

Optical sparse aperture imaging

Nicholas J. Miller, Matthew P. Dierking, and Bradley D. Duncan

التصوير بفتحة التشتت البصرى

الدقة التحليلية لنظام تصوير بصري تقليدي بحد الحيود diffraction-limited يتناسب طرديا مع قطر الحدقة pupil له. والهدف الاساسي للتصوير بفتحة التشتت هو تحسين الدقة التحليلية وتقليل مساحة تجميع كمية الضوء الكلية، وهذا التقليل امرا مفضلا، لان تكاليف الفتحة الكبيرة مرتفعا جدا. الاداء القياسي معرف ويستخدم لتقييم العديد من تراكيب واشكال فتحات التشتت من فتحات فرعية متعددة وفردية ودائرية. تم دراسة الفتحة الفرعية وتأثير الانحناء على جودة الصورة. قمنا في البداية باختيار مصفوفة فتحات باقل عدد ممكن ذات ترابط تلقائي كما وصفت بواسطة Golay. قمنا بنغير كلا من عدد الفتحات الفرعية والمسافات النسبية بينهما للوصول الى افضل مصفوفة فتحات. وافادت النتائج التي عن عدسة كبيرة مع مصفوفة والمسافات النسبية بينهما للوصول الى افضل مصفوفة فتحات. وافادت النتائج التي عن عدسة كبيرة مع مصفوفة Golay. وفي هذه التجربة قمنا بتصوير حافة مائلة مميزة بـ ISO12233 عن عدسة كبيرة مع مصفوفة Golay. وفي هذه التجربة قمنا بتصوير حافة مائلة مميزة بـ ISO12233 التباين مصاحب لهذه الصور المتكونة من خلال مصفوفة فتحات التشتت و عرفنا انخاض وينر-هيلستوم لاسترجاع التباين في الصور التي حصلنا عليها بالتجربة. وميزا الخفاض وينر-هيلستوم لاسترجاع التباين في الصور التي حصلنا عليها بالتجربة. وفي النهاية، وصفنا الطريقة التباين مصاحب لهذه الصور المتكونة من خلال مصفوفة فتحات التشتت و عرضا تأثير استخدام فلتر وينر-هيلستوم لاسترجاع التباين في الصور التي حصلنا عليها بالتجربة. وفي النهاية، وصفنا الطريقة التوليف صور من فتحات فرعية متعددة باستخدام اللوغاريثم استرجاع الطور للحصول على تقديرات لمجال الفتحات الفرعية. النتائج العملية من توليف الصور لجسم نقطي من التصوير بقحات فرعية متعددة معديرات من معد

1. المقدمة Introduction

انتشر التصوير بفتحة التشتت نتيجة للبحث عن دقة تحليلية زاوية عالية في مجال علوم الفلك. مجال تداخل فتحة التشتت هي تقنية لاز الت في بداياتها. منذ العام 1940، تم بناء مقياس تداخل الراديو بنجاح، والذي جمع مجالات الاشعاع من عدة انتينا. هذا سمح بالحصول على صور بدقة تحليلية عالية لمصادر راديو خارج نطاق الكرة الارضية. مصفوفة الانتينا مثل المصفوفة الضخمة يمكن ان تستخدم لتوليف صور ثنائية الابعاد بدقة تحليلية عالية عن طريق قياس وضوحها المعقد [1]. من خلال قلب سعة فورييه وطور الرؤية يمكن تكوين صورة المصدر [2].

تطبيق تقنية التصوير بفتحة التشتت في النظام تصوير بصري هو تحدي. في مقياس تداخل الراديو، التداخل والارتباط لمجالات الاشعاع من انيتنات فرعية يتم عادة بالكشف. طور الاشارات من الانتينات الفرعية في مصفوفة الترددات الراديوية ينجز في الاغلب من خلال ادخال تأخير مناسب بين الانتينا والرابط. وهذا لا يمكن بواسطة مصفوفة بصرية لان تقنية الكشف الحالية قادرة على تسجيل متوسط الشدة للمجال الضوئي عند كل فتحة فرعية وليس كشف متزامن لكل من سعة المجال والطور كما هو الحال في مصفوفة امواج الراديو. ولهذا فان المجالات الضوئية نفسها تتداخل على المستوى البؤري لمصفوفة الكاشف. ومن الضروري ان يكون طور الشعاع المتداخل للفتحات الفرعية في حدود جزء من الطول الموجي. ولهذا فان الموجية الضوئية القصيرة تتطلب دقة توجيه عالية للطور ومحاذاة لكل فتحة فرعية ضوئية.

تداخل ميكلسون هي مثال مبكر لما هو مطلوب اساسا لترتيب مكون من عنصرين من فتحة التشتت عند اطوال موجية ضوئية. باستخدام مرآتين، حصل ميكلسون على حزمة رفيعة من الترددات المكانية على امتداد اتجاه واحد [3]. بتغير المسافة بين المرآتين سجل ميكلسون التباين او الاهداب المضيئة، عند ترددين. كما استطاع قياس طور الاهداب عند كل تردد، وكان بإمكانه بناء صورة احادية الابعاد لمصادر نجمية. الا انه بدلا من ذلك افترض ان المصادر عبارة عن نجوم لها توزيع شدة اضاءة دائرية ومتماثلة. وبملاحظة المسافة عندما كانت الاهداب معتمة قام بحساب الاقطار الزاوية للنجوم.

القدرة التحليلية لفتحات تقليدية توصف بشكل جيد بقياس احادي، واتساع القمة المركزية لدالة الانتشار النقطية التحليلية لفتحات تقليدية توصف بشكل جيد بقياس احادي، واتساع القمة المركزية لدالة الانتشار النقطية النقطية والتي تتناسب عكسيا مع قطر الحدقة. هذا القياس مهم في الاغلب للفلكيين الراغبين في تطوير الدقة التحليلية الزاوية ولكنه غير كافي في تحليل نظام التصوير حيث ان الهدف يكون عبارة عن جسم ممتد وله محتوى ترددي مكاني كبير ويكون عادة بتباين قليل. طورت دالة والتي المحدوم (MTF) modulation transfer function) من تحليل فورييه واستخدمت ايضا في الحكم



بشكل كمي على مصفوفات فتحة التشتت وهي مهمة بشكل خاص في ضوء امكانية المعالجة اللاحقة للحصول على دقة تحليلية مكافئة لنظام الفتحة المغلق. الهدف الإساسي للتصوير بفتحة التشتت هو تحسين الدقة التحليلية وتقليل مساحة الضوء المجمع، والامر الاخير هذا مفضل لان تكلفة انظمة الفتحة الكبيرة باهظة جداً.

في الجزء 2، تم تطوير قياسات كمية بالاعتماد على دالة PSF و PTM لتقييم مصفوفات فتحة التشتت المكونة من العديد من الفتحات الفرعية الدائرية المتماثلة. في الجزء 3، قمنا باختيار مصفوفات جمعت على مصفوفات نقطية مدمجة كما وصفت بواسطة Golay [4]. وقمنا بتغير كلا من عدد الفتحات الفرعية والمسافات البينية للوصول الى افضل مصفوفة. في الجزء 4، تم دراسة تأثير المكبس و/او الانحناء المسبب للزيغ البصري وتم ربطه مع الصور الناتجة عن فتحة التشتت. في الجزء 5، عرضت نتائج تكوين الصور من العديد من الفتحات الفرعية باستخدام قناع لعدسة كبيرة على مصفوفة ومنت وملاحظة الانخفاض في التباين المصاحب لمصفوفة الفتحات. في الجزء 6، قمنا بنغير كلا من عدد المتحات العديد من المستويات البورية للصور الفرعية باستخدام قناع لعدسة كبيرة على مصفوفة السريع وملاحظة الانخفاض في التباين المصاحب لمصفوفة الفتحات. في الجزء 6، قمنا بفحص الكشف السريع العديد من المستويات البؤرية للصور الفرعية. موضح طريقة التكوين باستخدام لوغاريثم استرجاع الطور والنتائج العملية لصورة مصدر نقطي مبينا. كما تم ايضا مناقشة الضعف في طريقة استرجاع الطور. والخلاصة النهائية موضحة في الجزء 7.

2. النظرية Theory

قمنا باختيار مصفوفات Golay-N للتصوير بفتحة التشتت لفحصمها وهي مكونة من عدد N من الفتحات الدائرية المتماثلة،



الشكل 1. مصفوفة Golay-4 بمعامل تمدد 1.6.

تصميم جيد لفتحة التشتت تحتوي على المجالات البصرية من فتحاتها الفرعية للحصول على دقة تحليلية تحافئ فتحة مغلقة واحدة بمساحة فعالة كبيرة A_{eff} . تصميم جيد لمصفوفة تكبر المساحة الفعالة A_{eff} بينما تكافئ فتحة مغلقة واحدة بمساحة فعالة كبيرة A_{eff} . تصميم جيد لمصفوفة تكبر المساحة الفعالة إلى تقلل مساحة التجميع الكلية A_{array} . معامل الملء α هو النسبة بين مساحة مصفوفة الفتحة المشتتة إلى مساحة فتحة مغلقة واحدة والتي قدرتها الملء α معامل الملء α هو النسبة بين مساحة مصفوفة الفتحة المشتتة إلى مساحة فتحة مغلقة واحدة والتي تعامل الملء α معامل الملء α معامل مساحة فتحة معلقة واحدة والتي قدرتها التحليلية تقابل افضل قدرة تحليلية لمصفوفة النشت ولهذا، فان مساحة فتحة مغلقة واحدة والتي قدرتها التحليلية معامل الملء α . ولمصفوفة تشتت تحتوي على عدد N من الفتحات الفرعية الدائرية المتماثلة بقطر الوحدة فان معامل الملء يعطى على النحو التالي:



حيث D_{eff} هي القطر الفعال لفتحة دائرية مغلقة واحدة والتي تعطي افضل جودة صورة لتصميم فتحة التشتت ولكن، لا يوجد اتفاق واضح على كيفية قياس D_{eff}، وكقدرة تحليلية يمكن ان تقدر طبقا للعديد من قياسات المستوى البؤري، مثل معيار Rayleigh و Sparrow، او بواسطة مقياس التردد المكاني -5] 10.

A. مقاييس المستوى البؤري (دالة التشتت النقطي) (Focal Plane (Point Spread Function) Metrics

دالة الحدقة لمصفوفة التشتت، (P_{array}(x,y، تتكون من عدد فتحات N متماثل، الا في الطور، بفتحات فرعية في المستوى (x,y) يمكن ان تكتب على النحو التالي:

$$P_{array}(x, y) = \sum_{n=1}^{N} P_{sub}(x - x_n, y - y_n) e^{j\phi_n(x, y)}, \quad (2)$$

حيث ان P_{sub}(x,y) عبارة عن معامل شائع لكل دوال حدقة الفتحات الفرعية P_{sub}(x,y) هي بنية الطور، و(x_n,y_n) هي الاحداثيات المركزية للفتحة الفرعية n_{th}، على التوالي. التصوير يمكن ان نفكر به على انه عملية قياس للتداخل الضوئي حيث ان الترددات المكانية عبارة عن عينات ترتكز على المسافة المتجهة بين النقاط في الحدقة. و N مصفوفة حدقة نقطية لها مجموعة تراكيب 2/(N(N-1) من متجهات المسافات لأزواج الحدقات النقطية. من خلال تحليل فورييه وتطبيق نظرية الارتباط التلقائي فان دالة PSE الغير متزامنة لأي مصفوفة فتحة تشتت تتكون من عدد N متماثل، وبحد الحيود، تكون متفقة في الطور (أي ان كل م¢

$$PSF_{array}(u, v) = PSF_{sub}(u, v) \left[N + 2 \sum_{k=1}^{N \cdot (N-1)/2} \times \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda f} (\Delta x_k u + \Delta y_k v) \right] \right], \quad (3)$$

www.trgma.com

5



حيث ان (u,v) هي الاحداثيات المستوية للصورة، $(\Delta x_k, \Delta y_k)$ المتجه الفاصل بين المركبات في ازواج مراكز الفتحات الفرعية، λ هي الطول الموجي و f هي المسافة من الحدقة إلى مستوى الصورة.

نظام التصوير الغير متزامن يكون خطيا في الشدة وبالتالي الصورة المتكونة هي convolution لـ PSF لمصفوفة المحدقة والتوزيع الهندسي لشدة الصورة المثالية. وفي الحد الهندسي المثالي، تكون مصفوفة PSF هي دالة دلتا. ولهذا كلا من القمة المركزية الضيقة لـ PSF واقل طاقة ممكن خارج القمة المركزية مفضل. وطريقة واحدة لتعريف D_{eff} يمكن بهذا ان تعتمد على القيمة العظمى عند اقصى ارتفاع (FWHM) لـ PSF طبقا للمعادلة التالية:

$$D_{eff(PSF)} = \frac{\delta_0}{\text{FWHM}_{array PSF}} = \frac{1.03\lambda f}{\text{FWHM}_{array PSF}}, \quad (4)$$

حيث δ_{0} هي الـ FWHM لـ PSF لفتحة مفردة بقطر يساوي الوحدة.

الان لاحظ ان D_{span} تتناسب عكسيا مع اعلى قيمة لخط الاساس لأبعاد المصفوفة، D_{span} الان لاحظ ان حال، اذا كان معامل التمدد يزداد لكي نزيد D_{span} ، فان معامل الملء المتناقص سوف يسبب على كل حال، اذا كان معامل التمدد يزداد لكي نزيد أومي من معامل الملء المتناقص سوف يسبب ايضا طاقة اقل في القمة المركزية لـ PSF مع الطاقة في العامم الجانبية على المركزية لـ sidelobes لها الهمية كبيرة ايضا. ولهذا قمنا بتبني قياس، يعرف باسم -peak-to القمم الجانبية قياس، يعرف باسم -PSLR)،





الشكل 2 قياسات الدقة التحليلية لمصفوفة تشتت تتكون من اربعة فتحات فرعية دائرية متماثلة

من تصميم مجال الانتينا لمزيد من الاعتبارات. بالرجوع الى الشكل 2، قمنا بحساب PISLR لـ PISLR لـ PSF لـ PISLR لفتحة التشتت. لفتحة التشتت باستخدام الخطوات التالية: اولا، ايجاد قيمة FWHM لـ PSF لمصفوفة فتحة التشتت. وهذا يحدد القطر الفعال، D_{eff}، من المعادلة (4). بعد ذلك، قمنا ببناء نمط شدة Airy خيالي قطر قمته المركزية هو _{Dpeak} يعطى بالمعادلة التالية:

$$\omega_{peak} = \frac{2.44\lambda f}{D_{eff}}.$$
(5)

الـ PISLR أي النسبة لطاقة الـ PSF لفتحة التشتت داخل دائرة قطر ها _{Opeak} إلى الطاقة خارج الدائرة يعطى بوحدة الديسيبل على النحو التالي:



$$PISLR = 10 \log \left[\frac{\int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\omega_{peak}} PSF_{array}(\rho, \phi) \rho d\rho d\phi}{\int_{0}^{2\pi} \int_{\omega_{peak}}^{\infty} PSF_{array}(\rho, \phi) \rho d\rho d\phi} \right], \quad (6)$$

حيث ان ρ و φ هى الاحداثيات الاسطوانية استنادا على u و v لمتغير ات مستوى الصورة.

B. قياسات مستوى التردد (Modular Transfer Function)

Frequency Plane (Modular Transfer Function) Metrics

قياسات دقة التحليل مفيدة يمكن ان تتم في مجال التردد المكاني. محتوى التردد المكاني للصورة لنظام التصوير الغير متزامن، يساوي ناتج ضرب محتوى التردد المكاني لهندسة الصورة المثالي ودالة التحول الضوئي normalized (OTF)، حيث OTF هي تحويل فورييه الـ normalized لشدة PSF تعطى على النحو التالي:

$$OTF = \mathcal{H}(f_x, f_y) = \frac{\mathcal{F}\{PSF_{array}(u, v)\}}{\iint PSF_{array}(u, v)dudv}, \quad (7)$$

MTF حيث ان $f_x = x/\lambda f$ و $f_y = y/\lambda f$ هي الترددات المكانية [11]. معامل الـ OFT، يعرف على انه MTF يصف تحول تباين الجسم بالنسبة الى الصورة كدالة في التردد المكاني. دالة MTF تبر هن على انها دالة قياس مفيدة بصورة خاصة في تقييم نظام التصوير بفتحة التشتت. دالة OTF لمصفوفة فتحة التشتت وياس مفيدة بصورة خاصة في المعادلة (7). اذا كانت المصفوفة تحتوي على N فتحة تشتت متماثلة ودائرية وفي نفس الطور فان OTF و MTF يكونان متكافئتين ويمكن اثبات على ان يكونوا على النحو التحلي



$$MTF_{array}(f_x, f_y) = MTF_{sub}(f_x, f_y) * \left[\delta(f_x, f_y) + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N < N - 12/2} \times \delta\left(f_x \pm \frac{\Delta x_k}{\lambda f}, f_y \pm \frac{\Delta y_k}{\lambda f}\right)\right],$$
(8)

حيث ان $MTF_{sub}(f_{x},f_{y})$ هي دالة MTF لفتحة دائرية مفردة تعطى بالمعادلة التالية:

$$\begin{aligned}
\text{MTF}_{sub}(\rho) \\
= \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\lambda f}{D} \rho\right) - \left(\frac{\lambda f}{D} \rho\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f}{D} \rho\right)^2} \right] & \text{for } \rho \leq \frac{D}{\lambda f} \\ 0 & \text{for } \rho > \frac{D}{\lambda f} \end{cases} \\
\end{aligned}$$
(9)

حيث $p = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = q$ هي التردد المكاني القطري، و * تشير الى convolution [11]. أي زيغ بصري داخل الفتحة الفرعية سوف بالضرورة يقال (MTF_{sup}(f_x, f_y)، في حين ان اخطاء الطور بين الفتحات الفرعية، مثل المكبس والانحناء، سوف تقال بشكل عام (MTF_{sup}(f_x, f_y). دالة MTF المثالية تحتوي على قيمة ثابتة على نطاق التردد المكاني الغير محدود، متماثلة مع دالة دلتا PST المثالية. ولكن، أي نظام بصري عملي سوف يمتلك حدقة محدودة و هذا سوف يحد من نطاق التردد المكاني لـ MTF بشكل عام ويقلل من تباين الصورة عند كل الترددات المكانية بالنسبة للخلفية.

بالرجوع الى الشكل 2، يكون لمصفوفة MTF اعلى تردد مكاني ρ_{max} يتناسب مع بعد الخط الإساسي D_{span} . ولكن، التردد المكاني الاعلى يمكن احرازه فقط لزوايا سمتية azimuth محددة. نعرف الاعلى ولكن، التردد المكاني الاعلى يمكن احرازه فقط لزوايا سمتية azimuth محددة. نعرف مسيم على انها قطر اقل دائرة محيطها يشمل كل انماط MTF و ρ_{max} على انها قطر اكبر دائرة تحيط بداخلها الجزء القريب لدالة MTF. القطر الفعال D_{eff} ، يمكن ان يعرف بالاعتماد على دائة حد قطع بداخلها الجزء القريب لدالة ρ_{max} . القطر الفعال D_{eff} ، يمكن ان يعرف بالاعتماد على دائة حد قطع بداخلها الجزء القريب لدالة ρ_{max} . القطر الفعال D_{eff} ، يمكن ان يعرف بالاعتماد على دائة حد قطع على التردد لدالة محمد القطر الفعال MTF بالاعتماد على قيمة وحيدة لـ محمد ومنه، التردد لقطع الترد لدالة محمد القطر الفعال تردد قطع لدالة MTF بالاعتماد على قيمة وحيدة المحمد ومنه، التردد القطع. القطر الفعال معن المحمد على قيمة وحيدة المحمد ومنه، التردد القطع. القطر الفعال محمد القطع لدالة MTF بالاعتماد على قيمة وحيدة المحمد ومنه، التردد لدالة محمد ومنه المحمد القطع المحمد ومنه الاعتماد على قيمة وحيدة المحمد ومنه، الترد القطع. القطر الفعال يمكن عندها ان يعرف على النحو التالي:

$$D_{eff(MTF)} = \frac{\rho_{\min}}{\rho_o} = \rho_{\min} \lambda f, \qquad (10)$$

حيث ¹-ρ_o=(λf) هي تردد القطع لفتحة دائرية بقطر الوحدة. في كل الحالات، المعادلة (10) سوف تحدد قطر فعال D_{eff} اقل من المعادلة (4). ولهذا، لكي نوفر اكثر النتائج دقة في المناقشة التالية، المعادلة (10) سوف تستخدم بالاقتران مع المعادلة (1) لتحديد معامل ملء المصفوفة α.

الدقة التحليلية المكانية ليست هي القيمة ذات الجدارة لنظام التصوير. كما ان التشويش في الكاشف له تأثير قوي على جودة الصورة. أي نظام تصوير بفتحة تشتت عمليا يواجه باضمحلال الاشارة بالنسبة الى التشويش (SNR) بالمقارنة مع الفتحة المغلقة لسببين اساسيين: السبب الاول واضح ان التقليل في مساحة تجميع الفوتونات، والسبب الثاني يكمن في التقليل في التردد الوسطي لدالة MTF [21]. الانخفاض في مساحة تجميع الفوتونات، والسبب الثاني يكمن في التقليل في التردد الوسطي لدالة MTF [21]. الانخفاض في مساحة تجميع الفوتونات، والسبب الثاني يكمن في التقليل في التردد الوسطي لدالة SNR [21]. الانخفاض في ايضا. التقليل في دالة MTF، على كل حال، يسبب المزيد من التقليل في SNR داخل طيف التردد الوسطي نتيجة لانخفاض تباين الصورة، بالمقارنة مع الفتحة المغلقة المفردة. ولهذا، بذلنا اقصى ما يمكن الوسطي نتيجة لانخفاض تباين الصورة، بالمقارنة مع الفتحة المغلقة المفردة. ولهذا، بذلنا اقصى ما يمكن الوسطي نتيجة لانخفاض تباين الصورة، بالمقارنة مع الفتحة المغلقة المفردة. ولهذا، بذلنا اقصى ما يمكن الوسطي نتيجة لانخفاض تباين الصورة، بالمقارنة مع الفتحة المغلقة المفردة. ولهذا، بذلنا المي عر كل الميف كم نقي التردد المكاني له SNR في نفس الوقت حرصنا على ان يكون مستوى MTF عبر كل الطيف كافي الطيف كافي الترد المكاني التطري SNR في SNR مقبولة لنظام التصوير.

مصفوفة فتحة التشتت تحتوي على فتحات فرعية بقطر الوحدة لها MTF بقيمة الوحدة عن التردد صفر وحجم يتناسب مع المساحة الكلية للفتحة. قمنا بتقليل معامل الملء للمصفوفة لكي نزيد النطاق، ولكن قمنا بذلك على حساب تقليل قيمة MTF للترددات المكانية الاعلى من صفر. ولهذا عرفنا الدالة MTF_{midfreq}، بذلك على حساب متوى على الترددات المكانية الاعلى من صفر. ولهذا عرفنا الدالة MTF_{midfreq}، ولكن قمنا بذلك على الها متوسط مستوى على الترددات المكانية الاعلى من صفر. ولهذا عرفنا الدالة MTF_{midfreq}، ولكن قمنا بذلك على حساب معايل قيمة MTF للترددات المكانية الاعلى من صفر. ولهذا عرفنا الدالة MTF_{midfreq}، ولكن قمنا بذلك على حساب معايل قيمة MTF للترددات المكانية الاعلى من صفر. ولهذا عرفنا الدالة MTF_{midfreq}، ولكن قمنا الشكل 2 و كما هو حسب بطريقة تحليلية على النحو التالي:

$$MTF_{midfreq} = \frac{1}{2\pi(\rho_{min}^2 - 1)} \int_0^{2\pi} \int_1^{\rho_{min}} MTF(\rho, \phi)\rho d\rho d\phi.$$
(11)

قمنا مع العديد من الباحثين بمراقبة MTF_{midfreq} لمصفوفة فتحة تشتت صممت بشكل متقن ووجدنا انها تتناسب طرديا مع معامل الملء α [12]. بتقليل معامل الملء للمصفوفة نقلل MTF_{midfreq}، والتي تقابل قيمة اسوأ لـ SNR.



3. تصميم افضل مصفوفة فتحة تشتت Designing Optimal Sparse Aperture Arrays

الرغبة في تصوير هدف ممتد بمحتوى ترددي مكاني غير معروف يجعلنا نقترح تصميم مصفوفة فتحة تشتت تشتت لتمتلك دالة MTF بأعلى حد قطع للتردد المكاني بتباين كافي. دالة MTF لمصفوفة فتحة تشتت عملية عبارة عن معامل للارتباط التلقائي الـ normalized للمصفوفة. لان الارتباط التلقائي ليست عملية عكسية، فان المصفوفة التي تولد دالة MTF المفضلة لا يمكن ان تحسب بطريقة تحليلية واللوغاريثم العددي ممنوع حسابيا لمصفوفات اكثر من بضع فتحات فرعية [13]. استخدم Golay لوغاريثم تخميني عشوائي وقيد حله لمعامل الرتباط التي المعامل ارتباط تتمات عملية تحميني معاوني معاوني ويتباين كافي معاوني واللوغاريثم العدي ممنوع حسابيا لمصفوفة التي تولد دالة MTF المفضلة لا يمكن ان تحسب بطريقة تحليلية واللوغاريثم عميني معاوني وقيد حله لمجموع من شبكة انماط عديدة في بحثه حول المصفوفة التي لها معامل ارتباط ارتباط التلقائي محكم بالقدر المطلوب [4,13].



الشكل 3 مصفوفة Goley ذات التماثل الثلاثي بمعامل ارتباط تلقائي محكم وبالقدر المطلوب. الصف العلوي ترتيب لمصفوفة نقطية. الصف السفلي معامل الارتباط التلقائي المصاحب لكل ترتيب.

Golay-3	$\left(-\frac{1}{2},-\frac{\sqrt{3}}{6}\right)$	$\left(rac{1}{2},-rac{\sqrt{3}}{6} ight)$	$\left(0, \frac{\sqrt{3}}{3}\right)$
Golay-6	$\left(0,-\frac{2\sqrt{3}}{3}\right)$	$\left(1, -\frac{2\sqrt{3}}{3}\right)$	$\left(1, \frac{\sqrt{3}}{3}\right)$
	$\left(\frac{1}{2},-\frac{5\sqrt{3}}{6}\right)$	$\left(-1, -\frac{\sqrt{3}}{3}\right)$	$\left(-\frac{3}{2},\frac{-\sqrt{3}}{6}\right)$
Golay-9	$\left(-\frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{6}\right)$	$\left(rac{1}{2},-rac{\sqrt{3}}{6} ight)$	$\left(0, \frac{\sqrt{3}}{3}\right)$
	$\left(\frac{7}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{6}\right)$	$\left(rac{3}{2},rac{5\sqrt{3}}{6} ight)$	$\left(-\frac{3}{2},\frac{11\sqrt{3}}{6}\right)$
	$\left(-2,\frac{\sqrt{3}}{3}\right)$	$\left(-2,-\frac{5\sqrt{3}}{3}\right)$	$\left(\frac{1}{2},-\frac{7\sqrt{3}}{6}\right)$
Golay-12	$(0, -\sqrt{3})$	$(-2, -\sqrt{3})$	$\left(-\frac{1}{2},-\frac{3\sqrt{3}}{2}\right)$
	$(-4, -2\sqrt{3})$	$(5, -\sqrt{3})$	$\left(\frac{5}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$
	$\left(\frac{5}{2},\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$	$\left(\frac{3}{2},\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$	$\left(-\frac{1}{2},\frac{3\sqrt{3}}{2}\right)$
	$\left(-\frac{3}{2},\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$	$(-2, \sqrt{3})$	$(-1, 3\sqrt{3})$

الجدول 1. الاحداثيات المركزية للفتحات الفرعية في مصفوفة Goley ذات التماثل الثلاثية (s=1)

A. تحسين معامل التمدد Optimizing the Expansion Factor.

MTF تأثير وضع حدقة دائرية على مصفوفة Golay النقطية تؤثر مباشرة على معامل التمدد. دالة MTF لمصفوفة Golay بمعامل تمدد يساوي الوحدة تكون ممتلئة بشكل مكدس حول المركز ببضع مستويات فارغة وتعرض تقريبا مستويات MTF منتظمة على كل الترددات المكانية في الحزمة الوسطة. زيادة معامل التمدد للمصفوفة له تأثير متوقع على دالة MTF له. اذا كان في المعادلة (8)، نفترض في البداية معامل التمدد للمصفوفة له تأثير متوقع على دالة MTF له. اذا كان في المعادلة (8)، نفترض في البداية معامل التمدد للمصفوفة له تأثير متوقع على دالة MTF و على كالترددات المكانية في الحزمة الوسطة. زيادة معامل التمدد للمصفوفة له تأثير متوقع على دالة MTF له. اذا كان في المعادلة (8)، نفترض في البداية مركبات متجه الفصل يصف المصفوفة حيث تكون حدقة الفتحات الفرعية مماسة (s=1)، فانه بالتالي مركبات متجه الفصل يصف المصفوفة حيث تكون حدقة الفتحات الفرعية مماسة (s=1)، فانه بالتالي مركبات متجه الفصل يصف المصفوفة حيث تكون حدقة الفتحات الفرعية مماسة ($\Delta x_k, \Delta y_k$) يساوي الوحدة.

الجدول 2 يوضح خصائص مصفوفة Golay-9. كل صف يبين قائمة لدالة PSF و دالة MTF لتزايد معامل التمدد. وكما هو متوقع، يوجد زيادة خطية في D_{eff} بالاعتماد على FWHM لدالة PSF وزيادة



خطية في ترددات حد القطع، ρ_{min} و MTF و MTF. على سبيل المثال، مصفوفة Golay-9 لها MTF فارغة تظهر عندما يزيد معامل التمدد عن 1.6. ومن اجل هذا البحث، اخترنا معاملات تمدد اقل قليلا من تلك المطلوبة لتجنب مستويات MTF التي تساوي صفر. بالأخص، حددنا معامل التمدد بحيث ان اقل مستوى MTF كان تقريبا 3% من القمة. وكما ذكر سابقا. في نظام التصوير العملي، فان المصفوفة تتطلب الحفاظ على اقل مستوى MTF بالاعتماد على اعتبارات SNR، بدلا من تجنب مستويات MTF مستويات MTF التي تساوي صفر. مابقا.

B. مقارنة بين ترتيبات الفتحات الفرعية Comparison of Subaperture Arrangements

Golay المصفوفة الاكثر نجاحا نظرا لإحكامها من حيث معامل ارتباطها التلقائي / MTF هي مصفوفة -Golay و -6, -6, -6, -6, -6, -6, -6, -6, -6, -6, -6, -6, -6, -12 مع الثلاثي الثلاثي. كل من هذه المصفوفات تم تحسينها لمعامل التمدد. المشاهد العلوية لكل دالة PSF و MTF موضح في الرسومات الرمادية في الاشكال من 4 الى 7، مع الشريحة الافقية المركزية لكل دالة تظهر بالأسفل. القياسات البارزة لـ MTF و PSF لفتحة فرعية مفردة ولكل من مصفوفات والمركزية لكل دالة تظهر بالأسفل. القياسات البارزة لـ MTF و PSF فنتحة فرعية مفردة ولكل من مصفوفات وolay مزود ايضا في الجدول 3. وكما ذكرنا فان ميزة انظمة التصوير بفتحة التشتت بالنسبة لأداء بحد الحيود هو معامل الملء، في حين ان ميزة التصوير بفتحة تشتت بالنسبة إلى اداء بالنسبة لأداء بحد الحيود هو معامل الملء، في حين ان ميزة التصوير بفتحة تشتت بالنسبة إلى اداء محدد بدالة $MTF_{midfreq}$. المصفوفتين 9-Oolay و12-Golay سوف يكون لها افضل اداء حيود مع معاملات ملء منخفضة ومتماثلة تقريبا. ولكن اداء و13-Golay سوف يكون لها المصفوفة و-Golay معامل الملء، في حين ان ميزة التصوير بفتحة تشتت بالنسبة إلى اداء محدد بدالة Golay. المصفوفة و-Golay و12-Golay و13-Golay سوف يكون لها افضل اداء حيود مع معاملات ملء منخفضة ومتماثلة تقريبا. ولكن اداء و13-Golay سوف يكون لها افضل اداء حيود مع معاملات ملء منخفضة ومتماثلة تقريبا. ولكن اداء Golay مصفوفة 9-Golay كانت Golay من 12-Golay، وهذا يعني ان الصورة الملتقطة بواسطة مصفوفة 9-Golay يجب ان يكون لها اروع من 12-Golay، وهذا يعني ان الصورة الملتقطة بواسطة مصفوفة 9-Golay يجب ان يكون لها اروع من 12-Golay ولمنا ولهذا 9-Golay بعامل تمدد 1.4 اعتمد من قبلنا ليكون افضل مصفوفة لان يكون الها اكبر D_{eff} لمعامل ملء متواضع نسبيا يعادل %2.00 كانه مصفوفة 9-Golay مصفوفة 9-Golay كاني كان ولوغ المال مصفوفة المعامل ملء متواضع نسبيا يعادل %2.00 كانه يحافظ على تباين تردد وسطي كافي. المكل الهندسي للمصفوفة موضح في الشكل 8.



ا**لجدول 2.** قياسات مصفوفة Golay-9 كدالة في معاملات التمدد

Array	Expansion Factor (s)	Dcircumscribed	FWHM _{PSF}	PISLR [dB]	$\rho_{\min}(\lambda f)$	$\rho_{\max}(\lambda f)$	MTF _{midfreq}	Fill Factor (α) (%)
Golay-9	1.0	8.02	$\delta_0/6.98$	-6.14	4.36	7.08	0.089	47.2
Golay-9	1.1	8.73	$\delta_0/7.58$	-7.09	4.71	7.68	0.076	40.6
Golay-9	1.2	9.43	$\delta_0/8.16$	-7.94	5.02	8.29	0.067	35.7
Golay-9	1.3	10.1	$\delta_0/8.77$	-8.70	5.32	8.90	0.059	31.9
Golay-9	1.4	10.8	$\delta_0/9.38$	-9.39	5.68	9.50	0.052	27.9
Golay-9	1.5	11.5	$\delta_0 / 9.98$	-10.0	5.92	10.1	0.046	25.7
Golay-9	1.6	12.2	$\delta_0 / 10.6$	-10.6	6.23	10.8	0.041	23.2
Golay-9	1.7	12.9	$\delta_0/12.7$	-11.4	2.12	11.4	Voids	—
Golay-9	1.8	13.6	$\delta_0 / 13.4$	-11.9	1.66	12.2	Voids	—
Golay-9	1.9	14.3	$\delta_0 / 14.1$	-12.4	1.20	12.7	Voids	_
Golay-9	2.0	15.0	$\delta_0/14.8$	-12.8	1.18	13.2	Voids	—

4. اخطاء الزيغ البصري في انظمة التصوير بفتحة التشتت Aberration Errors in a Sparse Aperture Imaging System

اخطاء المكبس و/او الطور المضافة إلى فتحة فرعية واحدة او اكثر بصفة عامة تقلل الدقة التحليلية. ولاختبار تأثير اخطاء الطور هذه على مصفوفة بدالة PSF غير متزامنة، قمنا بإيجاد معامل التربيع لتحويل فورييه عدديا من المعادلة (2)، بعد ان طبقنا في البداية تركيب الطور المفضل لكل فتحة فرعية. دالة MTF تم فحصها بالتقدير العددي من المعادلة (7) وبأخذ معامل الناتج.

الشكل 9 يوضح دالة PSF و دالة MTF لمصفوفة Golay-9 المحسنة عندما نصف موجة المكبس اضيفت الى الداخل، والفتحة الفرعية في الجانب الايسر السفلي في المصفوفة الموضح في الشكل 8. التأثير على دالة PSF ملحوظ بشكل قليل، عندما تزاح الطاقة من القمة المركزية إلى القمم الفرعية Sidelobes [9]. كما ان MTF تعاني من اضافة المكبس. لاحظ في الشكل 9 ان مستوى MTF في المساحات بين قمم الارتباط التلقائي النقطي يقل عن ما كان عليه في الشكل 6.





الشكل 4. دالة PSF و MTF لمصفوفة Golay-3 عند افضل معامل تمدد 1.6.

لحسن الحظ، نصف موجة المكبس هي اسوء حالة للفتحة الفرعية الفردية.

الشكل 10 يوضح دالة PSF و MTF لمصفوفة Golay-9 عند نفس الفتحة الفرعية لها انحدار على امتداد المحور الافقي بموجة كاملة. الانحدار بموجة كاملة على الفتحة الفرعية المفردة يسبب انحراف الطاقة من الفتحة الفرعية بعيدا عن المحور البصري، ويضع الطاقة في القمم الفرعية sidelobes لـ PSF وبهذا تقل الدقة التحليلية. كما ان MTF تعاني من الانحدار كما شاهدنا بظهور فراغ في التردد. وكما هو متوقع، اذا اردنا من نظام فتحة التشتت ان تزداد الدقة التحليلية فان الفتحات الفرعية يجب ان تزداد الدقق التحليلية في نفس الفتحات الفرعية يجب ان



5. تصوير شريحة الدقة التحليلية Imaging a Resolution Target

شريحة دقة تحليلية ISO12233 شفافة تم تصويرها على المستوى البؤري من خلال مصفوفة فتحة تشتت Golay-9 الافضل [14]. صورة الشريحة تزود بمتوسط قياس MTF للمصفوفة. التجهيزات العملية موضح في الشكل 11.





PSF (top view, log-scaled)





الشكل 5. دالة PSF و MTF لمصفوفة Golay-6 عند افضل معامل تمدد 1.5.















الشكل 6. دالة PSF و MTF لمصفوفة Golay-9 عند افضل معامل تمدد 1.4.

الاضاءة الغير متزامنة للهدف وضع على البعد البؤري امام العدسة f₁. وبهذه الطريقة، في النظام 4f تم وضع شريحة الدقة التحليلية عند مسافة محددة من العدسة f2 ومن ثم تم تقييم قناع مستوى مكون من العدسة/الحدقة. التكبير لنظام التصوير هو النسبة بين الابعاد البؤرية للعدسة، f1/f2. استخدمت شريحة بصرية عديمة اللون بشقين لتجنب الزيغ البصري الذي من الممكن ان يؤثر على الاداء، واستخدمت كاميرا CCD مونوكروماتيك (احادية اللون) (1200x1600 بكسيل بحجم بكسيل يساوي 1.4µm) باستجابة خطبة تعادل 8bit لالتقاط الصور



حدقة هذا النظام البسيط تتوافق مع العدسة f₂. ولهذا، Goley-9 (S=1.4) وضع قناع الحدقة اقرب ما يمكن (حوالي 7mm) من السطح الامامي لهذه المرآة. صورة لخطوط مائلة في شريحة الدقة التحليلية ISO12233 استخدم لحساب MTF باستخدام اللوغاريثم الاكثر شيوعا [15]. يأخذ اللوغاريثم صورة حواف الخطوط المائلة، ويوجد افضل خط يناسب fit من خلال حساب rorr ويبني least squares error ويبني من المتحقق المنحنى الحافة يحسب بعد ذلك للحصول على دالة انتشار الخط متوسط منحنى الحافة ويتقال التشار الخطوط المائلة ويتقال ويبني والفتات ويبني المائلة، ويوجد افضل خط يناسب MTF من خلال حساب ISO12233 من خلال حساب المائلة، ويوجد افضل خط يناسب fit من خلال حساب بعد ذلك للحصول على دالة انتشار الخط متوسط منحنى الحافة والمائلة، وبعد ذلك، يطبق تحويل فورييه الغير متصل على دالة انتشار الخط، والنتيجة تقاس بواسطة حجم البكسيل لتعطي MTF لحافة الخط المائل.











الشكل 7. دالة PSF و MTF لمصفوفة Golay-12 عند افضل معامل تمدد 1.3.



حسبت MTF بهذه الطريقة باستخدام بر امج تحليلية متوفرة من الرابطة الدولية لصناعة التصوير [16].

النتائج العملية موضحة في الشكل 12 حيث دوال MTF الرأسية والافقية حسبت من خصائص الخطين المائلين في الصور الملتقطة ورسمت على امتداد MTF النظرية لمصفوفة 9-Goley. الـ MTF المقاسة افتقت بشكل جيد مع MTF النظرية عند كل الترددات المكانية. بالإضافة الى جزء من الصورة الاصلية الملتقطة بواسطة مصفوفة 9-Goley موضح على الجانب الايسر في الشكل 13.



الشكل 8. الشكل الهندسي لمصفوفة Golay-9 بأفضل معامل تمدد يساوي 1.4.

الجدول 3. قياسات الجودة لأفضل مصفوفة Golay تحتوي على N عنصر.

Array	Expansion Factor (s)	$D_{ m circumscribed}$	FWHM _{PSF}	PISLR [dB]	$\rho_{\min}(\lambda f)$	$\rho_{\max}(\lambda f)$	MTF _{midfreq}	Fill Factor
Single	NA	1.00	δο	7.13	1.00	1.00	NA	1.00
Golay-3	1.6	2.85	$\delta_0/2.92$	-2.92	1.99	2.60	0.136	75.8%
Golay-6	1.5	5.58	$\delta_0 / 5.83$	-7.52	3.98	4.96	0.067	37.9%
Golay-9	1.4	10.8	$\delta_0/9.38$	-9.39	5.68	9.50	0.052	27.9%
Golay-12	1.3	14.8	$\delta_0 / 12.7$	-10.6	6.59	12.9	0.045	27.6%



MTF (top view, log-scaled)



PSF (top view, log-scaled)





الشكل PSF 9 و MTF لافضل مصفوفة Golay-9 بمكبس λ/2 اضيف الى فتحة فرعية واحدة.

بالرغم من ان الدقة التحليلية للصورة ازدادت بالمقارنة مع الفتحة الفرعية الفردية، الا ان هذا امرا غير مرضي لانخفاض التباين. انخفاض التباين مصاحب لمصفوفة التشتت التي لها معامل مل، منخفض: الانخفاض في الحزمة الوسطى لـ MTF يقابل مباشرة انخفاض تباين الصورة. ولهذا توقعنا ان انظمة التصوير بفتحة التشتت العملية سوف تستخدم فلتر استرجاع بعد الكشف لتحسين تباين الصورة [6]. نظريا، البصريات المثالية المستخدمة للصورة يمكن ان تسترجع بواسطة التصوير معروف ومحدد. لنظام تصويرة المراعية المتراعين الصورة إلى المورة إلى معامل مالمان النظمة التصوير بفتحة التشتت العملية سوف تستخدم فلتر استرجاع بعد الكشف لتحسين تباين الصورة [6]. نظريا، البصريات المثالية المستخدمة للصورة يمكن ان تسترجع بواسطة deconvolution للصورة الملتقطة عند المستوى البؤري على ان يكون لها PSF لنظام التصوير معروف ومحدد. لنظام تصوير عملي، تستخدم فلار المترجاع متطورة مثل



MTF (top view, log-scaled)













الشكل 11. تصوير شريحة دقة تحليلية اضيئت بضوء غير متزامن من خلال مصفوفة فتحة Golay



فلتر وينر هيلستروم Wiener-Helstrom، والتي تفسر التشويش الموجود في الصور الملتقطة [17]. فلتر الاسترجاع وينر، (W(f_x,f_y)، والتي deconvolves الصورة الملتقطة بنظام تصوير دالة PSF له معروفة في وجود التشويش الابيض يعطى بالمعادلة التالية:

$$W(f_x, f_y) = \frac{\mathscr{H}^*(f_x, f_y)}{|\mathscr{H}(f_x, f_y)|^2 + K},$$
(12)

حيث ان (*H*(f_x,f_y هي دالة OTF و K هي النسبة بين طاقة التشويش إلى متوسط طاقة اشارة الصورة. لاحظ ان فلتر وينر يمكن ان يحسن التباين ولكن لا يستطيع ان يسترجع التردد المكاني للصورة التي تقع اسفل مستوى التشويش. نتائج استخدام فلتر وينر للصور التي قمنا بالتقاطها موضحة في الجانب الايمن في الشكل 3 حيث K اختيرت لتزودنا بصورة مرضية.

6. تكوين صور المستوى البؤري Synthesis of Focal Plane Images

في الجزء 5 قمنا بعمل تجربة اكدت ان الصور بدقة تحليلية عالية يمكن ان تكون بضم المجالات لكل فتحة فرعية على مستوى بؤري واحد للكاشف. مثل نظام التصوير هذا موضح في الشكل 14 (a). الصور المتراكبة تشكلت بواسطة كل مجالات الفتحات الفرعية جمعت في مركز المحور البصري لمستوى البؤرة بواسطة قوة عدسة كبيرة. شدة الصورة المرصودة بواسطة مصفوفة المستوى البؤري هي مربع معامل المجال المتراكب. تكوين مناسب لمجالات مستوى حدقة الفتحات الفرعية بشكل مجالات الفتحة الفرعية ان تكون في نفس الطور في حيز التداخل، و هذا ما تقوم به العدسة الكبيرة بشكل مباشر. لسوء الحظ، العدسة الكبيرة المفردة تتغلب على احد الإسباب الرئيسية لاستخدام التصوير بفتحة التشتت و هو تقليل التكاليف والوزن ومساحة البصريات المستخدمة. اخرون قاموا ببناء انظمة تصوير بفتحة التشتت باستخدام عناصر بصرية متعددة واصغر لتقوم بدمج مجالات الفرعية بشكل مقزامن على كاشف واحد مثل مختبر ابحاث القوة الجوية تحت اسم على المؤرعية بشكل مقزامن على كاشف واحد مثل مختبر العائم القوة الجوية تحت اسم على الفتحات الفرعية بشكل مقزامن على كاشف واحد مثل مختبر العائم القوة الجوية تحت اسم مجالات الفتحات الفرعية بشكل مقزامن على كاشف واحد مثل مختبر العائم المورة المؤرون قاموا ببناء الفرعية بشكل مقزامن على كاشف واحد مثل مختبر الحاث القوة الجوية تحت اسم مجالات الفتحات الفرعية بشكل مقزامن على كاشف واحد مثل مختبر الحاث القوة الجوية تحت اسم مطالتونوية بشكل معترامن على كاشف واحد مثل مختبر الحاث القوة الجوية تحت اسم معالات الفتحات الفرعية بشكل مقزامن على كاشف واحد مثل مختبر العائمين استخدمة الاستشعار عن بعد الذي يوفر تغذية ملولمين على كاشف واحد مثل مختبر الحاث القوة الجوية تحت اسم محالات الفرعية بشكل مقزامن على كاشف واحد مثل مختبر الحاث القوة الحوية الاستشعار عن بعد الذي يوفر تغذية مكسية لتفعيل التحكم في جامع الاشعة الضوئي. ونظام تصوير بفتحة تشتت بديل يجمع شدة الصور الماتقطة بواسطة كاميرات متعددة منفصلة موضح في الشكل 14 (d). في هذا النظام مجال الحدقة يحول الى عينات sampled بواسطة كاميرات مستقلة متعددة، والتي تتكون من عدسات بسيطة ومصفوفة CCD.



الشكل 12 دالة MTF النظرية والمقاسة عمليا لمساحة مقاطع افضل مصفوفة Golav-9 (s=1.4).

A. وصف العملية Process Description

مصفوفة CCD تسجل الشدة المتوسطة خلال فترة الزمن، وليس المجال المعقد. وبالمعلومات المتوفرة في المستوى البؤري، يكون هناك قلة في المعلومات الكاملة للمجال في مستوى الحدقة. يمكن قياس الطور بالاعتماد على طرق تصوير متزامنة متقدمة، مثل التصوير الهولوجرافي او الرصد الهترودايني (المتعلق باقتران ترددين) [18]. ومن اجل تبسيط التجربة العملية، اخترنا ان نستخدم احد طرق اللوغاريتمات المعروفة لاسترجاع الطور لبناء مجال الحدقة لكل فتحة فرعية بالاعتماد على قياسات شدة مستوى البؤرة [19]. وبالارتباط مع لوغاريثم استرجاع الطور، فان الكاميرات المنفصلة هي مجسات الساسية لجبهة الموجة تقوم بقياس مجال مستوى الحدقة عند كل موضع فتحة فرعية.

بالعودة إلى الشكل 14 (b)، شدة الصور الناتجة عن اجسام اضيئت بضوء متزامن التقطت في نفس اللحظة على كواشف CCD عند نفس المستوى البؤري. تم ايجاد معامل المجالات الملتقطة عند المستوى البؤري من خلال الجذر التربيعي لكل شدة صورة.



معامل مستوى البؤرة هذا وشكل الفتحة المعروف هي قيود تستخدم في تحويلات فوربيه المتكررة لوغاريثم استرجاع الطور والذي ينتج عنه تقدير للمجال المعقد عند كل حدقة كاميرا [20]. وخلال العملية اللاحقة، استرجاع مجالات الفتحات الفرعية يستخدم في مصفوفة واحدة عند موضع يتطابق مع الموضع الحقيقي للكاميرا في مصفوفة فتحة التشتت. صور بدقة تحليلية اعلى تتكون رقميا من خلال استخدام العدسة الوهمية وتطبيقها على مجالات منفصلة مكانيا وتمتد لمجال مستوى الحدقة والى لمستوى بؤرة الكاشف الوهمية وتكون صورة مستوى المجال من خلال تحويلات فوربيه المنفصلة. الصورة المتكونة هي معامل مربع الناتج.

B. تكوين صورة لجسم نقطي عمليا Experimental Synthesis of a Point Object Image.

استخدمنا النظام الموصوف في الشكل 15 لتصوير جسم نقطي قرب باستخدام موجة مستوية جاوسيان بواسطة فلترة وتجميع شعاع ليزر Nd:YAG. لتبسيط التجربة استخدم افضل قناع Golay-3 (s=1.6) ووضع في مستوى الحدقة، باستخدام فتحة فر عية مفردة مكشوفة تم التقاط صورة بواسطة CCD.



الشكل 13 صورة صف Golav-9 (على اليسار) والصورة المسترجعة لها بفلتر وينر (على اليمين)





الشكل 14 (a) تكوين الصورة باستخدام عدسة حقيقية مفردة. (b) تكوين الصورة باستخدام عدسة تخيلية.

اخذت صورة تطابق كل فتحة فرعية بالتعاقب. تم اعادة بناء مجال مستوى الحدقة (السعة والطور) لكل فتحة فرعية باستخدام تحويلات فورييه المتكررة لوغاريثم استرجاع الطور. الشكل 16 عبارة عن مثال يوضح صور مستوى البؤرة التي اخذت واسترجاع طور مستوى الحدقة والشدة الناتجة من استخدام لوغاريثم استرجاع الطور أننا قمنا بتصوير مصدر نقطي، فان

استرجاع مجالات مستوى الحدقة يظهر طور وشدة مسطح. وعلى كل حال، لان اللوغاريثم استرجاع الطول استخدم بشكل منفصل لكل فتحة فرعية فكل علاقات طور الحدقة فقد كنتيجة لذلك.



الشكل 15. تصوير جسم نقطي غير محدود بمصفوفة فتحة Golay المثبتة



الشكل 16. طور مستوى الحدقة والشدة المسترجعة للفتحة الفرعية B في مصفوفة Golay-3 موضح على اليسار



في خطأ المكبس واعطى اداء ضعيف لنظام التصوير. لتصحيح هذا الامر، قمنا بطرح متوسط الطور المقاس على كل حدقة حتى نصفر مكبس الحدقة. وبعد ذلك مجالات طور حدقة الفتحة الفرعية المصحح ادمج في مصفوفة واحدة. مصفوفة مجالات الفتحات الفرعية مدت حتى مستوى البؤرة من خلال تحويل فورييه المنفصل وتربيعه للحصول على صورة مستوى البؤرة المتكون للجسم النقطي الموضح في الشكل .17

. الضعف الشديد في الصورة المتكونة بواسطة استرجاع الطور ${f C}$

Potential Weaknesses of Image Synthesis Using Phase Retrieval

لاحظنا ان طريقتنا في استخدام لو غاريثم استرجاع الطور لا يجمع على مجال حدقة جيد في وجود مقدار من التشويش الخلفي كبير. اللو غاريثم استرجاع الطور يقوم بإعادة البناء بشكل عشوائي، لتراكيب دقيقة في طور مستوى الحدقة حتى عندما يستخدم انحياز صغير منتظم يضاف الى شدة Airy المثالية في مستوى البؤرة. اننا نشك ان هذا التركيب الدقيق مطلوب في الحدقة لكي نشتت بعض الطاقة بعيدا عن بقعة Airy المركزية الصغيرة في اتجاه تجمع كل مستوى البؤرة. تتطلب عملية بناء الفتحة الناجحة دمج متزامن لمجالات حدقة فتحات متعددة. ولدمج متزامن لهذه المجالات خلال عملية الكشف اللحق، علاقات الطور بين حدقات الفتحة الفرعية يجب ان تكون معروفة. ولهذا مجال مستوى الحدقة



الشكل 17. تكوين أخر كشف لشدة صور نظام Golay-3



يجب ان تكون متزامنة مكانيا على كل فتحة التشتت ومتزامنة زمنيا على كل زمن التعريض لمصفوفة مستوى بؤرة CCD. الجسم النقطي المستخدم في تجربتنا ينتج مجال حدقة متزامن مكاني، ولكن الاشعاع من الجسم الممتد لا يظهر تزامن مكاني على كل الحدقة. ولهذا لكي نحافظ على علاقات الطور بين الفتحات الفرعية المنفصلة، فان الجسم يجب ان مضاء بضوء متزامن. الاضاءة المتزامنة تعرض بعض الامكانيات المحتملة. اولا، لو غاريثم استرجاع الطور يجب ان يعيد بناء قيم مركبة لمجال الحدقة من شدة معن المحاور بين صورة مستوى البؤرة، مهمة اللوغاريثم وجدت بانها صعبة [21]. ثانيا، لان طور الحدقة في الاغلب صورة مستوى البؤرة، مهمة اللوغاريثم وجدت بانها صعبة [21]. ثانيا، لان طور الحدقة في الاغلب تحتوي على تراكيب دقيقة، فان مكبس متطور اكثر وبدون امالة يجب ان يصم. ثالثا، اضاء متزامنة تعرض بعض يحتوي على تراكيب دقيقة، فان مكبس متطور اكثر وبدون امالة يجب ان يصم. ثالثا، اضاء متزامنة تحرض الغلب وحتوي على تراكيب دقيقة، فان مكبس متطور المتر وبدون امالة يجب ان يصم. ثالثا، اضاء متزامنة الحاد الخلي الخلب وحتوي على تراكيب دقيقة، فان مكبس متطور اكثر وبدون امالة يجب ان يصم. ثالثا، اضاء متزامنة الخابة المنزامنة وحتوي على تراكيب دقيقة، فان مكبس متطور الخر وبدون امالة يجب ان يحمم. ثالثا، اضاء متزامنة المام تحتوي الخلب ولاغلي ويسبب ضرر للصورة، ولهذا يمكن تقليلها بواسطة وحتوي على تراكيب دقيقة، فان مكبس متطور المتر وبدون امالة يجب ان يصم. ثالثا، اضاء متزامنة المام تدخل بقع في صورة مستوى البؤرة. تباين البقع عالي ويسبب ضرر للصورة، ولهذا يمكن تقليلها بواسطة ونخل مل منورة المتوسط وهذا يمد التزامن المكاني للصورة المتكونة. ولكن هذا يتطلب زيادة زمن التعريض الكلي ونظام كشف لتكوين الصورة اكثر تطورا لبناء صور بدقة تحليلية عالية.

7. الخلاصة والاستنتاج Summary and Conclusions

قمنا بتعريف لمقياس الدقة التحليلية بالاعتماد على دالة PSF ودالة MTF لتقييم مصفوفة التشتت بعدد N من الفتحات الفرعية المتماثلة ذات حد الحيود. تم در اسة تأثيرات تشويش الكاشف، وفلتر استرجاع الصورة، والمكبس و/أو زيغ الانحناء بالنسبة الى تصوير فتحة التشتت. اخترنا مصفوفة Golay ذات ارتباط تلقائي مدمجة بالقدر الكافي مع التحكم في عدد الفتحات الفرعية والمسافات النسبية بينهم للوصول إلى افضل تماثل ثلاثي لمصفوفة و-Golay. قمنا بعد ذلك بتكوين صورة من مجالات حدقة فتحة فرعية إلى افضل تماثل ثلاثي لمصفوفة و-Golay. قمنا بعد ذلك بتكوين صورة من مجالات حدقة فتحة فرعية معنددة بواسطة قناع عدسة كبيرة مع مصفوفة و-Golay. قمنا بتصوير شريحة دمن مجالات حدقة فتحة فرعية الي افضل تماثل ثلاثي لمصفوفة و-Golay. قمنا بعد ذلك بتكوين صورة من مجالات حدقة فتحة فرعية الحدة بواسطة قناع عدسة كبيرة مع مصفوفة و-Golay معا يتصوير شريحة دقة التحليل بخط مائل التحقق من حصيلة الدقة التحليلية لمصفوفة و-Golay معا قدرت بواسطة دالة MTF لها. كذلك بنجاح متعددة بواسطة قناع عدسة كبيرة مع مصفوفة و-Golay كما قدرت بواسطة دالة MTF لها. كذلك بنجاح التحقق من حصيلة الدقة التحليلية لمصفوفة و-Golay كما قدرت بواسطة دالة MTF لها. كذلك بنجاح البقنا السترجاع لصورنا لكي نسترجع التباين المفقود. ثم بعد ذلك وصفنا طريقة التكوين التي تستخدم اللوغاريثم استرجاع الطور وعرضنا النتائج العملية لتصوير جسيم نقطي. الضعف في استخدام هذه اللوغاريثم استرجاع الطور وعرضنا النتائج العملية لتصوير جسيم نقطي. الضعف في استخدام هذه اللوغاريثم استرجاع الطور وعرضنا النتائج العملية لتصوير جامين نقطي. الضعف في استخدام هذه اللوغاريثم استرجاع الطور وعرضنا النتائج العملية لتصوير جامين نقطي. الضعف وي التي تسخدم مصفوفات فتحة التشت النه يعزز الدقة التحليلية لفتحة مفردة. ولكن، لاحظنا اللوغاريثم الرغية تماز راعية مفردة ولكن التي تشوين التي تستخدام هذه الطريقة تم مناقشته. التصوير بفتحة التشت بين انه يعزز الدقة التحليلية لفي مفردة ولكن، لاحظنا اللوغايية، ممان يقلي الصور بالمنو عنه ورعن تحدي تقني هائل لضبط دقيق لطور الفحيا مصفوفات فتحة التشت لها نسبة عالم من خلال استخدام استرجاع الطور ممكن وتم استعر اضه. ولكن، مصفوفات فتحة العملية، تكوين الصور بالكشف ما خلال استخدام الترجاع الطور ممكن وتم استعر فيه. ولكن، وحمان محيه مموفوات



هذا الجهد مدعوم بشكل جزئي من قبل القوة الجوية الامريكية والديناميكية العامة لدايتون، اوهايو ـ من خلال العقد رقم F33601-02-F-A581، وبواسطة مؤسسة الاتصالات البصرية والليدار (LOCI) في جامعة دايتون. وجهات النظر الموضحة في هذا البحث هي للباحثين ولا تعكس السياسة الرسمية للقوات الجوية، قسم الدفاع او الحكومة الامريكية.

تمت الترجمة في المركز العلمي للترجمة

www.trgma.com

4-10-2010

References



1. J. D. Monnier, "Optical interferometry in astronomy," Rep. Prog. Phy. 66, 789–857 (2003).

2. J. W. Goodman, Statistical Optics, 1st ed. (Wiley-Interscience, 1985).

3. A. A. Michelson, *Studies in Optics* (University of Chicago Press, 1927).

4. M. J. E. Golay, "Point arrays having compact nonredundant autocorrelations," J. Opt. Soc. America **61**, 272–273 (1971).

5. R. D. Fiete, T. Tantalo, J. R. Calus, and J. A. Mooney, "Image quality of sparse-aperture designs for remote sensing," in Opt. Eng. **41**, 1957–1969 (2002).

6. L. M. Mugnier, G. Rousset, and F. Cassaing, "Aperture configuration optimality criterion for phased arrays of optical telescopes," J. Opt. Soc. Am. A **13**, 2367–2374 (1996).

7. J. E. Harvey and R. A. Rockwell, "Performance characteristics of phased array and thinned aperture telescopes," Opt. Eng. **27**, 762–768 (1988).

8. J. L. Flores, G. Paez, and M. Strojnik, "Design of a diluted aperture by use of the practical cutoff frequency," Appl. Opt. **38**, 6010–6018 (1999).

9. S.-J. Chung, D. W. Miller, and O. L. deWeck, "Design and implementation of sparse aperture imaging systems," in *Highly Innovative Space Telescope Concepts*, H. A. MacEwen, ed., Proc. SPIE **4849**, 181–192 (2002).

10. S. M. Watson, J. P. Mills, and S. K. Rogers, "Two-point resolution criterion for multiaperture optical telescopes," J. Opt. Soc. Am. A **5**, 893–903 (1988).

11. J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, 2nd ed. (McGraw-Hill, 1996).

12. J. R. Fienup, "MTF and integration time versus fill factor for sparse-aperture imaging systems," in *Imaging Technology and Telescopes*, J. W. Bilbro, J. B. Breckinridge, R. A. Carreras, S. R. Czyzak, M. J. Eckert, R. D. Fiete, and P. S. Idell, eds., Proc. SPIE **4091**, 43–47 (2000).

13. E. Keto, "The shapes of cross-correlation interferometers," Astrophys. J. **475**, 843–852 (1997).

14. ISO 12233, "Photography—electronic still-picture cameras— resolution measurements" (International Organization for Standardization, 2000).



15. B. Tatian, "Method for obtaining the transfer function from the edge response function," J. Opt. Soc. Am. 55, 1014–1019 (1965).

16. P. Burns, *Spatial Frequency Response code written for Matlab, sfrmat2: version 2.1* (International Imaging Industry Association, 2003).

17. C. W. Helstrom, "Image restoration by the method of least squares," J. Opt. Soc. Am. **57**, 297–303 (1967).

18. J. W. Goodman, D. W. Jackson, M. Lehmann, and J. Knotts, "Experiments in long-distance holographic imagery," Appl. Opt. **8**, 1581–1586 (1969).

19. R. J. Fienup, "Phase retrieval algorithms: a comparison," Appl. Opt. 21, 2758–2769 (1982).

20. J. N. Cederquist, J. R. Fienup, C. C. Wackerman, S. R. Robinson, and D. Kryskowski, "Wave-front phase estimation from Fourier intensity measurements," J. Opt. Soc. Am. A **6**, 1020–1026 (1989).

21. J. R. Fienup, "Reconstruction of a complex-valued object from the modulus of its Fourier transform using a support constraint," J. Opt. Soc. Am. A **4**, 118–123 (1987).

22. N. J. Miller, B. D. Duncan, and M. P. Dierking, "Resolution enhanced sparse aperture imaging," in *Proceedings of IEEE Aerospace Conference* (IEEE, 2006) IEEEAC paper 1406.