تصميم وتحليل هوائي رقعي وحيد القطب متعدد المجالات الترددية للأجهزة المتنقلة بعربات

الدكتور شحادة سليمان الموسى[1]

الملخص

تستعرض هذه المقالة تصميم وتحليل هوائي رقعي وحيد القطب مسطح ومدمج. يقترح تركيبه على العربات ويناسب الاتصالات المتنقلة. باستخدام هذا الشكل غير المألوف أمكن الحصول على هوائي يعمل على مجالات ترددية متعددة وبتغذية واحدة مشتركة. باستعمال هوائي على شكل دائرة مثنية قطرها يساوي ربع طول موجة أدنى تردد عامل في المجال الأول، وبقطع حافات الهوائي يمكن الحصول على هوائي متعدد المجالات الترددية. تم استخدام البرنامج الكهرومغناطيسي HFSS لتصميم ومعايرة الشكل النهائي للهوائي الذي يغطي الهوائي الناتج المجالين الترددين العريضين الآتيين:

(800 – 1100) MHz & (1700 – 2200) MHz

وهما يشملان المجالات الترددية القياسية للاتصالات المتنقلة GSM و أنظمة الاتصالات الرقمية DCS و أنظمة الاتصالات الشخصية PCS و أنظمة الاتصالات المتنقلة العامة UMTS. ويؤمن نسبة أمواج مستقرة أقل من 2 (SWR < 2) لجميع المجالات. وتتطابقت نتائج القياسات المخبرية بشكل جيد مع نتائج النمذجة.

الكلمات المفتاحية: الهوائيات (المسطحة – الشريطية – الهوائيات – وحيدة القطب)، هوائيات المركبات – هوائيات أنظمة الاتصالات المتنقلة – هوائيات متعددة المجالات – برنامج HFSS.

[1] قسم هندسة الاتصالات والإلكترون– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق.

1 - مقدمة

بعد الانتشار الواسع والضروري للاتصالات المتنقلة في الحياة العملية ولاسيّما في وسائل النقل المختلفة [1]، تم تصميم أنواع متعددة من الهوائيات التي تركب على العربات وبأشكال مختلفة كل منها يؤدي الوظيفة المطلوبة منه ضمن مجال ترددي واحد. بازدياد الطلب على الاتصالات الحديثة أصبح من الضروري تصميم هوائي يركب في العربات ويغطي جميع الترددات المطلوبة في الاتصالات الحديثة سواء لنقل الصوت والصورة أو البيانات أو الربط مع شبكة الانترنت. من الضروري أن يكون الهوائي صغير الحجم مسطحاً قابلاً للتركيب على أي نوع من المركبات بحيث يغطي جميع المجالات الترددية المستخدمة في الاتصالات الأرضية.

الموضوع المطروح للبحث هو تصميم هوائي بكبل تغذية واحد وبأصغر حجم ممكن مسطح قابل للتركيب في وسائل النقل المختلفة ليعمل ضمن المجالات الترددية الآتية المستخدمة في الاتصالات الأرضية المتنقلة وهي:

1) الحلقات اللاسلكية المغلقة وعرض مجالها النسبي 7.5%
WLL: (824 – 890) MHz

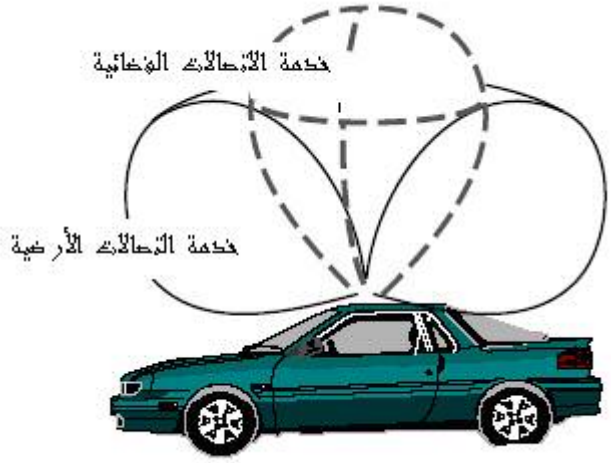
2) أنظمة الاتصالات المتنقلة للمجال 900 وعرض مجالها النسبي 7.6%
GSM 900: (890 – 960) MHz

3) أنظمة الاتصالات الرقمية المتنقلة المجال 1800 وعرض مجالها النسبي 9.5%
DCS (GSM 1800): (1710 – 1880) MHz

4) أنظمة الاتصالات الشخصية وعرض مجالها النسبي 7.5%
PCS: (1850 – 1990) MHz

5) أنظمة الاتصالات المتنقلة العامة وعرض مجالها النسبي 12.2
UMTS: (1920 – 2170) MHz

ونظراً لأنَّ هذه الاتصالات أرضية يجب أن يكون المخطط الإشعاعي للهوائي كما هو موضح بالشكل (1).



الشكل (1) المخطط الإشعاعي المطلوب للاتصالات الأرضية والفضائية

من ملاحظة المجالات الترددية المطلوب أن يعمل عندها الهوائي المقترح تصميمه نجد أنها شبه متراصة وأحياناً متداخلة، ومن ثَمَّ يمكن تجميعها في مجالين عريضين على الشكل الآتي:

1) المجال الأول MHz (1000 – 800) وعرض مجاله النسبي 31.5%

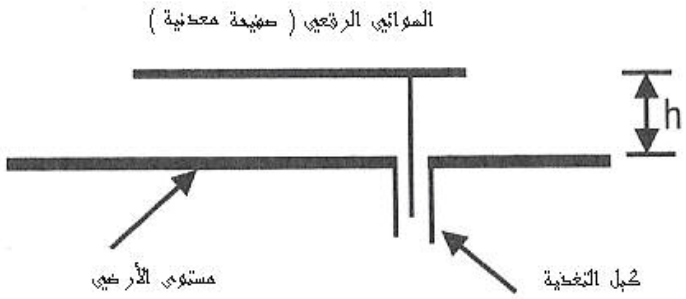
2) المجال الثاني MHz (2200 – 1700) وعرض مجاله النسبي 25.6%

من خلال الإطلاع على ما نشر سابقاً عن الموضوع المطروح والذي يمكن إيجازه على الشكل الآتي:

تستعمل الهوائيات الشريطية (Micro-strip) والرقعية (Patch) الصغيرة في أنظمة الاتصالات المتنقلة [5 , 4 ,3 , 2]. وهي عبارة عن هوائيات مسطحة بطول نصف طول الموجة أو هوائيات مدمجة مقصورة طولها ربع طول الموجة، تركب هذه الهوائيات في الأجهزة المحمولة للعمل في المجالين الترددين 900MHz و 1800MHz لنظام GSM. بعض التصاميم مكونة من هوائيين بتغذية مفصلة (هوائي

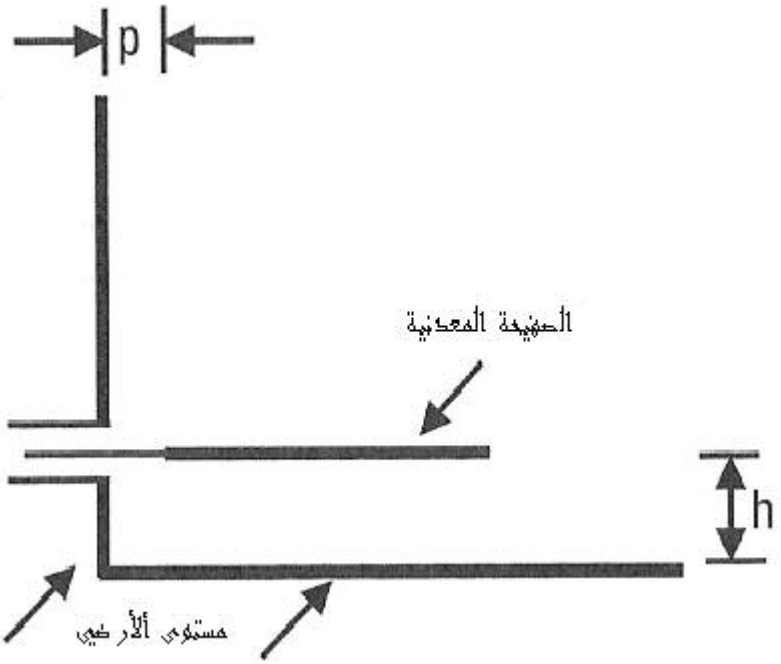
لكل مجال). وبعضها الآخر مكونة من هوائي واحد لمجالين وبخط تغذية واحد. لتأمين التوليف المطلوب يتم استخدام طرائق متعددة منها القصر والتحميل بمكثف وإحداث شق واختيار الشكل المناسب للهوائي على شكل حرف R [6] أو حرف F [7]، ويستخدم الهواء كحامل عازل بسماكة كبيرة لتحقيق عرض المجال المطلوب، أو يستخدم الهوائي الرقعي متعدد الطبقات لتحقيق ذلك [2].

ولزيادة عرض مجال الهوائي الشريطي micro-strip antenna - الذي يعرب أحياناً بالمكروشرائحي- تتمُّ زيادة سماكة الحامل العازل h واستخدام مادة عازلة ذات ثابت عازلية منخفض (أقرب إلى الواحد). يمكن الحصول على عرض مجال من 5% وحتى 10% باستخدام عازل سميك وثابت عازلية منخفض. عند زيادة h تقل كفاءة الهوائي ويزيد مستوى الاستقطاب المتعاكس (المتعامد) cross-polar و يزداد طول مجس الكبل المغذي لسطح المشع المعلق في الهواء كما هو موضح في الشكل (2)، ومن ثَمَّ تزداد تحريضيته الذاتية وتصبح ممانعة دخل الهوائي أكثر تحريضية ويصعب عندها تحقيق التوافق الضروري. مهما اتبع من إجراءات لزيادة عرض المجال للهوائي الشرائحي والرقعي فإنه من الصعب أو المستحيل الحصول على عرض المجال المطلوب مع المحافظة على شكله المسطح (لأنه يتطلب زيادة كبيرة في h أو استعمال عدة طبقات عازلة في الهوائي لزيادة عرض مجاله الترددي).



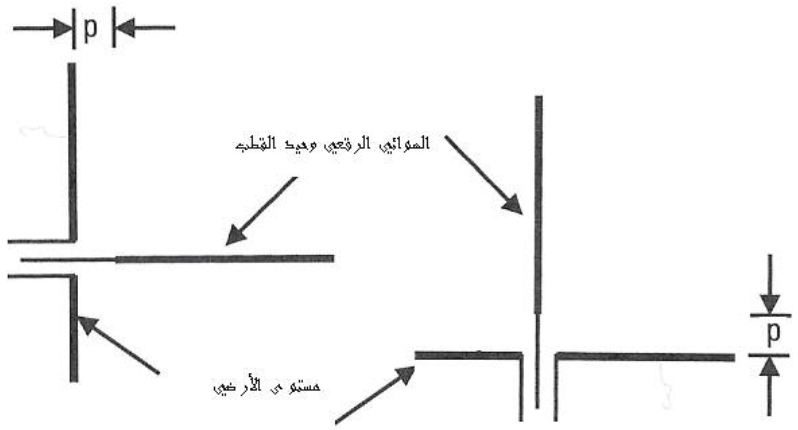
الشكل (2) زيادة h للهوائيات عريضة المجال

للتخلص من أثر تحريضية كبل التغذية تتمُّ تغذية الهوائي من أحد الأطراف وبـــشكل متعامد مع مستوي الأرضي. كما هو موضح بالشكل (3)



الشكل (3) تغذية الهوائي بشكل متعامد مع الأرض

إذا كانت h كبيرة يمكن إهمال أثر الأرض، ومن ثَمَّ يصبح لدينا الهوائي وحيد القطب مسطحاً a planar monopole antenna كما هو مبين بالشكل (4). يتكون الهـــوائي وحيد القطب المعروف (الهوائي الشاقولي) بالأساس من سلك شاقولي رفيع مركـــب فوق مستوى الأرضي. عرض مجال هذا الهوائي كبير ويزداد بزيادة قطره، والهوائي الرقعي وحيد القطب يمكن اعتباره هوائياً اسطوانياً مع قطر فعال كبير.



الشكل (4) الهوائي وحيد القطب مسطحاً

يمثل هذا الهوائي الرقعي هوائياً شريطياً (مع الأرضي) ولكنه ذو حامل عازل سميك جدا وثابت عازليته تساوي الواحد (هواء). ومن ثَمَّ نحصل منه على عرض مجال كبير، حيث تتولد أنماط متعددة عالية في السطح المعدني للهوائي، وهذه الأنماط ذات عرض مجال كبير مما يقلل التغيير في ممانعة دخل الهوائي.

يمكن استخدام أي شكل هندسي لتحقيق هذا الهوائي المماثل لهوائي اسطواني عمودي. والأشكال الهندسية المستخدمة هي المربع والمستطيل والمثلث والمسدس والقطع الناقص والدائرة، أو أي شكل مكون من أجزاء من هذه الأشكال الهندسية. والشكل الدائري يعطي أكبر عرض مجال من الأشكال الأخرى [3].

2 - الهوائي وحيد القطب المسطح

يعتمد عرض مجال الهوائي بشكل أساسي على عرض الهوائي المسطح وقطر مجس التغذية وطوله ونظراً لأنَّ الموصل SMA يستعمل للترددات بدءاً من 1000 MHz لتغذية الهوائي، وهذا الموصل قطره ثابت ويساوي 0.12 cm، ومن ثَمَّ فإن طوله p هو الذي يؤثر في عرض المجال، فعند زيادة طوله بشكل بسيط تزداد ممانعته التحريضية وتنزاح ممانعة دخل الهوائي باتجاه اليسار على مخطط شمث مما يؤدي

إلى زيادة في عرض مجال الهوائي. حتى يكون الهوائي أصغر ما يمكن يجب أولاً حساب أدنى تردد للهوائي وحيد القطب المسطح تتحقق عنده نسبة أمواج مستقرة SWR أقل من 2، وهذا يقابل عامل انعكاس دخل $S_{11} = -10\,dB$ عند مدخل الهوائي المغذى من كبل ممانعته المميزة $Z_0 = 50\ \Omega$.

يحسب هذا التردد بشكل تقريبي بمكافئة مساحة الهوائي الرقعي بمساحة هوائي وحيد القطب أسطواني له الارتفاع نفسهL ونصف قطر مكافئ r، من أجل هوائي مستطيل (W , L) فإن:

$$2\pi\, r\, L = W\, L \quad \text{أي أن:}$$

$$r = \frac{W}{2\pi} \qquad (1)$$

ممانعة الدخل لهوائي وحيد القطب بطول λ/4 تساوي نصف ممانعة هوائي ديبول معزول بطول λ/2، وبالتالي فإن ممانعة الدخل لهذا الهوائي تعطى بالعلاقة:

$$Z_i = 36.5 + j\ 21.25\ \Omega \qquad (2)$$

يمكن جعل ممانعة الدخل حقيقية، إذا تم أخذ طول الهوائي وحيد القطب مساوياً لأقل من ربع طول الموجة أي:

$$L = 0.24\ \lambda\ F \qquad (3)$$

حيث أن:

$$F = \left(L/r\right) \Big/ \left(1 + L/r\right) = \frac{L}{\left(L + r\right)} \qquad (4)$$

وبالتالي فإن طول الموجة يمكن الحصول عليه من العلاقة:

$$\lambda = \frac{L + r}{0.24} \qquad (5)$$

وعليه يحسب أدنى تردد يعمل عليه الهوائي من العلاقة:

$$f_L\,[GHz) = C/\lambda = \frac{7.2}{\left(L + r\right)[cm]} \qquad (6)$$

لم تأخذ هذه المعادلة بالحسبان أثر طول مجس التغذية p الذي يزيد من الطول الفعال للهوائي، ومن ثَمَّ يقلل أدنى تردد يعمل عليه، وتعدل المعادلة السابقة لتصبح من الشكل:

$$f_L\,[GHz) = \frac{7.2}{(L + r + p)\,[cm]} \qquad (7)$$

ونظراً لأنَّ الشكل الدائري يتمتع بعرض مجال ترددي كبير مقارنة مع أي شكل هندسي آخر. بسبب تشكل أنماط عليا مختلفة في هذا الشكل على عكس الأنماط المتشكلة في المستطيل، لأن الأنماط المتولدة في الشكل الدائري تحدد بجذر المشتق الثاني لتابع بيسل [1]. عرض المجال المصاحب للأنماط المختلفة كبير جدا بسبب كون القرص محاطاً بمادة ثابت عازليتها قريب من الواحد (هواء)، وتغير ممانعة الدخل من نمط إلى آخر يبقى صغيراً جداً. تشكل ممانعة الدخل عدة حلقات على مخطط شمث، ولكن تبقى داخل دائرة $SWR = 2$ وهذا يعني أن عرض المجال كبير.

أما حساب أبعاد الهوائي الدائري المكافئ لهوائي أسطواني لهما المساحة نفسها، فيتم بمساواة المساحتين $2\pi r L = \pi a^2$ أي أن:

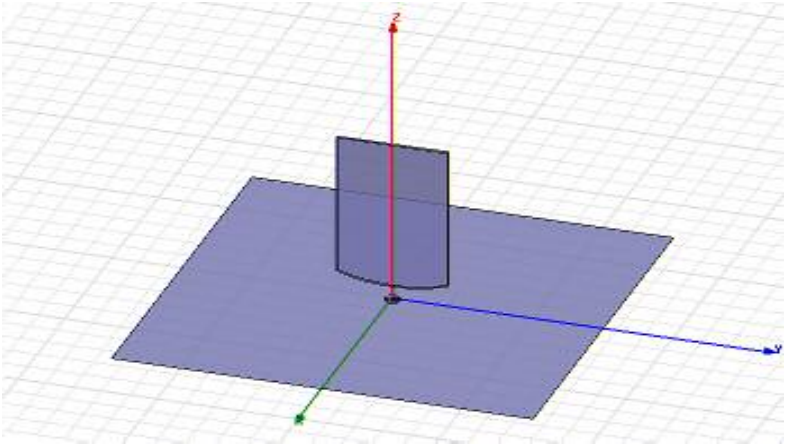
$$L = 2a \quad , \quad r = a/4 \qquad (8)$$

3 – اختيار الشكل العام للهوائي وأبعاده

يبين الشكل (5) الهوائي المختار الذي يجب أن يعمل بدءاً من أدنى تردد مطلوب وهو: 800 MHz. إذْ اختير نصف قطر الجزء الدائري من الهوائي W =5 cm، وعرضه 4 cm. وسماكته تساوي قطر المغذي SMA والبالغ 0.12 cm ، وطول المغذي p = 0.6 cm، بدءاً من السطح العلوي للأرض، فيكون طول الهوائي المطلوب وفقاً للعلاقة (7) هو:

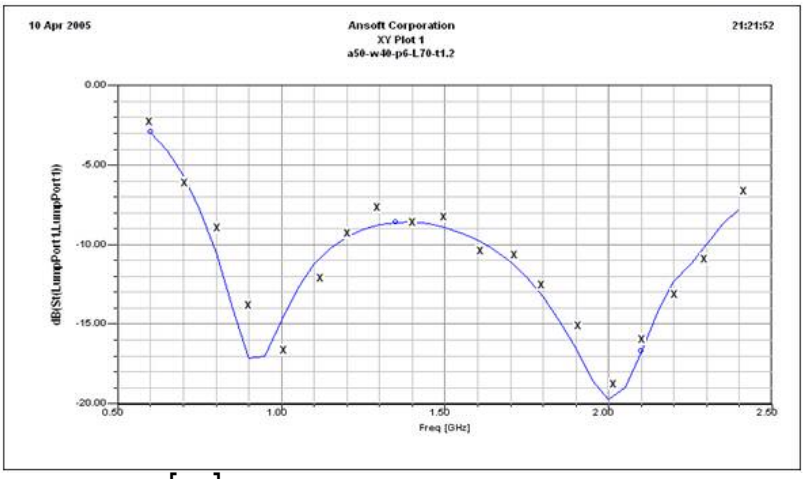
$$L = \frac{7.2}{0.8} - (r + p) = 9 - (\frac{W}{2\pi} + p) \approx 7.8\,cm$$

ولكن في أثناء النمذجة وجد أن الطول اللازم لتحقيق المجالات المطلوبة هو فقط 7cm والحد الأدنى للتردد كان 790 MHz. وكانت مساحة الأرضي (15 cm *15).



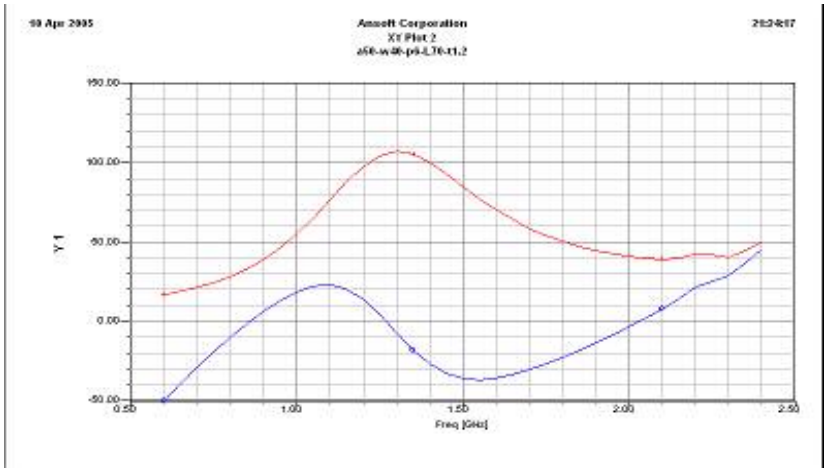
الشكل (5) الهوائي المدروس

وباستعمال برنامج HFSS تم حساب فقد العودة Return loss بالديسبل، كم هو موضح في الشكل (6). إذْ بلغ عرض المجال الأول الذي يضم مجالين معاً هو: MHz(1180 – 790) وهو أكبر من المطلوب، أما عرض المجال الثاني الذي يضم ثلاثة مجالات فقد بلغ MHz(2300 - 1630) وهو أكبر من المجال المطلوب أيضاً، وهو كافٍ لكي نضمن تحقيق المجالات المطلوبة عند التنفيذ العملي.



الشكل (6) علاقة فقد العودة Return loss بالتردد $S_{11}[dB]$

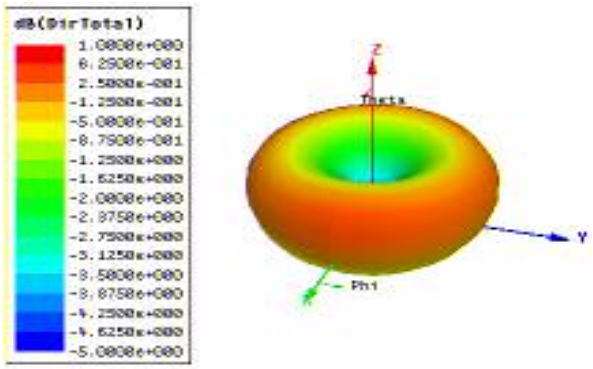
أما علاقة ممانعة الدخل بالتردد فموضحة بالشكل (7)



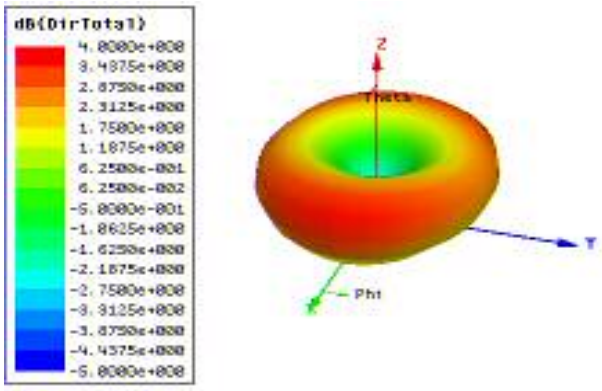
الشكل (7) علاقة ممانعة دخل الهوائي بالتردد

المخطط الإشعاعي للهوائي عند منتصف المجال الأول أي عنـــد التـــردد(900MHz) موضحة بالشكل (8)؛ إِذْ نلاحظ أنه أيزوتروبي في المستوى الأفقي، في حين يتوجـــه

الإشعاع الأعظمي بزاوية تقع فوق الأفق في الاتجاه الشاقولي وهو المخطط الإشعاعي المطلوب في حالة استخدامه في الاتصالات المتنقلة الأرضية، كما ذكر في المقدمة ووضح بالشكل (1). في حين يبين الشكل (9) ربح الهوائي عند منتصف المجال الثاني (أي عند التردد 1950 MHz) ؛ إذْ يلاحظ أن ربحه أعلى منه في الحالة السابقة (عند التردد 900 MHz) وذلك نظراً لكون المساحة الفعالة للهوائي عند هذا التردد أكبر(تتناسب عكسياً مع مربع طول الموجة).



الشكل (8) المخطط الإشعاعي عند التردد 900 MHz



الشكل (9) المخطط الإشعاعي عند التردد 1950 MHz

4 – دراسة أثر مساحة الأرض

لكي لا يؤثر هيكل السيارة في المخطط الإشعاعي للهوائي اعتبار أن الأرضي الخاص بالهوائي عبارة عن صفيحة من النحاس مربعة الشكل طول ضلعها 15 cm؛ إذْ من المطلوب أن يكون الهوائي أصغر ما يمكن على الرغم من أن سطح الأرضي يركب على هيكل السيارة ذي السطح الواسع مما يمكّن من تركيبه بسهولة. تمّت دراسة أثر تصغير مساحة الأرضي وكانت النتائج على الشكل الأتي:

تم تصغير حجم الأرضي إلى cm (10 * 10) واستبدل السطح المتبقي بالحديد (باعتبار أن هيكل السيارة مصنع من الحديد)، فلم تتأثر خواص الهوائي الترددية والإشعاعية.

تم تصغير حجم الأرضي إلى cm (10 * 5) فكان التأثير في التردد معدوماً في حين انزاح اتجاه الإشعاع الأعظمي باتجاه الأفق.

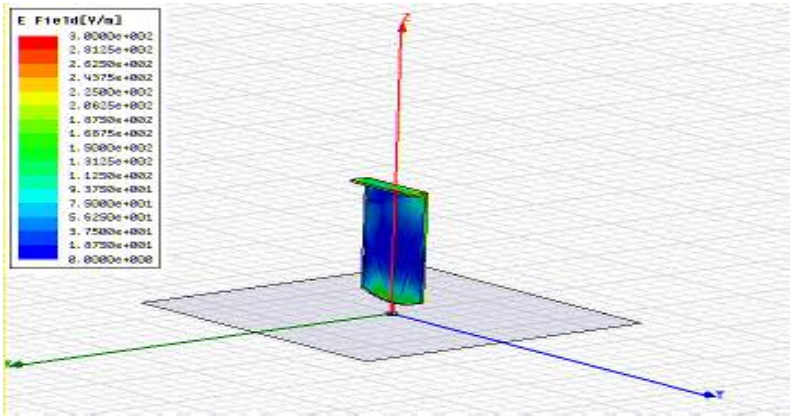
تم تصغير حجم الأرضي إلى cm (6 * 3) من النحاس والباقي من الحديد فساء فقد العودة عند المجال الترددي العالي بشكل ملحوظ أكثر من حالته عند المجال المنخفض. كما انحرف الإشعاع الأعظمي باتجاه الأفق.

5 – دراسة أثر تغطية الهوائي بمادة عازلة

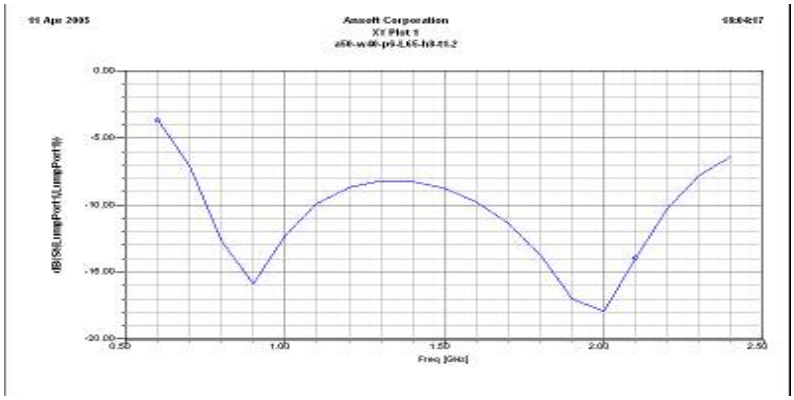
لحماية الهوائي من مؤثرات الطبيعة في أثناء استخدامه. تمّت تغطية الهوائي بمادة عازلة(إسفنجية) ثابت عازليتها قريبة من الواحد فلم تتأثر الخواص الإشعاعية والترددية للهوائي. أما عند استعمال مادة ذات ثابت عازلية كبير فإن فقد العودة يسوء بشكل ملحوظ عند جميع الترددات بسبب أن الإشعاع الكهرطيسي يتم من ناقل إلى عازل ومن ثم من العازل إلى الهواء، وبالتالي يقل التوافق بين ممانعة الهوائي وممانعة الهواء الخارجي.

6 – دراسة إمكانية تقصير طول الهوائي بالثني

نظراً لأنَّ عرض الهوائي باتجاه المحور y كبير 4cm لا يمكن ثني الهـوائي بهـذا الاتجاه. إنما يمكن ثنيه باتجاه المحور x ولكن مقدار الثني يجب أن لا يكون كبيـراً، وإلا أصبحت سماكة الهوائي كبيرة، ولم يعتبر مسطحاً. لقد وجد أثناء النمذجة أن ثني رأس الهوائي بمقدار 8 mm. يقابلها تقصير الطول بمقدار 5 mm أي أن ثني الهـوائي يتطلب زيادة في الطول الهندسي للهوائي بمقدار 3. mm في حين قل الطول الشاقولي بمقدار 5mm. والشكل (10) يبين شكل الهوائي بعد الثني. وخواصه الترددية موضحة بالشكل (11).

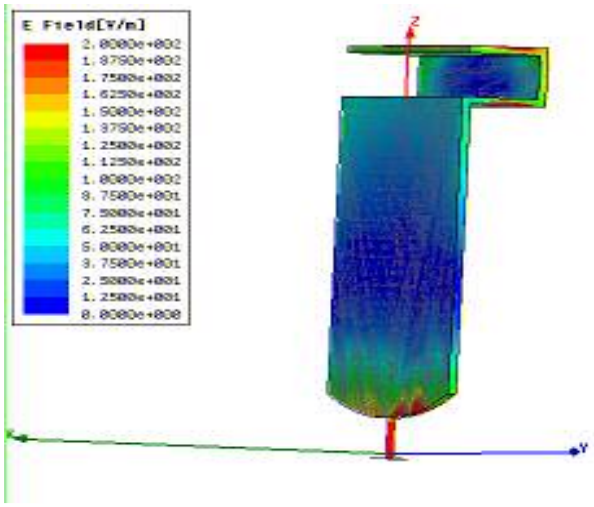


الشكل (10) الهوائي المثني وتوزع الحقل الكهربائي عليه

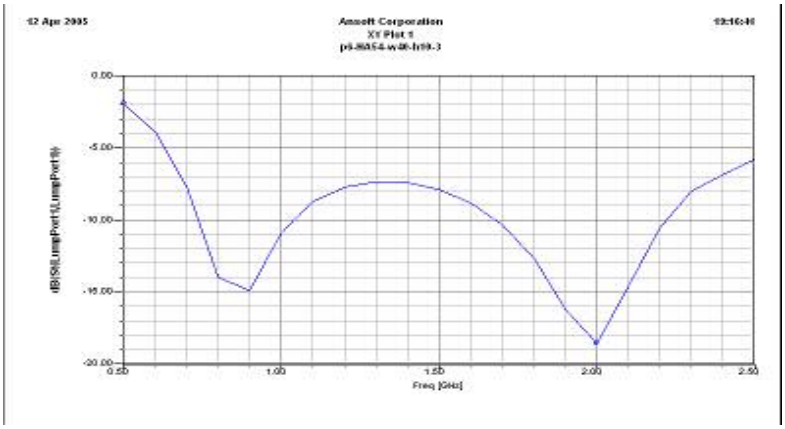


الشكل (11) الخواص الترددية للهوائي المثني

بثني الهوائي كما هو مبين بالشكل (12) وبالأبعاد: mm (10 – 10 – 10 – 54 – 6) أي أن الطول الشاقولي أصبح mm 64، كانت خواصه الترددية كما هـــي موضـــحة بالشكل (13)



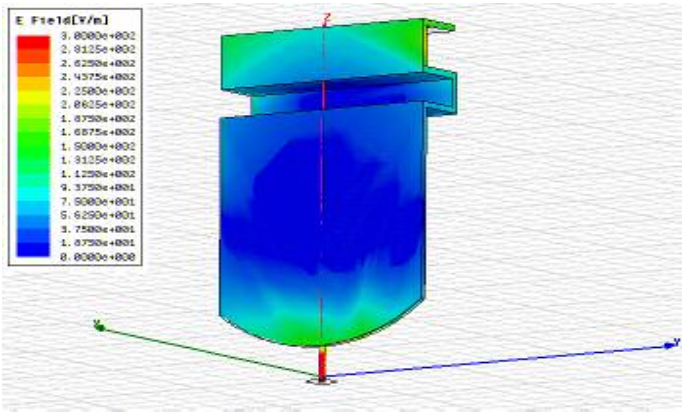
الشكل (12) الهوائي المطوي أبعاده mm (10 – 10 – 10 – 54 – 6)



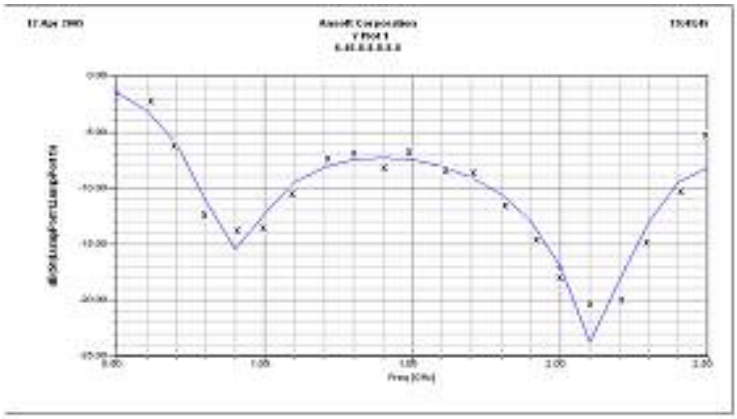
الشكل (13) الخواص الترددية للهوائي المطوي

نلاحظ أن التردد المنخفض قد أصبح 720 MHz، وهذا يعني أن الطول الفعال للهوائي قد ازداد على الرغم من أن الطول الشاقولي نقص بمقدار 6 mm.

بثني الهوائي كما هو مبين بالشكل (14) نحصل على الخواص الترددية المبينة بالشكل (15). نلاحظ أنَّه تمَّت المحافظة على المجال الترددي المطلوب على الرغم من تقصير الطول الفيزيائي للهوائي وهو المطلوب.



الشكل (14) هوائي مطوي خمس مرات mm (8 - 8 – 8 – 8 – 45 – 6)



الشكل (15) الخواص الترددية للهوائي المطوي المبين بالشكل (14)

7 - النتائج العملية

تم تنفيذ الهوائي المبين بالشكل (5) مخبرياً (يدوياً) وقياس فقد العودة له، وتم تثبت نتائج القياس بنقط على الشكل (6). وقد بينت النتائج العملية تأثر $S_{11}[dB]$ بطريقة ربط مجس التغذية للهوائي وتثبيته بصفيحة الأرضي. ولكن كانت القياسات العملية مطابقة تقريباً للحسابات النظرية عند معظم الترددات التي أجريت عندها القياسات.

نفذت الشركة الطالبة للبحث النموذج الموضح بالشكل (14) وأجرت هي بنفسها القياسات المطلوبة الموضحة بنقط على الشكل (15)، وكانت النتائج مشجعة وتتطابق مع نتائج النمذجة. سيتم طلي الهوائي بمادة عازلة وتركيبه على سطح السيارة ودراسة أثر هيكل السيارة في المخطط الإشعاعي للهوائي من قبل الشركة قبل البدء بتصنيعه تجارياً.

8 – الاستنتاجات

1 – بينت الدراسة إمكانية استخدام هوائي مسطح متعدد المجالات الترددية (تشمل جميع أنواع الاتصالات المتنقلة المطلوبة).

2 – من خلال تغيير شكل الهوائي وأبعاده الهندسية تم ضبط المجالات الترددية المطلوبة.

3 – أثبتت الدراسة أن الهوائي المسطح وحيد القطب هو الشكل المناسب لتحقيق أقصر هوائي يمكن أن يحقق أدنى تردد مطلوب (طول الهوائي أقل من ربع طول الموجة).

4 – يمكن تقصير طول الهوائي بثني الجزء العلوي فقط من الهوائي باتجاه البعد الصغير. ويمكن الحصول على تقصير بحدود 40%. لأنه لا يمكن ثني الأجزاء السفلية من الهوائي لقربها من مستوي الأرضي والتي يشكل الجزء المثني سعة كبيرة لا يمكن تعويضها مع المحافظة على عرض المجال المطلوب.

5 – يمكن إجراء ثني تدريجي صغير من الأسفل وكبير من الأعلى لتقصير طول الهوائي مع المحافظة على عمل الهوائي ضمن مجال عريض.

6 – إن طلي الهوائي بمادة عازلة رقيقة ثابت عازليتها قريبة من الواحد لا يؤثر في خواص الهوائي الترددية والإشعاعية.

7 – إنَّ استخدام طبقة عازلة سميكة تؤثر في الخواص الترددية للهوائي ولكن لا تؤثر تأثيراً كبيراً في المخطط الإشعاعي له.

8 – لم يدرس أثر مقاومة الهوائي للريح في أثناء سير المركبة، لأن ارتفاعه صغير.

المراجع العلمية

1) E. Gschwendtner
Breitbandig Multifuktions Antennen für den konformen Einbau in Kraftfahrzeuge , Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik, Universität Karlsruhe (TH) , 2001 , S.191

2) Kin – lu Wong Compact and Broadband Micro strip Antennas John weley & sons , inc. 2003 , 335 P.

3) G. kumar & K.P. Ray Broadband Micro strip Antennas Artech House , inc. 2003 , 415 P.

4) R. B. Watewhouse Micro strip Patch Antennas , A Designer's Guide RMIT University , Academic Publishers 2003 , 418 P.

5) M. Hoffmeuster Entwurfskriterien für Antennen von schnurlos Telefonen Braunschweig techn. Uni. Diss. 2000 , 105 S.

6) M. Ali , H.S. Hwang and T. Sittironnarit Design and Analysis of an R-Shaped Dual-Band Planar Inverted-F Antenna for Vehicular Applications. IEEE Transactions on Vehicular Technology , Vol.53 , No. 1 , 1,Jan. 2004 , P. 29 – 37

7) P.Ciais , R. Staraj , G. Kossiavas , and C. Luxey Design of an Internal Quad-Band Antenna for Mobile Phones IEEE Microwave And Wireless components Letters Vol. 14 , No. 4 , April,2004 , P. 148 – 150

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2005/4/18.