

# NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ẢNH CHO HỆ THỐNG QUANG HỌC ĐỘ SÂU TRƯỜNG MỞ RỘNG BẰNG KẾT HỢP HAI ẢNH CỦA HAI MẶT NẠ ĐỐI XỨNG XUYÊN TÂM

## IMPROVING IMAGE - QUALITY FOR EXTENDED DEPTH - OF - FIELD OPTICAL SYSTEM BY COMBINING TWO IMAGES OF TWO RADIALLY SYMMETRIC PHASE MASK

<sup>1</sup>Lê Văn Nhu, <sup>2</sup>Trần Trọng Thắng

<sup>1</sup>Học Viện Kỹ thuật quân sự

<sup>2</sup>Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 05/10/2021, Ngày chấp nhận đăng: 24/12/2021, Phản biện: PGS.TS. Vũ Hải

### Tóm tắt:

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất sự kết hợp ảnh của hai mặt nạ pha đối xứng xuyên tâm cho nâng cao chất lượng tạo ảnh của hệ thống tạo ảnh. Phương pháp đưa đến bằng quá trình xử lý ảnh từ hai ảnh của hai mặt nạ pha mà đưa đến hàm truyền quang học khác nhau ở các vùng tần số khác nhau. Hai mặt nạ pha được sử dụng là hai mặt nạ pha bậc bốn. Ảnh nhận được từ hai ảnh này đưa đến chất lượng tốt hơn trên toàn miền tần số. Kết quả mô phỏng ảnh chứng minh phương pháp đề xuất đưa đến ảnh tốt hơn trên toàn miền tần số.

### Từ khóa:

Mặt nạ pha đối xứng xuyên tâm, tăng cường chất lượng ảnh, độ sâu trường (DOF), mặt nạ pha bậc 4 (QPM).

### Abstract:

In this paper, we propose the combination two images of two radially phase masks to improve image quality of imaging systems. Method is obtained by digital processing of two images of two phase masks which have two difference optical transfer functions at low frequency and high frequency regions. Two phase masks are used to be square phase masks. Images by using digital processing has better quality on all frequency region. Simulation Results demonstrated that proposed method is used to obtain good image on all frequency region.

### Keywords:

Radially phase mask, imaging improvement, Depth of Field, Square phase mask.

## 1. GIỚI THIỆU CHUNG

Ở hệ thống quang học truyền thống, ứng với mỗi giá trị khẩu độ số (NA) xác định thì sẽ đưa đến một khoảng độ sâu trường xác định mà chỉ có các vật nằm trong

vùng này mới đưa đến ảnh sắc nét và rõ ràng [1]. Tuy nhiên có nhiều ứng dụng thực tế yêu cầu một khoảng độ sâu trường rộng cho nhận các thông tin vật ba chiều như tạo ảnh y tế, các thiết bị quan sát hoặc

giảm quang sai cho hệ thống quang học. Một cách đơn giản để tăng độ sâu trường là giảm giá trị NA xuống. Tuy nhiên phương pháp này sẽ giảm độ tương phản và tín/tạp (SNR). Do vậy phương pháp này không được sử dụng phổ biến trong thực tế.

Gần đây, có một phương pháp mới được ứng dụng cho mở rộng độ sâu trường đó là một mặt nạ pha đặt thêm vào hệ thống quang học cho nhận hàm nhòe điểm (point spread function-PSF) hoặc hàm truyền điều biến (modulation transfer function-MTF) gần như bất biến trên một khoảng độ sâu trường mở rộng [2], nhờ đó thông tin vật trên một độ sâu trường lớn có thể nhận được. Một mặt nạ pha phổ biến được sử dụng là mặt nạ pha đối xứng xuyên tâm. Các mặt nạ pha này có thể đưa đến ảnh sắc nét chấp nhận được mà không cần qua xử lý ảnh hoặc để nhận được ảnh tốt hơn cần xử dụng thêm quá trình xử lý ảnh [3]. Thêm vào đó, ảnh nhận được từ mặt nạ pha đối xứng xuyên tâm sẽ không xuất hiện tạp chất (imaging artifacts) [4]. Các mặt nạ pha đối xứng xuyên tâm cho mở rộng độ sâu trường đã được đề xuất như mặt nạ pha bậc bốn (QPM) [5], mặt nạ pha logarit [6], mặt nạ pha lai ghép nhiều xạ [7], mặt nạ pha phi cầu [8]. Trong đó QPM được sử dụng phổ biến nhất trong thực tế.

Do QPM là mặt nạ pha của hàm toán học chẵn nên PSF được sinh ra không đối xứng qua mặt phẳng ảnh ở hướng dọc trục. Hay nói cách khác, MTF tại các giá trị lệch tiêu (defocus) âm và dương là khác nhau khi giá trị tuyệt đối của độ lệch

tiêu bằng nhau. Điều này đưa đến một đặc tính tạo ảnh thú vị cho QPM đó là đối với giá trị lệch tiêu dương thì hàm MTF sẽ cao ở vùng tần số thấp và bị giảm ở vùng tần số cao trong khi đối với giá trị lệch tiêu âm thì hàm MTF sẽ thấp ở vùng tần số thấp và cao ở vùng tần số cao. Thêm vào đó, chúng tôi phát hiện ra một mặt nạ pha (được gọi là sQPM) có đặc tính tạo ảnh hoàn toàn giống với QPM nhưng ngược lại đó là với giá trị lệch tiêu dương thì hàm MTF sẽ thấp ở vùng tần số thấp và cao ở vùng tần số cao trong khi đối với giá trị lệch tiêu âm thì hàm MTF sẽ cao ở vùng tần số thấp và thấp ở vùng tần số cao. Chúng tôi đề xuất phương pháp xử lý số với hai ảnh nhận được từ hai mặt nạ pha trên cho nhận được ảnh có chất lượng tốt trên toàn miền tần số.

## 2. PHÂN TÍCH ĐẶC TÍNH TẠO ẢNH CỦA QPM VÀ sQPM

Mặt nạ QPM cho mở rộng độ sâu trường có thể biểu diễn ở dạng toán học như sau:

$$f_{QPM}(x, y) = a(x^2 + y^2)^2 + b(x^2 + y^2) \quad (1)$$

Hàm đồng tử của một hệ thống quang học liên quan đến mặt nạ và độ lệch tiêu có thể biểu diễn như sau:

$$P(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\{i[f(x, y) + \psi(x^2 + y^2)]\} & \text{if } x^2 + y^2 \leq 1 \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{với } \psi = \frac{\pi L^2}{n} \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right) \quad (3)$$

trong đó,  $L$  là kích thước đồng tử;  $\lambda$  là bước sóng ánh sáng;  $f$ ,  $d$ ,  $d_0$  là tiêu cự,

khoảng cách đến vật, khoảng cách đến ảnh.

Hàm PSF có thể được tính toán từ theo biến đổi Fourier của hàm đồng tử như sau:

$$h = |FFT P(x, y)|^2 \quad (4)$$

Hàm truyền quang học (optical transfer function-OTF) có thể nhận được từ biến đổi Fourier của hàm PSF như sau:

$$H = FFT h \quad (5)$$

Hàm MTF là thành phần biên độ của OTF.

Mặt nạ pha sQPM nhận được ở dạng công thức như sau:

$$f_{sQPM}(x, y) = \max(f_{QPM}(x, y)) - a(x^2 + y^2)^2 - b(x^2 + y^2) \quad (6)$$

Có thể thấy rằng sQPM là dịch chuyển của mặt nạ QPM mà đưa đến giá trị không ở vùng ngoài biên và giá trị lớn nhất xuất hiện ở tâm.

Ảnh nhận được có thể mô tả bằng công thức như sau:

$$g = o * h + n \quad (7)$$

trong (7),  $o$  là vật và  $n$  là nhiễu. Ở miền tần số (Fourier domain) công thức (7) có thể biểu diễn như sau:

$$G = O \times H + N \quad (8)$$

trong đó,  $G$  là biến đổi Fourier của  $g$ ,  $O$  là biến đổi Fourier của  $o$  và  $N$  là biến đổi Fourier của  $n$ .

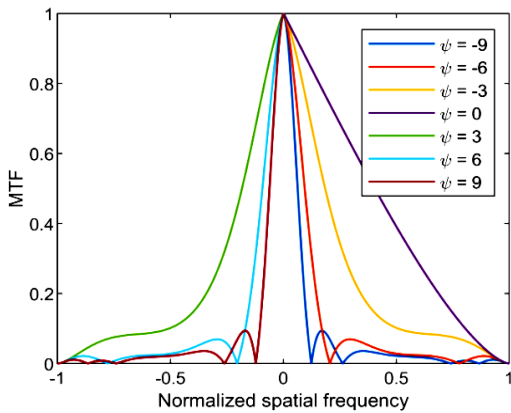
Như chỉ ra ở công thức (7), ảnh nhận

được sẽ phụ thuộc vào PSF, trong khi ở công thức (8) ảnh nhận được phụ thuộc vào OTF.

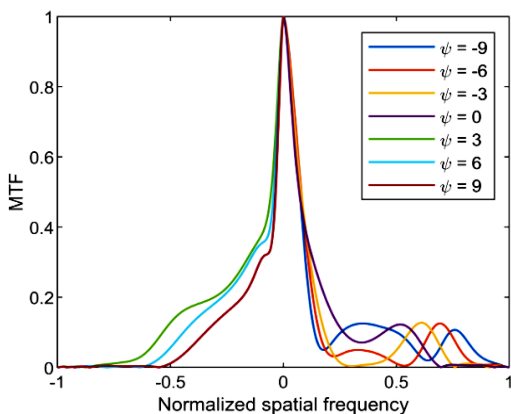
Tham số mặt nạ pha QPM và sQPM cần tối ưu hóa để nhận được đặt tính tạo ảnh tốt nhất.

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng các tham số mặt nạ QPM đã nhận được tối ưu hóa ở bài báo [2], do vậy tham số tối ưu của mặt nạ pha QPM là  $a=17.65$  và  $b=-14.6$ . Từ đó, ta có giá trị lớn nhất của mặt nạ pha QPM là 3.06. Như vậy các tham số tối ưu hóa cho hai mặt nạ pha QPM và sQPM đã được xác định. Trên cơ sở các tham số này, chúng ta sẽ tiến hành khảo sát đánh giá hàm MTF. Hàm MTF ứng với hệ thống quang học truyền thống, mặt nạ pha QPM và sQPM được chỉ ra ở hình 1. Hàm MTF càng thấp thì chất lượng ảnh nhận được càng thấp. Hình 1(a) chỉ ra, hàm MTF tương đối nhạy với sự thay đổi của độ lệch tiêu. Khi trị tuyệt đối tham số lệch tiêu càng lớn thì hàm MTF càng thấp. Do vậy, chất lượng ảnh của hệ thống quang học truyền thống sẽ suy giảm nhanh khi giá trị lệch tiêu tăng lên. Không khó để nhìn thấy rằng hàm MTF của mặt nạ pha QPM và sQPM là tương đối bất biến với độ lệch tiêu trong sự so sánh với hàm MTF của hệ thống quang học truyền thống. Từ Hình 1(b) và 1(c) thấy rằng hai hàm MTFs của mặt nạ pha QPM và sQPM là đối xứng nhau qua mặt phẳng ảnh tiêu cự. Khi giá trị độ lệch tiêu dương ( $\psi = 3, 6$  và  $9$ ), giá trị hàm MTF của mặt

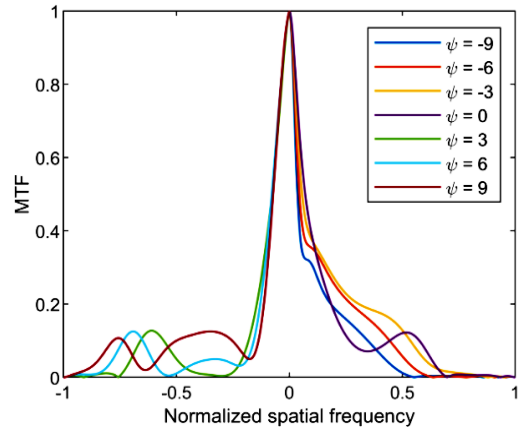
nạ pha QPM ở vùng tần số thấp là lớn hơn giá trị MTF của mặt nạ pha sQPM, trong khi giá trị hàm MTF của mặt nạ pha QPM ở vùng tần số cao sẽ thấp hơn giá trị MTF của mặt nạ pha sQPM. Điều này nghĩa rằng chất lượng tạo ảnh của mặt nạ pha QPM ở vùng tần số thấp là tốt hơn mặt nạ pha sQPM, trong khi chất lượng tạo ảnh của mặt nạ pha QPM ở vùng tần số cao là thấp hơn mặt nạ pha sQPM. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất phương pháp cho kết hợp hai ảnh này cho nhận ảnh độ chất lượng tốt trên toàn miền tần số bằng phương pháp xử lý ảnh. Phương pháp xử lý ảnh sẽ được trình bày ở mục 3.



(a)



(b)



(c)

Hình 1. Hàm MTF cho hệ thống quang học truyền thống, mặt nạ pha QPM và sQPM ứng với các độ lệch tiêu khác nhau

### 3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Hai ảnh nhận được từ hai mặt nạ QPM và sQPM mà có hai hàm MTF khác nhau cho khôi phục ảnh độ tương phản cao hơn. Ở bài báo này, chúng tôi sử dụng quá trình khôi phục ảnh mờ để nhận ảnh độ tương phản cao. Thuật toán được sử dụng là cuộn nghịch đảo Richardson-Lucy [9]. Công thức của quá trình xử lý ảnh có thể được trình bày như sau :

Thuật toán khôi phục này được mô tả bằng công thức sau đây:

$$o_{k+1} = o_k \times \left( \frac{\dot{h}^* \frac{g}{o_k * h}}{\dot{h}^* \frac{g}{o_k * h}} \right) \quad (9)$$

$$h_{k+1} = h_k \times \left( \frac{\dot{o}_k^* \frac{g}{o_k * h}}{\dot{o}_k^* \frac{g}{o_k * h}} \right) \quad (10)$$

trong đó,  $g$  là ảnh nhận được trên đầu thu;  $o$  là vật;  $h$  là hàm nhòe điểm;  $\hat{h}$  là liên hợp của hàm nhòe điểm  $h$ ;  $k$  chỉ ra giá trị của vòng lặp; ký hiệu  $*$  là tích chập. Vấn đề của chúng ta cần sử dụng thuật toán mờ Richardson-Lucy cho nhiều ảnh như thế nào. Vấn đề này được giải quyết như sau: ở mỗi vòng lặp, quá trình thực hiện từng ảnh tương ứng với độ sâu hội tụ của nó bằng sử dụng các công thức (9) và (10) và sau đó ảnh cuối cùng nhận được bằng cộng các ảnh khôi phục này. Quá trình này được diễn giải bằng hệ thống công thức (11) - (13) như sau:

$$o_{i,k+1} = o_k \times \left( \hat{h}_{i,k} * \frac{g_i}{o_k * h_{i,k}} \right) \quad (11)$$

$$h_{i,k+1} = h_{i,k} \times \left( o_k * \frac{g_i}{o_k * h_{i,k}} \right) \quad (12)$$

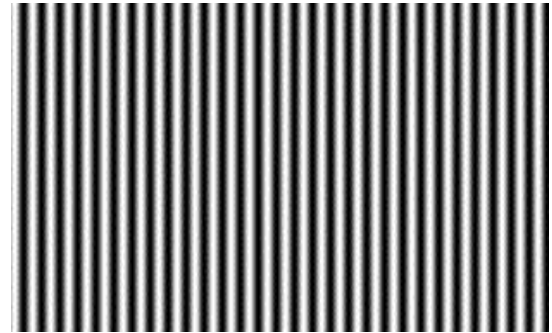
$$o_{k+1} = \sum_{i=1}^N o_{i,k} \quad (13)$$

trong đó,  $i$  là chỉ số thứ tự ảnh dọc trục;  $N$  là số lượng ảnh. Trong bài báo này, chúng tôi thực hiện với  $N=2$ .

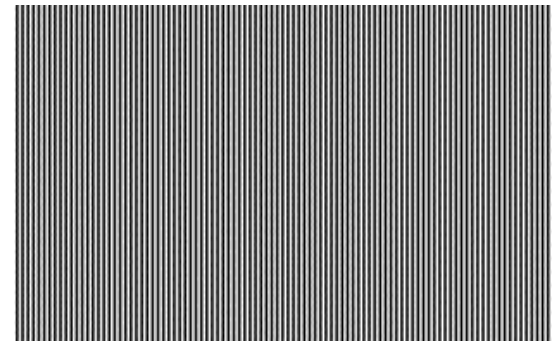
Chúng tôi chọn hai ảnh mẫu dạng hình sin cho đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất. Hai ảnh mẫu này tương ứng với khu vực tần số thấp và tần số cao. Ảnh ứng với khu vực tần số thấp được chỉ ra ở hình (a), trong khi ảnh mẫu ứng với tần số cao được chỉ ra ở hình (b).

Hai ảnh này sẽ được sử dụng như đầu vào

cho thực hiện quá trình mô phỏng tạo ảnh của hệ thống quang học mở rộng độ sâu trường.



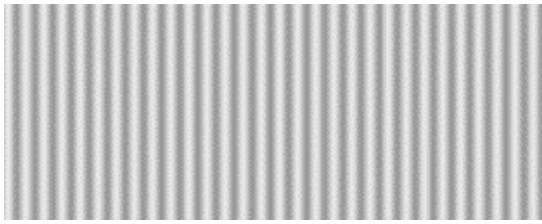
(a)



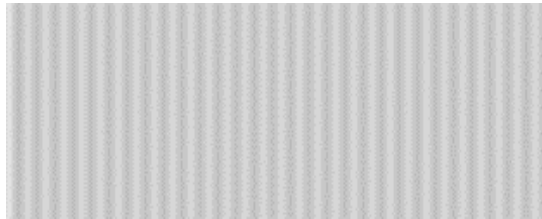
(b)

**Hình 2. Hai ảnh mẫu dạng sin ứng với khu vực tần số thấp và tần số cao**

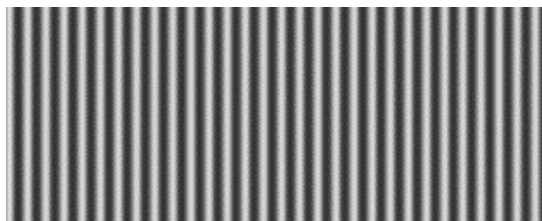
Bằng sử dụng công thức (7), các ảnh nhận với các mặt nạ pha QPM và sQPM ứng với vật mẫu ở tần số cao được chỉ ra ở hình 3(a) và 3(b), tương ứng. Trong khi ảnh của phương pháp đề xuất được chỉ ra ở hình 3(c). Từ hình 3(a) và 3(b) thấy rằng chất lượng ảnh của mặt nạ pha QPM là tốt hơn chất lượng ảnh của mặt nạ pha sQPM. Có thể thấy rằng chất lượng ảnh của phương pháp đề xuất là tốt hơn cả hai ảnh của mặt nạ pha QPM và sQPM.



(a)



(b)



(c)

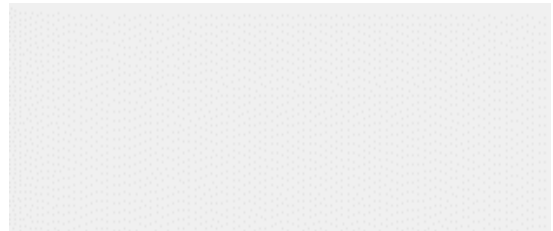
**Hình 3. Ảnh của mặt nạ pha QPM, sQPM và phương pháp đề xuất tại độ lệch tiêu  $\psi=9$  cho ảnh hình sin ứng với khu vực tần số thấp**

Hai ảnh của mặt nạ pha QPM và sQPM được chỉ ra ở hình 4(a) và 4(b), tương ứng, cho vật mẫu tương ứng với vùng tần số cao tại độ lệch tiêu  $\psi=9$ .

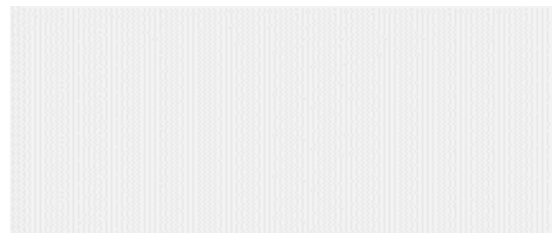
Từ hình 4(a) và 4(b) thấy rằng chất lượng tạo ảnh của mặt nạ pha QPM là thấp hơn mặt nạ pha sQPM.

Hình 4(a) có thể thấy rằng ảnh nhận được có mức cường độ sáng gần như nhau ở các vị trí điểm ảnh nên gần như không phân biệt được các vạch. Hình 4(c) cho thấy rằng ảnh của phương pháp đề xuất tốt hơn ảnh của mặt nạ pha sQPM.

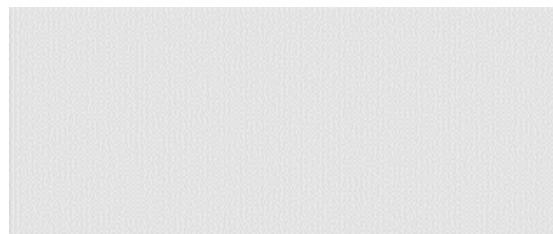
Tiếp theo, chúng ta xem xét quá trình tạo ảnh ở độ lệch tiêu  $\psi=6$ . Hai ảnh của mặt nạ pha QPM và sQPM được chỉ ra ở hình 5(a) và 5(b), tương ứng, cho vật mẫu ứng với khu vực tần số thấp.



(a)



(b)



(c)

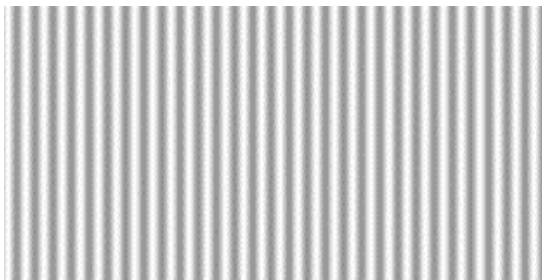
**Hình 4. Ảnh của mặt nạ pha QPM, sQPM và phương pháp đề xuất tại độ lệch tiêu  $\psi=9$  cho ảnh hình sin ứng với khu vực tần số cao**

Có thể thấy rằng chất lượng ảnh của mặt nạ pha QPM là tốt hơn mặt nạ pha sQPM. Trong khi, ảnh của phương pháp đề xuất là tốt hơn so với ảnh của mặt nạ pha QPM, được thấy rõ ở hình 5(c).

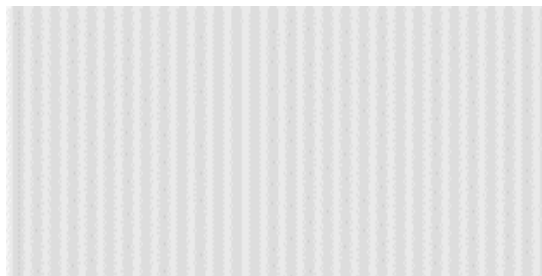
Hai ảnh của mặt nạ pha QPM và sQPM tại độ lệch tiêu  $\psi=6$  được chỉ ra ở Hình

6(a) và 6(b), tương ứng, cho vật mẫu ứng với khu vực tần số cao.

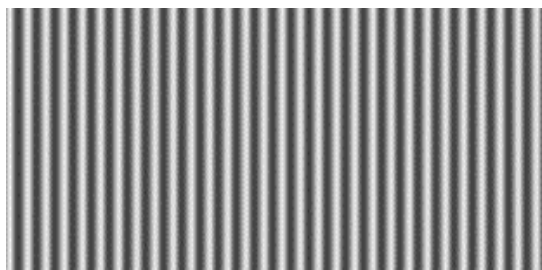
Có thể thấy rằng ảnh của mặt nạ pha QPM gần như có mức cường độ như nhau ở các điểm ảnh nên không biệt được vạch sáng và tối. Chất lượng ảnh của mặt nạ pha sQPM là tốt hơn QPM. Tuy nhiên, có thể thấy rằng ảnh của phương pháp đề xuất là tốt hơn ảnh của mặt nạ pha sQPM và được thể hiện ở hình 6(c).



(a)

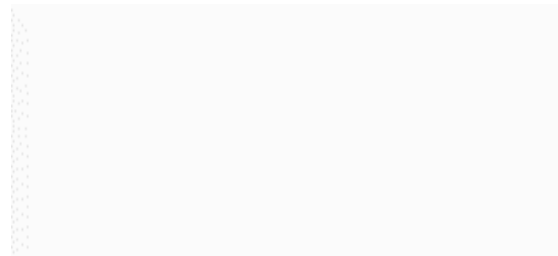


(b)

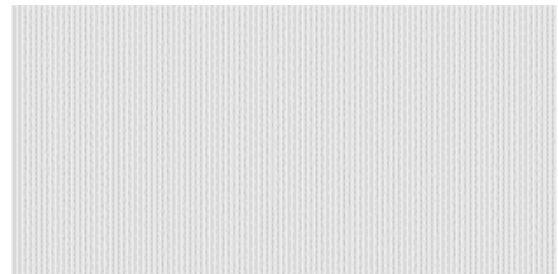


(c)

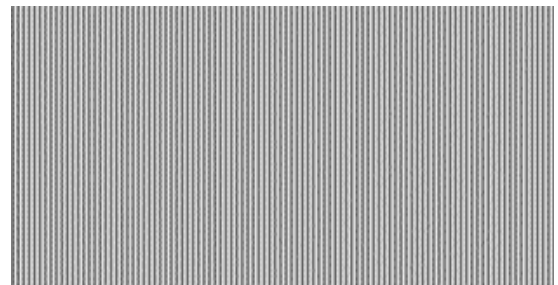
**Hình 5. Độ lệch tiêu  $\psi=6$  theo thứ tự từ trên xuống dưới là ảnh cho QPM, sQPM và phương pháp đề xuất**



(a)



(b)



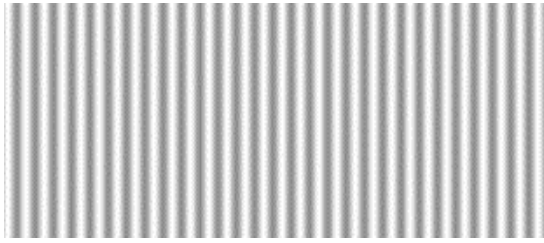
(c)

**Hình 6. Độ lệch tiêu  $\psi=6$  theo thứ tự từ trên xuống dưới là ảnh cho QPM, sQPM và phương pháp đề xuất**

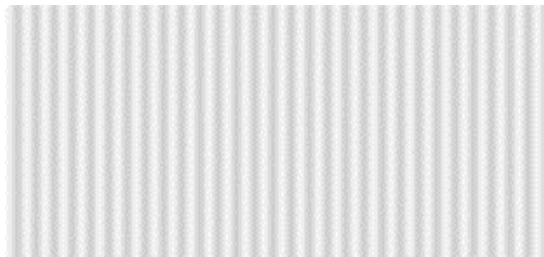
Cuối cùng chúng ta xem xét tạo ảnh tại độ lệch tiêu  $\psi=3$ . Hai ảnh của mặt nạ pha QPM và sQPM được chỉ ra ở ảnh 7(a) và 7(b), tương ứng, cho vật mẫu ứng với khu vực tần số thấp.

Có thể thấy rằng ảnh của mặt nạ pha QPM là tốt hơn ảnh của mặt nạ pha sQPM. Trong khi hình 7(c) cho thấy ảnh của phương pháp đề xuất là tốt hơn ảnh

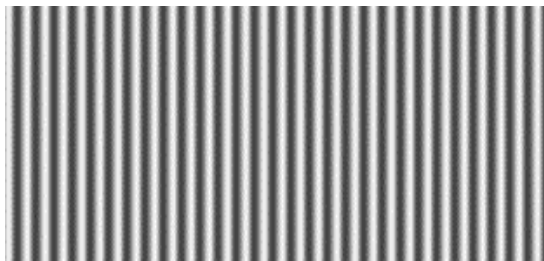
của mặt nạ pha QPM.



(a)



(b)



(c)

**Hình 7. Độ lệch tiêu  $\psi=3$  theo thứ tự từ trên xuống dưới là ảnh cho QPM, sQPM và phương pháp đề xuất**

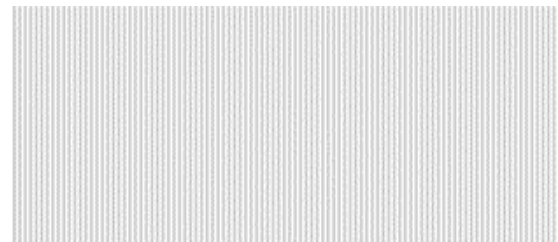
Đối với vật mẫu ứng với khu vực tần số cao, ảnh của hai mặt nạ pha QPM và sQPM tại độ lệch tiêu  $\psi=3$  được chỉ ra ở hình 8(a) và 8(b), tương ứng. Không khó nhìn thấy rằng, chất lượng tạo ảnh của mặt nạ pha sQPM là tốt hơn mặt nạ pha QPM. Trong khi ảnh của phương pháp đề xuất là tốt hơn ảnh của mặt nạ pha sQPM.

Từ các kết quả mô phỏng và phân tích tại ba vị trí độ lệch tiêu ( $\psi=3, 6$  và  $9$ ) ứng

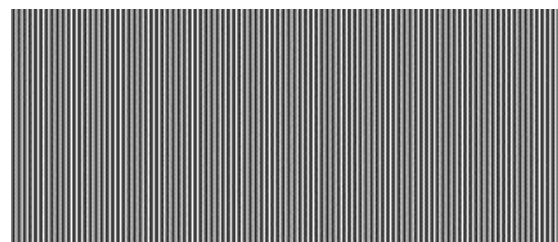
với hai vật mẫu tương ứng ở vùng tần số thấp và tần số cao thì cho thấy rằng ảnh của mặt nạ pha QPM tại vùng tần số thấp thì tốt hơn ảnh của mặt nạ pha sQPM, trong khi ảnh của mặt nạ pha QPM tại vùng tần số cao thì kém hơn ảnh của mặt nạ pha sQPM. Phương pháp đề xuất đưa đến chất lượng tốt trên toàn miền tần số. Do vậy, phương pháp đề xuất có thể được sử dụng để nhận được ảnh chất lượng tốt trên toàn miền tần số không gian của hệ thống tạo ảnh.



(a)



(b)



(c)

**Hình 8. Độ lệch tiêu  $\psi=3$  theo thứ tự từ trên xuống dưới là ảnh cho QPM, sQPM và phương pháp đề xuất**

Từ các kết quả mô phỏng và phân tích tại



ba vị trí độ lệch tiêu ( $\psi = 3, 6$  và  $9$ ) ứng với hai vật mẫu tương ứng ở vùng tần số thấp và tần số cao thì cho thấy rằng ảnh của mặt nạ pha QPM tại vùng tần số thấp thì tốt hơn ảnh của mặt nạ pha sQPM, trong khi ảnh của mặt nạ pha QPM tại vùng tần số cao thì kém hơn ảnh của mặt nạ pha sQPM. Phương pháp đề xuất đưa đến chất lượng tốt trên toàn miền tần số. Do vậy, phương pháp đề xuất có thể được sử dụng để nhận được ảnh chất lượng tốt trên toàn miền tần số không gian của hệ thống tạo ảnh.

Để đánh giá rõ hơn hiệu quả của phương pháp đề xuất, trong bài báo này chúng tôi sử dụng hàm đánh giá SSIM (structural similarity index measure-SSIM). Giá trị của SSIM nằm trong khoảng từ 0 đến 1. Giá trị SSIM càng lớn thì hai ảnh càng giống nhau. Trong bài báo này, chúng tôi sẽ xem xét giá trị SSIM cho ảnh các mặt nạ pha, ảnh phương pháp đề xuất so với ảnh mẫu. Do vậy, khi giá trị SSIM càng lớn thì chất lượng ảnh càng tốt và giống ảnh mẫu. Bảng 1 và bảng 2 chỉ ra giá trị SSIM của QPM, sQPM và phương pháp đề xuất. Có thể thấy rằng ở tần số thấp giá trị SSIM của QPM là lớn hơn giá trị SSIM của sQPM. Điều này nghĩa rằng chất lượng ảnh tại tần số này của QPM là tốt hơn chất lượng ảnh của sQPM. Tuy nhiên, tại tần số cao thì giá trị SSIM của QPM là thấp hơn giá trị SSIM của sQPM. Điều này nói lên rằng chất lượng ảnh của mặt nạ QPM là thấp hơn chất lượng ảnh của sQPM tại tần số này. Rõ ràng rằng giá

trị SSIM của phương pháp đề xuất là lớn hơn giá trị SSIM của QPM hoặc sQPM tại tần số thấp hoặc tần số cao.

Điều này nghĩa rằng phương pháp có thể nhận được chất lượng ảnh tốt trên toàn miền tần số.

**Bảng 1. Giá trị SSIM của các mặt nạ pha và phương pháp đề xuất cho tần số thấp**

	QPM	sQPM	Đề xuất
$\psi=3$	0.2517	0.6266	0.8175
$\psi=6$	0.1479	0.6031	0.7622
$\psi=9$	0.1597	0.4891	0.6915

**Bảng 2. Giá trị SSIM của các mặt nạ pha và phương pháp đề xuất cho tần số cao**

	QPM	sQPM	Đề xuất
$\psi=3$	0.8027	0.7230	0.9259
$\psi=6$	0.8163	0.6671	0.9013
$\psi=9$	0.8036	0.6106	0.8635

#### 4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã đề xuất thành công phương pháp bằng sự kết hợp ảnh của hai mặt nạ pha đối xứng xuyên tâm cho nhận ảnh có chất lượng tốt hơn. Hai mặt nạ pha QPM và sQPM đã được sử dụng cho chứng minh hiệu quả của phương pháp đề xuất. Kết quả mô phỏng trên hàm MTF và tạo ảnh đã được chỉ ra. Kết quả tạo ảnh chứng minh rằng phương pháp đề xuất đưa đến ảnh chất lượng cao trên toàn miền tần số.

*Lời cảm ơn:* Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài của Sở Khoa học và Công nghệ Hà Nội trong đề tài mã số : 01C-01/02-2021-3.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

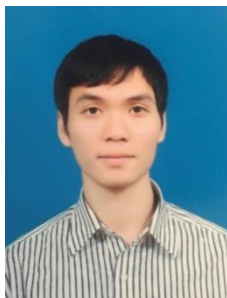
- [1] R. Hild, M.J. Yzuel, J.C. Escalera, et al., Influence of nonuniform pupils in imaging periodical structures by photolithographic systems, *Optical Engineering*, Vol. 37, Issue 4, pp. 1353-1363, 1998.
- [2] Shouqian Chen, Van Nhu Le, Zhigang Fan, and Hong Cam Tran. Extended depth-of-field imaging through radially symmetrical conjugate phase masks. *Optical Engineering* 54(11), 115103 (November 2015).
- [3] L.V. Nhu, C. Kuang, X. Liu., "Extended depth of field imaging by both radially symmetrical conjugating phase masks with spatial frequency post-processing," *Optics communications*. 411, pp. 80-87, 2018.
- [4] X. Mo, Optimized annular phase masks to extend depth of field, *Optics Letters*, Vol. 37, Issue 11, pp. 1808-1810, 2012.
- [5] L.V. Nhu, Z. Fan, F. Dang, S. Chen, "Extending depth of field for hybrid imaging systems via the use of both dark and dot point spread functions", *Appl. Opt.* 55 (26), pp. 7345–7350, 2016.
- [6] J. Sochacki, S. Bara, Z. Jaroszewicz, A. Kolodziejczyk, Phase retardation of uniform intensity axilens, *Opt. Lett.* 17, pp. 7–9, 1992.
- [7] D. Zalvidea, E.E. Sicre, Phase pupil functions for focal depth enhancement derived from a wigner distribution function, *Appl. Opt.* 37, pp. 3623–3627, 1998.
- [8] W. Chi, N. George, Electric imaging using a logarithmic asphere, *Opt. Lett.* 26, pp. 875–877, 2001.
- [9] M. Brinicombe et al., "Blind deconvolution by means of the Richardson–Lucy algorithm," *J. Opt. Soc. Am. A.* 12(1), pp. 58-65, 1995.

### Giới thiệu tác giả:



Tác giả Lê Văn Nhu tốt nghiệp đại học tại Học viện Kỹ thuật quân sự vào năm 2007. Nhận bằng thạc sĩ và tiến sĩ tại Đại học Công nghiệp Cáp Nhĩ Tân, Trung Quốc năm 2012 và 2016. Nghiên cứu sau Tiến sĩ tại Đại học Chiết Giang, Trung Quốc từ năm 2016 đến năm 2018. Hiện nay tác giả công tác tại Học viện Kỹ thuật quân sự.

Lĩnh vực nghiên cứu: Kỹ thuật mã hóa mặt sóng, thiết kế hệ thống quang học, xử lý ảnh y tế, nâng cao chất lượng ảnh.



Tác giả Trần Trọng Thăng tốt nghiệp Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2006. Nhận bằng thạc sĩ tại Học Viện Kỹ thuật quân sự năm 2009. Hiện nay tác giả công tác tại Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: Xử lý ảnh y tế, nâng cao chất lượng ảnh, hệ thống giám sát từ xa, ứng dụng của IOT.

