

تصميم وتنفيذ هوائي ياغي لربط الشرائح الميكروية ودليل الموجة مستطيل الفتحة باستخدام طريقة FDTD

الدكتور عدي علي*

(تاريخ الإيداع 22 / 2 / 2010. قُبل للنشر في 13 / 5 / 2010)

□ ملخص □

تقدم هذه المقالة دراسة تصميمية وتنفيذية لدارة ربط بين الشرائح الميكروية ودلائل الموجة مستطيلة الفتحة مكونة من هوائي ياغي يودا، وذلك باستخدام طريقة الفروقات المنتهية في مجال الزمن FDTD. تم تصميم هوائي ياغي يودا مصنوع من الشرائح الميكروية ذات المادة العازلة مرتفعة السماحية الكهربائية، بحيث يكون لهذا الهوائي مخطط إشعاعي محوري متوضع في مستوي الحقل الكهربائي الأعظمي (E-plane) داخل فتحة دليل الموجة. تُعد هذه الطريقة في الربط من الطرائق البسيطة في التصنيع والتنفيذ وتؤمن الربط على مجال ترددي عريض، حيث تبين من دراسة عامل الانعكاس لهذه الدارة باستخدام طريقة FDTD أن أكثر من 35% من عرض الحزمة للقناة X له عامل انعكاس أقل من -12dB، وهذا متوافق بشكل كبير مع النتائج العملية التي أخذت لدارة ربط لها سماحية كهربائية نسبية $\epsilon_r = 2.2$.

تعتمد طريقة FDTD على حساب مركبات الحقل الست تبعاً للزمن عند جميع خلايا المنطقة المدروسة، وهذا أتاح معرفة التوزيع المكاني والزمني لمركبات الحقل الكهربائي والمغناطيسي ضمن المادة العازلة للشريحة المطبوعة ضمن دليل الموجة.

الكلمات المفتاحية: FDTD، هوائي ياغي_ يودا، الشرائح الميكروية، دليل الموجة.

* مدرس - عضو هيئة تدريسية - كلية الهندسة الالكترونية - أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية - حلب - سورية.

Designing and Implementing A Yagi Antenna for Microstrip -to- Waveguide Transition Using FDTD Method

Dr. Odai Ali *

(Received 22 / 2 / 2010. Accepted 13 / 5 / 2010)

□ ABSTRACT □

This paper describes a microstrip-to-waveguide transition consisting of a Yagi-like antenna using Finite-Difference Time-Domain method. The single-layered quasi-Yagi antenna fabricated on high dielectric-constant substrate has end-fire radiation patterns. This antenna is inserted in the E-plane of the rectangular waveguide to launch the TE_{10} dominant mode. With this new scheme of excitation, compact design and low-cost fabrication is achieved without requiring multilayered substrate. This transition achieves very broad bandwidth and relatively low insertion loss. The X-band transition with alumina substrate $\epsilon_r = 2.2$ demonstrates 35% bandwidth with return loss better than -12 dB.

The Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method is used for the full-wave analysis of planar microstrip and microwave circuits.

Keywords: FDTD method, Yagi-Uda antenna, Microstrip line, Waveguide.

*Assistant Professor, Faculty of Electronic Engineering, Al-Assad Academy for Military Engineering, Aleppo, Syria.

مقدمة:

إن إحدى الطرائق المستخدمة في ربط الشرائح الميكروية بأدلة الموجة هي الطريقة التي تستخدم هوائي ياغي- يودا المصنوع بواسطة الشرائح الميكروية الذي له مخطط إشعاعي أعظمي باتجاه محوره. يتم صناعة الهوائي باستخدام طريقة الدارات الميكروية المطبوعة المتألّفة أو المتكيفة (MMIC) " Monolithic-Microwave integrated circuit " ويوضع هذا الهوائي داخل دليل الموجة مستطيل الفتحة في المستوي الذي تكون فيه شدة الحقل الكهربائي E أعظمية. بالطبع النمط الفعّال هو النمط الرئيس TE_{10} . وتُعدُّ هذه الطريقة في الربط بسيطة وغير مكلفة، وتحقق عرض حزمة كبير وضياع منخفض نسبياً.

بالرغم من أن دليل الموجة لا يزال المكون الأساسي للمنظومات الميكروية كونه البنية المعدنية الأقل ضياعاً والأكفأ في نقل الاستطاعات العالية، إلا أن الشرائح الميكروية أخذت حيزاً كبيراً من التطبيق كونها تتلاءم بشكل كبير مع الأنظمة الصغيرة، وذات الحركة العالية والاستطاعة المنخفضة نسبياً. تظهر الحاجة بين الحين والآخر إلى الانتقال بين آليتي النقل هذين لضرورات تصنيعية أو للحاجة ضمن استخدام ما. ولذلك اهتم الباحثون منذ منتصف التسعينيات من القرن الماضي بهذا الموضوع، إلى أن توصل الباحث نوريكا كنيديا في عام 1999 إلى طريقة بسيطة وغير مكلفة وسهلة الاستخدام تعتمد على هوائي ياغي-يودا مصنع من الشرائح الميكروية يعمل على المجال $(8 \div 12)GHZ$ ويتكون من المشع الأساسي وعاكس وموجه وحيد وله ضياع ارتداد $R_L \leq -10dB$ من أجل 48% من عرض العصابة. استخدم شريحة ميكروية واحدة مصنوعة من مادة أكسيد الألمنيوم "Alumina" ذات السماحية الكهربائية العالية نسبياً ($\epsilon_r = 9.9$). اعتمد هذا الباحث بشكل أساسي في عمله على الانتقال من الشرائح الميكروية إلى دليل الموجة. يهتم هذا البحث بدراسة تحليلية وتصميمية لدارة الربط باستخدام طريقة "Finite- FDTD Difference Time-Domain" وإيجاد الاستجابة الترددية لهذه الدارة ومقرنتها مع النتائج التجريبية والتحليلية المنشورة سابقاً [1]، حيث أظهرت الدراسة على المجال الترددي $(8 \div 12)GHZ$ توافقاً جيداً كما سنرى لاحقاً.

أهمية البحث وأهدافه:

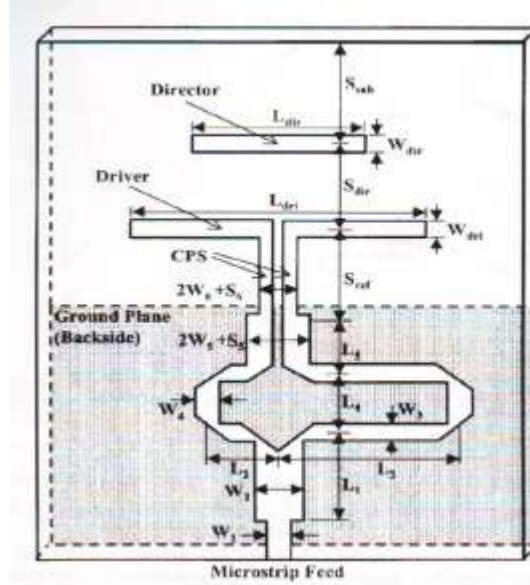
تأتي أهمية البحث من الحاجة إلى استخدام الشرائح الميكروية ودلائل الموجة بمكان واحد في الكثير من التطبيقات العملية والاستفادة من مولدات التردد الميكروي التي تعمل بتقنيات الطريقة الصلبة في الدارات المطبوعة أو استخدام المولدات الكريستالية والمضخمات الترانزستورية في دلائل الموجة.

طرائق البحث ومواده:

تقوم طريقة البحث على دراسة وتحليل هوائي ياغي-يودا المكون من مشع وموجه واحد باستخدام طريقة FDTD ومن ثم تصميم الهوائي وإجراء القياسات العملية عليه باستخدام التجهيزات المخبرية الضرورية الموجودة في مخبر الهوائيات وانتشار الأمواج في أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية ومقارنة النتائج مع الدراسات النظرية والعملية المنشورة سابقاً والتي تستخدم طرائق أخرى في عملية التحليل.

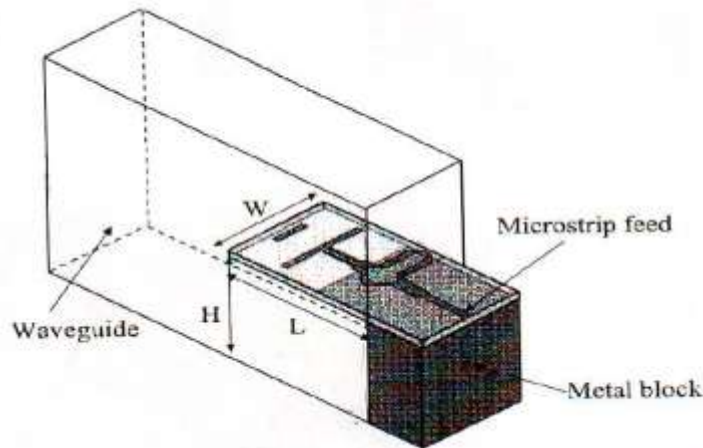
آلية التصميم:

يُعدُّ هوائي ياغي- يودا العنصر الأساسي في عملية الربط بين دليل الموجة والشرائح الميكروية كما هو مبين في الشكل (1). بحيث يتكون هذا الهوائي من عنصرين أحدهما المغذي والثاني الموجه، ومن عاكس مكون من المستوي الأرضي ومن بالون ناقل يؤمن إضافة فرق صفحة (طور) بين الإشارتين على طرفي الدببول مقدارها 180° وتوافق في الصفحة عند خط النقل المطبوع، مما يؤمن الانتقال بين خطي النقل المتوازيين وخط الشريحة الميكروية المفرد وسيطلق على هذا البالون المرحلة الانتقالية.



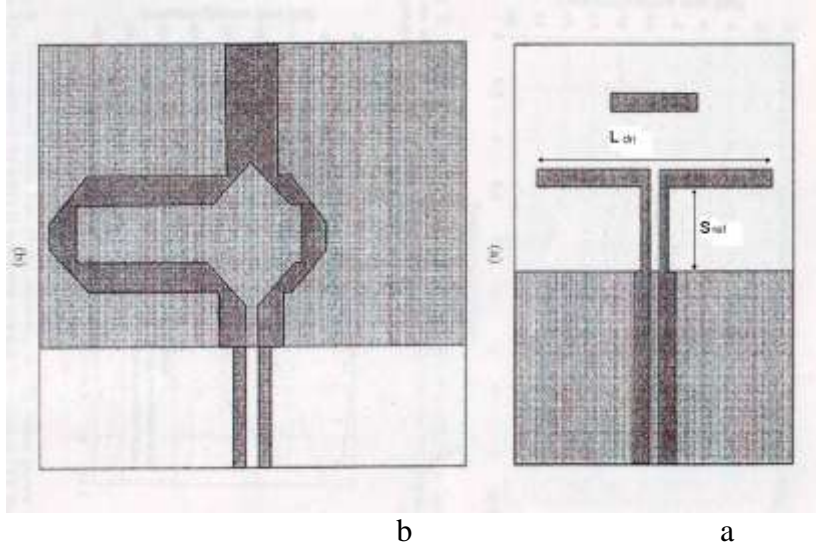
الشكل (1) هوائي شبه ياغي مكون من مشع وموجّه وعاكس.

يوضع الهوائي في المستوي E داخل دليل الموجة كما هو مبين في الشكل (2). إنَّ عرض المادة العازلة للشريحة الميكروية (W) والمستوي الأرضي لها يساوي ارتفاع دليل الموجة الداخلي.



الشكل (2) الربط بين دليل الموجة وخط النقل.

يتم الوصل الكهربائي (التماس) بين جدران دليل الموجة والمستوي الأرضي للشريحة. وسيتم تجزئة هوائي ياغي إلى قسمين: الأول هو العنصر الأساسي والموجه وخط النقل المكون من شريحتين متوازيتين كما هو مبين في الشكل (3a)، والثاني هو المرحلة الانتقالية كما هو مبين في الشكل (3b) وسيتم شرح كلا القسمين كل على حدة.

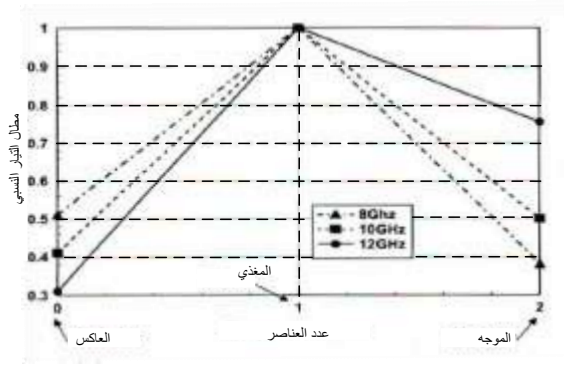


الشكل (3) أقسام الدارة a: الهوائي، b: المرحلة الانتقالية.

تصميم الهوائي:

يملك العنصر الأساسي للهوائي دخل مكون من خطي نقل كما هو مبين الشكل (3a). يتم وصل هذين الخطين مع خطين آخرين بعرض أكبر موجودين على المادة العازلة (substrate) بحيث يضمنان عدم نشوء أنماط هجينة غير مرغوبة ناتجة عن التحويل من دخل ثنائي إلى شريحة ميكروية مفردة. يبلغ طول العنصر الأساسي حوالي $L_{dri} = \lambda_g / 2$ حيث $\lambda_g = \lambda_0 / (\sqrt{\epsilon_r} + 1)$ ويبعد بمسافة $S_{ref} = \lambda_g / 4$ عن العاكس (المستوي الأرضي). وكلما كانت قيمة السماحية الكهربائية النسبية للمادة أكبر كان الحقل متركزاً تحت خط الشريحة وكانت عملية الربط أفضل ومن دون ضياعات.

يشع الهوائي أو يستقبل (حيث إن هذا الهوائي يمكن أن يكون مرسلًا أو مستقبلًا) حقلًا كهربائيًا موازيًا لحقل النمط الرئيس TE_{10} في دليل الموجة. سيعمل العاكس على زيادة نسبة الموجة الأمامية إلى الخلفية، وسيقوم الموجه الذي يملك طول أقل من طول العنصر الأساسي بزيادة توجيهية الهوائي داخل دليل الموجة بالإضافة إلى كونه عاملاً مهماً في زيادة عرض حزمة العمل للهوائي. يبين الشكل (4) مطال التيارات النسبية الموزعة على العناصر الثلاثة للهوائي، وذلك من أجل ترددات مختلفة الناتجة عن المراقبة العملية.



الشكل (4) مطال التيارات النسبية الموزعة على العناصر الثلاثة للهوائي.

ينتج اختلاف مطال التيار تبعاً للتردد من حقيقة تغير الطول الكهربائي للعنصر عند تغير التردد العامل، وتصبح كثافة الاستطاعة المنبعثة عن العناصر الأقصر أكبر من كثافة الاستطاعة المنبعثة عن العناصر الأطول عند زيادة التردد، حيث إن كل عنصر يغطي محزمة ترددية متناسبة مع طوله و يزداد عرض الحزمة الترددية للهوائي بزيادة عدد العناصر.

بالرغم من أن التوقعات البدائية لأطوال ومواضع عناصر الهوائي يمكن إيجادها باستخدام طريقة ياغي في التصميم إلا أنه لا بد من إجراء الدراسة على الموجة الكاملة (full wave) وتقليل التقريبات قدر الإمكان. ولقد وجد أن طول الموجة والمسافة بينه وبين المغذي تكون أصغر منها عند استخدام طريقة ياغي، وذلك للحصول على عرض عسبة كبير. ولقد وجد أنه في حال عدم وجود المرحلة الانتقالية (البالون)، فإن عرض عسبة العمل يكون كبيراً أيضاً، وهذا دليل على إن البالون معزول عن الهوائي، ولا يؤثر على عمله سلباً، وهذا يدل على الجودة الصريحة لاستخدام هذا الهوائي في عملية الربط بين الشرائح الميكروية والدلائل الموجية.

تصميم المرحلة الانتقالية:

تعدّ المرحلة الانتقالية (البالون) جزءاً أساسياً في عملية الربط، ويجب أن تكون هذه المرحلة قادرة على نقل الأنماط الفردية (النمط الرئيس في دليل الموجة) وتخميد الأنماط الزوجية (الهجينة) على مجال ترددي كبير. تقوم هذه المرحلة بتأمين انزياح صفحي مقداره 180° بين مطالي الإشارة القادمين من وإلى خطي النقل المتوازيين عند منتصف المجال الترددي (10 GHz)، وتنتج ممانعة موافقة للأنماط الفردية التي تملك ممانعة أصغر بكثير من الممانعة التي تملكها الأنماط الزوجية. إضافةً إلى التوافق الجيد الذي تؤمنه هذه المرحلة بالنسبة للأنماط الفردية فهي تشكل تقريباً حمل مفتوح بالنسبة للأنماط الزوجية.

باستخدام التصميم البرمجي الذي يعالج كامل الموجة (كافة مركبات الموجة) وباستخدام أبعاد البالون التي تحقق فرق مسافة $\lambda_g/2$ أي فرق صفحة 180° تم الحصول على البالون النموذجي الذي يمكن استخدامه في هذا النظام، [1]. حيث تم ملاحظة التالي عند تصميم هذه المرحلة:

- ضياع التغذية (التحريض) صغير جداً (حوالي -1 dB).
- ضياع الانعكاس أقل من -10 dB من أجل الأنماط الفردية والزوجية وعلى كامل المجال X تقريباً.

تم إعطاء الحرية الكاملة في اختيار عرض الشريحة الميكروية المفرد عند مدخل البالون، وذلك لتحقيق الممانعة المرغوبة وتحسين عامل الانعكاس بين الدارة المطبوعة والهوائي.

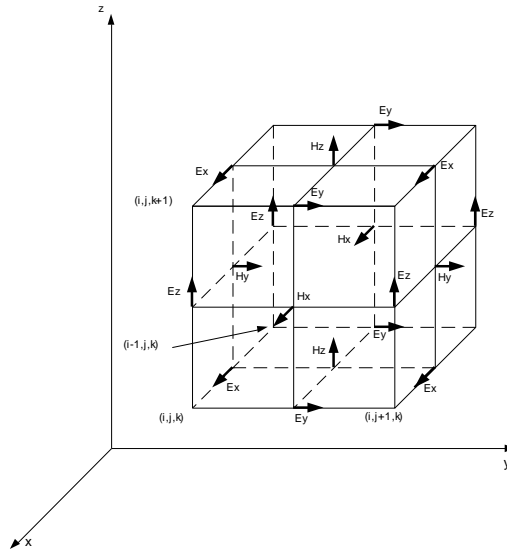
طريقة الفروقات المنتهية في مجال الزمن FDTD:

تعتمد طريقة FDTD على وصف معادلاتي ماكسويل لدوران الحقلين الكهربائي والمغناطيسي (فاراداي وأمبير) بشكل متقطع في حيز مكاني محدود تبعاً للزمن [2]، للتبسيط يمكن وصف المادة التي يُدرس فيها انتشار الحقل بأنها منتظمة ومتجانسة وعديمة الضياع، بالتالي تكون معادلاتي ماكسويل على الشكل الآتي:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

لحل المعادلتين (1) و (2) باستخدام طريقة FDTD يجب تقطيع المنطقة المدروسة إلى خلايا حجمية صغيرة تتناسب أبعادها مع أبعاد مكونات المادة (أبعاد النواقل والعوازل) تسمى خلايا Yee نسبةً للعالم Yee مكتشف هذه الطريقة، كما هو مبين في الشكل (5).



الشكل (5) توضع مركبات الحقل الكهرومغناطيسي على خلية Yee.

إن أبعاد الخلية على المحاور \hat{x} و \hat{y} و \hat{z} هي على التوالي Δx و Δy و Δz ويمكن إيجاد مركبات الحقل في مركز كل وجه للخلية بدلالة مركبة الحقل في تلك النقطة عند اللحظة الزمنية السابقة وبدلالة مركبات الحقل المماسية عند حواف الخلية كما هو مبين في العلاقات الآتية:

$$H_x \Big|_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = D_a \Big|_{i,j,k} \cdot H_x \Big|_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}} + D_b \Big|_{i,j,k} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{E_y \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n - E_y \Big|_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} \\ - \frac{E_z \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n - E_z \Big|_{i,j-\frac{1}{2},k}^n}{\Delta y} \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$H_y \Big|_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = D_a \Big|_{i,j,k} \cdot H_y \Big|_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}} + D_b \Big|_{i,j,k} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{E_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - E_z \Big|_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x} \\ - \frac{E_x \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n - E_x \Big|_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$H_z \Big|_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = D_a \Big|_{i,j,k} \cdot H_z \Big|_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}} + D_b \Big|_{i,j,k} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{E_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n - E_x \Big|_{i,j-\frac{1}{2},k}^n}{\Delta y} \\ - \frac{E_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - E_y \Big|_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x} \end{array} \right\} \quad (5)$$

$$E_x \Big|_{i,j,k}^{n+1} = C_a \Big|_{i,j,k} \cdot E_x \Big|_{i,j,k}^n + C_b \Big|_{i,j,k} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{H_z \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \\ - \frac{H_y \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \end{array} \right\} \quad (6)$$

$$E_y \Big|_{i,j,k}^{n+1} = C_a \Big|_{i,j,k} \cdot E_y \Big|_{i,j,k}^n + C_b \Big|_{i,j,k} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{H_x \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x \Big|_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \\ - \frac{H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$E_z \Big|_{i,j,k}^{n+1} = C_a \Big|_{i,j,k} \cdot E_z \Big|_{i,j,k}^n + C_b \Big|_{i,j,k} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \\ - \frac{H_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_x \Big|_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \end{array} \right\} \quad (8)$$

حيث إن:

$$D_a \Big|_{i,j,k} = \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{\rho_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2\mu_{i,j,k}} \\ 1 + \frac{\rho_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2\mu_{i,j,k}} \end{array} \right\}, \quad D_b \Big|_{i,j,k} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}} \\ 1 + \frac{\rho_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2\mu_{i,j,k}} \end{array} \right\} \quad (9)$$

$$C_a |_{i,j,k} = \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}} \\ 1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}} \end{array} \right\}, \quad C_b |_{i,j,k} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}} \\ 1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}} \end{array} \right\} \quad (10)$$

حيث إن σ هي الناقلية النوعية للمادة، ε هي السماحية الكهربائية للمادة، μ هي النفوذية المغناطيسية للمادة، ρ هي المقاومة المغناطيسية للمادة.

تُعطى القيمة الأعظمية للخطوة الزمنية التي تضمن حالة الاستقرار في عمليات الحساب بالعلاقة التالية [2]:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{-1/2} \quad (11)$$

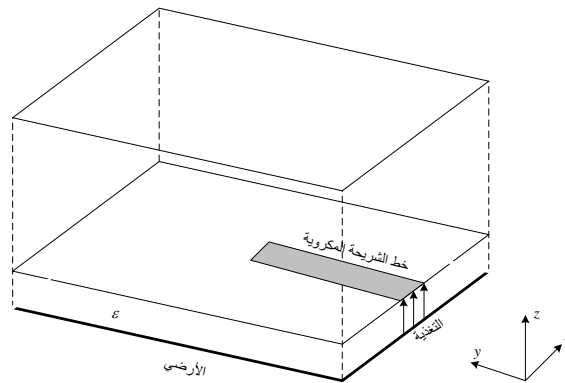
حيث إن c هي سرعة الضوء في الفضاء الحر.

يمكن وصف جزء من الحيز المدروس بالشكل (6) حيث يُظهر الشكل أن التغذية تتم بين الأرضي وخط الشريحة المكروية (Microstrip line)، وذلك بإعطاء قيم لمركبة الحقل E_z تساوي التابع النبضي الغاوسي كونه له نفس الشكل في المجالين الزمني والترددي ويعطي حزمة ترددية مناسبة تتناسب عكساً مع عرض النبضة في مجال الزمن بالإضافة إلى أن معالجتها باستخدام FDTD سهل، كما في المعادلة الآتية:

$$E_z = f(t) = e^{-(t-t_0)^2/T^2} \quad (12)$$

حيث إن T هي عرض نبضة غاوس، t_0 هي زمن بدء النبضة.

تظهر مشكلة حساب الحقل عند حدود الحجم المدروس لأن حساب الحقل عندها يحتاج إلى قيمة الحقل خارج تلك الحدود، لذلك تم استخدام طريقة طبقات الملائمة التامة (PML) "Perfectly Matched Layers" التي تعتمد على زيادة الناقلية النوعية للطبقات الخارجية، مما يسمح باستخدام الطبقة الأخيرة كناقل مثالي دون حدوث أية انعكاسات إلى الطبقات الداخلية [3].



الشكل (6) منطقة حساب الحقل.

النتائج والمناقشة:

- النتائج الحسابية البرمجية:

إذاً يمكن تحقيق عملية الربط بين دليل الموجة وخط النقل الشرائحي بوساطة هوائي شبه ياغي مصنوع من الشرائح الميكروية، والحصول على أداء جيد لمنظومة الربط هذه. تم دراسة نموذج دائرة الربط بالاعتماد على البرامج التحليلية لطريقة FDTD باستخدام بيئة "Matlab" ويفرض أن السماحية الكهربائية النسبية للشريحة هي على التوالي $\epsilon_r = 10.2$ و $\epsilon_r = 9.9$ وسماكتها $h = 0.635$ mm ثم وضع الهوائي المطبوع في منتصف دليل الموجة عند $H = 0.635$ mm كما هو مبين في الشكل (2)، وأبعاد دائرة الربط المطبوعة على الشكل التالي:

$$W_1 = W_3 = W_4 = W_5 = W_{dri} = W_{dir} = 0.6 \text{ mm}$$

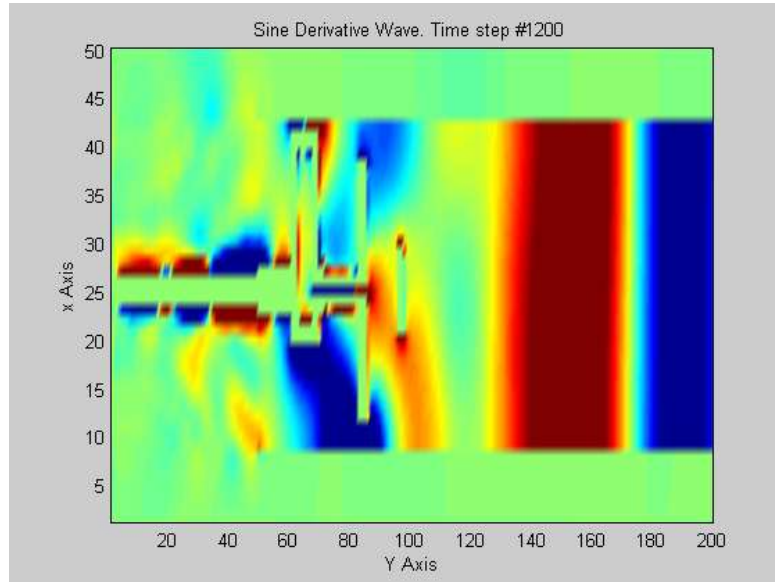
$$W_2 = 1.2 \text{ mm}, W_6 = s_5 = s_6 = 0.3 \text{ mm}$$

$$L_1 = 3.3 \text{ mm}, L_2 = 1.5 \text{ mm}, L_3 = 4.5 \text{ mm}, L_4 = 1.9 \text{ mm}, L_5 = 0.9, s_{ref} = 3.75 \text{ mm}$$

$$s_{dir} = 3.3 \text{ mm}, s_{sub} = 1.5 \text{ mm}, L_{dri} = 8.1 \text{ mm}, L_{dir} = 3.1 \text{ mm}$$

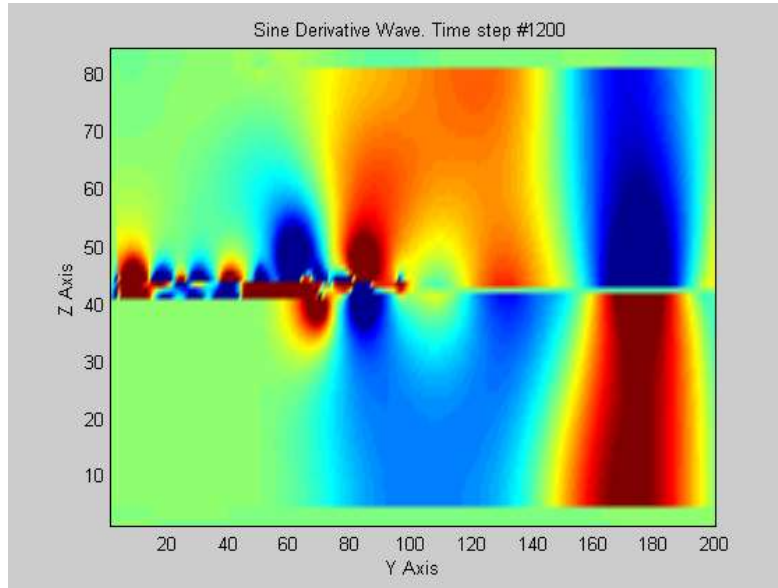
بالاعتماد على الأبعاد السابقة تم اختيار الخطوة المكانية $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.3$ mm والخطوة الزمنية $\Delta t = 0.4 \times 10^{-12}$ sec وعرض نبضة غاوس $T = 15 \times 10^{-12}$ sec وزمن الانزياح أو البدء $t_0 = 30 \times 10^{-12}$ sec

أجريت الحسابات على حاسوب شخصي "PC" بمعالج "Pentium 4" وسرعة "3GHz"، واستغرقت عملية الحساب 23 ساعة، تم خلالها حساب مركبات الحقل الكهرومغناطيسي داخل دليل الموجة وفي الشريحة الميكروية، حيث يبين الشكل (7) مركبة الحقل الكهربائي E_x في مستوي الذي تتوضع فيه دائرة الربط "xy-plane" إذا كانت السماحية الكهربائية النسبية $\epsilon_r = 10.2$ ، حيث يدل تغير اللون بين الغامق والفاتح على تغير جهة الحقل وشدة اللون تدل على قيمة مطال الحقل.



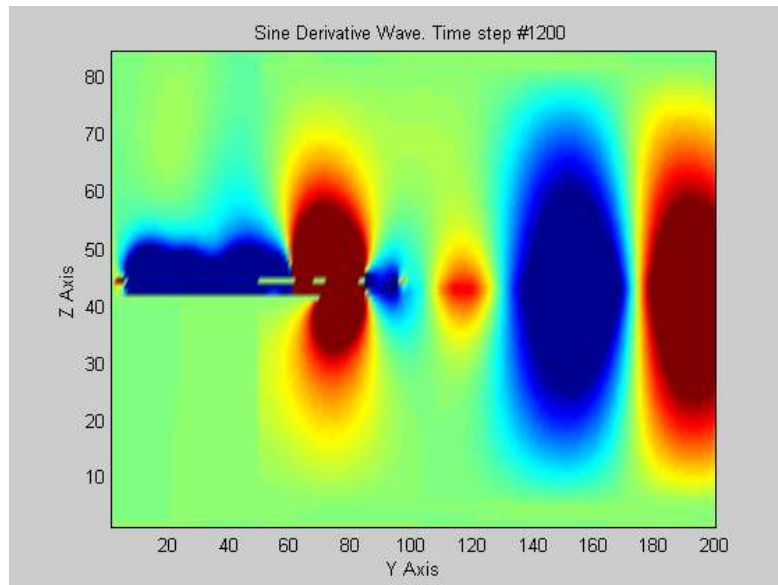
الشكل (7) توزيع مركبة الحقل E_x في مستوي الهوائي xy-plane.

يبين الشكل (8) توزيع مركبة الحقل H_y في المستوي العمودي على الهوائي في zy -plane عند الزمن $1200\Delta t$ ، ويظهر فيه أن شدة الحقل للمركبة H_y تكون موزعة على جوانب دليل الموجة، وهذا هو الحال بالنسبة للنمط الرئيس TE_{10} .



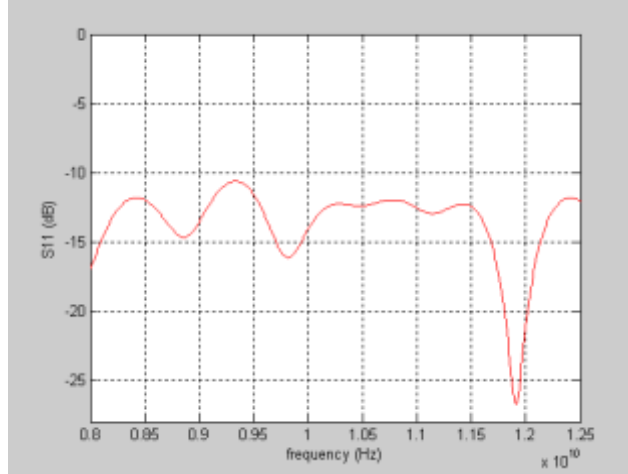
الشكل (8) توزيع مركبة الحقل H_y في المستوي zy -plane.

أما مركبة الحقل H_z في المستوي zy -plane فهي مبينة في الشكل (9).



الشكل (9) توزيع مركبة الحقل H_z في المستوي zy -plane.

ثم تم حساب عامل الانعكاس للدائرة في حال كانت السماحية الكهربائية النسبية للشريحة $\epsilon_r = 10.2$ [4]، بإهمال عامل الضياع لكل من المادة الناقلة والمادة العازلة، كما هو مبين في الشكل (10) ويلاحظ أن عامل الانعكاس لا يزيد عن -10 dB على كامل المجال المدروس $(8-12.5)\text{GHz}$.

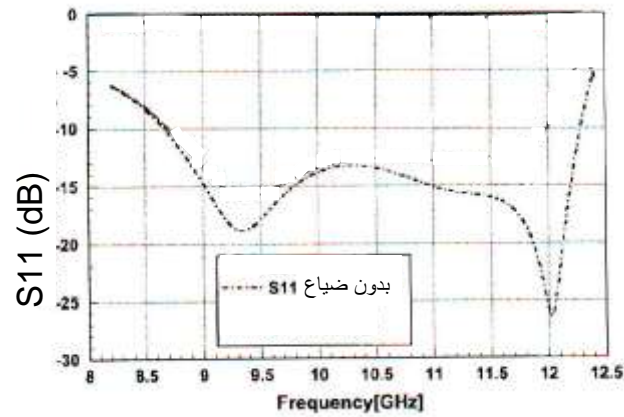


الشكل (10) عامل الانعكاس لدائرة الربط عندما $\epsilon_r = 10.2$ باستخدام طريقة FDTD.

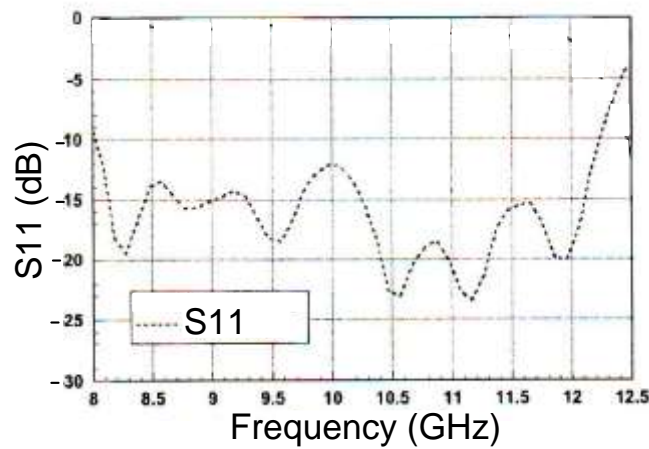
يبين كل من الشكلين (11-12) عامل الانعكاس للدائرة محسباً ببرنامج High Frequency structure simulator (HFSS) ومقاساً بشكل عملي، على التوالي [1]، حيث يُلاحظ أن عامل الانعكاس المحسوب بطريقة HFSS له قيمة أكبر من -10 dB على مجال يبلغ حوالي 35% من المجال الترددي الكلي بينما في القياس التجريبي العملي لا تزيد قيمته عن -10 dB سوى على مجال مقداره حوالي 10% من المجال الترددي الكلي، وبمقارنة ذلك مع نتائج طريقة FDTD المذكورة أعلاه يظهر مدى دقة هذه الطريقة بالمقارنة مع النتائج العملية.

يظهر في طريقة FDTD وبرنامج HFSS أن عامل الانعكاس يبلغ أصغر قيمة له (-27 dB) عند التردد حوالي 12 GHz ، ولكن في طريقة FDTD يكون التردد الذي يبلغ عنده عامل الانعكاس هذه القيمة هو 11.9 GHz وهي القيمة التجريبية نفسها، بينما باستخدام HFSS قيمة التردد الذي يبلغ عنده عامل الانعكاس القيمة (-27 dB) هي 12.03 GHz ، أي أن الحساب بطريقة FDTD أكثر دقة منه ببرنامج HFSS.

بمقارنة الأشكال الثلاثة (10-11-12) يتبين أن منحنى عامل الانعكاس في طريقة FDTD أكثر ملاحظة وملائمة للمنحنى التجريبي من المنحنى المستنتج باستخدام HFSS وذلك كون طريقة FDTD تأخذ ضمناً ضياعات المواد المستخدمة في التصميم بعين الاعتبار.

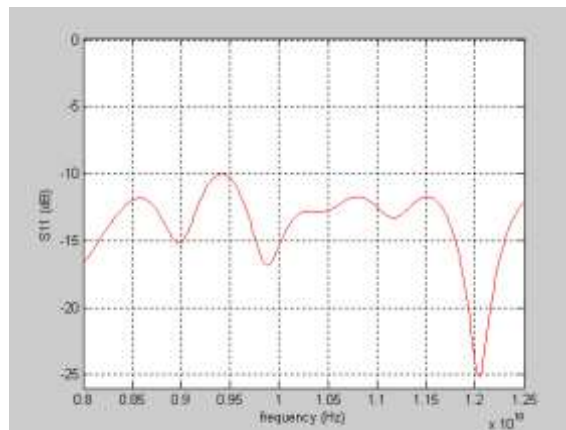


الشكل (11) عامل الانعكاس لدارة الربط عندما $\epsilon_r = 10.2$ باستخدام برنامج HFSS.

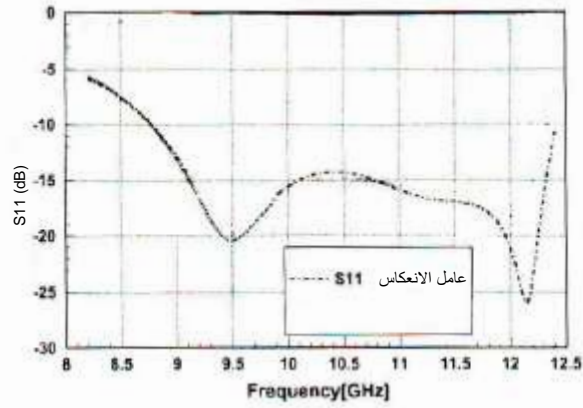


الشكل (12) عامل الانعكاس المقاس لدارة الربط عندما $\epsilon_r = 10.2$.

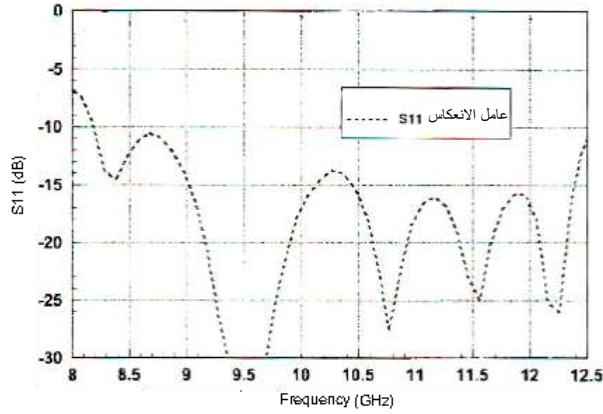
للتأكيد على صحة النتائج السابقة أعيدت الحسابات على شريحة ميكروية لها سماحية كهربائية نسبية $\epsilon_r = 9.9$ ، فكانت النتائج كما هو مبين في الشكل (13)، وبالمقارنة مع نتائج HFSS المبينة في الشكل (14) والنتائج العملية المبينة في الشكل (15) [1]، يمكن تدعيم النتائج السابقة واعتمادها نتائج صحيحة ودقيقة.



الشكل (13) عامل الانعكاس للمادة الأولى $\epsilon_r = 9.9$ بإهمال ضياعات المادة الناقلة والعازلة.



الشكل (14) عامل الانعكاس لدائرة الربط عندما $\epsilon_r = 9.9$ باستخدام طريقة HFSS.



الشكل (15) عامل الانعكاس المقاس لدائرة الربط عندما $\epsilon_r = 9.9$.

- نتائج القياسات العملية:

تم تصنيع دائرة الهوائي باستخدام شريحة ذات سماحية كهربائية $\epsilon_r \cong 2.2$ كما هو مبين في الشكل (14). تمت عملية الربط بين دليل الموجة وخط نقل الشريحة الميكروية، حيث تم وضع الهوائي في المستوي E وفي منتصف دليل الموجة حيث تكون شدة الحقل الكهربائي أعظميه وتم الوصل الكهربائي (التماس) بين جدران دليل الموجة والمستوي الأرضي للشريحة بشكلٍ محكم كما هو مبين في الشكل (17). وقياس عامل الانعكاس S_{11} على المجال الترددي $(8.5 \div 11) GHz$ وبخطوة ترددية $(0.25) GHz$ وتم الحصول على النتائج المبينة في الشكل (18)، يمكن ملاحظة أن عامل الانعكاس ضمن المجال الترددي $(9.25 \div 11) GHz$ يتأرجح حول القيمة $-9 dB$ وبمقارنة هذه النتائج لعامل الانعكاس مع نتائج الحساب باستخدام طريقة FDTD، يُلاحظ أن النتائج التي تم الحصول عليها عملياً وحسابياً متقاربة وإن الاختلافات التي تظهر على الشكل تعود إلى عدم وجود دقة كافية في قيمة السماحية الكهربائية النسبية للشريحة وسماكة المادة العازلة وأبعاد الدائرة المنفذة، نظراً لما تمثله هذه الاختلافات في الأبعاد من تأثير على الاستجابة الترددية عند العمل على الترددات الميكروية.

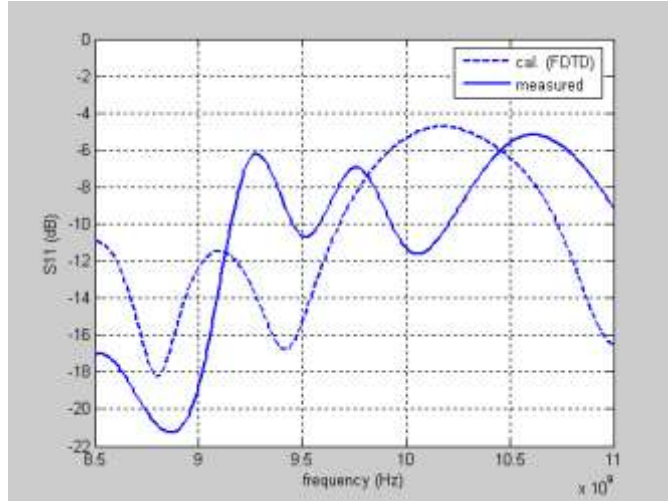


الشكل (16) دائرة الربط مصنوعة على شريحة لها سماحية كهربائية نسبية $\epsilon_r \approx 2.2$.



الشكل (17) دائرة الربط العملية.

بتصميم وتنفيذ دائرة الربط بين دليل الموجة وخط الشرائح الميكروية يمكن الاستفادة من هذه الدارة في مخابر الأمواج الميكروية لإجراء التجارب والأبحاث العملية على الشرائح الميكروية باستخدام مولدات إشارات الترددات العالية المتوفرة في هذا المخبر التي تعمل عادةً على المجال الترددي $(8.5 \div 11) GHz$.



الشكل (18) عامل الانعكاس المقاس والمحسوب بطريقة FDTD لدارة الربط عندما $\epsilon_r = 2.2$

الاستنتاجات والتوصيات:

تم دراسة وتنفيذ دارة ربط بين خطوط الشرائح الميكروية وأدلة الموجة باستخدام شريحة ميكروية لها سماحية كهربائية نسبية (مادة الفيبر) $\epsilon_r \cong 2.2$ باستخدام طريقة FDTD وأظهرت النتائج أن هناك توافقاً كبيراً بين النتائج العملية والنظرية. كما أن نتائج طريقة FDTD التي أجريت على مواد بسماحية كهربائية نسبية 9.9 and 10.2 أظهرت مدى دقة وفعالية هذه الطريقة بالمقارنة مع HFSS المنشورة سابقاً. تعدُّ هذه الطريقة في الربط سهلة واقتصادية بالمقارنة مع طريقة الكوابل المحورية ووصلات الربط بينها وبين دلائل الموجة.

بناءً على ما تقدم نوصي بما يأتي:

1. إجراء الدراسة والتصميم على مواد لها سماحية كهربائية أكبر من سماحيات المواد المدروسة.
2. إجراء الدراسة على الأنماط الهجينة.
3. دراسة إمكانية استخدام هوائي لغارتمى دوري مطبوع بدلاً من هوائي ياغي _ يودا.
4. إجراء المقارنة مع طرائق أخرى تأخذ بعين الاعتبار عامل الضياع في العازل والناقل.

المراجع:

1. KANEAD, N. *A Broad-Band Microstrip-To-Waveguide Transition using Quasi-Yagi antenna*, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.47, NO. 12, 1999, 2562-2567.
2. YEE K, S. *Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media*, IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-14, 1966, 302-307.
3. BERENGER, J. P. *Perfectly matched layer for the FDTD solution of wave-structure interaction problems*, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 44, 1996, 110-117.
4. ODAI, A. "Analysis of microstrip to wave guide transition using FDTD".1st International Engineering Sciences Conference IESC'08, 2008, 51-60