

تصميم عدة أفنعة بصرية وتنفيذها وتقييم أدائها لتقليل الأشعة الضوئية الراجعة عن الأجهزة البصرية والإلكتروبصرية

محمد سعيد معروف و فواز سيوف و ظافر موسى

المعهد العالي لأبحاث الليزر وتطبيقاته – جامعة دمشق – سورية

تاريخ الإيداع 2011/03/01

قبل للنشر في 2011/10/17

الملخص

تعدُّ ظاهرة الضوء الراجع من نقاط الضعف الرئيسية في إخفاء الأجهزة الضوئية والأنظمة البصرية المستخدمة ككواشف ضوئية وكاميرات المراقبة. لأنها وإن حدثت بقيم صغيرة، يمكن للطرف الآخر معرفة مكان وجود هذه الأجهزة عن طريق رصد الإشارات الضوئية الراجعة عنها. أصبح هذا الموضوع يشغل مصممي الأجهزة البصرية والأجهزة الإلكترونية والبصرية وكاميرات المراقبة. درست في هذه الورقة الطرائق التي استخدمها الباحثون سابقاً لتقليل الإشارات الراجعة عن الأجهزة البصرية ومحاسن تلك الطرائق ومساوئها. ونقترح عدة تصاميم لأفنعة بصرية (optical masking) لتخفيض الأشعة الضوئية الراجعة (المرتدة) عن الأجهزة البصرية والإلكتروبصرية المستخدمة، وإمكانية حذف الضوء الراجع بشكل تام. مع المحافظة على جودة الصورة في أثناء المراقبة والتصوير، وقياس دقة الفصل لتلك الصورة وقياس تابع الـ MTF لتلك الأفنعة البصرية.

الكلمات المفتاحية: الضوء الراجع، الأجهزة والأدوات البصرية، الأفنعة البصرية.

Design, Realization, and evaluation multiple optical masks for Reduction of Retroreflection from optical and opto-electronical systems

M. S. Maroof; F. Sayoaf and Z. Moussa

High institute of research and application laser- Damascus university- Syria

Received 01/03/2011

Accepted 17/10/2011

ABSTRACT

Optical retroreflection phenomena take place in optical instruments used as detectors, optical measurement devices and surveillance cameras.

Retroreflection is considered as the principal weakness even when it takes place in small values as it enables observers to pinpoint the presence of these devices by observing their retroreflective signals. Therefore, this issue became the main concern of designers of the optoelectronic instruments and surveillance cameras.

In this paper, methods used by researchers to diminish or even to eliminate the retro-reflective signal are considered. Each of these methods has its advantage and disadvantages. The optical masking method with its theoretical and experimental considerations is proposed. The main objective of this method is to reduce the retro-reflective optical beams of getting out from optical and optoelectronic devices in use. The possibility to the complete elimination of retro-reflective beams by means of optical masking is considered. The maintenance of the image quality during surveillance and taking pictures, the measurement of the resolution, and the MTF function were maintained.

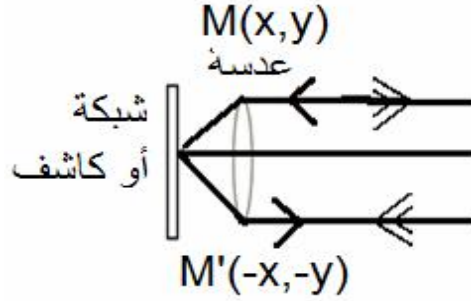
Key words: Retroreflection, Optoelectronic system, Optical masking.

المقدمة

لم يحظَ موضوع الأشعة الضوئية الراجعة بالشهرة المناسبة بين الباحثين في البصريّات والضوئيات، كغيرها من الظواهر، هذا على الرغم من أنها ظاهرة مهمة جداً. فمصمم الأدوات المرورية (العواكس خاصة) يجهد في جعل الضوء الراجع أعظم مايمكن، بينما في الكواشف الضوئية وأنظمة المراقبة المخفية يجهد مصمم الأنظمة البصرية لجعله أصغر مايمكن، لأن الإشارة الراجعة هي نقطة ضعف تبين مكان الكاشف البصري أو أداة المراقبة الضوئية.

الضوء الراجع هو بالتعريف الضوء المرتد باتجاه المنبع عند إنارة جهاز بصري. يبين الشكل (1) كيفية رجوع الضوء في جملة ضوئية بسيطة (عدسة و سطح عاكس في المستوي المحرق) وتكون الإشارة واضحة في حالة استخدام الليزر كمنبع ضوئي.

تبحث هذه الورقة في طرائق التغلب على ظاهرة الضوء الراجع، والتخلص منه باستخدام طريقة الأفنعة البصرية الحديثة، وسنقدم بالنتيجة اقتراحاً وتصميماً مدروساً لأدوات ضوئية ينعدم فيها الضوء الراجع تقريباً.



الشكل (1) رجوع الأشعة الضوئية عند إنارة جهاز بصري بواسطة منبع ليزري.

طرائق تقليل الأشعة الضوئية الراجعة

هناك عدة طرائق لتخفيض شدة الأشعة الضوئية الراجعة عن الأنظمة البصرية والإلكتروبصرية وهي ثمانية طرائق رئيسية. [1,11,12,13,17].

أ- إمالة عدسة الدخّل (الجسمية) في النظام البصري:

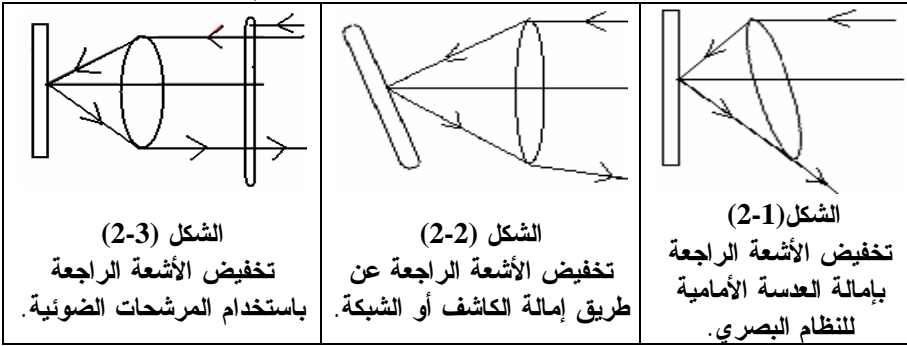
يمكن خفض الأشعة الراجعة بإمالة عدسة الدخّل (الجسمية) في النظام البصري. من عيوب هذه الطريقة أنها تحتاج إلى إمالة العدسة بزوايا كبيرة مما يزيد الزيوغ البصرية ويقلل حقل الرؤية، الشكل (1-2).

ب- إمالة الكاشف أو شبكة القياس المتوضعين في المستوي المحرقى لجسمية دخل النظام البصري:

بإمالة الشبكة أو الكاشف سيتغير اتجاه الأشعة الراجعة كما في الأجهزة البصرية التي تحوي كواشف ضوئية أو شبكات تسديد أو قياساً في المستوي المحرقى لجسمية الدخل. لكنه في الحقيقة يخرجها باتجاه آخر، ويقللها بسبب صغر فتحة الدخل عند الميلان، كما في الشكل (2-2).

ج - المرشحات الضوئية:

يمكن استخدام مرشح ضوئي كما في الشكل (2-3) بحيث يوضع المرشح الضوئي أمام فتحة الدخل للنظام البصري، أو أمام المستوي المحرقى. من الممكن أن نرسم شبكة القياس أو التسديد الخاصة بالجهاز البصري على المرشح الضوئي مباشرة من جهته الخلفية. هذه الطريقة فعالة جداً إذا امتص المرشح نطاقاً موجياً ضيقاً موافقاً لطول موجة الليزر المستخدم في الكشف. هي فعالة من أجل الليزرات العاملة ضمن هذا النطاق الموجي فقط، وبقيّة الأشعة ستمر ليقوم الجهاز بعمله. على سبيل المثال: من أجل الأشعة الليزرية التي لها طول الموجة $1\mu\text{m}$ أو قريبة منه، يمكن استخدام فلتر من النوع KG1,KG5 [3] [schott]. يتميز هذا المرشح بأنه يمتص طول موجة الليزر $1\mu\text{m}$ ، ويمرر الأطوال الموجية المرئية فلا يعطي أي تأثير سلبي بالنسبة إلى الصورة العادية، أما بالنسبة إلى طول موجة الليزر المرئي مثلاً فإنه لا يعمل بشكل جيد.



د - إمالة الجهاز البصري أو البصري الإلكتروني المستخدم:

عند إمالة الجهاز البصري أو الكاميرا كما في الشكل (3-1)، فإن العديد من الكاميرات أو الحساسات تميل والطاقة الراجعة تكون أقل، كما تقل الأشعة الراجعة. هذه الطريقة تتطلب إمالة كبيرة للجهاز (أكثر من نصف حقل الرؤية) فيقل مجال استخدام الجهاز ويقل وضوح الصورة.

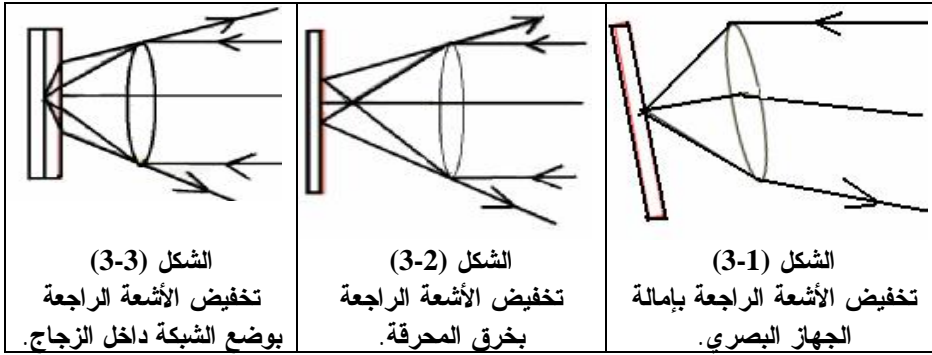
هـ- خرق محرقة الجهاز البصري (Defocusing):

تؤدي عملية خرق المحرقة في الأنظمة البصرية إلى عدم رجوع الأشعة إلى المنبع بسبب تغير المحرق، مما يؤدي إلى زيادة الزيغ البصري، ومن ثم يعطي صورة غير واضحة كما في الشكل (3-2).

و- تغيير مواصفات الشبكة في المحرق:

يجري ذلك برسم شبكة القياس أو التسديد التي توضع عادة في المستوي المحرقي للأجهزة البصرية، بواسطة الليزر داخل الصفيحة المتوازية الوجهين، أو برسم تلك الشبكة على الصفيحة المتوازية الوجهين مباشرة، ثم تلتصق مع صفيحة ثانية متوازية الوجهين ومن نوع الزجاج البصري نفسه كما في الشكل (3-3). ويجب أن تكون قرينة انكسار اللاصق البصري مساوية لقرينة انكسار الزجاج البصري المستخدم. هذه الطريقة جيدة ورخيصة الثمن ولا تتعلق بطول موجة الليزر المستخدم، وتشبه من حيث المبدأ طريقة خرق المحرقة (Defocusing)، ولكنها لا تحذف الأشعة الضوئية الراجعة كلها، وسماكة الشبكة تصبح كبيرة إذا أردنا نتائج أفضل، ولا تؤثر في جودة الصورة.

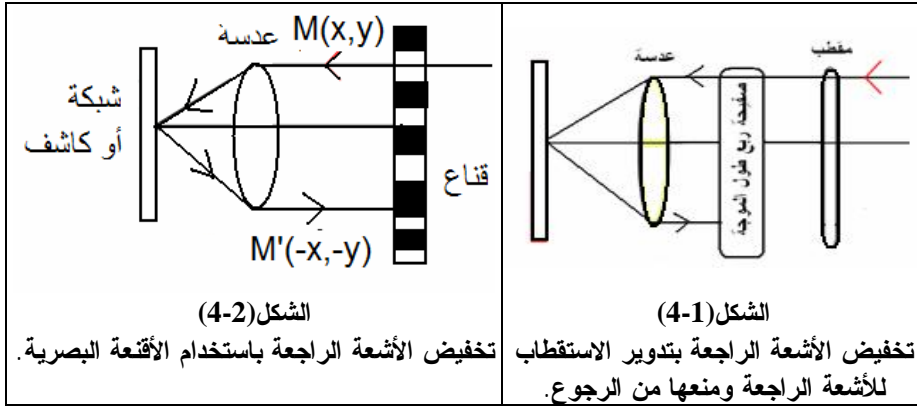
ولكن هذه الطريقة خاصة ببعض الأجهزة كقوائس المسافة والمناظير ذات الشبكات، ولا يمكن تطبيقها على الكاميرات.



ز - استخدام مقطب وصفيحة ربع طول الموجة:

يمكن استخدام صفائح موجية (wave plate) كما هو موضح في الشكل (4-1)، يُدور الاستقطاب للأشعة الراجعة وتمنع من الرجوع إلى المنبع، وذلك بوضع مقطب ضوئي (polarizer) يسمح للأشعة بالورود وفق اتجاه واحد فقط بالعبور، ومن ثم تقوم الصفيحة الموجية ($\lambda/4$) بتدوير الاستقطاب بمقدار $(\pi/2)$. يصبح الاستقطاب عمودياً على استقطاب الشعاع الوارد فلا يسمح له المقطب بالمرور مرة ثانية. هذه الطريقة فعّالة ولا تبقى سوى 10% من الأشعة الراجعة، وهي الأشعة التي أصبح استقطابها دائرياً، لكن هذه

الصفحة عالية الثمن، وشفافة ربع طول الموجة مرتبطة بطول موجة الليزر المستخدم أيضاً، لذلك لا تستخدم هذه الطريقة لأنها غير عملية.



ح- طريقة الأفنعة البصرية (Optical masking):

تستخدم الأفنعة البصرية كما في الشكل (4-2) بحيث تمر الأشعة الضوئية أولاً في القناع البصري وبعد انعكاسها في المستوي المحرق، نختار قناعاً بصرياً بحيث لا يسمح بمرور الأشعة مرة ثانية منه.

مبدأ عمل القناع البصري

يعتمد عمل القناع البصري على حجب الأشعة الراجعة (المرتدة) عن الأنظمة البصرية، مع الأخذ بالحسبان فتحة دخل النظام البصري، والأشعة الضوئية الواردة على فتحة الدخل لمعيد ضوئي أو أي نظام بصري في النقطة التي إحداثياتها $M(x,y)$ ، سترتد عنه في النقطة التي إحداثياتها $M'(-x,-y)$ ، متناظرة مع الأشعة الواردة ومحفوظة على النقطية بالنسبة إلى مركز العدسة. ذلك لأن الانعكاس الذي يحدث في المستوي المحرق للعدسة يعود بزواوية انعكاس مساوية لزواوية الورد، كما هو موضح في الشكل (4-2).

وعليه فإن كل شعاع ضوئي يرد على عدسة الدخل للنظام البصري يرجع وفق مبدأ الأشعة الراجعة، متناظراً مع الشعاع الوارد بالنسبة إلى المحور البصري للعدسة. نريد أن نوضح هنا أن الشيء المهم بالنسبة إلى عمل القناع البصري هو عدم التناظر في حجب الضوء كي نحذف الأشعة الراجعة ونغلق عليها الطريق بمنع عودتها إلى المنبع الذي وردت منه.

إن عملية حجب الأشعة الراجعة يجب أن تتلائم مع المحافظة على جودة الصورة التي نحصل عليها في الأنظمة البصرية وكاميرات المراقبة، وستوضح كيفية التأكد من

الحجب البصري للقناع وطريقة قياس جودة الصورة عن طريق قياس قدرة الفصل للنظام البصري (Resolution) قبل استخدام القناع البصري وبعده.

نذكر فيما يأتي الخواص الأساسية المميزة لجودة النظم البصرية:

1- تكبير النظام البصري.

2- شدة إضاءة الخيال أو الصورة.

3- حقل الرؤية.

4- جودة الصورة (الخيال البصري) وهذه مرتبطة بما يأتي:

أ- قدرة الفصل للجهاز البصري. هي قدرته على تمييز خيال عن آخر.

ب- تابع النقل التعديلي للصورة MTF (Modulation Transfer Function).

ج- الزيوج البصرية وهي انزياح موقع الخيال الحقيقي عن موقعه المثالي بسبب الخطأ في العنصر البصري، وله عدة أنواع (الزيغ الكروي، الانزياح عن الخط الحيبي، الزيغ الكروي للحزمة المنحرفة، التذبذب، اللانقطية، انحناء الحقل، التشوه، والزيغ اللوني).

سنهتم في بحثنا هذا من أجل تحديد جودة الصورة بقدرة الفصل وتابع MTF؛ لأنها الأهم في حالة الأفتعة البصرية.

1- التعابير الرياضية المستخدمة من أجل تحديد جودة الصورة وتقليل الأشعة الراجعة:

- تابع MTF (Modulation Transfer Function).

إن جودة الخيال لجسم ما عبر عدسة يعبر عن جودة هذه العدسة، وتقاس جودة الخيال بقياس التباين للترددات الفراغية.

يَعْرِف التباين (أو التعديل) بالعلاقة الآتية [20]:

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

ومن أجل جسم ما لدينا:

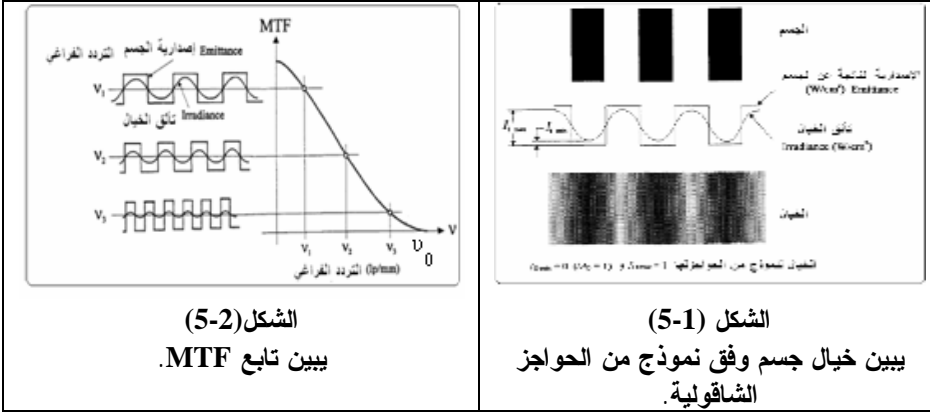
$$M_o = \frac{I_{o\max} - I_{o\min}}{I_{o\max} + I_{o\min}}$$

إذ $I_{o\max}$, $I_{o\min}$ هي الشدات العظمى والدنيا المنبعثة عن الجسم.

وكذلك للخيال:

$$M_i = \frac{I_{i\max} - I_{i\min}}{I_{i\max} + I_{i\min}}$$

إذ I_{imax} , I_{imin} هي الشدات العظمى والدنيا المنبعثة عن الخيال، كما هو موضح في الشكل (5-1).



الشكل (5-2)
يبين تابع MTF.

الشكل (5-1)
يبين خيال جسم وفق نموذج من الحواجز الشاقولية.

إنَّ تابع الـMTF بالتعريف هو :

$$MTF(u) = \frac{M_i}{M_o}$$

إذ u هو التردد الفراغي (spatial frequency) زوج خط (عاتم ومضيء) في واحدة الطول (عادة بالمليمتر) [20]. إنَّ عدد أزواج الخطوط يزداد ما دام التباين في الخيال يتناقص إلى حد ينعدم عنده التباين ومن ثم نصل إلى تردد القطع للنظام البصري u_0 وهو التردد الذي ينعدم من أجله تابع الـMTF، كما هو مبين في الشكل (5-2). من أجل نظام بصري خالٍ من العيوب:

$$u_0 = \frac{1}{\lambda(f/D)}$$

إذ λ : طول موجة الضوء المستخدم.

f/D : العدد المحرق ويساوي البعد المحرق للعدسة مقسوماً على فتحة العدسة (f-number).

- تقييم جودة الصورة يجري بواسطة تابع نقل الصورة (MTF).

الذي يستخدم كميّار (autocorrelation function) لتابع الارتباط الذاتي للحقل $A(x,y)$ في فتحة الدخل [1]

$$MTF = |A(x,y) \otimes A^*(x,y)| \quad (1)$$

$$A(x, y) = A_0(x, y) \exp[ic(x^2 + y^2)] \quad \text{إذ:}$$

وإذ $A(x, y)$ هي طويبة الحقل في نقطة (x, y) من مستوي فتحة الدخل للنظام البصري باعتبار مبدأ الإحداثيات على المحور البصري للنظام البصري المدروس.

A^* : يرمز إلى المرافق العقدي لـ A ، A_0 : تابع فتحة الدخل لنظام المحرقة، c : مقدار اللامحرقية للعدسة.

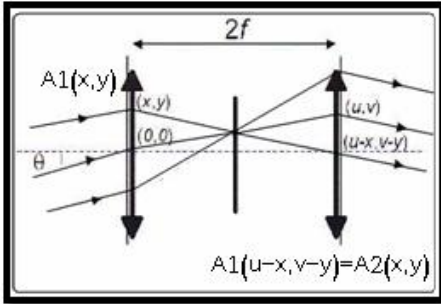
نفرض أن النظام البصري لا يوجد فيه عدم محرقة، أي إن $c=0$ ، في هذه الحالة يكون لدينا $A(x, y)$ هو فقط تابع فتحة الدخل إذ إن قيمته (1) عندما تكون الأشعة غير محجوبة بالقناع البصري، ومن ناحية أخرى هي (0) في الحالة المعاكسة من أجل نظام بصري متمحرق تكون $A(x, y)$ ذات قيمة حقيقية، وتصيح المعادلة (1) كما يأتي:

$$MTF = A(x, y) \otimes A(x, y) \quad (2)$$

هذا التعبير سنستخدمه في هذا العمل من أجل التعبير عن جودة الصورة.

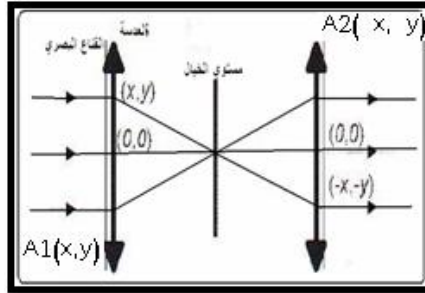
لتقليل الأشعة الضوئية الراجعة كما في الشكل (6-1) نعرض ثلاثة أشعة داخلية للنظام البصري مع قناع بصري أمام فتحة الدخل. كل منها سينعكس في المستوي المحرق، ويمكن أن توصف في مستوي الخيال، ويمر كل منها من خلال العدسة والقناع البصري مرة ثانية.

إن كشف الأشعة الراجعة ممكن عندما تمر الحزمة من القناع البصري نفسه مرة ثانية. حيث المرور الأول يجري خلال العدسة والآخر هو خرج العدسة، كما هو مبين في الشكل التوضيحي (6-1).



الشكل (6-2)

عندما يكون الورود وفق أشعة غير محورية A_2 ليست فقط تحويل مرآتي، ولكن تتزاح بالمقدار (u, v) عن الانعكاس المرآتي.



الشكل (6-1)

مبدأ عمل القناع في نظام بصري مؤلف من عدسة مع سطح مستوي بمحرقها.

ندعو $A_1(x,y)$ مطال الأشعة عند دخول القناع البصري و $A_2(x,y)$ المطال عند الخروج منه. فيكون ناتج جداء التابعين هو التابع الذي سيخبرنا أي الأشعة التي دخلت سترجع أم لا؟

عندما يرجع كل من الأشعة $A_1(x,y)$ و $A_2(x,y)$ سنرمز لها (1)، أما في حال عدم رجوع $A_1(x,y)$ أو $A_2(x,y)$ فنرمز لها (0). أي الشعاع الداخل إلى فتحة الدخل للنظام البصري عند النقطة (x,y) سوف يحجز بواسطة القناع البصري لأن المرور الثاني يتم عبر القناع نفسه. عندما يقع الشعاع الليزري على المحور البصري للنظام البصري عند النقطة (x,y) سوف تغادر فتحة النظام عند الموقع $(-x,-y)$ نستنتج أن: $A_2(x,y)=A_1(-x,-y)$ لأن أشعة الليزر تنتشر خلال المحرق، ومن أجل هذا يتم انعكاسها مرآتياً على نفسها، في حين القناع البصري لا يغير التوجيه.

2- معامل تحجيب القناع البصري.

سنرمز له بـ b ، عندما يكون $b=50\%$ ، يحذف القناع نصف الأشعة الواردة عليه، وسيلغي الأشعة الراجعة كلها.

مثال: لأخذ الحد الأدنى من تخفيض الأشعة الراجعة، لحذفها -قدر الإمكان- يجب أن يكون انتظام القناع البصري منتقى خلال المرور الثاني، هذان الزوجان من الحزمة الواردة والراجعة يجب أن يكونا محجوبين بشكل متتال، والتي تكون غير مغلقة في أثناء الدخول تصبح مغلقة أمام الأشعة الراجعة ومعامل التحجيب لها في هذه الحالة (2b). يصبح معامل تخفيض الأشعة الراجعة في هذه الحالة (1-2b). بشكل عام خلال العبور الثاني، عندما يكون جزء من الأشعة قد ألغى، وهي التي لم تلغ خلال المرور الأول للأشعة، يصبح عندئذ معامل تخفيض الأشعة الراجعة (1-b). ومعامل التخفيض التام للأشعة الراجعة K يمكن أن يُعطى بالعلاقة (3) الآتية [1]:

$$K = (1 - a b) \quad (3)$$

إذ: b : هو معامل الحجب الأولي.

a : فعالية القناع البصري المعتمد (معامل الجودة للقناع).

قيمة معامل الجودة للقناع البصري هي ضمن المجال: $1 < a < 2$

تكون الأشعة الراجعة قد حذفت بشكل تام عندما يكون $a=2$ ، والتحجيب (b) يجب أن يكون على الأقل 50%.

وتخفيض معامل الإرجاع الضوئي للقناع البصري R_{mask} ممكن حينها من أجل زوايا الورود كلها، وليس فقط من أجل الورود الناظمي، والحصول على صورة جيدة.

تصميم الأفتحة البصرية الملائمة للأنظمة البصرية والإلكترونية وتصنيعها

صُممت وصُنعت عدة أفتحة بصرية (شطرنجي بقياسين، دوائر، حواجز، قطاعات)، جميعها غير متناظرة بالنسبة إلى المحور البصري، كي تسمح للأشعة الضوئية البصرية بالمرور مرة واحدة فقط خلاله وبحيث لا تعود تلك الأشعة الراجعة عن الأجهزة البصرية أو الكاميرات مرة ثانية باتجاه المنبع الضوئي الذي وردت منه. معامل التحبيب البصري للفتحة $b=0.5$ (أي الحاجز يساوي الفراغ) كي لانقلل من جودة الصورة وكي نحافظ على أكبر كمية من الطاقة الضوئية الواردة لفتحة دخل النظام البصري. هذا مهم جداً بالنسبة إلى الأجهزة المستخدمة في القياس مثل أجهزة قياس المسافة، وأجهزة الرؤية الليلية.

1- طريقة التصنيع:

يُرسب أكسيد الكروم بعدة طبقات رقيقة نانوية (thin film) $60-80\text{ nm}$ مع أكسدة في آخر مرحلة، على صفيحة متوازية الوجهين من الزجاج BK7 على فتحة دخل النظام البصري أو الكاميرا، ثم تعالج المناطق المراد إظهارها (الحواجز السوداء) بطلائها بمادة حساسة مظهرة فوتوريست (photo resist) وذلك حسب مخطط فيلم حساس ترسم عليه الحواجز المطلوبة. تزال المناطق التي لم تعرض للمادة الحساسة بحفرها بواسطة أي حمض يتفاعل مع الكروم المرسب، ونزيله عن الزجاج فنحصل على الفراغات البيضاء بين الحواجز.

هذه الطريقة صالحة للأنظمة كلها التي تعمل في المجال المرئي من الطيف، أما بالنسبة إلى الأنظمة البصرية التي تعمل في المجال تحت الأحمر فيمكن استخدام مادة الجرمانيوم بدلاً من الزجاج.

كما طُليت الصفيحة الزجاجية بطلاء ضد الانعكاس من الوجهين كي لا تعكس الأشعة الواردة عليها وفق انعكاس فرينيل.

2- المخططات البصرية للأفتحة البصرية المصنعة.

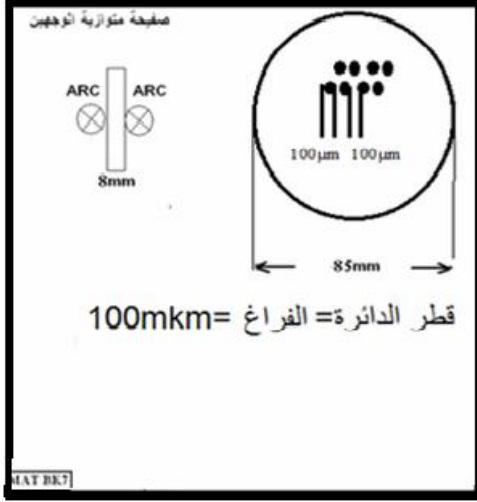
أ- المخطط التصميمي لفتحة بصري شطرنجي:

الفتحة البصري الأول، شطرنجي عبارة عن مربعات غير متناظر بالنسبة إلى المحور البصري، منتظم من حيث ترتيب الحواجز، وفق حواجز مربعات قياسها 2.5 mm ، وفتحة آخر وفق حواجز ميكروية $100\mu\text{m}$ ، لزيادة أثر الانعراج الضوئي عند حروف الحواجز كي نتخلص من الأشعة الراجعة بتردد فراغي كبير، محفورة على طلاء نانوي (50 nm) من الكروم، بحيث يكون عرض الحاجز يساوي عرض الفراغ، أي معامل الحجب $b=0.5$.

المخطط البصري للفتحة الشطرنجي مبين في الشكل (7) الذي يبين المواصفات البصرية للفتحة والفتحة، ونذكر أن المواصفات البصرية للفتحة مهمة جداً وخاصة التوازي بين السطحين، ومعامل التسطح والاستوائية، والنظافة البصرية للسطوح، ذلك من أجل الحصول على فتحة بصري جيد لا يؤثر في مواصفات دقة الصورة وتفاصيلها.

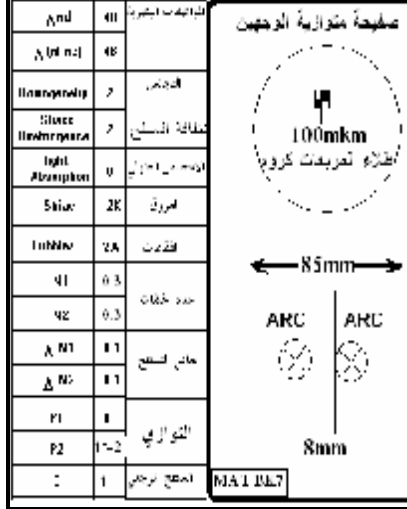
ب- المخطط التصميمي لقناع بصري دوائر ممتلئة:

القناع البصري الثاني، قناع بجواز دائرية ممتلئة غير متناظرة بالنسبة إلى المحور البصري لفتحة الدخل، ومنتظم من حيث الترتيب، وفق حواجز ميكروية $100\mu\text{m}$ ، بحيث يكون قطر الدائرة يساوي عرض الفراغ يساوي $100\mu\text{m}$ ، أي معامل الحجب $b=0.5$. وفق المخطط البصري المبين في الشكل (8).



الشكل (8)

مخطط قناع الحواجز الدائرية معامل الحجب $b=0.5$ التردد الفراغي $v=100\mu\text{m}$



الشكل (7)

مخطط لقناع شطرنجي معامل الحجب $b=0.5$ التردد الفراغي $v=100\mu\text{m}$

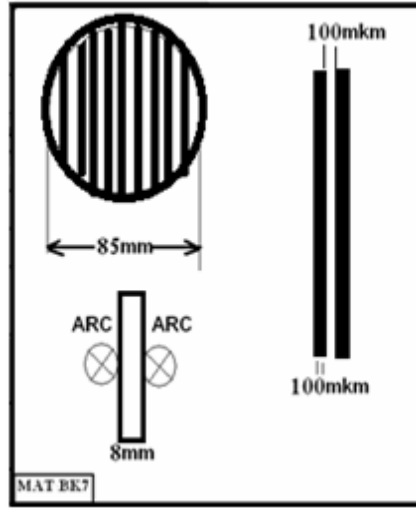
ج- المخطط التصميمي لقناع بصري حواجز شاقولية:

القناع البصري الثالث: قناع بجواز شاقولية غير متناظر بالنسبة إلى المحور البصري لفتحة الدخل، ومنتظم من حيث الترتيب، وفق حواجز ميكروية $100\mu\text{m}$ ، بحيث يكون عرض الحاجز يساوي عرض الفراغ ويساوي $100\mu\text{m}$ ، أي معامل الحجب $b=0.5$. المخطط البصري مبين في الشكل (9).



الشكل (10)

مخطط لقطاع قطاعي معامل الحجب $b=0.5$ ،
التردد الفراغي الزاوي $v=10.58^\circ$



الشكل (9)

مخطط لقطاع وفق حواجز شاقولية معامل
الحجب $b=0.5$ التردد الفراغي $v=100\mu\text{m}$.

د- المخطط التصميمي لقطاع بصري قطاعي:

القطاع البصري الرابع: قطاع قطاعي مفيد جداً في التطبيقات البصرية لأنه يسمح لكمية كبيرة من الطاقة المحورية بالمرور خلاله. كي يكون غير متناظر بالنسبة إلى المحور البصري نختار عدد القطاعات بحيث يكون نصف العدد الكلي عدداً فردياً قمنا باختيار العدد 34 والذي نصفه 17 وهو عدد فردي ويمكن تحقيقه، ويعدّ العدد كبيراً والقطاعات البصرية التي نحصل عليها صغيرة، ويبقى أثر الانعراج الضوئي فعالاً لتقليل الأشعة الضوئية الراجعة التي تتجح بالمرور الثاني عبر القطاع البصري، فتتحل مبتعدة عن المحور البصري، ولا تعود إلى المنبع. المخطط البصري للقطاع البصري مبين في الشكل (10).

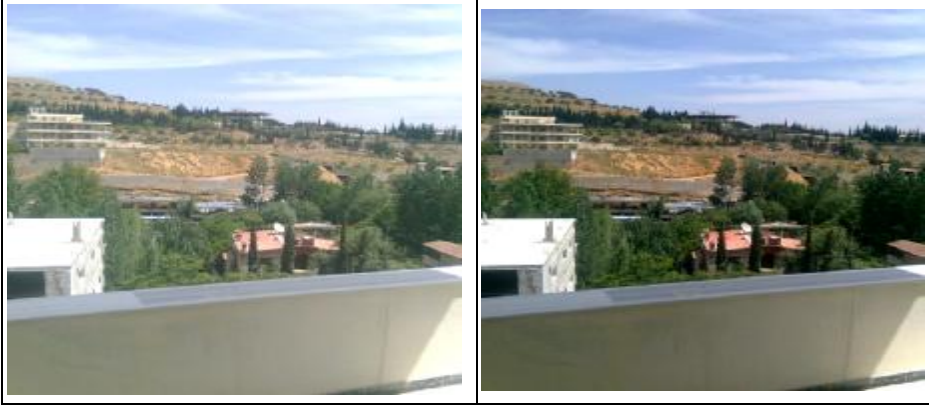
النتائج التجريبية

لإثبات بعض الدراسات النظرية سنقوم بتجارب عن جودة الصورة في الأجهزة البصرية والكاميرات قيست وفق أفتحة لها حواجز نظامية (مرتبة) مختلفة والقيمة الكلية لتخفيض إشارة الأشعة الراجعة التي نحصل عليها بهذه الأفتحة، وسنبين أولاً نتائج جودة الصورة، وقياسات شدة الأشعة الراجعة المكشوفة.

1 - قياسات جودة الصورة:

لقياس مستوى انحدار جودة الصورة بعد القناع البصري، نستخدم كاميرا تصوير عادية وقناعاً بصرياً شطرنجياً له حواجز نظامية مرتبة ومعامل الحجب له هو $b=0.5$ دورية هذه الحواجز هي $100\mu\text{m}$ في حين فتحة الكاميرا المستخدمة قطرها 50 mm ، وتأخذ الصور كما في الشكل (11).

الصورة على اليسار في الشكل (11) مأخوذة من دون قناع على فتحة الكاميرا، أما الصورة على اليمين فمأخوذة بقناع معامل الحجب له $b = 0.5$.



الشكل (11) صورة مأخوذة بكاميرا، الصورة على اليمين مع وجود قناع شطرنجي $b=0.5$ أمام فتحة الكاميرا وتبدو أقل إضاءة (أعتم) وأوضح، أما الصورة على اليسار من دون قناع بصري فتبدو أشد إضاءةً.

يبدو تأثير القناع واضحاً في خلفية الصورة فقط وهذا التأثير صغير، نستنتج أن تأثير القناع البصري مهمل في جودة الصورة، إذ إن الصورة أخذت في يوم مشمس، الاختلاف في الصورة يوضح أن لاشيء يتغير في المشهد بين الصورتين مع قناع أو من دونه. ونلاحظ أن الفرق فقط في شدة إضاءة الصورة، والاختلاف الآخر في الصورة يصنع وضوحاً إضافياً بوجود القناع البصري في حالة كون الإضاءة شديدة.

-نستنتج أن إضافة قناع بصري عند دخل الكاميرا أو الجهاز البصري، يقلل من جودة الصورة في حال كون الإضاءة ضعيفة (وذلك لأن كمية الطاقة التي تدخل إلى الكاميرا أو الجهاز البصري أقل)، ولكنه يعمل على تحسين جودة الصورة وخاصة في حال كون الإضاءة شديدة مثل أوقات الظهيرة، وتبقى الصور جيدة ومفهومة التفاصيل. يمكننا أن نبين جودة الصورة بشكل كمي من قياس تابع الـ MTF للقناع البصري.

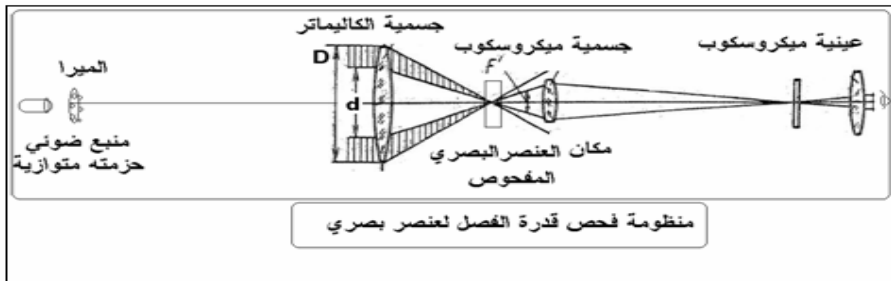
2- قياسات قدرة الفصل (Resolution) للكاميرا المستخدمة والأقنعة البصرية:

نعرف قدرة الفصل بأنها عدد الخطوط التي يمكن أن نميز بينها في 1mm. يمكن أن نوضح طريقة دقيقة جداً لقياس قدرة الفصل لجهاز بصري أو كاميرا أو عنصر بصري [22,23]. نبيّن ذلك في الشكل التوضيحي (13) نضع ميّرا مدرجة في المستوي المحرفي لكاليماتر (مسددة ضوئية) له بعد محرفي كبير $f=1600\text{mm}$ وقطر عدسة الجسمية المستخدمة $D=148\text{mm}$ وذات نوعية جيدة بصرياً من حيث الزيوغ البصرية، ومطلية ضد الانعكاس من أجل المجال المرئي من الطيف، و قدرة الفصل لها عالية (5arc sec). نضيء الميّر بضوء أبيض فنحصل على حزمة ضوئية متوازية عريضة بقطر كبير ومتجانس، نضع أولاً كاليماتر آخر أو ميكروسكوب أفقي مقابل للكاليماتر لنرى في البداية خطوط الميّر ومدى وضوحها.

نضع الكاميرا أو الجهاز البصري من دون القناع البصري على فتحة الدخل، ونقيس مقدرة الفصل للجهاز [4,7].

ثم نعيد القياسات مع القناع البصري.

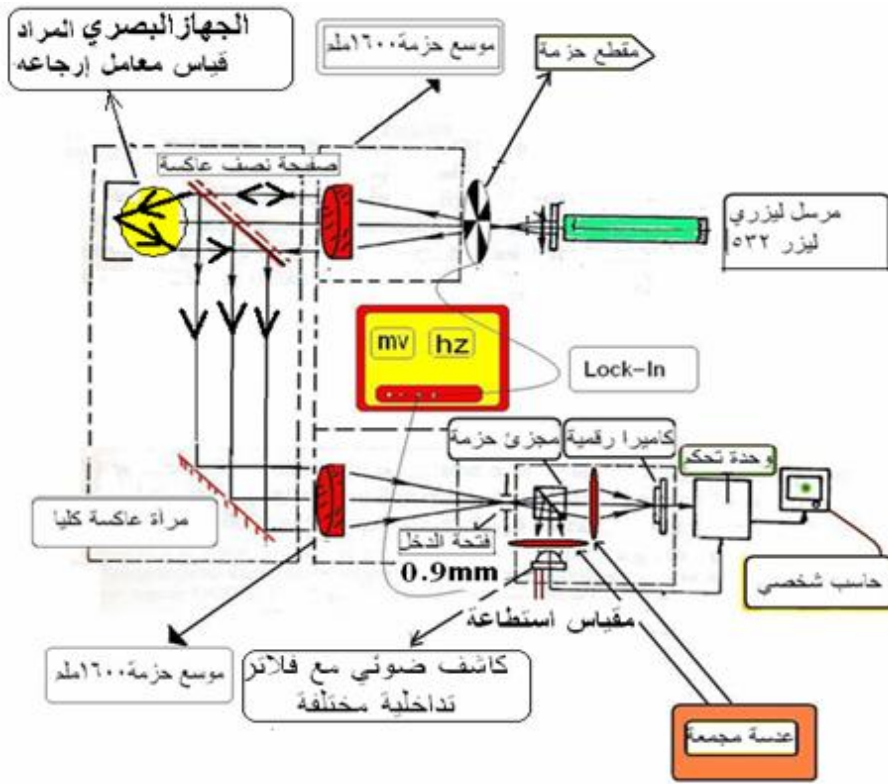
وجدنا أن القناع البصري ذا الحواجز الصغيرة (بكل أنواعها) لا يؤثر في قدرة الفصل، وليس له أي تأثير سلبي في قدرة الفصل للكاميرا، فقد تمكنا من رؤية المجموعات نفسها مع القناع أو من دونه، إلا أنه هنالك أثراً واضحاً للانعراج عند استخدام الأقنعة ذات الحواجز القريبة، وهذا له تأثير جيد في الأشعة الراجعة المتبقية فتتباعد عند خروجها من النظام البصري ولا ترجع إلى المنبع الضوئي.



الشكل (13) المخطط التوضيحي لطريقة قياس قدرة الفصل لجهاز بصري أو لقناع بصري.

3- قياسات الاستطاعة الضوئية الراجعة:

لقياس استطاعة الإشارة الراجعة يمكن أن نستخدم الطريقة المبينة في الشكل التوضيحي (14).



الشكل (14) طريقة قياس معامل الإرجاع الضوئي لجهاز بصري مع قناع بصري أو من دونه
 نحسب معامل الإعادة الضوئية من العلاقة (3):

$$R = \frac{I}{E} \left[\frac{m^2}{str} \right] \quad (3)$$

إذ: I (luminance) هي الاستضاءة (الشدة الإشعاعية) الصادرة عن المعيد الضوئي أو الجهاز الإلكتروني البصري المدروس المقبسة على سطح عمودي على اتجاه الإضاءة [w/str].
 E (illuminance) إضاءة (استتارة) السطح البصري التي اكتسبها من منبع الإضاءة [w/m²] ضمن زاوية صلبة محددة وتعطى بالعلاقة:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta) = \frac{\pi d^2}{4f^2}$$

يمكننا معرفة معامل الإرجاع الضوئي من قياس الاستطاعة (P_{inp}) في محرق قناة الاستقبال بواسطة مقياس استطاعة حساس وتطبيق العلاقة الآتية (4) التي تربط بين معامل الإرجاع الضوئي والاستطاعة الراجعة المرتدة عن النظام البصري، واستطاعة الليزر المستخدم P_1 أو باستخدام مرجع ضوئي معياري مدرج يستخدم لهذا الغرض.

$$R_{oc} = \frac{P_{inp} \cdot Z^4 \cdot \theta^2}{P_L \cdot D_{OB}^2 \cdot \tau_{oc} \cdot \tau_a} \quad (4)$$

إذ: R_{oc} : معامل الإعادة الضوئي للنظام البصري، Z : المسافة بين المنبع الليزري والجهاز البصري.

P_1 : استطاعة المرسل الليزري، θ : زاوية تباعد المرسل الليزري، D_{OB} : قطر جسمية الدخول للمستقبل الليزري.

(P_{inp}): الاستطاعة الراجعة المقيسة في محرق جسمية الدخول، τ_{oc} : النفوذية البصرية الكلية للعناصر البصرية المستخدمة في جهاز القياس جميعها، τ_a : النفوذية الجوية وفق طول موجة الليزر المستخدم في القياس.

ويمكننا أن نستخدم العلاقة (5) التي تربط بين معامل الإعادة الضوئي ومعامل الجودة a .

$$R_{mask} = R_{oc} \cdot K \quad (5)$$

بالتعويض في العلاقة (3) نجد أن:

$$R_{mask} = R_{oc} \cdot (1 - a \cdot b) \quad (6)$$

إذ: R_{mask} : معامل الإعادة الضوئي بوجود القناع البصري.

R_{oc} : معامل الإعادة الضوئي للنظام البصري من دون القناع البصري.

a : معامل جودة القناع البصري، b : معامل الحجب البصري للقناع.

عندما يكون $a = 2$, $b = 0,50$ يكون $R_{mask} = 0$ أي إن الأشعة الراجعة جميعها قد أُلغيت.

يمكن معرفة معامل جودة القناع a من قياس معامل الإعادة الضوئية مع قناع أو من دونه، والتعويض في المعادلة (6) فنحصل على المعادلة (7) التي تعطينا معامل الجودة a للقناع البصري:

$$a = \frac{1 - \frac{R_{\text{mask}}}{R_{\text{oc}}}}{b} \quad (7)$$

يمكن الربط بين الاستطاعة المقیسة في الحالتين مع القناع البصري ومن دونه، مع معامل الجودة وفق المعادلة (8):

$$a = \frac{1 - \frac{P_{\text{mask}}}{P_{\text{oc}}}}{b} \quad (8)$$

إذ: P_{mask} : الاستطاعة الراجعة المقیسة بوجود القناع، P_{oc} : الاستطاعة الراجعة المقیسة دون القناع البصري.

- من أجل نظام بصري عبارة عن منظار تكبيره 7^{\times} ، وقدرة الفصل له $17.5''$ يكون معامل الإرجاع الضوئي له من دون قناع بصري $R=77.9 \text{ [m}^2/\text{str}]$.

- في حال وجود قناع بصري التردد الفراغي للحواجز الشطرنجية $100\mu\text{m}$ تهبط قيمة معامل الإرجاع الضوئي إلى 10% فقط من القيمة السابقة، ويكون معامل الإرجاع الضوئي $R=7.79 \text{ [m}^2/\text{str}]$ وهذا يعدُّ مقداراً قليلاً جداً وأمناً بالنسبة إلى معامل الإرجاع الضوئي، بالنسبة إلى الأشعة المحورية (محور الأشعة الواردة من المنبع الضوئي منطبقة على المحور البصري للجهاز المدروس)، ويعدُّ أسوأ وضع للجهاز عندما يكون محورياً مع المنبع الضوئي، أما في حال كون الأشعة غير محورية فإن قيمة الأشعة الراجعة هي أقل بكثير من المحورية، وهي الحالة العامة لاستخدام الأجهزة البصرية، وعندها تهبط القيمة إلى $R=4.2$. ومن ثم، فإذا قمنا بحساب معامل الجودة a لهذا القناع من أجل $b=0.5$ يكون $a=1.9$ من أجل الأشعة المحورية، مع بقاء قدرة الفصل للنظام البصري كما هي.

- في حال وجود قناع بصري التردد الفراغي للحواجز الشطرنجية 2.5mm تهبط قيمة الانعكاس الراجع إلى 30% فقط من قيمتها من دون قناع، ويكون معامل الإرجاع الضوئي $R=22.5 \text{ [M}^2/\text{Str}]$ ، وهذا القناع هو أقل فعالية من السابق. ويكون معامل الجودة a لهذا القناع $a=1.4$ من أجل $b=0.5$ يكون من أجل الأشعة المحورية.

- في حال وجود قناع بصري قطاعي، التردد الفراغي للحواجز الزاوية $v=10.58^0$ تهبط قيمة الانعكاس الراجع إلى قرابة 10% من قيمتها من دون قناع، ويكون معامل الإرجاع الضوئي $R=3.9 \text{ [M}^2/\text{Str}]$. ويكون معامل الجودة a لهذا القناع من أجل $b=0.5$ يكون $a=1.8$ من أجل الأشعة المحورية.

- حصلنا على نتائج مشابهة عند استخدام كاميرا CCD(HITACHI) مع جسمية (ZOOMATAR) بعدها المحرقي 75mm وفتحة العدسة D=60mm وفق ورود ناظمي، وكان معامل تخفيض الأشعة الراجعة قرابة 5% من قيمتها الأصلية قبل القناع، وهي نتائج جيدة ومقبولة مقارنة بالنتائج المذكورة في المراجع [1,10,18].
نبيّن فيما يأتي جدولاً بالقياسات لمعامل الإرجاع الضوئي $R [m^2/str]$ حالة الورد الناظمي لكل نوع من أنواع الأفتعة على حدة، لكل جهاز من الأجهزة السابقة.

الجدول (1) قياسات معامل الإرجاع الضوئي لأنواع الأفتعة البصرية كلّها المصنعة على عدة أجهزة بصرية.

نوع القناع المستخدم	معامل الجودة a	التردد الفراغي v	كاميرا CCD	جسمية مع شبكة بعدها المحرقي 75mm	منظار 7x	معيد ضوئي هرمي
من دون قناع	0		120	150	77.9	1000
شطرنجي كبير	1.39	2.5mm	62.8	50.3	22.5	303.8
قطاعات زاوية	1.8	10.58 ⁰	10.7	12.92	7.79	102.6
حواجز دائرية	1.673	100μ	19.2	24.14	13.3	163.5
حواجز شاقولية	1.63	100μ	22.8	28.50	15.29	182.5
شطرنجي صغير	1.9	100μ	6.25	8.15	3.9	52.4

- نستنتج أن القناع البصري الميكروي الشطرنجي الذي قمنا بتصميمه وتنفيذه، غير المتناظر بالنسبة إلى المحور البصري، ومعامل جودته a=1.9 ومعامل الحجب البصري الأفتعة البصرية هو أفضل أنواع الأفتعة البصرية المستخدمة في الأجهزة البصرية، لأنه يقلل معامل الإرجاع الضوئي أكثر ما يمكن، وهو رخيص التكاليف مقارنة بطريقة تقليل الأشعة الراجعة باستخدام الصفائح الموجية، وهو يحافظ على جودة الصورة من حيث تابع MTF ودقة الفصل لم تتأثر كثيراً فإن ملامح الصورة تبقى واضحة ويمكن تمييزها على الرغم من نقصان شدة إضاءة الصورة كما لاحظنا، ويعدّ هذا جيداً خاصة في أوقات الظهيرة.

4- قياس تابع MTF لتحديد جودة الخيال الناتج عن الجهاز البصري:

يُقاس تابع الـ MTF (Modulation Transfer Function) [18,20,21] بواسطة جهاز خاص بذلك. يمكن قياس تابع الـ MTF لبعض النظم البصرية المشكّلة للصور.

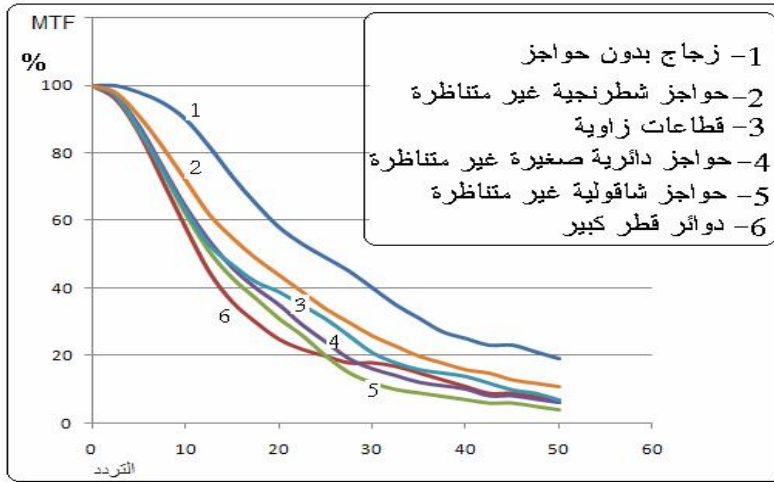
- تابع الـ MTF للأفتعة البصرية يحتوي على كل من الترددات الفراغية العالية والمنخفضة. وهذا يعني أن القناع البصري يحافظ على تفاصيل المعلومات (النقطية) للمشاهد المرآب. تابع الـ MTF لا يعتمد على محورية القناع البصري، وعندما يزداد الحجب البصري، فإن جودة الصورة ستنقص، والمعدل الوسطي لتابع MTF سيزداد

متناسباً مع المقدار (1-b). لجودة نقاط الصورة في حقل الرؤية، ومن ثم تميز كون b منخفضة قدر الإمكان.

- أنواع الأفنعة البصرية المختارة في التصاميم المختلفة، ترسم على فتحة الدخول للأنظمة البصرية، وتابع MTF يقيّمها. الـ MTF الحاد (الشوكي) غير جيد عندما نريد إعادة بناء الصورة. مثل الفلترة المتعددة التي نقوم بها في صور الكاميرات، أمّا إذا كانت عينات الحواجز عند خرج القناع تعطي شكلاً أملس لتابع MTF فعندها يكون القناع جيداً ويمكن اعتماده.

- قيس تابع MTF وفق ورود أشعة متوازية بواسطة عدسة جسمية بعدها المحرقي 90mm قبل العينة وعدسة بعدها المحرقي 140mm لتجميع الأشعة الناتجة إلى كاميرا CCD للحصول على صورة شق مضيء.

نستنتج من الشكل (16) أن تابع MTF للأفنعة ذات الحواجز الشطرنجية الميكروية أفضل من بقية أنواع الحواجز، إذ يمكن اعتمادها في الأجهزة البصرية وأجهزة التصوير، بسبب تجانس التابع ولأنه أملس ومنظم وتواتر القطع لها كبير نحو $\nu_c = 75$ ، في حين تواتر القطع لبقية الأنواع لا يتجاوز 60.



الشكل (16) قياس تابع MTF للأفنعة البصرية

الخلاصة

- الأبنعة البصرية ذات الحواجز غير المتناظرة للمحور البصري كلها قادرة على تخفيض الأشعة المحورية الراجعة، غير أن سلوك تخفيض الأشعة الراجعة من أجل الانحرافات الصغرى عن اتجاه المحور تعتمد على استخدام نماذج الأبنعة البصرية للحصول على هذه النماذج ذات الحواجز الصغيرة غير المتناظرة، وهذا يقود إلى تضيق القيمة الصغرى للحواجز.
- إن الأبنعة البصرية المستخدمة ذات الحواجز الشطرنجية والدوائر الميكروية المرسومة على الأغشية الرقيقة هي أفضل بكثير من الحواجز الميللي مترية، ويمكن اعتمادها لتخفيض معامل الإرجاع الضوئي في الأجهزة البصرية وأجهزة التصوير، لأنها تحافظ على جودة الصورة من حيث تابع MTF.
- دقة الفصل لتلك الأجهزة لم تتغير عند استخدام هذه الأبنعة، وفائدتها الكبيرة إذ قامت الأبنعة البصرية بتخفيض معامل الإرجاع الضوئي إلى قيمة صغيرة جداً (أقل من 5% -10% من قيمتها من دون قناع بصري) في حالة الورود الناظمي.
- معامل جودة للقناع البصري $a=1.9$ وهي قيمة جيدة عندما يكون معامل الحجب $b=0.5$ ، ومع المحافظة على جودة الصورة، وهي صالحة على أي طول موجة.
- حصلنا على صورة أوضح عند استخدامها في الكاميرات، لأنها قللت من شدة الأشعة الضوئية الداخلة للكاميرا، ولكن في حال استخدامها في الأجهزة البصرية التي تقوم بقياسات طاقة يجب زيادة طاقة المرسلات الليزرية في تلك الأجهزة، أو جعل تلك النوافذ متحركة بحيث نزيلها في أثناء القياس ونعيدها في حالات المراقبة، ولاسيما أن كلفتها من الناحية الاقتصادية قليلة جداً مقارنة بالصفائح الموجية والمقطبات.

REFERENCES

1. L. Mieremet Ric, M. A. Schleijsen Frank, (2010). Retroreflection reduction by masking apertures, *Opt.Eng.VOL(49)/4*, 043202.
2. Gary, M. Kuan, and Steven Moser, J. (1998). Sensitivity of Optical Metrology Calibration to Measured Corner Cube Retroreflection Parameters for the Space Interferometry Mission, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Tec.
3. Schott Catalogue 2008.
4. Абенфков. Абеев. (1974). Юстировка и Сборка оптических приборов, Машиншсероение, Москва Россия.
5. новосибирская приборостроительный завод Ленина. Скамья Оптическая (1988). ОСК-2ЦЛ, Москва Россия.
6. Нада. Михайлов. Абенов. (1974). Иструкций Выбрать Оптических Элементов. Ленинград.
7. Даннелвичь. Никвтен. Самьернов. (1976). Юстировка иКонтроль и Сборка оптических приборов, Машиншсероение, Леннен, Москва Россия.
8. Арторьян. Галоян. Глибов. Никаров. (1988). Изерение Потеры в Оптических Траектория, патент Номер621,37,28,029,7.Инст. Оптико.
9. Валеры Карасик. Николаи Барешников. (2003). Современные Оптические Приборы, Москва, инст. Баумана.
10. Владемер Бухтина. (2009). Конференсе Оптические лазерние лидар, захотеть охота, Москва Россия.
11. Charmaine Gillbreath, G. Steven Bowman, R. (2000). Modulating Retroreflector using Multiple Quantum Well Technology, United States Patent N.6.154,299 NOV.28.
12. Rabinovich, W. S. Mahon, R. (2005). Free- Space Optical Communications link at 1550nm using multiple quantum – well Modulating Retroreflectors in marine environment, U.S. Naval Research laboratory, Washington. D.C20375.
13. George, H. Seward Pamela, S. Cort. (1999). Measurement and characterization of angular reflectance for cube-corners and microspheres, *OPT. ENG.* 38(1), P164-169, (JUN).
14. Gilbreath, G. C. Rabinovich, W. S. (2001). Large- aperture multiple quantum well modulating retroreflector for free-space optical data transfer on unmanned aerial vehicles, *OPT. ENG.* 40(7), P1348-1356, (JULY).
15. Robin J. N. Coope, Lone A. Whichead, and Andrzej Kotlicki, (2002). Modulation of Retroreflection by controlled frustration of total internal reflection, *APPLIED OPTICS VOL(41), NO(25), SEP.*
16. Stephen, F. Jacobs, (1982). Experimental with retro directive arrays" *OPT. ENG.* 21(2), P281-283.
17. Willam S. Rabinovich, Peter G. Gotez, Rita Mahon. (2007). 45-Mbite/s Cat's –eyes modulating retroreflectors, *OPT. ENG.* 46(10),104001.
18. Thomas, J. (1989). Principles of thermal imagers and their design p.27-39.
19. Robert, E. Fisher (2008). Optical System design-2nd Ed. Chp.10-15-16, MC Graw Hill.
20. Robert, E. Fisher. (1992). Optical System design, Course MIT, Chp.1-2, G. Hill.
21. Brian, J. Thompson. (2006). Lens Design Forth Edition, Optical science and engineering, university of Rochester, New York.
22. Pantazis, M. Macdonald, J. (1997). Optics and Optical Design, Oxford.
23. Robert W. Boyd. (1983). Radiometry and the Detection of Optical Radiation, institute of optics university of Rochester.