

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306984

结合高频感知的大气偏振模式生成方法*

鲍昌皓^{1,2} 高欣健¹ 王文莉^{1,2} 王昕^{1,2} 高隽^{1,2}

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009; 2. 合肥工业大学图像信息处理研究室 合肥 230009)

摘要:大气偏振模式是一种稳定的自然属性,其在导航、探测等领域有广泛的应用,但由于自然环境以及周边建筑物遮挡的影响,在同一时刻获取的大气偏振信息是局部且不连续的,导致其在实际应用中受到影响。现有方法主要对大气偏振模式进行大范围图像的修复,对于高频信号的修复精度十分有限导致边缘模糊。针对该问题,本文采用软分割软合成的方法,对偏振信息进行冗余分割并合成,避免了高频信号的丢失,挖掘每个局部中的高频信号特征,并根据大气偏振模式时空连续性合理推测,保证重构的信息与真实信息保持一致,从而生成完整连续的大气偏振信息。实验结果证明,本方法能够很好地重构大气偏振模式中缺失的偏振信息,在云层干扰大于40%的实测重构实验中,本文方法的SSIM和PSNR得分相较于其他方法提高了26%和12%。

关键词:大气偏振模式;偏振信息重构;高频感知;软分割软合成

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Atmospheric polarization mode generation method based on high-frequency perception

Bao Changhao^{1,2} Gao Xinjian¹ Wang Wenli^{1,2} Wang Xin^{1,2} Gao Jun^{1,2}

(1. School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Image Information Processing Laboratory, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Atmospheric polarization mode are stable natural attributes with widespread applications in navigation, detection, and other fields. However, due to the influence of natural environments and surrounding structures, the polarization information obtained at the same time is often local and discontinuous, impacting its practical use. Existing methods mainly focus on repairing large-scale images of atmospheric polarization mode, resulting in limited accuracy in restoring high-frequency signals and causing edge blurring. To address this issue, this paper proposes a method of soft segmentation and synthesis for polarization information, which avoids the loss of high-frequency signals by redundantly segmenting and synthesizing the polarization information, thereby mining the high-frequency signal features in each local region. Additionally, based on the spatiotemporal continuity of atmospheric polarization mode, reasonable inference is made to ensure consistency between the reconstructed information and the real information, thereby generating complete and continuous atmospheric polarization information. Experimental results demonstrate that this method effectively reconstructs missing polarization information in atmospheric polarization mode. In practical reconstruction experiments where cloud interference exceeds 40%, the proposed method shows a 26% improvement in SSIM and a 12% improvement in PSNR compared to other methods.

Keywords: atmospheric polarization mode; polarization information reconstruction; high frequency perception; soft segmentation and soft synthesis

0 引言

大气偏振模式^[1-2]是太阳光在大气的散射作用下产生的具有不同偏振度和偏振化方向的偏振光集合。大气偏振模式通常使用偏振角来进行信息表征,呈现稳定的 ∞ 字形特征及连续性分布,其中所蕴含的方向信息在偏振导航^[3-6]和偏振成像^[7-10]等领域具有广泛的应用。但由于天气、设备等影响,无法精准获取完整且连续的大气偏振信息,所以研究偏振信息的获取方式具有重要意义。当前获取大气偏振信息的主要方法是使用偏振相机^[11-13]拍摄。此方案是在相机镜头上添加4个不同角度的偏振片,拍摄同一时刻下的偏振信息图像。但是想要获取全天大气偏振模式,需要加上鱼镜头来扩大视场角,但周围若有其他建筑物遮挡将影响偏振信息的获取。并且在有云天气时,天空中的云层会致使获取的大气偏振信息产生不规则的失真,无法准确得到偏振角数据,所以如何去除云层的干扰噪声,获得完整的全天域大气偏振信息是个至关重要的问题。

重构大气偏振信息的方法主要分为传统方法和基于深度学习的方法。传统方法主流使用插值法^[14],该方法通过分析缺失区域周围的像素点,按照一定规则来重构缺失区域,但是当缺失区域面积过大时,将很难重构出符合真实情况的大气偏振模式。近些年深度学习科技飞速发展,许多学者提出了基于深度学习的图像处理重构方法。其中,甘鑫等^[15]首次将深度学习的方法引入了大气偏振信息重构中,并建立了基于生成对抗网络的大气偏振模式生成网络,从局部的偏振信息生成全天域的大气偏振模式。严圆等^[16]提出了基于非局部信息的大气偏振信息生成网络,从全局不同区域提取偏振信息并挖掘偏振模式在时间分布的连续性,在空间和时间维度实现重构缺失的信息。Qian等^[17]提出使用Unet卷积神经网络对偏振图像进行二值分割从图像中分离并去除厚重的云层和建筑物遮挡区域。Pu等^[18]提出基于对抗学习的天空偏振模式图像重构方法,利用邻域一致性注意层来学习重构任务中图像内缺失区域特征之间的关系,引入一致性对抗损失来提高真实特征分布的学习能力。上述方法中,从甘鑫等^[15]首次将深度学习引入以来,各位学者分别利用时间分布连续性,二值分割,邻域一致性从偏振图像的特征角度进行推理,对偏振信息采用整体大范围修复,虽然取得了较为不错的成果,但在由于在特征上采样过程中采用硬分割,缺乏对边缘信息的修复进行约束,导致边缘模糊、高频信息丢失。针对目前深度学习处理方法处理大气偏振信息出现的边缘模糊、高频信息丢失的问题,本文提出基于高频感知的大气偏振模式生成方法,从高频信号感知入手,通过对偏振数据进行软分割,挖掘

每个不同局部结构中冗余的高频信号特征,随后对分割结果进行软合成,确保重构出的高频特征与分割前的高频特征保持一致,以此保证高频信号在特征提取过程中不会丢失,进而避免边缘模糊,实现了对缺失的偏振信息的特征修复,生成完整且符合实际的大气偏振模式。

综上,本文主要贡献如下:

1) 针对大气偏振信息受外界干扰情况导致失真的问题,本文提出了一种基于高频感知的大气偏振模式生成网络,对缺失的偏振信息进行重构生成完整大气偏振模式。

2) 针对现有重构方法使用硬分割导致偏振信息获取不完全的问题,本文设计了软分割软合成模块,该模块对偏振数据进行冗余分割,保留更多的偏振信息,挖掘出高频信号特征。

3) 针对现有重构方法出现的边缘模糊、高频信息丢失的问题,本文设计了高频感知修复模块,该模块对软分割模块保留的高频偏振信息分析推理出偏振连续性信息,从而进行更加精准的偏振信息重构。

1 大气偏振模式及其获取

原本无偏的太阳光在大气中传播时经过空气中的气体粒子和气溶胶粒子时会发生散射作用,从而产生具有不同偏振化方向的偏振光,大气偏振模式就是这些偏振光在天空形成固定分布规律的偏振光集合。大气偏振模式呈现出稳定的 ∞ 字形特征分布和变化规律,其分布和规律与观测时太阳位置有十分紧密的关系,并包含着重要且丰富的时空方位和位置信息,所以大气偏振模式在导航、探测等领域拥有着广泛的应用场景。

为了更好地获取大气偏振模式数据并将其用于大气偏振模式的进一步研究与应用,学者们从物理角度实现对太阳光在大气中传播时的建模仿真,而这类仿真中使用较多的是瑞利仿真模型和Berry仿真模型。瑞利仿真模型设定太阳光传输时只与大气中的气体粒子发生单次瑞利散射而产生偏振光,但是大气中还有很多其他气溶胶粒子,会使太阳光发生多次散射,因而瑞利仿真模型的结果与实际存在差异。Berry仿真模型通过引入奇异点来解决实际大气环境中太阳光多次散射作用带来的中性点问题,同时修正大气浑浊度来消除太阳光多次散射带来的影响。

为了采集到真实情况下的大气偏振数据,学者们还设计研发了多种设备来采集大气偏振信息^[19-21],能够在真实大气下采集不同偏振角度的偏振信息。分时测量法是目前使用较多的偏振信息获取方法,这种方法是通过使用高分辨率单反相机搭载偏振片采集不同偏振角度的偏振信息图像,然后使用Stokes矢量法^[22]计算出某一固

定时刻的大气偏振模式信息。但是在实际中使用偏振相机^[23]采集偏振信息时,天空中会存在云层干扰的情况导致某一时刻获取的大气偏振模式特征退化并且不完整的情况,无法获得连续清晰的偏振数据,如图 1 所示。

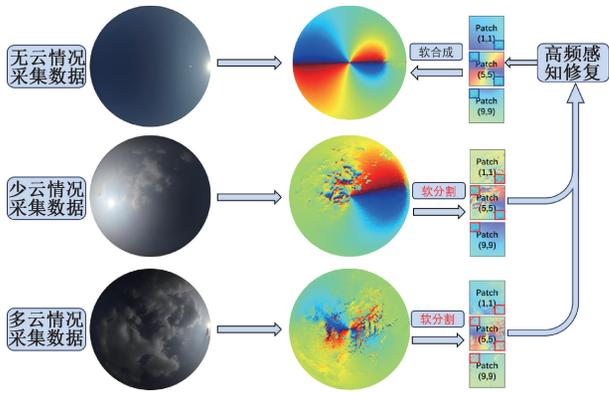


图 1 不同情况下大气偏振信息对比

Fig. 1 Comparison of atmospheric polarization information in different scenarios

2 本文方法与网络结构

本文网络主要由如下 3 个部分组成:1) 包含软分割和软合成卷积编码器和对应的卷积解码器;2) 一对补丁到标记和标记到补丁模块;3) 在补丁与标记转换模块之间的高频感知修复模块。本文网络结构如图 2 所示,受外界环境干扰而不完整的大气偏振信息先经过编码器处理得到卷积偏振信息特征图,然后通过软分割生成更小的补丁块直接嵌入标记中。第 2 步,高频感知修复模块得到上一步生成的标记,然后根据保留下来的高频信息以及大气偏振模式的时空连续性进行融合信息推理,生成细化修复后的标记。第 3 步将细化标记再转换成补丁,随后将生成的补丁块通过软合成逐个像素放回原始帧中得到修复过的偏振信息特征图,最后再用解码器对生成的特征图解码得到重构后完整的大气偏振信息图。

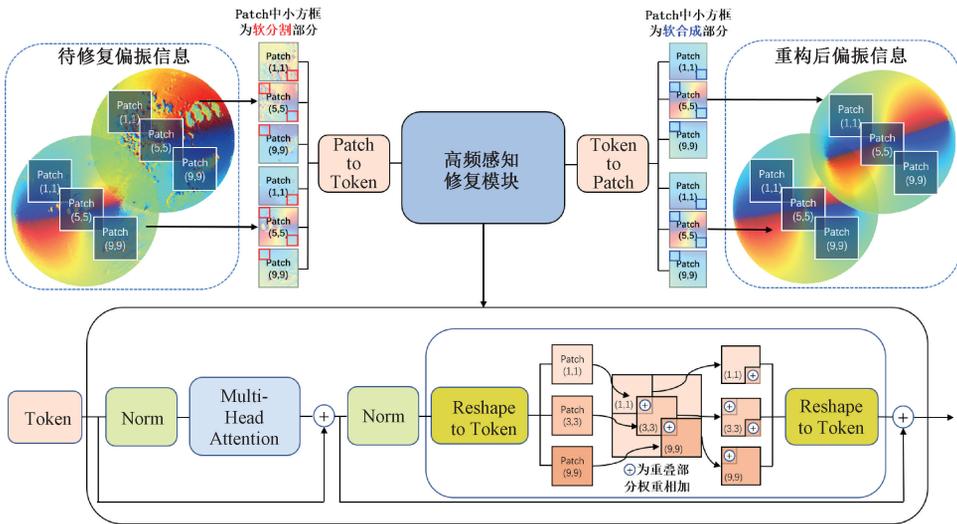


图 2 基于高频感知的大气偏振模式重构网络结构框架图

Fig. 2 Framework of reconstruction network for atmospheric polarization mode based on high-frequency perception

2.1 软分割软合成

不同于其他深度学习方法使用硬分割,本文提出将大气偏振信息图软分割成具有重合部分的补丁,即两个相邻的补丁之间存在相同的信息区域,这有助于在后续的高频感知修复模块中挖掘出不同补丁之间的偏振信息连续性关系,扩大信息感受野,从而推理出更加合理接近现实的补丁,随后在经过软合成后重新拼接组成重构后的完整大气偏振信息图。

如图 3 所示,软分割模块将每个卷积偏振信息特征图分割成 $k \times k$ 大小的补丁,其中 k 大于步长 s 。所以计算可得补丁的数量是(其中 p 是填充大小):

$$n = \left[\frac{h + 2 \times p - k}{s} + 1 \right] \times \left[\frac{w + 2 \times p - k}{s} + 1 \right] \quad (1)$$

软合成模块负责将软分割生成的 n 块补丁按照他们原始的空间位置合成,生成一个新的与原始特征图大小相同的偏振信息特征图。然而由于补丁中重叠区域的存在,所以在将补丁合成原来的形状时,软合成模块会将相邻补丁的重叠位置的特征值相加计算出新的特征值。

软分割和软合成模块是本文网络设计的基础,因为这样设计使得其他深度学习方法使用硬分割所丢失的高频信息得以保留,随后经过高频感知修复模块处理时,原

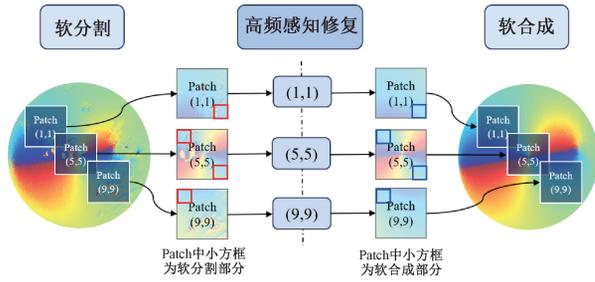


图3 软分割和软合成

Fig. 3 Soft segmentation and soft synthesis

本这些在重叠的区域中的额外偏振信息可以被模块利用起来,同时根据大气偏振模式本身具有的时空连续性进行更加合理的修复补丁生成。通过这种方式生成的补丁包含了其他区域的信息,所合成得到的重构大气偏振信息的边缘更加平滑,避免了高频模糊,得到符合更加真实情况的大气偏振信息。

2.2 高频感知修复模块

本文中设计的高频感知修复模块采用与标准的注意力模块一样的结构,但是标准注意力模块处理的是硬分割生成的补丁模块,所以将前馈网络替换成本文提出的偏振信息融合前馈网络(PIFFN),这个网络使用与标准前馈网络中一样的网络参数,但是添加了软分割以及软合成的过程,可以利用前一步软分割所生成的具有重叠区域的补丁所包含的冗余信息,从而使用注意力模块的时候获得更多的偏振信息,进行更加合理地推测。这里假设第 l 个修复块的输入补丁为 Z_l ,其中 $l \in [0, L]$, L 是大气偏振信息修复块的数量,所以一个大气的偏振信息修复块可以表示为:

$$Z'_l = MSA(LN_1(Z_{l-1})) + Z_l \quad (2)$$

$$Z'_{l+1} = PIFFN(LN_1(Z'_l)) + Z'_l \quad (3)$$

其中, MSA 和 LN 分别代表高频感知修复模块中的标准多头自注意力和层归一化。

为了更加清晰展示偏振信息融合前馈网络,本文设定 $F' = F3N(F) = F3N(LN_2(Z'_l))$,并让 f_i, f'_i 是来自 F, F' 的令牌向量,所以 $IFFN$ 可以表示为:

$$p_i = MLP_1(f_i) \quad (4)$$

$$A_j = SC(p_{j,0}, \dots, p_{j,n-1}) \quad (5)$$

$$p'_{j,0}, \dots, p'_{j,n-1} = SS(A_j) \quad (6)$$

$$f'_i = MLP_2(p'_i) \quad (7)$$

其中, MLP_1 和 MLP_2 代表偏振信息多层感知。软合成表示将 $p_{j,0}, \dots, p_{j,n-1}$ 这些一维向量合成一个二维特征图 A_j ,软分割表示将特征图分割成一维向量 $p'_{j,0}, \dots, p'_{j,n-1}$ 。注意在 $p'_i = SS(SC(p'_i))$ 中还有一个偏振特征信息融合处理。

2.3 损失函数

本文通过最小化这些损失来训练网络:

$$L = \lambda_R L_R + \lambda_{adv} L_{adv} \quad (8)$$

其中, L_R 是所有偏振信息像素的重建损失, L_{adv} 是GAN的对抗性损失, λ_R 和 λ_{adv} 分别是不同损失函数的权重。对于偏振信息重建损失,通过计算偏振信息修复区域像素 \tilde{Y} 与真实偏振信息像素 Y 之间的差值得到:

$$L_R = \|(\tilde{Y} - Y)\| \quad (9)$$

此外,使用判别器 D 来辅助训练高频感知修复模块,它可以使修复的偏振信息更加贴合实际,具有更好的真实性。这个判别器同时把真实偏振信息和重建得到的完整偏振信息作为输入,处理后输出一个范围 $[0, 1]$ 的标量,0表示假,1表示真。此判别器训练的的目的是使所有的合成信息可以与真实信息区分开来,然后令高频感知修复模块朝着此判别器相反的方向训练,直到判别器 D 无法分别出真实偏振信息和重构偏振信息。判别器 D 的损失函数表示为:

$$L_D = E_Y[\log D(Y)] + E_{\tilde{Y}}[\log(1 - D(\tilde{Y}))] \quad (10)$$

高频感知修复模块的损失函数为:

$$L_{adv} = E_{\tilde{Y}}[\log D(\tilde{Y})] \quad (11)$$

3 实验结果与分析

使用本文所设计的高频感知修复网络进行大气偏振信息重构任务实验。首先在理想天气下的实测数据加上不规则掩膜,然后进行重构实验,来验证网络的可行性和鲁棒性;在此基础上再对实测的有外界干扰(云层、建筑物、树木)数据开展大量偏振信息重构实验,验证本文提出的基于高频感知的大气偏振模式生成网络能否可以在实测受外界干扰的偏振数据中重构生成符合实际的偏振信息;之后通过对比其他深度学习的现有方法,验证本文方法优越性;最后一部分进行了消融实验验证了文中提出的高频感知修复模块在本文网络进行偏振信息重构任务中的重要性。

本文在大气偏振数据集TP2245上对网络模型进行训练,实验过程中所使用的数据来自于合肥工业大学图像处理实验室在实际条件下采集的实测数据,其中包含8000张瑞模型仿真数据和蒙特卡洛模型仿真数据,以及6000张在不同时间、地点和天气环境下实测的大气偏振数据。本文中使用随机掩膜对仿真数据和实测晴朗数据进行标注来模拟实测中云层干扰,而对于实测中有云层干扰的大气偏振数据,采用人为制造与数据中受干扰区域相对应的掩膜来进行标注。

实验环境:硬件平台为PC: Intel(R) Core(TM) i7-11700 CPU,内存为16 GB, Ubuntu18.04, Nvidia GeForce RTX2060 显卡,使用的软件为Pytorch1.6.0,

MATLAB2019a, Cuda10.1, Cudnn7.6。

3.1 可行性实验结果与分析

本文首先选取一组真实有云情况下大气偏振信息重构进行过程展示,如图 4 所示。最左边为原始信息,其次为输入信息,然后是中间过程图,为注意图和原始信息图的叠加,可以看到本网络成功识别大气偏振信息的子午线,并且根据子午线周边信息,重构出完整的大气偏振模式。

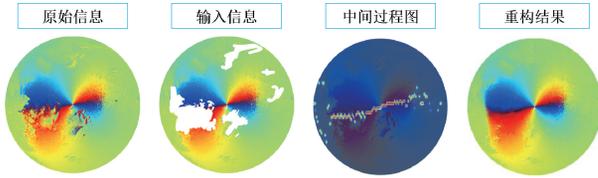


图 4 重构过程展示

Fig. 4 Reconstruction process presentation

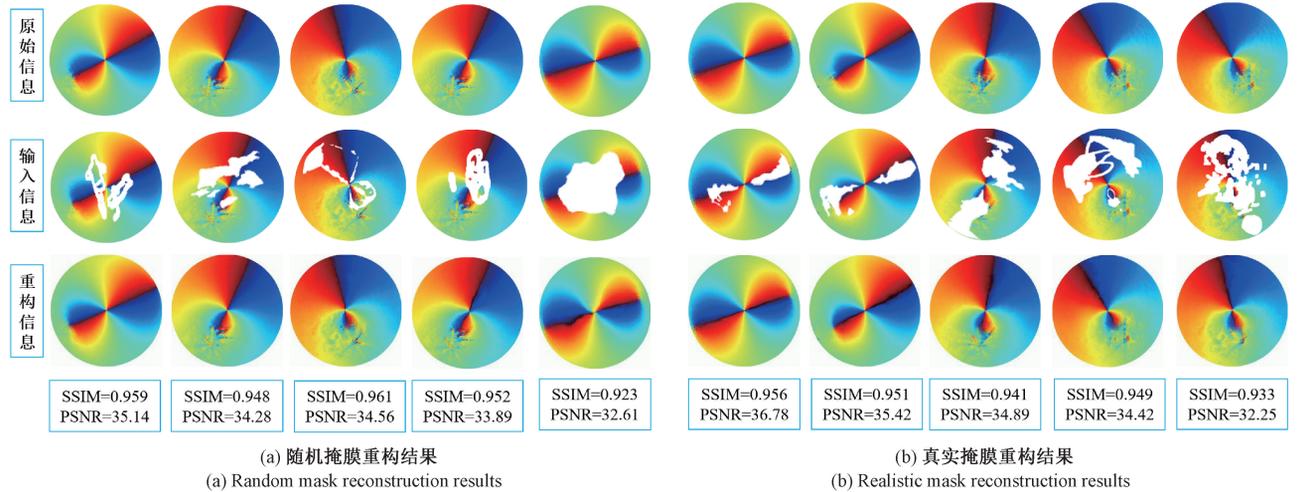
本文从大气偏振数据集 TP2245 中选出晴朗无云大气偏振信息图,分别使用从网络上下载的随机掩膜数据集以及根据采集的有云大气偏振数据集制作的真实情况掩膜集,将其加在晴朗无云大气偏振信息图上进行可行性实验。在此处引入两个指标:结构相似性 (structural similarity, SSIM) 和峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR),在本文实验中,结构相似性 SSIM 和峰值信噪比 (PSNR) 越大,则说明重构出的大气偏振信息与原始信息更接近,精度更高,效果更好,也说明本文网络效果也

更好。

从数据集中选取 5 组晴朗天气下大气偏振模式图组,因为晴朗天气情况下没有云层等噪声的影响,是完整的大气偏振模式,所以先使用随机掩膜来模拟有云情况下的噪声扰动。使用本文网络重构结果如图 5 (a) 所示,图中可以看到重构的大气偏振模式与真实的偏振信息相似度极高,并且 SSIM 均超过 0.92, PSNR 均达 32,即使在最后一组中掩膜面积超过了 40%的并且是图片中心区域缺失的情况下,重构结果 SSIM 和 PSNR 的得分依然可以取得 0.923 和 32.61,说明重构出的大气偏振模式符合原始晴朗情况下的偏振信息。

再对这 5 组大气偏振模式图组加上根据采集的其他时间段有云大气偏振数据集制作的真实情况掩膜,以此来更真实地模拟出有云层时对大气偏振模式的干扰,将此组大气偏振模式送入本文重构网络,重构结果如图 5 (b) 所示。图中可以看到即使换成了真实掩膜重构的结果依然与真实情况高度相似,并且在前 4 组干扰较少的情况 SSIM 仍保持在 0.94 以上, PSNR 保持在 34 以上,最后一组掩膜面积接近 50%的情况下 SSIM 仍达到 0.933, PSNR 达到 32.25,说明在使用真实掩膜情况下大气偏振信息重构仍能轻松实现。

通过以上两组使用不同掩膜进行的大气偏振信息重构实验可以得出,本文所提出的重构网络可以在受干扰的大气偏振信息中提取出缺失的偏振信息进行修复,生成完整的∞字形,并且与真实大气偏振信息结构相似度较高,验证了本文网络在重构偏振信息的可行性。



(a) 随机掩膜重构结果
(a) Random mask reconstruction results

(b) 真实掩膜重构结果
(b) Realistic mask reconstruction results

图 5 可行性大气偏振信息重构实验

Fig. 5 Feasibility experiment for atmospheric polarization information reconstruction

3.2 实测受干扰大气偏振信息重构

从实测数据集中选取 5 组分别存在不同面积云层噪声干扰的大气偏振数据,每组包含 5 张间隔时间小于

20 min 的大气偏振信息图,用于提供其他时刻的大气偏振信息,并用掩膜来标记大气偏振数据中被云层噪声干扰的区域。经本文重构网络修复后,得到的结果如图 6

所示。

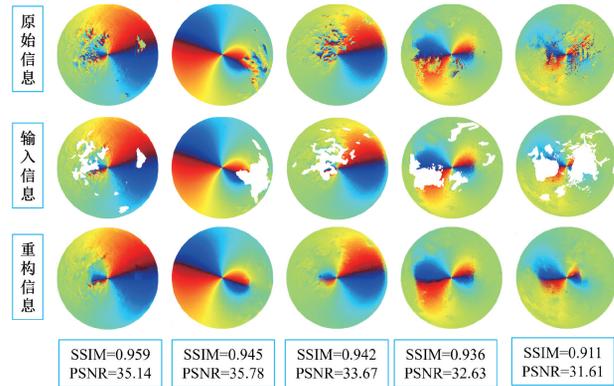


图 6 不同面积云层噪声干扰下重构结果

Fig. 6 Reconstruction results under different cloud coverage noise interference

从图 6 中可以看到,当云层面积逐渐加大时,原本完整的大气偏振信息将受到干扰导致无法呈现出无云层干扰时完整的 ∞ 字形。在经过本文所提出的重构网络结构修复后,原本不清晰的 ∞ 字形能够显示出来。从图中重构信息可以看到当云层干扰面积较小的时候,重构出的大气偏振信息与真实大气偏振信息相似度较高,并且 SSIM 和 PSNR 也能达到较高的得分;但是当云层噪声面积逐渐加大后,重构信息与真实相似度有所下降,但是仍能看出 ∞ 字形以及子午线,SSIM 和 PSNR 分别保持在 0.92 和 32 以上。

从实测数据集中选取 3 组分别存在建筑物、树木以及建筑物树木重合遮挡的不完整的大气偏振数据,随后使用掩膜来标记被遮挡产生的噪声干扰区域,送入本文重构网络修复后结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看到,在这 3 种情况干扰占比均大于 40%的情况下,本文网络依旧可以根据遮挡区域周边信息,较为完好地重现出大气偏振信息以及完整的 ∞ 字形并且 SSIM 和 PSNR 也均能保持在 0.92 以及 31 以上,验证本文网络在重构不同干扰的大气偏振信息过程中的适用性。

3.3 与其他修复结果对比

为了验证本文中提出的基于高频感知的大气偏振模式生成网络在偏振信息重构任务中的优越性,下面将本文方法与传统方法和深度学习方法进行实验修复对比。本文中选取 Criminisi 传统方法、STTN 网络 (spatial-temporal transformer networks)、NCAPG 网络 (atmospheric polarization mode generation based on neighborhood constraints) 以及 APGNL (generating atmospheric polarization mode based on non-local information) 在有云情况下的大气偏振信息重构实验中与本文网络进行对比。此处选取 5 种不同云层干扰程度的大气偏振信息图放入

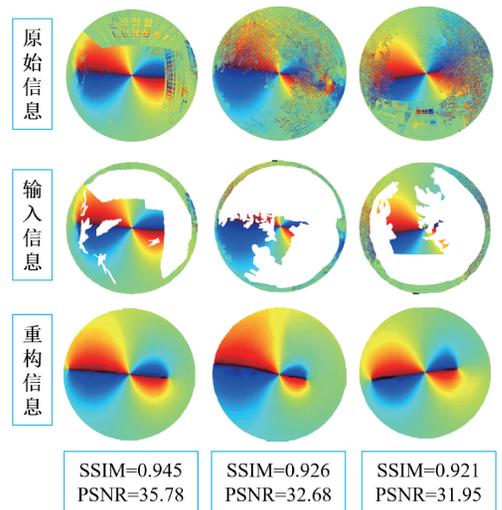


图 7 建筑物树木噪声干扰下重构结果

Fig. 7 Reconstruction results under different constructions and trees noise interference

以上网络中进行重构实验,结果如图 8 和表 1 所示。

从图 8 和表 1 中定性分析可以看到,当云层干扰面积低于 20%的时候,本文网络修复结果与其他网络并无明显差距;但是当云层面积逐渐增大到 20%~30%时,Criminisi 和 APGNL 网络已经因为云层干扰到 ∞ 字形的中心区域从而无法生成出完整的 ∞ 字形,但是本文网络仍可以较好地完成;在干扰面积达 30%~40%时,本文网络仍可以重构出较为完整的 ∞ 字形,但是其他网络均出现了 ∞ 字形扭曲;在干扰面积达到 40%以上之后,只有本文网络能够较好地重构出 ∞ 字形及子午线,并且去除云层噪声,产出真正符合实际情况的大气偏振信息。

随后进行重构速度对比实验,本文中选取干扰面积大于 40%组的各深度学习网络运行时间以及这 5 组的平均运行时间进行展示,如表 2 所示。

从表 2 可以看到本文方法处理速度均优于其他深度学习方法,这是因为在高频感知修复模块中,本文采用了用传统注意力模块相同的参数量,所以相较于其他加入其他参数的深度学习方法,本文网络运行速度更快。

3.4 消融实验

为了验证高频感知修复模块和软分割软合成模块在本文所提出的基于高频感知的大气偏振模式生成网络中的重要性,此处分别设计 3 组消融实验,第 1 组为不包含软分割软合成模块和感知高频感知的网络,第 2 组为不包含软分割软合成的网络,但是使用高频感知,第 3 组为不包含高频感知的网络,但是包含软分割软合成。将这 3 组网络模型分别在有云层干扰的大气偏振数据上进行重构实验,然后分析对比两组网络生成的结果,计算出 SSIM 和 PSNR 得分,所得数据如表 3 所示。

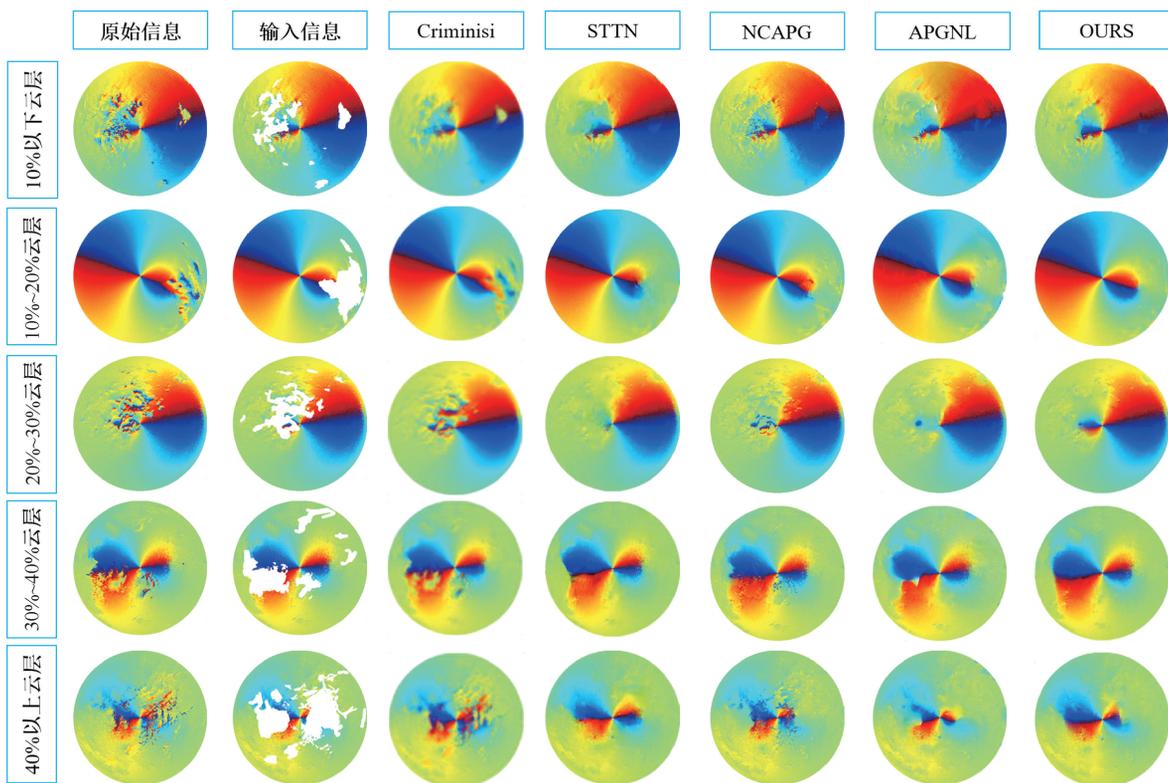


图 8 有云情况下不同方法重构结果对比

Fig. 8 Comparison of different methods reconstruction results under cloudy conditions

表 1 各方法重构结果定量对比 (PSNR/SSIM)

Table 1 Quantitative comparison of each method reconstruction results (PSNR/SSIM)

方法	Proportion of Cloud Area					
	Under 10%	10%~20%	20%~30%	30%~40%	Over 40%	
SSIM	Crimimisi	0.884	0.853	0.798	0.723	0.632
	STTN	0.933	0.931	0.915	0.912	0.838
	NCAPG	0.937	0.935	0.892	0.905	0.856
	APGNL	0.937	0.935	0.892	0.905	0.856
	Ours	0.959↑	0.945↑	0.942↑	0.936↑	0.911↑
PSNR	Crimimisi	31.68	31.04	29.51	27.96	26.73
	STTN	30.38	30.26	30.09	29.61	27.29
	NCAPG	32.35	32.02	30.66	29.69	26.43
	APGNL	32.35	32.02	30.66	29.69	26.43
	Ours	34.14↑	34.78↑	33.67↑	32.63↑	31.61↑

表 2 重构速度对比

Table 2 The reconstruction speed comparison

方法	STTN	NCAPG	APGNL	本文
40%以上云层	3.29	3.56	3.47	3.25
云层占比平均	3.22	3.34	3.22	3.19

从表 3 中可以定量地看到,在云层低于 20% 的时候,本文提出的包含软分割软合成的大气偏振模式重构网络修复出来的结果得分与另外 3 种网络差距并不大,提升

能力十分有限。但是当云层面积加大到 20% 以上时,另外 3 种的重构网络修复精度与有软分割软合成的重构网络差距就会随着干扰云层面积的加大而逐渐拉大,可以看到在云层面积达到 40% 以上的时候,相比较不包含软分割软合成和高频感知的网络,本文重构网络的 SSIM 得分提高了 0.039,PSNR 得分提高了 2.52。出现这种情况是因为当云层干扰面积较小的时候,无软分割软合成的重构网络也能够从干扰区域周围获取足够的信息来填补云层干扰的区域,但是当云层面积逐渐加大之后,这个网

表3 消融实验对比结果
Table 3 The result of ablation experiments

云层干扰面积	不包含软分割软合成和 高频感知的网络		不包含软分割软合成的网络		不包含高频感知的网络		包含软分割软合成和 高频感知的网络	
	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR
10%以下	0.954	35.02	0.955	35.02	0.955	35.10	0.959↑0.005	35.14↑0.12
10%~20%	0.943	35.58	0.944	35.65	0.945	35.69	0.945↑0.002	35.78↑0.20
20%~30%	0.925	31.81	0.930	32.85	0.934	32.89	0.942↑0.017	33.67↑1.86
30%~40%	0.910	30.16	0.918	31.26	0.925	31.92	0.936↑0.026	32.63↑2.47
40%以上	0.872	29.09	0.894	29.94	0.902	30.56	0.911↑0.039	31.61↑2.52

络就没办法从原始信息中挖掘出更加符合真实情况的信息进行填补。不包含软分割软合成的网络由于没有软分割所提供的冗余偏振信息,重构结果依然比较差。不包含高频感知的网络虽然有了软分割软合成模块,但是没有高频感知模块将得到的冗余偏振信息进行合理地推测,所以依旧得不到较好的重构结果。但是本文重构网络可以通过软分割和软合成在补丁分割和融合过程中挖掘出更多的高频信息,推理出更加真实的大气偏振信息连续性分布特性,所以在大面积云层干扰的情况下,本文提出的网络依然能重构出更加符合实际情况的大气偏振信息。

4 结 论

针对实际采集大气偏振信息时出现的云层遮挡导致的偏振信息失真的问题,本文提出了一种基于高频感知的大气偏振模式生成方法。该方法从高频信号感知入手,通过对偏振数据冗余分割,挖掘每个不同局部结构中冗余的高频信号特征,合理推测大气偏振信息的连续性分布,保证重构组合的偏振信息与分割前的信息保持一致,实现对缺失的偏振信息的修复,生成有云天气下的完整符合实际的大气偏振模式。实验结果证明,本文提出的基于高频感知的大气偏振模式生成方法可以重构出符合实际情况的大气偏振信息,并且在处理云层干扰面积较大的时候依然可以重构高精度的大气偏振信息。本文偏振信息重构方法得到实验验证,具有良好的可行性和鲁棒性,本文所提出的方法对未来的偏振信息重构领域具有重要意义。

参考文献

- [1] AYCOCK M T, LOMPADO A, WHEELER M B. Using atmospheric polarization patterns for azimuth sensing [P]. Defense + Security Symposium, 2014.
- [2] GUANYU Q, JUN T, CHONG S, et al. A highly robust polarization orientation method based on antisymmetry of skylight polarization pattern [J]. Measurement, 2022, 204.
- [3] 江云秋,高晓颖,蒋彭龙. 基于偏振光的导航技术研究[J].

现代防御技术, 2011, 39(3): 67-70.

JIANG Y Q, GAO X Y, JIANG P L. Investigation into navigation technique based on polarized light [J]. Modern Defense Technology, 2011, 39(3): 67-70.

- [4] 褚金奎,赵开春,王体昌,等. 仿生偏振导航传感器实验模型的构建与标定[J]. 微纳电子技术, 2007(21): 376-378, 406.

ZHU J K, ZHAO K CH, WANG T CH, et al. Construction and calibration for bionic navigation sensor [J]. Micronano-electronic Technology, 2007(21): 376-378, 406.

- [5] 江云秋,高晓颖,蒋彭龙. 基于偏振光的导航技术研究[J]. 现代防御技术, 2011, 39(3): 67-70.

JIANG Y Q, GAO X Y, JIANG P L. Investigation into navigation technique based on polarized light [J]. Modern Defense Technology, 2011, 39(3): 67-70.

- [6] GUAN L, LIU S, LI S, et al. Study on polarized optical flow algorithm for imaging bionic polarization navigation micro sensor [J]. Optoelectronics Letters, 2018, 14(3): 220-225.

- [7] XIAOTIAN L, FENG L, BIAN X, et al. Polarization imaging detection method based on dynamic vision sensor [J]. Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications, 2021, 11763.

- [8] 李淑军,姜会林,朱京平,等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 803-809.

LI SH J, JIANG H L, ZHU J P, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection [J]. Chinese Optics, 2013, 6(6): 803-809.

- [9] YANG Y, YAN Q, TAO L, et al. Full stokes single photon compressive polarization imaging [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91: 053701.

- [10] 卢皓,赵开春,尤政,等. 基于偏振成像的方位角度解算算法的设计与验证[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(11): 1492-1496.

LU H, ZHAO K CH, YOU ZH, et al. Design and verification of an orientation algorithm based on polarization imaging [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(11): 1492-1496.

- [11] 陈立刚, 孟凡刚, 袁银麟, 等. 偏振相机的光学定标方案研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5 (3): 227-231.
CHEN L G, MENG F G, YUAN Y L, et al. Project of calibration method for polarization camera [J]. Journal of Atmospheric and Environment Optics, 2010, 5 (3): 227-231.
- [12] PHILIP B, RUPERT Y, CHRIS C. Multiple-view polarimetric camera. [J]. Applied Optics, 2018, DOI: 10.1364/AO.57.006329.
- [13] SHUAI L, WENQING X, JIE Z, et al. Skylight polarization measurement based on DoFP polarization camera [P]. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics (China); Univ. of Science and Technology of China (China), 2022.
- [14] 曾怀恩, 黄声享. 基于 Kriging 方法的空间数据插值研究 [J]. 测绘工程, 2007 (5): 5-8, 13.
ZENG H EN, HUANG SH X. Research on spatial data interpolation based on Kriging interpolation [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2007 (5): 5-8, 13.
- [15] 甘鑫, 高欣健, 钟彬彬, 等. 基于有限样本的大气偏振模式生成方法 [J]. 光电工程, 2021, 48 (5): 13-27.
GAN X, GAO X J, ZHONG B B, et al. A few-shot learning based generative method for atmospheric polarization modelling [J]. Opto-Electronic Engineering, 2021, 48 (5): 13-27.
- [16] 严圆, 高欣健, 高隽, 等. 基于非局部信息的大气偏振模式生成方法 [J]. 图学学报, 2023, 44 (3): 551-559.
YAN Y, GAO X J, GAO J, et al. A generative network based on non-local information for atmospheric polarization modelling [J]. Journal of Graphics, 2023, 44 (3): 551-559.
- [17] QIAN G Y, TANG J, SHEN CH, et al. A highly robust polarization orientation method based on antisymmetry of skylight polarization pattern [J]. Measurement, Volume 204, 2022, 112070, ISSN 02632241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112070>.
- [18] PU X K, WANG X, GAO X J, et al. Sky polarization pattern reconstruction and neutral line detection based on adversarial learning [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, DOI: 10.1109/TIM.2023.3318720.
- [19] 韩浩, 何赞泽, 杜旭, 等. 基于偏振信息图像增强的多目标检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (3): 29-38.
HAN H, HE Y Z, DU X, et al. Multi-object detection based on polarization information image enhancement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (3): 29-38.
- [20] ZHOU J, YANG Z, HUANG H. Deriving the geocentric vector and the solar vector from the atmospheric polarization pattern on LEO satellites [J]. Optik, 2018, 154: 100-108.
- [21] 李志勇, 卢松升. 基于多核 DSP 的 3 通道偏振图像 FMT 配准方法 [J]. 电子测量技术, 2022, 45 (19): 155-160.
LI ZH Y, LU S SH. 3-channel polarization images FMT registration method based on multi-core DSP [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45 (19): 155-160.
- [22] 赵鹏翔, 刘宾, 潘晋孝. 基于 Stokes 矢量的多视角水下偏振成像算法研究 [J]. 国外电子测量技术, 2021, 40 (3): 77-82.
ZHAO P X, LIU B, PAN J X. Research on multi-view underwater polarization imaging algorithm based on Stokes vector [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40 (3): 77-82.
- [23] 吕鑫, 王道档, 阮旻, 等. 用于瞬态微观轮廓检测的 Mirau 偏振干涉显微镜 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (2): 92-99.
LYU X, WANG D D, RUAN Y, et al. Polarization Mirau interference microscope for transient microscopic testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43 (2): 92-99.

作者简介



鲍昌皓, 2021 年于安徽大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为智能信息处理。

E-mail: bch1999@foxmail.com

Bao Changhao received his B. Sc. degree from Anhui University in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in Hefei University of Technology. His main research interest includes intelligent information processing.



高欣健(通信作者) 2017 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为图像处理、深度学习、人工智能、机器学习。

E-mail: gaixinjian@hfut.edu.cn

Gao Xinjian (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2017. Now he is an associate professor, master's supervisor in Hefei University of Technology. His main research interests include image processing, deep learning, artificial intelligence and machine learning.