

## تحليل و تصميم مصفوفة الهوائيات التجزئية ومقارنتها بالمصفوفة الخطية منتظمة المسافات والتغذية

الدكتور السموعل صالح\*  
الدكتور تاج الدين جركس\*\*

(تاريخ الإيداع 31 / 8 / 2008. قُبل للنشر في 12/11/2008)

### □ الملخص □

درس سابقا هوائي المصفوفة الخطي ووصف بشكل دقيق، كما تم تحليل كل العوامل اللازمة لإيجاد الهوائي الأمثل وتحديد مخططه الإشعاعي. إن الهندسة التجزئية أو التكريرية (Fractal Geometry) هي امتداد للهندسة الإقليدية، و تستخدم لتوصيف الكثير من الأشكال التي لا يمكن توصفها بدقة باستخدام الهندسة التقليدية و خاصة الأشكال ذات التماثل الداخلي (Auto-similarity). بما أن بنية الجسم التجزئي تختلف عن بنية الجسم العادي في عدة عوامل، هذا يسمح بزيادة عدد معاملات التصميم للهوائي مما يضيف درجات حرية جديدة في تصميم هذا النوع من الهوائيات. هذا الاختلاف ينتج عن التوضع التجزئي لعناصر الهوائي، ويؤدي بالتالي إلى تغير الأبعاد بين عناصر المصفوفة، وهو محكوم ببعض عوامل الجسم التجزئي. إن تحليل العلاقة بين عوامل المصفوفة التجزئية التي تشكل الهوائي وعوامل هذا الهوائي من ربح و مخطط إشعاعي و فتحة إشعاع و مقارنة الهوائي التجزئي مع الهوائي المنتظم، يوضح أن الهوائي المصفوفي التجزئي لديه معاملات تصميمية أكثر، وبالتالي إمكانية أفضل في تحديد الهوائي المطلوب لتطبيق ما.

**الكلمات المفتاحية:** الهندسة التجزئية- البعد التجزئي- درجة التجزيء- الهوائي المصفوفي المنتظم- الهوائي المصفوفي التجزئي- معاملات تصميمية جديدة.

\* مدرس- قسم هندسة الاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين - اللاذقية- سورية. [a.saleh@free.fr](mailto:a.saleh@free.fr)  
\*\* أستاذ- قسم هندسة الاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين - اللاذقية- سورية.

## Analyzing and Designing Fractal Antenna Arrays and Comparing them With Linear Antenna Arrays

Dr. Alsamawal Saleh●  
Dr. Taj dein Jarkas ●●

(Received 31 / 8 / 2008. Accepted 12 / 11 / 2008)

### □ ABSTRACT □

The linear, fractal array has already been accurately studied and analyzed in order to find the optimal antenna and define its radiation pattern. Fractal geometry is an extension of normal geometry, specially the auto-similarity objects. The location of fractal antenna elements adds several degrees of liberty to the antenna design; that is due to the difference between the texture of fractal and normal objects. This difference augments the number of design parameters for fractal antenna because the fractal array has different distances between elements. This distance changes when the dimension of fractal objects is modified. The analysis of the relation between fractal object parameters and antenna radiation pattern and its comparison with linear array antenna shows that the fractal antenna has more design parameters, so that it has a better capacity for identifying the antenna required for a certain application.

**Keywords:** Fractal geometry, Fractal dimension, stage of growth, linear array antenna, fractal array antenna, new design parameter.

---

\*Assistant Professor, Department of Communications Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. e-mail: [a.saleh@free.fr](mailto:a.saleh@free.fr) .

\*\*Professor, Department of Communications Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة:**

لسنين عدة، كانت الهندسة الإقليدية قاعدة أساسية للنظرية الكهرومغناطيسية، وخاصة في دراسة العديد من المجالات المتعلقة بهندسة الاتصالات المكروية. لكن التشارك بين الأمواج الكهرومغناطيسية و الهندسة الإقليدية أدى إلى إيجاد و تطوير كم لا بأس به من الأشكال المعتمدة حاليا في كل مجالات الاتصالات المكروية وخاصة المرشحات والهوائيات [2] [3] [4] [5]، ففي مجال الهوائيات تمت دراسة و تصميم الهوائيات الخطية و الأسطوانية و الدائرية و الكروية و كذلك الكثير من الهوائيات المطبوعة و بأشكال مختلفة دائرية و مربعة و مثلثية و حتى قرصية. الهندسة التجزئية أو التفسيرية (Fractal Geometry) [1] هي امتداد للهندسة الإقليدية، وتستخدم لتوصيف كثير من الأشكال التي لا يمكن وصفها بدقة في الهندسة العادية و خاصة الأشكال ذات التشابه او التماثل الداخلي (Auto-similarity)، مزجت عدة دراسات بين الأشكال التجزئية و معادلات ماكسويل، و ذلك لفهم أكبر لعملية الانتشار و الإشعاع، كما حددت المصفوفة  $S$  للكثير من الأشكال التجزئية.

تمت دراسة و توصيف المصفوفة الخطية العادية بشكل دقيق منذ زمن بعيد، وتم تحديد وتحليل كل العوامل (تحديد المسافة بين عناصر المصفوفة و التيارات المارة بالعناصر و ...) اللازمة لإيجاد الهوائي الأمثل الذي يعمل عند تردد معين وتحديد ربحه و مخططه الإشعاعي. التوضع التجزئي لعناصر الهوائي الخطي سيضيف درجات حرية جديدة في تصميم هذا النوع من الهوائيات، و ذلك لأن الجسم التجزئي يختلف (كما سنرى لاحقا) في بنيته الهندسية عن الجسم العادي بعدة نقاط او بمجموعة عوامل إضافية تسمح بزيادة عدد بارامترات التصميم للهوائي. هذا الاختلاف ينتج عن التوضع التجزئي لعناصر الهوائي، ويؤدي بالتالي إلى اختلاف الأبعاد بين عناصر المصفوفة، وهذا الاختلاف محكوم ببعض العوامل الجديدة المتعلقة بالجسم التجزئي. إن تحليل العلاقة بين عوامل المصفوفة التجزئية التي تشكل الهوائي وعوامل هذا الهوائي من ربح و مخطط إشعاعي و معامل الهوائي و ... قد يسمح لنا بتصميم الهوائي المطلوب بشكل أفضل و أدق.

**أهمية البحث وأهدافه:**

الهوائيات عنصر أساسي في عالم الاتصالات الذي يتطور بشكل متسارع جدا، مما يتطلب إيجاد نمط جديد من الهوائيات التي تخدم هذا التطور الكبير، مثل: الهوائيات عريضة الحزمة و متعددة الحزم كذلك الهوائيات المفتاحية و الذكية. البحث المعروض يقدم مساهمة جديدة في هذا المجال بحيث يبحث في زيادة درجات الحرية اللازمة في تصميم الهوائيات، بمعنى آخر زيادة معاملات التصميم التي تقود إلى تحديد أدق للهوائي المطلوب في استخدام معين، و لهذا درس هذا البحث الهوائيات المصفوفية التجزئية، و قارنها مع الهوائيات المصفوفية الخطية من أجل معرفة تأثير زيادة عدد المعاملات التصميمية في تحديد الهوائي و مخططة الشعاعي و اتجاهيته ... .

**طرائق البحث و مواده:****1. الأشكال التجزئية [الهندسة التجزئية]:**

لا يمكن قياس طول الشاطئ بدقة باستخدام الهندسة الإقليدية، وإنما يمكن قياسه بتقريب ما لأنه كثير التداخلات و التدرجات. مثلا عندما يتجول إنسان على شاطئ البحر، و يقطع مسافة بين نقطتين مقدرة بـ 2 km، يعبر خلالها مجموعة من الخجان و الصخور الصغيرة دون الحاجة للالتفاف حولها، إذا استبدلنا الرجل بكائن آخر أصغر حجما،

فإن المسافة المقطوعة بين النقطتين ستزداد إلى 3 km مثلاً، لأن الصخور والخلجان التي قطعها الرجل سيضطر الكائن الصغير للمرور حولها. وهكذا كلما صغر الجسم تزداد المسافة المقطوعة، هذا ما لاحظته العالم ماندلبور، بناءً عليه، الهندسة التقليدية تعطي نظرة تقريبية عن بعض المجسمات الطبيعية أو بعض الخطوط المحددة لهذه المجسمات مثلاً بالنسبة للشواطئ: الهندسة الإقليدية تعطي رسماً أملساً، وليس متعرجاً بشكل كافٍ لكي يعبر عن الشاطئ، وبالنسبة للغيوم أيضاً كمثال آخر: فهي تقرب لكرات والجبال لمخاريط و... و... بعد هذه الملاحظات قرر العالم ماندلبور إرساء قواعد الهندسة التجزئية أو التفسيرية (Fractal Geometry)، كلمة Fractal قادمة من الكلمة اللاتينية "Fractus" وتعني كسر أو شعر. بعد هذا العالم بدأت الدراسات تلاحظ أهمية هذه الهندسة وأدخلتها في كثير من المجالات: معالجة الصور، الكهرومغناطيسية، الضوئية، ... فما هو الجسم التجزئي و ما هي عوامله الأساسية.

الجسم التجزئي: هو جسم غير منتظم، من الممكن أن يكون محدداً، ولكنه غير منته، ويتصف بأنه يملك خاصية التشابه الداخلي أو التكرار للشكل العام بمعنى آخر إذا قمنا بأخذ Zoom على أي قطعة من هذا الجسم سوف نشاهد الشكل الإجمالي للجسم، أي أن القطعة الصغيرة هي شكل مصغر جداً عن الشكل الأساسي، وهذا الجسم يتولد بالتجزئ أي يتجزأ الشكل الأساسي إلى أصغر فأصغر، وبشكل يشابه الجسم الأساسي وهذا التجزئ محكوم بعدة عوامل [1] هي:

### 1-1. البعد التجزئي (D):

البعد التجزئي (Fractal Dimension) هو معامل أساسي للجسم التجزئي، وهو في غالب الأحيان عدد عادي، وليس صحيحاً مثل الأجسام الإقليدية المتعارف عليها (مربع، مكعب، ...) ونستطيع أن نعبّر عنه بالقانون التالي:

$$D = \frac{\log(N)}{\log(1/\rho)} \quad (1)$$

حيث إن  $N$  يمثل عدد القطع الموجودة في الجسم التجزئي و  $\rho$  يمثل درجة التقسيم لهذا الجسم.

### 1-2. درجة التجزئ (S):

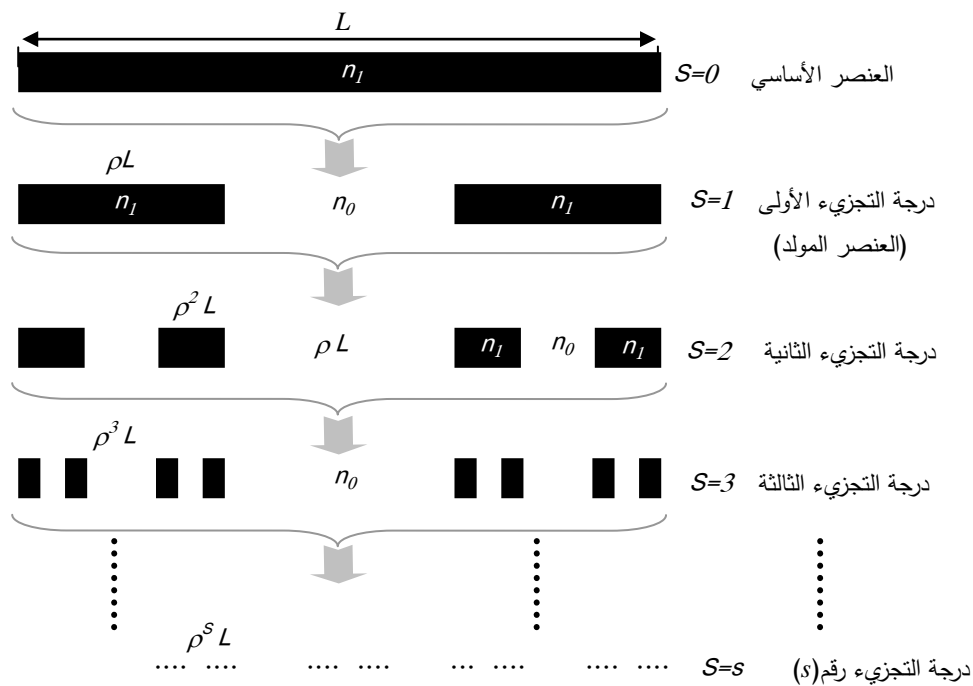
لنعرف الآن عملية التكرار (Iteration) في الحصول على الجسم التجزئي، وهي أهم عملية في الهندسة التجزئية، وذلك لأننا عرفنا الجسم التكراري (التجزئي بأنه يتولد بالتكرار)، وهذه العملية تحصل على عدة مراحل كل مرحلة تسمى درجة التجزئ (Stage of Growth)، والتي تبدأ من الدرجة  $S=0$  التي تعبر عن الجسم الأساسي، وتستمر حتى اللانهاية حيث تنعدم المادة أي تصبح قطع الجسم صغيرة جداً، هذه العملية تقوم بتطبيق علاقة البعد التجزئي في كل مرحلة من مراحل التجزئ  $S$ . تتلخص هذه العملية في أن الدرجة اللاحقة  $S$  هي  $N$  نسخة من الدرجة السابقة  $S-1$  ولكنها مصغرة بـ  $\rho$  مرة أي مضروبة بمعامل التقسيم أو التصغير  $\rho$  وبذلك نستطيع القول إن البعد التجزئي محقق على أي درجة من درجات التجزئ.

### 1-3. معامل تغيير أبعاد الفجوات أو الفراغات:

العنصر الأساسي الثالث في تكوين الجسم التكراري، ويعبر عن توزيع الفراغات أو الفجوات داخل الجسم التجزئي، الحاجة إلى هذا المعامل (Lacunarity) تكمن في التعبير عن الجسم التجزئي ذو البعد  $D$  بعدة أشكال لها نفس البعد التجزئي ونفس درجة التجزئ، ولكنها تختلف عن بعضها البعض بتوزيع الفراغات الموجودة ضمنها أو بشكل آخر تختلف بتوزيع المادة أو بكثافة المادة ضمن درجة تجزئ ما للجسم.

من أجل فهم أكبر لهذه العوامل و للجسم التجزئي، سنقوم بشرح أحد أنواع الأجسام التجزئية وهو التوزيع الكانتوري متعدد الطبقات أو العناصر (Cantor Bar distribution or Cantor fractal Multilayers) و هو

التوزيع أو الترتيب الكانتوري الثلاثي الذي سنقوم بدراسته كهوائي مصفوفي. يبدأ هذا التوزيع، كما هو واضح من الشكل (1) بالعنصر الأساسي أو الشكل الأساسي (Initiator) والذي يعبر عن قطعة مستقيمة بطول  $L$  من مادة ما ذات قرينة انكسار  $n_1$  أو أي ثوابت أخرى لها علاقة بمجال الدراسة، موضوعة في الفراغ الحر وذات قرينة الانكسار  $n_0$ . لنقم بتقسيم هذه القطعة إلى ثلاثة أقسام متساوية بمعامل تقسيم  $\rho = 1/3$  ثم ننزع القطعة الوسطى فنحصل على قطعتين تشبهان الجسم الأصلي، و لكن أقل طولاً بمقدار معامل التقسيم  $1/3$  و يفصل بينهما الفراغ بقرينة انكسار  $n_0$ ، هذه المرحلة تسمى بدرجة التجزئة الأولى أو المولد للجسم التجزيئي، في المرحلة الثانية للتجزئة  $S=2$  نقوم بنفس عملية التقسيم السابقة، فنحصل على قطعتين مصغرتين بمقدار  $1/3$  عن كل قطعة في العنصر المولد  $S=1$  (أي يصبح لدينا 4 قطع تشبه العنصر الأساسي و مصغرة بمقدار  $\rho^2=1/9$ ) و يفصل بينها الفراغ المصغر عن الفراغ السابق بنفس القيمة، بشكل آخر يمكننا القول إنه في هذه المرحلة (درجة التجزئة الثانية) لدينا نسختان مصغرتان بمقدار  $1/3$  من المرحلة السابقة (درجة التجزئة الأولى  $S=1$ ) وهكذا دواليك بالنسبة لدرجة التجزئة الثالثة  $S=3$  نحصل على ثمان قطع مصغرة بمقدار  $\rho^3=1/27$  ويمكن القول أيضاً أنه لدينا قطعتان مصغرتان بمقدار  $1/3$  من درجة التجزئة السابقة  $S=2$  وتستمر هذه العملية حتى نصل إلى درجة تجزئة عالية جداً (أي معامل تقسيم كبير) عندها تنتهي المادة، أو تصبح قليلة جداً كالغبار و نحصل على الغبار الكانتوري.



الشكل (1) درجات التجزئة الـ  $s$  الأولى للتوزيع الكانتوري الثلاثي حيث البعد التجزيئي

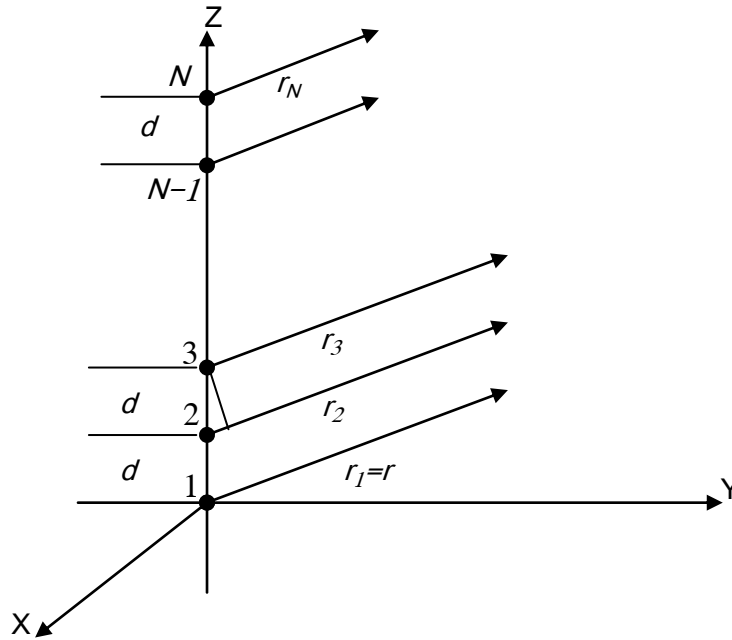
$$D = \ln(2)/\ln(3) = 0.63$$

بملاحظة الشكل السابق نجد أن المرحلة الأولى للتجزئة  $S=1$  ما هي إلا نسختان مصغرتان بمقدار معامل التجزئة من الجسم الأساسي  $S=0$ ، كذلك المرحلة الثانية للتجزئة  $S=2$  مكونة من نسختين متماثلتين و مصغرتين بمقدار  $\rho$  من درجة التجزئة السابقة (الدرجة الأولى  $S=1$ ) وهذا ينطبق على الدرجة الثالثة للتجزئة، والتي تتكون من نسختين مصغرتين من المرحلة الثانية. إذا يمكننا القول إنه في المرحلة (أو درجة التجزئة اللاحقة)  $S$  ضمن عملية

التجزيء أو عملية التكرار للجسم الأساسي ما هي إلا  $N$  (عدد القطع للعنصر المولد) قطعة مصغرة بمقدار معامل التجزيء ( $\rho = 1/3$ ) من درجة التجزيء السابقة  $S=S-I$ . إذا أي جسم تجزئي يمكن توصيفه بالعوامل المذكورة آنفاً، وهي أولاً البعد التجزئي الذي بتغيره تتغير أبعاد العناصر و المسافات بين هذه العناصر، و ثانياً درجة التجزيء بحيث يتغير عدد العناصر و تتغير المسافات فيما بينها عند تغير هذا المعامل. هذه الدراسة سنقوم على دراسة هوائي المصفوفة الخطية العادي بالإبعاد الثابتة بين عناصر المصفوفة الخطية ومقارنتها مع الهوائي التجزئي مع احتمال تغير الأبعاد بين عناصر المصفوفة بتغير البعد التجزئي أو معامل التجزيء أو تغير عدد العناصر بتغير درجة التجزيء، سنقوم الآن بدراسة المصفوفة الخطية.

## 2. الهوائي الخطي ذو $N$ عنصر منتظم المسافات والتغذية:

ليكن لدينا هوائي مصفوفي [6] مكون من  $N$  عنصر (عنصر نقطي أو ثنائي قطب) تغذى هذه العناصر بتيارات متساوية السعة مع وجود زاوية طور بين التيار المغذي لكل عنصرين متتالين قدرها  $\alpha$  والمسافة بين كل عنصرين متتالين واحدة وتساوي  $d$  كما في الشكل (2).



الشكل (2) مصفوفة الهوائي الخطي منتظم المسافات  $d$  ذو  $N$  عنصر

هذا الهوائي يسمى منتظم المسافات، لأن المسافة بين عناصر الهوائي ثابتة، و سنقوم بدراسة وحساب الحقل الكهربائي في نقطة استقبال ما  $P(r, \theta, \varphi)$  تقع في منطقة المجال البعيد منطقة فراهوفر. الدراسة النظرية الرياضية لهذا الهوائي معروفة ومبرهنة سابقاً، نستطيع الحصول على الحقل الكهربائي الكلي عندما تكون عناصر المصفوفة متماثلة و ذلك بضرب معامل المصفوفة لكل العناصر بالحقل الكهربائي الناتج عن عنصر واحد من عناصر الهوائي، وليكن العنصر الأول، وبالتالي لنحسب حقل العنصر الأول.

$$E_{\theta 1} = \frac{j60\pi I_1 l}{\lambda r_1} e^{-jkr_1} \sin \theta \quad (2) \quad \text{إن الحقل الكهربائي الناتج عن العنصر الأول هو:}$$

$$E_{\theta 1} = E_{\theta} = \frac{j60\pi I l}{\lambda r} e^{-jkr} \sin \theta \quad \text{و لدينا } r_1=r, I_1=I \text{ و بالتالي:}$$

$$E_{\theta_2} = \frac{j60\pi I_2 l}{\lambda r_2} e^{-jkr_2} \sin \theta \quad \text{و الحقل الناتج عن العنصر الثاني هو:}$$

ومن الشكل نلاحظ أن:  $r_2 = r - d \cdot \cos \theta$  و  $I_2 = I \cdot e^{j\alpha}$  إذا يمكن أن نكتب من أجل العنصر

$$E_{\theta_2} = \frac{j60\pi I l}{\lambda r} e^{-jkr} \sin \theta e^{j(kd \cos \theta + \alpha)} = E_{\theta} e^{j(kd \cos \theta + \alpha)} \quad (3) \quad \text{الثاني العلاقة التالية:}$$

أما بالنسبة للعنصر الثالث وعلى اعتبار أن:  $r_3 = r - 2d \cdot \cos \theta$  و  $I_3 = I_2 e^{j\alpha} = I \cdot e^{j2\alpha}$  نستطيع كتابة الحقل للعنصر الثالث بالشكل:

$$E_{\theta_3} = \frac{j60\pi I l}{\lambda r} e^{-jkr} \sin \theta e^{j[2(kd \cos \theta + \alpha)]} = E_{\theta} e^{j[2(kd \cos \theta + \alpha)]} \quad (4)$$

و تستمر عملية حساب الحقل الناتج لكل عنصر (كما في المعادلات 2 و 3 و 4) حتى نصل إلى العنصر الأخير  $N$  حيث يعطى حقله بالعلاقة التالية:

$$E_{\theta N} = \frac{j60\pi I l}{\lambda r} e^{-jkr} \sin \theta e^{j[(N-1)(kd \cos \theta + \alpha)]} = E_{\theta} e^{j[(N-1)(kd \cos \theta + \alpha)]} \quad (5)$$

وبذلك يكون الحقل الكلي  $E_{\theta total}$  الناتج عن كل العناصر معطى بالعلاقة التالية:

$$E_{\theta total} = E_{\theta_1} + E_{\theta_2} + E_{\theta_3} + \dots + E_{\theta N}$$

بتعويض العلاقات السابقة في علاقة الحقل الكلي  $E_{\theta total}$  ينتج لدينا:

$$E_{\theta total} = E_{\theta} [1 + e^{j(kd \cos \theta + \alpha)} + e^{j2(kd \cos \theta + \alpha)} + \dots + e^{j[(N-1)(kd \cos \theta + \alpha)]}] = E_{\theta} \cdot Af$$

حيث أن المقدار ما بين قوسين يسمى بمعامل المصفوفة و هو إذا يساوي:

$$Af = 1 + e^{j(kd \cos \theta + \alpha)} + e^{j2(kd \cos \theta + \alpha)} + \dots + e^{j[(N-1)(kd \cos \theta + \alpha)]}$$

بفرض أن:  $\psi = kd \cdot \cos \theta + \alpha$  عندها يمكن كتابة معامل المصفوفة بالشكل التالي:

$$Af_{\psi} = 1 + e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{j(N-1)\psi} = \sum_{n=1}^N e^{j(N-1)\psi} \quad (6)$$

$Af_{\psi}$ ، من العلاقة (6)، هو عبارة عن تابع دوري دوره  $2\pi$  بالتالي عندما  $0 \leq \theta \leq \pi$  فإن  $\psi$  تتغير ضمن المجال  $\alpha - kd \leq \psi \leq kd + \alpha$  بإجراء مجموعة من العمليات الرياضية المعروفة على هذا التابع نستطيع

$$Af_{\psi} = \frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} \quad (7) \quad \text{الوصول إلى العلاقة النهائية التالية:}$$

$$Af_{\psi} = e^{j\frac{1}{2}(N-1)\psi} \frac{\sin \frac{N}{2}\psi}{\sin \frac{\psi}{2}} \quad \text{ويمكن كتابته بالشكل التالي:}$$

إذا أخذنا نقطة الأصل (0) في منتصف الهوائي المصفوفي فإن العلاقة لمعامل المصفوفة تصبح بالشكل:

$$Af_{\psi} = \frac{\sin \frac{N}{2}\psi}{\sin \frac{\psi}{2}}$$

من أجل زاوية  $\psi$  صغيرة فإن  $(\sin \frac{\psi}{2} \cong \frac{\psi}{2})$  وبالتالي يصبح معامل المصفوفة على الشكل التالي:

$$Af_{\psi} = \frac{\sin \frac{N}{2} \psi}{\frac{\psi}{2}} \quad (8)$$

القيمة العظمى لـ  $Af_{\psi}$  تساوي  $N$ . و بما أننا نتعامل أحياناً مع قيم عظمى تساوي الواحد لذلك نستخدم معامل المصفوفة أصغر ب  $N$  مرة وعندها يصبح معامل المصفوفة معطى بالعلاقة (9):

$$Af_{\psi} = \frac{1}{N} \frac{\sin \frac{N}{2} \psi}{\frac{\psi}{2}} \quad (9)$$

الحقل الكهربائي الكلي للهوائي المصفوفي الخطي ما هو إلا جداء معامل المصفوفة بالحقل الكهربائي الناتج عن العنصر الأساسي المتوضع في مركز الإحداثيات يكتب بالشكل النهائي التالي:

$$E_{\theta Total} = \frac{j60\pi I l}{\lambda r} e^{-jkr} \sin \theta \frac{\sin \frac{N}{2} (kd \cos \theta + \alpha)}{\sin \frac{1}{2} (kd \cos \theta + \alpha)} \quad (10)$$

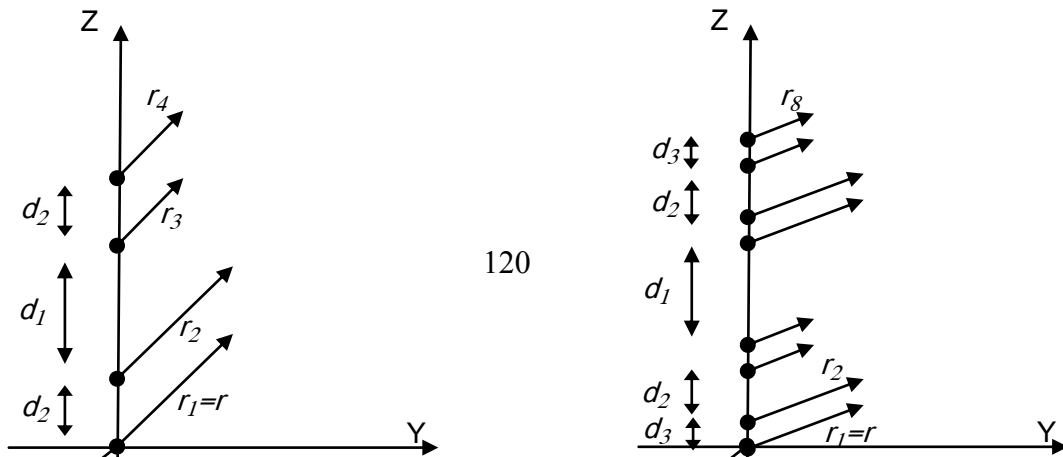
و بالتالي الحقل المغناطيسي يعطى بالعلاقة:

$$H_{\phi Total} = \frac{E_{\theta Total}}{\eta}$$

علاقة الحقل الكهربائي الكلي (10) في نقطة  $P$  تبعد بعداً كبيراً عن الهوائي المصفوفي متماثل الأبعاد والتغذية تسمح بحساب، و رسم المخطط الإشعاعي لهذا النوع من الهوائيات، و الذي يكافئ المخطط الناتج عن ضرب المخطط الإشعاعي لعنصر واحد من عناصر المصفوف بالمخطط الإشعاعي لمعامل المصفوف.

### 3. الهوائي الخطي التجزئي ذو $N$ عنصر، منتظم التغذية:

بالنسبة لهذا النوع من الهوائيات التجزئية تكون المسافات بين عناصر الهوائي غير متساوية، وإنما محكومة بالبعد التجزئي  $D$  للجسم التجزئي (Fractal object) المختار، و كذلك درجة التجزئ  $S$  [7]. في دراستنا هذه اعتمدنا على التوزيع الكانتوري (Cantor distribution) الموضح في الشكل (1) فإذا اخترنا المرتبة الثانية فما فوق للتجزئ، فسيكون لدينا عدد عناصر الهوائي مساوية إلى  $N^S$  عنصر و أصغر مسافة بين العناصر هي  $d_{min} = \rho^S L$  أما أكبر مسافة فهي  $d_{max} = \rho L$  حيث إن  $L$  يعبر عن الطول الكلي للجسم التجزئي، والذي يعبر عن طول الهوائي و  $\rho$  هنا هي معامل التقسيم، والتي يمكن تغييرها، وبالتالي تغير المسافات بين عناصر الهوائي، الشكل التالي يوضح شكلين لمصفوفة هذا الهوائي الخطي على اعتبار الدرجتين الأولى و الثانية للتجزئ من التوزيع





الكانتوري. لحساب الحقل الكهربائي الكلي لهذا الهوائي نعتمد نفس الطريقة السابقة في حساب حقل الهوائي الخطي منتظم المسافات، و لكن سيختلف معنا هنا حساب بعد كل عنصر من عناصر الهوائي عن منطقة دراسة الحقل البعيد، مما يعطي هذا النوع من الهوائيات درجة حرية إضافية أثناء التصميم، وذلك لأن المسافات بين عناصر الهوائي تتبع الجسم التجزيئي المختار، و بالتالي يمكن أن تكون هذه المسافات متغيره في الهوائي. لحساب البعد  $r$  لكل عنصر نفرض أن عدد عناصر الهوائي يتبع درجة التجزيء  $S$  فسيكون عددها مساويا إلى  $N^S$  وبالتالي لدينا  $M=N^S-1$  مسافة غير متساوية بين العناصر إذا لدينا  $r_M$  مسافة يجب حسابها، فإذا فرضنا أن أول عنصر في الهوائي متوضع في مركز الإحداثيات فان  $r_1 = r$  هو البعد المرجعي، فإذا بدأنا حساب البعد  $r_M$  الذي يمثل بعد آخر عنصر من مصفوفة الهوائيات عن منطقة المجال البعيد، فإنه يمكن حسابه بالطريقة التالية:

$$r_M = r_{M-1} - d_M \cdot \cos\theta$$

$$r_{M-1} = r_{M-2} - d_{M-1} \cdot \cos\theta \quad \text{وبالتالي فان البعد الذي يليه هو:}$$

و هكذا تستمر عملية حساب البعد عن منطقة الحقل البعيد حتى نصل إلى حساب  $r_1$  و  $r_2$  وذلك وفق الشكل

$$r_2 = r_1 - d_2 \cdot \cos\theta \quad \text{التالي:}$$

حتى نصل إلى حساب قيمة البعد لأول عنصر من المصفوفة و الذي يعطى بالشكل:  $r_1 = r - d_1 \cdot \cos\theta$ . أما لحساب المسافات  $d_1, d_2, \dots, d_{M-1}, d_M$  بين عناصر الهوائي، فذلك عائد للجسم التجزيئي المختار و تحديدا لبعده التجزيئي  $D$  و درجة التجزيء المختارة  $S$  التي تعطي  $S+1$  بعد مختلف بين عناصر الهوائي و معامل التقسيم  $\rho$ .

في دراستنا على الجسم الكانتوري ذو البعد  $D = \frac{\ln(N)}{\ln(\rho)} = \frac{\ln(2)}{\ln(3)} = 0.63$  و درجة التجزيء  $S=3$  (الشكل (3))

فإنه لدينا ثلاث مسافات مختلفة تبدا بـ  $d_3 = \rho^S L = \frac{1}{27} L$  وهي اصغر مسافة بين عناصر الهوائي ثم

$d_2 = \rho^{S-1} L = \frac{1}{9} L$  و أخيرا المسافة الكبرى بين العناصر وهي  $d_1 = \rho^{S-2} L = \frac{1}{3} L$  و بالتالي يمكن حساب

الحقل الكهربائي الكلي لهذا الهوائي باستخدام العلاقة التالية:

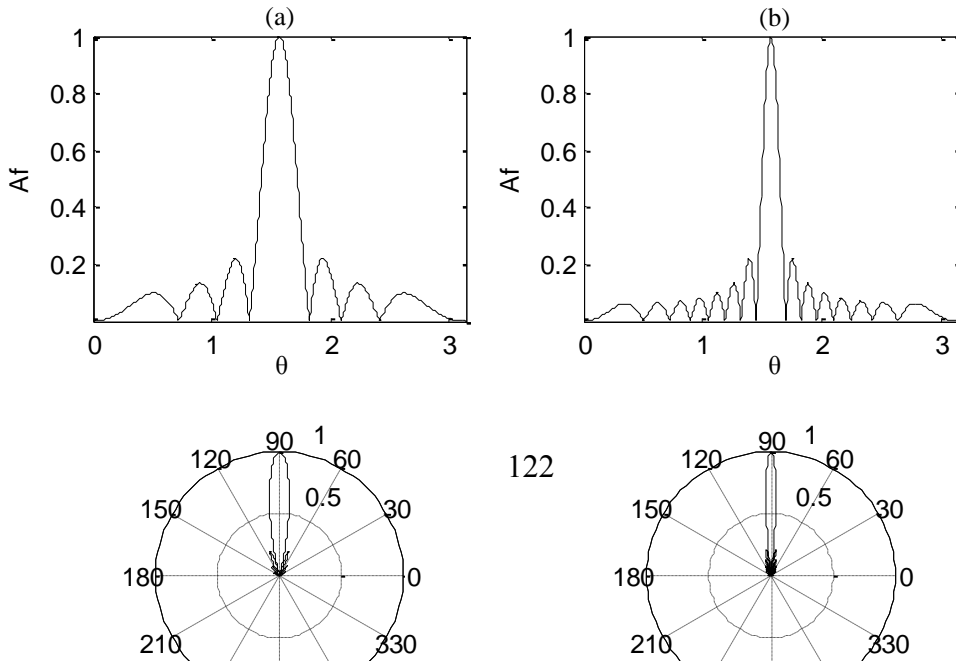
$$E_{\theta Total_F} = E_{\theta} \left[ 1 + e^{j(kd_1 \cos\theta + \alpha)} + e^{j(kd_2 \cos\theta + \alpha)} + \dots + e^{j(kd_M \cos\theta + \alpha)} \right] = E_{\theta} \cdot Af_F \quad (11)$$

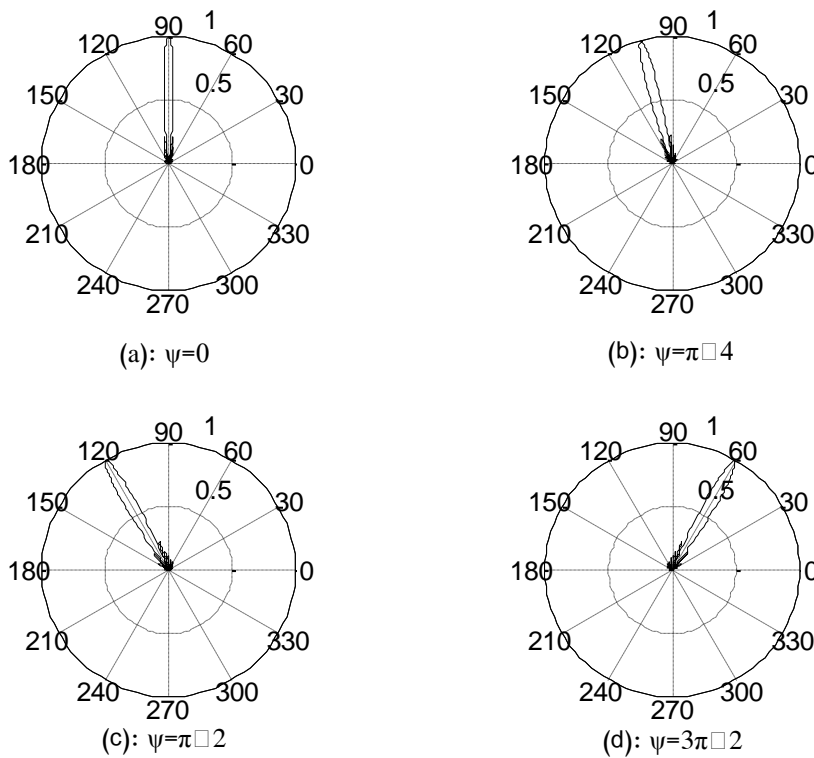
إن  $Af_F$  معامل الهوائي المصفوفي التجزيئي و يختلف عن السابق باختلاف المسافات  $d$  بين عناصر الهوائي.

## النتائج والمناقشة:

بناءً على العلاقة (11) للحقل الكهربائي الكلي للهوائي المصفوفي التجزئي وعلى علاقة الهوائي المصفوفي (10) المدروس سابقاً تم إنشاء برنامج يحاكي كلا من الهوائيين المصفوفين العادي والتجزئي، و يجد قيم كل من الحقل الكهربائي ومعامل الهوائي المصفوفي و المخطط الإشعاعي لكلا الهوائيين. ويقوم بدراسة التغيرات التي تحصل على هذه القيم جراء تغيير بعض المعاملات التجزئية مثل البعد التجزئي  $D$  الذي يتغير بتغير معامل التقسيم  $p$  و درجة التجزئ  $S$  وفي النهاية سنقارن النتائج مع تلك التي تخص الهوائي منتظم المسافات والتغذية. من المعروف أن زيادة عدد عناصر الهوائي المصفوفي الخطي و زيادة المسافة بين هذه العناصر  $d$  تزيد من عدد الفصوص الجانبية للهوائي، و لكن وبنفس الوقت تقلل من زاوية فتحة الإشعاع، و يصبح الهوائي ذا اتجاهية أعلى، الشكل (4) يمثل معامل المصفوفة و المخطط الشعاعي لهوائي مصفوفي منتظم التغذية ذو عدد عناصر ثابت، و لكن بقيمتين مختلفتين لـ  $d$  بحيث النسبة  $d_1 \square d_2 = 2$  نلاحظ أن فتحة الإشعاع قد تغيرت بنفس المقدار تقريباً.

تغير طور تيار التغذية (لاحظ الشكل (5)) لهذا الهوائي سيولد كما هو معروف مخططاً شعاعاً يميل بزاوية ما عن توجيهه الأصلي هذه الظاهرة استغلت من أجل الحصول على مخطط إشعاعي دوار دون الحاجة لدوران الهوائي، وهذا يتطلب دقة عالية في تحديد أطوار التيارات المغذية، أما إذا لم نستخدم الهوائي في الحصول على مخطط شعاعي دوار، فيجب التنويه إلى أن أي تغير في طور التيارات المغذية سوف يغير من اتجاهية الهوائي، و بذلك يفقد الهوائي المصفوفي معامل رئيس و أساسي.

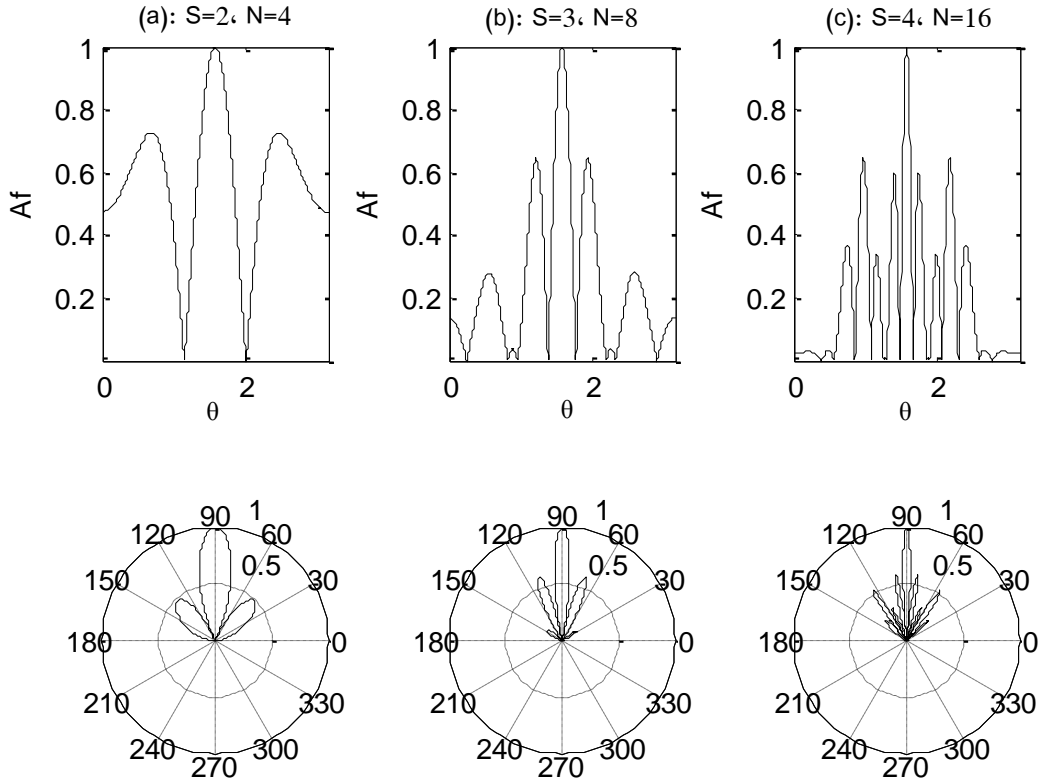




الشكل (5) : المخطط الإشعاعي للهوائي الخطي منتظم المسافات و ذو  $16$  عنصر و مسافة  $2 \lambda$  ، لكن بصفحة تيار متغيرة.

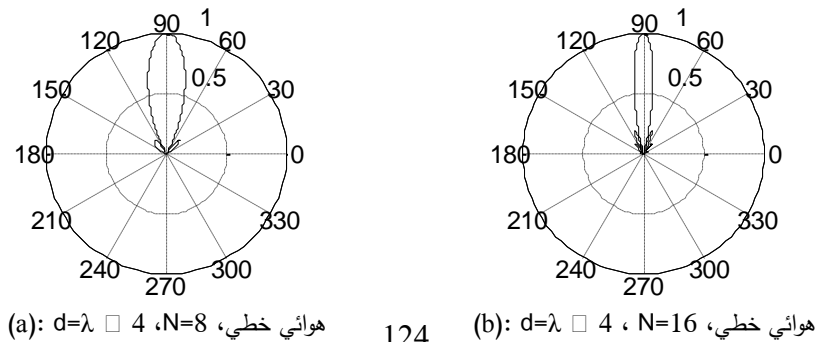
الهوائي المصفوفي التجزيئي يختلف كما رأينا بزيادة درجات الحرية في التصميم بمعنى آخر زيادة معاملات التصميم، و بالتالي الحصول على هوائي ذي ميزات أفضل، فمثلا يمكن تغيير عدد العناصر بزيادة درجة التجزيء  $S$  أو بتغيير البعد التجزيئي  $D$  والذي بدوره يغير المسافات  $d$  بين العناصر. إذا أخذنا هوائي مصفوفي تجزيئي ببعد تجزيئي  $D = \frac{\ln(N)}{\ln(\rho)} = \frac{\ln(2)}{\ln(3)} = 0.63$  هذا يعني أنه في درجة التجزيء الأولى  $S=1$  لدينا عنصران أما في الثانية  $S=2$  لدينا أربعة عناصر مع مسافات متغيرة بين هذه العناصر تتمثل بـ  $d_1$  و  $d_2$  و عند  $S=3$  يصبح عدد العناصر ثمان مع ثلاث مسافات متغيرة  $d_1$  و  $d_2$  و  $d_3$  الذي يحدد هذه المسافات هو البعد التجزيئي  $D$  معامل

المصفوفة و المخطط الإشعاعي الناتجان، يملكان فتحة إشعاع أضيق كلما تعمقنا في درجة التجزئية، و لكن تزداد الفصوص الجانبية الشكل (6) و هذا سنناقشه لاحقاً.



الشكل (6) : معامل المصفوفة و المخطط الإشعاعي للهوائي التجزئي ذو البعد  $=0.63$  و لدرجة التجزئية الثانية والثالثة والرابعة، بصفحة تيار  $\psi=0$ .

بمقارنة الهوائي التجزئي السابق مع الهوائي العادي مع الأخذ بعين الاعتبار نفس عدد العناصر في كل من الهوائيين، ولكن بوجود التوزيع التجزئي للمسافات  $d$  في الهوائي التجزئي، تبين أن المخطط الشعاعي للهوائي ذي المسافات المتغيرة تجزئياً <حوالي يساوي مجموعها مجموع المسافات في الهوائي الخطي> يملك مخططاً إشعاعياً بفتحة إشعاع أضيق، و لكن الفصوص الجانبية أكثر الشكل (7).



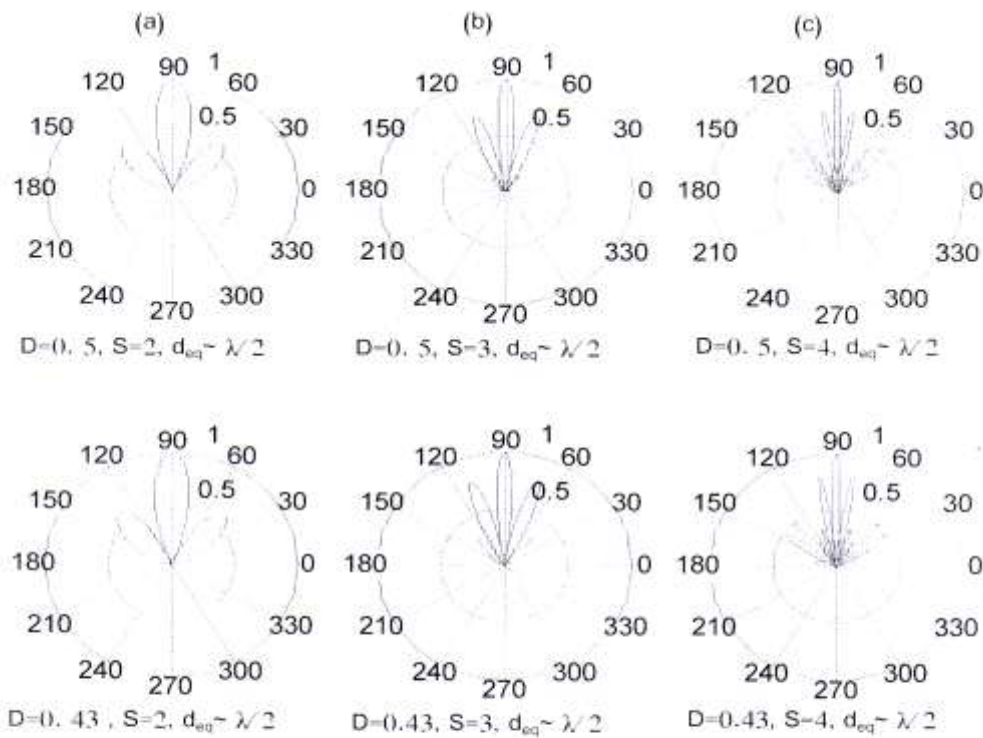
(a): هوائي خطي،  $d=\lambda/4$ ،  $N=8$

124

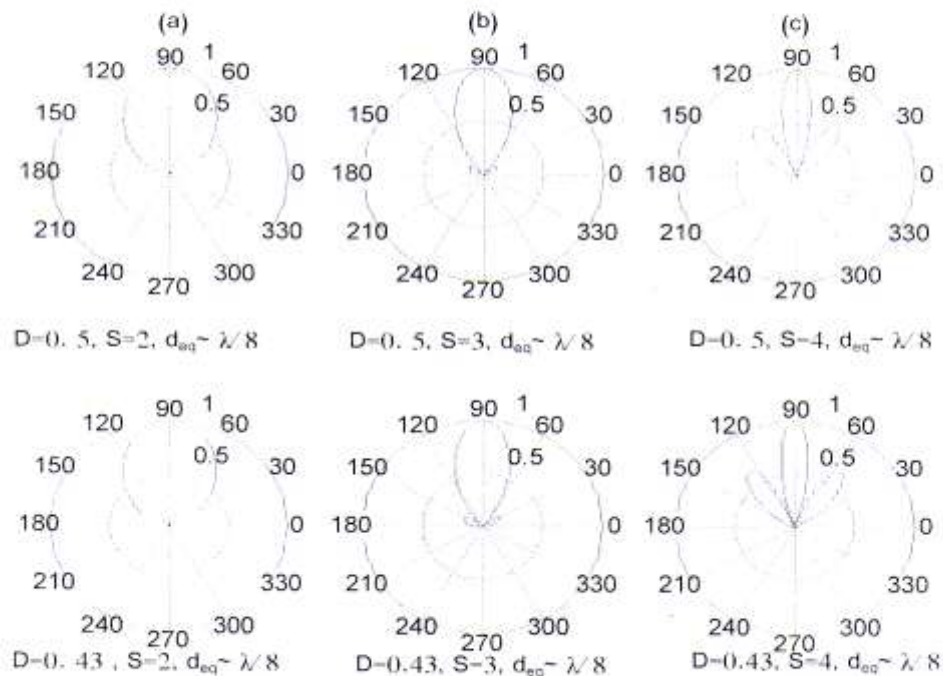
(b): هوائي خطي،  $d=\lambda/4$ ،  $N=16$

زيادة درجة التجزئـة بالحفاظ على نفس البعد التجزئـي يعني مضاعفة عدد العناصر، الذي أدى للحصول على فتحة إشعاع أضيق و لوب إشعاع جانبي أكبر. بالنسبة للفصوص الجانبية هنا يمكن بتغيير بعض عوامل الهوائي التجزئـي العمل على: استغلالها بشكل جيد بحيث تغطي مع اللوب الأساسي مناطق مجاورة للمنطقة الرئيسة المغطاة، و هنا يجب العمل على زيادة استطاعة هذه الفصوص. أو نعمل على التقليل من استطاعة هذه الفصوص بحيث نهمل تأثيرها، و هذا ما نراه بمقارنة الشكل (5، b، c) مع الشكل (6، e، c) حيث غيرنا فقط المسافة بين العناصر بالنسبة للهوائي التجزئـي. بتغيير البعد التجزئـي إلى  $D = \frac{\ln(N)}{\ln(\rho)} = \frac{\ln(2)}{\ln(4)} = 0.5$  سيؤدي ذلك إلى تغيير المسافات بين العناصر، بتغيير الأبعاد هذا حصلنا على مخطط إشعاع بفتحة إشعاع أضيق، و كلما تعمقنا في درجة التجزئـة كلما ضاقت هذه الفتحة، كذلك بالنسبة للهوائي التجزئـي ذي البعد  $D = \frac{\ln(N)}{\ln(\rho)} = \frac{\ln(2)}{\ln(5)} = 0.43$  و هذا ما نراه واضحا بالشكل (8)، هناك بعض الفصوص الثانوية التي يمكن التعامل معها كما رأينا سابقا.

بالنتيجة يمكن ملاحظة أنه بتغيير المسافات  $d_1$  و  $d_2$  و  $d_3 \dots$  و بوجود درجة تجزئـة مناسبة  $S$  و مسافة كلية  $d_{eq}$  بين عناصر الهوائي ككل تعادل أجزاء إما من نصف طوال  $2 \lambda$  أو من ربع طول  $4 \lambda$  يمكن التحكم بالفصوص الجانبية لاحظ الشكل (9).

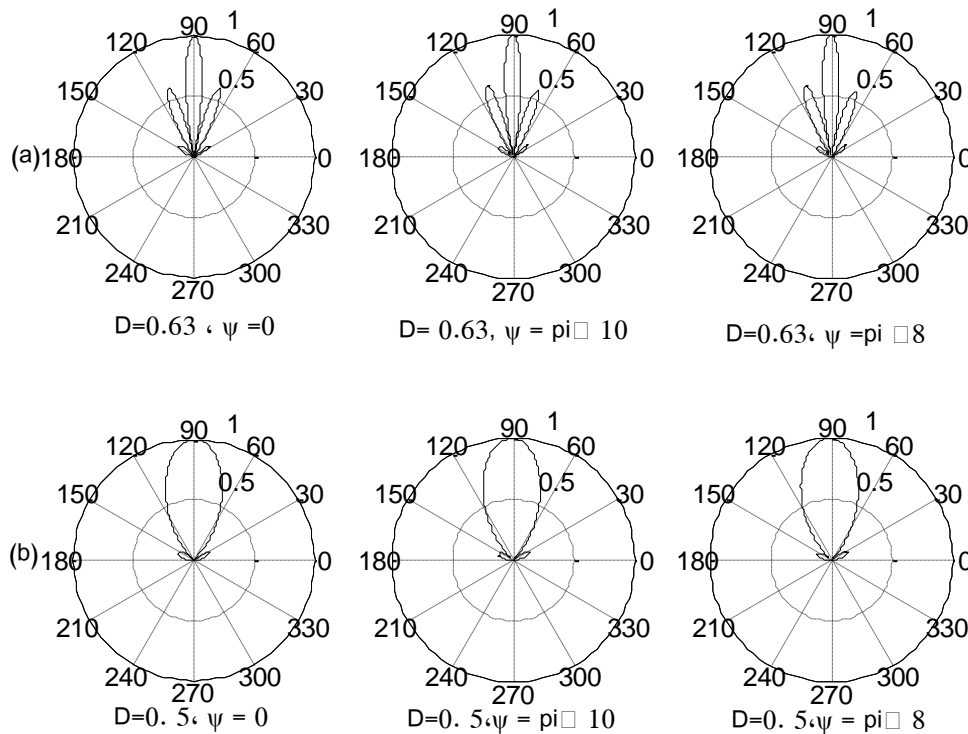


الشكل (8) : المخطط الإشعاعي للهوائيات التجزئية ذو البعد  $D=0.5$  و  $D=0.43$  لدرجة التجزئ الثانية والثالثة والرابعة، بصفحة تيار  $\psi=0$ .



الشكل (9) : المخطط الإشعاعي للهوائيات التجزئية ذو البعد  $D=0.5$  و  $D=0.43$  لدرجة التجزئ الثانية والثالثة والرابعة، بصفحة تيار  $\psi=0$ .

لاحظنا أيضا أن هناك ميزة أخرى تمتلكها الهوائيات الخطية التجزئية، و هي التغيير القليل جدا، والذي يمكن إهماله، بجهة المخطط الإشعاعي الرئيس إذا ما تغيرت صفحة التيار المغذي لعناصر الهوائي بشكل بسيط، إذا الهوائي المصفوفي التجزئي حصين ضد التغيرات في طور التيار المغذي لعناصره كما هو واضح في الشكل (10).



الشكل (10) : المخطط الإشعاعي للهوائي التجزئي ذو البعد  $D=0.63$  و البعد  $D=0.5$

$D$  لدرجة التجزء الثالثة، بصفحة تيار متغيرة.  $d_{eq} \sim \lambda \square 2$  و (a) :  $d_{eq} \sim \lambda \square 8$

### الاستنتاجات والتوصيات:

نستطيع القول إن هذا العمل قد قام بدراسة و مقارنة كل من الهوائيين المصفوفي الخطي و التجزئي بعد إنشاء برنامج بلغة الـ Matlab، تبين من هذه الدراسة أن الهوائي التجزئي يمتلك درجات حرية أكثر (معاملات إضافية من أجل التصميم) من الهوائي الخطي، وبالتالي يمكن الحصول على مواصفات جديدة أفضل و بدقة أكبر باستخدام الهوائيات المصفوفية التجزئية. التعمق أكثر في الهندسة التجزئية و تطبيقاتها و اختيار الجسم التجزئي المناسب يعطي إمكانات جديدة في التصميم، على سبيل المثال لم نناقش في هذا العمل أثر معامل تغير أبعاد الفجوات من أجل بعد تجزئي محدد ودرجة تجزء محددة على تصميم الهوائي و تحديد معاملاته كذلك زيادة عدد القطع في التوزيع الكانتوري، والذي سيغير من البعد التجزئي إذا لدينا معامل آخر يمكن مناقشته وهذا مجال بحثنا الجديد.

## المراجع:

- [1] MANDELBROT ,B,B, *Les Objects Fractals forme Hasard et dimension*, Paris: Flammarion, 1975, 1984, 1989.
- [2] JAGGARD; D.L. X. SUN," *Reflection from fractal Multilayers*," Optics Letters. Vol 15, n°24, 1990, 1428-1430.
- [3] A.D JAGGARD; D.L. JAGGARD," *Scattering from fractal superlattices with variable lacunary*," J. Opt. Soc. Amer. A15, 1998, 1626-1635.
- [4] A.-S. SALEH; H.AUBERT," *Use of variable Lacunarity Multi-gap Cantor Slabs in Waveguides for the Design of Microwave filters*," Microwave and optical technology letters, vol.28, n°2, January 2001, 127-130.
- [5] F.SURRE, A.-S. SALEH; H.AUBERT," *Frequency Response of Self-Similar Planar Waveguides*," Microwave and optical technology letters, vol.37, n°3, may 2003.
- [6] Constant A. BALANIS," *Antenna Theory, Analyses and Design*," Second edition, New York. 1997.
- [7] X.YANG, J. CHIOCHETTI, D. PAPADOPOULOS; L. SUSMAN ," *Fractal Antenna elements and Arrays*," Applied Microwave and Wireless technical Feature, vol.11, may 2000, 34-46.