

التوصية ITU-R M.1851-2 (2023/12)

السلسلة M: الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي
وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة

نماذج رياضية لمخططات هوائيات أنظمة الرادارات
في خدمة الاستدلال الراديوي وأنظمة الخدمة
المتنقلة للطيران يتعين استخدامها في الدراسة
التحليلية للتداخل



تمهيد

يوظف 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 مدى 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 الكهروتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في القرار ITU-R 1. وترد الاستثمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني <https://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 <https://www.itu.int/pub/R-REC/ar>)

العنوان	السلسلة
البث الساتلي	BO
التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية	BR
الخدمة الإذاعية (الصوتية)	BS
الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)	BT
الخدمة الثابتة	F
الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة	M
انتشار الموجات الراديوية	P
علم الفلك الراديوي	RA
أنظمة الاستشعار عن بُعد	RS
الخدمة الثابتة الساتلية	S
التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية	SA
تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة	SF
إدارة الطيف	SM
التجميع الساتلي للأخبار	SNG
إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت	TF
المفردات والمواضيع ذات الصلة	V

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

النشر الإلكتروني
جنيف، 2025

© ITU 2025

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).

التوصية ITU-R M.1851-2

نماذج رياضية لمخططات هوائيات أنظمة الرادارات في خدمة الاستدلال الراديوي وأنظمة الخدمة المتنقلة للطيران يتعين استخدامها في الدراسة التحليلية للتداخل

(2023-2018-2009)

مجال التطبيق

تصف هذه التوصية نماذج رياضية لمخططات هوائيات أنظمة الرادارات في خدمة الاستدلال الراديوي وأنظمة الخدمة المتنقلة للطيران يتعين استخدامها في الدراسات التحليلية للتداخل بنوعية التداخل وحيد المصدر والتداخل المجمع. واعتماداً على هوائي ذي عرض حزمة 3 dB وسوية الذروة الأولى للفصوص الجانبية، أمكن اختيار المجموعة المناسبة من المعادلات لكل من مخططي السمات والارتفاع. وتحدد هذه التوصية كذلك تعريف مخططات الذروة، بالنسبة لمسبب تداخل وحيد المصدر، والمخططات المتوسطة، بالنسبة لمسببات تداخل متعدد المصادر.

مصطلحات أساسية

مخططات هوائيات، توزيع التيار، مجال الإضاءة، معادلات مخططات القناع الذروي والمتوسط

المختصرات/المسرد

3-D ثلاثي الأبعاد (Three dimensional)

ADP مخطط اتجاهية الهوائي (Antenna directivity pattern)

CSC² قاطع التمام التربيعي (Cosecant squared)

SLL مستوى الفص الجانبي (Sidelobe level)

توصيات قطاع الاتصالات الراديوية ذات الصلة

التوصية ITU-R F.699 - مخططات الإشعاع المرجعية لهوائيات الأنظمة اللاسلكية الثابتة التي يجب استعمالها في دراسات التنسيق وفي تقييم التداخل في مدى الترددات من 100 MHz إلى 86 GHz

التوصية ITU-R F.1245 - النموذج الرياضي لمخططات الإشعاع المتوسطة وذات الصلة من أجل هوائيات الأنظمة اللاسلكية الثابتة من نقطة إلى نقطة للاستعمال في تقييم التداخلات في مدى الترددات من 1 إلى 86 GHz

التوصية ITU-R M.1638 - الخصائص ومعايير الحماية المطبقة في دراسات التشارك المتعلقة برادارات التحديد الراديوي للموقع (باستثناء رادارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض) ورادارات الملاحة الراديوية للطيران العاملة في نطاقات الترددات ما بين 5 250 و 5 850 MHz

التوصية ITU-R M.1652 - اختبار دينامية التردد (DFS) في أنظمة النفاذ اللاسلكي بما فيها الشبكات المحلية الراديوية لأغراض حماية خدمة الاستدلال الراديوي في النطاق 5 GHz

التوصية ITU-R M.1849 - الجوانب التقنية والتشغيلية لرادارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أن نموذجاً رياضياً يعد لازماً من أجل إجراء المخططات المعممة للهوائيات المعدة للدراسات التحليلية للتداخل عندما لا يتوفر أي مخطط محدد لأنظمة الرادارات في خدمة الاستدلال الراديوي وأنظمة الخدمة المتنقلة للطيران،

وإذ تدرك

أن هذه النماذج الرياضية قد لا تنطبق على جميع أنظمة الاستدلال الراديوي وأنظمة الخدمة المتنقلة للطيران، مثلاً على بعض مخططات هوائي أنظمة القياس عن بُعد في الخدمة المتنقلة للطيران،

توصي

- 1 بأنه ينبغي، إذا ما توفرت مخططات الهوائي و/أو معادلات المخططات المقيسة واجبة التطبيق على أنظمة الرادارات في خدمة الاستدلال الراديوي أو أنظمة الخدمة المتنقلة للطيران ضمن توصيات أو تقارير لقطاع الاتصالات الراديوية، استعمال تلك المخططات أو المعادلات؛
- 2 بأنه ينبغي، في غياب معلومات تتعلق بمخططات هوائيات الأنظمة المعنية للرادارات في خدمة الاستدلال الراديوي أو أنظمة الخدمة المتنقلة للطيران، استعمال أحد النماذج الرياضية المرجعية للهوائيات الموصوفة في الملحق 1 وذلك لأغراض تحليل التداخل؛
- 3 بأنه، فيما يتعلق بالهوائيات ذات الصفائف مرتبة الأطوار، إذا لم تتوفر معلومات تتعلق بتصميمها المادي (الهندسة، عدد العناصر، المباعدة بين العناصر، مخطط إشعاع العنصر الوحيد، الكسب)، ينبغي عندئذ استعمال مخططات الهوائي لنماذج الهوائيات ذات الصفائف مرتبة الأطوار الواردة في الملحق 1؛
- 4 بأنه، فيما يتعلق بالهوائيات ذات الصفائف مرتبة الأطوار، إذا لم تتوفر معلومات تتعلق بتصميمها المادي، ينبغي عندئذ أن تُستعمل مخططات الهوائي ذي الفتحة المستطيلة أو الهوائي ذات المصدر الخطي، على النحو المبين في الملحق 1؛
- 5 بأن تفضّل، إن توفرت، مخططات الهوائيات المقيسة التي تمثل هوائي أنظمة الرادارات في خدمة الاستدلال الراديوي أو أنظمة الخدمة المتنقلة للطيران لإجراء تحليلات التداخل.

الملحق 1

نماذج رياضية لمخططات هوائيات أنظمة الرادارات في خدمة الاستدلال الراديوي
وأنظمة الخدمة المتنقلة للطيران يتعين استخدامها في الدراسات التحليلية للتداخل
جدول المحتويات

الصفحة

4	.....	مقدمة	1
5	.....	الصيغ الرياضية	2
5	.....	1.2 الهوائي ذو الفتحة المستطيلة	
5	.....	1.1.2 خلفية	
6	.....	2.1.2 معادلات الهوائي النظرية	
12	.....	3.1.2 إجراء تحديد القناع	
14	.....	2.2 الهوائي ذو مخطط الارتفاع على شكل قاطع التمام التربيعي	
19	.....	3.2 المخططات النظرية والأقنعة لمختلف مخططات إشعاع الهوائيات	
22	.....	4.2 اختيار مخطط الهوائي للنماذج بدون استخدام قواعد	
23	.....	مقارنة مخططات الهوائي	3
23	.....	الهوائي المكافئ ذو الفتحة الدائرية بتناقص تدريجي	4
23	.....	1.4 استعمال هوائي مكافئ ووصف مخططه	
26	.....	2.4 إجراء حساب غلاف الفصوص الجانبية	
30	.....	3.4 اختيار مخطط الهوائي للنماذج بدون استعمال القاعدة	
30	.....	تقريب المخططات ثلاثية الأبعاد (3-D)	5
33	.....	مخططات هوائيات الصفيح مرتب الأقطار	6
33	.....	1.6 صفيح الهوائيات الخطي مرتب الأقطار	
36	.....	2.6 صفيح الهوائيات المستوي مرتب الأقطار	
38	.....	كفاءة الهوائي	7
39	.....	أمثلة عن مخططات مقيسة	8

1 مقدمة

لا بد من إيجاد نموذج رياضي معمم لمخططات هوائيات أنظمة الرادارات في خدمة الاستدلال الراديوي وأنظمة الخدمة المتنقلة للطيران عندما لا يتوفر لهذه المخططات أي تعريف ضمن توصيات قطاع الاتصالات الراديوية واجبة التطبيق على نظام الرادار في خدمة الاستدلال الراديوي ونظام الخدمة المتنقلة للطيران قيد التحليل. ويمكن استعمال النماذج المعممة لمخططات الهوائيات في الدراسات التحليلية التي تخص مداخل مسببات التداخل وحيد المصدر ومتعدد المصادر، من قبيل التداخل الصادر عن الأنظمة الأخرى للرادارات والاتصالات.

ويصف هذا الملحق المخططات المقترحة للهوائيات والتي يتعين استخدامها. وإذا ما عرفت، على نحو مسبق، المعلومات بشأن عرض حزمة الهوائي وسوية الذروة الأولى للفصوص الجانبية، أمكن اختيار المجموعة المناسبة من المعادلات واجبة الاستعمال لكل من مخططي السمات والارتفاع.

ويسجل الجدول 1 نتائج مديات معلمات الهوائيات النمطية استناداً إلى توصيات قطاع الاتصالات الراديوية.

الجدول 1

الحدود النمطية لمعلمات هوائيات الرادارات في خدمة الاستدلال الراديوي

القيمة القصوى	القيمة الدنيا	الوصف	الوحدات	معلمة الهوائي
33 400	420		MHz	ترددات الإرسال والاستقبال
		أفقي، رأسي، دائري		نمط استقطاب الهوائي
		صفيح عنصر ياغي، عاكس مكافئ، صفيح هوائيات مرتبة الأطوار		نمط الهوائي
		مروحي، حزمة نقطية، حزمة بقاطع التمام التريبي		نمط الحزمة - الأكثر شيوعاً
54	25,6		dBi	كسب الإرسال والاستقبال
5,75	0,25	حزمة نقطية		عرض الحزمة في الارتفاع (-3 dB)
(θ_3) 3,6 (θ_{Max}) 44	(θ_3) 3,6 (θ_{Max}) 20	حزمة بقاطع التمام التريبي (CSC^2) (المعادلتان (22) و(23) والجدولان 7 و8)	بالدرجات	
5,75	0,4	حزمة نقطية	بالدرجات	عرض الحزمة في السمات (-3 dB)
90+	60-		بالدرجات	حد زاوية المسح في الارتفاع
360	30 قطعاً		بالدرجات	حد زاوية المسح في السمات
15,6-	35-		dB	السوية الأولى للفصوص الجانبية الأدنى من ذروة الفص الرئيسي

تم استخدام الجدول 1 من أجل الاسترشاد به في تطوير الأنماط والمخططات المقترحة للهوائيات.

2 الصيغ الرياضية

1.2 الهوائي ذو الفتحة المستطيلة

1.1.2 خلفية

يمكن استعمال نماذج أدق لمخططات الهوائي عندما تتاح معلومات عن شكل توزيع التيار أو مجال الإضاءة عند فتحة الهوائي. ولتبسيط التحليل، يعتبر التوزيع الحالي للهوائي بصفته دالة تعتمد على إحداثيات الارتفاع أو السمات. ويتم الحصول على مخطط الاتجاهية، $F(\mu)$ ، لتوزيع معين انطلاقاً من التحويل المنتهي لفوريي (Fourier) وفقاً للتالي:

$$(1) \quad F(\mu) = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} f(x) \cdot e^{j\mu x} dx$$

حيث:

$f(x)$: الشكل النسبي لتوزيع المجال، انظر الجدولين 2 و 4 والشكل 1

$$\mu = \pi \left(\frac{l}{\lambda} \right) \sin(\alpha) = \text{معلمة متاحة في الجدول أدناه كالتالي}$$

l : الطول الكلي للفتحة

λ : طول الموجة

ω : ارتفاع الحزمة أو زاوية تسديد (مسح) السمات نسبة إلى الفتحة العادية

θ : زاوية اتجاه النقطة المعنية نسبة إلى الفتحة العادية

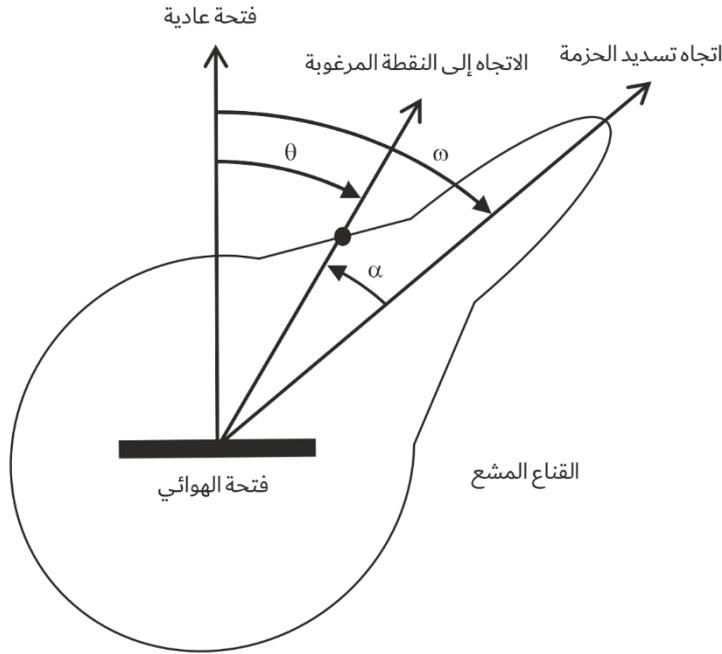
α : زاوية اتجاه النقطة المعنية نسبة إلى اتجاه زاوية التسديد ($\alpha = \theta - \omega$)

x : المسافة المقيّسة على طول الفتحة: $-1 \leq x \leq 1$

z : الترميز للأعداد المركبة.

الشكل 1

قناع مخطط قطبي للهوائي



M.1851-01

يقدم الجدولان 2 و 4 المخططات النظرية المقترحة للهوائيات ذات توزيع مجال الطور المنتظم.

وتقدّم المعلمات والصيغ التي يتعين استخدامها من أجل تحديد مخططات اتجاهية الهوائيات (ADP) في الجدولين 2 و 4 (ثم بعد ذلك في الجداول والأشكال ذات الصلة)، مع مراعاة أن اتساع المجال عند حافة فتحة الهوائي لا يساوي الصفر عموماً.

ويوصى بأقنعة فصوصي أو متوسطة لإجراء دراسات التشارك والتوافق مع أنظمة الرادارات وأنظمة الخدمة المتنقلة للطيران، مع مصدر واحد أو عدة مصادر للتداخل، على التوالي. ويبدأ القناع عند نقطة القطع المستقاة من المخطط النظري ويتناقص عبر الفصوص الجانبية وصولاً إلى قناع أساسي يمثل الفصوص الجانبية البعيدة والفصوص الخلفية.

وإذا ما توفرت مخططات هوائيات رادارات فعلية، فينبغي عندئذ رقيمتها واستخدامها.

2.1.2 معادلات الهوائي النظرية

ترد معادلات مخططات الاتجاهية المقيّسة والمعلمات المرتبطة بها في الجدولين 2 و 3 لمختلف توزيعات المجال بحيث التمام عند فتحة الهوائي مع مراعاة سوية قاعدة C. والقاعدة هي سوية تُحسب على حواف الهوائي عند تقييس توزيع الاتساع. ويشار إلى زاوية المسح بالمعلمة ω . وتشير θ_3 إلى عرض حزمة الهوائي عند نصف القدرة (بالدرجات). وتشير SLL إلى سوية الفصوص الجانبية الأولى الأدنى من الحزمة الرئيسية، بالديسيبل (dB). ومديات سويات الفصوص الجانبية لكل من توزيعات الاتساع ($n = 0$ أو 1 أو 2) مبيّنة في عمود "مدى سويات الفصوص الجانبية الأولى الأدنى من الذروة المقيّسة للفص الرئيسي (dB)" في الجدول 2 فيما يتعلق بنموذج استعمال القاعدة. وترد في الجدول 4 مخططات الاتجاهية المقيّسة والمعلمات المرتبطة بها فيما يتعلق بالحالة التي لا تُستخدم فيها القاعدة.

والفرق بين هذين النموذجين هو أن النموذج الأول (الجدولان 2 و 3) يمكن أن يعطي أي سوية للفصوص الجانبية في المدى من -13,2 dB إلى -40 dB، بينما يعطي النموذج الثاني قيماً محددة لسويات الفصوص الجانبية -13,2 dB، -23 dB، -32 dB، -40 dB و -47 dB. كما أن النموذج الثاني يعطي غلظاً تنازلياً للفصوص الجانبية أكثر حدة بالمقارنة مع النموذج الأول.

الجدول 2

المعلومات النظرية لاتجاهية الهوائيات ذات الفتحة المستطيلة

رقم المعادلة	مدى سويات الفصوص الجانبية الأولى الأدنى من ذروة الفص الرئيسي (dB)	μ (بالراديان) بدلالة θ_3 (بالدرجات)	θ_3 : عرض الحزمة عند نصف القدرة (بالدرجات)	المعامل K (°)	مخطط الاتجاهية $F(\mu)$ (μ بالراديان)	الشكل النسبي لتوزيع المجال $f(x)$ مع استعمال القاعدة C حيث: $-1 \leq x \leq 1$
(2)	13,2-	$\frac{\pi \cdot K \cdot \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	$K \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	50,8	$\frac{\sin(\mu)}{\mu}$	منتظم
(3)	13,2- إلى 22,7-	$\frac{\pi \cdot K \cdot \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	$K \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	المعادلة (6)	$\frac{C \frac{\sin \mu}{\mu} + (1 - C) \frac{2}{\pi} \frac{\cos \mu}{1 - \left(\frac{2\mu}{\pi}\right)^2}}{C + (1 - C) \frac{2}{\pi}}$	$C + (1 - C) \cos\left(\frac{\pi x}{2}\right)$ (تُستمد C من المعادلة (5))
(4)	22,7- إلى 40-	$\frac{\pi \cdot K \cdot \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	$K \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	المعادلة (8)	$\frac{C \frac{\sin \mu}{\mu} + \frac{(1 - C)}{2\mu} \frac{\sin \mu}{1 - \left(\frac{\mu}{\pi}\right)^2}}{C + \frac{(1 - C)}{2}}$	$C + (1 - C) \cos^2\left(\frac{\pi x}{2}\right)$ (تُستمد C من المعادلة (7))

الجدول 3

جدول اختيار معلمات الهوائي ذي الفتحة المستطيلة (تناقص تدريجي لجيب التمام)

عامل عرض النطاق K (°)	القاعدة C	مدى المستويات القصوى للفصوص الجانبية الأدنى من الذروة المقيسة للفص الجانبي الرئيسي (dB)	توزيع جيب التمام مرفوعاً للأس n
50,8	—	13,2-	0
$K = -0.0117(SLL + 22.7)^3 + 0.217(SLL + 22.7)^2 - 2.46(SLL + 22.7) + 64.2$ (6)	$C = 0.0007(SLL + 22.7)^3 - 0.006(SLL + 22.7)^2 + 0.09(SLL + 22.7) + 0.1$ (5)	13,2- إلى 22,7-	1
$K = -0.0013(SLL + 40)^3 + 0.018(SLL + 40)^2 - 0.79(SLL + 40) + 73$ (8)	$C = 0.0056(SLL + 40)^3 - 0.04(SLL + 40)^2 + 1.1(SLL + 40) + 9.9$ (7)	22,7- إلى 40-	2

الجدول 4

المعلمات النظرية لاتجاهية الهوائي ذي الفتحة المستطيلة أو المصدر الخطي بدون استعمال القاعدة

رقم المعادلة	السوية الأولى للفصوص الجانبية الأدنى من ذروة الفص الرئيسي (dB)	μ (بالراديان) بدلالة θ_3 (بالدرجات)	θ_3 : عرض الحزمة عند نصف القدرة (بالدرجات)	مخطط الاتجاهية $F(\mu)$ (بالراديان)	الشكل النسبي لتوزيع المجال $f(x)$ مع استعمال القاعدة حيث: $-1 \leq x \leq 1$
(9)	13.2-	$\frac{\pi \times 50.8 \times \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	$50.8 \left(\frac{\lambda}{l}\right)$	$\frac{\sin(\mu)}{\mu}$	منتظم
(10)	23-	$\frac{\pi \times 68.8 \times \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	$68.8 \left(\frac{\lambda}{l}\right)$	$\frac{\pi}{2} \left[\frac{\cos(\mu)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]$	$\cos\left(\frac{\pi x}{2}\right)$
(11)	32-	$\frac{\pi \times 83.2 \times \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	$83.2 \left(\frac{\lambda}{l}\right)$	$\frac{\pi^2}{2 \cdot \mu} \left[\frac{\sin(\mu)}{\left(\pi^2 - \mu^2\right)} \right]$	$\cos^2\left(\frac{\pi x}{2}\right)$
(12)	40-	$\frac{\pi \times 95 \times \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	$95 \left(\frac{\lambda}{l}\right)$	$\frac{3\pi \cos(\mu)}{8} \left[\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} - \frac{1}{\left(\frac{3\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]$	$\cos^3(\pi^*x/2)$
(13)	47-	$\frac{\pi \times 106 \times \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	$106 \left(\frac{\lambda}{l}\right)$	$\frac{3\pi^4 \sin(\mu)}{2\mu(\mu^2 - \pi^2)(\mu^2 - 4\pi^2)}$	$\cos^4(\pi^*x/2)$

ويمكن الحصول على المخطط ثلاثي الأبعاد (3-D) بالطريقة التالية، بالوحدات الخطية:

$$(14) \quad G_{3D} = G_1(\theta_1) \times G_2(\theta_2)$$

أو بالديسيبل (dB):

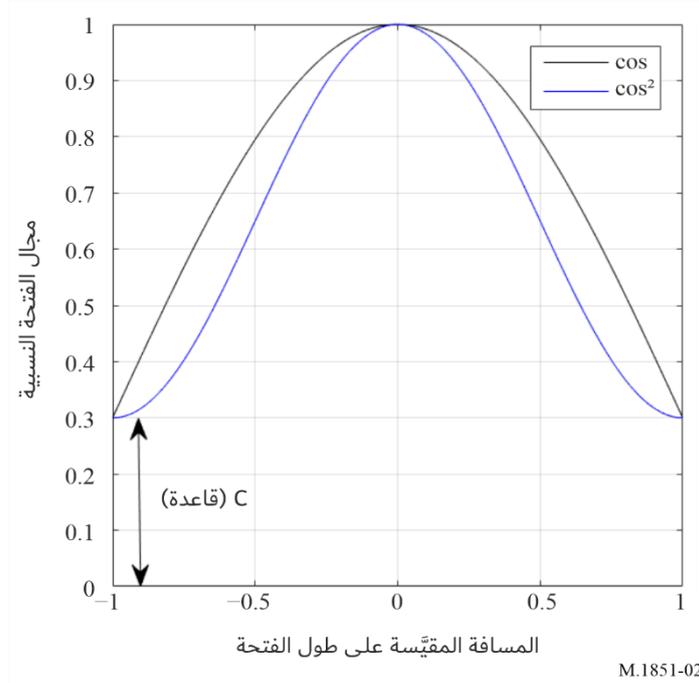
$$(15) \quad G_{3D,dB} = G_{1,dB}(\theta_1) + G_{2,dB}(\theta_2)$$

حيث G_{3D} و G_1 و G_2 هي معاملات مقيسة، و G_1 و G_2 هما مخطط إشعاع الهوائي في المستويين E و H، و θ_1 و θ_2 هما زاويتا الارتفاع في هذين المستويين.

ويمثل الشكلان 2 و 3 على التوالي الرسوم البيانية للأشكال النسبية لمختلف دالات توزيع المجال $f(x)$ بجيب التمام مع استعمال القاعدة، على النحو المعرّف في الجدول 2، وبدون استعمال القاعدة، على النحو المعرّف في الجدول 4.

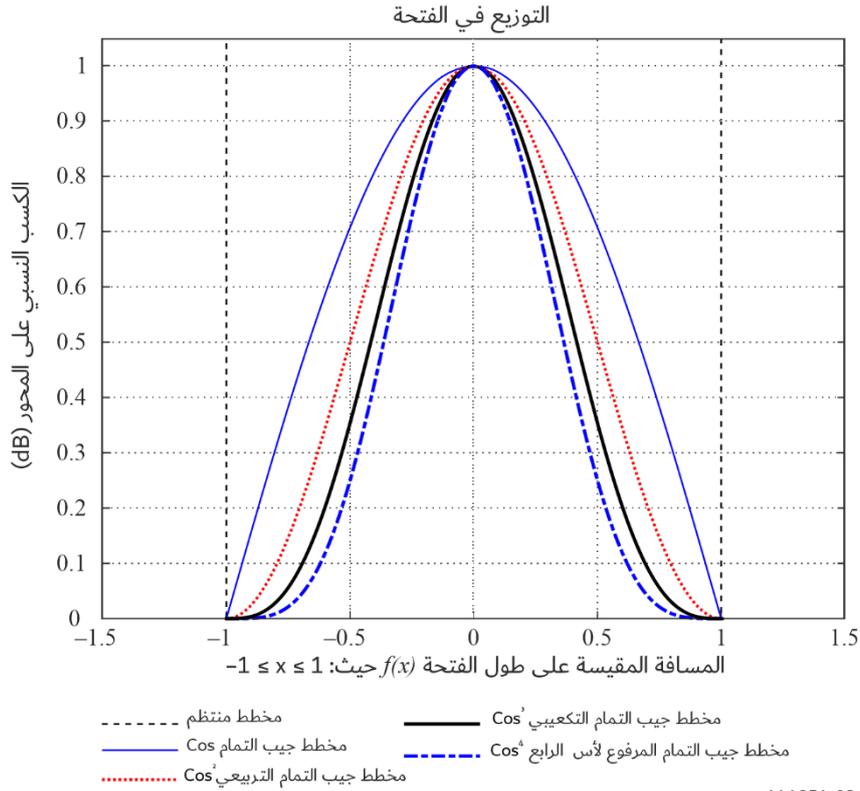
الشكل 2

التوزيعات في الفتحة مع استعمال القاعدة



الشكل 3

التوزيعات في الفتحة بدون استعمال القاعدة

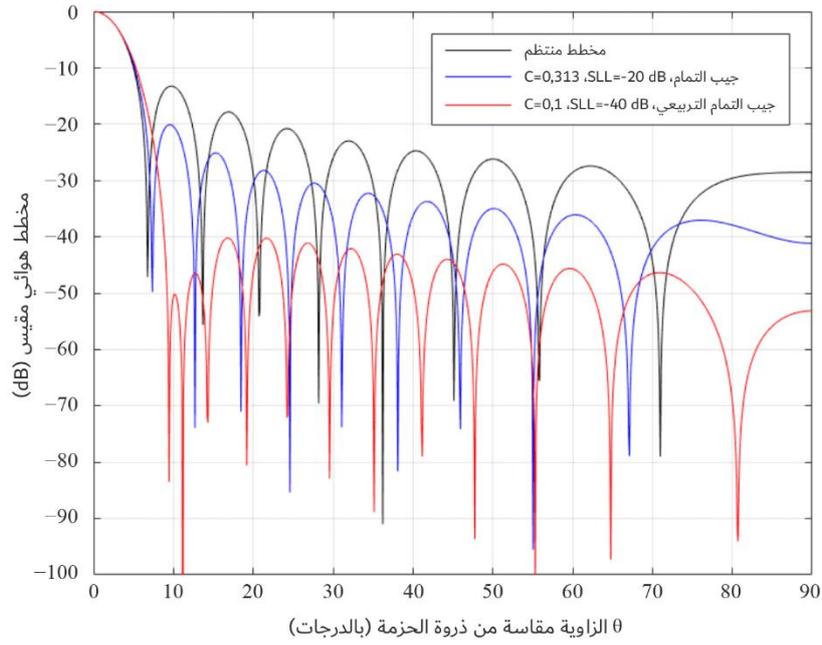


ولما كان عرض الحزمة عند نصف القدرة، θ_3 ، متاحة، فإن قيمة μ يمكن إعادة تعريفها بدلالة عرض حزمة الهوائي عند نصف القدرة. ويمكن إنجاز ذلك بواسطة الاستعاضة عن الكمية $(\frac{l}{\lambda})$ الواردة في المعادلة $\mu = \pi (\frac{l}{\lambda}) \sin(\theta)$ بثابت μ (عامل عرض الحزمة) يعتمد على الشكل النسبي لتوزيع المجال؛ مع قسمته على عرض الحزمة عند نصف القدرة، θ_3 ، على النحو المبين في الجدول 2. وترد تقديرات عامل عرض الحزمة في الجدولين 2 و 4؛ ويمكن اشتقاق هذه القيم بوضع المعادلة $F(\mu) = -3 \text{ dB}$ ، وتحديد الزاوية θ .

ويعرض الشكل 4 مختلف مخططات الهوائي ذي الفتحة المستطيلة من أجل دالات توزيع المجال المنتظم وبجيب التمام (COS) وجيب التمام التربيعي (COS^2) مع استعمال القاعدة. ويعرض الشكل 5 مختلف مخططات الهوائي ذي الفتحة المستطيلة من أجل دالات توزيع المجال المنتظم وبجيب التمام (COS) وجيب التمام التربيعي (COS^2) وجيب التمام التكعيبي (COS^3) وجيب التمام المرفوع للأس الرابع (COS^4) بدون استعمال القاعدة. وبما أن المخططات متماثلة رياضياً، فقد رُسمت بشكل جزئي في المخطط. ولأغراض المقارنة، ضُبِطت جميع المخططات على نفس عرض الحزمة عند 3 dB البالغ 6,0 درجات، ما يعني أن النسبة λ/l يمكن أن تأخذ قيمةً مختلفة.

الشكل 4

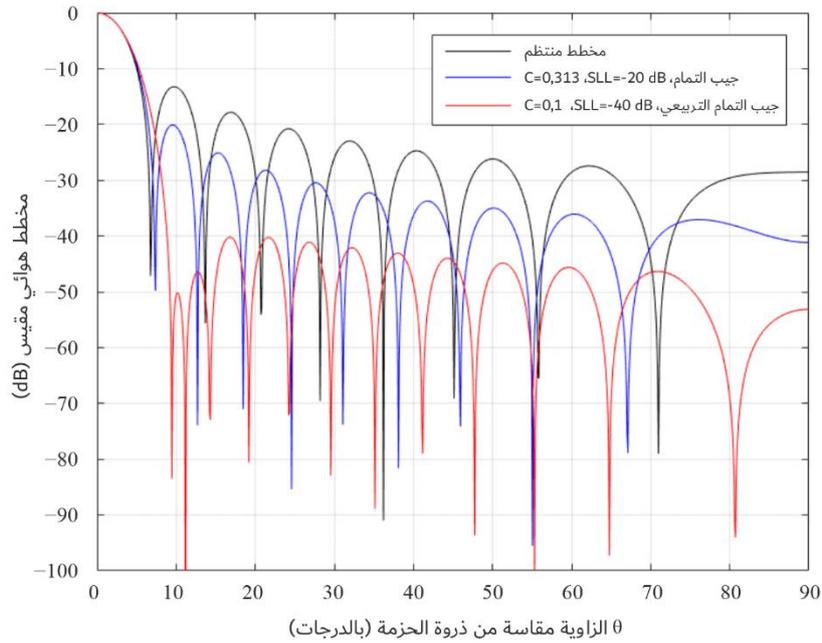
مقارنة مخططات الهوائي لمختلف التوزيعات في الفتحة المستطيلة مع استعمال القاعدة، حيث عرض الحزمة عند 3 dB يبلغ 6,0 درجات (تمثل المخطط)



M.1851-04

الشكل 5

مقارنة مخططات الهوائي لمختلف التوزيعات في الفتحة المستطيلة بدون استعمال القاعدة، حيث عرض الحزمة عند 3 dB يبلغ 6,0 درجات (تمثل المخطط)



M.1851-05

3.1.2 إجراء تحديد القناع

استناداً إلى الشكلين 4 و 5 أعلاه، يتم اشتقاق معادلات القناع باستخدام منحني متوافق مع السويات الذرورية للفصوص الجانبية للهوائي. وقد ثبت، بمقارنة تكامل المخطط النظري والمخطط المقترح للقناع، أن الفرق بين القدرة الذرورية والمتوسطة في انقطاع واحد على مستوى رئيسي يساوي حوالي 4 dB. ويتوجب تطبيق التعاريف التالية:

- تحويل المعادلات من (2) إلى (13) إلى قيم بالديسيبل (dB) باستخدام التالي: $(|Normalized Pattern|) \times 20$ ؛
- تقييس كسب مخططات الهوائي بالنسبة للأسلوب بدون استعمال القاعدة المبين في الجدول 4. أما توزيع المجال المنتظم فلا يستلزم التقييس، وأما بالنسبة لجيب التمام فطرح القيمة: -3,92 dB، وبالنسبة لجيب التمام التربيعي فطرح القيمة: -6,02 dB، وبالنسبة لجيب التمام التكميلي فطرح القيمة: -7,44 dB، وبالنسبة لجيب التمام المرفوع إلى الأس الرابع فطرح القيمة -8,52 dB (انظر الجدول 6)؛ والأسلوب المبين في الجدول 2 لا يستلزم التقييس؛
- من أجل رسم مخطط القناع، استخدم المخطط النظري للاتجاهية استناداً إلى الجدول 2 بالنسبة للنماذج مع استعمال القاعدة واستناداً إلى الجدول 4 بالنسبة للنماذج بدون استعمال القاعدة، على النحو المبين في الخطوتين السابقتين، حتى تصل إلى نقطة الانقطاع إما بالنسبة للمخطط الذروي أو المتوسط للهوائي، حسب ما يقتضيه الحال. وبعد نقطة الانقطاع، طبق مخطط القناع على النحو المبين في الجدول 5 بالنسبة للنماذج مع استعمال القاعدة وفي الجدول 6 بالنسبة للنماذج بدون استعمال القاعدة؛
- قناع المخطط الذروي هو مخطط الهوائي الذي يمر فوق ذروات الفصوص الجانبية. ويتعين استخدام هذا القناع بالنسبة لمسبب التداخل وحيد المدخل؛
- قناع المخطط المتوسط هو مخطط الهوائي الذي يقارب القيمة التكاملية للمخطط النظري. ويتعين استخدامه لمسببات التداخل المجمع متعدد المصادر؛
- نقطة انقطاع قناع المخطط الذروي هي النقطة التي تقع في اتساع المخطط (dB) وتكون أدنى من الكسب الأقصى حيث يتعد شكل المخطط من المخطط النظري إلى المخطط الذروي للقناع، على النحو المبين في الشكل 6؛
- نقطة انقطاع قناع المخطط المتوسط هي النقطة التي تقع في اتساع المخطط (dB) وتكون أدنى من الكسب الأقصى حيث يتعد شكل المخطط من المخطط النظري إلى المخطط المتوسط للقناع، على النحو المبين في الشكل 6؛
- المعلمة θ_3 هي عرض حزمة الهوائي عند 3 dB (بالدرجات)؛
- المعلمة θ هي الزاوية الموجودة إما في التقاطعات على المستويين الرئيسيين للارتفاع (المستوى الرأسي) أو للسمت (المستوى الأفقي) (بالدرجات)؛
- القناع المتوسط هو القناع الذروي بعد طرح 4 dB. ولاحظ أن نقاط انقطاع المخطط الذروي تختلف عنها في المخططات المتوسطة؛
- يمكن الحصول على المخطط ثلاثي الأبعاد (3-D) من خلال المعادلة $G_{3D} = G_1(\theta_1) + G_2(\theta_2)$ ، حيث G_1 و G_{3D} و G_2 هي معلمات مقيسة معبر عنها بالديسيبل، G_1 و G_2 هما مخططا إشعاع الهوائي في المستويين E و H، و θ_1 و θ_2 هما زاويتا الارتفاع في هذين المستويين.

ويبين الجدولان 5 و 6 المعادلات التي يجب استعمالها في هذه الحسابات.

الجدول 5

المعادلة (16): معادلات مخططات القناع الذروي والمتوسط النظرية المقيسة
بالنسبة للتناقص التدريجي لجيب التمام مع استعمال القاعدة

المستوى الأساسي للقناع (dB)	B	A	معادلة القناع بعد نقطة انقطاع المخطط التي يبتعد فيها القناع عن المخطط النظري (dB)	توزيع المجال
30-	2,876	8,584		منتظم
50-	إذا $SLL \leq -18$ و $SLL \geq -22.7$: $0.03911 SLL^3 + 2.1706 SLL^2 + 39.803 SLL + 246.52$ إذا $SLL < -13.2$ و $SLL > -18$: $-0.461 SLL - 3.058$	$-0.000473(SLL + 13.2)^5 - 0.008667(SLL + 13.2)^4 - 0.0581(SLL + 13.2)^3 - 0.1455(SLL + 13.2)^2 - 0.1342(SLL + 13.2) + 8.2489$	$-A \ln \frac{B|\theta|}{\theta_3}$	COS
60-	$\exp(-0.00027 SLL^3 - 0.02255 SLL^2 - 0.751 SLL - 6.6)$	$0.000119 SLL^3 + 0.00869 SLL^2 + 0.2488 SLL + 10.37$		COS ²

الجدول 6

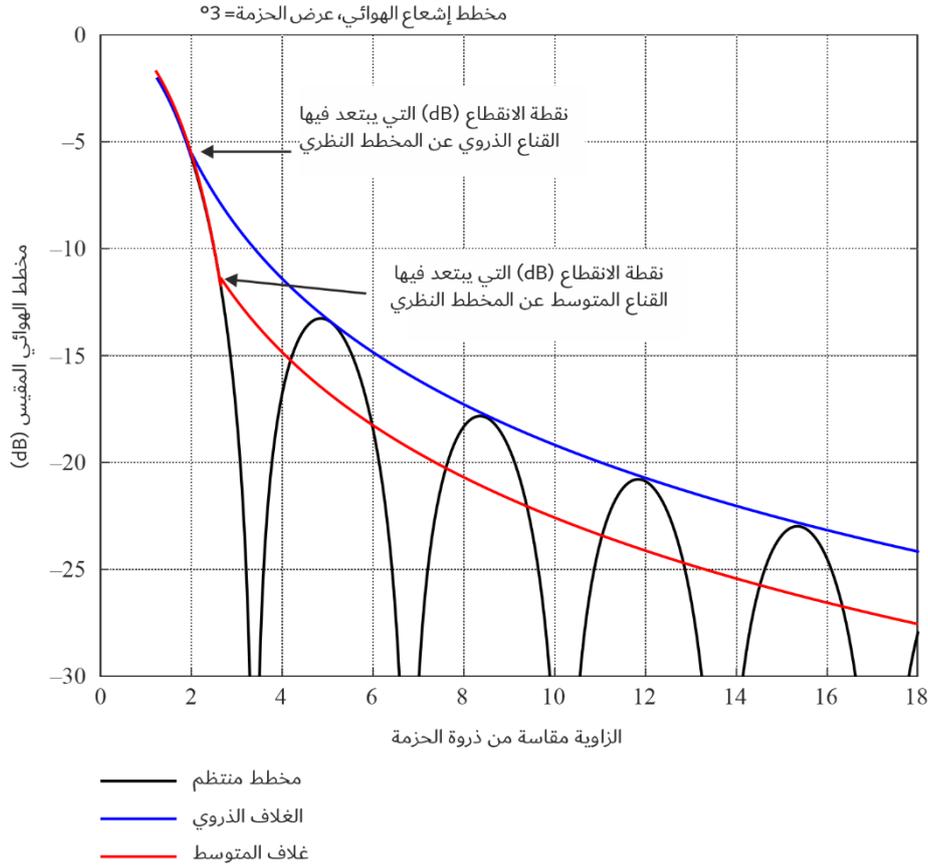
معادلات المخططات النظرية للقناع الذروي والمتوسط

رقم المعادلة	المستوى الأساسي للقناع (dB)	الثابت المضاف إلى المخطط الذروي لتحويله إلى قناع متوسط (dB)	نقطة انقطاع المخطط المتوسط التي يبتعد فيها القناع عن المخطط النظري (dB)	نقطة انقطاع المخطط الذروي التي يبتعد فيها القناع عن المخطط النظري (dB)	معادلة القناع بعد نقطة انقطاع المخطط التي يبتعد فيها القناع عن المخطط النظري (dB)	التقييس	توزيع المجال
(17)	30-	3,72-	12,16-	5,75-	$-8.584 \cdot \ln \left(2.876 \cdot \frac{|\theta|}{\theta_3} \right)$	0	منتظم
(18)	50-	4,32-	20,6-	14,4-	$-17.51 \cdot \ln \left(2.33 \cdot \frac{|\theta|}{\theta_3} \right)$	3,92-	COS
(19)	60-	4,6-	29,0-	22,3-	$-26.882 \cdot \ln \left(1.962 \cdot \frac{|\theta|}{\theta_3} \right)$	6,02-	COS ²
(20)	70-	4,2-	37,6-	31,5-	$-35.84 \cdot \ln \left(1.756 \cdot \frac{|\theta|}{\theta_3} \right)$	7,44-	COS ³
(21)	80-	2,61-	42,5-	39,4-	$-45.88 \cdot \ln \left(1.56 \cdot \frac{|\theta|}{\theta_3} \right)$	8,52-	COS ⁴

الدالة $\ln()$ هي دالة اللوغاريتم الطبيعي. ويقدم الشكل 6 مثلاً عن نقطة الانقطاع.

الشكل 6

مثال عن نقطة الانقطاع



M.1851-06

2.2 الهوائي ذو مخطط الارتفاع على شكل قاطع التمام التريبيعي

المخطط على شكل قاطع التمام التريبيعي (CSC^2) هو شكل خاص يوفر لمستقبل الرادار قوة شبه ثابتة لارتدادات الصدى بشكل مستقل عن المدى الأفقي للطائرات التي تحلق على ارتفاع ثابت. ويبين الشكل 7 مخططاً نمطياً لأداء كشف المدى (km) للرادارات. ويُجَدَّد مخطط اتجاهية القدرة المقيَّس بقاطع جيب التمام التريبيعي، بوحدة dB، على نحو متقطع، كما يلي بالنسبة للرادارات المنصوبة على الأرض:

$$(22) \quad G_{Ground}(\theta) = \begin{cases} G_{unif}(\theta) & \text{if } \theta \in [\theta_{Null}; \theta_{Start}] \\ G_{CSC^2}(\theta) & \text{if } \theta \in [\theta_{Start}; \theta_{End}] \\ G_0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

وبالنسبة للرادارات المحمولة جواً، يُحصل على مخطط اتجاهية القدرة المقيَّس بقاطع جيب التمام التريبيعي

$$(23) \quad G_{Airborne}(\theta) = \begin{cases} G_{unif}(\theta) & \text{if } \theta \in [\theta_{Start}; \theta_{Null}] \\ G_{CSC^2}(\theta) & \text{if } \theta \in [\theta_{End}; \theta_{Start}] \\ G_0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

حيث:

$G_{unif}(\theta)$: مخطط اتجاهية القدرة المقيَّس المرتبط بمخطط المجال المنتظم (المبين في الجدولين 7 و 8 أدناه)، بالديسيبل
 $G_{CSC^2}(\theta)$: مخطط اتجاهية القدرة المقيَّس المرتبط بجزء قاطع التمام التريبيعي من المخطط (المبين في الجدولين 7 و 8 أدناه)، بالديسيبل

- G_0 : مستوى الاتجاهية الأساسي المقيس، بالديسيبل
- θ_{Start} : زاوية الارتفاع (أو زاوية الانخفاض) لنقطة نصف القدرة على الفص الرئيسي التي يبدأ عندها مخطط الحزمة بقاطع التمام التريبيعي (تنظر التفاصيل أدناه)، بالدرجات
- θ_{Null} : نصف عرض الحزمة من الصفر إلى الصفر للهوائي $\frac{\sin(x)}{x}$ ، المحدد من خلال $\frac{\theta_3}{0.88}$ ، بالدرجات. وباستخدام زاوية تسديد حزمة الهوائي، تكون قيمة θ_{Null} هي $\theta_{Tilt} - \frac{\theta_3}{0.88}$ ، بالدرجات، بالنسبة للرادار المنصوب على الأرض، و $\theta_{Tilt} + \frac{\theta_3}{0.88}$ بالنسبة للرادار المحمول جواً. وبذلك، تُحدّد القيمة الدنيا لمخطط توزيع المجال المنتظم عند المستوى الأدنى لنسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي
- θ_{End} : الزاوية القصوى التي يقف عندها مخطط الحزمة بقاطع التمام التريبيعي
- θ : زاوية لتقييم مخطط الهوائي، بالدرجات
- θ_3 : عرض حزمة الهوائي عند نصف القدرة، بالدرجات
- θ_{Tilt} : زاوية ارتفاع ميل حزمة الهوائي أو زاوية تسديد حزمة الهوائي، بالدرجات.
- وإذا توفرت القيم التشغيلية القصوى للمدى والارتفاع، بالكيلومتر، لتطبيق نظام راداري، فإن الزاوية التي يبدأ عندها المخطط بقاطع التمام التريبيعي (CSC^2) تُحدّد من خلال المعادلة التالية¹:

$$(24) \quad \theta_{start} = \sin^{-1} \left[\frac{Maximum_Height}{Maximum_Range} - \frac{Maximum_Range}{2 * \left(\frac{4}{3}\right) Re} \right]$$

- حيث R_e هو نصف قطر الأرض البالغ 6 378 km. ولكن، إذا لم تتوفر المعلومات التشغيلية، فإن الزاوية التي يبدأ عندها المخطط بقاطع التمام التريبيعي، θ_{Start} ، تُحدّد من خلال المعادلات التالية:
- $\theta_{Start} = \frac{\theta_3}{2} + \theta_{Tilt}$ بالنسبة للرادار المنصوب على الأرض و $\theta_{Start} = \frac{-\theta_3}{2} + \theta_{Tilt}$ بالنسبة للرادار المحمول جواً.
- ويطبّق مخطط الحزمة بقاطع التمام على النحو المبين في الجدولين 7 و 8.

الجدول 7

معادلات مخطط الهوائي المقيس بقاطع التمام التريبيعي للرادارات المنصوبة على الأرض

رقم المعادلة	تعليقات	معادلة قاطع التمام التريبيعي
(25)	عند زوايا أصغر من θ_{Null} أو أكبر من θ_{End} ، استعمال نسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي بقيمة dB 55- علماً أن θ_{Null} هي $\theta_{Tilt} - \frac{\theta_3}{0.88}$	المستوى الأساسي لقاطع التمام G_0 (مثال = -55 dB)
(26)	استعمال $\frac{\sin(x)}{x}$ انطلاقاً من النصف الأدنى لعرض الحزمة من الصفر إلى الصفر إلى بداية مخطط CSC^2 عند θ_3 أو θ_{start} ، أيهما توفر	$G_{unif}(\theta) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sin(\mu)}{\mu} \right)$ $\mu = (\pi \cdot 50.8 \cdot \sin(\theta - \theta_{Tilt})) / \theta_3$

الجدول 7 (تتمة)

رقم المعادلة	تعليقات	معادلة قاطع التمام التريبيعي
(27)	بدء مخطط CSC^2 وصولاً إلى زاوية CSC^2 القصوى الكسب عند الزاوية θ_{Start} هو كسب المخطط $\frac{\sin(x)}{x}$ عند الزاوية θ_{Start} . وكسب المخطط أدنى من الكسب الذروي للهوائي بمقدار 3 dB عند θ_{Start}	$G_{csc^2}(\theta)$ $= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{CSC(\theta)}{CSC(\theta_{Start})} \right)$ $+ 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sin \left(\frac{\pi \cdot 50.8 \cdot \sin(\theta_{Start} - \theta_{tilt})}{\theta_3} \right)}{\frac{\pi \cdot 50.8 \cdot \sin(\theta_{Start} - \theta_{tilt})}{\theta_3}} \right)^\circ$

الجدول 8

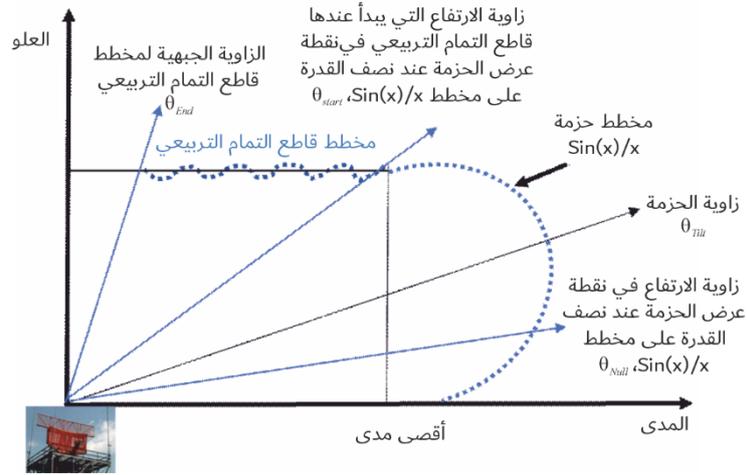
معادلات مخطط الهوائي المقيس بقاطع التمام التريبيعي للرادارات المحمولة جواً

رقم المعادلة	تعليقات	معادلة قاطع التمام التريبيعي
(28)	عند زوايا أصغر من θ_{Null} أو أكبر من θ_{End} ، استعمال نسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي بقيمة -55 dB. علماً أن θ_{Null} هي $\theta_{Tilt} - \frac{\theta_3}{0.88}$	المستوى الأساسي لقاطع التمام G_0 (مثال = -55 dB)
(29)	استعمال $\frac{\sin(x)}{x}$ انطلاقاً من النصف الأدنى لعرض الحزمة من الصفر إلى الصفر إلى بداية مخطط CSC^2 عند θ_3 أو θ_{start} ، أيهما توفر	$G_{unif}(\theta) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sin(\mu)}{\mu} \right)$ $\mu = (\pi \cdot 50.8 \cdot \sin(\theta - \theta_{Tilt})) / \theta_3$
(30)	بدء مخطط CSC^2 وصولاً إلى زاوية CSC^2 القصوى الكسب عند الزاوية θ_{Start} هو كسب المخطط $\frac{\sin(x)}{x}$ عند الزاوية θ_{Start} . وكسب المخطط أدنى من الكسب الذروي للهوائي بمقدار 3 dB عند θ_{Start}	$G_{csc^2}(\theta)$ $= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{CSC(\theta)}{CSC(\theta_{Start})} \right)$ $+ 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sin \left(\frac{\pi \cdot 50.8 \cdot \sin(\theta_{Start} - \theta_{tilt})}{\theta_3} \right)}{\frac{\pi \cdot 50.8 \cdot \sin(\theta_{Start} - \theta_{tilt})}{\theta_3}} \right)^\circ$

وتمثل الأشكال الواردة أدناه وصفاً بيانياً لهذه المخططات.

الشكل 7

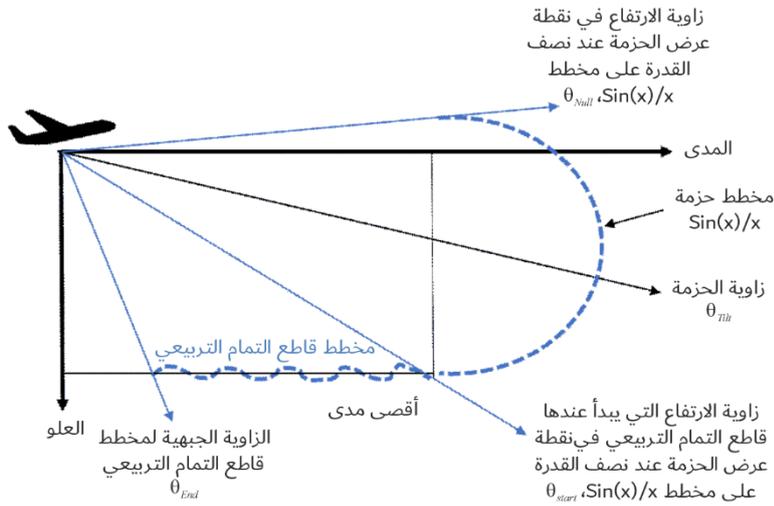
تغطية الحزمة بقاطع التمام التريبيعي لأنظمة رادارات البحث



M.1851-07

الشكل 8

تغطية الحزمة بقاطع التمام التريبيعي لأنظمة الرادارات المحمولة جواً

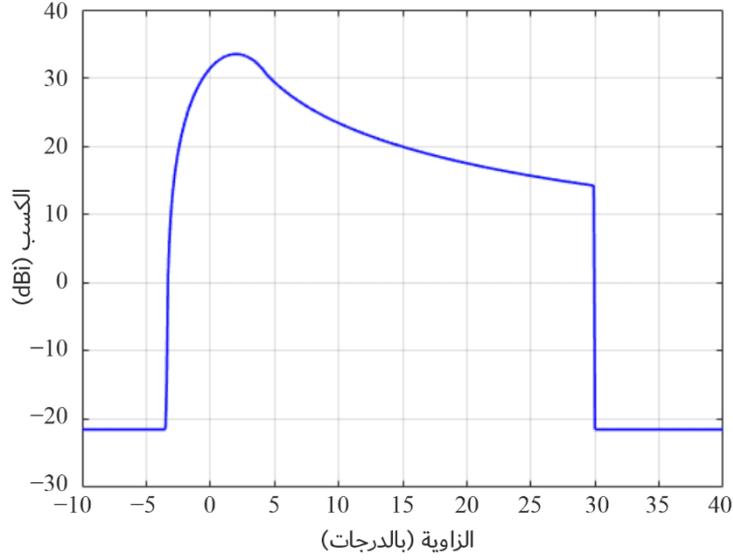


M.1851-08

يرد أدناه مثال يُستخدم فيه الإجراء أعلاه لتوفير مخطط هوائي لمعلومات الرادار C (مستمد من التوصية ITU-R M.1462-2)؛ ولا يظهر الشكل نفسه في هذه التوصية).

الشكل 9

مثال عن رادار منصوب على الأرض - اتجاهية الهوائي النظرية بقاطع التمام التريبيعي، حيث
 $\theta_{Tilt} = 2,0^\circ$ ، $\theta_{Null} = -3,5^\circ$ ، $\theta_{End} = 30,0^\circ$ ، $\theta_{Start} = -4,4^\circ$ ، $\theta_{3dB} = 4,8^\circ$ ، $dBi_{33,5} = 33,5$ = الكسب

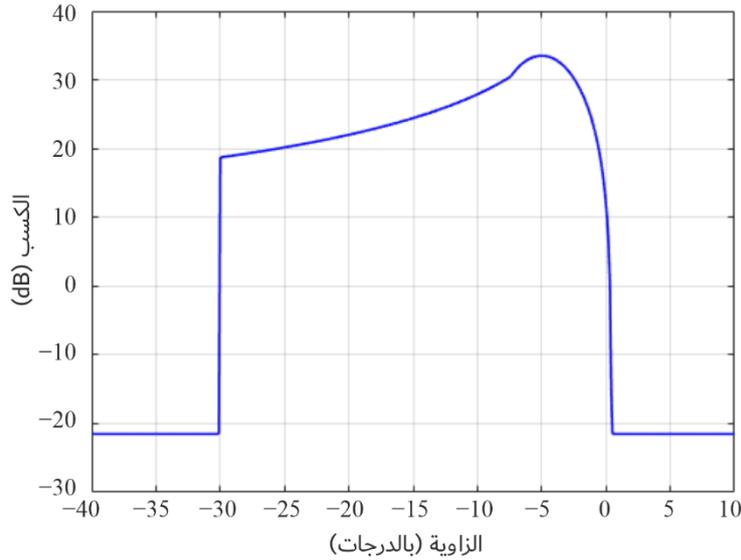


M.1851-09

بالنسبة للرادار المحمول جواً، يبيّن أدناه مخطط الهوائي المعكوس بدلالة قاطع التمام التريبيعي وزاوية الارتفاع.

الشكل 10

مثال عن رادار محمول جواً - اتجاهية الهوائي النظرية بقاطع التمام التريبيعي، حيث
 $\theta_{Tilt} = -5,0^\circ$ ، $\theta_{Null} = 0,5^\circ$ ، $\theta_{End} = 30,0^\circ$ ، $\theta_{Start} = -7,4^\circ$ ، $\theta_{3dB} = 4,8^\circ$ ، $dBi_{33,5} = 33,5$ = الكسب

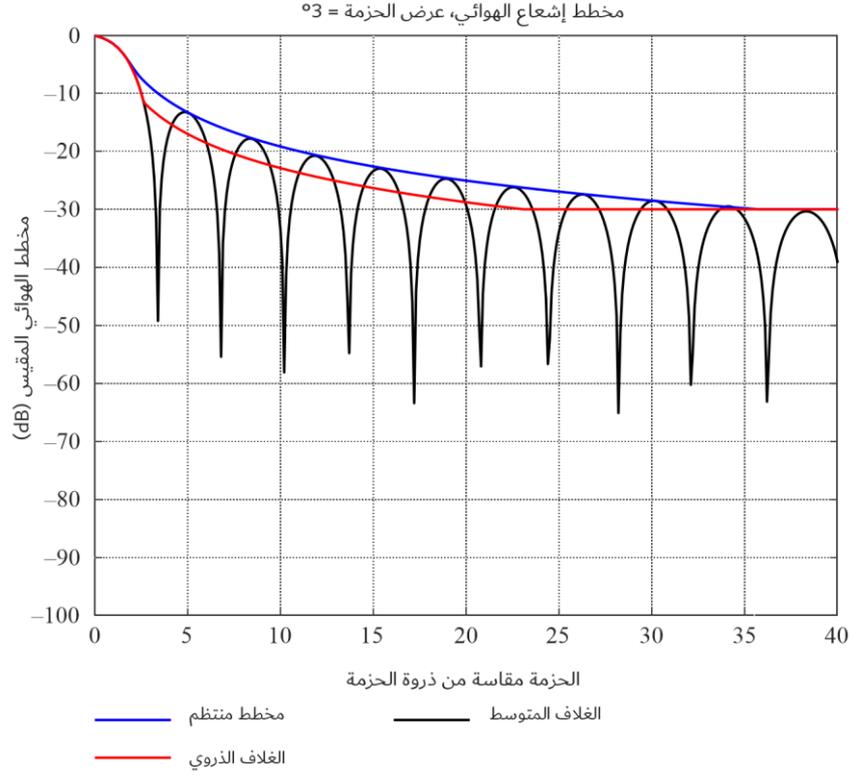


M.1851-10

3.2 المخططات النظرية والأقنعة لمختلف مخططات إشعاع الهوائيات

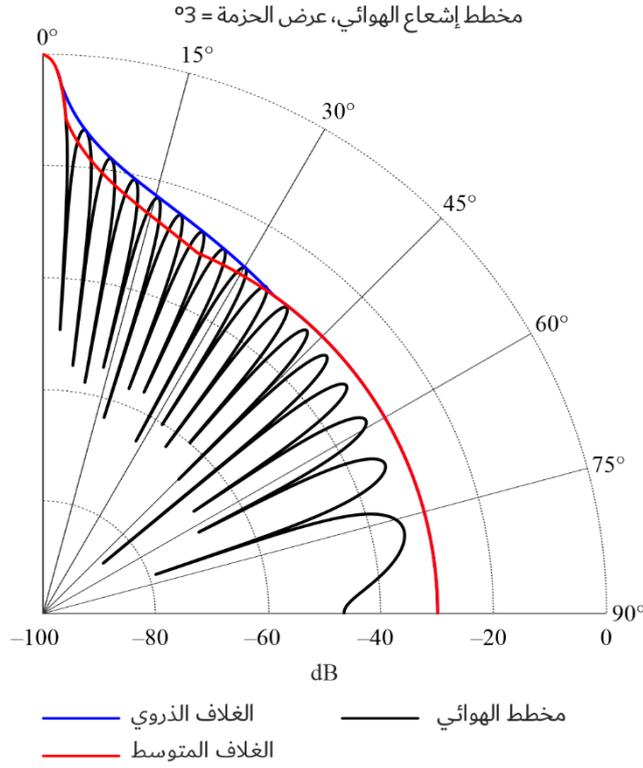
الشكل 11

مخطط الهوائي المقيس، الغلاف الذروي والمتوسط لتوزيع المجال المنتظم



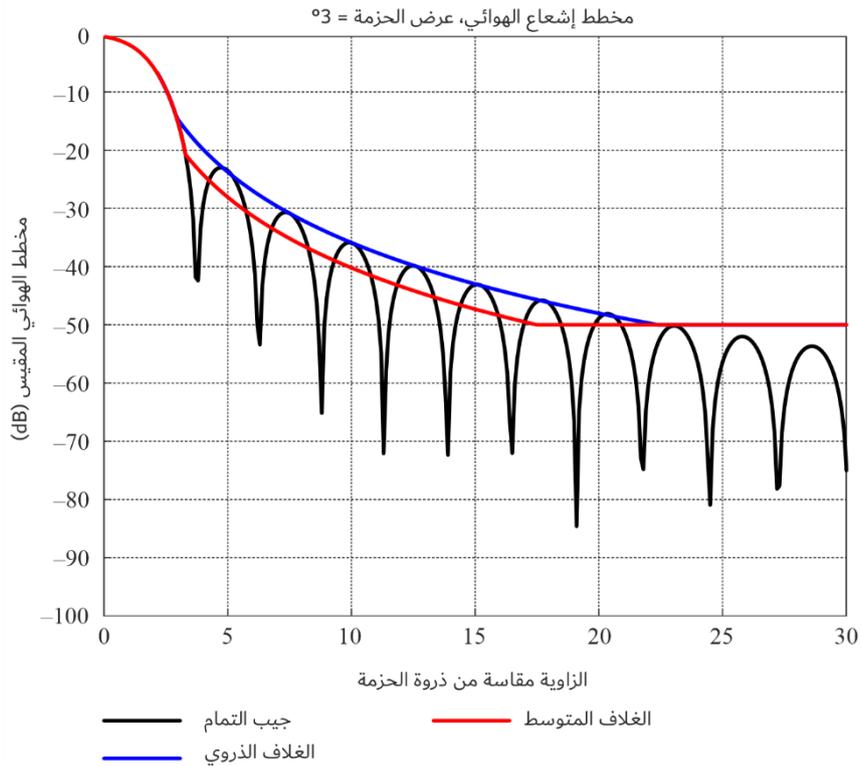
الشكل 12

مثال عن الرسم البياني القطبي لمخطط هوائي مقيس، الغلاف الذروي والمتوسط، بالدرجات، لتوزيع المجال المنتظم



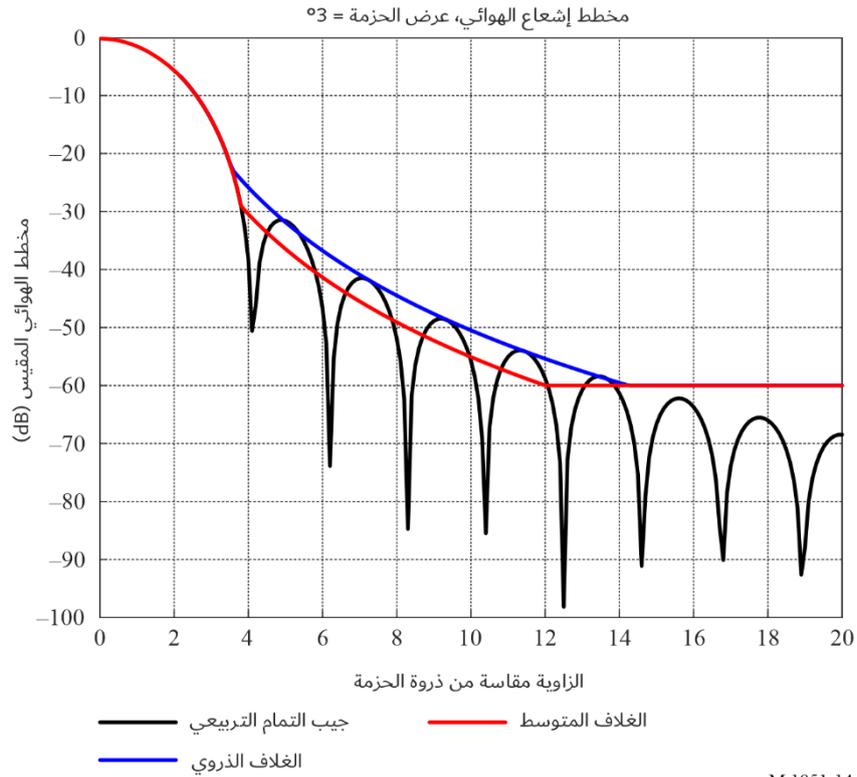
الشكل 13

مخطط الهوائي، الغلاف الذروي والمتوسط لتوزيع مجال على شكل جيب التمام



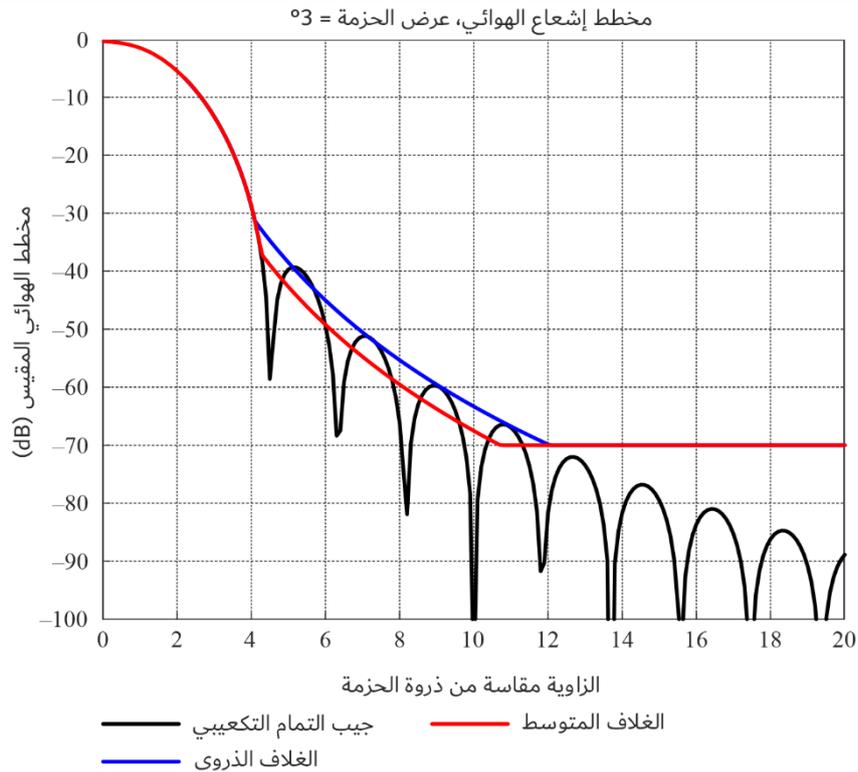
الشكل 14

مخطط الهوائي المقيس، الغلاف الذروي والمتوسط، بالدرجات، لتوزيع على شكل جيب التمام التريبيعي



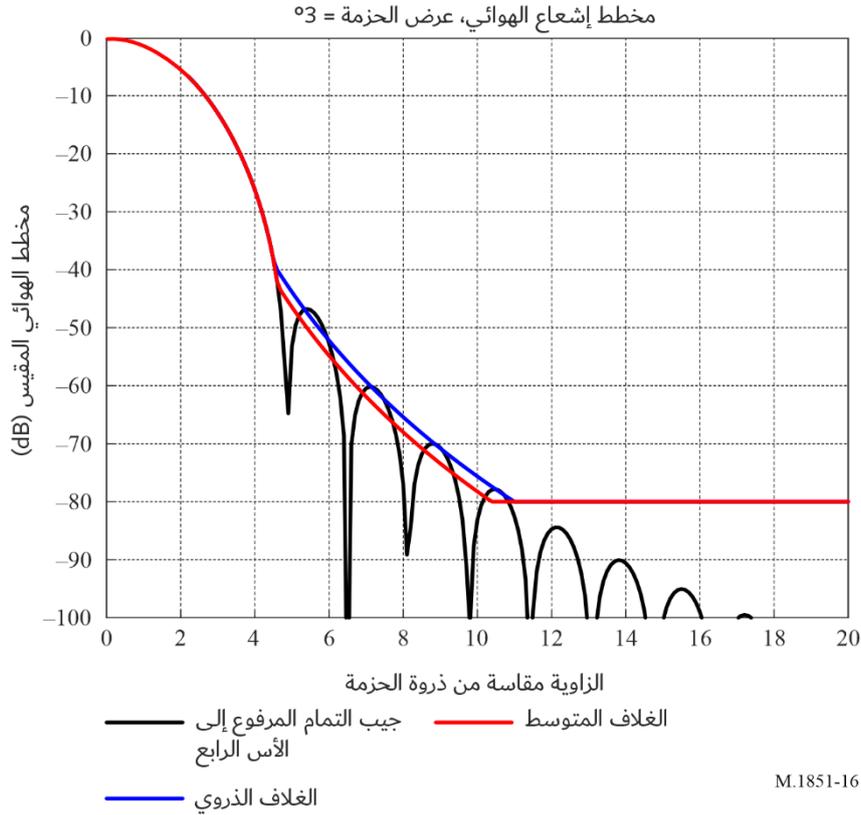
الشكل 15

مخطط الهوائي المقيس، الغلاف الذروي والمتوسط، بالدرجات، لتوزيع على شكل جيب التمام التكميبي



الشكل 16

مخطط الهوائي المقيس، الغلاف الذروي والمتوسط، بالدرجات، لتوزيع المجال على شكل جيب التمام المرفوع إلى الأس الرابع



4.2 اختيار مخطط الهوائي للنماذج بدون استخدام قواعد

يستند الاقتراح الذي يقدمه الكيفية التي ينبغي اختيار مخطط الهوائي طبقاً لها إلى معلومات حول عرض حزمة الهوائي عند نصف القدرة وسوية الذروة للفصوص الجانبية. ويقدم الجدول 9 هذه الكيفية مع توفر معلومات عن عرض الحزمة عند نصف القدرة. ويقدم هذا النموذج قيماً محددة لسويات الفصوص الجانبية -13,2 dB، -23 dB، -32 dB، -40 dB و-47 dB.

الجدول 9

جدول اختيار مقارنة المخطط

رقم معادلة القناة	رقم معادلة المخطط النظري	نمط توزيع الهوائي المحتمل وجيب التمام المرفوع إلى القدرة n	مدى مستوى الفص الجانبي الأول تحت الذروة المعيارية للفص الرئيسي (dB)
(7)	(2)	منتظم	13,2 إلى > 20
(8)	(3)	$1 = n$	20 إلى > 30
(9)	(4)	$2 = n$	30 إلى > 39
(10)	(5)	$3 = n$	39 إلى > 45
(11)	(6)	$4 = n$	≥ 45

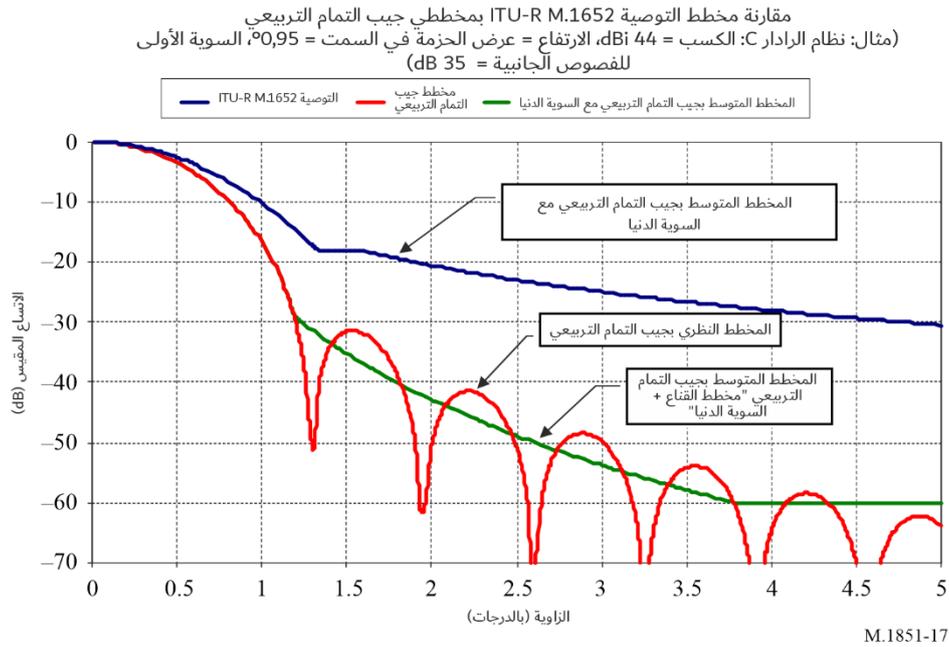
3 مقارنة مخططات الهوائي

تعطي التوصية ITU-R M.1652 أحد النماذج الرياضية التي يتعين استخدامها لمخطط هوائيات أنظمة الرادارات في خدمة الاستدلال الراديوي الذي تم استخدامه في تحليل التداخل. ويتضمن هذا النموذج معادلات يتوجب استخدامها للعديد من المخططات بصفته دالة تتوقف على كسب الهوائي. وتثبت المقارنة بين النماذج المطورة في هذه التوصية وبين نظام الرادار جيم (C) من التوصية ITU-R M.1638-0 أن المخطط الوارد في التوصية ITU-R M.1652 ليس هو المخطط الأمثل. ومثلما يبين ذلك الشكل 17، فإن المخطط الوارد في التوصية ITU-R M.1652 يقدر كسب الهوائي للانحراف عن محور تسديد الهوائي بقدر أكبر بكثير من قيمته (°).

وجدير بالذكر أيضاً أن المعادلات المحددة في التوصية ITU-R F.699 تميل إلى المبالغة في تقدير مستويات الفصوص الجانبية لبعض أنظمة الرادارات، وأنها لم تُوضع من أجل أنظمة الرادارات.

الشكل 17

مقارنة مخططات الهوائي



4 الهوائي المكافئ ذو الفتحة الدائرية بتناقص تدريجي

يصف هذا القسم مخطط إشعاع هوائي مكافئ ذي فتحة بتناقص تدريجي وكذلك مخططات إشعاع الغلاف الذروي والمتوسط لاستعمالها في تحليلات التداخل. وعند تقديم معلومات عن عرض الحزمة عند نصف القدرة ومستوى الذروة للفصوص الجانبية، يمكن اختيار مجموعة المعادلات المناسبة لمخططات الهوائي بالقيم الذروية والمتوسطة. وتستخدم مخططات الغلاف الذروي للفصوص الجانبية بالنسبة لمصدر واحد للتداخل، بينما تُستخدم مخططات الغلاف المتوسط للفصوص الجانبية بالنسبة لعدة مصادر للتداخل.

1.4 استعمال هوائي مكافئ ووصف مخطظه

الهوائي المكافئ هو هوائي يستخدم عاكساً مكافئاً، وهو سطح منحنى يتخذ شكل المقطع العرضي للمكافئ، لتوجيه الموجات الراديوية. والهوائيات ذات العواكس الأكثر شيوعاً هي الهوائي ذو العاكس الزاوي، والهوائي المكافئ، والهوائي المكافئ الدوراني، وهوائي كاسغرين. ويمكن أن تكون للهوائيات المكافئية أعلى الكسب وأضيق عروض الحزمة مقارنة بأي نوع آخر من الهوائيات. ولتحقيق عروض حزمة ضيقة، يجب أن يكون قطر العاكس المكافئ أكبر بكثير من طول الموجة للموجات الراديوية المستعملة.

وُستعمل الهوائيات المكافئية في رادارات التتبع (مثل السفن والطائرات والسحب) والاتصالات من نقطة إلى نقطة والوصلات اللاسلكية لاتصالات البيانات والاتصالات الساتلية وهوائيات الاتصالات في المركبات الفضائية. وُستخدم أيضاً في التلسكوبات الراديوية. وأصدر قطاع الاتصالات الراديوية العديد من التوصيات لهذه التطبيقات، مثل التوصية ITU-R F.699، التي تنص في الفقرة 4 من "توصي" على أنه في الحالات التي يكون فيها عرض الحزمة θ للهوائي فقط هي المعروفة:

يمكن تقدير D/λ (المعبر عنها بنفس الوحدة) من الصيغة التالية: $\frac{D}{\lambda} \approx \frac{70}{\theta}$ حيث θ هو عرض الحزمة (3- dB) (بالدرجات)؛ وعلى افتراض أن عرض الحزمة θ ، يمكن تقدير قيمة G_{max} على وجه التقريب بما يلي: $G_{max} \text{ (dBi)} \approx 44.5 - 20 \log \theta$.

وينصب التركيز هنا على استعمال الهوائيات المكافئية في تطبيقات الرادار، حيث الحاجة إلى إرسال حزمة ضيقة من الموجات الراديوية لتحديد موقع الكائنات وتتبعها. ويتطلب تحليل التداخل وضع أغلفة ذروية ومتوسطة لمخططات الفصوص الجانبية للهوائي تعتمد فقط على عرض حزمة الهوائي عند نصف القدرة والمستوى الذروي للفصوص الجانبية. والنهج المستخدم مشابه للنهج المستخدم في الفتحة الخطية.

واستناداً إلى المرجعين [1] و[3]، تُحسب دالة منحنى الاتجاهية المقيّس للتوزيع المكافئي $F(\theta, n)$ لمختلف التناقصات التدريجية على أساس استعمال قاعدة C من خلال المعادلة التالية:

$$(31) \quad F(\theta, n) = \frac{\frac{2J_1(\beta a \sin(\theta))}{\beta a \sin(\theta)} + \frac{(1-C)2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}(\beta a \sin(\theta))}{n+1(\beta a \sin(\theta))^{n+1}}}{C + \frac{(1-C)}{n+1}}$$

وبالنسبة للنماذج بدون استعمال القاعدة:

$$(32) \quad F(\theta, n) = \frac{2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}(\beta a \sin(\theta))}{(\beta a \sin(\theta))^{n+1}}$$

حيث:

- β : ثابت في الفضاء الحر = $\frac{2\pi}{\lambda}$ ، حيث λ معبر عنها بالأمتار
- a : نصف قطر الهوائي، بالأمتار
- D : قطر الهوائي، بالأمتار
- θ_3 : عرض الحزمة عند نصف القدرة للهوائي عند 3 dB، بالدرجات
- J_n : دالة بيسيل (يمكن تقييمها بواسطة أدوات برمجية مختلفة)
- λ : طول الموجة
- n : القيمة الرقمية للقدرة المكافئية للتناقص التدريجي

وفي المعادلتين (31) و(32)، $\beta a = \frac{\pi K}{\theta_3}$ ، بالنسبة للنموذج الرياضي القائم على الهوائي $\theta_3 = D/\lambda$ (بالراديان). وبالنسبة للنموذج بدون استعمال القاعدة، ترد قيم K بالدرجات في الجدول 10 حيث $K = \frac{2a \theta_3}{\lambda}$ وتشير SLL إلى السوية الأولى للفصوص الجانبية، بالديسيبل. ويمكن صياغة المعادلة (31) كالتالي:

$$(33) \quad F(\theta, n) = \frac{\frac{2J_1\left(\frac{\pi K}{\theta_3} \sin(\theta)\right)}{\frac{\pi K}{\theta_3} \sin(\theta)} + \frac{(1-C)2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}\left(\frac{\pi K}{\theta_3} \sin(\theta)\right)}{n+1\left(\frac{\pi K}{\theta_3} \sin(\theta)\right)^{n+1}}}{C + \frac{(1-C)}{n+1}}$$

وبالنسبة للنماذج بدون استعمال القاعدة، يمكن صياغة المعادلة (32) كالتالي:

$$(34) \quad F(\theta, n) = \frac{2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}(\pi K/\theta_3 \sin(\theta))}{(\pi K/\theta_3 \sin(\theta))^{n+1}}$$

ويمكن الحصول على المخطط ثلاثي الأبعاد (3D) بتدوير مخطط الإشعاع المستمد من المعادلتين (33) و(34) حول المحور المتعامد مع الفتحة.

وفي الجدول 10 تبيّن العلاقة بين سوية الفصوص الجانبية، والقاعدة C ، وعامل عرض الحزمة. ومن خلال النموذج مع استعمال القاعدة، يمكن الحصول على أي سوية للفصوص الجانبية في المدى من $-17,66$ dB إلى $-44,72$ dB. ومديات سويات الفصوص الجانبية لكل من توزيعات الاتساع ($n = 0$ أو 1 أو 2 أو 3) مبيّنة في عمود "مدى سويات الفصوص الجانبية القصوى الأدنى من الذروة المقبّسة للفص الرئيسي (dB)" في الجدول 10.

وترد في الجدول 11 المعلمات المرتبطة بالنموذج بدون استعمال القاعدة. ويعطي هذا النموذج قيماً محددة لسويات الفصوص الجانبية $-17,66$ dB، $-24,64$ dB، $-30,61$ dB، $-35,96$ dB و -40 dB. كما يعطي غلظاً تنازلياً للفصوص الجانبية أكثر حدة بالمقارنة مع النموذج القائم على المعادلة (33).

الجدول 10

جدول اختيار معلمات الهوائي ذي الفتحة الدائرية مع استعمال القاعدة

عامل عرض النطاق K (°)	القاعدة C	مدى سويات الفصوص الجانبية القصوى الأدنى من الذروة المقبّسة للفص الرئيسي (dB)	التوزيع المكافئي إلى الأس n
58,2125	–	17,66–	0
$K = 0.0051(SLL + 24.265)^4$ $- 0.089(SLL + 24.265)^3$ $+ 0.599(SLL + 24.265)^2$ $- 3.11(SLL + 24.265)$ $+ 69.43$ (36)	$C = 0.0016(SLL + 24.265)^3$ $- 0.009(SLL$ $+ 24.265)^2$ $+ 0.12(SLL + 24.265)$ $+ 0.1$ (35)	24,2– إلى 17,66–	1
$K = 0.0019(SLL + 34.7)^4$ $- 0.052(SLL + 34.7)^3$ $+ 0.492(SLL + 34.7)^2$ $- 2.63(SLL + 34.7)$ $+ 74.9$ (38)	$C = (0.0022(SLL + 34.7)^3$ $- 0.032(SLL + 34.7)^2$ $+ 0.38(SLL + 34.7)$ $+ 1.1)/10$ (37)	24,2– إلى 34,7–	2
$K = 0.0057 SLL^3 + 0.7079 SLL^2$ $+ 28.061 SLL$ $+ 433.7618$ (40)	$C = 0.01008 SLL + 0.4959$ (39)	44,72– إلى 34,7–	3

الجدول 11

جدول اختيار معلمات الهوائي ذي الفتحة الدائرية بدون استعمال القاعدة

عامل عرض النطاق K (°)	سوية ذروة الفص الجانبي (dB)	أس المكافئي، n
58,2125	17,66–	0
72,5938	24,64–	1
84,0529	30,61–	2
96,3142	35,96–	3
108,2317	40,0–	4

2.4 إجراء حساب غلاف الفصوص الجانبية

يمكن وضع معادلات القناة باستخدام المعادلة (33) والجدول 12 للنماذج باستعمال القاعدة، أو المعادلة (34) والجدول 13 للنماذج بدون استعمال القاعدة. وتُشتق هذه الأقتعة باستخدام المنحى المناسب لسويات ذروة الفصوص الجانبية للهوائي بعد موقع الصفر الأول لمخطط الهوائي. وخلصت مقارنة التكامل بين المخطط النظري والمخطط المقترح للقناة إلى أن الفرق بين الغلاف الذروي والغلاف المتوسط في انقطاع واحد على مستوى رئيسي هو 4 dB. وتُستخدم الإجراءات التالية لحساب الغلاف الذروي والغلاف المتوسط:

- 1 حساب المعادلة (33) للنماذج باستعمال القاعدة أو المعادلة (34) للنماذج دون استعمال القاعدة بالنسبة لمختلف قيم n باستخدام العامل K الوارد في الجدول 10 أو 11، ثم تقييس المخطط وتحويله إلى الديسيبل باستعمال المعادلة:

$$20 \times \log_{10}(|\text{Normalized Pattern}|)$$
- 2 لرسم مخطط القناة، استخدم مخطط الاتجاهية النظري المستمد من المعادلة (33) للنماذج مع استعمال القاعدة أو المعادلة (34) للنماذج بدون استعمال القاعدة حتى تصل إلى نقطة الانقطاع إما بالنسبة للمخطط الذروي أو المخطط المتوسط للهوائي، حسب ما يقتضيه الحال. وبعد نقطة الانقطاع، طبق مخطط القناة على النحو المبين في الجدول 12 بالنسبة للنماذج مع استعمال القاعدة أو الجدول 13 بالنسبة للنماذج بدون استعمال القاعدة؛
- 3 قناع المخطط الذروي هو مخطط الهوائي الذي يمر فوق ذروات الفصوص الجانبية. ويُستخدم هذا القناع في حالة مصدر واحد للتداخل؛
- 4 قناع المخطط المتوسط هو مخطط الهوائي الذي يقارب القيمة التكاملية للمخطط النظري. ويُستخدم هذا القناع في حالة التداخل المجمع متعدد المصادر؛
- 5 نقطة انقطاع قناع المخطط المتوسط هي النقطة التي تقع في اتساع المخطط (dB) وتكون أدنى من الكسب الأقصى حيث يتعد شكل المخطط من المخطط النظري إلى المخطط المتوسط للقناع؛
- 6 نقطة انقطاع قناع المخطط الذروي هي النقطة التي تقع في اتساع المخطط (dB) وتكون أدنى من الكسب الأقصى حيث يتعد شكل المخطط من المخطط النظري إلى المخطط الذروي للقناع؛
- 7 المعلمة θ_3 هي عرض حزمة الهوائي عند 3 dB (بالدرجات)؛
- 8 المعلمة θ هي الزاوية الموجودة إما في التقاطعات على المستويين الرئيسيين للارتفاع (المستوى الرأسي) أو للسمت (المستوى الأفقي) (بالدرجات)؛
- 9 القناع المتوسط هو القناع الذروي بعد طرح 4 dB. ولاحظ أن نقاط انقطاع المخطط الذروي تختلف عنها في المخططات المتوسطة؛
- 10 يمكن الحصول على المخطط ثلاثي الأبعاد (3D) بتدوير مخطط إشعاع الغلاف المستمد من الجدول 12 بالنسبة للنماذج مع استعمال القاعدة أو الجدول 13 بالنسبة للنماذج بدون استعمال القاعدة حول المحور المتعامد مع الفتحة. ويبين الجدولان 12 و13 المعادلات التي يجب استعمالها في حسابات أقتعة الهوائي المتوسطة والذروية.

الجدول 12

المعادلة (41): معادلات مخططات القناع الذروي والمتوسط النظرية المقيسة
بالنسبة للتناقص التدريجي المكافئ مع استعمال القاعدة

المستوى الأساسي للقناع (dB)	B	A	معادلة القناع بعد نقطة انقطاع المخطط التي يبتعد فيها القناع عن المخطط النظري (dB)	التوزيع المكافئ المرفوع إلى الأس n
35-	2,394	12,55		0
50-	<p>إذا كانت $SLL \geq -24.2$ و $SLL \leq -21.55$:</p> $B = 0.083177 SLL^3 + 5.4731 SLL^2 + 119.8649 SLL + 877.4646$ <p>إذا كانت $SLL \geq -21.55$ و $SLL \leq -17.66$:</p> $B = -0.2471 SLL - 1.6534$	$A = -0.00227(SLL + 17.66)^5 - 0.02745(SLL + 17.66)^4 - 0.1224(SLL + 17.66)^3 - 0.204(SLL + 17.66)^2 - 0.1727(SLL + 17.66) + 12.2586$	$-A \ln \frac{B|\theta|}{\theta_3}$	1
60-	<p>إذا كانت $SLL \geq -34.7$ و $SLL \leq -32.6$:</p> $B = -1.5961 SLL^2 - 106.45 SLL - 1758.7$ <p>إذا كانت $SLL \geq -32.6$ و $SLL \leq -24.2$:</p> $B = 0.0656 SLL^2 + 2.574 SLL + 29.4$	<p>إذا كانت $SLL \geq -34.7$ و $SLL \leq -31.55$:</p> $A = -0.06419753 SLL^3 - 6.17611 SLL^2 - 198.013 SLL - 2105.5$ <p>إذا كانت $SLL \geq -31.55$ و $SLL \leq -24.2$:</p> $A = 0.0053 SLL^2 + 0.4366 SLL + 18.714$		2
70-	$B = -0.0219(SLL + 34.7)^3 - 0.148(SLL + 34.7)^2 - 0.856(SLL + 34.7) + 7.64$	$A = 0.0005(SLL + 34.7)^3 + 0.0022(SLL + 34.7)^2 + 0.0324(SLL + 34.7) + 11.7177$		3

الجدول 13

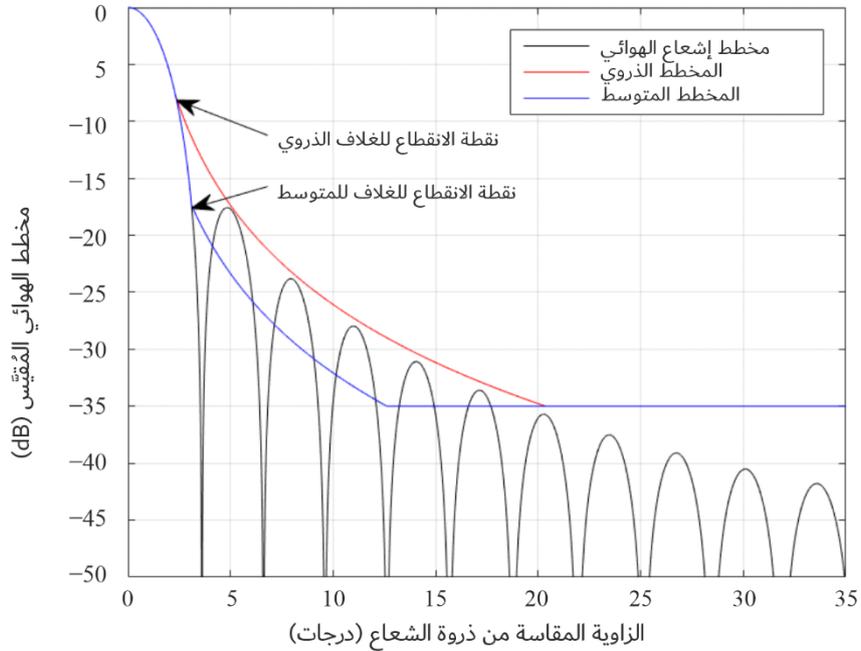
معادلات مخططات القناع النظرية المقيّسة للقيم الذروية والمتوسطة بدون استعمال القاعدة

رقم المعادلة	المستوى الأساسي لقناع الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي (dB)	نقطة انقطاع المخطط المتوسط التي يتعد فيها القناع عن المخطط النظري (dB)	نقطة انقطاع المخطط الذروي التي يتعد فيها القناع عن المخطط النظري (dB)	معادلة القناع بعد نقطة انقطاع المخطط التي يتعد فيها القناع عن المخطط النظري (dB)	المعادلة (22) لتوزيع المجال
(42)	35-	$1,051 \times \theta_3$	$0,8537 \times \theta_3$	$-28.9 \times \log_{10} \left( \frac{|\theta|}{\theta_3} \right) - 11.9$	$n = 0$
(43)	50-	$1,161 \times \theta_3$	$0,9893 \times \theta_3$	$-49.0 \times \log_{10} \left( \frac{|\theta|}{\theta_3} \right) - 14.4$	$n = 1$
(44)	60-	$1,273 \times \theta_3$	$1,13 \times$	$-69.13 \times \log_{10} \left( \frac{|\theta|}{\theta_3} \right) - 15.46$	$n = 2$
(45)	70-	$1,339 \times \theta_3$	$1,2165 \times \theta_3$	$-89.0 \times \log_{10} \left( \frac{|\theta|}{\theta_3} \right) - 16.12$	$n = 3$
(46)	80-	$1,3906 \times$	$1,2835 \times$	$-108.8 \times \log_{10} \left( \frac{|\theta|}{\theta_3} \right) - 16.27$	$n = 4$

ويبيّن النهج في الشكل 18.

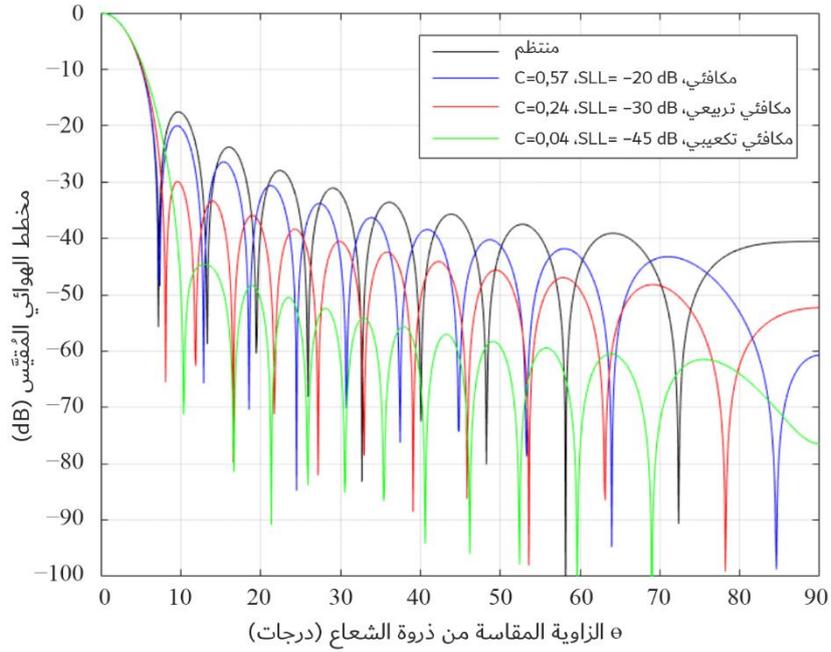
الشكل 18

مثال عن نقطة الانقطاع



الشكل 19

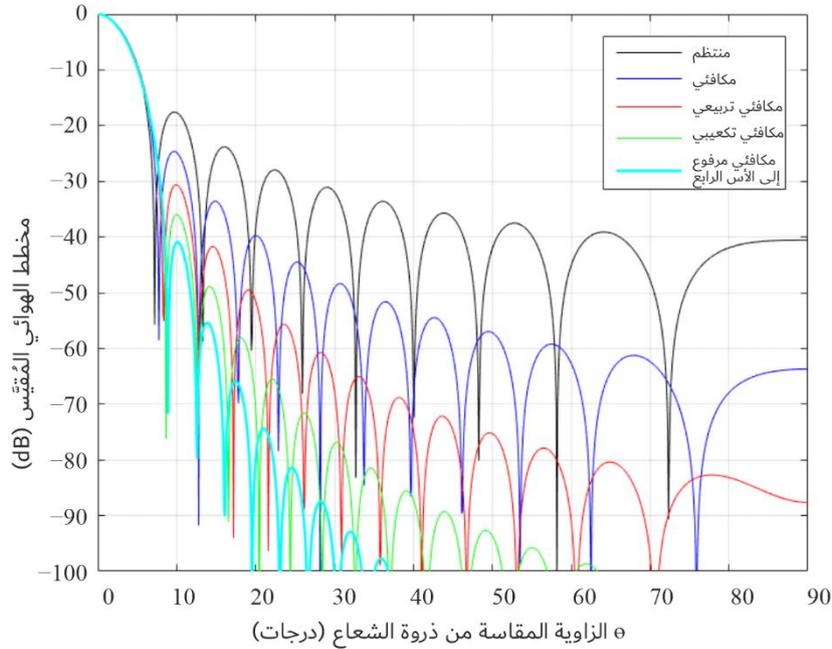
مقارنة مخططات الهوائي لمختلف التوزيعات المكافئية الدائرية في الفتحة بتناقص تدريجي مع استعمال القاعدة، حيث عرض الحزمة عند 3 dB يبلغ 6,0 درجات (تمثل المخطط)



M.1851-19

الشكل 20

مقارنة مخططات الهوائي لمختلف التوزيعات المكافئية الدائرية في الفتحة بتناقص تدريجي بدون استعمال القاعدة، حيث عرض الحزمة عند 3 dB يبلغ 6,0 درجات (تمثل المخطط)



M.1851-20

3.4 اختيار مخطط الهوائي للنماذج بدون استعمال القاعدة

يقدم الجدول 14 اقتراحاً بشأن كيفية اختيار مخطط الهوائي استناداً إلى معلومات حول السوية الذرية للفصوص الجانبية. ويعطي هذا النموذج قيماً محددة لسويات الفصوص الجانبية -17,66 dB، -24,64 dB، -30,61 dB، -35,96 dB و-40 dB.

الجدول 14

التناقص التدريجي المكافئ بدلالة السوية الذرية للفصوص الجانبية

أُس توزيع الهوائي المكافئ، n	مدى السويات الذرية المقيسة للفصوص الجانبية (dB)
$n = 0$	15- إلى 20-
$n = 1$	20- إلى 27-
$n = 2$	27- إلى 33-
$n = 3$	33- إلى 38-
$n = 4$	أقل من 38-

المراجع

- [1] Barton, David K., and Ward, Harold R., *Handbook of Radar Measurement*, Artech House, 1984, Table A.15, page 264.
- [2] Chang, Kai, editor-in-chief, et al., *Encyclopaedia of RF and microwave engineering*, 6 Volume set. Koazkoff, Dennis, *Aperture Antennas*, DeVry University, Alpharetta, Georgia, page 365. The *Encyclopaedia of RF and Microwave Engineering* is available online at <http://www.mrw.interscience.wiley.com/erfme>.
- [3] Stutzman, Warren L. and Thiele, Gary A., *Antenna theory and design*, 3rd ed. 2013. Table 9-2, page 389.

5 تقريب المخططات ثلاثية الأبعاد (3-D)

تتطلب تقنيات المحاكاة والتنبؤ في بعض الحالات استخدام مخطط إشعاع ثلاثي الأبعاد للهوائي. ويقدم معظم مصنعي الهوائيات معلومات لا تتعلق إلا بتقاطعات الإشعاع في المستويين الرئيسيين (السمت/الارتفاع)، انظر نظام الإحداثيات في الشكل (29) للهوائي المستخدم في المحاكاة. وبما أن المخطط ثلاثي الأبعاد قد يكون مطلوباً، يقدم تقدير أفضل للإشعاع ثلاثي الأبعاد باستخدام التقاطعات في السمت والارتفاع.

وبشكل عام، الطريقة الأبسط لتقريب مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد من خلال التقاطعات في مستوييه الرئيسيين (السمت والارتفاع) هي عن طريق جمع قيم العينات المتاحة بالديسيبل لكل زاوية سمت وزاوية ارتفاع. وتستخدم هذه الطريقة الكلاسيكية على نطاق واسع في العديد من أدوات المحاكاة، عندما تكون القدرات ثلاثية الأبعاد مطلوبة.

وفي حالة الهوائيات الاتجاهية، تم تحديد العديد من الأساليب. انظر القائمة المرجعية التي تبين العديد من هذه المراجع. وتم اختيار أسلوبين بسيطين من المرجح [3]، هما أسلوب الجمع وأسلوب الجمع المرجح. ويقارن هذان الأسلوبان بأسلوب الجمع.

ويُعرف أسلوب الجمع على أنه إضافة العينات المتاحة من المستويين الأفقي والرأسي بالديسيبل (dB). ويُعتمد هذا الأسلوب بشكل خاص للهوائيات شاملة الاتجاهات في السمت، ويمكن استخدامه عند توفر التقاطعات في المستويين الرئيسيين في السمت والارتفاع.

$$G_{sum} = G_{az}(\varphi) + G_{el}(\theta)$$

وبالنسبة لأسلوب الجمع المرجح المشار إليه في المرجع [3]، تعتمد المعادلات المستخدمة في المرجع على التقاطع الأفقي G_{az} بالديسيبل، والمُعَرَّف من -180 درجة إلى 180 درجة، والتقاطع الرأسي G_{el} بالديسيبل المُعَرَّف من -90 درجة إلى 90 درجة. ويُستخدم فقط مخطط مكسب الأمامي بدلالة زاوية الارتفاع. ولا يُستخدم في هذه المنهجية مخطط المكسب للفصوص الخلفية بدلالة زاوية الارتفاع.

$$G_{az}(\varphi) = 10 \log_{10}(g_{az}(\varphi))$$

$$G_{el}(\theta) = 10 \log_{10}(g_{el}(\theta))$$

عند النقطة (θ, φ) ، تُحسب القيمة التقريبية للمكسب المرجح GW من خلال المرجع [3]:

$$GW(\theta, \varphi) = \frac{G_{az}(\varphi) \times w_1 + G_{el}(\theta) \times w_2}{\sqrt{w_1^k + w_2^k}}$$

حيث تحدّد w_1 و w_2 كالتالي:

$$w_1(\theta, \varphi) = g_{el}(\theta) \times (1 - g_{az}(\varphi))$$

$$w_2(\theta, \varphi) = g_{az}(\varphi) \times (1 - g_{el}(\theta))$$

وذكر في المرجع [3] أن المفهوم الذي تقوم عليه هذه التقنية هو أن عملية تقدير عينة الإشعاع تتضمن البيانات الفعلية لمخططات الارتفاع والسمت الرئيسية الأخرى، كدالة للمسافة الزاوية بين النقطة المعنية ونقطة العينة، بطريقة ترجيحية بين القطعين الرئيسيين. وفي هذا النهج، توفر دالة الترجيح وسيلة لترجيح المسافة الزاوية بشكل مناسب.

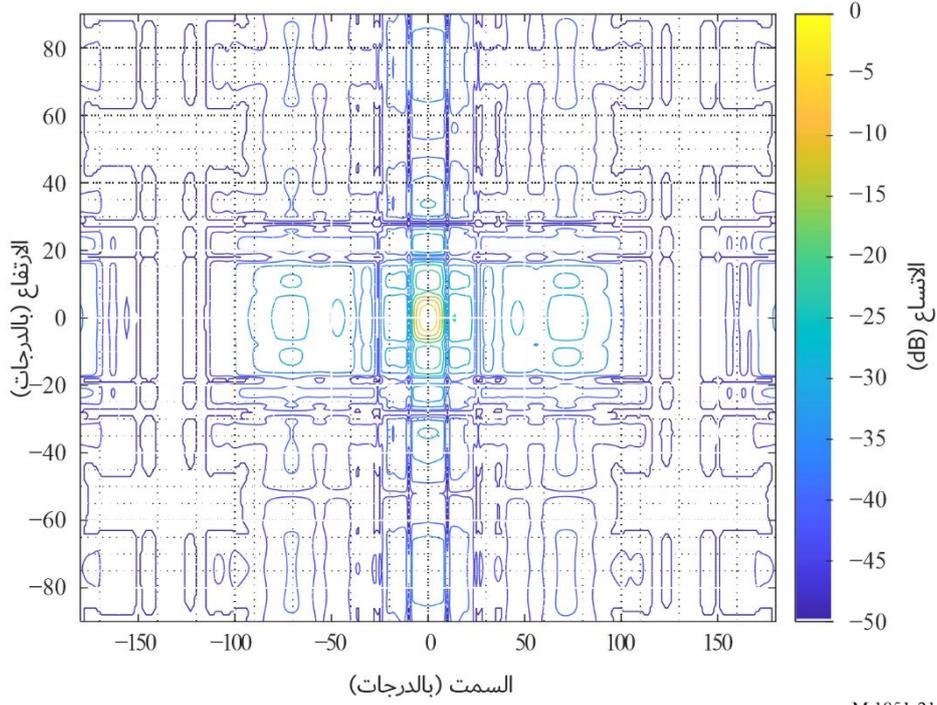
وتبين أن قيمة تساوي 2 للعامل k مناسبة للهوائيات الاتجاهية، ولكن يمكن النظر في تقديرات تقريبية أخرى.

وفيما يتعلق باستخدام الفقرة 1.2 (الهوائي ذو الفتحة المستطيلة)، يمكن الحصول على مخططات الإشعاع ثلاثية الأبعاد أو مخططات الغلاف بواسطة المعادلة (14). وفيما يتعلق باستخدام الفقرة 4 (الفتحة الدائرية)، يمكن الحصول على مخططات الإشعاع ثلاثية الأبعاد أو مخططات الغلاف بتدوير المخطط ثنائي الأبعاد. وإذا كانت مخططات إشعاع الهوائي المقاسة متاحة، يمكن استخدام نفس الأساليب حسب نوع الهوائي المعني.

ويبين الشكلان 21 و 22 مثلاً عن مخطط ثلاثي الأبعاد ناتج عن تقاطعات مستوييه ثنائيي الأبعاد على النحو المبين في الشكل 23.

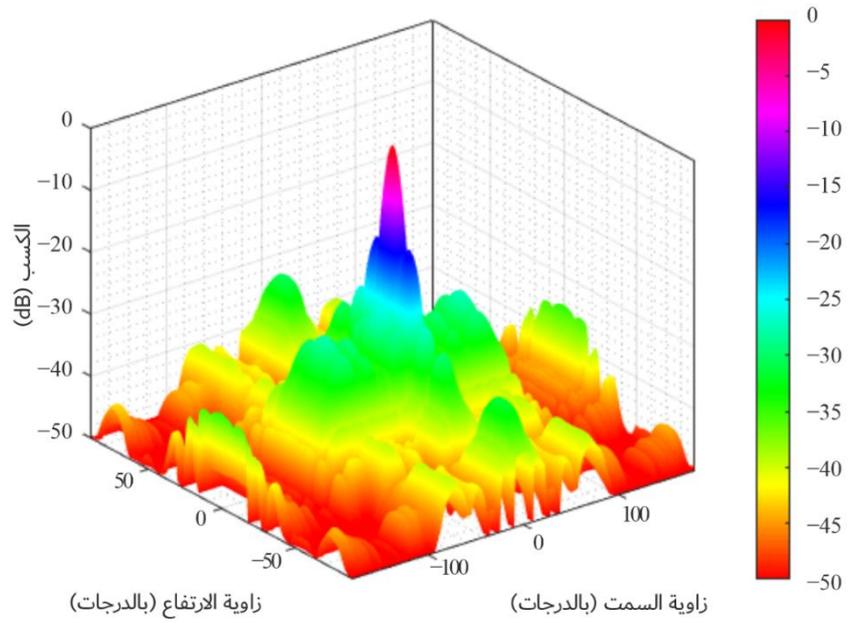
الشكل 21

مثال عن مخطط أكفة هوائي مقيس (dB) محسوب من خلال تقاطع مستوييه المبيينين في الشكل 23



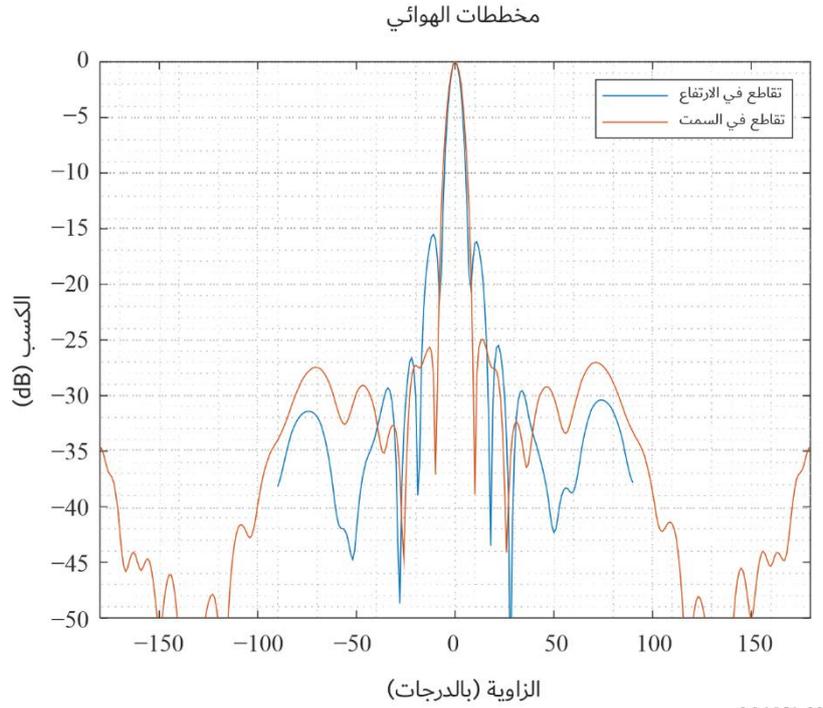
الشكل 22

مثال عن رسم ثلاثي الأبعاد لهوائي بدلالة زاويتي السمت والارتفاع النسبيتين، محسوباً من خلال تقاطع مستوييه المبيينين في الشكل 23



الشكل 23

تقاطعات مستويات الهوائي المستخدمة كمثال لحساب المخططات ثلاثية الأبعاد



6 مخططات هوائيات الصفييف مرتب الأَطوار

1.6 صفييف الهوائيات الخطي مرتب الأَطوار

يمكن استعمال المعادلة التالية في حسابات المخطط المعايير المنتظم لهوائيات الصفييف الخطي:

$$(47) \quad g(\theta) = f(\theta) \cdot \frac{1}{N} |AF(\theta)|^2$$

حيث:

$g(\theta)$: مخطط كسب هوائي الصفييف الخطي المعايير المنتظم

$f(\theta)$: مخطط الكسب المعايير لعناصر الإشعاع الأساسية المضافة إلى هوائيات الصفييف الخطي المنتظم

N : عدد عناصر الإشعاع الأساسية

$AF(\theta)$: عامل هوائيات الصفييف الخطي المنتظم:

$$(48) \quad AF(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{N\Psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\Psi}{2}\right)}$$

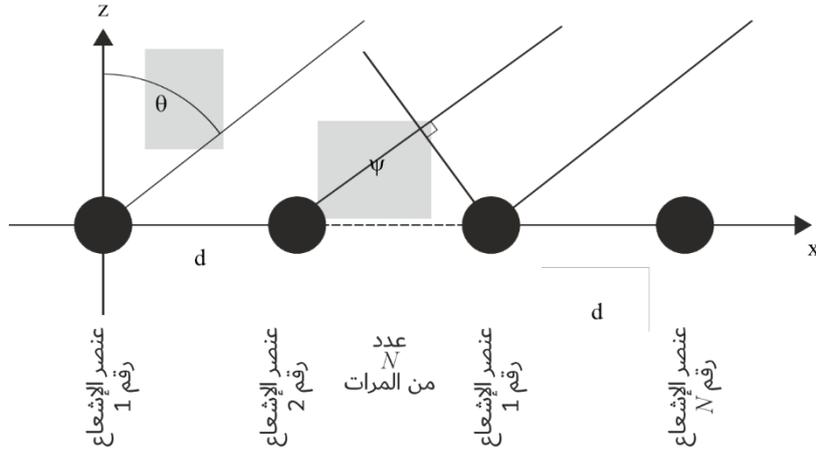
مع

$$(49) \quad \Psi(\theta) = 2\pi(d/\lambda)(\sin(\theta) - \sin(\omega))$$

حيث:

- d : المسافة البينية العادية المنتظمة لعنصر الإشعاع الأساسي
 λ : طول الموجة عند التردد المعني
 ω : زاوية توجيه الحزمة إلكترونياً
 θ : الزاوية خارج المحور
 N : عدد عناصر الإشعاع الأساسية.

الشكل 24

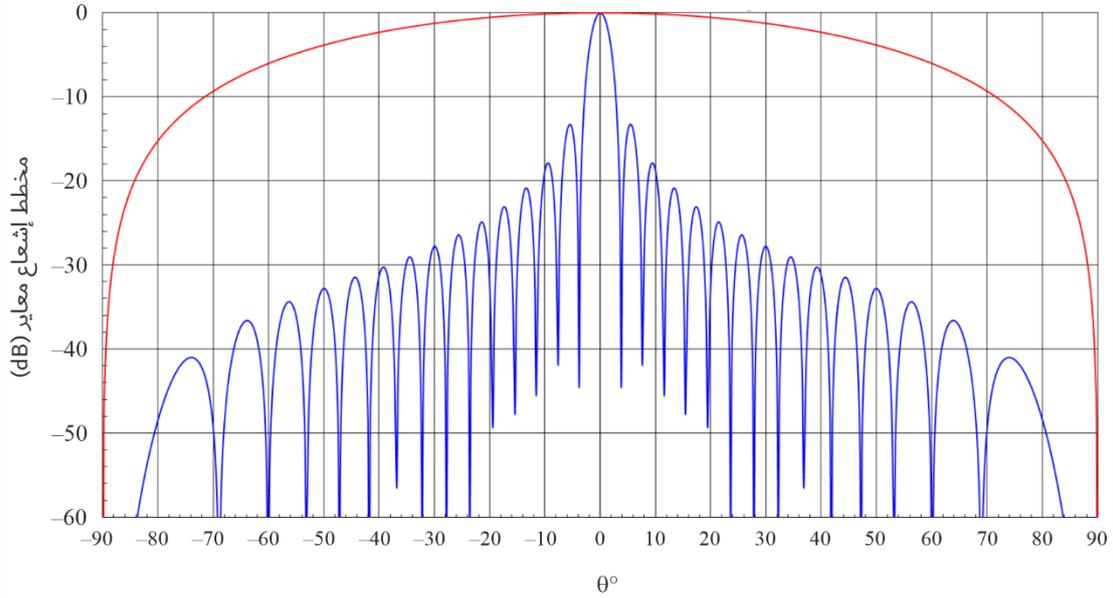


M.1851-24

وتسمح الطبيعة الخاصة لهوائيات الضعيف مرتب الأقطار بالتحكم إلكترونياً في الفص الرئيسي لمدى مخطط الهوائي من محور التسديد الميكانيكي للهوائي. وعند زوايا المسح ω الكبيرة، ينبغي مراعاة آثار بعض الفصوص الجانبية في مخططات الهوائي باعتبارها عمليات كبيرة بالنسبة إلى التوسع وخسارة التماثل (انظر الشكل 25). وفي الحقيقة، تنخفض القيمة القصوى للفص الرئيسي عندما يكون الجيب (ω) فما فوقه هو مخطط عنصر الإشعاع الأساسي في الضعيف. وهذه النتيجة هي حزمة رئيسية موسعة وخسارات في الكسب الأقصى وبالتالي زيادة للفصوص الجانبية البعيدة. وبالنسبة إلى زاوية ω بمدى يتراوح بين $60 \pm$ و $90 \pm$ من محور التسديد الميكانيكي للهوائي فإن المخطط الناتج يكون مضطرباً للغاية لدرجة أن يصبح غير قابل للاستعمال (انظر الشكل 26). وتقع القيم العملية للزاوية ω بين 0 و $60 \pm$ من محور التسديد الميكانيكي للهوائي. وعلاوة على ذلك، إذا كانت شبكة الضعيف بمسافة أكبر من $\lambda/2$ بين عناصر الإشعاع الأساسية في الضعيف، فقد تظهر فصوص شبكية للفص الرئيسي عند قيم للزاوية ω بمدى أقل حتى من $60 \pm$ من محور التسديد الميكانيكي للهوائي (انظر الشكل 27). وحتى إذا كانت شبكة الضعيف بمسافة $\lambda/2$ بين عناصر الإشعاع الأساسية في الضعيف، فإن الفصوص الجانبية للفصوص الشبكية للفص الرئيسي والمتمركزة عند $90 -$ و $90 +$ من محور التسديد الميكانيكي للهوائي، تجعل مخطط الضعيف مضطرباً (انظر الشكل 28)، وتؤدي كذلك توسع كبير للفص الرئيسي وخسارة التماثل.

الشكل 25

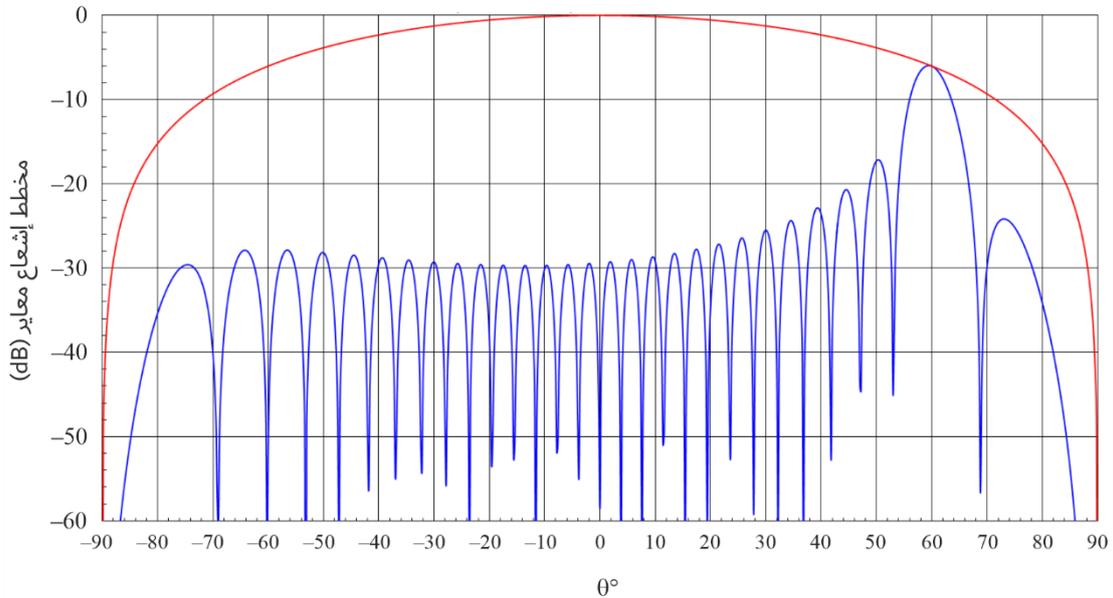
مخطط إشعاع نظري مقيس لصفييف خطي منتظم مؤلف من 30 عنصراً مشعاً وشبكة بمسافة $\lambda/2$ (المنحنى الأزرق) موجه نحو محور التسديد مع مخطط إشعاع للعناصر يجب تمام تربيعي (المنحنى الأحمر)



M.1851-25

الشكل 26

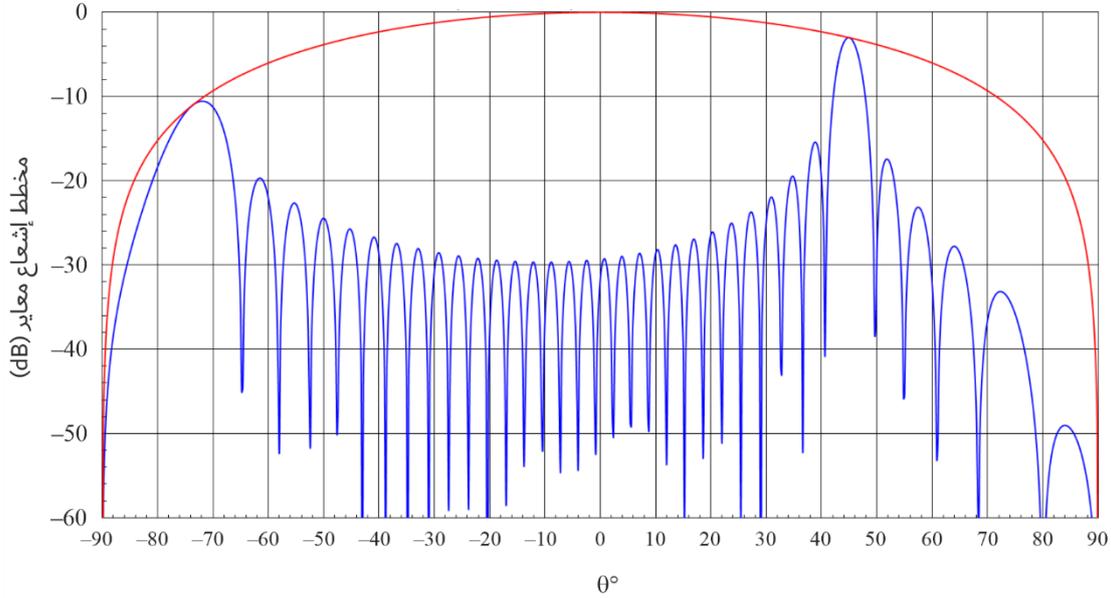
مخطط إشعاع نظري لصفييف خطي منتظم مؤلف من 30 عنصراً مشعاً وشبكة بمسافة $\lambda/2$ (المنحنى الأزرق) موجه نحو الاتجاه 60° مع مخطط إشعاع للعناصر يجب تمام تربيعي (المنحنى الأحمر)



M.1851-26

الشكل 27

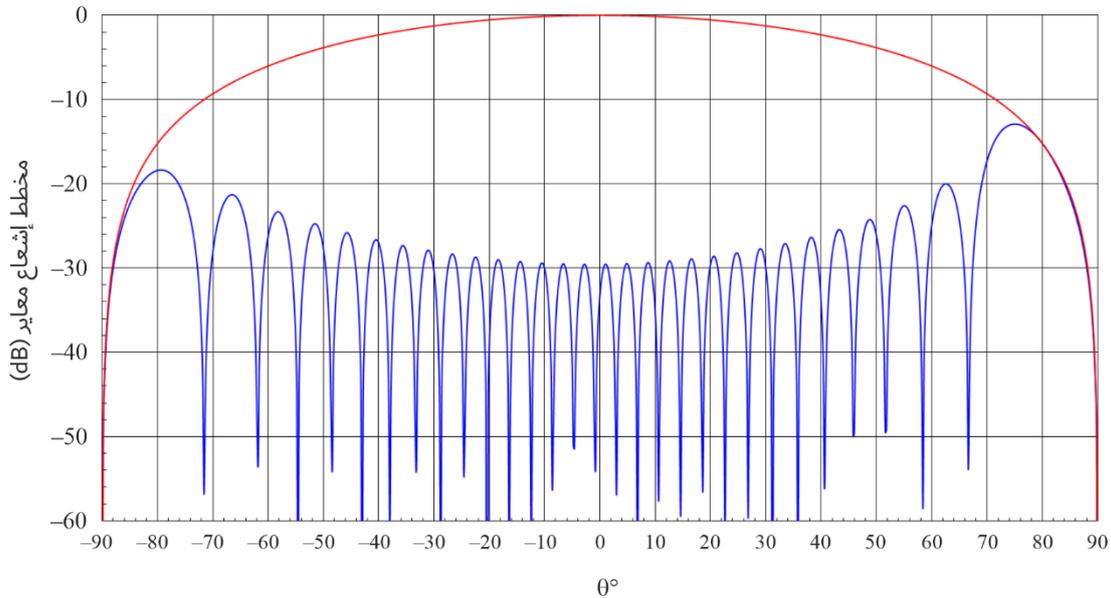
مخطط إشعاع نظري لصفيف خطي منتظم مؤلف من 30 عنصراً مشعاً وشبكة بمسافة $0,6\lambda$ (المنحنى الأزرق) موجه نحو الاتجاه 45° مع مخطط إشعاع للعناصر يجيب تمام تربيعي (المنحنى الأحمر)



M.1851-27

الشكل 28

مخطط إشعاع نظري لصفيف خطي منتظم مؤلف من 30 عنصراً مشعاً وشبكة بمسافة $\lambda/2$ (المنحنى الأزرق) موجه نحو الاتجاه 80° مع مخطط إشعاع للعناصر يجيب تمام تربيعي (المنحنى الأحمر)



M.1851-28

2.6 صفيف الهوائيات المستوي مرتب الأطوار

الصفائف المستوية هي عادةً مجموعة من العناصر الواحدة المشعة المتطابقة (كأحاديات القطب وثنائيات القطب والعناصر الشريطية الصغيرة...) ضمن مستوى. ويتم تنظيمها/مباعدتها عادةً في هيكل منتظم، مما يؤدي إلى أشكال نمطية تكون مثلاً مستطيلة،

أو سداسية، أو دائرية، أو غير ذلك. وتمكّن الصفائف المستوية من مسح الحزمة الرئيسية في أي اتجاه للزاوية θ (الارتفاع) و φ (السمت) في أي اتجاه في الفضاء ثلاثي الأبعاد.

وبالتالي، يمكن التعبير عن مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد للصفيف المستوي من خلال عنصرين:

- أ) اتجاهية العنصر الواحد $D_e(\theta, \varphi)$ في كل اتجاه زاوي (θ, φ) (إما من خلال المخطط أو من خلال الخصائص المادية من قبيل الارتفاع والعرض والطول وثابت العازلية ϵ_r للعنصر، إلخ.)،
- ب) عامل الصفيف $AF_{(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})}(\theta, \varphi)$ كدالة لتوجيه اتجاه الحزمة $(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$ والاتجاه الزاوي (θ, φ) (من خلال شكل الصفيف وعدد العناصر والمباعدة بين العناصر، ومن خلال معاملات الترجيح على مستوى عناصر الصفيف المرتب الأطوار: منتظم أم لا).

وانطلاقاً من هذين العنصرين، يمكن التعبير عن اتجاهية الصفيف المستوي $D_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$ كالتالي:

$$D_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan}) = 4\pi \frac{D_e(\theta, \varphi) \cdot |AF_{(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})}(\theta, \varphi)|^2}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi} D_e(\theta', \varphi') \cdot |AF_{(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})}(\theta', \varphi')|^2 \sin\theta' d\theta' d\varphi'}$$

وبتطبيق عامل الكفاءة η للصفيف المستوي، يمكن وضع مخطط الكسب $G_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$ لتوجيه اتجاه الحزمة $(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$ والاتجاه الزاوي (θ, φ) كالتالي:

$$G_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan}) = \eta \cdot D_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$$

ومن المعادلة التالية أن تمكن من تحديد الاتجاهية في حالة صفيف الهوائيات المستوي مع شبكة مستطيلة على النحو التالي:

$$(50) \quad D_a(\theta, \varphi) = D_e(\theta, \varphi) \cdot \frac{1}{N} \cdot |AF(\theta, \varphi)|^2$$

حيث:

θ : زاوية الارتفاع (بالراديان)

φ : زاوية السمت (بالراديان)

$D_a(\theta, \varphi)$: مخطط اتجاهية هوائيات الصفيف المستوي المنتظم

$D_e(\theta, \varphi)$: مخطط اتجاهية العناصر المشعة الأساسية المدججة في هوائيات الصفيف المستوي المنتظم

N_x : عدد العناصر المشعة الأساسية على طول المحور x

N_y : عدد العناصر المشعة الأساسية على طول المحور y

$N = N_x \cdot N_y$: العدد الإجمالي للعناصر المشعة الأساسية

AF: عامل هوائيات الصفيف المستوي المنتظم

$$(51) \quad AF(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{N_x \psi_x(\theta, \varphi)}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta, \varphi)}{2}\right)} \times \frac{\sin\left(\frac{N_y \psi_y(\theta, \varphi)}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta, \varphi)}{2}\right)}$$

مع

$$(52) \quad \psi_x(\theta, \varphi) = 2\pi \times \frac{d_x}{\lambda} \times (\sin(\theta) \times \cos(\varphi) - \sin(\omega_\theta) \times \cos(\omega_\varphi))$$

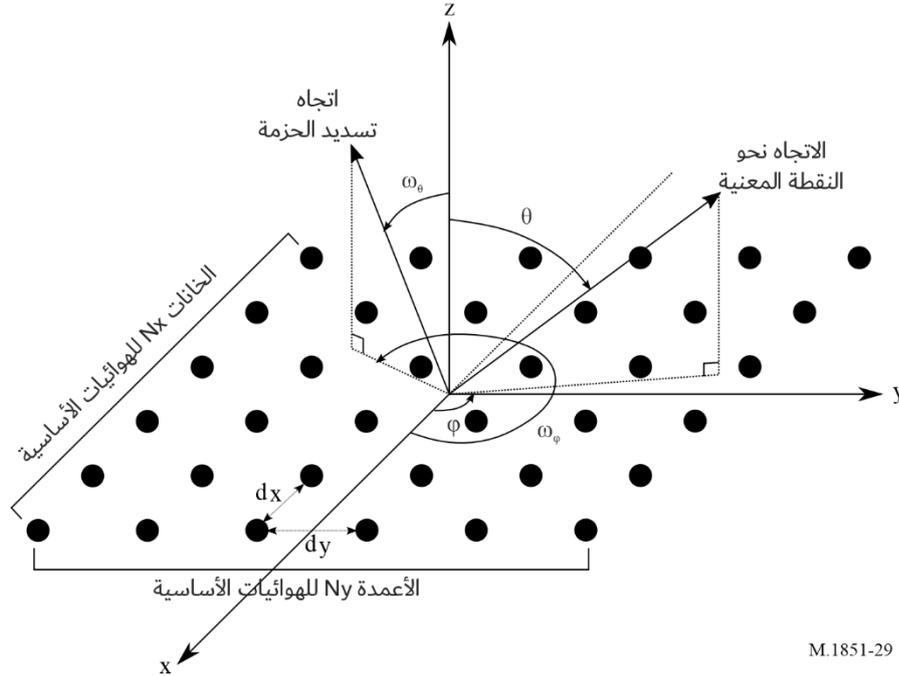
$$(53) \quad \psi_y(\theta, \varphi) = 2\pi \times \frac{d_y}{\lambda} \times (\sin(\theta) \times \sin(\varphi) - \sin(\omega_\theta) \times \sin(\omega_\varphi))$$

حيث:

d_x : المسافة النظامية بين العناصر المشعة الأساسية المنتظمة على طول المحور x (بالأمتار)

- d_y : المسافة النظامية بين العناصر المشعة الأساسية المنتظمة على طول المحور y (بالأمتار)
- λ : طول الموجة عند التردد المعني (بالأمتار)
- ω_θ : زاوية التوجيه الإلكتروني للحزمة في الارتفاع (بالراديان)
- ω_φ : زاوية التوجيه الإلكتروني للحزمة في السميت (بالراديان).

الشكل 29



M.1851-29

وعلى غرار صفيف الهوائيات الخطية مرتبة الأطوار، يسمح الصفيف المستوي مرتب الأطوار بتوجيه الفص الرئيسي للهوائي إلكترونياً باتجاه أي إحداثيات كروية. غير أن زوايا التوجيه الكبيرة للسميت والارتفاع تؤدي إلى ظهور تأثيرات فصوص جانبية محددة في مخطط الهوائي، وكذلك إلى توسع كبير في الفص الرئيسي وخسارة التماثل. والفصوص الشبكية متطابقة مع تلك المبينة في الفقرة 1.6. ويتطلب نموذج هذا القسم معرفة عدد العناصر (N_x , N_y) والمسافات بين العناصر (d_x , d_y) ومخطط إشعاع العنصر الواحد والكسب ذي الصلة للعناصر. وفي حال عدم توفر أي معرفة بمعلمات الدخل هذه، ينبغي استخدام أقنعة ذروية أو متوسطة، كما هو مبين في الفقرة 1.1.2.

7 كفاءة الهوائي

تحدد كفاءة الهوائي كمية القدرة المقدمة إلى الهوائي التي يتم إشعاعها فعلياً، وتُعرّف على أنها النسبة (بالوحدات الخطية للقدرة) بين الكميتين ويجب أن تكون حتماً أقل من 1 (أو ما يعادل 0 dB). ونتيجة لذلك، يجب توخي الحذر عند استخدام نموذج من هذه التوصية، لضمان امتثال مخطط كسب الهوائي المتولد لهذا القيد المفروض على كفاءة الهوائي.

ويمكن حساب إجمالي الكسب المدمج (TIG) عند توفر المخطط الإشعاعي ثلاثي الأبعاد للهوائي. قد يبالغ في تقدير إجمالي الكسب المدمج في الحالات التي تُستخدم فيها أقنعة ذروية أو متوسطة للهوائي. ويحدّد إجمالي الكسب المدمج بوحدات خطية على النحو التالي:

$$TIG = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi} G(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi$$

حيث:

 θ : زاوية الارتفاع (بالراديان) ϕ : زاوية السم (بالراديان) $G(\theta, \phi)$: كسب الهوائي فيما يتعلق بهوائي متناح (خطي)

8 أمثلة عن مخططات مقيسة

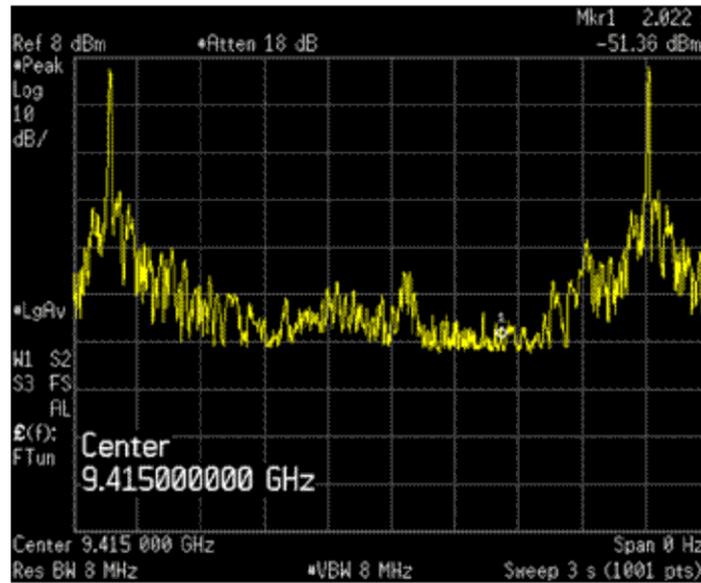
يعرض الشكلان 30 و 31 مثالين لمخططين مقيسين لهوائي رادار، في النطاق 9 GHz. ويمثل المحور X زاوية السم الممتدة لأكثر من 360°، ويمثل المحور Y مستوى القدرة المستقبلية عند كل زاوية سم. ومخطط القدرة مُقيس على أقصى قيمة له أو على هوائي متناح يُعتبر مخطط الهوائي المقيس أو مخطط الاتجاهية.

وتشير التحليلات الأولى لمخططات الهوائي المقيسة إلى أن الفصوص الجانبية الأولى تظهر بالقرب من -30 dBc مع ميل ملحوظ للفصوص الجانبية، ما يؤدي إلى تقدير على وجه التقريب باستخدام قانون إضاءة الفتحة بجيب التمام التريبيعي. وقد يبدو الحد الأساسي النظري للقناع عند -60 dBc الذي يقدمه نموذج جيب التمام التريبيعي منخفضاً جداً في هذه الحالة بسبب وجود فص خلفي وفصوص وانعراجات إلى الخلف في مخطط هذا الهوائي. ولذلك ينبغي، إذا لزم الأمر، استخدام مخططات هوائي حقيقية بدلاً من المخططات النظرية كلما أمكن.

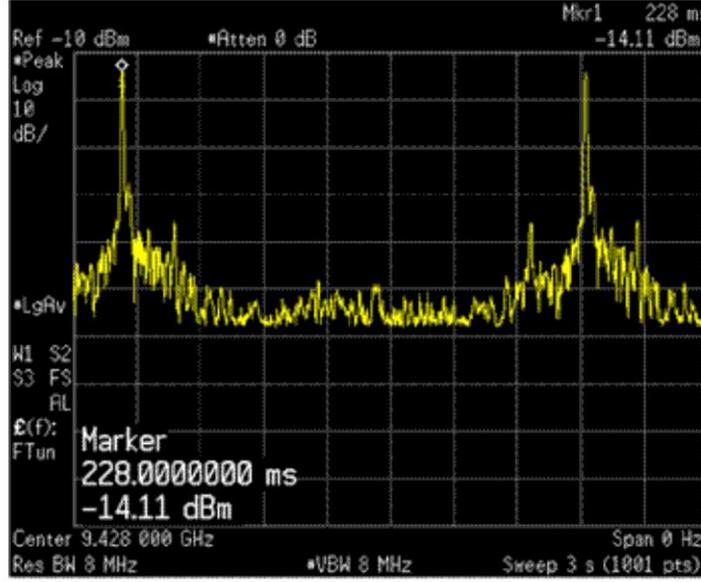
ويبين الشكل 30 مثلاً لمخططات مقيسة بقاطع التمام التريبيعي. ويتم الحصول على حزم الرادار من هوائي عاكس يُغذى ببوقين ينتجان حزمتين مائلتين عند زوايا ارتفاع مختلفة.

الشكل 30

مثال لمخطط هوائي مقاس



الشكل 31
مثال لمخطط هوائي مقاس

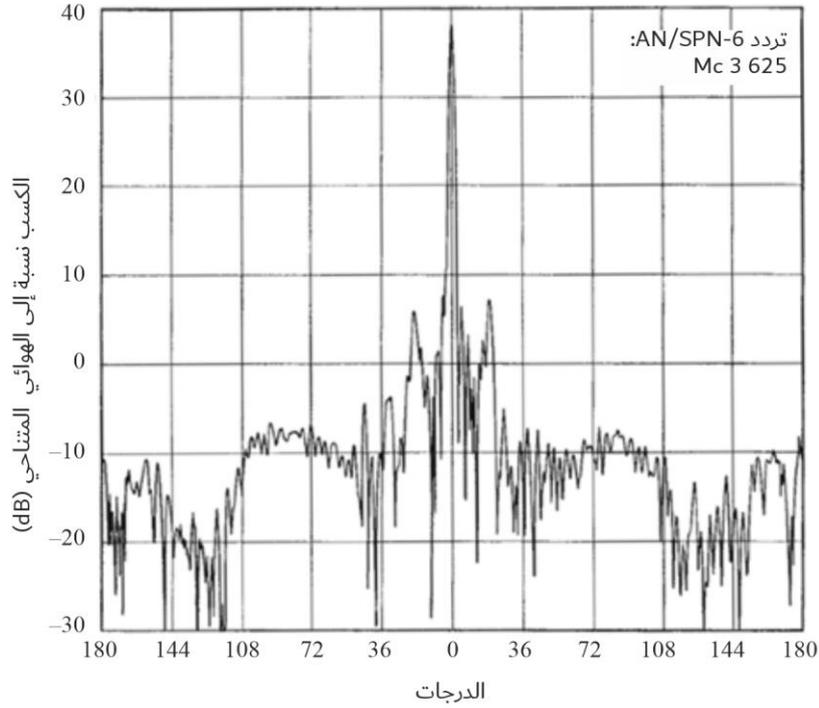


M.1851-31

ويبين الشكلان 32 و33 مثالين آخرين.

الشكل 32

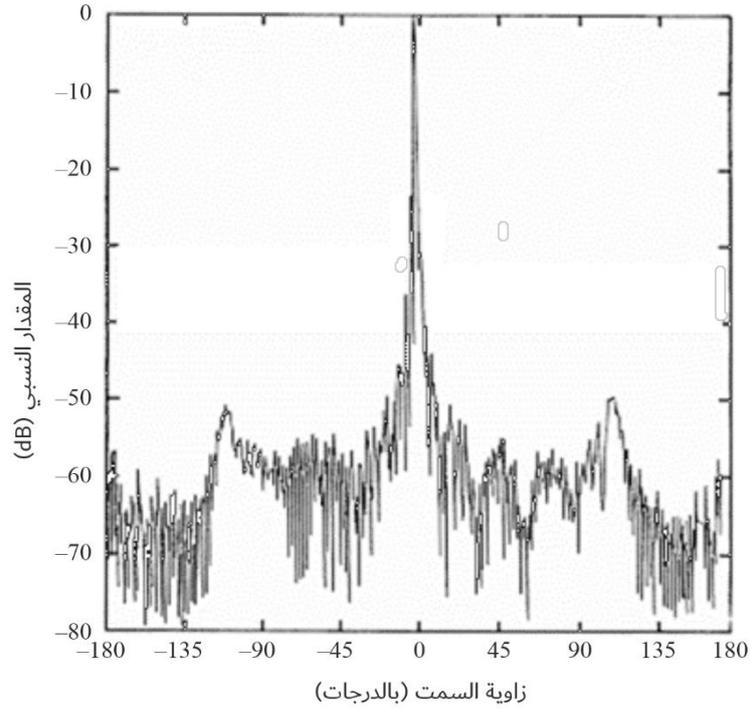
القياس انطلاقاً من هوائي رادار AN/SPN-6 عند 3,6 GHz و38 dBi



M.1851-32

الشكل 33

مخطط هوائي رادار دوبلر من رادار للأرصاد الجوية بفص جانبي أول
ذي مستوى يبلغ 25 dB ونسبة المقدمة إلى المؤخرة 60 dB

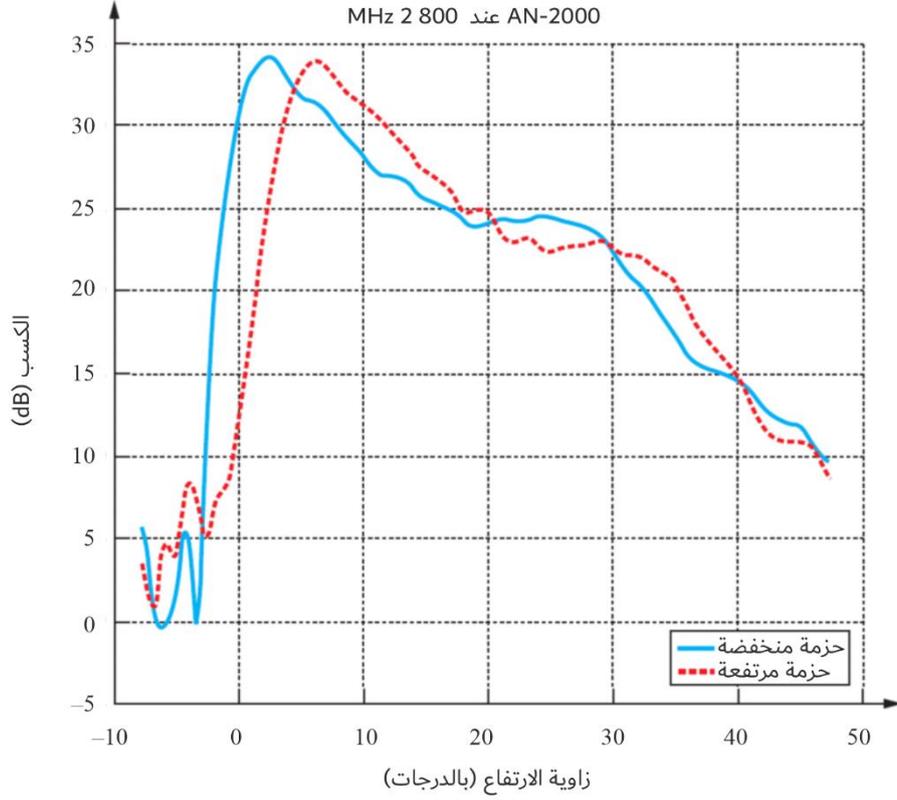


M.1851-33

يمكن مقارنة الشكل 34 مع المخطط النظري للهوائي بقاطع التمام التربيعي المستمد من المعادلتين (22) و(23).

الشكل 34

القياس انطلاقاً من هوائي لمراقبة الحركة الجوية STAR2000 عند 2,8 GHz



M.1851-34