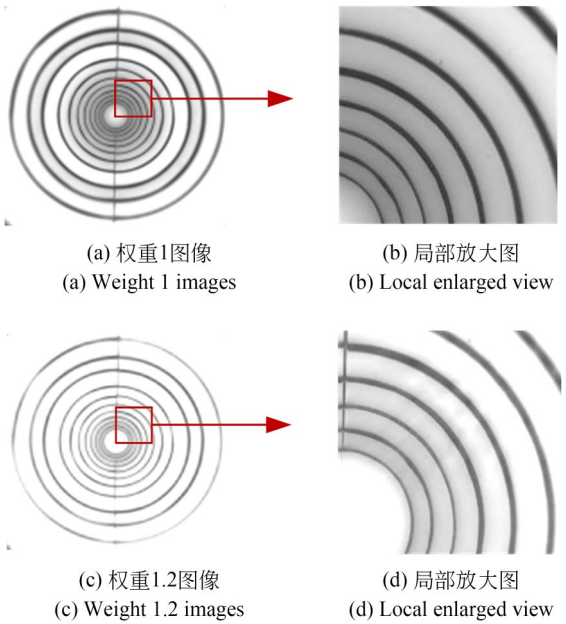


图 6 权重 1 与 1.2 解压图像对比图

Fig. 6 Comparison of decompressed images with 1-weighted and 1.2-weighted

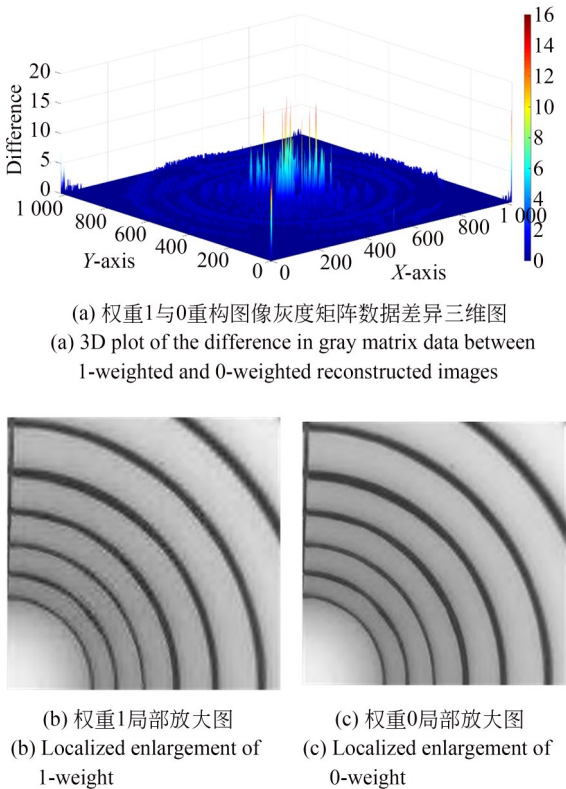


图 7 压缩倍率 13.89 倍高频小波系数子带权重 1 与 0 解压重构图像对比图

Fig. 7 Comparison of compression magnification 13.89 times high frequency wavelet coefficients subband weights 1 and 0 decompression reconstructed image

图像边缘区域毛刺现象显著减少。表 2 为上述压缩倍率下,小波系数子带权重为 1 与 0 的解压图像的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)。分析结果,权重 0 相比权重 1 信噪比最高可提升 3.67 dB。压缩倍率为 13.89 倍时权重 1 与 0 的解压图像灰度矩阵数据差异三维图如图 7(a)所示,局部放大图分别如图 7(b)与图 7(c)所示。

经过试验验证,最终确定了对各个小波子带所赋权重,具体数值见表 3。

表 2 不同压缩倍率下,小波系数子带权重 0 与 1 的解压图像信噪比

Tab. 2 Signal-to-noise ratio of decompressed images with wavelet coefficients subband weights 0 and 1 at different compression multiplicities

压缩倍率	12.65	13.89	15.38	17.85	19.23
SNR(权重 0)	36.96	35.88	34.45	32.96	30.56
SNR(权重 1)	33.45	32.21	30.97	29.48	27.08

表 3 小波变换子带权重提升表

Tab. 3 Table of subbands weighting enhancement for wavelet transform

子带	HL_1	LH_1	HH_1	剩余子带
权重	0	0	0	1

3.3 SPIHT 多级树集合分裂编码

SPIHT 是 EZW 的改进算法,它采用了空间方向树结构对小波系数进行分类,并使用了三个数据链表来组织数据,以提高编码效率和图像压缩倍率,并降低算法复杂度。

3.3.1 空间方向树结构

在对小波变换后的系数进行编码时,SPIHT 会根据图像的分辨率大小构建空间方向树(Spatial Orientation Tree, SOT)。每个树节点 $c(i,j)$ 对应一个图像坐标 (i,j) 处的小波系数。根据树的结构特点,每一组根节点只有一个(对于 a 级小波分解,根节点为 LL_a, LH_a, HL_a, HH_a),与根节点对应的直接后代系数节点有四个,图像坐标分别为 $(2i, 2j), (2i, 2j+1), (2i+1, 2j), (2i+1, 2j+1)$ 。为了便于后续阈值比较与系数编码,

SPIHT 对不同等级小波系数节点集合进行了如表 4 的分类。空间方向树结构见图 8。

表 4 空间方向树节点分类表

Tab. 4 Table of spatial orientation tree node classification

名称	分类标准
	根节点所有 <i>Children</i> 节点的坐标集,
$O(i,j)$	$O(i,j)=\{(2i,2j),(2i,2j+1),(2i+1,2j),$ $(2i+1,2j+1)\};$
	根节点所有后代节点的坐标集,
$D(i,j)$	包括 <i>Children</i> , <i>Grandchildren</i> , <i>Great-Grand-</i> <i>children</i> 节点;
	所有 <i>Parent</i> 根节点的坐标集合,
$H(i,j)$	$H(i,j)=\{LL_i,LH_i,HL_i,HH_i\};$
	根节点所有间接后代节点,
$L(i,j)$	$L(i,j)=D(i,j)-O(i,j)$

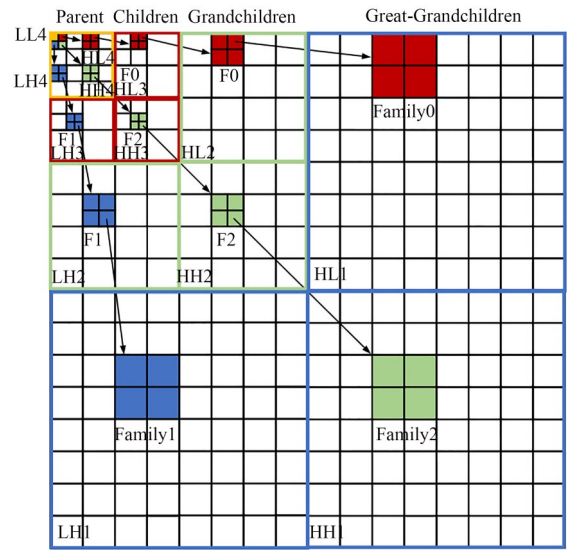


图 8 SPIHT 算法空间方向树结构图
Fig. 8 Image of SOT structure of SPIHT

3. 3. 2 重要性测试与阈值计算

小波系数矩阵按照空间方向树分类后,则会形成多个含有 1 个根节点与 84 个后代节点组成的小波系数节点集合。为加速后续系数编码,需对这些小波系数集合进行重要性测试,给予符号位 $S_n(Y)$ 。若集合内最大树节点 $c(i,j)$ 大于阈值 T ,则判断此集合含有重要性参数, $S_n(Y)=1$,否则 $S_n(Y)=0$ 。 $S_n(Y)$ 的计算公式见式(3), Y 为小波系数集合,编码循环次数 n 的计算公式见式

(4), $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。阈值 T 的计算公式见式(5):

$$S_n(Y)=\begin{cases} 1 & \max \{c(i,j)\} \geqslant 2^n, c(i,j) \in Y \\ 0 & other \end{cases}, (3)$$

$$n=\lfloor \log_2(\max \{|c(i,j)|\}) \rfloor, (4)$$

$$T=2^n. (5)$$

3. 3. 3 系数编码

SPIHT 算法编码时需要构造三个相互连接的链表,依照 Z 字型顺序对空间方向树进行扫描、编码和压缩。三个链表分别是有效像素链表(List of Significant Pixels, LSP)、不重要像素链表(List of Insignificant Pixels, LIP)和不重要集合链表(List of Insignificant Sets, LIS),它们在整个编码过程中会被动态更新^[23],具体流程见图 9。为便于说明,以 16×16 图像灰度矩阵作为输入,具体的编码过程包括以下五个步骤:

(1)初始化:开始编码之前,需要将 $H(i,j)$ 与 $\{LH_i,HL_i,HH_i\}$ 集合的小波系数纵横坐标,分别填入 LIP 与 LIS 链表,LSP 链表置零,并计算阈值 T 与编码循环次数 n 。以图 10 中计算的三级小波变换系数矩阵为例,根据式(4)可知循环次数为 7,根据式(5)可知初始阈值为 128,LIP 链表中为黄色区域的纵横坐标,LIS 为黄色区域中除去左上角四个像素外其余像素的纵横坐标(彩图见期刊电子版)。

(2)LIP 编码:遍历扫描 LIP 链表中的小波系数,若大于本轮循环的阈值,则对编码码流输出 1,将坐标加入 LSP 链表,小波系数为正再输出 1,为负输出 0;若小于阈值则输出 0,等待下一轮扫描比较。如图 10 所示,第一轮扫描阈值为 128,只有坐标(2,2)的数值符合要求,加入至 LSP 链表中,输出的码流为 000110000000000000;第二轮扫描阈值为 64,坐标(1,2)和(2,1)的数值符合要求,加入 LSP 链表,输出码流为 011110000000000000。限于篇幅,剩余 5 次循环结果不再给出。

(3)LIS 编码:LIS 链表存储是 $O(i,j)$ *children* 与 $L(i,j)$ *grandchildren* 小波系数集合所对应的 $H(i,j)$ 的根节点坐标,每次扫描会扫描该根节点所对应的所有后代节点。遍历扫描 $O(i,j)$ 和其对应的 $L(i,j)$ 中的小波系数,分别对应

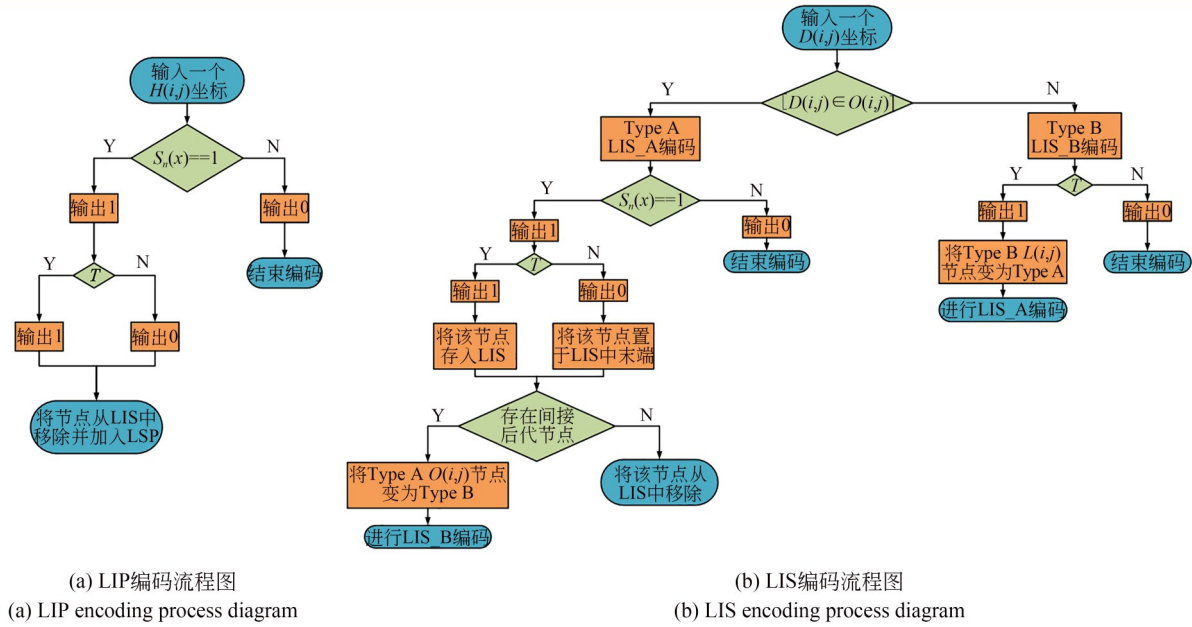


图9 编码流程图

Fig. 9 Encoding process diagram

Type_A 编码与 *Type_B* 编码,若该根节点的小波系数集合中有大于阈值的数值,则将该小波系数集合加入 LIP 中,进行一次扫描编码,将大于阈值的数据坐标加入至 LSP 中并输出码流,并且将可能存在重要系数的 $O(i,j)$ 数据坐标加入至 LIS 中。如图 10 所示,第一次扫描没有数据大于 128,链表维持不变;第二轮扫描阈值为 64, $L(i,j)$ 中坐标 (4,12) 的数据大于 64,则其添加至 LSP 链表中,其所在的小波系数集合坐标加入至 LIP 中,等待下一次扫描。可能存在重要系数的 $O(i,j)$ 中的 (1,5)(1,6)(2,5) 加入至 LIS 中。输出的码流为 10000000000000001000100010。限于篇幅,剩余 5 次循环结果不再给出。

(4) LSP 编码: 每轮循环将链表内对应的数值都转换为二进制,并根据式 (6) 计算出对应的参数 k 。然后将每个数值的二进制第 k 位作为编码值输出。例如有重要像素值 70(01000110), 对应集合阈值 T 为 64, 则 k 为 6, 则将其第 6 位 0 作为最终编码值输出。如图 10 所示, LSP 输出码流为 70701107, 每完成一次扫描在码流末端添加一个 7, 便于解码时识别分解级数。限于篇幅, 剩余 5 次循环结果不再给出。

$$k = \log_2 T. \quad (6)$$

(5) 循环细化阈值: 完成 LSP, LIP 和 LIS 中

的所有系数编码后, 将所有集合的阈值缩小一半, 并且重复进行编码, 直至阈值减小为 1, 表示图像编码完成。编码后的数据码流包含了图像的所有信息, 解码的过程需要使用与编码器相同的筛选条件和排序条件, 将初始阈值、压缩码流、初始 LIP, LIS, LSP 坐标集合、分解级数等参数作为编码器的输入, 即可重构出小波系数矩阵。如图 10 所示, 经过 7 级重构后的小波系数矩阵与图像灰度矩阵的误差均为 $-1 \sim 1$ 的范围内, 对于图像而言, 该误差影响不大。

3.3.4 并行小波系数扫描顺序

本文对 SPIHT 算法扫描小波系数的顺序进行了改进, 采用了并行扫描方式。传统的扫描方式是按照不同的小波分解级别, 逐行逐列对所有的小波系数进行 Z 字型扫描。并行扫描方式则根据子带类型、子带方向和编码规则, 对不同分解级别的小波系数进行并行扫描。根据二维小波分解特点, 除去一个低频子带, 剩余三个高频子带 LH , HL 和 HH 分别控制垂直、水平和对角线方向的小波系数; 在这三个方向的高频系数子带上, 可以同时进行 Z 字型扫描, 从而将扫描时间缩短为传统方式的 $1/3$ 。且并行扫描在扫描方向上, 与空间方向树的结构一致, 也可以提升 SPIHT 对小波系数的分类速度。按照并

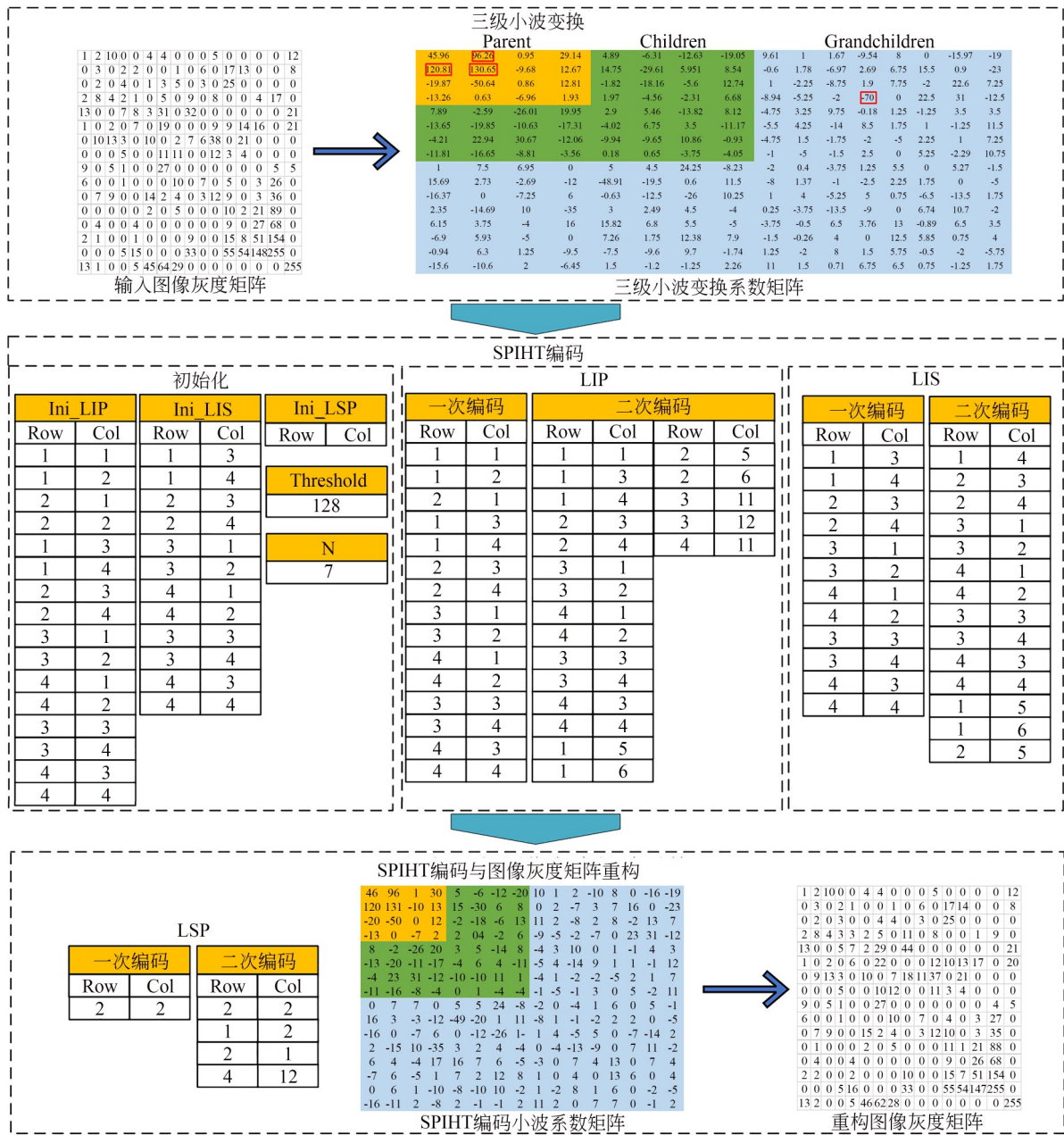


图 10 SPIHT 编解码结果图

Fig. 10 SPIHT coding and decoding result diagram

行扫描方式分类后的小波系数集合和编码码流与原算法不会有任何区别,重建精度保持一致^[24]。

3.4 改进型 RLE 游程编码算法

观察经过 SPIHT 算法编码输出的图像压缩码流,发现数据码流中包含大量连续的 1 与 0。这也符合天线罩内部图像的特点,背景像素颜色一致且占据了图像的大部分区域。该情况非常适合使用 RLE 编码对压缩码流进一步压缩,且不

会影响图像质量和损失图像信息。

传统的游程编码是一种简单且无损的数据压缩算法,通过将数据中连续相同的数据表示为一个原始数据及其重复次数的方式来实现数据压缩。例如,序列 122333444455555678 经过 RLE 编码可以表示为 1122334455617181,其中原始数据在奇数位,重复次数在偶数位。原本 18 位的数据压缩为 16 位,效果并不明显。因为当数据码流中,数据只出现一次时,传统的游程编码不能减

少数据量,反而增加 1 位数据,导致压缩效果变差。

针对这一缺点,本文对传统算法做以改进。对于数据出现一次或连续两次的情况,不对数据进行任何处理,直接写入输出码流。因为 RLE 编码表达一个重复数据片段最少需要两个数,所以如果重复次数为 2,也无需对数据进行处理,以提高编码效率。对连续重复三次及以上的数据,持续计数其重复次数,并对其加上 0.5,使之成为含有小数的浮点数,以实现重复数据与非重复数据的区分。改进型 RLE 压缩算法实现步骤为以下三步:

第一步:在数据检索对比阶段,当数据码流输入后,依次对前后相邻的数据进行比对。如果相邻数据相同,则数据计数器 count 自加,直至下一个不同数据出现时停止自加并清零返回。如果 $\text{count} \geq 3$,则可进入游程编码环节;否则直接写入输出码流,不予以其他处理。

第二步:RLE 编码环节,读取 count 计数器数值,在原始数据的基础上加上 0.5,以标识其为重复数据。

第三步:码流组织环节,依据 RLE 编码格式以及码流输入顺序,将重复数据与非重复数据依次排列,从而形成最终图像压缩码流。算法整体流程图如图 11 所示。

使用图 10 测试图例输出的 SPIHT 压缩码流作为 RLE 的输入,图 12 列举了前 81 位数据的压缩结果,81 位的数据经过压缩,变为了 28 位,效果显著;整个压缩码流共有 914 位,经过压缩减少了 445 位,压缩倍率约为 2 倍。

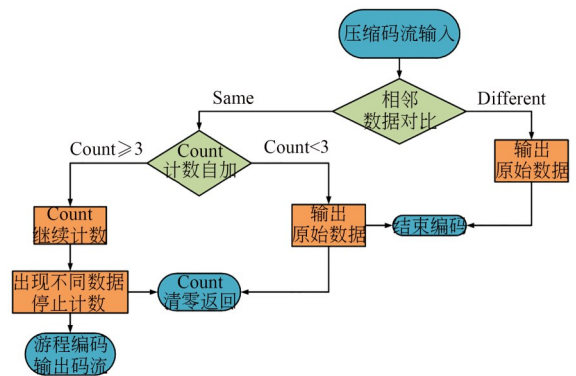


图 11 改进型游程编码流程图
Fig. 11 Modified RLE encoding process diagram

Col	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Data	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Col	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Data	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	1	1	1
Col	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
Data	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Col	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
Data	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Col	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	...	914
Data	0	0	0	1	0	7	1	1	0	0	0	0	0	1	0	...	0

(a) SPIHT初级图像压缩码流
(a) SPIHT primary image compression code stream

Col	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Data	0.5	3	1	1	0.5	24	7	0	1.5	4	0.5	12	1	0.5	15	1	0.5
Col	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	...	469
Data	3	1	0.5	3	1	0	7	1	1	0.5	5	1	0.5	8	0	...	0

(b) 经改进型RLE输出的图像压缩码流
(b) Image compression codestream output by modified RLE

图 12 改进型 RLE 编码结果图
Fig. 12 Modified RLE encoding result map

4 试验与结果分析

图像压缩算法及其对照组试验均基于 Intel 的 i5-9300H CPU 硬件平台,使用 Matlab R2019a 版本软件完成。共采用 2 幅模拟天线罩内部真实图像进行测试,图像为分辨率 $1\,024 \times 1\,024$ 的 8 bit 灰度图像。选取一幅基准圆环图像与一幅形变圆环

图像,对比各种不同算法压缩效果,结果如图 13 所示。对压缩图像的客观质量评价,主要通过计算典型图像评价参数来分析评判,客观评价结果应当与主观观察结果相符,本文使用图像压缩倍率、峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)、结构相似性(Structural Similarity, SSIM)和无参图像锐度来对图像压缩结果进行质量评价。

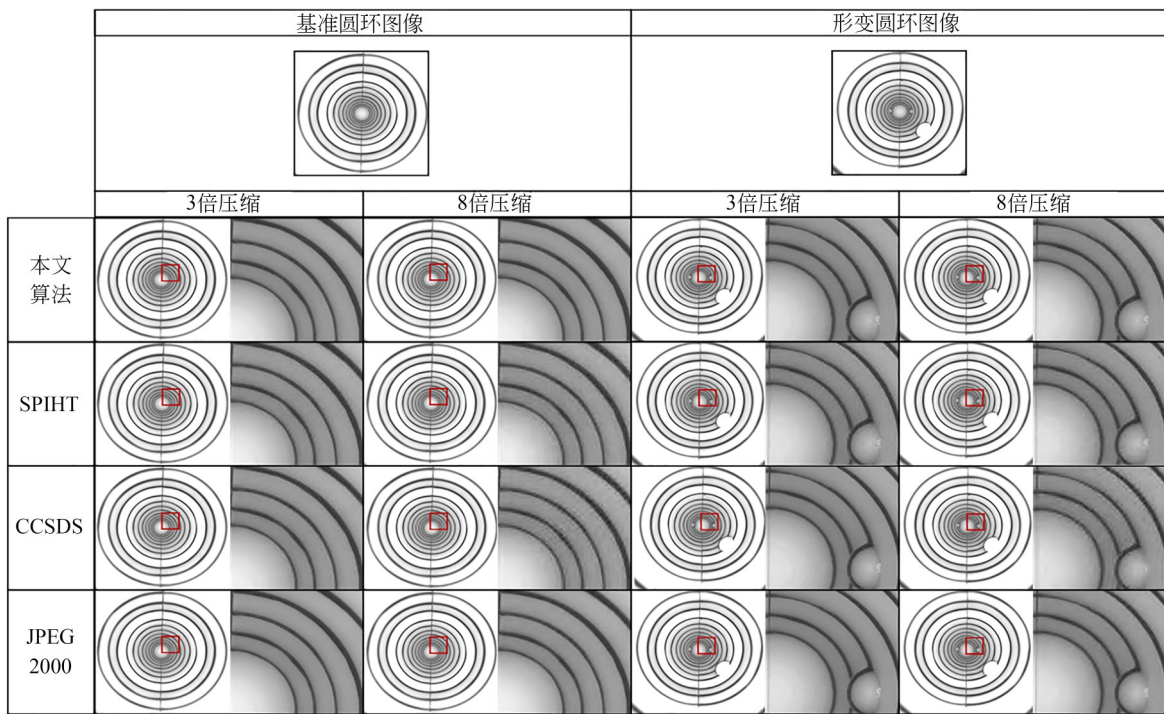


图 13 不同压缩算法效果对比图

Fig. 13 Comparison of the effect of different compression algorithms

PSNR 和 SSIM 是目前应用最广泛的图像客观评价指标。PSNR 通过计算两幅图像对应像素之间的误差大小来评判相似度,属于基于误差敏感的图像质量评价标准^[25],其计算公式见式(7):

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{(2^b - 1)^2}{MSE} \right). \quad (7)$$

SSIM 与 PSNR 不同,属于感知型误差模型,更符合人眼直观感受,从图像亮度 $l(x, y)$ 、对比度 $c(x, y)$ 和结构 $s(x, y)$ 三个方面考量图像质量^[26],其计算公式见式(8)~式(11):

$$SSIM = l(x, y) \times c(x, y) \times s(x, y), \quad (8)$$

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x \mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, \quad (9)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x \sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}, \quad (10)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x + \sigma_y + C_3}. \quad (11)$$

计算结果见表 5。无参锐度是评价图像清晰度的^[27-28],对图像梯度矩阵进行奇异值分解,可计算出图像的无参锐度,便可分析出该图像清晰度,计算公式见式(12):

$$G = U \times \begin{bmatrix} s_1 & 0 \\ 0 & s_2 \end{bmatrix} \times [v_1 \ v_2]^T. \quad (12)$$

计算结果见表 7。

式(7)中, b 为图像的位深度, MSE 为当前图像与原始图像的均方误差;式(8)~式(11)中, x 和 y 分别为参考图像和失真图像块, μ_x 和 μ_y 分别

为 x 和 y 的均值, σ_x 和 σ_y 分别为 x 和 y 的方差, σ_{xy} 为 x 和 y 的协方差, $C_1=(K_1F)^2$, $C_2=(K_2F)^2$, $C_3=C_3/2$ 为三个常数, K_1 和 K_2 默认取 0.01 和 0.03, F 为图像像素值的范围, 即 2^b-1 ; 式(12)中, G 为像素梯度, U, V 分别为 G 的左右奇异向量矩阵, s_1 为无参锐度。

本文共选用了 4 种图像压缩算法来做对照组, 分别是 SPIHT, CCSDS, JPEG2000 和 RLE。因为 RLE 属于无损压缩算法, 压缩后的图像与原始图像不存在任何差异, PSNR 计算结果为正无穷, SSIM 计算结果为 1, 对于 2 幅测试图像的压缩倍率也均小于 3 倍, 所以没有在表 5 中列举。

表 5 本文算法, SPIHT, CCSDS, JPEG2000 压缩性能对比
Tab. 5 Comparison of compression performance of this paper's algorithm, SPIHT, CCSDS, and JPEG2000

图像类型	压缩倍率	本文算法		SPIHT		CCSDS		JPEG2000	
		SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB
基准圆环图像	3.03	0.996 5②	46.121 32	0.988 8③	41.235 23	0.971 4④	38.835 84	0.997 1①	46.424 11
	4.01	0.995 6	44.336 0	0.976 5	39.564 8	0.956 7	38.062 5	0.994 8	43.546 6
	5.28	0.994 2	43.478 5	0.958 2	38.374 3	0.936 4	37.687 2	0.992 3	42.896 2
	6.22	0.991 7	42.801 9	0.932 8	37.224 9	0.911 3	34.948 1	0.990 7	41.656 9
	7.20	0.990 4	41.624 7	0.923 4	36.568 1	0.903 9	34.173 5	0.989 4	41.075 9
	8.47	0.983 4②	40.922 32	0.919 7③	35.141 43	0.885 0④	33.389 64	0.985 7①	40.949 71
	9.41	0.975 7	39.475 5	0.893 0	33.975 9	0.864 7	32.497 9	0.974 8	39.352 0
形变圆环图像	3.03	0.996 1②	45.971 42	0.984 4③	40.235 23	0.977 2④	38.586 84	0.996 8①	45.980 51
	4.01	0.995 5	44.847 9	0.974 3	39.524 0	0.953 9	38.038 2	0.994 7	43.928 6
	5.28	0.994 1	43.009 5	0.947 6	37.848 8	0.933 5	37.356 1	0.992 8	41.895 9
	6.22	0.992 5	41.868 7	0.934 3	37.390 8	0.912 9	34.565 7	0.990 1	40.428 6
	7.20	0.990 6	40.374 3	0.913 2	34.721 8	0.908 4	34.420 4	0.988 4	39.834 5
	8.47	0.987 6	39.349 0	0.905 1	34.037 6	0.887 9	33.257 4	0.984 8	39.239 6
	9.41	0.977 0②	38.368 22	0.885 8③	32.891 83	0.864 8④	32.415 54	0.980 4①	38.919 41

表 6 压缩倍率 8.47 倍不同压缩算法压缩时间对比
Tab. 6 Comparison of compression times for different compression algorithms at a compression ratio of 8.47x

压缩算法	基准圆环图像			形变圆环图像		
	SSIM	PSNR/dB	压缩时间/s	SSIM	PSNR/dB	压缩时间/s
本文算法	0.983 4	40.922 3	3.888 6	0.987 6	39.349 0	3.883 4
SPIHT	0.919 7	35.141 4	3.829 6	0.905 1	34.037 6	3.358 4
CCSDS	0.885 0	33.389 6	2.912 7	0.887 9	33.257 4	2.936 7
JPEG2000	0.985 7	40.949 7	6.015 4	0.984 8	39.239 6	5.997 8

表 7 压缩倍率 8.47 倍不同压缩算法无参锐度对比
Tab. 7 Comparison of parameterless sharpness for different compression algorithms at a compression ratio of 8.47x

压缩算法	基准圆环图像	形变圆环图像
本文算法	45.844	45.705
SPIHT	36.542	36.495
CCSDS	30.375	30.242
JPEG2000	43.778	43.736

通过观察不同压缩倍率下的重建图像可知, 在满足测试系统要求指标(即压缩倍率至少为 8)的条件下, 本文算法的图像依然具有较好的主观图像效果、较高的 PSNR 与 SSIM。以基准圆环图像为例, 当压缩倍率为 8.47 时, 重建图像 PSNR 约为 41 dB, SSIM 为 0.983 4, 与 SPIHT 和 CCSDS 相比, SSIM 和 PSNR 分别提高了 6.92%, 16.45% 和 11.12%, 22.56%。压缩时间相比于 SPIHT 增加 0.06 s, 算法复杂度增加不

多。CCSDS虽然压缩时间最短,但重构图像质量最差,无法满足形变测试需求。从主观上观察试验结果图像,本文算法在压缩图像中心区域和不同半径圆环边界区域的图像毛刺感较弱,纹理清晰,与原图视觉效果相差不大,明显优于SPIHT和CCSDS压缩算法;分析表7数据,本文算法的无参锐度比SPIHT与CCSDS算法分别高9.302和15.479,提升较为明显。

与目前主流的JPEG2000相比,SSIM与PSNR最高可提升0.2%,2.75%。但压缩时间缩短了35.35%,算法复杂度大幅降低。从主观上观察试验结果图像,JPEG2000在圆环边界区域的毛刺感稍强;无参锐度略低于本文算法2.066。相比于对照组三种压缩算法,本文算法的解压缩图像更有利于后续开展基于分析圆环轮廓变化的形变量测量。当压缩倍率从3倍持续增大,本文算法图像质量下降的幅度较小,与JPEG2000相仿,明显优于SPIHT和CCSDS算法。

5 结 论

本文从引信天线罩形变测量任务实际压缩

需求出发,提出了一种高效的图像压缩算法,并介绍了引信天线罩形变图像测试方法。该算法采用9/7M小波基函数分解图像,通过为各级小波分解子带赋予权重,减少了噪声信息,从而改善了图像质量。然后,采用并行像素扫描方式,将SPIHT压缩时间开销缩短了2/3。最后,通过改进型RLE游程编码,进一步提高了压缩倍率。试验结果表明,该算法在满足实际压缩需求的条件下,与SPIHT和CCSDS算法相比,本文算法的SSIM与PSNR指标分别提高6.92%,16.45%和11.12%,22.56%,压缩时间相比SPIHT算法仅增加0.06s,算法复杂度增加有限。与JPEG2000相比,本文算法的SSIM与PSNR最高可提升0.2%,2.75%,但压缩时间缩短了35.35%,算法复杂度大幅降低。综上所述,当对引信天线罩形变图像进行相同压缩倍率的压缩时,本算法的压缩时间与算法复杂度较低的SPIHT算法相近,压缩图像的质量却能达到JPEG2000的水平,以相对较少的压缩时间达成了与JPEG2000相当的压缩图像质量。

参考文献:

- [1] 李越,孙发鱼,白瑞青. 引信天线罩形变遥测图像动态测试方法[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(1): 85-89.
LI Y, SUN F Y, BAI R Q. Fuze radome deformation dynamic test method based on image telemetry [J]. *Journal of Detection & Control*, 2024, 46(1): 85-89. (in Chinese)
- [2] 秦强强,周金柱,韩冰. 复合材料天线罩形变夹具设计与试验[J]. 机械设计, 2021, 38(S2): 46-50.
QIN Q Q, ZHOU J Z, HAN B. Design and experiment of deformation fixture for composite radome [J]. *Journal of Machine Design*, 2021, 38(S2): 46-50. (in Chinese)
- [3] NAG A, RAO R R, PANDA P K. High temperature ceramic radomes (HTCR) - A review[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(15): 20793-20806.
- [4] 周保林. 基于小波变换的嵌入式图像编码算法的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2022.
ZHOU B L. *Research on Embedded Image Coding Algorithm Based on Wavelet Transform* [D]. Tian-
- jin Polytechnic University, 2022. (in Chinese)
- [5] WANG Q, LIU P, ZHANG L, *et al.* Ratedistortion optimal evolutionary algorithm for JPEG quantization with multiple rates[J]. *Knowledge-based systems*, 2022, 24(23): 108500.
- [6] 席子钊. 基于JPEG2000的静态图像压缩系统的研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
XI Z Z. *Research and Design of Static Image Compression System Based on JPEG2000* [D]. Xi'an: Xidian University, 2022. (in Chinese)
- [7] 刘东,王叶斐,林建平,等. 端到端优化的图像压缩技术进展[J]. 计算机科学, 2021, 48(3): 1-8.
LIU D, WANG Y F, LIN J P, *et al.* Advances in end-to-end optimized image compression technologies[J]. *Computer Science*, 2021, 48(3): 1-8. (in Chinese)
- [8] JIANG Y H, CUI R S, LIU F. Multi-resolutional human visual perception optimized pathology image progressive coding based on JPEG2000[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2023, 115: 116960.

- [9] 雷杰,于露露,罗晓红,等. 面向深空探测 Bayer 图像的高效编码[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 191-200.
- LEI J, YU L L, LUO X H, *et al.* Efficient coding method for deep space detection Bayer pattern image[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(1): 191-200. (in Chinese)
- for bayer images in deep space exploration[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(01): 191-200. (in Chinese)
- [10] SAID A, PEARLMAN W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, 6(3): 243-250.
- [11] 张光普,陈日清,付轶帆,等. 基于FPGA的多通道心电信号实时滤波与压缩[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(2): 14-18, 22.
- ZHANG G P, CHEN R Q, FU Y F, *et al.* Multi-channel ECG signal real time filtering and compression based on FPGA[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2018, 37(2): 14-18, 22. (in Chinese)
- [12] 周月,倪晋平,谭林秋,等. 基于多级树集合分裂的零飞仪实时图像压缩[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(5): 139-143.
- ZHOU Y, NI J P, TAN L Q, *et al.* Compression of real-time image in zero-flying instrument using multi-level tree set splitting algorithm[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(5): 139-143. (in Chinese)
- [13] 周文敬. 星载图像压缩核 VLSI 实现的软件验证[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2017.
- ZHOU W J. *Software Verification of The Implementation of The Spaceborne Image Compression Kernel VLSI*[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [14] 王鸣哲. 星载图像压缩系统中高速小波变换的 FPGA 设计与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- WANG M Z. *FPGA Design and Implementation of High-Speed Wavelet Transform in Spaceborne Image Compression System*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [15] PRANITHA K, KAVYA G. An efficient image compression architecture based on optimized 9/7 wavelet transform with hybrid post processing and entropy encoder module[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2023, 98: 104821.
- [16] 徐勇. 基于首1游程的图像位面并行编码算法[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 864-870.
- XU Y. Bit-plane paralleled image coding algorithm based on Run-length coding of first 1 bit[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 864-870. (in Chinese)
- [17] 吕德远,黄浩文,曾珉,等. 快照马赛克高光谱图像CCSDS压缩器的FPGA实现[J]. 光学精密工程, 2022, 30(8): 883-893.
- LÜ D Y, HUANG H W, ZENG M, *et al.* FPGA implementation of CCSDS compressor for snapshot mosaic hyperspectral images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(8): 883-893. (in Chinese)
- [18] CHANDRA' S, SHARMA A, SINGH G K. A comparative analysis of performance of several wavelet based ECG data compression methodologies[J]. *IRBM*, 2021, 42(4): 227-244.
- [19] LUAN S S, CHENG B W, JIANG S, *et al.* An optimized Run-length based algorithm for sparse remote sensing image labeling[J]. *Defence Technology*, 2022, 18(4): 663-677.
- [20] ZOUARI S, MASMOUDI A. Dictionary-based histogram packing technique for lossless image compression[J]. *Journal of Visual Communication and Image representation*, 2023, 95: 103894.
- [21] KOLEKAR M H, JHA C K, KUMAR P. ECG data compression using modified Run length encoding of wavelet coefficients for holter monitoring[J]. *IRBM*, 2022, 43(5): 325-332.
- [22] Image Data Compression. Recommendation for Space Data System Standards, CCSDS 122.0-B-1[R]. Washington, D. C; CCSDS, 2005.
- [23] ZHANG M, TONG X J. Joint image encryption and compression scheme based on IWT and SPIHT[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90: 254-274.
- [24] YU H T, YANG Y G, ZHANG D B, *et al.* VLSI design for adjustable compression rate in lossless/lossy compression of EEG signal[J]. *Microelectronics Journal*, 2024, 148: 106193.
- [25] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to

- structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2004, 13(4): 600-612.
- [26] WANG Z, SIMONCELLI E P, BOVIK A C. Multiscale structural similarity for image quality assessment[C]. *The Thrity-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers. Pacific Grove, CA, USA. IEEE*, 2003: 1398-1402.
- [27] 刘建磊. 结合局部特征的无参考彩色图像质量评价[J]. *光学 精密工程*, 2016, 24(5): 1176-1184.
- LIU J L. No-reference color image quality assessment based on local features[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1176-1184. (in Chinese)
- [28] ZHU X, MILANFAR P. No-reference sharpness metric sensitive to blur and noise[C]. *New York: IEEE*, 2009: 64-69.

作者简介:



张浩洋(2000—),男,陕西渭南人,硕士研究生,2022年于西安工业大学获得学士学位,主要从事FPGA逻辑设计、图像压缩算法等方面的研究。E-mail:1920171410@qq.com

通讯作者:



王 凡(1987—),女,陕西西安人,博士,副教授,硕士生导师。2015年于北京理工大学获博士学位,主要研究方向为图像及信号处理算法。E-mail: wangfan@xatu.edu.cn