

基于相位差分的抗噪行列解包裹算法

吴志伟 徐海芹

东华大学信息科学与技术学院

DOI:10.12238/acair.v3i2.13561

[摘要] 行列解包裹算法是光学测量领域的核心步骤之一,其主要作用在于通过消除包裹相位中由反正切运算引起的 2π 周期性跳变,重构出真实的连续相位,尽管其运算效率高,但在实际应用中存在显著局限性:当相位图中存在噪声干扰或局部相位突变时,单一行或列方向的误差会沿解包裹路径持续累积传播,形成条带状相位误差,即拉丝现象。因此,本文提出一种基于相位差分的抗噪行列解包裹算法。通过计算相邻列相位差分检测相位跳变区间,然后对跳变区间施相位补偿消除误差;最后对局部噪声点平滑处理。实验结果表明,在保证算法运算效率的前提下,显著提升了其抗噪性能,有效消除了拉丝现象,为复杂噪声环境下的相位解包裹提供了可靠解决方案。

[关键词] 相位解包裹; 抗噪

中图分类号: TN911.8 **文献标识码:** A

Noise-Resistant Phase-Difference-Based Row-Column Phase Unwrapping Algorithm

Zhiwei Wu Haiqin Xu

College of Information Science & Technology

[Abstract] The row-column phase unwrapping algorithm serves as a critical step in optical phase measurement, aiming to eliminate the 2π periodicity jumps induced by the arctangent function in wrapped phase maps and reconstruct the true continuous phase distribution. Although computationally efficient, this method exhibits significant limitations in practical applications: when noise interference or local phase discontinuities exist in the phase map, errors along a single row or column direction accumulate and propagate along the unwrapping path, resulting in strip-shaped phase artifacts that span the entire image, known as the "streaking phenomenon." To address these challenges, this paper proposes a phase-difference-based row-column phase unwrapping algorithm. The methodology involves three key steps: First, a phase difference matrix between adjacent columns is constructed to detect abrupt phase jump intervals. Second, adaptive 2π -integer-multiple phase compensation is applied to the identified jump regions to eliminate discontinuities. Finally, localized noise points are suppressed through smoothing processing to further enhance robustness. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm significantly improves noise resistance while maintaining computational efficiency, effectively mitigating the "streaking phenomenon." This advancement provides a reliable solution for phase unwrapping in complex noise-laden environments, such as industrial inspection and dynamic optical measurement systems.

[Key words] Phase unwrapping; Noise resistance

引言

相位解包裹技术作为光学干涉测量、结构光三维重建等领域核心技术,旨在消除包裹相位中的 2π 整数倍跳变,恢复连续的真实相位分布。然而,实际测量环境中普遍存在的噪声干扰、局部遮挡等问题,导致解包裹过程易出现误差累积与传播,成为制约高精度相位重建的关键挑战。近年来,国内外学者围绕相位解包裹问题提出了多种解决方案,主要可分为时间相位展开算法^[1]与空间相位展开算法^[2]。

时间相位展开算法通过采集不同时间或不同频率下的多帧相位图像,利用时序信息的关联性逐级解调出相位。它主要分为多频法相位解包裹和多强度值图案辅助的方法。多频法相位解包裹通过投影不同频率的条纹图案,计算其包裹相位差生成等效低频差频相位,直接解调级次信息。基于多强度值图案辅助法则通过投影时间序列的编码图案直接标记相位级次,结合包裹相位恢复绝对相位,典型方法如格雷码辅助法通过二值化编码划分级次区间,抗噪性强且动态适应能力强,但需额外投影编

码图案,时间成本较高。时间相位展开算法本质是牺牲了实时性但是获得更高的精度或者更强的抗噪能力。

空间相位展开算法是一种基于单幅包裹相位图的局部空间关系恢复连续相位的方法,主要有枝切法、质量导向法^[3]、最小范数法^[4]、行列解包裹等。其中枝切法通过识别包裹相位中的残差点,将最近的两个正负极性残点以最近的路径连接起来,连接完所有的残差点后再任意选取一个非残差点作为起点,在不跨越残差点路径的条件下,沿着积分路径进行解包裹,但是残差点密集时易形成无法展开的封闭区域,且枝切线影响结果的平滑性。质量导向法根据质量图,如相位导数方差、相关系数等,从高质量区域向低质量区域逐点展开。这虽然抑制误差传递,但是质量图生成依赖先验信息,低质量区域易累积误差。最小二乘法将相位展开转化为求解泊松方程,通过全局优化最小化相位梯度与包裹梯度差异,计算快、结果平滑,适合大面积连续相位,但是过度平滑细节,会造成噪声区域误差扩散。

行列解包裹算法通过逐行或逐列处理二维包裹相位图,逐步消2跳变以恢复绝对相位。其核心思想是将二维解包裹问题转化为一维解包裹问题的组合,其运行效率高,但抗噪能力弱,噪点引起的错误相位会沿着行或者列传播,形成拉丝现象,严重影响相位的连续性。

针对行列解包裹算法的缺陷,本文提出一种基于相位差分的抗噪行列解包裹算法。首先计算相邻列相位的差分,然后根据相位差分结果,精准定位相位跳变区间及其方向性特征;其次,对相位跳变区域施加相位修正,然后重复上述步骤直至将错误施加到跳变区域的相位误差降低至零;最后,针对跳变起始点的局部噪声,使用均值滤波抑制噪声提高相位精度。实验结果表明,该算法在保证行列法高效性的同时,显著提升了抗噪性能,为解决复杂噪声环境下的相位解包裹问题提供了新的技术途径。

1 行列解包裹原理

作为二维相位解包裹的基础,一维相位解包裹算法构建了相位连续性恢复的理论基础。在光学相位测量中,由于需要使用反正切函数提取相位,所以原始相位数据被包裹在 $(-\pi, \pi)$ 区间内。当实际相位超出该区间时,相位值会因模 2π 运算被限制在 $(-\pi, \pi)$ 内,导致相位分布出现 2π 整数倍的阶跃式不连续突变,如图2-1所示。

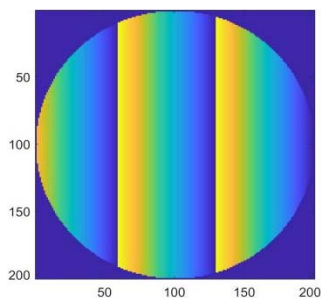


图2-1 包裹相位

因此,一维相位解包裹过程的核心思想是通过相邻像素间的相位连续性假设,逐点修正包裹相位中的相位突变,以实现相位的连续分布。具体过程如下:首先选取一个初始点的相位作为参考基准,然后计算当前点与其前一相邻点的相位差值,并将 π 设定为相位跳跃的判定阈值,若相位差值的绝对值超过阈值 π ,即表明此处出现相位突变。此时需确定当前点与初始相位点之间相位突变的次数 k ,若后一点的相位大于前一点的相位,那么该点及后续所有点均加上 $2k\pi$;反之则减去 $2k\pi$ 。完成全部像素遍历后,便能得到连续分布的真实相位。

设包裹相位为 $\phi_{\text{wrapped}}(x, y)$,真实相位为 $\phi_{\text{real}}(x, y)$,一维解包裹算法的数学过程可表示为式(2-1):

$$\begin{cases} \phi_{\text{wrapped}}(x, y) = \phi_{\text{real}}(x, y) + 2k\pi \\ k = \text{round}([\phi_{\text{real}}(x, y) - \phi_{\text{wrapped}}(x, y)] / 2\pi) \end{cases} \quad (2-1)$$

二维行列解包裹算法的本质是通过降维思想将二维相位重建问题转化为易于操作的一维序列处理。该方法充分利用了相位数据在空间维度上的连续性特征,将整幅相位图视为由若干连续排列的行向量或列向量构成的数据集,通过逐行或逐列的一维解包裹实现全局相位连续性。具体的实施步骤如下:参照一维解包裹的原理,在干涉图中任选的一行(或者一列)作为解包裹起点,进行一维相位解包裹,消除该行中的相位跳变,得到连续的真实相位序列。此时,该中间行的相位值已准确反映实际相位信息,可作为后续二维解包裹处理的起点,成为整个干涉图的相位解包裹的基准行。

在完成基准行的相位解包裹后,该算法进入二维扩阶阶段,以中间行的连续相位序列为参考基础相位,系统采用逐列递推的策略向图像上下两侧延伸解包裹计算,计算其与已解包裹的相邻列对应像素的相位差,若相位差值绝对值超过 π ,则通过叠加或减去 2π 的整数倍修正相位跳变,确保行间相位连续,最终得到的结果图2-2所示

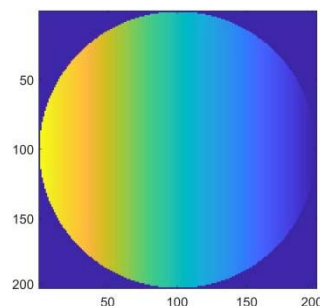


图2-2 解包裹相位

行列解包裹算法虽然凭借其路径可控性和计算简洁性成为相位解包裹的主流方法,但其内在的路径依赖性也埋藏着显著的技术隐患。该算法的核心风险源于其单向递推机制——处理过程中的每个相位修正决策仅依赖当前解包裹路径上的相邻像素信息。当相位图中出现以下典型干扰时,算法的局限性会集中

暴露并沿解包裹路径传播: 其一, 在散斑噪声密集区域, 随机相位跳变会被误判为真实相位突变, 导致错误的 2π 补偿值累积; 其二, 局部遮挡造成的相位信息缺失会中断相位梯度传递逻辑, 使后续像素解包裹失去可靠参照基准。

这种误差传播的物理表现即为拉丝现象: 在解包裹结果中, 初始误差点会沿着处理路径方向延伸出条带状相位畸变区域, 如图2-3所示。首个异常点的修正错误会迫使后续所有像素的相位值被迫叠加相同的补偿相位, 最终导致整列甚至大面积的错误相位解包裹。

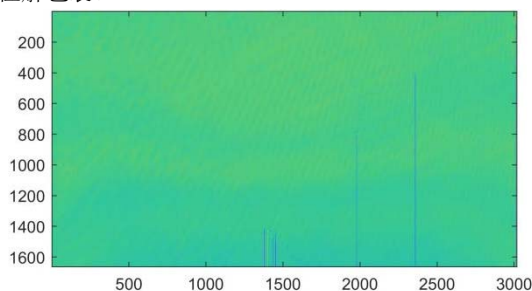


图2-3 解包裹相位中的拉丝现象

2 基于相位差分的抗噪行列解包裹算法

针对传统行列解包裹算法在噪声干扰下易产生误差传播的问题, 在波前平滑的前提下, 本文提出一种基相位差分的抗噪行列解包裹算法。具体步骤如下:

首先在已完成解包裹的相位中选择不存在拉丝现象的一列, 然后由该列向两侧扩展, 不断计算每一列与其前一列的相位差值。当检测到相位差的绝对值在某区域内连续出现超过的相位突变时, 算法将自动标记该区域为误差传播段。这种基于连续区间的判定策略, 可有效区分真实相位跳变与噪声引发的局部畸变。第列与第列的相位差可用式(3-1)表示:

$$\Delta\varphi(n, m) = \varphi(n, m) - \varphi(n-1, m) \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (3-1)$$

若 n 在连续区间 $[N_0, N]$ 满足 $|\Delta\varphi(n, m)| > \pi$, 则判定该区间存在相位跳变:

其次针对标记的异常区间, 算法根据相位突变方向实施差异化补偿: 如果 $\Delta\varphi(n, m)$ 大于 π , 则对该正突变区域叠加 -2π 补偿值, 如果 $\Delta\varphi(n, m)$ 小于 $-\pi$, 则对该负突变区域叠加 2π 补偿值。该过程中仅对异常区间实施补偿, 避免因为补偿导致的二次误差。

系统通过循环执行上述检测-补偿流程实现相位的渐进优化。每次迭代后重新评估相邻列之间的最大相位差值, 直至所有

区域的相位差的绝对值稳定在阈值 π 以内。这种迭代机制通过多轮次精细调整最终达成全局相位连续性。实验表明, 通常3到5次迭代即可使存在拉丝现象的干涉图达到平滑状态, 如图3-1所示。

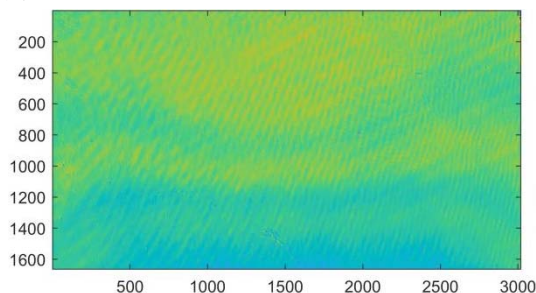


图3-1 去除拉丝现象后的解包裹相位

上述过程虽然可以消除干涉图中的拉丝现象, 但是对于强噪声或遮挡所引起的孤立跳变起始点, 该算法并不能消除, 因为这些噪声的区域并不大, 通常在2个像素左右, 所以直接以异常点为中心, 采集其上下相邻像素的相位的平均值, 重构出符合局部相位变化趋势的合理值。该策略既能消除尖锐噪声点, 又可保留真实的相位边缘特征, 避免了传统滤波方法导致的细节模糊问题。

3 结论

通过上述分析可知, 本文提出的基于相位差分的抗噪行列解包裹算法有效的解决了以下三点问题: 其一, 通过分析相位差分数据, 准确的找到了噪声传播段; 其二, 迭补偿机制逐步消除了噪声传播引起的带状误差, 消除了拉丝现象; 其三, 局部修复策略针对性处理噪声源, 降低其对相位精度的影响。实验表明, 经该算法处理后的解包裹相位中的拉丝现象被完全消除, 相位曲面呈现出良好平滑性。

[参考文献]

- [1]金川, 肖朝. 基于时间相位的反向条纹测量方法[J]. 成都信息工程大学学报, 2016, 31(04): 382-385.
- [2]张颖, 曹益平. 一种尽可能抑制拉线误差的快速空间相位展开算法[J]. 光学与光电技术, 2024, 22(02): 1672-3392.
- [3]太曼力, 李文国, 刘韬, 等. 基于质量引导的枝切法相位解包裹算法[J]. 电子科技, 2024, 37(07): 72-80.
- [4]吴旭辉, 刘娇娇, 王丙楠, 等. 基于区域分割的枝切与最小二乘法相位解包裹融合算法[J]. 激光杂志, 2024, 45(04): 75-80.

作者简介:

吴志伟(1996--), 男, 汉族, 江苏省连云港市人, 硕士研究生在读, 电气工程。