

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312546

# 面向北斗短报文渐进式传输图像恢复算法研究<sup>\*</sup>

纪林锋<sup>1</sup> 花国祥<sup>1,2</sup> 肖 扬<sup>1</sup>

(1.南京信息工程大学 南京 210044; 2.无锡学院 无锡 214063)

**摘要:** 北斗三代卫星技术在电力方面的短报文通信和定位技术应用日趋成熟,但利用北斗短报文进行电力应急通信图像传输的相关研究尚不完善,尤其是图像经北斗短报文传输后的失真问题解决不够理想。本文提出了一种面向北斗短报文的渐进式传输图像恢复算法,首先以 JPEG2000 图像压缩算法为例,分析了渐进式图像传输技术与北斗短报文的特点,然后提出了 JPEGRE 图像恢复算法,利用峰值信噪比与结构相似性参数反映算法性能,最后通过实验方法证明 JPEGRE 图像恢复算法与其它流行算法相比具有更好的恢复能力。本文研究旨在提高有损压缩后图像恢复程度,辅助电力应急时做出更优的应急方案。

**关键词:** 北斗短报文;图像压缩;渐进式传输;JPEG2000;电力应急通信

**中图分类号:** P228.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5025

## Research on progressive transmission image restoration algorithm for Beidou short message

Ji Linfeng<sup>1</sup> Hua Guoxiang<sup>1,2</sup> Xiao Yang<sup>1</sup>

(1. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Wuxi College, Wuxi 214063, China)

**Abstract:** The application of Beidou three-generation satellite technology in short-message communication and positioning technology in power is becoming more and more mature, but the related research on using Beidou short-messages for power emergency communication image transmission is not perfect, especially after the images are transmitted through Beidou short-messages. The resolution of the distortion problem is not ideal. This paper proposes a progressive transmission image recovery algorithm for Beidou short messages. First, taking the JPEG2000 image compression algorithm as an example, the characteristics of the progressive image transmission technology and Beidou short messages are analyzed, and then the JPEGRE image recovery algorithm is proposed. The peak signal-to-noise ratio and structural similarity parameters are used to reflect the performance of the algorithm. Finally, the experimental method proves that the JPEGRE image restoration algorithm has better restoration ability than other popular algorithms. The purpose of this research is to improve the degree of image recovery after lossy compression, and to make a better emergency plan when assisting power emergencies.

**Keywords:** Beidou short message; image compression; progressive transmission; JPEG2000; power emergency communicatio

## 0 引 言

在电力行业中,输配电领域易受外界影响从而引发严重的电力故障<sup>[1]</sup>。其中恶劣自然灾害导致的事故在总事故中占比较高,严重故障的发生原因包括大雪、暴雨、台风和雷电<sup>[2]</sup>,据广东电网统计,近三年自然灾害造成线路杆塔倒塌超过 2 300 基、主网杆塔地基沉降超过 10 处。在严重自然灾害发生的情况下,往往会丧失 5G、4G 和 3G 等移动信

号,使抢修人员无法通过手机正常通信;在偏远山区,由于信号覆盖不全面,也会导致应急中心无法通过手机通信来对电力故障抢修现场进行消息传递。以上情况不仅仅会导致国家电力建设产生经济损失,同时还对电力抢修人员的生命安全造成威胁,因此在输配电领域中紧急抢救时实时有效的信息互通就显得十分重要<sup>[3]</sup>。

基于北斗三号短报文通信可将突发事件的现场信息以图像的方式采集然后发送给电力指挥监控中心,与其建立

收稿日期:2023-01-04

<sup>\*</sup> 基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目 036000KK52200058(GDKJXM20202001)资助

数据联系,报送现场的图像信息,可快速接收指挥监控中心的指挥与调度,其用途广泛,根据沈阳航空航天大学王尔申等<sup>[4]</sup>、国防信息学院王昊等<sup>[5]</sup>专家的研究,北斗短报文通信甚至可以用于军事、航海、航天和地质勘探等各种重要场所。然而北斗短报文通信在远程数据传输中存在一定的局限性,其单次通信的容量有限,系统每次通过 RDSS 链路发送一次短报文后都需要等待很长一段时间才能进行下一条的短报文发送<sup>[6]</sup>。因为北斗短报文通信在数据传输上存在限制,所以使用北斗短报文进行图像传输时,需要对图像进行高强度压缩,利用压缩算法提高其码流的传输效率。图像压缩是图像处理、图像存储与图像传输的基础,因此为了达到尽量少的数据进行图像存储和传输的目的,需要使用适配与卫星图像图像传输的图像压缩方法。

目前应用广泛的两种卫星图像压缩算法分别是 JPEG-LS<sup>[7]</sup>与 JPEG2000<sup>[8]</sup>,与 JPEG2000 相比, JPEG-LS 虽然是无损图像压缩,但其并不支持渐进式图像传输,因此本文仅针对新一代图像压缩标准 JPEG2000<sup>[8]</sup> 压缩的图像进行图像恢复研究。JPEG2000 在支持图像有损压缩、渐进式传输和感兴趣传输编码的同时,还支持超低比特率压缩<sup>[10]</sup>。由于 JPEG2000 压缩算法与渐进式传输技术更加适配,因而被电力通信广泛应用<sup>[11]</sup>。JPEG2000 虽然在同类图像压缩技术上有优势,但是有损压缩并通过北斗短报文传输后,通过现有图像恢复算法得到的图像仍不够清晰,因此本文提出了一种面向北斗短报文的渐进式传输图像恢复算法 JPEGRE,将 DWT 域网络与像素域网络相结合,再利用损失函数进行监督,使其适配于北斗短报文传输的同时,还可以将接收端获取的图像恢复清晰。本文以电力应急图像为实验对象,北斗短报文传输为实验背景,对渐进式图像恢复算法进行分析,在网络训练平台和北斗短报文收发平台进行图像恢复实验,最后将 JPEGRE 与利用 haar 小波的 DRUNET、MWCNN 图像恢复算法和原始图像压缩算法 JPEG2000 进行数据比对,验证该算法的优越性。

## 1 适配于北斗短报文的图像压缩算法

自 2020 年 8 月国家北斗卫星导航系统新闻发布会召开后,正式宣布北斗三号的短报文通信服务进行升级拓展,其区域通信能力可以达到 1 000 汉字左右,不仅可以传送汉字和语音,还可以进行图像传输。本章节在基于北斗短报文通信的环境上进行图像压缩的研究,着重介绍 JPEG2000 算法,利用 JPEG2000 压缩算法将图像压缩至北斗短报文传输要求范围之内,达到利用北斗短报文传输图像的效果。

### 1.1 JPEG2000 压缩算法介绍

JPEG2000 是一种基于离散小波变换的卫星图像有损压缩算法,是以 JPEG 为基础开发的新一代静态图像编码。JPEG2000 作为 JPEG 的升级算法,拥有 JPEG 许多优秀性能的同时,还因为采用了 DWT 和 EBCOT,获得了非常优秀的压缩性能<sup>[12]</sup>。

JPEG2000 比传统 JPEG 多出 6 个优点,分别为低比特率下的超级压缩性能、无损和有损压缩、依据像素精度或分辨率进行渐进传输、感兴趣区域编码、码流的随机处理和获取和图像保护。

JPEG2000 正是拥有良好的编码性能,所以广泛用于各种卫星通信中。在文献[13-14]中,表明了 JPEG2000 极其适配于利用北斗 3 号卫星链路进行的北斗短报文图像渐进式传输。JPEG2000 编码器和解码器的基本流程如下图 1 和 2 所示,编码器部分先对原始图像进行预处理,接着进行离散小波变换。对图像开展有损压缩时,需要先量化小波参数。然后对编码块展开划分,编码块必须要基于个个子带进行工作划分。划分完成后,对每个编码块进行 Tier1 编码,之后让编码经过 Tier2, Tier2 编码对算数编码器(MQ)输出码进行打包处理,同时利用 PCRD 算法对码流进行截取使其分层,产生 JPEG2000 压缩标准码流。解码器流程就是编码器的逆向流程,先解包压缩码流和对 EBCOT 进行逆编码,然

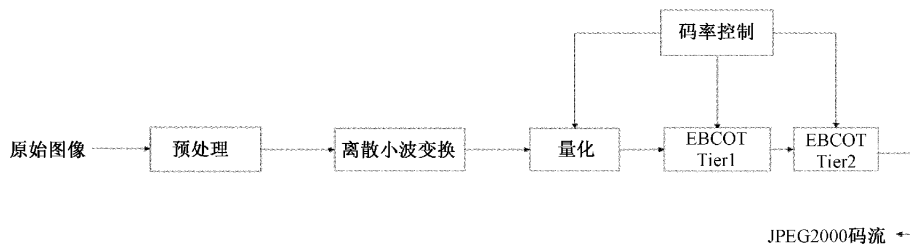


图 1 JPEG2000 编码流程

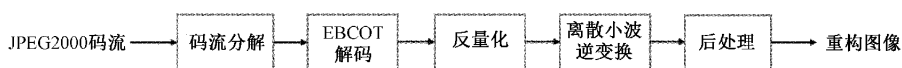


图 2 JPEG2000 解码流程

后对其反量化处理,最后对处理后的数据进行离散小波逆变换与后处理,得出重构的原始图像。

### 1.2 JPEG2000 有损压缩失真情况

JPEG2000 变换编码,其有损压缩后失真的主要原因

是小波变换后子带系数量化,通常表现为精度降低从而导致细节丢失和图像模糊。图3是压缩比为25时经过压缩传输后的重构图像对比。通过对比两张图像发现,压缩图像周边发生模糊,树叶和云朵发生了细节丢失。

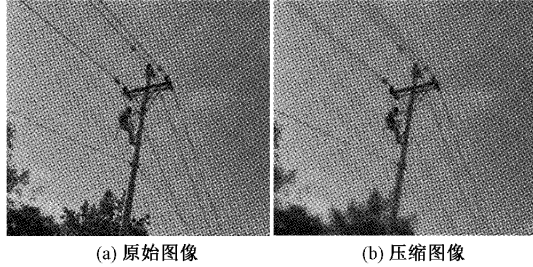


图3 压缩比为25的失真状况

## 2 图像质量恢复评估指标

由于本论文是对图像有损压缩后图像恢复技术的研究,所以需要通过观察峰值信噪比<sup>[15]</sup>来判断恢复效果的优劣;同时观察其图像结构的相似性<sup>[16]</sup>来判断图像主题结构还原程度。

### 2.1 峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)

压缩过图像后,原始图像通常与重构图像存在些许差异,为了可以直观判断图像质量的优劣,需要使用 PSNR 信号重建质量测量方法,其 PSNR 值越高,则证明图像恢复效果越好。在本文中,PSNR 为最大像素值平方比上重构图像和原始图像的均方差的绝对值,PSNR 通过均方差(MSE)公式进行定义,假设存在两个  $m \times n$  的单色图像  $I$  和  $K$ ,如果  $I$  和  $K$  的噪声相近,则他们均方误差定义为:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2 \quad (1)$$

PSNR 定义为:

$$PSNR = 20 \lg \left( \frac{\text{MAX}_I}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (2)$$

峰值信噪比作为最常见的图像质量评估指标,被大量用于图像处理质量评估中。但是 PSNR 数值与人眼对图像的评估存在一定的误差<sup>[17]</sup>,所以 PSNR 无法代表人眼的视觉感知。由上述得知,PSNR 还需要引入其他指标才可以进行图像重构质量评估,才会使评估更加贴和肉眼视觉判断结果。

### 2.2 结构相似性

卫星图像具有极高的结构性,其特征往往是重构图像的像素与原始图像存在很高的相关性,原始图像与重建图像结构信息虽然差异不大,但他细节改变人类无法通过肉眼察觉。通过探测原始图像与重构图像的结构信息,可以衡量两幅图像的相似度,从而察觉到图片的失真状态。结构相似性(structural similarity, SSIM)测量函数的公式如下:

$$SSIM = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (3)$$

式中: $x$  和  $y$  是图片, $\mu_x$  与  $\mu_y$  为  $xy$  的均值, $\sigma_x^2$  和  $\sigma_y^2$  为  $x$  的方差, $\sigma_{xy}$  为  $xy$  的均方差,其中  $c_1 = (k_1 l)^2$ ,  $c_2 = (k_2 l)^2$ , SSIM 函数的范围为  $0 \sim 1$ ,其数值越大可以证明重构图像的失真越小,原始图像与重构图像越相似。

## 3 JPEG2000 有损压缩图像恢复研究

虽然 JPEG2000 无损压缩压缩后图像不会出现失真情况,但是 JPEG2000 图像无损压缩算法无法用于电力卫星通信,所以本章提出的图像恢复算法是在 JPEG2000 有损压缩图像传输的基础上进行研究,通过 JPEG2000 图像恢复网络(JPEGRE)解决 JPEG2000 有损压缩后图像失真情况,实现重构图像的恢复。

### 3.1 JPEGRE(JPEG2000 restoration network)算法设计

JPEG2000 作为变换编码,利用离散小波变换把图像每块频率成分抽取后,进行分解得到分辨率不同的子带,之后对各个子带进行量化编码,最后利用解码器的反变换获得重构图像。因此,当小波变换本身存在量化误差时,这一误差可能会被急剧放大,最终可能导致重构图像结构的变化与像素的丢失,使其压缩图像产生模糊失真,无法运用于电力应急通信。

如上所述,将 DWT 域与像素域相结合,同时利用 DWT 域细节信息和像素域的结构信息进行图像重构,就可以避免误差放大导致的图像模糊失真情况。图像  $I$  被 JPEG2000 解压缩为像素字段的输入。为了不引入新误差,小波系数不能通过  $I$  小波变换中获得。所以直接从压缩码流中获得小波子带系数  $i$  作为 DWT 域的输入。JPEGRE 图像恢复算法的目标是从  $i$  中恢复未量化的子带系数  $G(i)$ ,然后通过小波逆变换将其合并到图像  $I'$  中,使其尽可能与原始未压缩图像  $K$  相似。同时, $I'$  在像素域中也被当做另外一个输入,用  $I$  恢复未失真图像  $F(I, I')$ ,使其也可以尽可能接近未压缩的图像  $K$ 。

### 3.2 JPEGRE 网络结构设计

JPEGRE 网络结构流程图如图4所示,同一分辨率层在 DWT 域(离散小波变换)中量化步长是一致的,所以 DWT 域仅需对相应子带进行反量化即可。相反,在像素域,网络需要从图像中学习有用的信息,图像的分辨率必须至少是小波子带的两倍。

图4的网络结构是由图2JPEG2000 解码器改进而成,整个网络分为两部分,分别为离散小波变换网络(DWT 域子网络)和像素域主网络,DWT 网络功能是从相同分辨率的小波子带中寻找信息并反量化为合适的值用于北斗传输;像素域网络任务是把  $F$  以  $G$  的输出与重构图像作为输入,学习从图像中恢复失真的细节,利用损失函数对 DWT 域子网络和像素网络进行监督。

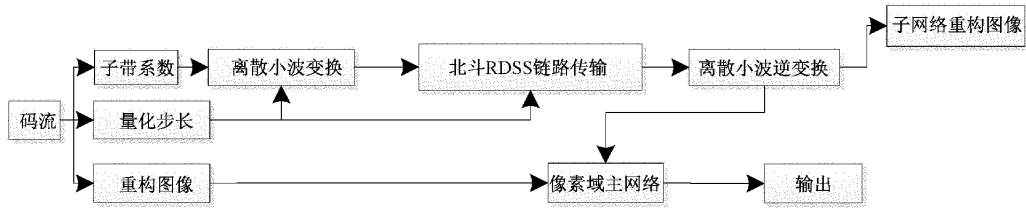


图 4 JPEGRE 网络结构

3.3 DWT 域子网设计

每个子带的校正子带系数作为 DWT 域子网输入。由于量化步长与量化过程相关,所以对应的量化步长也可以被输入到网络中,用于恢复量化前子带系数的分布。图 5

为 DWT 域子网络结构图,其主要利用离散小波变换在同分辨率的小波子带中分辨信息且把子带系数反量化,通过高通与低通滤波器进行滤波,让图像细节恢复,使图像更加平滑。

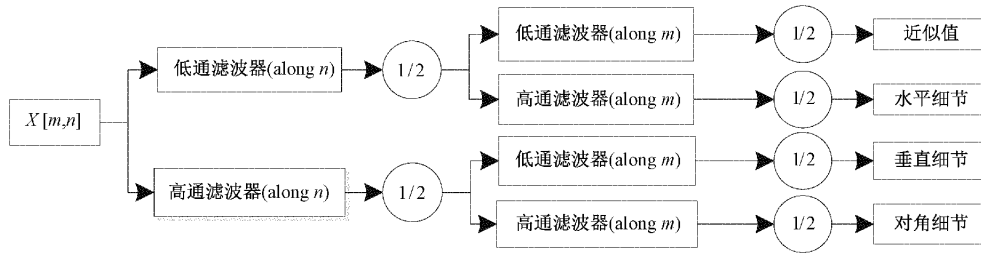


图 5 DWT 域子网结构

3.4 像素域网络

像素域网络为 JPEGRE 的主网络,可以使重构图像 I' 学习失真图像 I 的特征,调整像素域后,仍需要在像素域中完成最终恢复过程。像素域主网络结构如图 6,首先利用特征提取提取出图像的结构特征,然后通过下采样进

行两轮卷积确定特征图,特征图确定后让其通过 3 次扩张卷积来改善图像的感受野,最后通过上采样的两轮卷积使图像更加平滑,得到较好的输出图像。像素域网络通过主网络与子网络相结合,实现更好的交叉举证和图像恢复效果。

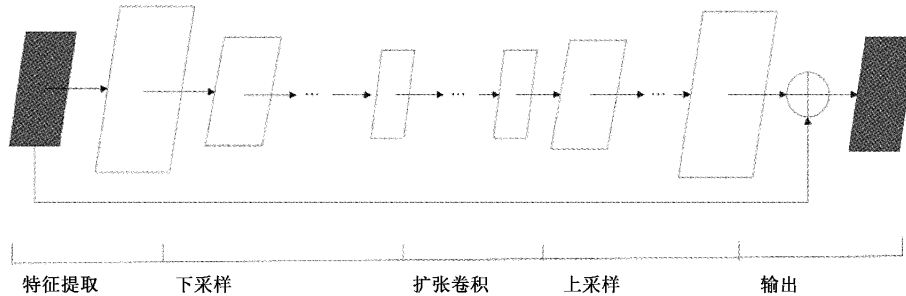


图 6 像素域网络结构

3.5 损失函数

为实现主网与子网的学习,主网与子网需要利用损失函数监督,其监督函数为复合损失函数,用于定义 JPEGRE 的损失函数公式如下。其中 O 和 O<sub>D</sub> 分别为主网和子网的输出, I 为输入原图, γ 为平衡输出参数,值域为(0,1)。

$$L = L_{DWT-OUT} + L_{OUT} = (1 - \gamma)MSE(O_D, I) + \gamma MSE(O, I) \quad (4)$$

4 北斗短报文传输图像恢复实验

4.1 北斗短报文图像恢复实验平台参数

1) 网络训练平台

网络训练平台为个人电脑,显卡为 NVIDIA GeForce

RTX 3060,图像恢复部分的代码利用开源平台的 PyTorch 进行编写,图像压缩部分仍为原始 JPEG2000 代码, JPEG2000 压缩方式选择有损压缩,设置其压缩倍率为 25。子网与主网的参数分别设置为 5 和 15,同时利用 Adam 优化器进行优化,学习率参数设置为 0.001,利用平台显示的参数来观察图像的峰值信噪比。

2) 北斗短报文收发平台

北斗短报文收发平台为北斗三号(BD3)与智能电网融合组网技术项目提供的融合装置硬件平台与软件平台,测试内容为随机拍摄图片,测试卡为 20 s 1 000 汉字的短报文双向卡,其硬件部分支持北三全频点,通道数量为 1 408,支持全星座: BDS/GPS/GLONASS/Galileo,支持

RTK 和 B2b-PPP,支持定点授时、自主优化定点位置授时、定位授时,需要 5~12 V,RTC 电池进行供电。融合装置接收信号频率范围为  $2\,491.75 \pm 8.16$  MHz,发射频点数值为  $Lf_0: 1\,615.68 \pm 4.08$ ,  $Lf_1: 1\,614.26 \pm 4.08$ ,  $Lf_2: 1\,618.34 \pm 4.08$ ,RDSS 发射功率 EIRP 范围 6~8 dBw,接收波束个数:BD2 10个;BD3 14个。图7与8分别为硬件部分与软件部分。



图8 北斗短报文收发平台软件

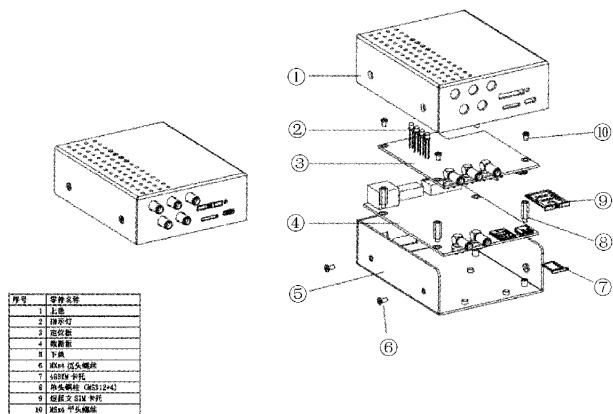


图7 北斗短报文收发平台硬件

3) 网络平台实验参数

在损失函数中,因为  $\gamma$  可以平衡主网与子网的输出,所以  $\gamma$  的取值可以影响 PSNR 提升量的值,由表1所示,  $\gamma$  值为 0.8 时信噪比提升量为最高值,所以  $\gamma$  值确定为 0.8。

4) 北斗短报文收发平台参数

利用北三终端进行图像传输,确定融合平台硬件与软件的性能,可以通过测试的数据对比来确定网络平台和终端之间的稳定性,由表2测试数据得出,图片传输成功率 80%,图像的压缩率良好,北斗短报文收发平台与网络平台的稳定性良好,失效率较低。

表1  $\gamma$  值对 PSNR 提升值影响

|             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\gamma$    | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   |
| PSNR 提升值/dB | 1.703 | 1.840 | 1.966 | 2.023 | 2.096 | 2.130 | 2.165 | 2.180 | 1.989 |

表2 北三终端图片传输测试

| 序号 | 测试内容                     | RDSS 搜星数量 | 报文条数(条) | 传输时间/s | 测试结果 | 备注                 |
|----|--------------------------|-----------|---------|--------|------|--------------------|
| 1  | 压缩前:2.63 MB<br>压缩后:10 kB | 2         | 10      | 240    | 成功   | —                  |
| 2  | 压缩前:2.63 MB<br>压缩后:10 kB | 2         | 10      | 240    | 成功   | —                  |
| 3  | 压缩前:2.63 MB<br>压缩后:10 kB | 2         | 10      | 240    | 成功   | —                  |
| 4  | 压缩前:2.63 MB<br>压缩后:10 kB | 2         | 10      | 240    | 失败   | 传输过程中丢包导致接收到的图片不完整 |
| 5  | 压缩前:2.63 MB<br>压缩后:10 kB | 2         | 10      | 240    | 成功   | —                  |
| 6  | 压缩前:2.63 MB<br>压缩后:20 kB | 2         | 20      | 480    | 成功   | —                  |
| 7  | 压缩前:2.63 MB<br>压缩后:20 kB | 2         | 20      | 480    | 成功   | —                  |
| 8  | 压缩前:2.63 MB<br>压缩后:20 kB | 2         | 20      | 480    | 成功   | —                  |
| 9  | 压缩前:2.63 MB<br>压缩后:20 kB | 2         | 20      | 480    | 失败   | 传输过程中丢包导致接收到的图片不完整 |
| 10 | 压缩前:2.63 MB<br>压缩后:20 kB | 2         | 20      | 480    | 成功   | —                  |

## 4.2 图像恢复数据对比

### 1) JPEGRE 与传统图像恢复网络对比

有损压缩图像拥有很多种图像恢复方法,其中最常用的有 MWCNN 网络和 DRUNET<sup>[18]</sup> 网络。MWCNN 图像恢复网络采用了先进的小波变换与逆变换,但是在去噪方面却不太优秀;DRUNET 图像恢复网络是目前综合性能最好的图像恢复网络,它拥有优秀的去噪、去模糊和去马赛克的能力,同时也是目前最流行的图像恢复网络。DRUNET 和 MWCNN 框架和算法都来自开源平台,为了方便对比,随机挑选 100 张与电网应急抢修现场相关图像,将 100 张图像先用 JPEG2000 进行压缩传输,然后分别把传输后的图像放入 JPEGRE、DRUNET 和 MWCNN 三种图像恢复网络中进行图像恢复,最后将其恢复图像测量出的 SSIM 与 PSNR 的值进行平均后对比,对比表见下表 3。

表 3 图像恢复能力对比

| 模型       | PSNR  | SSIM  |
|----------|-------|-------|
| JPEG2000 | 46.13 | 0.962 |
| JPEGRE   | 48.58 | 0.998 |
| DRUNET   | 46.97 | 0.968 |
| MWCNN    | 46.98 | 0.963 |

通过观察表 3 可知, JPEGRE 图像恢复网络的图像恢复性能远远优于传统的 MWCNN 网络和 DRUNET 网络,其最重要的原因是因为 JPEG2000 压缩算法的特殊性,导致传统有损压缩图像恢复算法对经过 JPEG2000 压缩后的图像恢复效果十分微弱。同时说明了 JPEG2000 中的小波变换与 haar 小波存在本质的不同,因此才导致 JPEGRE 图像恢复网络恢复的图像具有更好的峰值信噪比与结构相似性值。

### 2) JPEGRE 图像恢复主观对比

4.2 节 1) 是对 3 种图像恢复网络的 PSNR 值与 SSIM 值进行客观的数值对比,得出 JPEGRE 图像恢复网络更加先进的结论。而 4.2 节 2) 则利用 4.2 节 1) 提出的 3 种图像恢复网络恢复的图像进行主观肉眼比较,通过对比短报文传输前原图图 9、利用 JPEG2000 有损压缩算法进行北斗短报文传输后的图像图 10 与 3 种图像恢复网络恢复的图像图 11、12 和 13,选择出最好的图像恢复网络算法。

观察以上 5 幅图像,图 10 周边失真,云朵细节模糊不清,图像整体结构尚且清晰;图 11 和 12 图像细节丢失严重,图像失真情况严重,图像内容模糊不清,图像结构相似性较低,并未完成图像恢复任务;图 13 细节还原清晰,相比于图 10,图像周边平滑度提高了 30%,失真情况比较轻微,云朵细节还原完美,成功完成图像恢复任务。

通过对比图 9~13 得出, MWCNN 恢复网络与 DRUNET 恢复网络的恢复原理与 JPEG2000 图像有损压

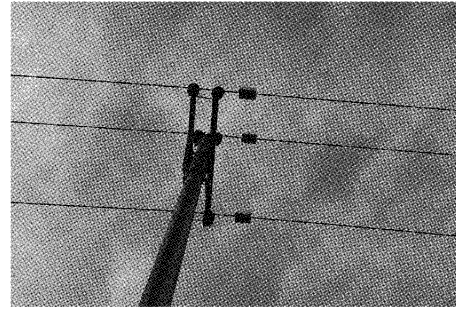


图 9 短报文传输前原图

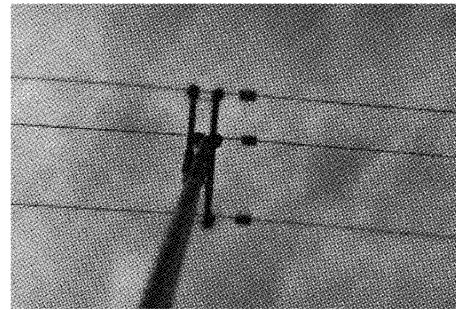


图 10 短报文传输后图像

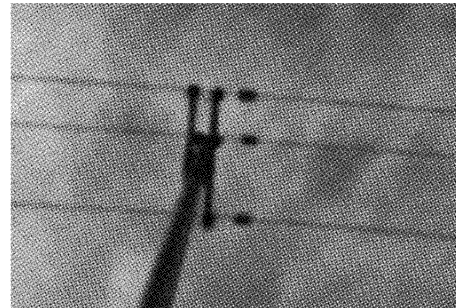


图 11 MWCNN 恢复

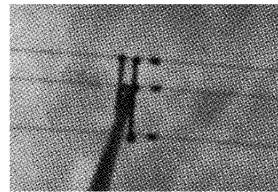


图 12 DRUNET 恢复

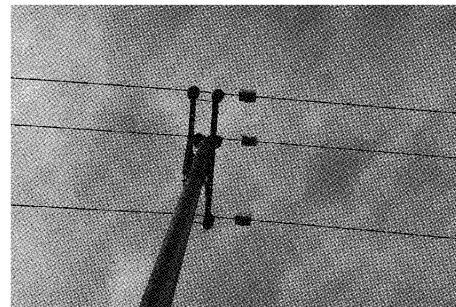


图 13 JPEGRE 恢复

缩算法不适配,导致恢复图像失真情况严重,图像结构模糊,无法在电力应急图像通信中应用。而 JPEGRE 的恢复程度明显优于前两者传统图像恢复方法,在证明其可以用于北斗短报文图像传输恢复工作的同时,也证明了 DWT 比 DCT 更有优越性。

## 5 结 论

由于北斗短报文通信在民用方面刚刚进入起步阶段,所以各种适配其通信信道的算法都有很大的优化空间。本论文对北斗短报文图像通信展开研究,主力解决其图像发送后图像失真的问题,虽然可以恢复图像经过 JPEG2000 有损压缩后发生失真的图像的基本轮廓与细节,但是在图像结构恢复优化上仍有巨大的提升空间。由于 JPEG2000 的部分专利被美国独占,所以在国内的核心文献很少。

图像恢复网络在北斗短报文通信上将会拥有很大的发展前景,不仅仅是在电力应急方面,灾害现场实时通报、航海和航空航天都可以使用。本论文提出的 JPEGRE 图像恢复网络,利用 DWT 与 JPEG2000 的高契合度,将图像恢复方法进一步优化,为提高图像压缩比提供了一种技术手段。

## 参考文献

- [1] 寇正,刘涛玮,刘轩,等.基于气象灾害的关键电力设备风险预警模型与实现方法[J].内蒙古电力技术,2021,39(5):10-14,39.
- [2] 程亮.华南沿海突发电力灾害背景下公众行为研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [3] 刘喆,杨迎春,周剑,等.面向灾后电力应急通信系统的多 AP 协作功率控制技术[J].湖北大学学报(自然科学版),2023,45(1):129-138.
- [4] 王尔申,舒皖森,刘云天,等.基于北斗/5G 的航空应急救援信息优化处理技术研究[J].电子测量技术,2021,44(24):8-13.
- [5] 王昊,孙思远.浅析北斗卫星导航系统在军事领域的应用[J].科技创新与应用,2015,114(2):71.
- [6] 周文婷,王涛,袁鸣峰,等.基于北斗短报文通信的用电信息采集系统的研制[J].电力自动化设备,2017,37(12):211-217.

- [7] 徐盛,曾永慧,樊士伟,等.基于 JPEG-LS 帧间扩展的图像无损压缩算法[J].计算机与数字工程,2006(3):7-9,31.
- [8] 赵清,林宝军,张善从. JPEG2000 遥感图像实时压缩系统[J].计算机仿真,2007(3):180-183.
- [9] 张韬.基于深度学习的近无损压缩遥感图像恢复研究[D].西安:西北大学,2021.
- [10] 刘方敏,吴永辉,俞建新. JPEG2000 图像压缩过程及原理概述[J].计算机辅助设计与图形学学报,2002(10):905-911,916.
- [11] 张海英.远程电力监控系统的数据与图像传输研究[D].厦门:厦门大学,2008.
- [12] ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1 N1646, JPEG2000 Part 1 final committee draft version1.0[S]. March, 2000.
- [13] 王然.面向卫星图像压缩的码率控制方法[D].武汉:武汉大学,2019.
- [14] 欧民,谭金林,张国华.一种基于 FPGA 和 ADV212 的遥感卫星图像 JPEG2000 实时解压缩方法[J].空间电子技术,2014,11(1):11-14.
- [15] 李江晖.改进遗传算法在图像恢复中的应用研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [16] 范新南,陈建跃,张学武,等.结构相似性的水下偏振图像复原[J].中国图象图形学报,2018,23(7):1033-1041.
- [17] 李春.基于小波分解的图像多分辨率非局部去噪方法的研究[D].天津:天津大学,2009.
- [18] ZHANG X, YANG W, HU Y, et al. DMCNN: Dual-domain multi-scale convolutional neural network for compression artifacts removal[C]. 2018:390-394.

## 作者简介

纪林锋,工学硕士,主要研究方向为电力应急通信与图像压缩技术,图像恢复技术与卫星通信等。

E-mail:3257892833@qq.com

花国祥(通信作者),工学博士,副教授,高级电力工程师,主要研究方向为电力通信与电力工作机器人等。

E-mail:hgx@cwuxu.edu.cn

肖杨,工学硕士,主要研究方向为无人带电工作机器人与机器人视觉等。

E-mail:terminalxy@163.com