تحليل أداء مجس الالياف البصرية المستخدم لقياس شدة المجال الكهربائي

سلمى محمد حسين* عدي عطا حمادي** رانيا عايد مركب**

تاريخ قبول النشر ٢٠٠٥/٥/٢

الخلاصـــة

في هذا البحث ، جرى تقديم نتائج لتحليل أداء مجس الالياف البصرية المستخدم لقياس وتحسس شدة المجال الكهربائي. بينت النتائج المستحصلة أن استخدام مجس طويل يعطي استجابية عالية لشدة المجال الكهربائي وقيمة عالية لتحسسية المجس ، إلا ان ذلك يتم على حساب تقليل شدة المجال الكهربائي التي يتم الكشف عنها. ولأجل الحصول على استجابية واسعة لشدة المجال ومنتظمة نسبياً يتم استبدال دالة الاستجابية الفعلية بدالة أخرى تتحدد تحليلياً.

المقـدمة

استأثرت مجسات المجال الكهربائي والهوائيات التي توظف الألياف البصرية باهتمام الباحثين مؤخراً بشكل كبير [3-1]. يتم تصنيع مثل هذه المجسات من خلال طلاء الليف البصري ذي النمط المنفرد بمادة نشطة كهروبصرياً وعند تعريض المجس إلى مجال كهربائي متناوب فإن الموجات الراديوية الناتجة تحدث تضميناً لمعامل انكسار مادة الليف. هذا التضمين يسبب إزاحة طورية يمكن الكشف عنها بشكل إشارة كهربائية باستخدام مقياس التداخل الذي يوظف الألياف البصرية والكواشف الضوئية. إن حساسية هذه المجسات تزداد خطياً مع طول المجس عند الأطوال الموجية الطويلة ، إلا أن زيادة طول المجس بشكل كبير تؤدي إلى تقليل الحساسية وقد تصل إلى الصفر عند الأطوال الموجية القصيرة [4].

هنالك العديد من التطبيقات التي توظف هذا النوع من المجسات وإن مجسات الألياف البصرية المصنعة من المواد العازلة كهربائياً تعمل كهوائيات استلام فقط إذ أنها لا تخضع لقواعد التبادل التي تعمل وفقها الأنواع التقليدية من الهوائيات. إن هذه الخاصية تجعل هذه المجسات مفيدة للعمل كهوائيات استلام ذات مساحة مقطع عرضي مقاربة للصفر. كذلك فإن هوائيات الألياف البصرية تكون محصنة تجاه النبضات الكهرومغناطيسية (EMP) والشحنات الكهربائية المستقرة [1].

علاوة على ذلك ، فإن هوائيات الألياف البصرية يمكنها استلام الحزم ذات الترددات الواطئة جداً إذ أن الهوائيات التقليدية بصورة عامة تكون ذات حجم كبير جداً وكفاءة واطئة بسبب الخسائر الناجمة عن درجة ترابط مكونات الشبكة.

النموذج النظري

تعطى إزاحة الطور (ϕ) الناتجة عن طول (L) لليف بصري موضوع في مجال كهربائي شدته (E) بالعلاقة الآتية:

$$\phi = \eta E n k L \qquad (1)$$

حيث k هو العدد الكمي للحامل البصري و n معامل انكسار مادة الليف و η حساسية المجس للمجال الكهربائي. يمكن تبسيط العلاقة (1) من خلال تعريف الحساسية التبادلية للمجس (S) والتي تمثل حاصل ضرب إزاحة الطور بشدة مجال كهربائي مقدارها (1V/m) لطول (1m) من الليف البصري ، فتصبح:

$$\phi = SEL \qquad (2)$$

إن القيمة النموذجية لعامل الحساسية التبادلية (S) للمجس تكون بحدود (50μrad/V) [4] وباستخدام مقياس تداخل (Interferometer) نموذجي ، فإن أدنى إزاحة طور يمكن الكشف عنها بحدود (1μrad/Hz) تجعل من الممكن كشف مجال كهربائي شدته $0.02V/\sqrt{Hz}$ لطول (1m) من الليف البصري. ولأجل كشف إشارات قيمتها ($1\mu VHz^{1/2}$) يتوجب استخدام ليف بصري بطول عدة كيلومترات على فرض أن الليف يمتد بشكل مستقيم [5].

عندما يكون زمن مرور الإشارة الضوئية خلال مجس طويل مقارب للفترة الزمنية التي يتم خلالها كشف المجال الكهربائي ، فإن المجال الكهربائي في المعادلة (2) لا يبقى ثابتاً. هذا التحليل يقدم الاستجابية الترددية لمجس طويل إذ تكون استطالة الليف البصري (أي مقدار التغير في طول الليف L) صغيرة مقارنة بالطول

* قسم العلوم التطبيقية ، الجامعة التكنولوجية ، بغداد ، العراق
** ص . ب . ٥٥١٥٩ ، بغداد ١٢٠٠١ ، العراق

الموجي لموجة المجال الذي يتم كشفه ، إلا أن زمن العبور خلال الليف البصري يكون طويلاً بشكل كافٍ مقارنة بزمن دورة المجال الكهربائي [6]. إن هذا التحليل يتناول فقط تأثير طول الليف البصري على الاستجابية الترددية.

إذا كان المجال الكهربائي متغيراً مع زمن العبور خلال المجس ، يتم إجراء التكامل لإزاحة الطور المحتثة بواسطة المجال الكهربائي لأجل الدقة. وعليه فإن زمن العبور (τ) يرتبط بالمسافة التي ينتقل بها الضوء خلال المجس (z) على افتراض أن تأثير المجال الكهربائي على قيمة معامل الانكسار (n) يكون مهملاً ، وكما يأتي:

$$\tau = nz/c \qquad (3)$$

حيث c سرعة الموجة الكهرومغناطيسية في الفراغ.

إن معادلة حساب إزاحة الطور الناتجة عن المجال الكهربائي لا تطابق المعادلة (2) وإنما تحسب كالآتي:

$$\phi = \int_0^L SE_0 e^{i\omega t} dz \qquad (4)$$

وبتعويض المعادلة (3) في المعادلة (4) وإجراء التكامل ، يصبح:

$$\phi = SE_0 L \frac{|\sin U|}{U} \qquad (5)$$

حيث

$$U = \frac{\pi f n L}{c} = \frac{\pi n L}{\lambda} \qquad (6)$$

حيث أن U هو تردد التقويم على طول الليف و λ الطول الموجي لموجة المجال المغناطيسي في الفضاء الحر. نفترض أن انتشار الموجة داخل الليف مع الطول يكون مثالياً أي أن الخسائر يمكن إهمالها.

النتائج والمناقشة

عند الترددات الواطئة ، يتم اختزال المعادلة (5) إلى المعادلة (2) ويبين الشكل (1) تغير الاستجابية المقومة للمجس لوحدة الطول (ϕ/SE_0L) كدالة لتردد التقويم (U) من الشكل يلاحظ أن ذروات الاستجابية تظهر عند شدة (20dB) فيما تهبط إلى الصفر عند قيم التردد U التي تمثل مضاعفات π. كما يلاحظ أن قيمة الاستجابية تقل بمقدار (3dB) عند تردد (U=1.39) أو (L=0.25λ) لمعامل الانكسار (n=1.5).

عند رسم ($\phi/SE_0\lambda$) مقابل (L/λ) ، كما في الشكل (2)، فإنه تتضح الزيادة الخطية في قيمة التحسسية إلى الحد الذي يمكن اعتباره طويل من ناحية التحسسية الكهربائية إذ لا يتم تحقيق زيادة أكبر في قيمة التحسسية. إن القيم الصفرية للتحسسية تنتج عندما يكون طول الليف البصري كبيراً.

إن عرض الحزمة الترددية (f_{3dB}) للمجس عند شدة مقدارها (3dB) يتحدد بطول المجس ، وفي حالة تردد (U=1.39) فإنه يعطى بالعلاقة الآتية:

$$f_{3dB} = \frac{1.39c}{\pi n L} = \frac{88.5MHz}{L} \qquad (7)$$

حيث (L) طول المجس. وعليه ، فمن أجل الحصول على عرض حزمة مقداره (88.5kHz) فإنه يتوجب العمل عند طول (1km) لليف.

من الشكل (1) والشكل (2) ، يلاحظ أنه لا يفضل العمل في المنطقة الطويلة كهربائياً بسبب تكوّن القيم الصفرية للاستجابية والتي تنشأ عن إجراء التكامل للدالة المتناظرة عبر مضاعفات الدورة وكما في المعادلة (4). يمكن إلغاء القيم الصفرية للاستجابية من خلال إضافة حدود تعبر عن عدم التناظر إلى الدالة نفسها. وذلك يتم من خلال جعل التحسسية (S) دالة للموقع (z). أي أنه لأجل حذف القيم الصفرية للدالة $S(z)$ يجب ألا تكون هذه الدالة متناظرة حول z=$L/2$.

لذلك ، يتم اختيار دالة خطية تعرف كالآتي:

$$S(z) = S_0[1 + (\frac{\tau - 1}{L})z] \qquad (8)$$

حيث S_0 التحسسية الابتدائية للمجس و τ معامل خاص بنوع الليف و قيمته $0 \le \tau \le 1$.

ومن خلال استبدال دالة التحسسية (S) في المعادلة (4) بالدالة $S(z)$ في المعادلة (8)، ينتج

$$\phi = \int S[1 + (\frac{\tau - 1}{L})z] E_0 e^{-i\omega t} dz \qquad (9)$$

وهذا التكامل يتضمن جزئين ، حقيقي وخيالي ، كما يأتي:

$$\mathrm{Re}\phi = S\left\{\frac{\sin 2U}{2U} + (\tau - 1)\left[\frac{\sin 2U}{2U} + \frac{\cos 2U - 1}{4U}\right]\right\} \qquad (10)$$

$$\mathrm{Im}\phi = SE_0L\left\{\frac{1 - \cos 2U}{2U} + (\tau - 1)\left[\frac{\sin 2U}{4U} - \frac{\cos 2U}{2U}\right]\right\} \qquad (11)$$

وإن قيمة ϕ تعطى كالآتي:

$$\phi = \sqrt{(\mathrm{Re}\phi)^2 + (\mathrm{Im}\phi)^2} \qquad (12)$$

يبين الشكل (3) علاقة ϕ/S_0E_0L بتردد التقويم (U) ومنه يلاحظ أن أقصى نهاية خطية للدالة تكون عندما $\tau = 0$. عند مقارنة الشكل (3) بالشكل (1) ، يلاحظ أن القيم الصفرية للاستجابية تحولت إلى مناطق تموج لذا يتسع المدى الترددي الذي يتم الإفادة منه للمجس.

أما الشكل (4) فيوضح علاقة $\phi/S_0E_0\lambda$ مقابل L/λ وهو يبين الزيادة الخطية في قيمة التحسسية وصولاً إلى المنطقة الطويلة كهربائيا إذ تمتد دالة الاستجابية وتنبسط بدلاً من القيم الصفرية الدورية في الشكل (2). إن إلغاء القيم الصفرية للتحسسية يكون على حساب تقليل قيمة التحسسية إذ تقل التحسسية للأطوال الموجية الطويلة بمقدار (6dB) في حالة المجس ذي السلوك الخطي.

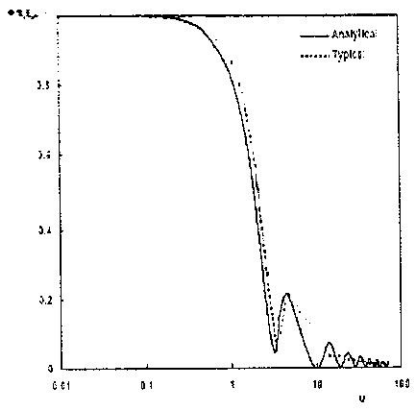

Fig. (3): variation of normalized symmetric response of sensor per unit length (ϕS_0E_0L) with the normalized frequency (U)

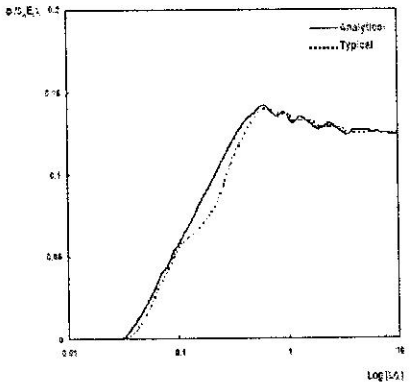

Fig. (4) variation of the normalized symmetric response of sensor per unit wavelength ($\phi S_0E_0\lambda$) with the normalized sensor length (L/λ)

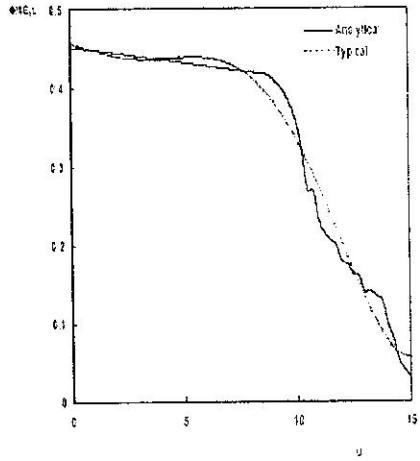

Fig. (3): variation of normalized response of sensor per unit length (ϕSE_0L) with the normalized frequency (U)

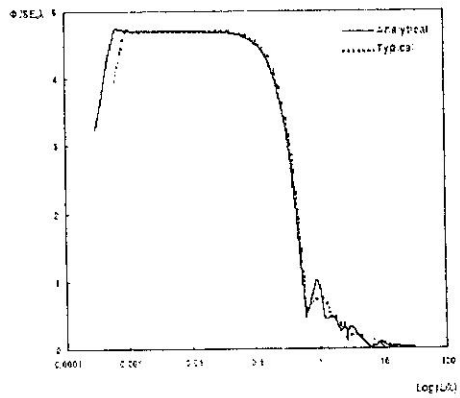

Fig. (4): variation of the normalized response of sensor per unit wavelength ($\phi SE_0\lambda$) with the normalized sensor length (L/λ)

الاستنتاجات

لأجل تحقيق قيم عالية لتحسسية مجس المجال الكهربائي باستخدام الألياف البصرية ، يتوجب جعل المجس طويل إذ أن التحسسية تتناسب مع طول المجس. عندما يكون طول المجس مقاربا أو أكبر من الطول الموجي لإشارة المجال الكهربائي ، تظهر قيم صفرية للاستجابية الترددية ، وهذه القيم يمكن تقليلها إلى حد إهمالها باستخدام دالة متناظرة للتحسسية حيث تتولد استجابية منبسطة وواسعة نسبيا في المنطقة الطويلة كهربائيا من المجس.

المصادر

1. Jarzynski, J., 1984, AC electric signals optical fiber sensor, J. Appl. Phys. 55: 3250 –3253.
2. Ku , C.C., De Paula , R.P., Jarzynski, J., and Bucaro, J.A ., 1983, Optical fiber antenna, Proc. SPIE, 412:178-184.
3. Wilson , M.L., Bartnik , D.J. and Bendddett , M.P., 1988, Novel optical fiber sensing system for the AC electric field, Proc. OFS, 114-117.
4. De Souza, P.D. and Mermelstein ,M.D., 1982, Radio frequency electric signal measurement by optical fiber sensor, Appl. Opt., 21:4214-4218.
5. Waford ,J.N., 1999, Three dimensional phase imaging with a scanning optical-fiber interferometer, Appl. Opt., 38:3508-3518.
6. Phillips, P.L. and Knight, J.C., 2000, Direct measurement of optical phase in the near field, Appl. Phys. Lett., 76:541-543.

Analytical Modeling to enhance electric Field measurement using Optical Fiber Sensor

Selma M.H **Oday A.H.** **Rania I.A.**

Abstract

In this work, the analysis results of performance of an optical fiber sensor used to measure and detect the electric field intensity were presented. These results explained that using long sensor allows high electric field response and high sensitivity to the sensor but this is performed while the electric field intensity to be detected is decreased. In order to obtain wide and relatively uniform responsivity, the mean electric field responsivity function is replaced by another one can determined analytically.