

تصميم هوائي شريطي دائري محمل بحلقة معدنية

رائد مسلم شعبان * زكي عبد الله احمد** وائل عبد اللطيف**

*جامعة البصرة- مركز أبحاث البوليمر - قسم علوم المواد

** جامعة البصرة - كلية العلوم- قسم الفيزياء

الملخص

تضمن البحث دراسة نظرية لتصميم هوائي شريطي دائري محمل بحلقة معدنية (CLAR) وحساب الهياكل الإشعاعية من خلال حل المعادلات التكاملية للمجال الكهربائي (EFIE) والمجال المغناطيسي (MFIE) حيث تم تحليل هذه المعادلات باستخدام طريقة العزوم (MoM) على اعتبار الهوائي متناظر حول المحور (Z). ولإيجاد التيارات السطحية (الكهربائية \vec{J}_s على سطح الموصل والكهربائية والمغناطيسية \vec{M}_s على السطح العازل) المسؤولة عن توليد المجالات الإشعاعية في الفضاء وللمركبتين (E_θ, E_ϕ) تم تمثيل التيارات السطحية بمجموعة من الدوال الأساسية والتي تعطي شكل متسلسلة فوريير لامتلاك الجسم صفة التماثل التداويري ومن ثم اختيار مجموعة من الدوال الوزنية لإيجاد النظام الخطي عن طريق استخدام طريقة كالركن التي تشترط أن تكون الدوال الوزنية مساوية للمرافق العقدي للتيار $(W = J^*)$.

Design of a Circular Disc Microstrip Antenna Loaded By Annular Ring

Raed M. AL-Saymaree*

Zeki A. Ahmed**

Wa'il A. Godaymi**

*Department of Material Science-Polymer Research Center-University of Basrah.

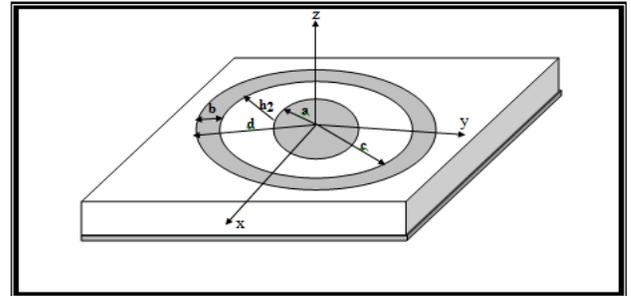
** Department Physics- College of Science-University of Basrah.

Abstract

The research contained in this thesis is a theoretical study of antenna design and calculation of the radiation fields using electric fields integral equation (EFIE) and magnetic field integral equation (MFIE). These equation have been converted, using the method of moments formulation of electromagnetic radiation in this these based on the bodies of revolution (BoR), which are generated by revolution a planar curve about an axis called axis of symmetry. To find an unknown electric current density on the surface of the conductor, and both unknowns electric and magnetic density current on the surface of the dielectric which are responsible for the generation of radiation fields in the space for the components (E_θ, E_ϕ) , the surface currents was represented by a set of basis functions that give the Fourier series because the body has a circular symmetry property and then select a set of weighted functions to find a linear system by using Galerkin method which requires that the weighted functions are equal to the complex conjugate of the current $(W = J^*)$.

المقدمة

الهوائيات بصورة عامة ذات أهمية كبيرة في مجال الاتصالات فمن خلالها يتم إرسال الموجات الكهرومغناطيسية من خط النقل إلى الفضاء الخارجي أو استلام تلك الموجات من الفضاء إلى خط النقل، ويعد الهوائي الشريطي (MSA) من أكثر أنواع الهوائيات انتشاراً ويتكون هذا النوع من الهوائيات من مشع (Patch) مثبت على جانب من شريحة عازلة كهربائياً (Dielectric Substrate) ويثبت على الجانب الآخر من هذه الشريحة قاعدة الهوائي (Ground Plane)⁽¹⁾، وتثار هذه الهوائيات بخط نقل محوري (Coaxial Line) أو خط نقل شريطي (Microstrip Line) عندما يتم تصميم الهوائيات ضمن مدى من الترددات تتراوح بين (0.1-50) GHz⁽²⁾. على الرغم من الاستخدام الواسع للهوائيات الشريطية إلا أنها تعاني من نقاط ضعف عدة كضيق عرض الحزمة وقلة التحصيل لصغر حجم الهوائي⁽³⁾ ولتحسين معاملات الهوائي سوف نعمل على تغيير شكل المشع للهوائي الشريطي الدائري من خلال إضافة حلقة معدنية موصلة تثار عن طريق الحث من خلال المشع الدائري الذي يغذى بثنائي قطب كهربائي كما مبين بالشكل (1).



الشكل (1) هوائي شريطي حلقي محمل بحلقة معدنية

حيث إن (d) يمثل نصف القطر الخارجي للحلقة بينما (c) يمثل نصف القطر الداخلي للحلقة و (b) سمك الحلقة وكما أن (h2) يمثل المسافة الفاصلة بين الحلقة والقرص و (a) تمثل نصف قطر القرص.

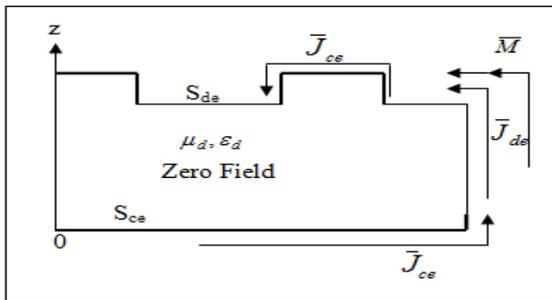
النظرية

استندت الدراسة النظرية لتحليل الإشعاع الصادر من الهوائي الشريطي الدائري المحمل بحلقة معدنية (CLAR) إلى طريقة العزوم وبالاستفادة من طريقة كالركن التي تفرض دوال وزنية مساوية للمرافق العقدي للدوال الأساسية (4)، كما تم استخدام مبدأ التكافؤ الذي يشير إلى استبدال مصادر المجال الكهرومغناطيسي بمصادر مكافئة إذ أن المصادر الكهرومغناطيسية المحتواة ضمن الحجم V والمحاط بالسطح S يمكن استبدالها بكثافة التيار السطحية (5) والتي توضح بالعلاقتين:-

$$\vec{J}_s = \hat{n} \times \vec{H}_s \quad \dots\dots(1)$$

$$\vec{M}_s = -\hat{n} \times \vec{E}_s \quad \dots\dots(2)$$

بتطبيق مبدأ التكافؤ على الهوائي الشريطي الدائري المحمل بحلقة معدنية يمكن تمثيل الهوائي بمنطقة التكافؤ الخارجية (Ve) التي تشمل السطحين S_{ce} (السطح الفاصل بين الموصل والفضاء الخارجي) و S_{de} (السطح الفاصل بين العازل والفضاء الخارجي) والموضحة في الشكل (2)، ومنطقة التكافؤ الداخلية (Vd) التي تتكون من السطحين S_{cd} (السطح الفاصل بين الموصل والعازل) و S_{de} والمبينة في الشكل (3).



شكل (2) التكافؤ الخارجي

حيث $\bar{E}^a(\bar{J}, \bar{M})$ و $\bar{H}^a(\bar{J}, \bar{M})$ يمثلان المجالين الكهربائي والمغناطيسي على التوالي المتولدين نتيجة التيار الكهربائي المحتث \bar{J} والتيار المغناطيسي المحتث \bar{M} والتي بدورها تشع في المنطقة الموصوفة بالمعاملات (μ_a, ϵ_a) ، والرمز a يشير إلى منطقة التكافؤ e أو d ، بينما $\bar{E}^d(\bar{J}^{id}, 0)$ ، $\bar{H}^d(\bar{J}^{id}, 0)$ يمثلان المجالين الكهربائي والمغناطيسي والناجمين من كثافة تيار المغذي (\bar{J}^{id}). يمكن التعبير عن التيارات المجهولة على السطوح المختلفة للهوائي بمجموعة من الدوال الأختبارية وباستخدام متسلسلة فورير والدوال المثلثية (8) لتقريب كثافة التيار على السطح S بالصيغة التالية:-

$$(\bar{J}_{ce} + \bar{J}_{de}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{l=1}^{2(N-N_e-7)} I_{ni}^{le} \bar{J}_{ni}^{le} + \sum_{l=1}^{2(N_e-3)} I_{ni}^{le} \bar{J}_{ni}^{2e} \right] \quad \dots (6-a)$$

$$(\bar{J}_{cd} + \bar{J}_{de}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{l=1}^{2(N-N_e-7)} I_{ni}^{ld} \bar{J}_{ni}^{ld} + \sum_{l=1}^{2(N_e-3)} I_{ni}^{ld} \bar{J}_{ni}^{2d} \right] \quad \dots (6-b)$$

$$\bar{M} = \eta_e \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{l=1}^{2(N_e-3)} K_{ni} \bar{M}_{ni} \quad \dots (6-c)$$

وبتعويض المعادلات (6) في المعادلات (5) نحصل على :-

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{l=1}^{2(N-N_e-7)} I_{ni}^{le} \bar{E}_{tan}^{le}(\bar{J}_{ni}^{le}, 0) + \sum_{l=1}^{2(N_e-3)} I_{ni}^{le} \bar{E}_{tan}^{le}(\bar{J}_{ni}^{2e}, 0) + \eta_e \sum_{l=1}^{2(N_e-3)} K_{ni} \bar{E}_{tan}^{le}(0, \bar{M}_{ni}) \right] = 0 \quad \text{, on } S_{ce} \quad \dots (7-a)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{l=1}^{2(N-N_e-7)} I_{ni}^{ld} \bar{E}_{tan}^{ld}(\bar{J}_{ni}^{ld}, 0) + \sum_{l=1}^{2(N_e-3)} I_{ni}^{ld} \bar{E}_{tan}^{ld}(\bar{J}_{ni}^{2d}, 0) + \eta_e \sum_{l=1}^{2(N_e-3)} K_{ni} \bar{E}_{tan}^{ld}(0, \bar{M}_{ni}) \right] = \bar{E}_{tan}^{de}(\bar{J}^{id}) \quad \text{, on } S_{cd} \quad \dots (7-b)$$

$$\eta_e \sum_{l=1}^{2(N_e-3)} \left[K_{ni} \bar{E}_{tan}^{le}(0, \bar{M}_{ni}) + K_{ni} \bar{E}_{tan}^{ld}(0, \bar{M}_{ni}) \right] = \bar{E}_{tan}^{de}(\bar{J}^{id}) \quad \text{, on } S_{de} \quad \dots (7-c)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{l=1}^{2(N-N_e-7)} \left\{ I_{ni}^{le} \bar{H}_{tan}^{le}(\bar{J}_{ni}^{le}, 0) + I_{ni}^{ld} \bar{H}_{tan}^{ld}(\bar{J}_{ni}^{ld}, 0) \right\} + \sum_{l=1}^{2(N_e-3)} \left\{ I_{ni}^{le} \bar{H}_{tan}^{le}(\bar{J}_{ni}^{2e}, 0) + I_{ni}^{ld} \bar{H}_{tan}^{ld}(\bar{J}_{ni}^{2d}, 0) \right\} \right] + \eta_e \sum_{l=1}^{2(N_e-3)} \left[K_{ni} \bar{H}_{tan}^{le}(0, \bar{M}_{ni}) + K_{ni} \bar{H}_{tan}^{ld}(0, \bar{M}_{ni}) \right] = \bar{H}_{tan}^{de}(\bar{J}^{id}) \quad \text{, on } S_{de} \quad \dots (7-d)$$

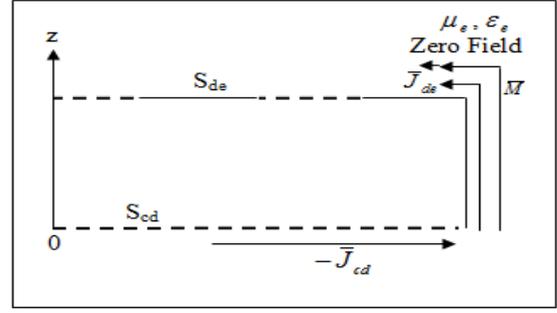
وفي دراستنا الحالية استخدمنا طريقة كالركن وفي هذه الطريقة تكون الدوال الوزنية مساوية للمرافق العقدي للدوال الأساسية للتيار ($W = J^*$).

$$\bar{W}(\bar{r}) = \bar{W}^i(t, \phi) + \bar{W}^o(t, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{l=1}^{N-10} \left[\bar{W}_{ni}^{le}(t, \phi) + \bar{W}_{ni}^{ld}(t, \phi) \right] \quad \dots (8-a)$$

$$\bar{W}_{ni}^{le}(t, \phi) = \hat{u}_i f_i(t) e^{-jm\phi} \quad \dots (8-b)$$

$$\bar{W}_{ni}^{ld}(t, \phi) = \hat{u}_o f_i(t) e^{-jm\phi} \quad \dots (8-d)$$

وباستخدام الضرب العددي للدوال الوزنية مع المعادلات (7) نحصل على المصفوفة التالية:-



شكل (3) التكافؤ الداخلي

أن الهوائي الشريطي يتكون من مواد موصلة وعازلة وبالتالي فإنها تحتوي على نوعين من شروط المسألة على كل من العازل والموصل (6)، وهذه الشروط تفرض تلاشي مركبات المجال الكهربائي المماسية للسطح الموصل، بينما تكون المجالات المغناطيسية والكهربائية مستمرة عند سطح العازل (7) ويمكن وصفها كالتالي :-

$$\hat{n} \times \bar{E}^e = 0 \quad \text{on } S_{ce} \dots (3-a)$$

$$\hat{n} \times \bar{E}^d = 0 \quad \text{on } S_{cd} \dots (3-b)$$

$$\hat{n} \times \bar{E}^d = \hat{n} \times \bar{E}^e \quad \text{on } S_{de} \dots (3-c)$$

$$\hat{n} \times \bar{H}^d = \hat{n} \times \bar{H}^e \quad \text{on } S_{de} \dots (3-d)$$

وحسب مبدأ التكافؤ الخارجي والداخلي نجد كثافة التيارات كما يلي :-

$$\bar{J}_{ce} = \hat{n} \times \bar{H}^e \quad \text{on } S_{ce} \dots (4-a)$$

$$\bar{J}_{cd} = \hat{n} \times \bar{H}^d \quad \text{on } S_{cd} \dots (4-b)$$

$$\bar{J}_{de} = \hat{n} \times \bar{H}^e \quad \text{on } S_{de} \dots (4-c)$$

$$\bar{M} = -\hat{n} \times \bar{E}^e \quad \text{on } S_{de} \dots (4-d)$$

إن التيار الكهربائي \bar{J} يتولد على السطحين الموصل والعازل في حين يتولد التيار المغناطيسي على السطح العازل فقط ، وعليه فعند تطبيق مبدأ التكافؤ على منطقتي التكافؤ الخارجية والداخلية للمسألة يمكن كتابة المعادلات التكاملية كما يلي:-

$$\hat{n} \times \bar{E}^e(\bar{J}_{ce} + \bar{J}_{de}, \bar{M}) = 0 \quad \text{on } S_{ce} \text{ and } S_{de} \quad \dots (5-a)$$

$$\hat{n} \times \bar{H}^e(\bar{J}_{ce} + \bar{J}_{de}, \bar{M}) = 0 \quad \dots (5-b)$$

$$\hat{n} \times \bar{E}^e(-\bar{J}_{cd} - \bar{J}_{de}, -\bar{M}) + \hat{n} \times \bar{E}^e(\bar{J}^{id}, 0) = 0 \quad \dots (5-c)$$

$$\hat{n} \times \bar{H}^e(-\bar{J}_{cd} - \bar{J}_{de}, -\bar{M}) + \hat{n} \times \bar{H}^e(\bar{J}^{id}, 0) = 0 \quad \text{on } S_{cd} \text{ and } S_{de} \quad \dots (5-d)$$

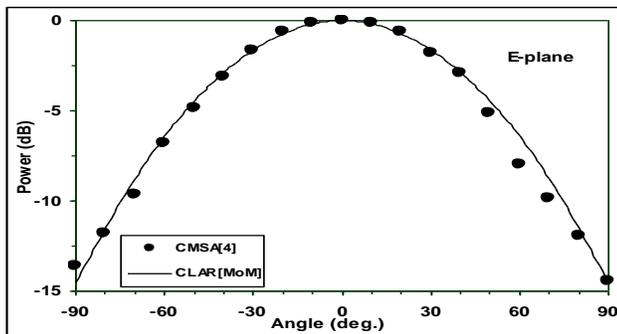
للوهائي :- وبعد التأكد من صحة البرامج المستخدم لبرمجة التحليل الرياضي للوهائي قيد الدراسة ولغرض تحسين معاملات الوهائي قمنا بأخذ قيم مختلفة للنسبة (Rab) التي تمثل النسبة بين نصف قطر القرص الدائري إلى سمك الحلقة المعدنية) ووجدنا بان هناك نسب تحسن من خواص الوهائي وأخرى تقلل من كفاءة الوهائي وذلك لتأثير سمك الحلقة المعدنية المشعة على التداخل بين الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة من الوهائي ، ويوضح الشكل (5) مقارنة الهيكل الإشعاعي لهوائي شريطي دائري محمل بحلقة مشعة (CLAR) للمستوي الأساسي (E-PLANE) عندما ينتشر بداخله النمط TM_{11} لقيم مختلفة من النسبة Rab . ويوضح الجدول (1) مقارنة التحصيل وعرض الحزمة (BW%) للوهائي (CLAR) لقيم مختلفة من (Rab) مع الهوائي الشريطي الدائري (CMSA) والحلقي (ARMSA) لبحوث سابقة (4) وذلك باستخدام العلاقات التجريبية لحساب التحصيل .

$$G(dB) = 10 \text{ Log} \left(\frac{36800}{HP_{H^*} HP_{E^*}} \right) \quad \dots (13)$$

وعلاقة عرض الحزمة :-

$$BW_{\text{Narrowband}} \% = \left(\frac{F_u - F_l}{F_r} \right) * 100\% \quad \dots (14)$$

حيث نلاحظ أن قيمة عرض الحزمة تكون الأفضل للنسبة (Rab=10) وهي (9.3%) مقارنة بكل من الهوائي الشريطي الدائري والحلقي وهي (1.1%) و (0.7%) على التوالي، إما بالنسبة للتحصيل فأن أفضل النسب كانت (Rab=2) وهي (8.28dB) مقارنة بكل من الهوائي الشريطي الدائري والحلقي وهي (6.8%) و (6.1%) على التوالي.



شكل (4) مقارنة الهياكل الإشعاعية للهوائي الشريطي الدائري المحمل بحلقة معدنية و الهوائي الشريطي الدائري عندما ينتشر بداخله النمط TM_{11} .

$$\begin{bmatrix} [Z_{ce,ce}^{1e}]_n & [0]_n & [Z_{ce,de}^{2e}]_n & \eta_e [Y_{ce,de}^{2e}]_n \\ [0]_n & [Z_{cd,cd}^{1d}]_n & [Z_{cd,de}^{2d}]_n & \eta_e [Y_{cd,de}^{2d}]_n \\ [Z_{de,ce}^{1e}]_n & [Z_{de,cd}^{1d}]_n & [Z_{de,de}^{2e} + Z_{de,de}^{2d}]_n & \eta_e [Y_{de,de}^{2e} + Y_{de,de}^{2d}]_n \\ [Y_{de,ce}^{1e}]_n & [Y_{de,cd}^{1d}]_n & [Y_{de,de}^{2e} + Y_{de,de}^{2d}]_n & \eta_e [Z_{de,de}^{2e} + Z_{de,de}^{2d}]_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I^e]_n \\ [I^d]_n \\ [I]_n \\ [K]_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0]_n \\ [V_{cd}^d]_n \\ [V^d]_n \\ [I^d]_n \end{bmatrix} \quad \dots (9)$$

والتي يمكن اختصارها بالشكل التالي :-

$$[\bar{T}_{n_m}][\bar{I}_n] = [\bar{V}_n] \quad \dots (10)$$

ومن خلال المعادلات السابقة يمكن حساب المجالات الإشعاعية في منطقة الإشعاع (المجال البعيد) من خلال المعادلات التالية (9) :-

$$E_\theta = -\frac{jW\mu_\epsilon}{4\pi r_o} e^{-jK_r r_o} F_1(\theta_o, \phi_o) \quad \dots (11-a)$$

$$E_\phi = -\frac{jW\mu_\epsilon}{4\pi r_o} e^{-jK_r r_o} F_2(\theta_o, \phi_o) \quad \dots (11-b)$$

حيث أن $F_1(\theta_o, \phi_o)$ و $F_2(\theta_o, \phi_o)$ هي معاملات القياس والمعرفة كما يلي :-

$$F_1(\theta_o, \phi_o) = \int_{\hat{\phi}} \left[\hat{J}(\hat{r}') \cdot \hat{\theta} + \frac{1}{\eta_e} \hat{M}(\hat{r}') \cdot \hat{\phi} \right] e^{-jK_r \hat{r}' \cdot \hat{r}} ds \quad \dots (12-a)$$

$$F_2(\theta_o, \phi_o) = \int_{\hat{\phi}} \left[\hat{J}(\hat{r}') \cdot \hat{\phi} - \frac{1}{\eta_e} \hat{M}(\hat{r}') \cdot \hat{\theta} \right] e^{-jK_r \hat{r}' \cdot \hat{r}} ds \quad \dots (12-b)$$

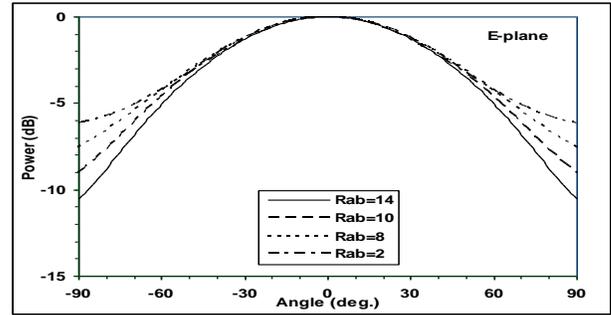
حيث أن $\hat{\phi}_o$ و $\hat{\theta}_o$ و \hat{r}_o هي وحدات المتجه الخاصة بنقطة المجال البعيد.

النتائج والمناقشة

يوضح الشكل (4) مقارنة الهيكل الإشعاعي لهوائي شريطي دائري محمل بحلقة مشعة (CLAR) عندما تكون $(h_2 \rightarrow 0)$ و $(b \rightarrow 0)$ مع هوائي شريطي دائري (CMSA) وذلك للتأكد من صحة البرامج المستخدمة لوصف المعادلات التي حصلنا عليها من خلال التحليل الرياضي للوهائي الشريطي الدائري المحمل بحلقة معدنية ، ولغرض مقارنة الهياكل الإشعاعية لهذه الحالة مع نتائج عملية منشورة لباحثين آخرين [4] فقد رسمت الهياكل الإشعاعية عند المستوي الأساسي الكهربائي E-plane للنمط TM_{11} ، إذ يلاحظ تطابقاً بين النتائج التي توصلنا إليها والنتائج العملية المنشورة وذلك لان طريقة العزوم تأخذ بنظر الاعتبار جميع تأثيرات السطوح الداخلية والخارجية

للوهائي قيد الدراسة كان عند النسبة ($R_{ab}=2$) وهي (8.28dB) ، إما عرض الحزمة فكانت النسبة ($R_{ab}=10$) هي الأفضل وهي (9.3%).

($R_g=0.31\lambda$, $f_r=794\text{MHz}$, $R_{g1}=0.01\lambda$, $h=0.0397\lambda$, $a_1=0.0077\lambda$, $a_3=0.0077$, $\epsilon_r=2.32$ $\phi_r=0^\circ$, $\rho_r=0.05\lambda$, $R_{ab}=55$)



الشكل (٥): تأثير قيم مختلفة من (R_{ab}) على الهيكل الإشعاعي للوهائي (CLAR) عندما ينتشر بداخله النمط TM_{11} .

($R_g=0.31\lambda$, $f_r=374\text{MHz}$, $R_{g1}=0.01\lambda$, $h=0.0397\lambda$, $a_1=0.0077\lambda$, $a_3=0.0077$, $\epsilon_r=2.32$ $\phi_r=0^\circ$, $\rho_r=0.05\lambda$)

جدول (1) مقارنة الهوائي (CLAR) مع الهوائيين (CMSA) و (ARMSA) للحصول وعرض الحزمة لقيم مختلفة من (h_2).

Antenna Type	HP_H° (deg)	HP_E° (deg)	Directive gain (dB)	BW% S=1.25
CMSA[4]	80	100	6.8	1.1
ARMSA[4]	81	103	6.1	0.7
CLAR ($R_{ab}=14$)	90	92	6.4	1.69
CLAR ($R_{ab}=10$)	80	96	6.8	9.3
CLAR ($R_{ab}=8$)	68	98	7.4	6.1
CLAR ($R_{ab}=2$)	58	92	8.28	3.84

الاستنتاجات

طريقة العزوم التي تعدّ من أفضل الطرائق العددية لتحليل الهوائي الشريطي الدائري المحمل بحلقة معدنية لإعطائها نتائج دقيقة وكان ذلك واضحاً من خلال التقارب بين الهيكل الإشعاعي للوهائي قيد الدراسة مع نتائج عملية لباحثين سابقين لأنها تأخذ تأثير جميع الشروط الحدودية الخاصة بجسم الهوائي ، ومن نتائج الهياكل الإشعاعية للوهائي الشريطي الدائري المحمل بحلقة معدنية نجد أن النسبة بين نصف قطر القرص الدائري إلى سمك الحلقة المشعة (R_{ab}) لها تأثير كبير على الهيكل الإشعاعي من خلال تأثيرها على التداخل بين الموجات الكهرومغناطيسية المشعة والمستلمة ، حيث نلاحظ أن أفضل تحصيل

المصادر

References

1. Bahl, I . J . and Bahartia, P., "*Microstrip antennas*", Artech House, Inc., 1980.
2. Deschamps, G.A., "Microstrip Microwave antennas", presented at the 3rd USAF Symposium on Antennas, 1953.
3. Howell, J.Q., "Microstrip antennas", IEEE AP-S Int. Symp. Digest, 1972, pp.177-180.
4. James, J. R. and Hall, P. S., "Handbook of microstrip antennas", Peter Peregrines, London, U. K., 1989.
5. Harrington, R . F , " Field computation by moment methods ", Macmillan, New York, 1993.
6. Timothy, E . D, and Christos G. C., " Integral equation analysis of dielectric and conducting bodies of revolution in the presence of arbitrary surfaces" IEEE Transaction on Antennas and propagation , Vol. 43. No. 7, pp.674-680, 1995.
7. Resende, U. C., Moreira, F. J. S., " Efficient evaluation of singular integrals in moment methods applied to solve scattering problems from bodies of revolution", IEEE , 2006 .
8. Jian B. , Daoxiang W. , and Kai N.Y. , " Radiation and scattering from bi-isotropic bodies of revolution " , IEEE 2007 .
9. Resende, U. C., Moreira, F. J. S., " Efficient evaluation of singular integrals in moment methods applied to solve scattering problems from bodies of revolution", IEEE , 2006 .