

Rauschquantifizierung in modulo- 2π -dargestellten räumlichen Phasenverteilungen

Alexander Höink*, Daniel Carl*, Björn Kemper*, Cornelia Denz**, Gert von Bally*

*Labor für Biophysik, Universitätsklinikum Münster

**Institut für Angewandte Physik, Universität Münster

<mailto:LBiophys@uni-muenster.de>

Ein Algorithmus zur Rauschquantifizierung von holographisch interferometrisch ermittelten modulo 2π vorliegenden Phasenverteilungen wird charakterisiert. Ergebnisse an mit digitaler Holographie und elektronischer Specklemuster-Interferometrie experimentell ermittelten Phasenverteilungen demonstrieren die Einsatzfähigkeit des Verfahrens.

1 Motivation

Bei kohärenten optischen Messverfahren zur Bestimmung räumlicher Phasenverteilungen und Phasenänderungen, wie z. B. bei der Digitalen Holographie [1], ist die Phasenauflösung durch das Phasenrauschen limitiert. Zur Optimierung der Phasenauflösung von Experimentalaufbauten ist es notwendig, das Rauschen von Phasenverteilungen zu minimieren und die daraus resultierende Phasenauflösung präzise zu quantifizieren. Hierzu wurde ein Rauschquantifizierungsalgorithmus für modulo 2π vorliegende Phasenverteilungen entwickelt (nachfolgend als „Dreiecks-Algorithmus“ bezeichnet), und mit einem ausschließlich Sinus-Kosinus basierten Rauschquantifizierungsalgorithmus verglichen.

2 Methode

Abb. 1 zeigt schematisch das Prinzip der Rauschquantifizierung mit dem „Dreiecks-Algorithmus“ am Beispiel einer Phasenverteilung φ modulo 2π . Zunächst wird φ mit einem Sinus-Kosinus-Mittelwertfilter geglättet [1, 2]. Anschließend werden in einem Fenster definierter Größe (ROI) sowohl φ als auch die geglättete Phasenverteilung $\bar{\varphi}$ dreieckstransformiert ($\varphi_D, \bar{\varphi}_D$) und um $\pi/2$ phasenverschoben ($\varphi_{DS}, \bar{\varphi}_{DS}$) (siehe Flussdiagramm in Abb. 1). Zur Vermeidung einer Unterbewertung des Phasenrauschens erfolgt jeweils innerhalb der ROI die Berechnung der Standardabweichungen $\sigma_D(\Delta_D)$, $\sigma_{DS}(\Delta_{DS})$ der Phasendifferenzen $\Delta_D = (\varphi_D - \bar{\varphi}_D)$ und $\Delta_{DS} = (\varphi_{DS} - \bar{\varphi}_{DS})$, woraus das Maximum $\sigma_{max} = \text{Max}(\Delta_D, \Delta_{DS})$ ermittelt wird. Die Bestimmung des mittleren Rauschens σ_m einer Phasenverteilung erfolgt durch Abrastern mit der ROI bei anschließender Mittelwertbildung. Abb. 2 demonstriert am Beispiel eines Schnittes durch einen simulierten linearen Phasenanstieg mit durch Rauschen bewirkten lokalen Maxima die Auswirkungen der Dreieckstransformation.

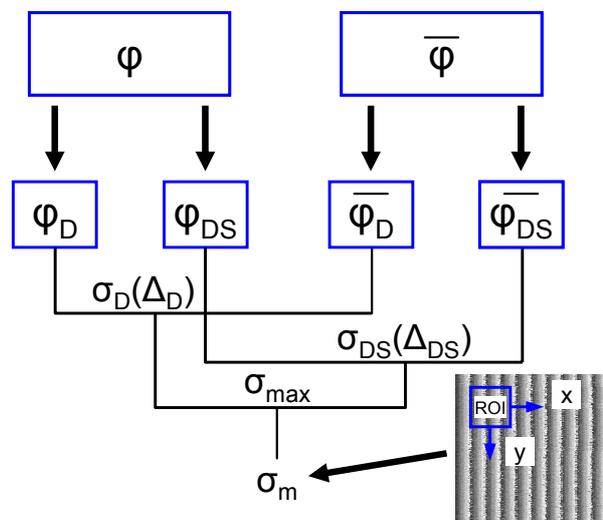


Abb. 1 Prinzip der Rauschquantifizierung bei Phasenverteilungen modulo 2π .

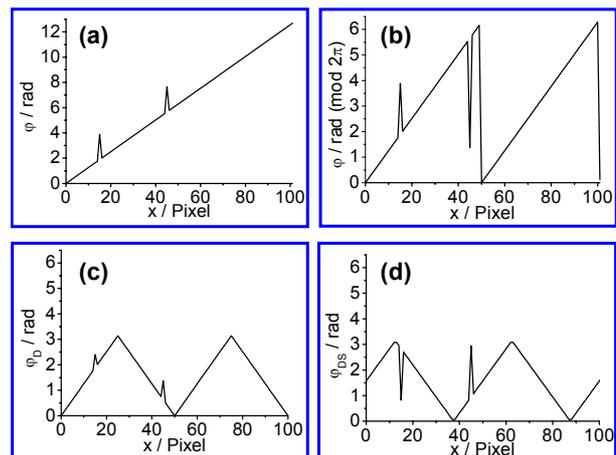


Abb. 2 Illustration zur Dreieckstransformation von Phasenverteilungen modulo 2π . (a): linearer Phasenanstieg mit 2 lokalen Maxima, (b): modulo 2π Darstellung von (a), (c): Dreieckstransformierte von (b), (d): Dreieckstransformierte von (b) + $\pi/2$.

3 Charakterisierung an simulierten Phasenverteilungen

Abb. 3 und Abb. 4 zeigen Ergebnisse von Untersuchungen mit dem „Dreiecksalgorithmus“ an simulierten räumlichen Phasenverteilungen modulo 2π im Vergleich zu einem Sinus-Kosinus basierten Algorithmus (SinCos) [2]. Dabei werden mit dem „Dreiecksalgorithmus“ bei vorgegebenem Rauschen bis $\sigma_m = 0,3$ rad Abweichungen im Bereich von $\approx 1\%$ ermittelt während durch SinCos eine Überbewertung des Rauschens erfolgt (Abb. 3).

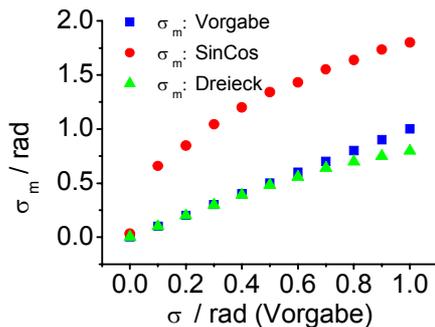


Abb. 3 Mittleres Rauschen σ_m bei simulierten räumlichen Phasenverteilungen modulo 2π (5 Streifen pro 512 Pixel) mit vorgegebenem Rauschen σ mit dem „Dreiecksalgorithmus“ (Dreieck) im Vergleich zu einem Sinus-Kosinus basierten Algorithmus (SinCos) [2]. Für den „Dreiecksalgorithmus“ wird bis $\sigma = 0,3$ rad eine Abweichung von der Vorgabe im Bereich von $\approx 1\%$ ermittelt.

In Abb. 4 ist das mit dem „Dreiecksalgorithmus“ und SinCos ermittelte Rauschen σ_m in Abhängigkeit der Raumfrequenz der Phasenstreifen modulo 2π bei einer Vorgabe $\sigma = 0,1$ aufgetragen. Mit SinCos werden gegenüber der Vorgabe deutlich überbewertete Werte für σ_m ermittelt, welche in Abhängigkeit der Streifendichte variieren. Der Dreiecksalgorithmus liefert im Vergleich zu SinCos jeweils konstante Werte mit Abweichungen im Bereich von $\approx 2\%$.

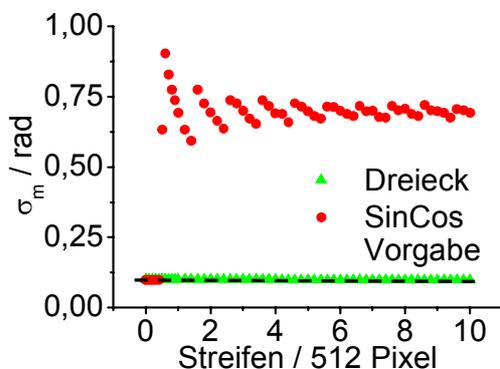


Abb. 4 Bestimmung von σ_m bei simulierten räumlichen Phasenverteilungen mit überlagertem Rauschen $\sigma = 0,1$ rad in Abhängigkeit der Anzahl der Phasenstreifen pro 512 Pixel im Vergleich für den „Dreiecksalgorithmus“ (Dreieck) und SinCos.

4 Einsatz an experimentell ermittelten Phasenverteilungen

Abb. 5 und Abb. 6 zeigen Ergebnisse vom Einsatz des „Dreiecksalgorithmus“ bei der Quantifizierung des Rauschens von Phasendaten, welche experimentell mit digitalholographischer Mikroskopie [3] und elektronischer Specklemuster-Interferometrie [2] ermittelt wurden.

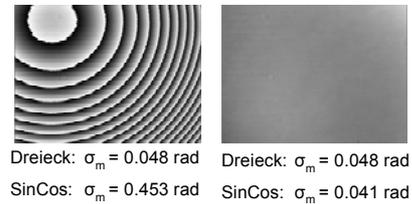
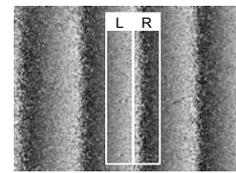


Abb. 5 Bestimmung von σ_m bei digitalholographisch rekonstruierten räumlichen Phasenverteilungen. Links: nicht optimal angepasste Rekonstruktionsparameter, rechts: optimierte Rekonstruktionsparameter).



σ_m	Links(L)	Rechts(R)	0,83
Dreieck	0,77	0,88	0,83
SinCos	0,98	1,83	1,41

Abb. 6 Bestimmung von σ_m bei der räumlich phasenschiebenden Specklemuster-Interferometrie. Links(L): Bereich mit linearem Differenzphasenanstieg, rechts(R): Areal, welches einen Phasensprung modulo 2π aufweist.

5 Zusammenfassung

Der vorgestellte „Dreiecksalgorithmus“ ermöglicht eine Quantifizierung des Rauschens in räumlichen Phasenverteilungen modulo 2π unabhängig von der Anzahl und Ausrichtung der Phasenstreifen. Die Ergebnisse an mit digitaler Holographie und elektronischer Specklemuster-Interferometrie ermittelten Phasenverteilungen demonstrieren die Einsatzfähigkeit des Verfahrens bei der Beurteilung von holographisch interferometrischen Phasennessdaten.

Literatur

- [1] T. Kreis, *Holographic Interferometry: Principles and Methods*, Akademie-Verlag, Berlin (1996)
- [2] B. Kemper, J. Kandulla, D. Dirksen, G. von Bally, „Optimization of spatial phase shifting in endoscopic electronic speckle pattern interferometry“, *Optics Communications* **217**, 151-160 (2003)
- [3] D. Carl, B. Kemper, G. Wernicke, G. von Bally, „Parameter optimized digital holographic microscope for high resolution living cell analysis“, *Appl. Opt.* **43**, 6536-6544 (2004)

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) FKZ 13N8183.