

## تحليل خوارزميات كشف القمم الطيفية لشبكات انحراف براغ في أنظمة قياس الكابلات الضوئية

م.ريم طعمي\*

(تاريخ الإيداع 2021/ 10/ 10 . قُبِلَ للنشر في 2021/ 12/ 21 )

### □ ملخص □

أصبحت حساسات التجهيزات الضوئية أكثر شيوعاً واستخداماً في مراقبة العديد من الظواهر والأهداف، ويعود سبب هذا الاستخدام إلى أسباب متعددة أولها الفوائد الكثيرة لأنظمة (FOS) Fiber Optic Sensors والمزايا التي تجعلها متفوقة على الحساسات الالكترونية مثل عدم الحساسية للتداخل الكهرومغناطيسي وغيرها من الميزات الأخرى. يقدم هذا البحث مقارنة تحليلية لأساليب اكتشاف القمة المستخدمة في أنظمة قياس شبكات براغ الضوئية وهي: الأسلوب الأعظمي، أسلوب النقطة الوسطى، أسلوب تقريب غاوس و أسلوب القطع المكافئ. يقوم البحث أيضاً بوصف تعديلات على هذه الأساليب.

الكلمات المفتاحية : أنظمة المراقبة بالألياف الضوئية(FOS)، حساسات الألياف الضوئية، شبكات براغ الضوئية، اكتشاف القمم.

## **Analysis of Algorithms for Detecting the Spectral Peaks of Bragg Diffraction Gratings in Fiber-optic Measuring Systems**

**\* Eng. Reem Toumi**

**(Received 10 /10 / 2021 . Accepted 21 /12 / 2021)**

### **□ ABSTRACT □**

Recently fiber optic systems (FOS) have become more commonly used for monitoring extended objects. The reason of this usage is, firstly, the presence of a number of advantages of FOS over electric sensors: insensitivity to electromagnetic interference and other property

This work presents a comparative analysis of peak detection methods used in fiber Bragg grating measurement systems: maximum method, centroid method, Gauss approximation method and parabola method. The paper also describes a number of solutions for the modification of the described.

**Keywords:** (FOS), fiber-optic sensors, fiber Bragg grating (FBG), peaks detection

---

\*Assistant, Communication Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering, Tartous University, Syria

## 1. مقدمة

أصبحت حساسات الأنظمة الضوئية Fiber Optic Sensors FOS مؤخراً أكثر شيوعاً و استخداماً في مراقبة العديد من الأشياء أو الأهداف [1]. يعود سبب هذا الاستخدام إلى أسباب متعددة و أولها الفوائد الكثيرة لأنظمة FOS و المزايا التي تجعلها متفوقة على الحساسات الالكترونية مثل عدم الحساسية للتداخل الكهرومغناطيسي، ضياعات قليلة ودقة عالية عند المراقبة لمسافات طويلة، خفة وزن الليف وحجمه الصغير إضافة إلى التطور الكبير في تصنيع الأجهزة والتي هي نتيجة لتكامل حساسات متنوعة وأجهزة الأنظمة ضمن أجهزة التطبيق المدروس [3]، [2].

أحد الأنظمة الأكثر شيوعاً للمراقبة التفاعلية لحالات الأهداف هي أنظمة حساسات الألياف الضوئية المعتمدة على شبكات انحراف براغ. يعتمد مبدأ عمل أنظمة FOS التي تستخدم شبكات براغ (FBG) Fiber Bragg Grating على التوزيع الطيفي للإشعاع المنعكس من الشبكة تبعاً لشدة المؤثر الخارجي. ويكون لطيف الإشعاع المنعكس من FBG له ذروة وحيدة واضحة وبالتالي فإن المشكلة أثناء معالجة معطيات FOS هي تحديد مكان هذه الذروة. يتراوح متوسط دقة FOS بالنسبة إلى ذروة انزياح طيف الإشارة المنعكسة من عشرات إلى بضعة بيكرومترات. لذلك تتمثل إحدى الطرق الرئيسية لتطوير FOS هي في تقليل الخطأ في قياس مواقع قمم FBG الطيفية [4].

تم في هذا العمل دراسة عدة طرق للبحث عن قمم شبكات براغ وهي: الأسلوب الأعظمي، أسلوب القيمة المتوسطة، أسلوب التقريب الغاوسي وأسلوب القطع المكافئ.

## 2. هدف البحث

يهدف هذا البحث إلى إيجاد أفضل الطرق لتحديد قمة الموجة المنعكسة عن شبكة براغ من خلال مقارنة مجموعة من الخوارزميات واختيار أفضلها لتحديد هذه القمة.

## 3. طرائق البحث وأدواته

### 3-1 مبدأ عمل الحساسات المعتمدة على شبكات براغ

يعتمد عمل حساسات الألياف الضوئية على تعديل خاصية أو أكثر لموجة الضوء المنتشر (المطال أو الشدة الطور، الاستقطاب، التردد) حيث يحدث التغيير على الكميات الفيزيائية مع بعضها.

أحد حساسات الألياف الضوئية الأكثر استخداماً هي حساسات شبكات براغ. تستخدم هذه الحساسات (FBG) في العديد من الصناعات وهي الطاقة الكهربائية، صناعة الفيول والتعدين والصناعات الكيماوية والنفطية والهندسة الميكانيكية و صناعة مواد البناء، الخ. مزايا هذه الحساسات هي خفة وزنها وحجمها الصغير وقلة حساسيتها للتداخل الكهرومغناطيسي وإمكانية تجميع عدد كبير من الحساسات في ليف ضوئي واحد آمن ضد الحرائق والانفجارات [5].

تتيح ميزات تصميم حساسات الألياف الضوئية فرصاً كبيرة لتطوير الأجهزة المصممة للعمل في ظروف التأثيرات البيئية الضارة وتستخدم هذه الحساسات لقياس مجال واسع من كميات فيزيائية مختلفة.

يعتمد مبدأ عمل FOS القائم على شبكات براغ على ظاهرة انحراف الضوء، شبكة ألياف براغ هي قسم من الليف الضوئي، يتغير معامل الانكسار بشكل دوري في الاتجاه الطولي مع فترة زمنية  $(\Lambda)$  في قلب هذا الليف الضوئي كما هو واضح في الشكل (1). يتم تحقيق ذلك من خلال إنشاء مناطق ذات تغيير دوري في معامل الانكسار في مرحلة التصنيع مباشرة داخل قلب الألياف الضوئية. عند مرور الإشعاع الضوئي نو الحزمة العريضة عبر شبكة

براغ لا يتم التداخل إلا في مناطق الانعكاس من كل مقطع مع وجود معامل الانكسار المتغير لموجة الضوء و التي تحقق شرط براغ و هو [6]:

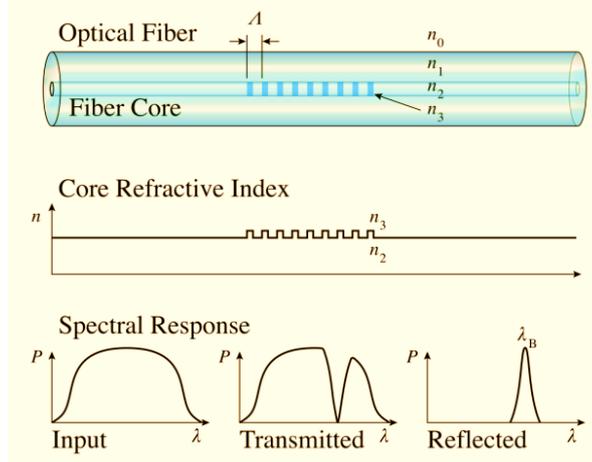
$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda \quad (1)$$

حيث أن  $\lambda_B$  هي طول موجة براغ

$n_{eff}$  : معامل الانكسار الفعال لقلب الليف الضوئي من أجل طول الموجة المركزية

$\Lambda$  : دور شبكة براغ (دور التغير في معامل انكسار قلب الليف الضوئي).

يؤدي ذلك إلى حقيقة أن FBG تعكس فقط الأمواج بطول مركزي وتمرر الأخرى كما في الشكل (1).



الشكل (1) بنية شبكة براغ [17]

حيث أن  $\Lambda$  دور انكسار الشبكة ( المسافة بين المساحات المعرضة من قلب الليف الضوئي).

$n_0$  : معامل انكسار البيئة الخارجية.

$n_1$  : معامل انكسار غمد الليف الضوئي.

$n_2$  : معامل انكسار قلب الليف الضوئي.

$n_3$  : معامل انكسار طبقة ليف ضوئي خاصة ( من مكان التعرض).

$p$  : استطاعة طيف الإشعاع.

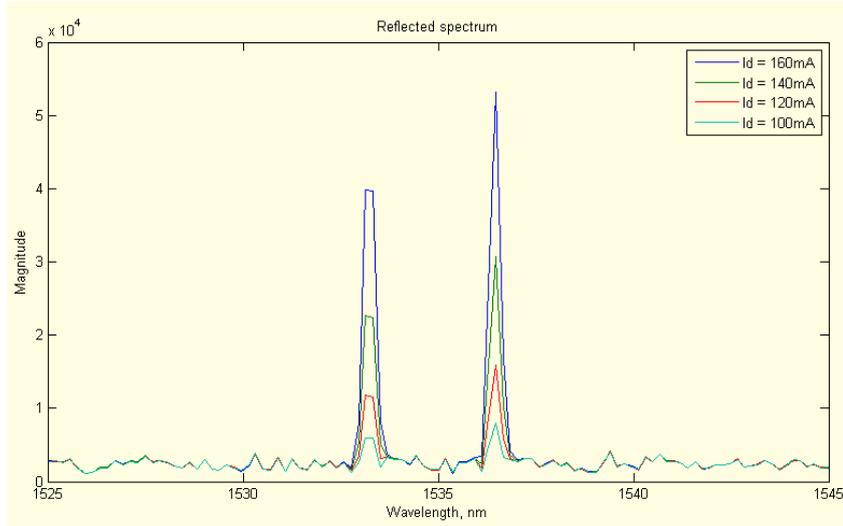
$\lambda$  : طول موجة الإشعاع.

$\lambda_B$  : طول موجة براغ.

من أجل شبكات ذات أطوال موجية  $\lambda_{B1} = 1533.22$  نانو متر و  $\lambda_{B2} = 1536.80$  نانو متر فإن طيف الانعكاس لإشارة الضوء عند قيم للشدة مختلفة سيببدو كما في الشكل (2). و بدوره معامل الانكسار الفعال  $n_{eff}$  و دور التعديل لمعامل الانكسار لشبكة  $\Lambda$  يمكن أن يتغير تحت تأثير خارجي. على سبيل المثال من خلال إجهاد أو درجة حرارة خارجية يكون التغير معطى بالعلاقة [7]:

$$\lambda_B(\sigma, T) = 2 \cdot n_{eff}(\sigma, T) \cdot \Lambda(\sigma, T), \quad (2)$$

حيث أن  $\sigma$  قيمة إجهاد مشوه خارجي و  $T$  درجة حرارة خارجية.



الشكل (2) مثال عن طيف إشارة منعكسة من أجل إشارات ذات تيارات ديود  $I_d = 100 \text{ mA}, 120, 140, =160$  وبالتالي فإن المبدأ الأساسي للقياس باستخدام FBG يتألف من تحديد انزياح طول موجة الإشارة المنعكسة من قياس تغير القيمة التالية:

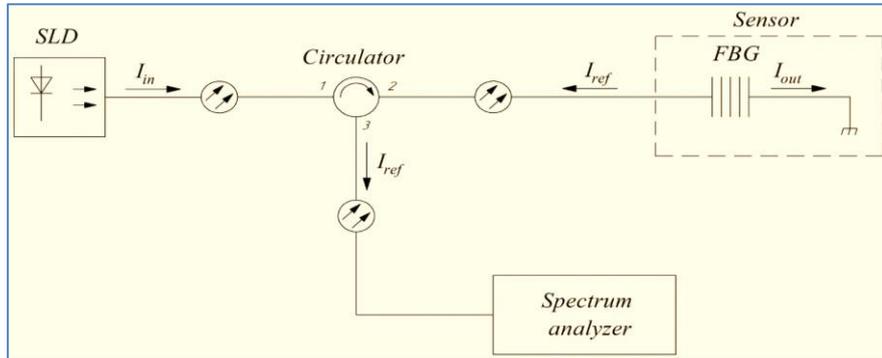
$$\Delta \xi(\sigma, T) = f(\Delta \lambda_B), \quad (3)$$

حيث أن  $\Delta \xi(\sigma, T)$  هو التغير في القيمة المقاسة والتي تعتمد على إجهاد التشوه الخارجي  $\sigma$  و درجة الحرارة الخارجية  $T$ .

### 2-3 الطرق المتبعة في العمل

يسمح تنفيذ FOS المعتمد على حساسات براغ كنظام شبه موزع بمراقبة حالة الكائن (الهدف) المتحكم به عند مسافات كبيرة مع وجود دقة عالية. أما فحص نظام التحكم وعمليات معالجة المعطيات المستقبلية من الحساسات فيتم عن طريق أجهزة الكترونية ضوئية مخصصة و تسمى فاحصات [8].

تم استخدام النظام المبين في الشكل (3) من أجل إجراء تحليل مقارنة لخوارزميات اكتشاف القمة .



الشكل (3) المخطط الصندوقي لنظام الفحص المقترح

$I_{in}$  : قوة إشارة الدخل

$I_{out}$ : قوة إشارة الخرج

$I_{ref}$  : شدة الإشارة المنعكسة

SLD: ديود ذو إضاءة فائقة

FBG: شبكة ألياف براغ الضوئية

هذا النظام هو حساس متصل من خلال موزع ضوئي متصل مع مصدر ضوئي ووحدة تحليل. تتعكس الإشارة من المصدر عن طريق عنصر حساس لنحصل على طول موجة الانعكاس ثابتة من خلال المحلل الطيفي.

### 3-3 خوارزميات شبكات براغ لاكتشاف الذروة

يكون لطيف الإشعاع المنعكس من شبكة FBG ذروة وحيدة ملحوظة وبالتالي فإن المهمة الأساسية في معالجة المعطيات من FOS هي تحديد الإزاحة عن الذروة. متوسط دقة FOS بالنسبة لإزاحة قمة طيف الإشارة المنعكسة يتراوح من عشرات إلى بضع بيكومتترات. وبالتالي فإن إحدى الطرق الأساسية لتطوير FOS هي تصغير الخطأ في قياس موقع قمم FBG الطيفية [9]. يمكن استخدام أساليب متنوعة لتحديد قمة براغ [14]، [15]، [16]، وتم دراسة بعض الأساليب في هذا البحث. من أجل مقارنة تحليلية لأساليب اكتشاف ذروة براغ فإن القيم التي تم الحصول عليها من محاكاة نظام ضوئي يحوي شبكة براغ تم اختيارها كطول موجة مرجعية للذروة.

#### 1-3-3 الأسلوب الأعظمي Maximum method

وهي خوارزمية مباشرة لإيجاد قيمة عظمى من عينات الطيف المنعكس [10]:

$$\lambda_B = \max_n \lambda_i, \quad i = 1, n, \quad (4)$$

حيث أن  $\lambda_i$  هي طول موجة العينة  $i$  من خاصية الطيف المنعكس.

تعتمد نتيجة الخوارزمية على خيار الخطوة المارة من خلال عينة الدخل. تستخدم هذه الخوارزمية عادة بالاشتراك مع استيفاء الشريحة. استيفاء شريحة مجموعة معطيات الدخل على المجال  $[X_0, X_n]$  مع القيم الطيفية  $y_0, y_1, \dots, y_n$  يمكن أن يتم تمثيلها كمجموعة من  $n - 1$  من كثيرات الحدود من الدرجة الثالثة حيث أن كل كثير حدود مفرد يطابق المجال  $[X_{i-1}, X_i]$ . وبالتالي يتم الخروج من الخوارزمية عن طريق إكمال البحث عن طول الموجة المطابق للقيمة العظمى من نتيجة الاستيفاء.

#### 2-3-3 أسلوب المتوسط (القيمة الوسطى) Mean value method

يعتمد هذا الأسلوب على مبدأ "العزم" والذي يعرف المركز الهندسي لتوزع المعطيات التي يتم الحصول عليها باستخدام محول تشابهي-رقمي يمكن أن يتم تمثيلها كهيستوغرام. يحدد عرض العمود عرض البكسل لمكتشف الصور و الارتفاع يحدد مستوى الإضاءة. لنفرض أن القمم تتزامن مع مركز جاذبية الشكل الذي تم تشكيله بأقسام الهيستوغرام لتحديد القمة المتوفرة [11]. هذا الأسلوب هو أسلوب بسيط لإيجاد قمة متوسطة والذي يمكن أن يتم تمثيله بالعلاقة التالية:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i I_i}{\sum_{i=1}^N I_i}, \quad (5)$$

حيث أن  $\lambda_i$  هو طول موجة براغ،  $I_i$ : قيمة طاقة طيف الخرج المطابقة لطول الموجة  $i = 1, N$ .

كما تظهر عملية المحاكاة يعطي هذا الأسلوب مستوى منخفض من الخطأ تبعاً لعدد ضخم من القياسات والتي يتم تحديدها بعدد مستويات أخذ العينات خلال المعالجة الرقمية للمعطيات التي تم الحصول

عليها من FOS. وبالتالي مع كل هذه الميزات فإن أسلوب القيمة الوسطى له سيئة ملحوظة وهي التعرض لضجيج إشارة الدخل والذي يؤدي إلى معالجة إضافية.

### 3-3-3 أسلوب تقريب غاوس Gauss approximation method

تعتمد هذه الطريقة على التشابه بين تابع الانعكاس  $R(\lambda, I)$  وتابع التوزيع الغاوسي [12]. تتمثل فكرة هذه الطريقة في تقريب الخصائص الطيفية للإشارة المنعكسة بواسطة التوزيع الغاوسي و التي لها الشكل:

$$I_G = I \cdot \exp\left(\frac{-(\lambda - \lambda_0)^2}{\sigma^2}\right), \quad (11)$$

حيث أن  $I$  هو المطال الأعظمي لطيف الإشارة المنعكسة،  $\lambda_0$  هو طول الموجة المطابق للمطال الأعظمي للطيف و  $\sigma$  هي عرض الحزمة.

خوارزمية البحث التقريبي الأمثلية تصبح عملية تصغير التعبير التالي:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i (f_i - \lambda_i)^2, \quad (12)$$

حيث أن  $w_i$  هو معامل الوزن.

$f_i$  هو تابع منحنى غاوسي:

$$f_i = \exp\left(-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (13)$$

### 3-3-4 أسلوب القطع المكافئ Hyperbolic method

أسلوب آخر لتحديد الذروة هو أسلوب القطع المكافئ. يعتمد هذا الأسلوب على بناء قطع مكافئ مساعد تتزامن ذروته على طول الحد الفاصل مع ذروة الشبكة. تتم عملية بناء القطع المكافئ على أساس إحداثيات النقط المجاورة بالقرب من المطال الأعظمي للطيف [13].

من أجل ذلك، باستخدام أسلوب البحث الأعظمي، يتم إيجاد المطال الأعظمي للطيف  $I_0$  و طول الموجة المطابق. بعد ذلك يتم أخذ عينتين في جوار المطال الأعظمي (من جوانب مختلفة) ليتم إيجاد ثوابت القطع المكافئ وفق مايلي:

$$a = \lambda_{i+1}(I_i - I_{i-1}) + \lambda_i(I_{i-1} - I_{i+1}) + \lambda_{i-1}(I_{i+1} - I_i), \quad (17)$$

$$b = \lambda_{i+1}^2(I_{i-1} - I_i) + \lambda_i^2(I_{i+1} - I_{i-1}) + \lambda_{i-1}^2(I_i - I_{i+1}), \quad (18)$$

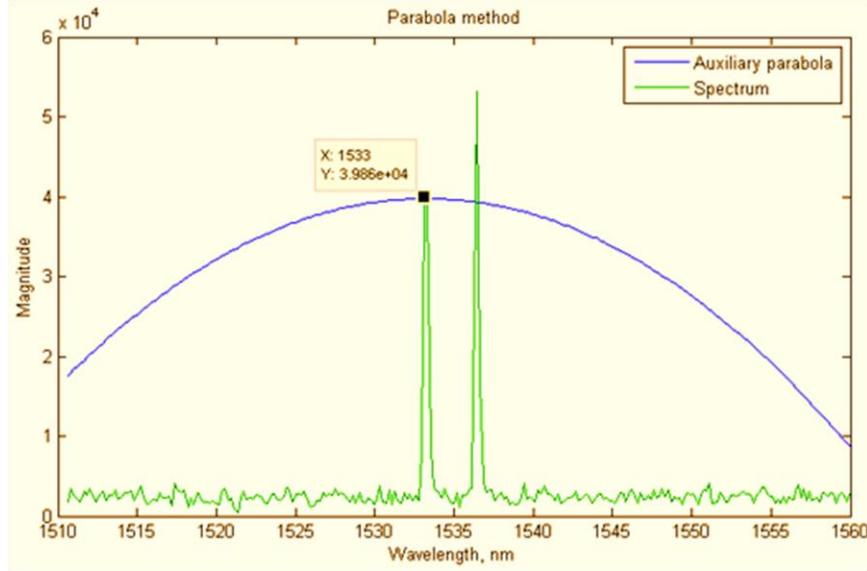
حيث أن  $\lambda_i = \lambda_0$ ،  $I_i = I_0$

يتم تخفيض تعريف القمة إلى حساب قمة ذروة القطع المكافئ باستخدام العلاقة:

$$\lambda_B = -\frac{b}{2a} \quad (19)$$

حيث أن  $a, b$  هي معاملات القطع المكافئ.

يوضح الشكل (4) مثال عن كيفية تحديد الذروة (الذروة اليسرى للشبكة التي تم تحليلها باستخدام أسلوب القطع المكافئ)

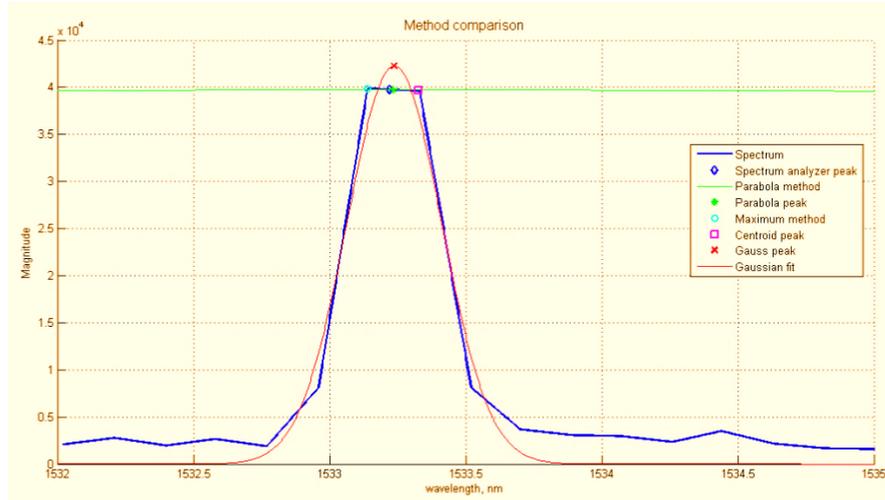


الشكل (4) تحديد الذروة باستخدام أسلوب القطع المكافئ

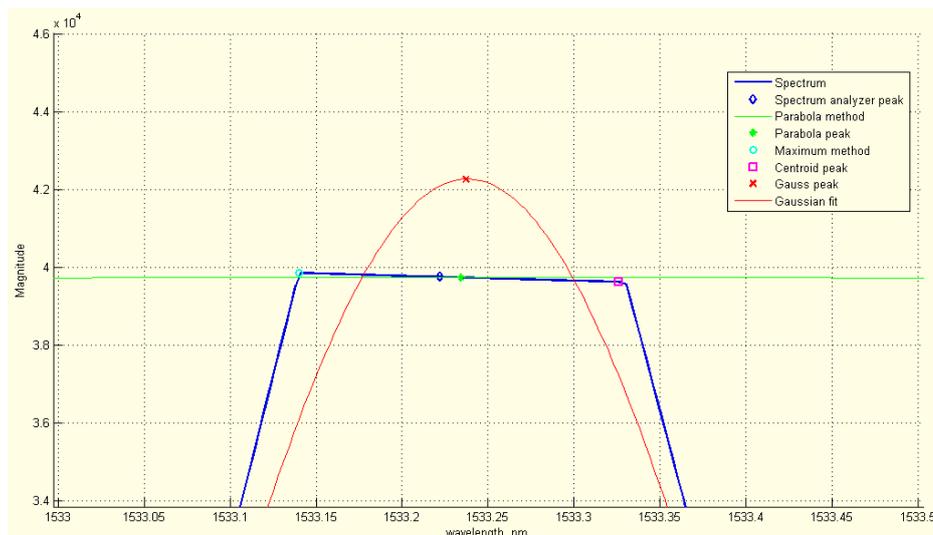
هذا الأسلوب هو تحديث لأسلوب البحث الأعظمي حيث أنه في المرحلة الأخيرة يتم حساب ذروة أكثر دقة في جوار المطال الأعظمي لطيف الإشارة المنعكسة.

#### 4. النتائج والمناقشة

تم في هذه الدراسة اختيار طول الموجة المنعكسة عند 1533.25 nm. تم استخدام معيار التحليل من خلال الفرق بين طول الموجة المحسوب عن طريق أسلوب اكتشاف الذروة وطول الموجة المحدد الذي حصلنا عليه من المحاكاة ( الشكل 5 والشكل 6).



الشكل (5) مقارنة بين أساليب اكتشاف القمة



الشكل (6) مقارنة بين أساليب اكتشاف قمة الشبكة (طيف مكبر عن الشكل 5)

بعد تحليل نتائج الاختبار ودراسة أساليب تحديد قمم FBG، تبين أن أسلوب غاوص وأسلوب القطع المكافئ واللذان لهما تقديرات أصغر خطأ للاكتشاف (10-30) بيكومتر حسب شدة إشعاع الدخل قد تم اختيارهما كأسلوب بحث محتمل.

الاثباتات الرئيسية لتفضيل أسلوب التقريب الغاوصي تشابه القمم الطيفية والقمم الغاوصية ولكن هذا الأسلوب أيضاً له مجموعة من السيئات أولها عرض القمة الطيفية يمكن أن يصل فقط إلى بضعة نانومترات والتي يمكن أن تؤدي بالتقطيع المنتظم إلى عدد غير كافي من العينات من أجل بناء تقريب دقيق و ثاني هذه السيئات أن هذا الأسلوب له تعقيد حساب عالي و هذا ما يجعله من الصعب استخدامه من أجل مراقبة الأنظمة متعددة القنوات. أسلوب القطع المكافئ أيضاً أظهر معدلات اكتشاف خطأ منخفضة جيدة. ولكن هذا الأسلوب غير مستقر لانزياح القمة الطيفية حيث أنه عندما تتزاح القمة بمقدار صغير عن قيمتها السابقة، فإن تقدير طول موجة براغ يمكن أن يتغير بشكل ملحوظ بسبب التغير في مواقع النقاط في جوار قيمة الشدة العظمى وهذا يؤدي إلى تغيير في قيم ثوابت القطع المكافئ و كنتيجة لذلك طول موجة القمة المحسوبة.

من الممكن استخدام أسلوب استيفاء الشريحة من أجل التخلص من هذه السيئات. يستخدم هذا الأسلوب من أجل زيادة عدد المراجع وزيادة الدقة التقريبية باستخدام مرشحات متنوعة من أجل تخفيض الضجيج ذو الطبيعة المختلفة. بالتحديد من أجل حل مشكلة التخلص من الضجيج الدوري والانبعاثات الحادة يمكن تطبيق مرشح كالمان. تم في هذا البحث إجراء مقارنة تحليلية لأساليب اكتشاف القمم في شبكات براغ: الأسلوب الأعظمي، أسلوب القيمة الوسطي، و أسلوب التقريب الغاوصي و أسلوب القطع المكافئ. عند تحليل نتائج الاختبار تم اختيار أسلوبين لهما أقل أخطاء اكتشاف للقمم (10-30) نانو متر وهما الأسلوب الغاوصي وأسلوب القطع المكافئ. وأيضاً بعد تحليل نتائج الاختبار تم اقتراح بعض التعديلات على هذه الأساليب ونظم المراقبة وتم وصف هذه التعديلات.

## 5. المراجع:

- [1] Zaytsev, K. I., Katyba, G. M., Yakovlev, E. V., Gorelik, V. S., & Yurchenko, S. O. (2014). Band-gap nonlinear optical generation: The structure of internal optical field and the structural light focusing. *Journal of Applied Physics*, 115(21), 213505.
- [2] Fedorov, A., Lazarev, V., Makhrov, I., Pozhar, N., Anufriev, M., Pnev, A., & Karasik, V. (2015). Structural monitoring system with fiber Bragg grating sensors: implementation and software solution. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 594, No. 1, p. 012049). IOP Publishing.
- [3] Fedorov, A. K., Anufriev, M. N., Zhirnov, A. A., Stepanov, K. V., Nesterov, E. T., Namiot, D. E., ... & Pnev, A. B. (2016). Note: Gaussian mixture model for event recognition in optical time-domain reflectometry based sensing systems. *Review of Scientific Instruments*, 87(3), 036107.
- [4] Mikheev, P. V., Dalinkevich, A. A., Gusev, S. A., Igonin, T. N., Maksaeva, L. B., & Nenashaeva, T. A. (2016). Research of long-term properties of high-strength fibreglasses by means of the built-in FBG sensors. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 77, p. 05003). EDP Sciences.
- [5] Lazarev, V. A., Leonov, S. O., Tarabrin, M. K., & Karasik, V. E. (2017, June). Fiber Bragg gratings strain measuring system and a sensor calibration setup based on mechanical nanomotion transducer. In *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X* (Vol. 10329, p. 103292F). International Society for Optics and Photonics.
- [6] Chernutsky, A. O., Zhirnov, A. A., Fedorov, A. K., Nesterov, E. T., Stepanov, K. V., Tezadov, Y. A., ... & Pnev, A. B. (2017, May). Phase-sensitive optical time-domain reflectometry with pulse mode EDFA: Probe pulse preparation. In *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS)* (pp. 2231-2236). IEEE.
- [7] Merlo, S., Malcovati, P., Norgia, M., Pesatori, A., Svelto, C., Pniiov, A., ... & Karassik, V. (2017, June). Runways ground monitoring system by phase-sensitive optical-fiber OTDR. In *2017 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)* (pp. 523-529). IEEE.
- [8] Konovalov, S., Mayorov, D., Ponomarev, Y., & Soloveva, T. (2018, September). High-precision smart system on accelerometers and inclinometers for Structural Health Monitoring: development and applications. In *2018 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics* (pp. 52-57). IEEE.
- [9] Chernutsky, A. O., Pnev, A. B., Stepanov, K. V., Zhirnov, A. A., Semyonov, V. Y., & Krotov, A. S. (2018, June). Measurement Of Cryological Temperature Distribution via Fiber Optic Sensors. In *2018 International Conference Laser Optics (ICLO)* (pp. 283-283). IEEE.
- [10] Mikhneva, A. A., Gribaev, A. I., Frolov, E. A., Novikova, V. A., Konnov, K. A., & Zaleskaya, Y. K. (2018). Inscription and investigation of the spectral characteristics of chirped fiber Bragg gratings. *Journal of Optical Technology*, 85(9), 531-534.
- [11] Kashyap, R. (2009). *Fiber bragg gratings*. Academic press.
- [12] Prohaska, J. D., Snitzer, E., Chen, B., Maher, M. H., Nawy, E. G., & Morey, W. W. (1993, March). Fiber optic Bragg grating strain sensor in large-scale concrete structures. In *Fiber Optic Smart Structures and Skins V* (Vol. 1798, pp. 286-294). International Society for Optics and Photonics.
- [13] Song, M., Lee, B., Lee, S. B., & Choi, S. S. (1997). Interferometric temperature-insensitive strain measurement with different-diameter fiber Bragg gratings. *Optics letters*, 22(11), 790-792.

[14] Othonos, A. (1997). Fiber bragg gratings. Review of scientific instruments, 68(12), 4309-4341.

[15] Geiman, B., Bohs, L., Anderson, M., Breit, S., & Trahey, G. (1997, October). A comparison of algorithms for tracking sub-pixel speckle motion. In 1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. An International Symposium (Cat. No. 97CH36118) (Vol. 2, pp. 1239-1242). IEEE.

[16] Bodendorfer, T., Muller, M. S., Hirth, F., & Koch, A. W. (2009, September). Comparison of different peak detection algorithms with regards to spectrometric fiber Bragg grating interrogation systems. In 2009 International Symposium on Optomechatronic Technologies (pp. 122-126). IEEE.

[17] فوجي واي جونسون ، دي سي كاواساكي، حساسية الضوء في موجهاات الألياف الضوئية، (1978)