

基于实时星点定位的感兴趣区域星图压缩方法

张 刘¹, 梁嘉新¹, 刘 赫¹, 张贵祥², 刘 威¹, 李 岩¹, 章家保¹

(1. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130061; 2. 苏州吉天星舟空间技术有限公司, 江苏 苏州 215006)

摘 要: 针对空间探测相机存储和传输星图占用过多星上资源的问题, 提出了一种基于实时星点定位的感兴趣区域星图压缩方法。首先, 利用环状结构元的顶帽算法分割星图中的星点目标与背景; 然后, 通过改进的星点定位算法, 扫描星图的同时检测星点目标并输出坐标; 接着, 根据星点坐标对原星图相应位置实时开窗得到星点图像, 再利用 JPEG-LS 图像压缩算法对星点图像无损压缩, 同时对原星图背景进行压缩参数可调的近无损压缩。FPGA 仿真实验表明: 对星点个数小于 20 的模拟星图, 本文方法处理时间在扫描一遍星图时间的基础上仅增加不到 6%。当背景压缩参数为 2 时, 本文方法较 JPEG-LS 无损压缩算法压缩比提升 2 倍以上, PSNR 大于 40 dB、SSIM 大于 0.95, 该方法压缩性能优势明显, 具有显著工程应用价值。

关键词: 信号与信息处理; 感兴趣区域星图压缩; 实时星点定位; JPEG-LS

中图分类号: V448.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)03-0802-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240734

Region of interest star map compression method based on real-time star location

ZHANG Liu¹, LIANG Jia-xin¹, LIU He¹, ZHANG Gui-xiang², LIU Wei¹, LI Yan¹, ZHANG Jia-bao¹

(1. College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Suzhou Jitian Xingzhou Space Technology Co., Ltd., Suzhou 215006, China)

Abstract: To solve the problem of storing and transmitting star maps by space detection cameras, a method of compression of star maps of region of interest based on real-time star location is proposed in this paper. First, the top hat algorithm of the ring structure element is used to separate the star object and the background in the star map. Then, through the improved star location algorithm, the star target is detected and the coordinates are output while scanning the star map. Then, the star image is obtained by opening the window in real time according to the star coordinates of the original star map. The star image is lossless compressed by JPEG-LS image compression algorithm, and the original star map background is compressed by near lossless compression with adjustable parameters. FPGA simulation results show that the processing time of the proposed method increases by less than 6% on the basis of scanning a star map with less than 20 star points. When the background compression parameter is 2, the compression ratio of

收稿日期: 2024-07-04.

基金项目: 国家基金委重大科研仪器研制项目(62227812); 国家自然科学基金项目(62073150).

作者简介: 张刘(1978-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 航天光学遥感系统设计, 星敏感器技术. E-mail: zhangliu@jlu.edu.cn

通信作者: 章家保(1981-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 卫星星敏感器系统设计, 仿真及测试技术, 卫星姿控部件电子学设计与测试技术. E-mail: zhangjiabao@jlu.edu.cn

the proposed method is more than 2 times higher than that of JPEG-LS lossless compression algorithm, and the PSNR is greater than 40 dB and SSIM is greater than 0.95. This method has obvious advantages in compression performance and has significant engineering application value.

Key words: signals and signal processing; region of interest star map compression; real-time star location; JPEG-LS

0 引言

随着空间技术的进步,空间探测相机逐渐向多功能复合型方向发展,空间目标探测及存储一体化相机成为了新一代星敏感器和深空探测相机的重要研究方向。星图作为星敏感器和深空探测相机的数据来源,包含了大量有用的信息,地面系统为了评估星敏感器的在轨工作情况,分析星图中的目标信息,需要传输星图至地面站进行进一步研究,这对星上存储资源和星地间传输带宽造成了巨大压力,为减少星图对星上资源的占用,星图压缩技术逐渐应用于星敏感器等设备中^[1-4]。

地面系统对星图研究中最关注的是星点目标(恒星和卫星等目标),因此星图压缩算法要尽量保证星点目标信息无失真。基于上述原则,当前针对星图的压缩算法大多采用无损压缩算法,单纯的有损压缩算法并不适用于星图的压缩。黄冠^[1]提出了一种星图快速无损压缩算法,包括预测编码和游程编码两种编码方式,针对背景单一的星图,数据大小可由压缩前6 400 KB减少到压缩后的2 330 KB,但当星图背景存在干扰时,无损压缩器压缩比明显下降。为了得到更高效的星图压缩算法,李灵珊^[5]提出了一种基于目标检测和图傅里叶变换的星图压缩算法,在低像素深度时的峰值信噪比(PSNR)均高于现有的图像视频编码标准,但该算法结构相对复杂,难以在资源有限的星载硬件平台中应用;邓宸伟等^[6]提出了一种基于目标对象的星图压缩算法,该算法先将星图划分成相对平坦的背景和相对复杂的目标对象,再以不同的压缩方式分别压缩图像,算法处理后重建图像的峰值信噪比,较JPEG处理后结果高0.5 dB以上,与JPEG2000处理后重建图像的峰值信噪比几乎没有差别,但该算法采用中值滤波去除背景干扰,在较强杂光干扰下可能由于灰度值阈值法分割图像不准确造成算法性能不稳定。

综上所述,在保证星图中目标信息无损的前

提下,为了得到更高效的星图压缩方法,本文提出了一种基于实时星点定位的感兴趣区域(ROI)星图压缩方法。该方法先采用环状结构元的顶帽算法滤除星图中的杂光和噪声干扰,然后通过改进的实时星点定位算法检测星点的开窗坐标,并对原星图对应坐标开窗后得到星点目标图像,再结合JPEG-LS图像压缩算法压缩参数可调的优点,对开窗后的星点目标图像进行无损压缩,同时对星图中的背景图像进行近无损压缩,最后将星点目标的无损压缩码流、星图背景的有损压缩码流和星点坐标合并,一起通过数据链路发送到地面站。

1 感兴趣区域星图压缩预处理

从星图中实时定位星点目标是本文星图压缩方法中的关键技术之一。因此,本文提出了一种形态学滤波与实时星点定位融合方法,提升了在杂光干扰下定位星点目标的成功率。

1.1 形态学滤波器设计

CMOS相机拍摄的星图会存在暗电流噪声、光子散粒噪声、读出噪声等^[7]。在轨执行任务时甚至会受到月光等杂光干扰,致使星图背景复杂。传统空间域滤波算法大多建立在目标和背景分别处于高频和低频空间的假设基础上,复杂背景中星点目标被噪声和杂光干扰,此类方法会有较高的虚警率^[8],而形态学顶帽(Top-hat)算法具有易于硬件实现和鲁棒性强的优点,适合从复杂背景中提取星点目标,因此本文采用形态学Top-hat算法作为感兴趣区域星图压缩的滤波算法。

传统Top-hat算法使用两个相同的结构元素进行先腐蚀后膨胀的开运算,剔除尺寸小于结构元的亮区域,再将原图像与其开运算结果作差得到星点目标图像,但传统Top-hat算法忽略了目标和背景的信息差异,可能造成算法误检与星点目标尺寸相近的噪声。为了提升算法从星图中提

取星点目标的成功率,本文采用环状结构元的 Top-hat 算法^[9],该算法利用两个不同的结构元素来进行腐蚀和膨胀操作,同时改变腐蚀和膨胀的运算顺序。环状结构元的 Top-hat 原理如式(1)(2)所示^[9],环状结构元素如图 1 所示,其中 B_o 为尺寸大于星点目标的圆形结构元, B_i 为尺寸小于 B_o 的圆形结构元, ΔB 为 B_o 与 B_i 间的环状结构元。 $\oplus$ 为膨胀运算, $\ominus$ 为腐蚀运算, $\bullet$ 为闭运算, B_{oi} 为该操作与 B_o 和 B_i 相关, f 表示原图, $NWTH$ 为环状结构元的 Top-hat 运算。

$$(f \bullet B_{oi})(x, y) = (f \oplus \Delta B) \ominus B_o \quad (1)$$

$$NWTH = f(x, y) - (f \bullet B_{oi})(x, y) \quad (2)$$

环状结构元的 Top-hat 算法先利用环状结构

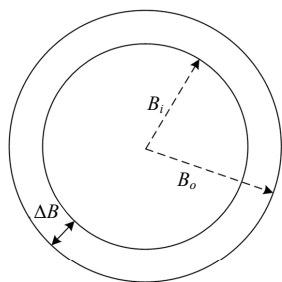
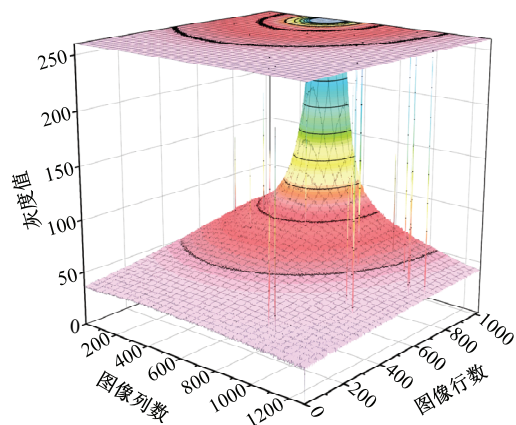
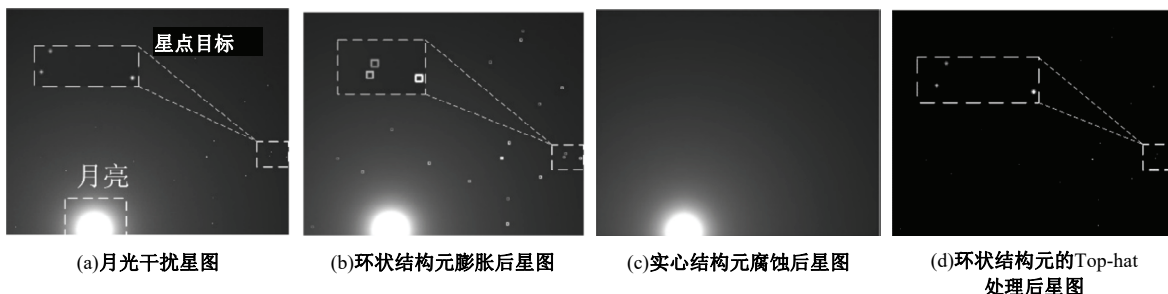
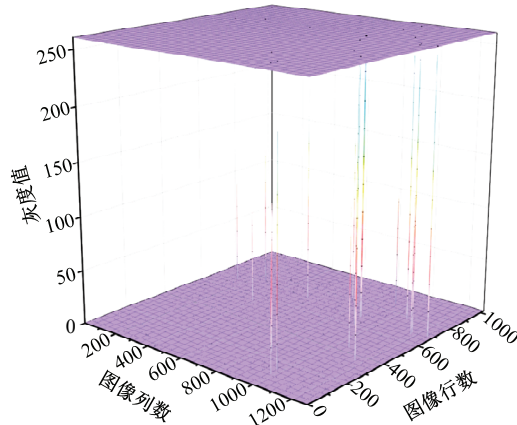


图 1 Top-hat 环状结构元的结构图

Fig. 1 Structural diagram of the Top-hat cyclic element



(e) 月光干扰星图灰度分布三维图



(f) 环状结构元的Top-hat处理后灰度分布三维图

图 2 环状结构元的 Top-hat 处理星图效果图

Fig. 2 Top-hat processing star map rendering of circular structural elements

元素对星图进行膨胀操作,使星点目标邻域的像素将星点目标“围”住,然后再使用实心结构元对膨胀后的星图进行腐蚀操作,去除环状邻域像素值,最后将原图与滤除星点目标图做差后,得到星点目标增强的星图。该算法在保证目标信息的情况下,抑制杂光和噪声干扰的效果明显。环状结构元的 Top-hat 算法处理效果如图 2 所示。

1.2 改进的实时星点定位算法

对星图进行感兴趣区域压缩前,需要定位星点目标的坐标。星点目标坐标定位方法主要分为基于窗口的星点提取算法^[10,11]和基于连通域检测的星点提取算法,基于窗口的星点提取算法通过设计滑动窗来检测星点目标,滑动窗过大会造成窗口内同时出现多星时检测失败,过小则会漏检无法进入窗口的较大星点,同时算法复杂度较高,硬件实现占用资源较多。连通域检测算法具有鲁棒性高、硬件资源消耗少的优势,适合于实时性要求高、硬件资源受限的星上应用场景。

基于行检测的连通域检测方法相较种子填色的连通域检测方法具有算法复杂度低、硬件实现效率高的特点,适合星载设备应用。但基于行检

测的连通域识别方法大多在检测完整幅星图的所有星点目标之后,再对星点目标信息进行计算^[12]。为了得到原始星点目标,必须片外存储整幅原始星图,待星点信息计算结束后再根据计算结果对原始星图进行开窗,限制了算法处理星图的速度。为了提高算法的实时性、减少图像处理过程中所占的存储资源,本文对基于行检测的连通域识别算法进行改进,扫描星图的同时实时检测星点目标并实时输出星点坐标。实时星点定位算法与传统方法的比较如图3所示。

首先,对经过环状结构元的 Top-hat 算法处理的图像缓存数行,同时进行行目标检测。从左至右,从上至下扫描像素,若当前扫描像素值大于预设阈值且前一扫描像素值小于预设阈值,记录当前扫描像素的列坐标为起始列 X_z ,继续向右逐个扫描像素,若当前扫描像素值大于预设阈值且后一扫描像素值小于预设阈值,记录当前扫描像素的列坐标为终止列 X_u 。

然后,判断当前起始列 X_z 与终止列 X_u 和上一行的行目标起始列 X_{z1} 与终止列 X_{u1} 是否满足 X_z 小于等于 X_{u1} 、 X_u 大于等于 X_{z1} 。若不满足条件,证明该行目标是新的疑似星点目标,此时该新的星点目标的起始行 Y_t 和终止行 Y_b 相同,记录此时新的星点目标格式为连通域标号+起始列+终止列+起始行+终止行;若满足上述条件,证明该行目标与上一行行目标连通,取 X_z 与 X_{z1} 的最小值、 X_u 与 X_{u1} 的最大值、当前行的行坐标 Y_n 分别更新

星点目标格式中的起始列、终止列和终止行。

接着,判断当前扫描像素的列坐标是否大于未输出星点目标的终止列,若大于终止列且未输出星点目标在该行没有更新,证明未输出星点目标扫描完成,读取该星点的目标格式。判断起始列 X_{z1} 和终止列 X_{u1} 、起始行 Y_t 和终止行 Y_b 之间的像素距离是否均大于预设像素距离来进一步消除噪声,满足星点判断条件后,通过式(3)计算星点中心坐标 (X, Y) 并实时输出。

$$\begin{cases} X = \frac{X_{z1} + X_{u1}}{2} \\ Y = \frac{Y_t + Y_b}{2} \end{cases} \quad (3)$$

最后,按照上述方法扫描完整幅星图,完成对星图中星点目标的实时定位,实时星点定位示意图如图4所示。该方法以较少的运算从背景中准确定位星点目标,同时对非星点的噪声进行剔除,为之后的感兴趣区域星图压缩环节做预处理。

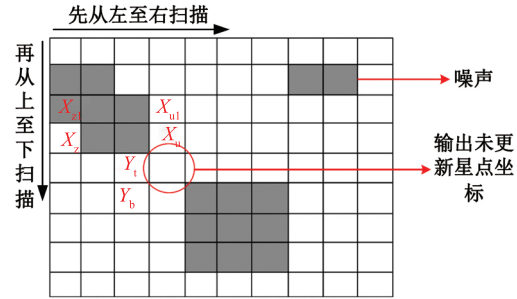


图4 实时星点定位示意图

Fig. 4 Real-time star point location schematic diagram

2 感兴趣区域星图压缩方案

2.1 JPEG-LS 压缩算法

JPEG-LS 图像压缩算法是一种静态图像压缩算法,主要组成部分包括上下文建模模块、常规编码模块、游程编码模块和码流拼接模块。该算法通过设置压缩参数 near 来控制图像压缩模式,压缩参数 near 为 0,则进入无损压缩模式;near 为其他正整数,则进入近无损压缩模式。随着 near 值的增大,图像压缩比也逐渐增高^[13,14]。JPEG-LS 图像压缩算法流程图如图5所示。

星敏感器和深空探测相机工作时拍摄到的星图大多都是背景为深空的图像,理想星图的背景灰度值应该全为零,这类十分平坦的图像被无损压缩效果优秀的 JPEG-LS 图像压缩算法压缩时,

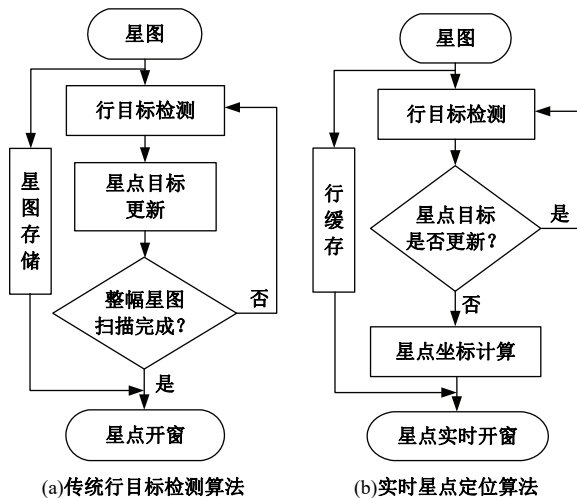


图3 传统行目标检测与实时星点定位比较

Fig. 3 Comparison between traditional row object detection and real time star location

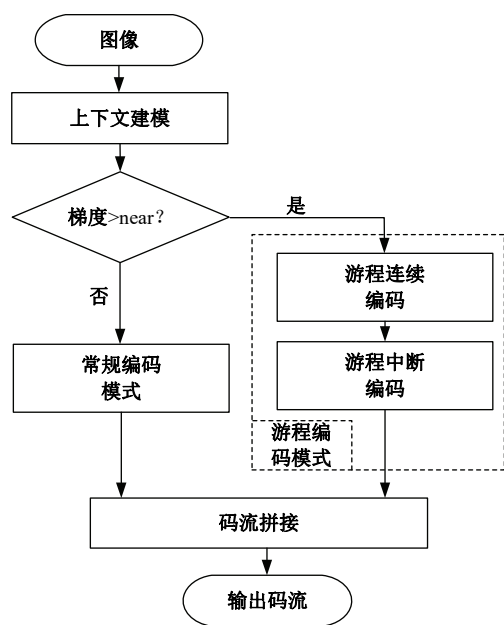


图 5 JPEG-LS 图像压缩算法流程图

Fig. 5 JPEG-LS image compression algorithm

像素会经常进入游程连续编码模式,可以得到很好的压缩效果。但当星图受到噪声以及月光等杂光干扰后,星图中像素灰度值变化剧烈,造成图像像素难以进入 JPEG-LS 无损压缩算法的游程编码模式,从而产生更长的码字,图像压缩比降低且压缩时间增长;若以 JPEG-LS 的近无损压缩模式压缩星图,虽然可以增大压缩比、减少压缩时间,但星点本身信息失真程度会随着压缩参数 near 的增大而增大,不利于地面系统对星图的进一步研究。

2.2 针对星点目标的感兴趣区域星图压缩方法

以同一压缩尺度对整幅星图进行图像压缩难以满足星图压缩的性能指标,本文考虑星图中不同信息的重要程度,采用星点目标与背景区分压缩的感兴趣区域压缩方法。

传统感兴趣区域压缩方法^[15]是先将整幅图像保存至存储器中,待目标检测完成后,再根据检测结果从存储器中读取图像进行感兴趣区域压缩,但星载设备存储资源有限、图像处理实时性要求高。为解决传统感兴趣区域压缩方法中至少需要扫描两遍图像的问题,本文在保证星点目标信息无损失的基础上,提出了一种基于实时星点定位的感兴趣区域星图压缩方法,该方法具有易于硬件实现、压缩星图速度快和星图压缩比高的特点。基于实时星点定位的感兴趣区域星图压缩方

法具体步骤如下:

首先,对原始星图进行行缓存以延迟数十行,同时使用环状结构元的 Top-hat 算法和实时星点定位算法实时检测星点坐标。扫描原始星图的同时使用 JPEG-LS 图像压缩算法以预设的压缩参数 near 对原星图背景进行近无损压缩,并存储压缩后的码流。

然后,根据设置的开窗窗口大小与实时检测的星点坐标计算得到星点目标的开窗范围,同时对延迟数十行的原始星图像素进行判断,若当前扫描像素坐标在目标窗口内部时,提取该像素并存储。直至扫描一遍延迟数十行的原始星图后,提取出所有固定窗口大小的星点目标图像。

接着,使用 JPEG-LS 图像压缩算法对固定窗口大小的星点目标图像进行无损压缩,并将压缩后的码流与所有星点坐标值存储。

最后,将所有压缩码流与星点坐标进行打包,通过数据链路发送到地面站。感兴趣区域星图压缩方法流程图如图 6 所示。

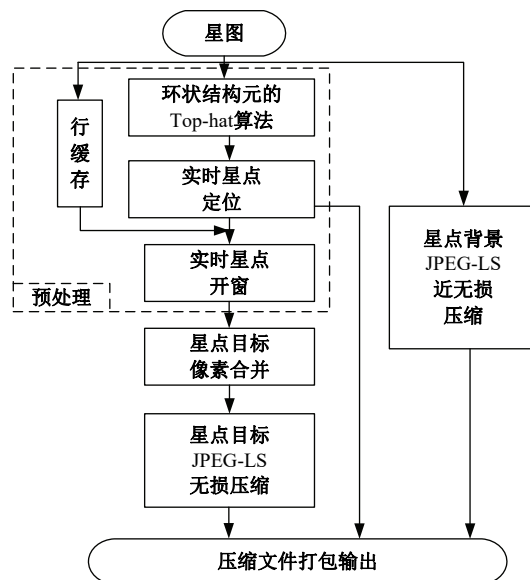


图 6 感兴趣区域星图压缩方法流程图

Fig. 6 Schematic diagram of ROI star map compression

3 算法验证与结果分析

3.1 模拟星图与仿真噪声

为了验证本文方法的有效性,使用自研的模拟星图软件生成多幅 1 280 像素×1 024 像素的 8 比特深度仿真星图,并对星图添加不同的噪声,以测试本文提出的感兴趣区域星图压缩方法在杂光

干扰下的图像压缩性能。

采用文献[16]中对杂光灰度分布的分析结果,对图像添加均匀分布噪声 I_j 、线性分布噪声 I_x 和高斯分布噪声 I_g 。3种噪声的计算公式如式(4)(5)(6)所示^[16],考虑杂光灰度值的波动性,rand取[0,10]的随机分布。 $g_{\max}$ 为190, $g_{\min}$ 为50, X 为1280个元素的行向量, Y 为沿像平面 x 轴方向的高斯分布函数,ones为1280个元素的列向量。

$$I_j = g_{\max} + 10 \times \text{rand} \tag{4}$$

$$I_x = \text{ones} \times \left(g_{\max} - \frac{g_{\max} - g_{\min}}{N_x} \times X \right) + 10 \times \text{rand} \tag{5}$$

$$I_g = \text{ones} \times Y + 10 \times \text{rand} \tag{6}$$

为了测试本文方法是否可以对较强月光干扰的星图高效压缩,通过式(7)将实际拍摄的月光干扰叠加至模拟星图中^[16],其中, I_i 为模拟星图像素灰度值, B_y 为实际拍摄的月光干扰图像灰度值, I_y 为图像叠加后像素灰度值,由于像素深度为8故阈值选取255。模拟星图叠加噪声效果图如图7所示。

$$I_y = \begin{cases} I_i + B_y, I_i + B_y \leq 255 \\ 255, I_i + B_y > 255 \end{cases} \tag{7}$$

3.2 FPGA 仿真及性能测试

为验证本文方法的可行性,采用verilog语言进行算法的逻辑设计并通过Modelsim进行FPGA仿真,之后将压缩后的文件通过JPEG-LS解压器解压。通过与JPEG-LS无损压缩比较,观察感兴趣区域星图压缩方法的压缩比变化。同时,为测试本文方法造成的图像质量损失,使用峰值信噪比(PSNR)与结构相似性(SSIM)来评价算法对星图造成的失真情况^[17],并与航天领域广泛

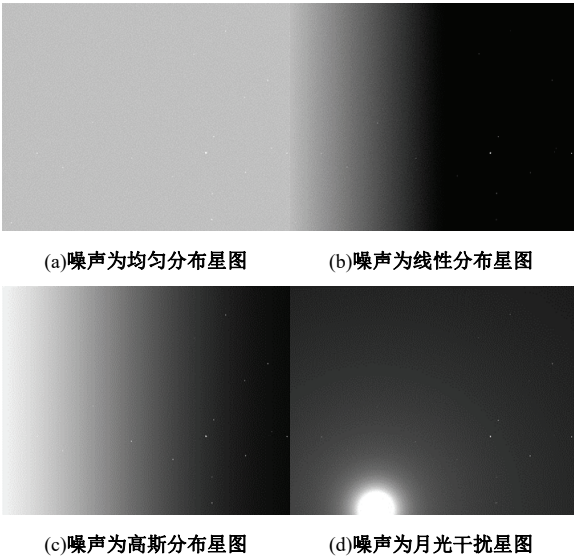


图7 模拟星图叠加噪声效果图

Fig. 7 Simulated star map overlay noise effect diagram

使用的JPEG2000图像压缩算法比较,结果见表1、表2。图8为本文方法硬件实现仿真图,图9为基于实时星点定位的感兴趣区域星图压缩方法及解压全流程示意图。

表1 压缩比对比表

测试图像名	JPEG-LS 无损压缩	感兴趣区域星图压缩	
		背景 near=1	背景 near=2
月光干扰图1	3.419	7.897	15.546
月光干扰图2	3.325	7.532	15.556
高斯噪声图1	2.032	3.262	4.411
高斯噪声图2	2.033	3.263	4.410
均匀噪声图1	2.029	3.250	4.403
均匀噪声图2	2.029	3.250	4.042
线性噪声图1	3.580	5.740	7.176
线性噪声图2	3.580	5.739	7.722

表2 相同压缩比下与JPEG2000的PSNR和SSIM对比表

测试图像名	感兴趣区域星图压缩		JPEG2000		感兴趣区域星图压缩		JPEG2000	
	(near=1)		(near=1)		(near=2)		(near=2)	
	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
高斯噪声图1	49.405	0.992	46.534	0.983	45.145	0.975	43.806	0.967
高斯噪声图2	49.905	0.991	46.515	0.983	45.154	0.975	43.834	0.968
均匀噪声图1	49.890	0.992	46.471	0.983	45.123	0.975	43.784	0.966
均匀噪声图2	49.894	0.992	46.483	0.983	45.429	0.975	44.329	0.972
线性噪声图1	51.955	0.991	49.177	0.990	47.070	0.971	46.376	0.982
线性噪声图2	51.970	0.991	49.248	0.990	47.049	0.971	46.374	0.982
月光干扰图1	50.427	0.992	49.436	0.990	46.262	0.981	46.955	0.983
月光干扰图2	50.367	0.992	49.265	0.989	46.273	0.982	46.930	0.983

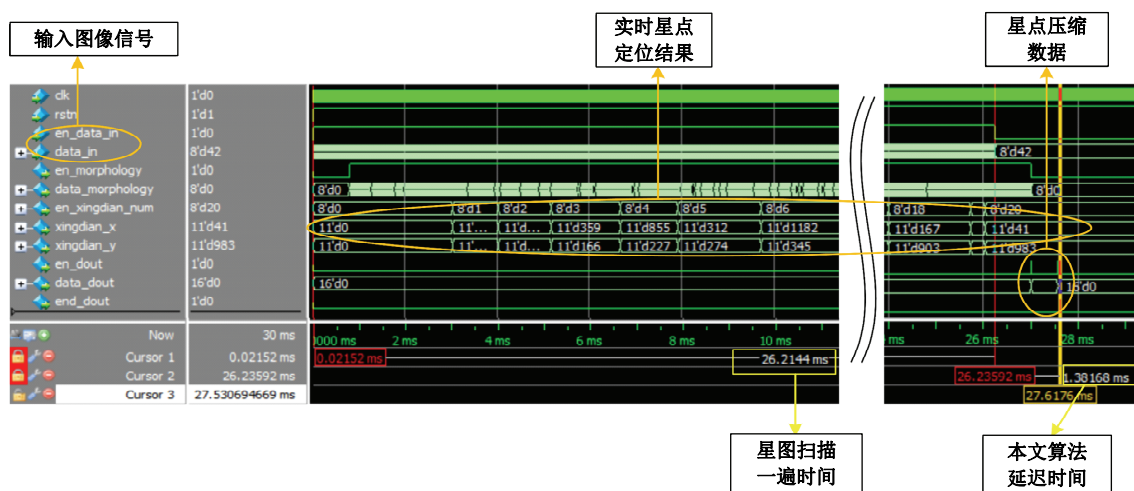


图 8 基于实时星点定位的感兴趣区域星图压缩方法 Modelsim 仿真

Fig. 8 Modelsim simulation of ROI star map compression algorithm based on real-time star point location

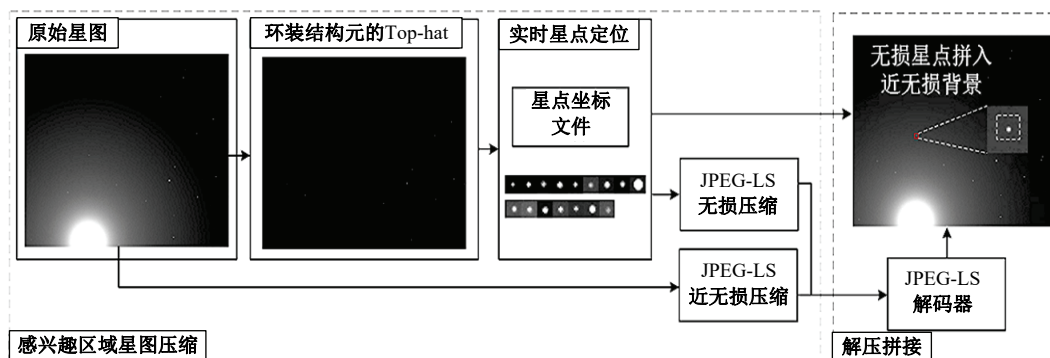


图 9 基于实时星点定位的感兴趣区域星图压缩方法及解压拼接全流程示意图

Fig. 9 ROI star map compression algorithm based on real-time star point location and the schematic diagram of the entire decompression and splicing process

由图 8 的 Modelsim 仿真图分析得出,以 50 MHz 的像素处理速度扫描一遍 $1\,280\text{ 像素} \times 1\,024\text{ 像素}$ 的 8 比特星图所需时间是 26.2144 ms,使用多幅星点个数小于 20 的模拟星图进行测试,结果表明,本文方法硬件实现的延迟时间小于 1.4 ms,处理时间在扫描一遍星图时间的基础上仅增加不到 6%,具有较好的实时性。

由表 1 分析得出,在模拟月光干扰、高斯噪声、均匀噪声与线性噪声的干扰下,背景压缩参数 near 大于 2 时,本文提出的基于实时星点定位的感兴趣区域星图压缩方法较传统 JPEG-LS 无损压缩算法压缩比提升 2 倍以上。

由表 2 分析得出,针对模拟月光干扰、高斯噪声、均匀噪声与线性噪声,相同压缩比的条件下本文方法与 JPEG2000 图像压缩算法在 PSNR 与 SSIM 两项参数指标接近。在压缩参数 near 为 2 时,本文方法的 PSNR 大于 40 dB、SSIM 大于

0.95,表明星图失真较小。同时,本文方法相比 JPEG2000 算法的有损压缩模式,可以保证星点目标信息无损,适用于星敏感器和深空探测相机等设备。

4 结束语

本文通过改进传统行目标检测算法的结构,设计了实时星点定位算法,并与环状结构元的 Top-hat 算法和 JPEG-LS 图像压缩算法结合,提出了一种基于实时星点定位的感兴趣区域星图压缩方法。利用 verilog 语言对算法进行逻辑设计并通过 Modelsim 仿真软件验证逻辑,结果表明,本文方法处理时间在扫描一遍星图时间的基础上仅增加 6%,具有较好的实时性。

采用叠加不同类型噪声的模拟星图对本文方法进行的测试,测试结果表明的本文方法可以实时准确定位星点坐标,并通过星点坐标完成感兴

趣区域星图压缩。在背景压缩参数为2的条件下,本文方法相较传统 JPEG-LS 无损压缩算法提升压缩比2倍以上,同时压缩后图像的 PSNR 大于 40 dB,SSIM 大于 0.95,对图像质量影响较小。

本文方法在保证星点信息无损失的前提下,提高了图像处理速度,具有较好的图像压缩效果和实时性,为星载平台的应用提供了技术参考,后续研究会进一步对算法进行优化,以满足更复杂的任务要求。

参考文献:

- [1] 黄冠. 星图无损压缩算法研究及其硬件描述语言设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学航天学院, 2023.
Huang Guan. Research on star map lossless compression algorithm and its hardware description language design[D]. Harbin: School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, 2023.
- [2] Zhou F, Ye T, Chai X, et al. Novel autonomous on-orbit calibration method for star sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 67: 135-144.
- [3] 刘薇, 刘松林, 郭子博, 等. 基于模型定义的光学遥感卫星星上处理系统设计[J]. 测绘学报, 2024, 53(4): 689-699.
Liu Wei, Liu Song-lin, Guo Zi-bo, et al. Design of an optical remote sensing satellite onboard processing system based on model definition[J]. Journal of Surveying and Mapping, 2024, 53(4): 689-699.
- [4] 刘向增, 范立佳, 徐雪灵, 等. 星载 JPEG-LS 图像压缩质量评价研究[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(9): 45-53.
Liu Xiang-zeng, Fan Li-jia, Xu Xue-ling, et al. Research on quality evaluation of spaceborne JPEG-LS image compression[J]. Microelectronics and Computer Science, 2021, 38(9): 45-53.
- [5] 李灵珊. 基于目标检测的星图压缩算法研究[D]. 长春: 吉林大学通信工程学院, 2024.
Li Ling-shan. Research on star map compression algorithm based on object detection[D]. Changchun: College of Communication Engineering, Jilin University, 2024.
- [6] 邓宸伟, 赵保军, 刘海燕. 星空图像压缩算法[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(12): 1096-1100.
Deng Chen-wei, Zhao Bao-jun, Liu Hai-yan. Starry sky image compression algorithm[J]. Transactions of Beijing institute of Technology, 2008, 28(12): 1096-1100.
- [7] 陈静远, 刘晓, 杜丽丽, 等. 面阵 CMOS 传感器图像噪声仿真与验证[J]. 光学学报, 2024, 44(12): 375-383.
Chen Jing-yuan, Liu Xiao, Du Li-li, et al. Simulation and verification of image noise of area array CMOS sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(12): 375-383.
- [8] 习腾彦, 袁丽华, 王树鹏. 基于局部对比度的自适应 Top-Hat 红外小目标检测[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(16): 372-384.
Xi Teng-yan, Yuan Li-hua, Wang Shu-peng. Adaptive Top-Hat infrared small target detection based on local contrast[J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2023, 60(16): 372-384.
- [9] Bai X Z, Zhou F G. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(6): 2145-2156.
- [10] 徐彬, 郑勇, 陈张雷, 等. 星光导航星点目标区域提取算法改进[J]. 测绘学报, 2023, 52(5): 760-768.
Xu Bin, Zheng Yong, Chen Zhang-lei, et al. The improvement of star target region extraction algorithm for star centroid[J]. Journal of Surveying and Mapping, 2023, 52(5): 760-768.
- [11] 练达, 周琦, 余路伟, 等. 高动态条件下星点像斑建模与补偿[J]. 飞控与探测, 2020, 3(3): 86-94.
Lian Da, Zhou Qi, Yu Lu-wei, et al. Modeling and compensation of star spot images under high dynamic conditions[J]. Flight Control and Detection, 2020, 3(3): 86-94.
- [12] 章家保, 张剑阳, 刘赫, 等. 改进游程编码算法的快速星点提取[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2025, 55(4): 1467-1473.
Zhang Jia-bao, Zhang Jian-yang, Liu He, et al. Fast star point extraction using improved run length encoding algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2025, 55(4): 1467-1473.
- [13] Xuan Wang, Lei Gong, Chao Wang, et al. UH-JLS: A parallel ultra-high throughput JPEG-LS encoding architecture for lossless image compression[C]//IEEE 39th International Conference on Computer Design, USA: University of Connecticut at Storrs, 2021,

- 335-343.
- [14] 韩宇, 袁素春, 张建华, 等. 高分七号卫星图像压缩 FPGA 设计与实现技术[J]. 航天器工程, 2020, 29(3): 169-176.
- Han Yu, Yuan Su-chun, Zhang Jian-hua, et al. FPGA design and implementation technology for compression of high-resolution satellite images from GF-7 satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(3): 169-176.
- [15] Deng L H, Huang Z H, Yao S K. A block-based JPEG-LS compression technique with lossless region of interest[C]//MIPPR 2017: Parallel Processing of Images and Optimization Techniques; and Medical Imaging, Xiangyang, China, 2018: 56-64.
- [16] 张皓晨. 杂光背景下星点提取与星图识别技术的研究[D]. 长春: 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 2019.
- Zhang Hao-chen. Research on star point extraction and star map recognition technology under clutter background[D]. Changchun: College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University, 2019.
- [17] 刘向增, 范立佳, 徐雪灵, 等. 星载 JPEG-LS 图像压缩质量评价研究[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(9): 45-53.
- Liu Xiang-zeng, Fan Li-jia, Xu Xue-ling, et al. Research on quality evaluation of spaceborne JPEG-LS image compression[J]. Microelectronics and Computer Science, 2021, 38(9): 45-53.