**طرائق التنبؤ بمخططات الإشعاع للهوائيات الكبيرة المستعملة في البحوث الفضائية  
وعلم الفلك الراديوي**

**السلسلة SA**

**التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية**

**التوصيـة ITU-R  SA.1345-1  
(2010/01)**

**تمهيـد**

يضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد لمدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها.

ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهرتقنية الدولية (ITU‑T/ITU‑R/ISO/IEC) والمشار إليها في الملحق 1 بالقرار ITU-R 1. وترد الاستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en> حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

|  |  |
| --- | --- |
| **سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية**  (يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>) | |
| **السلسلة** | **العنـوان** |
| **BO** البث الساتلي | |
| **BR** التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية | |
| **BS** الخدمة الإذاعية (الصوتية) | |
| **BT** الخدمة الإذاعية (التلفزيونية) | |
| **F** الخدمة الثابتة | |
| **M** الخدمة المتنقلة وخدمة التحديد الراديوي للموقع وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة | |
| **P** انتشار الموجات الراديوية | |
| **RA** علم الفلك الراديوي | |
| **S** الخدمة الثابتة الساتلية | |
| **RS** أنظمة الاستشعار عن بعد | |
| **SA التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية** | |
| **SF** تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة | |
| **SM** إدارة الطيف | |
| **SNG** التجميع الساتلي للأخبار | |
| **TF** إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت | |
| **V** المفردات والمواضيع ذات الصلة | |

|  |
| --- |
| ***ملاحظة****: تمت الموافقة على النسخة الإنكليزية لهذه التوصية الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.* |

*النشر الإلكتروني*جنيف، 2010

© ITU 2010

جميع حقوق النشر محفوظة. لا يمكن استنساخ أي جزء من هذه المنشورة بأي شكل كان ولا بأي وسيلة إلا بإذن خطي من  
الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).

التوصيـة ITU-R  SA.1345-1

طرائق التنبؤ بمخططات الإشعاع للهوائيات الكبيرة   
المستعملة في البحوث الفضائية وعلم الفلك الراديوي

(2010-1998)

مجال التطبيق

تصف هذه التوصية الطرائق المتبعة في التنبؤ بمخططات إشعاع الهوائيات الكبيرة المستعملة في البحوث الفضائية وعلم الفلك الراديوي مع مراعاة آثار تشوهات السطح العاكس في نمذجة مخطط إشعاع الهوائي.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ ) أن الهوائيات العاكسة التي تستعملها خدمتا البحوث الفضائية وعلم الفلك الراديوي تتشابه في كثير من الحالات من حيث كبر حجمها وتشغيلها بترددات تصل إلى عشرات GHz؛

ب) أن اختبارات الهوائي العادية أو قياسات الغرفة العازلة غير وافية نظراً للمسافات الشاسعة التي يتطلبها الحصول على شروط المجال البعيد التقليدية (2*D*2/λ، لكن التنبؤ بمخططات إشعاع الهوائيات الكبيرة جداً يمكن في بعض الحالات التأكد منه من خلال قياسات معايرة؛

ج) أن العديد من المصادر المحتملة للتداخل الناجم عن محطات للأرض في الخدمتين المذكورتين تقع في المجال القريب للهوائي؛

د) أن نماذج دقيقة مع برمجياتها أصبحت متوفرة للتنبؤ بمخططات إشعاع الهوائيات في المجالين القريب والبعيد على حدٍ سواء، إضافة إلى الحالات التي تتضمن تفاعلات مع عاكسات أخرى وعوائق غير مرغوب بها،

توصي

**1** باستعمال الطرائق الواردة في الملحق 1 وفي الشكل المبين أدناه في الحالات التي تتطلب اختيار أكثر تقنيات النمذجة ملائمةً للتنبؤ بمخطط الكسب للهوائيات ذات العاكس الكبيرة:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| الشـكل 1  عاكسات التحليل العاكس | **تقنيات التحليل الموصى بها** | |
| 1345-01  I  II  III  III  IV  قطاع  II  تغذية أو  عاكس فرعي  **عاكس** | قطاع I  عاكس محوري أمامي | بصريات مادية |
| قطاع II  فصوص جانبية بعيدة | نظرية الأغراف الهندسية/نظرية الأغراف الموحدة وطريقة نسبة المجال المستحث |
| قطاع III  الفصوص الخلفية | نظرية الأغراف الهندسية/نظرية الأغراف الموحدة |
| قطاع IV  قطاع محوري خلفي | تيارات حواف متكافئة |

**2** باستعمال الطريقة الواردة في الملحق 2 كدليل لانتقاء الطريقة الأكثر ملاءمة فيما يتعلق بتقنيات النمذجة التي تفترض القياس؛

**3** بمراعاة العوامل التالية في تحديد أهمية الخصائص الميكانيكية للهوائي موضوع النمذجة:

أ ) الانتشار من خلال دعامات التغذية في تحديد مستويات الفص الجانبي؛

ب) فيض الإشعاع المباشر من التغذية؛

ج) تشوهات السطح.

الملحق 1

قابلية تلاؤم مختلف طرائق النمذجة الكهرمغنطيسية للتنبؤ بالكسب   
ونماذج إشعاع الهوائيات الكبيرة

# 1 مقدمة

ثمة عدد كبير في التقنيات المتاحة لحل مشاكل نمذجة الإشعاع الكهرمغنطيسي. ولكل تقنية مزايا بالنسبة لبعض الحالات لكنها قد لا تلائم حالات أخرى. ويستعرض هذا الملحق التقنيات المستخدمة في نمذجة هوائيات ذات عاكس وتستعرض درجة قدرتها على تحليل الهوائيات الكبيرة ذات العاكس والمستخدمة عادة في خدمتي بحوث الفضاء وعلم الفلك الراديوي.

# 2 الطرائق التحليلية والرقمية

## 1.2 طريقة اللحظات

طريقة اللحظات هي تقنية رياضية لحل المعادلات الخطية غير المتجانسة في النمط:

*Lf*  *g* (1)

حيث *L هي عادة عامل خطي تفاضلي تكاملي، والدالتان f وg عناصر في حيز هلبرت. وفي هذه المعادلة تكون g قيمة معروفة، والمطلوب هو تحويل L للحصول على دالة غير معروفة f* *L*–1*g. وتفترض العملية تقنية تحوِّل معادلة المعامل (1) إلى نظام معادلات جبرية خطية. ولهذه الغاية، تتوسع الدالة f لتصبح سلسلة من الدالات الأساسية* {*fn*} مع معاملات ثابتة غير معروفة {*Cn*}. واستبدال هذا التوسع في المعادلة *(1)* وحساب الناتج الداخلي نضرب الحدين في سلسلة دالات اختبار معروفة {*wm*} تعيد المعادلة *(1)* إلى معادلة مصفوفة بسيطة من النوع:

**Ax**  **b** (2)

حيث يمكن استنتاج **A و bمن النواتج الداخلية** *Amn*  〈*wm*, *Lfn*〉, *bm*  〈*wm*, *g*〉 و **xه***و متجه المعاملات غير المعروفة باستعمال طرائق عددية أولية تفضي إلى معرفة* القيمة*f.*

ومن أجل تطبيق هذه التقنية على تحليل العاكس، لا بد من صياغة المسألة على شكل المعادلة (1). ويتم ذلك من خلال تحديد المجال الذي يستحثه الهوائي كعدد صحيح لتيارات السطح غير المعروفة على السطح العاكس. وإذا توفر شرط حدود المجال الكهرمغنطيسي الذي ينعدم فيه مكوّن التماس لشدة المجال الكهربائي عند سطح الموصل التام تنتج معادلة تتعلق بالكثافة السطحية للتيار **J*S*** غير المعروف مشابهة لشكل المعادلة (1):

 (3a)

وهي معادلة فريدهولم التكاملية من الصنف الأول وهنا:

**u***n***:** وحدة متعامدة على السطح

**:** وحدة إثنينية تنتج عن المعادلة 

*G*: دالة غرين العددية في الفضاء الحر وتنتج عن المعادلة:



حيث  *r'*  و *r*هما المسافتان الفاصلتان بين المصدر ونقطتي الرصد على التوالي

**E***i*: المجال الكهربائي الوارد

*k* = 2π/λ0: عدد الموجات في الفضاء الحر.

ويمكن حل المعادلة (3a) بتقسيم السطح إلى أجزاء صغيرة تنتشر الكثافة **J*S في كل منها بوصفها مجموع مكونات تيار في اتجاهين متعامدين. وإلا فيكون من الممكن إعطاء العاكس شكل شبكة معدنية مما يمكن من التعبير عن المجال المنتشر بوصفه متكاملاً وحيد البعد للتيار المتدفق عبر الشبكة. وفيما يتعلق بقطعة سلك رقيق على طول الاتجاه*** *z* ***المحدد بمتجه الوحدة*****u***z* تكون المعادلة المناسبة للشكل 1 على النحو التالي:

 (3b)

حيث العلامة (') تعني المشتقة. ويتيح حل المعادلة (3b) إلى مجموعة دالات أساسية مناسبة تحديد توزيع للتيار المجهول.

ومبدئياً هذه هي الطريقة الأكثر دقة من جميع الطرائق المتبعة في تحليل الانتشار الكهرمغنطيسي. وصيغة المعادلة الأساسية صحيحة، ويمكن الحصول على حلول دقيقة للغاية من خلال الاختيار المناسب للدالات الأساسية ودالات الاختبار. كما أنه يمكن إدراج جميع الدعامات ومصادر التغذية والعاكسات المساعدة والبنى الحاملة في المسألة. ويمكن بنفس الطريقة نمذجة السطوح غير المنتظمة للعاكس. وتجزِّئ الطريقة أساساً البنية الكاملة إلى أجزاء خطية أو مستوية صغيرة، يشتق شرط حدود كل منها مباشرة من معادلات ماكسويل دون قيد أو شرط. وينتج عن ذلك نظام مقترن بمعادلات يُحسب فيه أوتوماتياً التفاعل الكهرمغنطيسي المتبادل بين الأجزاء المذكورة سابقاً. لذلك فإن هذه الطريقة بوسعها التنبؤ بمخطط الهوائي الكامل في جميع نقاط الفضاء مع الأخذ بالحسبان لتأثير دعامة الهوائي والأنظمة الفرعية المتصلة به. وهنا تكمن الصعوبة: فإذا تمثل العاكس بشبكة معدنية مؤلفة من *M قطعة من الأسلاك الحديدية، وتمثل التيار الذي يعبر كلاً من هذه الأسلاك بعدد N من الدالات الأساسية، ينتج عندئذٍ نظام MN من المعادلات الخطية فيها عدداً من القيم المجهولة. ويتطلب تحديد العناصر MN لمصفوفة المعاملات تقديراً رقمياً للتكامل* (*MN*)2. ويلزم عادة من 10 إلى 20 قطعة لطول الموجة الواحدة بمعدل 3 دالات أساسية لكل قطعة من أجل الحصول على تمثيل دقيق للتيارات أي نظام يحتوي على 650 قيمة مجهولة للسطح العاكس المساوي لمربع طول الموجة.

غير أنه يمكن عملياً إدخال بعض التبسيط، ففي حالة العاكسات ذات التناظر المحوري والتغذية البؤرية يمكن الاستفادة من التناظر الدائري لخفض عدد المعاملات المجهولة إلى حدٍ بعيد. كما أن قانون كيرشوف يطبق على نقاط تقاطع الأسلاك من أجل تحديد العلاقات بين الثوابت المجهولة. وفي برنامج الشفرة الكهرمغنطيسية الرقمية (NEC) وهي سلسلة معروفة جيداً ومتداولة تجارياً تستخدم طريقة اللحظات وخاصةً المعادلة (3b)، يتمثل التيار *I*(*z*) في كل قطعة بمجموع الحدود الثلاثة، الحد الثابت وحد الجيب وحد جيب التمام. ويستبعد أحد المعاملات الثلاثة بتطبيق شرط مواصلة الحمولات والتيارات الكهربائية إلى نقاط تقاطع الأسلاك على نحو يلزم فيه تحديد الثابت المتبقي الذي يرتبط به اتساع التيار من خلال طرائق المصفوفة. وكي يكون هذا التمثيل دقيقاً ينبغي أن يقل طول كل قطعة سلك حديدي عن /10، مما يعطي أكثر من 220 قطعة لكل عنصر سطح عاكس لمساحة تساوي مربع طول الموجة.

لنأخذ عاكساً نصف قطره 100؛ في حال عدم وجود تناظر تتطلب هذه الطريقة تحديد حوالي 1,8  مليون عنصر من مصفوفة المعاملات **A ثم تحويل مصفوفة مركبة** 1 340  1 340. كما تؤدي نمذجة العاكسات المساعدة والبنى الحاملة إلى نظام معادلات أهم بكثير. وبصرف النظر عن الوقت CPU تزداد الموارد اللازمة للذاكرة بسرعة تبعاً لحجم العاكس. وتضم الطريقة أيضاً كثافة عالية من الحسابات الحاسوبية ولا تبدو مستدامة للعاكسات ذات الارتفاعات الكهربائية الكبيرة. وعموماً يكون الجسم الأقصى الذي يتيح استخدام هذه الطريقة بنجاح 10، وقد يصل إلى 25 عندما يكون بالإمكان الاستفادة من التناظر الدائري. وتتوسع هذه الحدود دائماً بفضل توفر الحواسيب ذات الاستطاعة الكبيرة، لكن يبدو أنه من غير الممكن اتباع هذه الطريقة في حالة هوائيات العاكسات الكبيرة، على الأقل في المستقبل القريب.

## 2.2 طريقة مجال الفتحة

وتستند طريقة مجال الفتحة إلى النظرية القائلة بأنه إذا كانت *S سطحاً مغلقاً يحتوي على مجموعة منتهية من المصادر* ، يمكن عندئذٍ التعبير عن المجال الناتج عن  في نقطة ما خارج السطح *S على شكل متكاملات لمتجهي المجال* **E***a* و **H***a*في السطح *S حيث a تحيل إلى مكونة التماس. وإذا اختير للسطح S شكل كروي يضم الهوائي، يمكن عند ذلك استعمال جهاز مسح كروي في المجال القريب لقياس الاتساع والطور للقيمتين* **E***a* و **H***a*في كامل السطح *S،* ثم حساب مجال الهوائي في كل نقطة من الفضاء خارج السطح *S.* غير أن قياس المجال القريب في كامل السطح الكروي المحيط بعاكس كبير صعب جداً إن لم يكن مستحيلاً تحقيقه عملياً. والبديل هو تحديد المجالات الكهرمغنطيسية في السطح *S* باستعمال *تقنيات تحليلية، لكن العاكسات المساعدة المركبة غالباً ما تسبب مشاكل عصيبة على الحل وتتطلب استخدام حلول مختلفة تقريبية.*

*ويُعرف أحد هذه الحلول باسم طريقة مجال الفتحة (انظر الشكل* 2a) ويستند إلى الفرضية القائلة بأن تتخذ **E***a* و **H**aقيماً غير معدومة في قطاع منته *S فقط. وهذا مبرر في حالة فئة واسعة من العاكسات المحدبة بؤرية التغذية عند وجود محيط مغلق منته*  يضم جميع الإشعاعات المنعكسة مرآوياً على السطح المشع للعاكس. ويُحدد الإسقاط على طول الإشعاع المنعكس على السطح *S* قطاعاً *A*∈ *S،* يحددهالمحيط** وتحسب فيه**E***a* و **H**aباستعمال قوانين علم البصريات الهندسي باعتبار  
 **E***a*  0 and **H***a* 0 over *S* – *A. ويحدد هذا الشرط انقطاعاً شديداً على* ** غير المتوائم مع قوانين ماكسويل.

ومن أجل مواجهة هذه الصعوبة يجب أن تكون كثافات المحولة الكهربائية والمغنطيسية على طول ** مطابقة لمعادلة المواصلة. وهكذا يعطى المجال الذي ينشره العاكس في العلاقة:

 (4)

حيث:

**u***n*: متجه وحدة خارجي في المسار الذاهب إلى A

*G* :دالة غرين العددية في الفضاء الحر.

وتشكل المعادلة (4) النتيجة الأساسية لطريقة مجال الفتحة وتستخدم على حد السواء في المجال القريب والمجال البعيد خارج السطح *S. وفي قطاع المجال البعيد للهوائي يمكن إدراج بعض عمليات التبسيط سعياً للحد من تعقيد الحسابات المطلوبة بشكل ملموس. غير أن المشكلة الرئيسية لهذه الطريقة تكمن في الانقطاع المحتمل على طول المنحنى* **؛ويمكن حل هذه المشكلة باستعمال عملية مصطنعة تماماً. وإضافة قيم كثافة المحولة الكهربائية والمغنطيسية على طول** تجعل المعادلة متوائمة مع قوانين ماكسويل لكنها لا تحسن أبداً من دقتها. غير أن المعادلة (4) في إطار استعمالها الفعلي، غالباً ما تصبح متكاملة عددية من خلال اختيار صائب للسطح *S* كما يرد في الفقرة3.2. وتعرف هذه المسألة بقدر أكبر في هذا الشكل:

الشـكل 2

طريقة مجال الفتحة



## 3.2 طريقة تكامل الإشعاع العددي/فتحة الإسقاط

إن طريقة فتحة الإسقاط (انظر الشكل 2ب)) هي أساساً تبسيط لطريقة مجال الفتحة موضوع الدراسة في القسم السابق. وينتقى السطح *S* مستوياً غير فئة *P* (يختار في جهة إشعاع العاكس) مغلقاً عند اللانهاية بمحيط لا نهائي جهة المصدر، وهنا يضم الهوائي. ويتلاشى المجال في قطاع المحيط (من منظور شرط الإشعاع) ويتضاءل الحد الأيمن من المعادلة (4) ليكون سطحاً متكاملاً على السطح *P*. ويمكن تحويل ذلك من خلال بضع عمليات رياضية إلى تكامل إشعاع عددي:

 (5)

حيث *F هي مكونة ديكارتية للمجال الكهربائي في الفتحة و*∂/∂*n هو المشتق العادي. ويمكن صياغة المعادلة (5) في شكل أسهل للاستعمال من خلال اختيار مستوى P يطابق المستوى x-y على النحو المبين في الشكل* 2ب) مع مصادر تنحصر في القطاع *z*  0. وذلك يعطي المجال المنتشر *Es* (*x, y, z) في أي نقطة لا على التعيين،* (Q(x, y, z)) مثل:

 (6)

حيث:

*r* :المسافة الفاصلة بين النقطة(ξ, η, 0) في الفتحة وبين نقطة المجال (Q(x, y, z))

**u*s*** :متجه الوحدة للعادي للجبهة الموجبة عند (ξ, η, 0)

**u***r* etc: متجهات الوحدة على طول الاتجاهات التي تشير إليها العلامات ذات الصلة.

وفي المعادلة (6) بترت المتكاملة إلى فتحة منتهية *A*∈ P مع افتراض ضمني بأن (F(, )  0) في المستوى *P – A*، والقطاع *A* هو السطح الذي عدده منحني التقاطع لحدود منطقة ظل الانعكاس مع المستوى *P*.

وفي قطاع المجال البعيد وحسب الاتجاه المحدد في (θ, )، يمكن تبسيط المعادلة (6) إلى:

 (7)

وتعطي المعادلة (7) المتكاملة العددية للأغراف المعروف الذي يعبر عن المجال البعيد بوصفه مكونة التماس للمجال الكهربائي في فتحة مستوية. ويفترض في اشتقاقه أن طول *F يتغير قليلاً في A ولو أن هذا الأمر غالباً ما يهمل.*

*وتستعمل المعادلة* (7) *على نطاق واسع في التنبؤ بمخططات المجال البعيد. ويتحدد مجال الفتحة* (*F* (ξ, η)) باستعمال علم البصريات الهندسي في القطاع الذي تنعكس فيه الأشعة مرآوياً. ويبتر المجال على طول الحد  لمنطقة ظل العاكس وينجم عن ذلك انقطاع في (*F* (ξ, η)) في الحد . وذلك بالطبع غير صحيح في الواقع. غير أن المعادلة (7) *قد استعملت كثيراً في السابق وهي تعطي قيماً صحيحة للمجال في الحزمة الرئيسية وفي الفصوص الجانبية المجاورة.*

وبالإمكان تقييم متكاملة المعادلة (7) في مجال مغلق واضح لفئة هامة من المجالات في الفتحة. ونظراً لافتراض أن *F* تساوي صفراً خارج *A*، ولإمكانية وضع حدود التكامل من – إلى  دون خسارة في الدقة فالمعادلة تتخذ شكل متكاملة فورييه المضاعفة. ويمكن عندئذ استخدام خوارزميات رقمية سريعة مثل متحولة فورييه السريعة (FFT) في التقييم الرقمي.

وهذه الطريقة سريعة نسبياً، وهنالك برامج فعالة تستعملها في كل أنواع هوائيات الفتحة المشعة. وعندما يشكل حرف العاكس محيطاً مستوياً *، يمكن اختيار A لتكون السطح الذي يحدده هذا المحيط. وفي مثل هذه الحالات، يوفر تكامل إشعاع المعادلة (7) فائدة حسابية جلية نسبةً إلى تقديرات علم البصريات المادي (الوارد في الفقرة 4.2) نظراً لأن التكامل في المعادلة (7) يقع في سطح مستو (على خلاف الحالة التي تفترض اختيار نظام ملائم لإحداثيات الخطوط المنحنية للعاكسات المقوسة). ففي المقام الأول، يمكن تقدير تشوهات سطح العاكس الكبيرة من حيث طول الموجة ويحتاج هذا التقدير استخداماً صحيحاً لطرائق علم البصريات الهندسي لأصغر شعاع منحنى أكبر من 5 أطوال الموجة. ويمكن مراعاة آثار الحجب النوعية لفتحة مشعة من خلال تتبع الأشعة. ويمكن إدراج آثار الدعامات في التحليل بواسطة تقنية معروفة مثل نسبة المجال المُستحث* (IFR) *التي يرد وصفها في الفقرة* 6.2. وكما ذكر آنفاً، لا تتيح طريقة إسقاط مجال الفتحة التنبؤ بشكل صحيح إلا بالحزمة الرئيسية والفصوص الجانبية القليلة الأولى، وعند الضرورة بمخطط الإشعاع الكروي الأمامي، ولكنها غير قادرة على التنبؤ بالمخطط متقاطع الاستقطاب بدقة كافية؛ كما يمكن بيان أن الطريقة تعطي مخططات تناظرية حتى في وجود مصدر بيئة   
لا تناظرية. وفي الدراسات الحديثة، ترفق دائماً طريقة إسقاط مجال الفتحة بالتقنيات GTD (الفقرة 5.2).

## 4.2 البصريات المادية

طريقة البصريات المادية(PO) هي أساساً تقنية تقريب تصل تيار سطح موصل مع المجال الكهرمغنطيسي الوارد. والمجال المنتشر **E***s* في قطاع غير محدود الناتج عن مجموعة مصادر التيار الكهربائية والمغنطيسية**J** و **J***m*على التوالي الكامنة داخلحجم فئة *V* يعطى في المعادلة:

 (8)

وإذا انطوى المصدر على مجرد كثافة تيار مُستحث **J**s في سطح موصل تماماً *S* أصبحت المعادلة (8) تكامل السطح في *S*:

 (9)

والمعادلة (9) دقيقة وصالحة في جميع نقاط الفضاء خارج قطاع المصدر (مع المصادر الفعلية تمثل دالة غرين شذوذاً). فهي تتيح تحديد المجال المنتشر في المجالين القريب والبعيد إذا كانت كثافة تيار السطح **J***s* معروفة في كل نقطة من السطح العاكس. لكن قيم كثافة **J***s* غير معروفة للأسف، ويتطلب تحديدها حل مسألة معقدة من قيم الحدود. (وفي الحقيقة تمثل طريقة اللحظات محاولة في هذا الاتجاه.)

وتقدم طريقة البصريات المادية حلاً تقريبياً للتعبير عن الكثافة **J***s* في نقطة ما من سطح العاكس من حيث كثافة المجال المغنطيسي الوارد في هذه النقطة **H***i* بالذات. وتحديداً يفترض أن:

 (10)

حيث **u***n* في متجه الوحدة المتعامد مع السطح *S*. وذلك يفترض تيار كثافة معدومة على أجزاء سطح العاكس التي لا يضيئها المصدر مباشرةً. وليست المعادلة (10) صالحة تماماً إلا في مستو منته موصِّل تماماً. كما أن التوزيع الفعلي للتيار يختلف   
(عن ذلك الوارد في المعادلة (10))، باختلاف الطابع المنتهي وتقوّس العاكس. فإذا كان نصف قطر التقوس كبيراً نسبة لطول الموجة تكون دقة المعادلة (10) كبيرة، باستثناء منطقة الظل وقرب حدودها. ويتيح حساب التيارات الحافية على طول الحدود تحسين الدقة على الرغم من أنها تزيد من تعقيد الحسابات.

وفي قطاع المجال البعيد وباتباع الاتجاه **u***r* ينتج عن تبسيط المعادلة (9):

 (11)

حيث هي الوحدة ثنائية المعامل. والمعادلة (11) هي العلاقة التي تستعمل عادة للمجال البعيد في طريقة البصريات الهندسية المعروفة بالطريقة PO. ووفقاً لوقت الوحدة CPU واحتياجات الذاكرة، تشبه الطريقة PO طريقة مجال الفتحة. لكنها تبدو أكثر دقة وتقدر بصحة قيم الحزمة الرئيسية والفصوص الجانبية القريبة؛ كما تعطي تقديراً أفضل لمخطط الإشعاع متقاطع الاستقطاب. أما التشوهات البسيطة للسطح فيمكن قولبتها بسهولة. كما يمكن إضافة ورود الدعامات ومصادر التغذية والأنظمة الفرعية المختلفة، إذا ما روعيت تياراتها السطحية على التوالي (الناتجة عن المعادلة (10) حسب الطريقة ((PO، لكن دون التفاعلات بين مختلف المصادر؛ وبذلك فإن الآثار المتوقعة لها على الأرجح قيمة نوعية فقط. وتستخدم الطريقة PO عادة في جميع الحالات ما عدا الحالة التي يمكن فيها عرض المجال المشع في فتحة مستوية يقارب حجمها حجم العاكس ذاته، حيث تمثل طريقة مجال الفتحة ميزة كبيرة من حيث سهولة الحساب. وكما في طريقة مجال الفتحة، فإن الطريقة PO حالياً تستعمل دائماً بالتوازي مع تقنيات الانعراج عالية التردد.

## 5.2 نظرية الانعراج الهندسية

نظرية الانعراج الهندسية (GTD) تقنية عالية التردد تناسب دراسة إشعاع الهوائيات الكبيرة من حيث طول الموجة. وكان جوزف كيلير أول من وضع هذه الطريقة باعتبارها امتداداً لطريقة البصريات الهندسية (GO)، وذلك لمراعاة المجالات غير المعدومة والموجودة في مواقع محجوبة. وحصلت هذه النتيجة عند إدراج مجموعة من الأشعة المنعرجة المتماثلة للأشعة المنعكسة التي تنقلها طريقة البصريات الهندسية (GO). وتظهر الأشعة المنعرجة (الشكلان 3 و4) من الحواف والزوايا ومن كل انقطاع مماثل لشعاع انحناء السطح. وبطريقة مماثلة للانتشار وفق قواعد البصريات الهندسية، يشكِّل الانعراج مبدئياً ظاهرة محلية صرفة: أي أن المجال المنعرج لا يرتبط إلا بكثافة المجال الوارد في نقطة الانعراج وبالخصائص الهندسية المحلية لحرف الانعراج.

الشـكل 3

مخروط الانعراج من خط انقطاع

1345

-03



0

مخروط أشعة منعرجة لنصف زاوية فتحة 

مماس مع خط الانقطاع

خط الانقطاع

اتجاه الأشعة الواردة

وينتج المجال المنعكس في الطريقة GO بضرب المجال الوارد في معامل الانعكاس. وبطريقة مماثلة يتحدد المجال المنعرج بضرب المجال الوارد في معامل الانعراج؛ وتعادل قيمة هذا الأخير حلاً مقارباً لمسألة قانونية ملائمة.

الشـكل 4

أشعة مرتبطة بالانعكاس والانعراج في سطح لا يخترق

مصدر

1345

-

04

~

حدود منطقة ظل

الأشعة الواردة

أشعة سطح منعرجة

أشعة حواف منعرجة

حدود منطقة ظل الأشعة المنعكسة

شعاع منعكس

غرض لا يخترق

حدود منطقة ظل السطح

أشعة واردة

شعاع منعكس

تمثل الطريقة GTD وامتداداتها التقنية عالية التردد الأكثر استعمالاً لدراسة المجال الذي يشعه العاكس.

وباتباع هذه الطريقة ينتج المجال المنتشر **E***s* في نقطة ما في الفضاء عن الصيغة:

**E***s*    **E***r*    **E***d*(12)

حيث **E***r* و **E***d* هما المجالان الناتجان عن استعمال الطريقتين GO و GTDعلى التوالي. والمجال GO هو:

 (13)

حيث:

: معامل الانعكاس الثنائي (باستعمال معاملات فرينل للانعكاس من سطح مستو عازل غير محدود)

**E***i* : المجال الوارد في نقطة الانعكاس *QR*

*H* : عامل التباعد الذي يرتبط بأشعة الانحناء الرئيسية لجبهة الموجة الواردة وبأشعة السطح العاكس في النقطة *QR*

*s*: المسافة من النقطة *QR* إلى النقطة المعنية في المجال.

وبطريقة مماثلة يكون المجال المنعرج:

 (14)

حيث:

: معامل الانعراج الثنائي

*L:* عامل التباعد المماثل.

غير أن الصيغة التي حددها كيلير لقيمة  لا تصلح في قطاعات الانتقال المجاورة لحدود ومنطقتي ظل العاكس والسطح وفي السطوح حول البؤرة. وبتخطي هذه الصعوبة، تقترح النظريات "النظامية" القائمة تمثيلاً من خلال دالات ليس فيها انقطاعات في قطاعات الانتقال. وهما النظرية النظامية الهندسية للانعراج (UTD) والنظرية النظامية المقاربة (UAT) اللتان تعطيان قيم  خالية من الحالات الشاذة في قطاعات الانتقال؛ وتستخدمان منذ أكثر من عقدين بنجاح في تنبؤات المجال البعيد. وتضم معاملات الانعراج متكاملات فريسنل التي تقيم بسهولة، وتتوفر بذلك خوارزمية سريعة وفعالة لتحليل العاكسات ذات الأبعاد الكبيرة. أما الحسابات بالطريقة GTD فيستعمل معظم الوقت فعلياً في تحديد موقع نقاط الانعكاس والانعراج في العاكس نسبةً لنقطتي المصدر والمجال. وقد يحتاج ذلك أحياناً في حالة العاكسات المتعددة والأشكال الهندسية المعقدة إلى وقت طويل ولكنه أقل من الوقت المطلوب لحساب متكاملات مضاعفة في سطوح واسعة.

غير أن النظريات "النظامية" لا تصلح في القطاعات قرب البؤرة التي تتحدد بأنها القطاعات التي تتقارب فيها مجموعة الأشعة لشكل نقاط بؤرية أو خطوط بؤرية. وتتيح طريقة التيار المكافئ (ECM) نمذجة هذه المناطق انطلاقاً من الحل الذي توفره الطريقة GTD عن بعد للمناطق قرب البؤرة من أجل تحديد قيمة تيار مكافئ قد يُنتج في هذا الموقع نفس قيم شدة المجال. ثم تستعمل قيمة هذا التيار للاستقطاب الخارجي لقيمة شدة المجال في القطاعات قرب البؤر. ولا تسفر أي من الطرائق  
GTD و UTDو UATو ECMعن نتائج في المناطق التي تتداخل فيها القطاعات قرب البؤرة للطريقة GTD وقطاعات الانتقال؛ لكن يمكن استخدام الطريقة المسماة نظرية الانعراج المادية (PTD)، وهي توسع منتظم لنهج البصريات المادية، على غرار نظرية الانعراج الهندسية التي تشكل امتداداً لطريقة البصريات الهندسية. وتتيح الطريقة PTD تحديد قيم شدة التيارات الكهربائية والمغنطيسية عند الحدود انطلاقاً من قيم شدة مجال البصريات الهندسية المتماسكة مع الحدود؛ ويتطلب تقييم المجال المنعرج إدراج هذه التيارات على طول الحدود. وفي القطاعات التي تستخدم فيها الطريقتان PTD و UTD/UAT معاً، يمكن بيان أن الحدود الرئيسية لصيغ النظريات النظامية تنتج باستعمال الطريقة PTD. غير أن استخدام الطريقة PTD تنطوي على تكامل إضافي على طول الحافة؛ وتشير الحسابات الرقمية إلى أنها لا تحسن من دقة النمذجة مقارنةً بالتقنيات التي تستعمل الطريقة UTD/UAT خارج المناطق التي تتداخل فيها مناطق قرب البؤر حسب الطريقة GTD مع حدود مناطق الظل حسب الطريقة GO.

ومن أهم فوائد الطريقة GO/UTD/UAT أنها تمكِّن من إجراء حساب سريع وتستخدم في سطوح بأشكال غير مستوية تضم حدوداً عشوائية شرط أن تكون أنصاف أقطار انحنائها كبيرة نسبةً لطول الموجة. ويعني ذلك أن حالات السطح الشاذة وتشوهات السطح المحددة تماماً (الناجمة عن آثار الجاذبية، مثلاً) يمكن معالجتها بهذه الطريقة. ويمكن حساب مصادر التغذية والعاكسات الفرعية من خلال أخذ الانعكاسات المتعددة بالحسبان. وفي بعض الحالات يمكن إدراج السطوح الموصلة بشكل غير تام والأوساط العازلة في الدراسة. أما الطريقة  GO/GTDفغير صالحة في السطوح قرب البؤرة ويتعين بالتالي أشكال نمذجة بديلة لهذه القطاعات.

## 6.2 آثار حجب الفتحة وآثار الدعم

يستعرض هذا القسم تقنيات النمذجة المطبقة على آثار حجب الفتحة وآثار الدعم.

إن مصدر تغذية هوائي علم الفلك الراديوي أو البحوث الفضائية والعاكس المساعد إن وجد، إضافة إلى بنى الدعم الميكانيكية المصاحبة وكبلات التغذية قد تسبب حجب بعض القدرة التي قد تصل عادةً إلى فتحة الهوائي. ويبدو أن هذه المشكلة مطروحة بوضوح بمزيد من الحدة في الأنظمة متناظرة المحاور مقارنة بالأنظمة ذات المركز المتخالف. وفي جميع الأحوال تؤدي آثار الحجب هذه إلى انخفاض في درجة أداء الهوائي. وتظهر الآثار المصاحبة في شكل نقص في الكسب وزيادة كبيرة في شدة مجال الفصول الجانبية (على الأقل في بعض الاتجاهات) وتراجع في صفاء استقطاب نظام الهوائي.

ويمكن إدراج آثار الحجب في دراسة مخطط الإشعاع عبر طريقة ما، لا سيما طريقة البصريات المادية أو تكامل الفتحة أو الطريقة GO/UTD.

ويمكن عادة حساب حجب العاكس المساعد ومصدر التغذية من خلال دراسة آثار التظليل البصري على تيارات السطح حسب النظرية PO أو على قيم شدة المجال في الفتحة. وهذا النهج مناسب عموماً نظراً لأنه يتيح لنا تقييم انخفاض الكسب في الحزمة الرئيسية والتغيرات التي تطرأ على الفصوص الجانبية القريبة. كما يمكن طرح شدة مجال الإشعاع المقدر مبدئياً بأقل من قيمته المفصلية من شدة المجال التي ترصد في كل نقطة من الجزء الذي يعاني من الحجب في الموقع. وفي حال اتباع إجراء حسابي يقضي في بعض الاتجاهات باستبدال النهج PO بالنهج GO/UTD، يمكن لإجراء الطرح هذا أن يبقى صالحاً للتطبيق، بفارق واحد هو أن الجزء "غير المحجوب" من مخطط الإشعاع يحسب بالنهج المختلط GO/UTD. وبما أن الحزمة الرئيسية الناجمة عن "المجال المحجوب" أوسع بكثير عادةً من الحزمة الرئيسية لمخطط الإشعاع الكامل، يمكن استخدام الطريقة PO أو طريقة تكامل الفتحة في حساب مخطط الإشعاع المحجوب في قطاعات زاوية أوسع بكثير مما تتيحه الطرائق المقابلة المطبقة على مركز لمخططات إشعاع العاكس الرئيسي. أما الآثار الناجمة عن الدعامات فيمكن أيضاً دراستها بأسلوب مماثل، من خلال دراسة ظواهر الظل البصري مثلاً. وقد يكون هذا النهج فعالاً شريطة أن يكون الجزء العرضاني للدعامة كبيراً من حيث القدرة الكهربائية. وإن لم يتحقق ذلك تظل إمكانية التقديرات الدقيقة ممكنة باستخدام النسبة IFR. فالمفهوم الذي تستند إليه النسبة IFR بسيط. إذ إن مصدر التغذية يضيء بعد الانعكاس على العاكس الرئيسي والدعامات، ثم ينحجب؛ ومجال الإضاءة له طابع موجة مستوية محلياً. أما المرحلة التالية فتتمثل بتحديد الخواص ثنائية الأبعاد (لكل وحدة طول) للانتشار الأمامي لغرض لا متناهي الطول له نفس الجزء العرضاني للدعامة المعرضة للموجة المستوية. وأخيراً يمكن حساب شدة مجال الدعامة الفعلي وخصوصاً مجال الانتشار الأمامي من خلال نقل النتائج لطول الدعامة ووزنها المقابلة للتوزيع المحلي لشدة المجال. وتتيح النسبة IFR تحديد قيمتين متقابلتين لقيمتي الاستقطاب المنفصلتين على التوالي والتي يمكن فيها تفكيك الموجات المستوية الواردة المحلية؛ وتسمح هذه الطريقة بالتالي تقييم الآثار المتصلة بالاستقطاب بسبب الانتشار الناجم عن الدعامة.

والنسبة IFR تساوي القيمة الفعلية للمجال المنتشر الأمامي الناجم عن الدعامة مقسومة على المجال المحجوب الناجم عن الدعامة وفق شروط التظليل التي تحددها قوانين البصريات الهندسية. وحسب التعريف الرسمي تساوي النسبة IFR لغرض اسطواني الشكل يقع في مجال موجة مستوية نسبة المجال المنتشر الأمامي إلى المجال المشع الافتراضي الأمامي الواقع في مجال موجة مستوية يساوي عرضها عرض الظل البصري للجزء العرضاني (الهندسي) للاسطوانة. ويكتسب مفهوم النسبة IFR أهميته من قدرته على تحديد قيمته الفعلية باستعمال تقنيات تحليلية أو رقمية (طريقة اللحظات وطريقة العناصر المنتهية وغيرها) أو حتى تجريبية، مما يتيح التنبؤ بدقة بالآثار الناجمة عن الدعامات. كما يتيح التحديد التحليلي أو الرقمي للنسبة IFR إنجاز العملية الوسيطة وهي تحديد التيارات الفعلية والتيارات المكافئة على سطح الدعامات بحد ذاتها. ونتيجةً لذلك يكون من الممكن نظرياً حساب كامل مخطط الإشعاع المنتشر في شكل مروحي للدعامة. وفي هذه الحالة ينبغي عادة أن تتضمن العملية المذكورة أعلاه نمذجة آثار الحجب والانتشار الناجمة عن الدعامة في قطاع زاوي واسع من مخطط إشعاع الهوائي.

وعندما يتألف سطح العاكس من ألواح، قد يؤثر الانعراج الصادر عن أمكنة الوصل على مخطط الإشعاع وكسب محور التسديد. وتزداد هذه الآثار أهميةً بازدياد تردد التشغيل وينبغي مراعاتها في الهوائيات المخططة للعمل في الترددات الملليمترية. ويمكن استخدام مفهوم الحجب البصري إذا كان التفاوت كبيراً في عرض الموجات الكهربائية، وإلاّ، فبالإمكان تحديد نسبة المجال المستحث بالتيار المغنطيسي (MIFR)، باستعمال نفس الخطوط المعتمدة في تحديد المفهوم التقليدي للنسبة IFR تقريباً.

## 7.2 آثار سطح العاكس

تجري الدراسات الكهرمغنطيسية الصارمة الدقيقة لأنظمة الهوائيات العاكسة عادة في شروط مثالية للسطح ومواقع مصادر التغذية والعاكسات المساعدة والعاكسات الرئيسية، وغيرها. لكن الشروط الفعلية تختلف عموماً عن الشروط المثالية بسبب الخلل في السطح واختلاف تراصف العناصر المختلفة. وتكون هذه الأخطاء عموماً إما محددة وإما عشوائية.

وقد يسهل نسبياً حساب الأخطاء المحددة في صياغة المشكلة. مثال على ذلك، يمكن حساب تشوهات هبوط سطح الهوائيات العاكسة الكبيرة بسبب النقل عند التسديد إلى زوايا الارتفاع المختلفة، والتشوهات الحرارية الناجمة عن تغير درجات الحرارية النهارية، من خلال استعمال سطح محدد رقمياً أو بدالات تحليل مختلفة مثل متعددات الحدود نصف القطرية لزيرنك في حالة العاكسات ذات الفتحة الدائرية، أو دالات الاستقطاب الداخلي بصورة عامة. ويمكن بالتالي استعمال هذه الدالات التي تناسب السطح في الدراسة الرامية لرصد آثار الأخطاء المحددة.

أما أخطاء السطح العشوائية أو شبه العشوائية فهي ناجمة أولاً عن عمليات التصنيع وعن اختلاف تراصف الألواح في حالة استعمال الألواح الصغيرة لصنع عاكسات كبيرة. ولا يمكن تحديد هذه الأخطاء ودراستها ببساطة، لذا يجب تحديدها ودراستها إحصائياً. وتجري عادة تبسيط الأخطاء الإحصائية بشأن السطح إلى صيغة موحدة إحصائية غوسيه للسطح تتميز بمعلمتين هما: جذر المتوسط التربيعي r.m.s لخطأ السطح، σ، وطول الترابط، *C.* وطول ترابط السطح هو مؤشر لكثافة الأخطاء في الفتحة؛ ويكون صغيراً في الأخطاء المتقاربة وكبيراً في الأخطاء المتغيرة ببطء. ويمكن استعمال تقنية التصوير التجسيمي وغيرها من تقنيات القياس من أجل تحديد هاتين المعلمتين بدرجات مختلفة من الدقة ثم تستعمل بعد ذلك في الدراسات الإحصائية لمخطط الناتج.

وأهم الطرائق المعروفة وضعها الدكتور جون روز[[1]](#footnote-1) واستكملها باحثون آخرون. وإذا كان للهوائي العاكس سطحاً يحتوي على خطأ في جذر المتوسط التربيعي σ، ينتج الجذر r.m.s لخطأ الطور في جبهة الموجة التي يعكسها هذا السطح في الصيغة التالية، (مع إهمال تصحيح بسيط ناجم عن انحناء العاكس):

 (15)

وقد وضع روز بعض الفرضيات بشأن الطبيعة المكانية للعلاقة، وبشأن توزيع ترددات أخطاء الطور، ونتج أن قيم الطور مترابطة تماماً في المسافات الصغيرة التي تقل عن 2*C* وغير مترابطة أبداً في المسافات الأطول. إضافةً إلى ذلك تنتج الأطوار المختلفة من عدد كبير من أخطاء الجزر r.m.s، δ، الغوسيه. ثم تحسب متوسط الكسب في أي اتجاه بإضافة كسب العاكس الكامل دون أي أخطاء، *G*0(θ,ϕ)، ينتج في المعادلة (16):

 (16)

حيث Λ*1* هي دالة لَمدا (أو دالة بيسيل المعيارية) من الدرجة الأولى. وهذا هو أبسط شكل للنتيجة القائمة على ما يسمى تقريب الأخطاء. كما استعمل روز وغيره تقديرات أخطاء أكثر دقةً. غير أن هذه التقديرات ذات طابع إحصائي ولا تستخدم إلا في القيم المتوسطة وفي حدود عدد كبير من الهوائيات.

# 3 الاستنتاجات

معظم التقنيات المذكورة في الفقرة 2 قادرة على التنبؤ بدقة بمخططات إشعاع المجال البعيد في مجالات تطبيقها. وبصورة عامة، تكمن أفضل طريقة لرصد الخصائص الكاملة لمخطط إشعاع الهوائي في استعمال عدد من مختلف الطرائق التي يحسن اختيارها. ويمثل الإدراج حسب طريقة البصريات المادية PO الحل الأكثر استعمالاً في دراسة إشعاع هوائيات العاكسات الكبيرة؛ فهي تعطي نتائج دقيقة في الحزمة الرئيسية وفي الفصوص الجانبية القريبة. وتساهم التحسينات المدخلة على حلول البصريات المادية مثل الطريقة GTD وامتداداتها (UTD وغيرها) في توفير وصف كامل لمخططات الإشعاع في جميع الاتجاهات لا سيما المجال في الفتحة العريضة وإشعاع الفصوص الخلفية.

وتستعمل طريقة مجال الفتحة ونظرية الانعراج الهندسية GTD في بعض الحالات التي يمكن فيها جعل السطح S مستوياً. وتضاف الإشعاعات المنعرجة الناتجة عن الطريقة GTD إلى السطح المنتهي *A الذي يختار بحيث تقع F على المحيط ويمكن إهمالها. وينتج عن ذلك دالة متناسقة وثابتة لكامل المستوى بحيث يتيح حساب التكامل في هذا المستوى تحديد مخطط الإشعاع بسرعة في كامل نصف الكرة الأمامي. وإذا كان السطح A أوسع بكثير من الإسقاط المتعامد A' لمصدر التغذية على P، من غير الممكن تطبيق هذه الطريقة لأن تغير طور F خارج A' يزداد سريعاً عند الابتعاد عن الحد. وإذا كانت حافة العاكس مستوية أمكن اختيار السطح A لتغطية العاكس.*

*ويمكن تمثيل فيض مصدر التغذية عن العاكس بمجرد تراكم المجالات، على الرغم من أن تحديداً دقيقاً قرب حدود منطقة الظل يتطلب تطبيق نظرية الانعراج الهندسية. كما يمكن مراعاة آثار حجب العاكس المساعد أو مصدر التغذية من خلال الظل أو الظل المسقط على سطح العاكس الرئيسي. وتستخدم التقنية* IFR في تقدير مساهمات الدعامة لكن استخدامها يقتصر على قيم الإشعاع المقيسة أو على الصيغ القانونية ذات الحل التقريبي أو المضبوط، وقد يتطلب الأمر عملاً إضافياً لتحديد مخططات إشعاع الدعامة في تركيب خاص. ومع ذلك قد توفر الحلول العامة التقريبية تقديرات مقبولة لمستويات الانتشار الناجم عن الدعامة الذي يحدث عادة في زاوية انحراف كبيرة عن محور التسديد (تبعاً لشكل الدعامة). وقد تكون كافية في معظم الحالات. وبإمكان تقنية الإدراج حسب قوانين البصريات المادية أن تراعي تشوهات العاكس أو خلل التراصف لمصدر التغذية والعاكس المساعد. ويمكن تحديد خصائص العاكس بطريقة تجريبية باللجوء إلى القياسات أو بالدراسة الميكانيكية. أما التصوير التجسيمي بالموجات الصغرية وقياسات الزوايا والقياسات بالتصوير فهي تقنيات تشخيص تستخدم في تقييم الحالة الميكانيكية لسطح العاكس وسطوح الأنظمة المصاحبة ومنها موقع مصدر التغذية والعاكس المساعد على النحو المبين في الملحق 2.

وفي العديد من الأنظمة يقع العاكس في المجال القريب لمصدر التغذية أو العاكس المساعد. مما يتطلب تقييماً دقيقاً لمخططات الإشعاع في المجال القريب للمصدر أو لمجموعة المصدر  العاكس المساعد. وقد تتيح طريقة اللحظات (MoM) والتقنيات المختلطة MoM/GTD حلولاً مناسبة.

ويشكل ضم طريقة الإدراج تبعاً للبصريات المادية مع نظرية الانعراج النظامية UTD أو نظرية الانعراج المادية PTD الأداة التحليلية التي يوصي بها لتمثيل مخطط إشعاع هوائيات العاكسات الكبيرة. وتسمح تقنيات التشخيص مثل التصوير التجسيمي والقياس بالتصوير بتحديد الخصائص "الفعلية" للعاكسات.

وتبعاً للخصائص التفصيلية لمنشأة معينة يمكن أيضاً مراعاة آثار البيئة التي يعمل فيها الهوائي. وآثار قبة الرادار والانعكاسات على سطح الأرض وعلى المباني الواضحة المجاورة آثار ينبغي أخذها بالحسبان. وبسبب التعقيدات الواضحة التي يسببها سيناريو بيئة الهوائي المعقدة، يستحسن اعتماد التقنية الأكثر بساطة قدر الإمكان. ويبدو أن الطريقة المستندة إلى نموذج هندسي هي النهج العملي الوحيد لتقييم تفاعل هوائي كبير مع بيئته المباشرة.

ويلخص الشكل 1 والجدول 1 التوصيات. أما مخطط إشعاع العاكس الكبير فموزع على أربعة قطاعات.

|  |  |
| --- | --- |
| القطاع I: | قطاع محوري أمامي |
| القطاع II: | فصوص جانبية بعيدة |
| القطاع III: | فصوص خلفية |
| القطاع IV: | قطاع محوري خلفي. |

ويعرض الجدول 1 الآليات الرئيسية وتقنيات الدراسة الموصى بها.

الجـدول 1

الآليات وتقنيات التحليل في العاكسات الكبيرة

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | الآليات الرئيسية | تقنيات الدراسة |
| القطاع I  القطاع المحوري الأمامي | أداء التغذية/العاكس المساعد  - الشكل العام للهوائي  - تراصف العاكس/التغذية  - تشوهات العاكس | PO |
| القطاع II  الفصوص الجانبية البعيدة | - أداء التغذية/العاكس المساعد  - الشكل العام للهوائي  - انعراج على حافة العاكس  - دعامات | GTD/UTD و IFR |
| القطاع III  الفصوص الخلفية | - انعراج على حافة العاكس | GTD/UTD |
| القطاع IV  قطاع المحور الخلفي | - إضاءة حرف العاكس  - خصائص هندسية لحافة العاكس | التيارات المكافئة عند الحواف |

الملحق 2

**الدراسة استناداًَ إلى بيانات تجريبية**

# 1 مقدمة

يمكن تقدير مخطط إشعاع هوائي تلسكوب راديوي دون اللجوء إلى عمليات نظرية بحتة بل إلى بيانات وسيطة مستمدة من التجارب. ويتم هنا استعراض الطرائق التي تأخذ في الحسبان البيانات التجريبية في الظروف التالية:

- اختبارات في المجال القريب؛

- التصوير التجسيمي بالموجات الصغرية؛

- قياسات المزواة؛

- التصوير المساحي.

ويرد أدناه وصف لكل من هذه التقنيات. وترتبط التقنية الأكثر ملاءمة لأي تطبيق بالظروف المحددة لكل حالة، ولذا يتعذر الإدلاء بتوصية عامة.

# 2 قياسات في المجال القريب

تستند الأسس النظرية لقياسات المجال القريب على نظرية المساحة المحيطة على النحو المعبر عنه في المعادلة (4). الفرق الوحيد هو أن الرمز *A* يستعمل الآن لوصف كامل المساحة *S. وسنلاحظ أنه إذا كانت مجالات التماس في مساحة تغطي الهوائي معروفة، من الممكن عندئذٍ تحديد مخطط إشعاع الهوائي في نقطة ما، غير أن تقييم المجالات في السطح S يستند هنا ليس إلى تقنية نظرية ولكن إلى قياسات مباشرة.*

وتتيح اختبارات المجال القريب التي تجرى في سطح مستوٍ تقييم المجالات المشعة في كامل نصف الكرة تقريباً. ومن ناحية أخرى، تتيح قياسات المجال القريب في سطح اسطواني وخصوصاً في سطح دائري وضع مخططات إشعاع في اتجاهات تغطي معظم كرة الإشعاع أو كاملها.

ويمكن اعتبار الإشعاع فيما يتعلق بالتشكيلات الهندسية النظامية مساوياً للقيمة الناتجة عن تكامل أو جمع التوافقيات الاسطوانية أو الكروية لمكونات أولية لموجة مستوية. وتساعد بعض الخوارزميات الرقمية إجراء جميع العمليات الحسابية بصورة فعالة. غير أن المسائل المرتبطة بقابلية تطبيق القياسات في المجال القريب على وضع مخطط إشعاع هوائي خدمة علم فلك راديوي أو أبحاث فضائية فتعزى إلى أهمية بيانات المجال القريب اللازمة لهذا الغرض فضلاً إلى الصعوبات الملموسة التي تواجه الحصول على بيانات موثوقة. ويحدد فاصل الاعتيان اللازم الكمية المطلوبة من بيانات المجال القريب لتحديد مخطط الإشعاع بصورة دقيقة. وفي حال مسح سطحي ينبغي أن يقل هذا الفاصل عن القيمة /2 أو يساويها. وفي حالة المسح الاسطواني ينبغي أن تقل مسافة الاعتيان حسب محور الاسطوانة عن القيمة /2 أو تساويها، بينما ينبغي أن يكون فاصل الاعتيان الزاوي تبعاً للمقطع العرضاني الدائري أقل من القيمة /(2*R*) المعبر عنها بالراديان أو مساو لها، وفي علاقة تدل فيها *R* على نصف قطر المساحة الاسطوانية المحيطة. وبطريقة مماثلة وفيما يتعلق بمسح كروي في المجال القريب ينبغي أن تكون فواصل الاعتيان الزاوي في زوايا السمت والارتفاع أقل من القيمة /(2*R*) راديان أو مساوية لها.

ومع مراعاة قيم فواصل الاعتيان هذه تظهر الأهمية البالغة لكمية البيانات المطلوبة في المجال القريب، فيما يتعلق بأبعاد الهوائيات المتداولة في خدمتي علم الفلك الراديوي والأبحاث الفضائية. كما أن تطوير أجهزة مناسبة للحصول على بيانات حقيقية في المجال القريب تطرح مشاكل خطيرة سواء على الصعيد الميكانيكي والكهربائي أم على التكلفة. وتعزى هذه الصعوبات إلى درجة الدقة الميكانيكية التي يتطلبها وضع المسبار عند التنقل عبر مسافات كبيرة من أجل اعتيان مجال الهوائي. وعلاوة على ذلك، ينبغي أن يكون مصدر الترددات الراديوية وتجهيزات القياس مستقرة بدرجة كافية (أو أن يكون التعويض عن التراوحات موثوقاً) خلال كامل عملية حيازة البيانات. وقد تؤثر الظروف البيئية بصورة خطيرة على جودة القياسات في المجال القريب. هذه القياسات التي ينبغي إجراؤها لأسباب عملية، في الفضاء الحر.

ولهذه الأسباب مجتمعةً، لا يمكن في الحقيقة التفكير في تحديد متكامل مخطط إشعاع هوائي خدمة علم فلك راديوي أو أبحاث فضائية في المجال القريب. ولكن القياسات في المجال القريب مفيدة في تقييم خصائص الإشعاع في بعض الأنظمة الفرعية الحساسة مثل المصدر الأولي والأجهزة المجمعة التي تضم مصدر تغذية أولياً وعاكسات مساعدة أو الأنظمة الفرعية ذات التغذية البيريكسوبية. ويمكن تطبيق المعلمات الناتجة عن هذه القياسات في دراسة إشعاع الهوائي بالطريقة PO أو GO  GTD.

# 3 التصوير التجسيمي بالموجات الصغرية

يشمل التصوير التجسيمي بالموجات الصغرية قياس خصائص إشعاع الهوائي وتتيح القياسات المعقدة الإضافية فيما بعد استنتاج حالة ملامح العاكس التلسكوبي وتراصفه. كما يتيح التصوير التجسيمي تحديد موقع ودرجة تشوهات السطح. ومن بين المعلومات الإضافية التي توفرها تقنية التصوير التجسيمي، معلومات عن احتمال تغير مكان مصدر التغذية نسبةً لموقعه البؤري الاسمي. وتحقق طريقة التصوير التجسيمي أهدافها عندما تتيح وضع تمثيل دقيق *لتراوحات طور* المجال في فتحة الهوائي. وبعد الحصول على هذه النتيجة، يتيح التحليل الهندسي للإشعاع تفسير تراوحات الطور في الفتحة كمعلومات عن ملامح السطح.

وتبدأ عملية قياس التصوير التجسيمي بتسجيل مخطط الهوائي ليس من حيث الاتساع فحسب بل من حيث الطور أيضاً. ومن أجل ضمان موثوقية بيانات الطور يستعمل عادة هوائي ثانٍ (مرجعي) يبقى ثابتاً طوال مدة القياسات. ويسجل مخطط الإشعاع في اللحظة التي يضيء فيها مصدر بعيد أو قريب الهوائي. وفي هذه الحالة، يصحح التوزيع الناتج للطور المراقب في الفتحة من أجل مراعاة خطأ الطور التربيعي الناجم عن التباعد بين المصدر والهوائي.

ويمكن أن تكون المصادر الأرضية مصادر محمولة على متن سوائل مستقرة بالنسبة إلى الأرض أو مصادر كونية بإشعاعات موجات صغرية. وهذان النوعان الأخيران مفيدان للغاية لإجراء بيانات تصوير تجسيمي لمخططات الهوائيات لأنها تحقق قياسات في زوايا ارتفاع قريبة من تلك المتصلة بالتشغيل الحقيقي لهوائي خدمة علم فلك راديوي أو أبحاث فضائية. كما أن آثار التشوهات الناجمة عن الجاذبية الأرضية تتخذ قيماً أقرب للواقع بكثير مقارنةً بحالة استعمال المصادر الأرضية. وتقدم قياسات التصوير التجسيمي التي تستعمل مصادر إشعاع فضائية نسبةً إلى استعمال مصادر كونية، مزية توفير قياسات تضم نسبة الإشارة إلى الضوضاء بصورة هامة. غير أنه من الضروري استعمال خوارزميات التعويض عن حركة السوائل طوال مدة القياسات ويجب عادة استعمال مستقبلات مصممة خصيصاً لذلك.

وبعد تسجيل مخطط الإشعاع، تستعمل علاقات متحولة فورييه لحساب قيم المجال في الفتحة. وتفرض نظرية الاعتيان تسجيل مخطط الإشعاع حسب الاتجاهات المختارة على انفصال مع فاصل اعتيان δ*UV* في الفضاء *U*-*V* (*U*  sin θ cos ,*V*  sin θ sin ) من قبيل:

*UV*  /*D* (17)

حيث *D* هو قطر الهوائي. وتتيح نظرية متحولة فورييه إثبات أنه في حال استعمال جدول *N*  *N* للقياسات في الفضاء *U*-*V*، يمكن الحصول على توزيع في الفتحة باستعمال استبانة البيكسل التالية:

 (18)

وتعادل قيمتا الاتساع والطور الناتجتان للبيكسل الواحد قيماً متوسطة لهاتين المعلمتين في المجال المراقب في السطح المعني. وهذا نتيجة الآثار التلافيفية الناجمة عن جزءٍ مبثورٍ من مخطط الإشعاع قبل معالجته. ولذا لا يمكن للتصوير التجسيمي أن يعطي سوى *قيم متوسطة* وليس معطيات دقيقة بهدف تحديد مظهر سطح الهوائي.

وتتيح تقنية تسوية معادلات بيانات الطور في الفتحة تصحيح أخطاء حتمية مثل التشوهات الناجمة عن الجاذبية الأرضية أو التشوهات العامة بتأثير درجة الحرارة فضلاً عن الخلل الناجم عن تغير مكان محاور وجوانب المصدر المشع الرئيسي. وما يتبقى بعد استبعاد مختلف العوامل هذه يعزى إلى تشوه شبه عشوائي لمظهر السطح. وتعزى عموماً هذه التشوهات العشوائية إلى أخطاء في التصنيع، أو إلى أخطاء في تراصف اللوحات، في حال وجودها. وفي الحالة الأخيرة يمكن استخدام البيانات المجمعة عن السطح في تحسين تراصف اللوحات التي تكوّن سطح العاكس. وفي جميع الحالات تتميز الخواص الإحصائية لسطح الهوائي عادةً بالقيمة ، أي متوسط القيمة التربيعية لانحراف السطح الفعلي نسبةً إلى مظهر عاكس محدد (مكافئ عموماً). والقيمة  التي يمكن تحديدها دون لبس بواسطة قياسات التصوير التجسيمي ترتبط بعدد من العوامل، منها طول موجة التشغيل ونسبة الإشارة إلى الضوضاء ومدى مخطط الإشعاع المسجل وأخطاء استقرار الطور في الأنظمة المستقبلية، إلى ما غير ذلك. وتدل القياسات العملية على أن القيم *D*/ الأكثر ارتفاعاً التي يمكن تحقيقها وقياسها بصورة موثوقة تقع بحدود 250 000.

وبعد جمع بيانات التصوير التجسيمي المتعلقة بالهوائي، يمكن وضع علاقات تحليلية لسطح العاكس باستعمال دالات الاستكمال المقطع ومتعددات حدود زيرنيك وغيرها. وهنا تكمن أساساً أهمية قياسات التصوير التجسيمي بوصفه أداة لنمذجة مخطط الإشعاع. ويمكن عندئذٍ ربط الوصف التحليلي للسطح بأي تقنية أخرى PO)أو + PO PTD أو (GO  GTD من أجل تحديد مخطط الإشعاع في القطاعات الزاوية التي لا تشملها العملية الأولية في قياسات التصوير التجسيمي أو لترددات مختلفة عن تلك المستعملة في نفس العملية. وبسبب ظواهر التلافيف المذكورة آنفاً يتحتم فقدان بعض المعلومات المتعلقة بتغيرات مظهر السطح. وبعبارة أخرى ليس الوصف المستخدم للسطح بالضرورة دقيقاً تماماً. وقد ينتج بالتالي بعض اللبس من حيث دقة مستوى الإشعاع المفترض في الفصوص الجانبية البعيدة. غير أن هذه النتائج ليست سيئة، فمستوى شدة المجال في الفصوص الجانبية البعيدة جداً ترتبط في الحقيقة ارتباطاً وثيقاً بدقة النموذج النظري للخصائص الهندسية لحافة العاكس وبمستوى الإضاءة.

بيد أن طريقة التصوير التجسيمي قد لا تنجح تماماً في توفير البيانات المطلوبة في حالة هوائي متعدد العاكسات. وفي هذه الحالة هنالك مهمة غاية في الدقة تنطوي على جميع بيانات الطور في الفتحة الناتجة عن القياسات بصورة صحيحة ودون لبس من جهة أو من جهة أخرى الأخطاء الحتمية أو العشوائية التي تؤثر على مظهر العاكس الرئيسي أو العاكس (العاكسات) المساعد (المساعدة).

وفي ضوء الاعتبارات الواردة آنفاً، فإن اللجوء إلى قياسات التصوير التجسيمي بالموجات الصغرية غير مفيد عادة إذا كان المطلوب مجرد تقييم خصائص تشغيل هوائي بالترددات الراديوية، وليس تحديد أخطاء المظهر التي ينجم عنها انحطاط النوعية. ومع ذلك يمكن استعمال هذه التقنية لقياس إشعاع الهوائي على مسافة متوسطة واستنتاج قيمة المجال البعيد.

# 4 قياسات المزواة

تستند قياسات المزواة، شأنها شأن قياسات التصوير المساحي التي سترد لاحقاً، إلى قوانين علم البصريات الذي يستخدم الطبيعة الهندسية للانتشار البصري. وذلك من أجل تحديد الإحداثيات الفراغية لنقاط التسديد (الأهداف). ويمكن تثبيت هذه الأهداف على سطح العاكس الرئيسي أو العاكس المساعد أو بنية الدعم أو الدعائم أو حتى للمنشأ الأولي للهوائي.

والمزواة أساساً أداة لقياس زاويتي الارتفاع والسمت عند تسديدها باتجاه الهدف. وهنالك متغيران رئيسيان لقياسات المزواة:

- طريقة المزواة والشريط؛

- التثليث باستعمال عدة محطات للمزواة.

وتكمن طريقة المزواة والشريط في التعبير عن إحداثيات نقطة ما في نظام إحداثيات مرتبط بالمزواة. فالأداة بحد ذاتها تقيس الزاويتين القطبيتين لهدف ما. ويمكن قياس المسافة نصف القطرية للهدف نسبةً إلى نقطة مرجعية للمزواة بواسطة إما شريط قياس معدني وإما شعاع ليزر لقياس المسافات.

ويفترض أن يعاير الجهاز المكون من المزواة وشريط القياس مسبقاً. كما قد تشكل المواقع غير السمتية مشكلة: فالجاذبية تؤثر بالواقع تأثيراً سلبياً على الأداة البصرية عندما تكون هذه الأخيرة مائلة (كما هي الحالة عند تركيبها على العاكس)، لذا ينبغي أن تكون مصممة خصيصاً لهذا الغرض.

وفيما يتعلق بالتثليث في محطات متعددة للمزواة، يتم مسح الأهداف في جهازين أو أكثر (من 2 إلى 4 عادة) يركبان في مكانين مختلفين من الجزء الأمامي للهوائي. ويقتصر المسح في هذه المرحلة على قياسات زاوية. ويمكن تحديد نظام عالمي للإحداثيات يتيح إعطاء الإحداثيات الزاوية لأي هدف كان ودون لبس؛ وينبغي بالتالي أن يكون الموقع الدقيق لكل محطة مزواة معروفاً تماماً مسبقاً. وهذه المرحلة هي مرحلة المعايرة (وهي دائماً أول عملية في سلسلة قياسات المزواة) وتنطوي أساساً على تحديد نقاط معروفة مثل طرفي نقطة أو أطراف قضبان أو غيرها.

وتعتمد دقة قياس أنظمة المزواة بالطبع على دقة الأداة. وتضمن المزواة الرقمية عالية الدقة حالياً مستويات خطأ ضئيلة جداً تبلغ حوالي arc 0,5 في الثانية. وبالتالي تتوقف الدقة النهائية للقياس بالمزواة بصورة رئيسية على دقة المعايرة أكثر من دقة القياس بحد ذاته. وتبلغ الدقة الحاصلة من القياسات الفعلية التي يعبر عنها بالنسبة *D*/ التي ورد تعريفها أعلاه،  باستعمال محطتي مزواة و باستعمال أربع محطات.

# 5 التصوير المساحي على مسافة قصيرة

التصوير المساحي هي تقنية الحصول على معلومات هندسية عن غرض ما من خلال قياس صورته الفوتوغرافية. كما تنطوي هذه العملية على تعريف عدد من النقاط المستهدفة في بنية الهوائي. ويتم تصوير الهوائي في عدة اتجاهات بواسطة أجهزة تصوير فوتوغرافي متخصصة، بحيث تظهر النقاط المستهدفة في عدة صور. ويعبر عن الإحداثيات السينية والعينية لصورة ما في نظام إحداثيات اللوحة الفوتوغرافية. وتتيح معادلات الإسقاط فيما بعد جمع إحداثيات صورة هدف معين مع الإحداثيات الحقيقية ثلاثية الأبعاد التي يعبر عنها نظام إحداثيات عالمي. ومجموعة المعادلات المتصلة بسائر الأهداف والصور هي نقطة انطلاق عملية تثليث التصوير المساحي.

وتعتمد معادلات الإسقاط لكل هدف بمجموعة من المعلمات (معلمات الإسقاط) الثابتة لكل صورة. ويسعى طور المعايرة إلى تحديد هذه الثوابت. ويمكن إجراء المعايرة وفق عملية مماثلة لتلك المستخدمة في معايرة القياسات بالمزواة، أي بتحديد عدد من النقاط المرجعية. غير أن الإمكانية التي توفرها تقنية التصوير المساحي لرصد عدد من النقاط في صورة واحدة تتيح الشروع بعملية معايرة أخرى موازية لعملية تحديد الموقع الحقيقي للهدف. ومبدئياً تفضي إمكانية تسجيل هدف معين في عدد من الصور إلى الحصول على نظام محدد يمكن حله باستعمال طرائق المربعات الأقل. وتتيح هذه الطريقة معرفة معلمات الإسقاط من خلال حل نظام محدود من المعادلات واستنتاج إحداثيات النقاط الأهداف من ذلك؛ وتعرف هذه الطريقة باسم طريقة الحزم.

وثمة تشابه بين الطريقة القائمة على نظام قياسات بتعدد المزواة وتقنية التصوير المساحي؛ إذ إن كل منهما تستعمل التثليث لتحديد إحداثيات الهدف. لكن ثمة فرقاً هاماً بينهما يكمن في أن تقنية التصوير المساحي لا تتطلب تحديداً دقيقاً لوضعية محطة الأدوات. إذ يمكن تحديدها استناداً إلى قياسات تجرى بما أنه في موقع المحطة المرجعي يفترض دائماً أن الأشعة التي تكون صورة الأهداف في صورة ما هي نقطية المركز.

ويكون التصوير المساحي أدق كلما ازداد عدد الصور؛ كما أنه يسهل إظهار عدد أكبر من النقاط ومن مواقع أكثر عدداً مقارنة بقياسات المزواة. والتصوير المساحي "سريع" جداً، وذلك مهم في حال وجود معلمات ترتبط بالوقت، الأمر الذي غالباً ما يكون. (وينبغي أن تجرى القياسات الميكانيكية التي تتعلق بالهوائيات الكبيرة ليلاً وبغطاء كاف من السحب لضمان درجة حرارة ثابتة). وهذه الفوائد، إذا ما أضيفت إلى قوة عملية المعايرة المذكورة أعلاه، تجعل من التصوير المساحي تقنية تحديد إحداثيات بدرجة أعلى دقة من تلك التي توفرها قياسات المزواة. وكثيراً ما يتيح التصوير المساحي بلوغ دقة النسبة *D*/ تعادل ، بينما يمكن تماماً الحصول على قيم قدرها  و إذا ما أجري كشف تصوير مساحي شديد الدقة لهوائي كبير. يمكن، نظراً لأن الهوائي خلال القياسات يميل عملياً عادة أفقياً، هنالك خطر ظهور تشوهات غير عادية جراء الجاذبية الأرضية.

وبما أن التصوير المساحي يسمح بإظهار عدد كبير من النقاط، يمكن ملاحظة نتيجة أفضل في التعبير عن سطح العاكس الرئيسي أو العاكس المساعد للهوائي مقارنةً بتقنيات القياس الأخرى. وقد تعطي معالجة هذه البيانات باستعمال طريقة ما، مثل PO أو GO  GTD، تقديراً حسناً لمخطط الإشعاع في قطاع زاوي كبير.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

1. RUZE, J. [April 1966] Antenna tolerance theory – A Review. *Proc. IEEE*, Vol. 54, **4**, p. 633-640. [↑](#footnote-ref-1)