الاتحـاد الدولـي للاتصـالات
قطاع الاتصالات الراديوية

منشورات ITU
التوصيات

التوصية ITU-R BS.705-2

(2025/11)

السلسلة BS: الخدمة الإذاعية (الصوتية)

خصائص ومخططات هوائيات الإرسال والاستقبال على الموجات الديكامترية (HF)

تمهيد

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.

حقوق الملكية الفكرية

يسترعي الاتحاد الانتباه إلى أن تطبيق هذه التوصية أو تنفيذها قد يستلزم استعمال حق من حقوق الملكية الفكرية. ولا يتخذ الاتحاد أي موقف من القرائن المتعلقة بحقوق الملكية الفكرية أو صلاحيتها أو نطاق تطبيقها سواء طالب بها عضو من أعضاء الاتحاد أو طرف آخر لا تشمله عملية إعداد التوصيات.

وعند الموافقة على هذه التوصية، كان الاتحاد قد تلقى إخطاراً بملكية فكرية تحميها براءات الاختراع يمكن المطالبة بها لتنفيذ هذه التوصية. ومع ذلك، ونظراً إلى أن هذه المعلومات قد لا تكون هي الأحدث، يوصى المسؤولون عن تنفيذ هذه التوصية بالاطلاع على معلومات براءات الاختراع ذات الصلة لقطاع الاتصالات الراديوية المتاحة في الموقع الإلكتروني: https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/Pages/itu-r-patent-information.aspx.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني https://www.itu.int/publ/R-REC/en)

السلسلة	العنوان
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
RS	أنظمة الاستشعار عن بُعد
S	الخدمة الثابتة الساتلية
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، 2026

© ITU 2026
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 BS.705-2

خصائص ومخططات هوائيات الإرسال والاستقبال على الموجات الديكامترية (HF)

(2025-1995-1990)

مجال التطبيق

تقدم هذه التوصية معلومات شاملة وتفصيلية عن الخصائص النظرية لهوائيات الإرسال على الموجات الديكامترية (HF) وكذلك خصائص هوائي استقبال مرجعي على الموجات الديكامترية (HF) يُستخدم لأغراض التخطيط.

مصطلحات أساسية

الموجات الديكامترية، إذاعة، هوائي، مخطط الإشعاع، النطاق 7

الاختصارات

EM كهرمغنطيسي/كهرمغنطيسية (*Electromagnetic*)

HRP مخطط إشعاع أفقي (*Horizontal radiation pattern*)

VRP مخطط إشعاع عمودي (*Vertical radiation pattern*)

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن مجموعة من مخططات هوائيات (الإرسال والاستقبال) للإذاعة على الموجات الديكامترية، إلى جانب معلومات أخرى ذات صلة، ضرورية عند تخطيط خدمات الإذاعة الصوتية في النطاق 7 (نطاق الموجات الديكامترية (HF))؛

ب) أن هذه المخططات ينبغي أن تكون سهلة الفهم والاستعمال من قبل مهندسي التخطيط والتصميم، مع الاحتفاظ بكل المعلومات الضرورية المفيدة؛

ج) أن خصائص هوائيات الموجات الديكامترية الواردة في الملحقين 1 و2 بهذه التوصية لها تطبيقات واسعة؛

د) أن بيئة الاستقبال تؤثر تأثيراً مهماً في مخطط إشعاع هوائيات الاستقبال،

توصي

1 باستعمال الصيغ المبينة بواسطة مخططات نموذجية والواردة في المرفق 1 بالملحق 1 بهذه التوصية مع برامج الحاسوب المقابلة لتقييم أداء هوائيات الإرسال بالموجات الديكامترية (HF)؛ خاصة لأغراض التخطيط

2 باستعمال الصيغ المبينة بواسطة مخطط نموذجي والواردة في الجزء 1 من الملحق 2 بهذه التوصية لتقييم أداء هوائي الاستقبال لتخطيط خدمات إذاعة سليمة في النطاق 7 (HF).

الملاحظة 1 – يعطي الجزء 1 من الملحق 1 معلومات تفصيلية بشأن الخصائص النظرية لمختلف هوائيات الإرسال HF.

تم تطوير برامج الحاسوب انطلاقاً من اعتبارات نظرية لحساب مخططات الإشعاع والكسب لمختلف أنماط الهوائيات المدرجة.

بالنسبة لكل هوائي مختار، تتضمن معطيات الخرج المتيسرة كسب الاتجاهية، والكسب النسبي لسمت وزاوية ارتفاع معينين، وجداول الكسب النسبي بالنسبة للكسب الأقصى وأخيراً عدداً من الخروج البيانية المختلفة.

تُدرج بعض المخططات النموذجية لتوضيح بعض الخروج الممكنة لإجراء الحساب.

سوف ينحرف الأداء الحقيقي للهوائيات المستعملة في الحالات العملية إلى حدٍ ما عن الخصائص المحسوبة بطريقة تحليلية. ولهذا الغرض فإن الجزء 2 من الملحق 1 يعطي نصائح عن هذا الانحراف على أساس نتائج مجموعة شاملة من القياسات التي قامت بها مختلف الإدارات بواسطة تقنيات حديثة.

الملحق 1

هوائيات الإرسال على الموجات الديكامترية (HF)

جدول المحتويات

الصفحة

الجزء 1 من الملحق 1 – خصائص ومخططات هوائي الإرسال على الموجات الديكامترية (HF) 5

1 مقدمة 5

2 تمثيل هندسي لمخططات إشعاع الهوائي 6

1.2 التمثيل البياني 7

3 حساب مخططات الإشعاع والكسب 9

1.3 اعتبارات عامة 9

2.3 مخططات الإشعاع 9

3.3 الاتجاهية والكسب 9

4.3 أثر الأرض 10

4 صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية 11

1.4 اعتبارات عامة 11

2.4 تسمية صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية 12

3.4 الإمالة 16

4.4 صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية المرتبة عمودياً 17

5.4 صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية المرتبة أفقياً (الهوائيات المدارية) 19

6.4 الصفائف شاملة الاتجاهات لثنائيات الأقطاب الأفقية 19

7.4 حساب مخططات صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية 20

5 الهوائيات اللوغاريتمية الدورية 36
1.5 اعتبارات عامة 36
2.5 تسمية الهوائيات اللوغاريتمية الدورية 36
3.5 حساب مخططات الهوائيات اللوغاريتمية الدورية الأفقية 38
4.5 حساب مخططات الهوائيات اللوغاريتمية الدورية العمودية 50
6 الهوائيات المعينية 52
1.6 اعتبارات عامة 52
2.6 تسمية الهوائيات المعينية 52
3.6 حساب مخططات الهوائي المعيني 53
7 الهوائيات أحادية الأقطاب العمودية 55
1.7 اعتبارات عامة 55
2.7 تسمية الهوائيات أحادية الأقطاب العمودية 56
3.7 هوائي أحادي الأقطاب دون نظام أرض 56
4.7 الهوائيات أحادية الأقطاب بنظام أرض 58
8 هوائيات ياغي–يودا 61
1.8 اعتبارات عامة 61
2.8 تسمية هوائيات ياغي–يودا 62
3.8 حساب مخططات هوائيات ياغي–يودا 63
4.8 المراجع 63
9 أمثلة عن المخططات 63
الجزء 2 من الملحق 1 – الجوانب العملية لهوائيات الإرسال على الموجات الديكامترية (HF) 64
1 مقدمة 64
2 قياس مخططات إشعاع الهوائيات 64
1.2 طريقة القياس 64
2.2 الاعتبارات المتعلقة باستخدام طائرة مروحية للقياسات 64
3.2 تجهيزات القياس 65
4.2 إجراءات القياس 65
5.2 معالجة المعطيات المقيسة 68
3 مقارنة مخططات الإشعاع النظرية والمقيسة 70
1.3 مقارنة نسب الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي النظرية والمقيسة 73
4 تأثير المحيط على مخططات الإشعاع 74
1.4 طوبوغرافيا الأرض 74

2.4 توصيلية الأرض 76
3.4 بنى محلية أخرى 76
5 التغيرات في الأداء الفعلي للهوائيات 78
1.5 المخطط السمتي 79
2.5 المخطط المائل 79
3.5 سوية الإشعاع العملي الدنيا لأغراض التخطيط 83
6 الطبيعة المناسبة وتطبيق الهوائيات 85
1.6 هوائيات ثنائيات الأقطاب الأفقية 85
2.6 الهوائيات الستارية القابلة للتوجيه 85
3.6 الهوائيات المعينية 85
4.6 الهوائيات اللوغاريتمية الدورية ذات السمت الثابت 85
5.6 الهوائيات اللوغاريتمية الدورية القابلة للتوجيه 85
6.6 اختيار الهوائي الأمثل 85
المرفق 1 بالملحق 1 – أمثلة المخططات 88
1 الهوائيات الستارية 88
1.1 الهوائيات الستارية دون عاكس 88
2.1 الهوائيات الستارية بعاكس موالف 88
3.1 الهوائيات الستارية بشاشة عاكسة لا دورية 88
2 الهوائيات المدارية 88
3 الهوائيات اللوغاريتمية الدورية 88
4 الهوائيات الربعية 88
5 هوائيات ثنائيات الأقطاب المتقاطعة 89
6 الهوائيات المعينية 89
7 هوائيات أحادية الأقطاب العمودية 89
8 هوائيات ياغي–يودا 89

الجزء 1
من الملحق 1

خصائص ومخططات هوائي الإرسال على الموجات الديكامترية (HF)

1 مقدمة

إن هدف الجزء 1 من هذا الملحق هو تقديم معلومات شاملة وتفصيلية عن الخصائص النظرية لهوائيات الإرسال على الموجات الديكامترية (HF). وتتمثل الطريقة التحليلية المتبعة في حساب مخطط واتجاهية الكسب لأي من أنماط الهوائيات المدرجة. وذلك على الرغم من استعمال الافتراضات التالية للتبسيط:

- الهوائي الواقع على أرض منبسطة متجانسة وغير مثالية؛
- عناصر هوائي تتكون من أسلاك رقيقة خطية؛
- توزيع التيار الجيبي في العناصر المشعة؛

تبين أن الخوارزميات المطورة في الآداب الحالية توفر حلاً وسطاً جيداً بين الدقة وسهولة الحساب.

لقد تم التحقق من طريقة تطبيق انعكاس المعاملات على أرض غير مثالية على أنها صحيحة. وتم تكييف طريقة حساب الكسب الأقصى للهوائيات لتأخذ في الحسبان بكيفية صحيحة أثر مختلف الإيصاليات. وتمت دراسة الخلفية النظرية الأساسية واشتقاق الصيغ المناسبة.

تم تطوير برامج الحاسوب لحساب مخططات الإشعاع والكسب للأنماط التالية من الهوائيات، المستعملة من قبل الإدارات، للإذاعة بالموجات الديكامترية (HF) وخدمات أخرى:

- صفائف ثنائيات أقطاب أفقية ذات نصف موجة؛
- هوائيات ربعية وثنائيات أقطاب أفقية؛
- هوائيات لوغاريتمية دورية؛
- هوائيات مدارية؛
- هوائيات معينية؛
- أحاديات أقطاب أفقية.

وفي هذه التوصية، تشكل برامج الحاسوب جزءاً لا يتجزأ من النشر، مما يسمح للقارئ بالقيام بحساباته الخاصة لأي نمط هوائي يرغب فيه في ظروف متغيرة.

فيما يخص نمط الهوائي المختار، تتضمن المعطيات المتيسرة عند الخرج: كسب الاتجاهية والكسب النسبي لسمت وزاوية ارتفاع معينين، وجداول الكسب النسبي بالنسبة للكسب الأقصى وعدداً من الخروج البيانية المختلفة.

لهذا السبب، لا تُدرج سوى بعض أمثلة المخططات لتوضيح بعض النتائج التي يمكن الحصول عليها بإجراء الحساب المستعمل.

هناك أمل في أن يقدم هذا الجزء إلى المهندس وسيلة مفيدة لتطوير وتخطيط وتشغيل الأنظمة الراديوية.

إن الأداء الحقيقي للهوائيات في الواقع تختلف إلى حد ما عن الخصائص المحسوبة بطريقة تحليلية. والجزء 2 من هذا الملحق يعطي معلومات عن هذا الانحراف على أساس نتائج مجموعة شاملة من القياسات التي أجرتها مختلف الإدارات باستعمال تقنيات حديثة.

2 تمثيل هندسي لمخططات إشعاع الهوائي

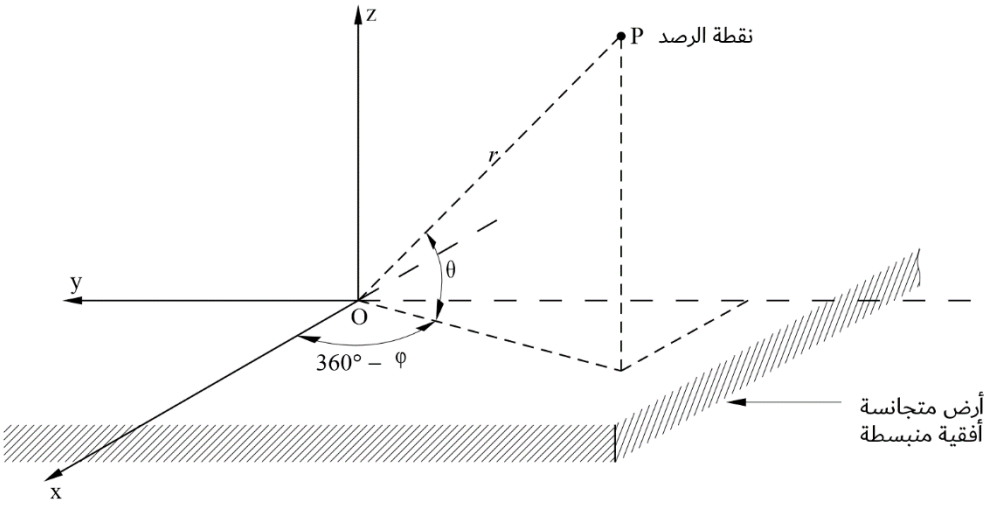
قد يتكون الهوائي من عنصر واحد أو عدد من العناصر المشعة. ويمكن تمثيل توزيع الإشعاع الفضائي، أو مخطط هوائي بمجموعة نقاط ثلاثية الأبعاد، تكون فيه لكل نقطة قيمة قوة محركة موجية (c.m.f.)[1]، على أساس نصف كرة تقع فوق الأرض، مع الهوائي في مركزها ونصف قطر واسع بالمقارنة مع القدود المادية والكهربائية للهوائي.

يشار إلى القوة المحركة الموجية عند نقطة ما على الكرة بالوحدة dB تحت القوة المحركة الموجية القصوى التي يُفترض أن قيمتها هي 0 dB.

يقوم مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد على نظام الإحداثيات المرجعية للشكل 1.

الشكل 1

نظام الإحداثيات المرجعية



BS.0705-01

في نظام إحداثيات قطبية كروية، تُحدد المعلمات التالية:

θ: زاوية الارتفاع بالنسبة للمستوي الأفقي ($0° \le \theta \le 90°$)

φ: زاوية السمت بالنسبة لمحور x ($0° \le \varphi \le 360°$)

r: المسافة بين المصدر ونقطة الرصد البعيدة حيث يُحسب المجال البعيد.

---

[1] تعريف القوة المحركة الموجية والقوة المحركة الموجية الخاصة (انظر التوصية ITU-R BS.561):

إن القوة المحركة الموجية عند نقطة ما في الفضاء هي ناتج شدة المجال الكهربائي عند تلك النقطة التي ينتجها الهوائي والمسافة من تلك النقطة إلى الهوائي. يجب أن تكون هذه المسافة واسعة بما يكفي لتكون المكونات الرجعية للمجال قابلة للإهمال.

إن القوة المحركة الموجية بالفولت تساوي رقمياً شدة المجال الكهربائي (mV/m) عند مسافة 1 km.

إن القوة المحركة الموجية الخاصة عند نقطة ما في الفضاء هي القوة المحركة الموجية عند تلك النقطة عندما تكون القدرة المشعة بواسطة الهوائي هي 1 kW.

1.2 التمثيل البياني

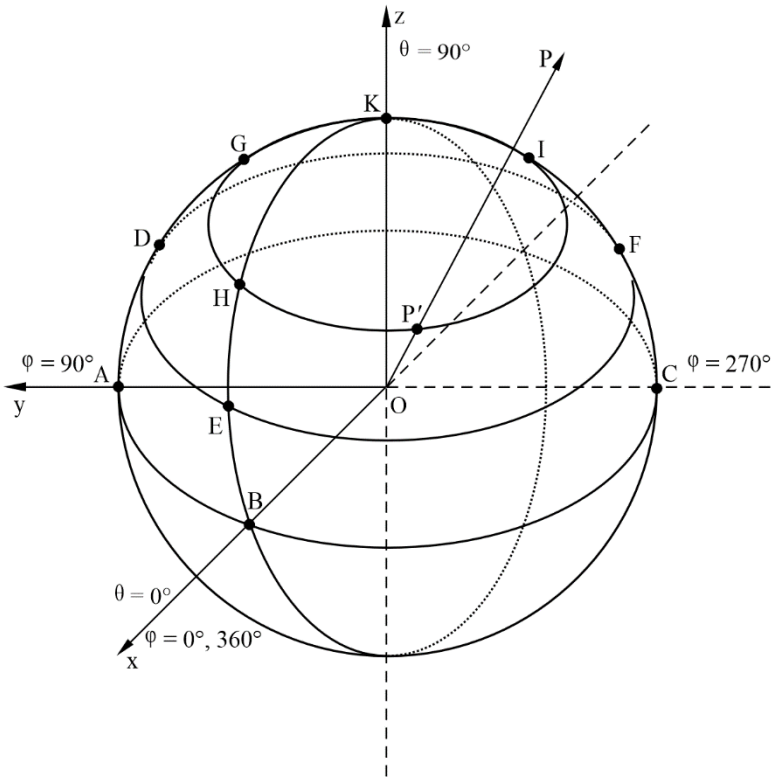
هناك عدة تمثيلات ممكنة لمخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد. وغالباً ما تُستعمل مجموعة من الأقسام الخاصة لمخطط الإشعاع عند زوايا ارتفاع خاصة (المخططات السمتية) وعند زوايا سمتية خاصة (المخططات العمودية)، لوصف مخطط الإشعاع التام. ويتمثل القسمان الأكثر أهمية في المخططات السمتية عند زاوية الارتفاع التي تحدث عندها القوة المحركة الموجية القصوى والمخطط العمودي عند الزاوية السمتية التي تحدث عندها القوة المحركة الموجية القصوى. ويُسمى هذان القسمان على التوالي مخطط الإشعاع الأفقي (HRP) ومخطط الإشعاع العمودي (VRP).

لتمثيل نصف الكرة والمنحنيات متساوية المجالات على مستوي الورق، يُستعمل الإسقاط المسمى "جيبياً" أو "إسقاط سانسون – فلامستيد".

يقع الهوائي في مركز كرة كما هو في الشكل 2 في نظام الإحداثيات المرجعية للشكل 1.

الشكل 2

نظام الإحداثيات الكروية



BS.0705-02

في هذا الإسقاط، تتحول النقطة $P'(\theta, \varphi)$ على الكرة للربعي $0° \le \varphi \le 90°$، $0° \le \theta \le 90°$ إلى $P''(\theta', \varphi')$ على مستوٍ حيث $\theta' = \theta$ و$\varphi' = \varphi \cos \theta$. ويُطبق تحويل مماثل على الربعيات الأخرى.

في إسقاط سانسون–فلامستيد المبين في الشكل 3 لنصف الكرة العلوي، يُمثَّل الاستواء بخط أفقي ويصبح مستوي الزوال المركزي عند $\varphi = 0°$ خطاً متعامداً مع الاستواء مشكلاً بذلك محوراً عمودياً.

إن متوازيات نصف الكرة خطوط مستقيمة متساوية التباعد على مستوي الزوال المركزي بالتناسب مع زاوية الارتفاع. وتمثل مستويات الزوال أجزاء من موجات جيبية متساوية التباعد بالتناسب مع زاوية السمت φ، كلها تمر عبر قطب نصف الكرة.

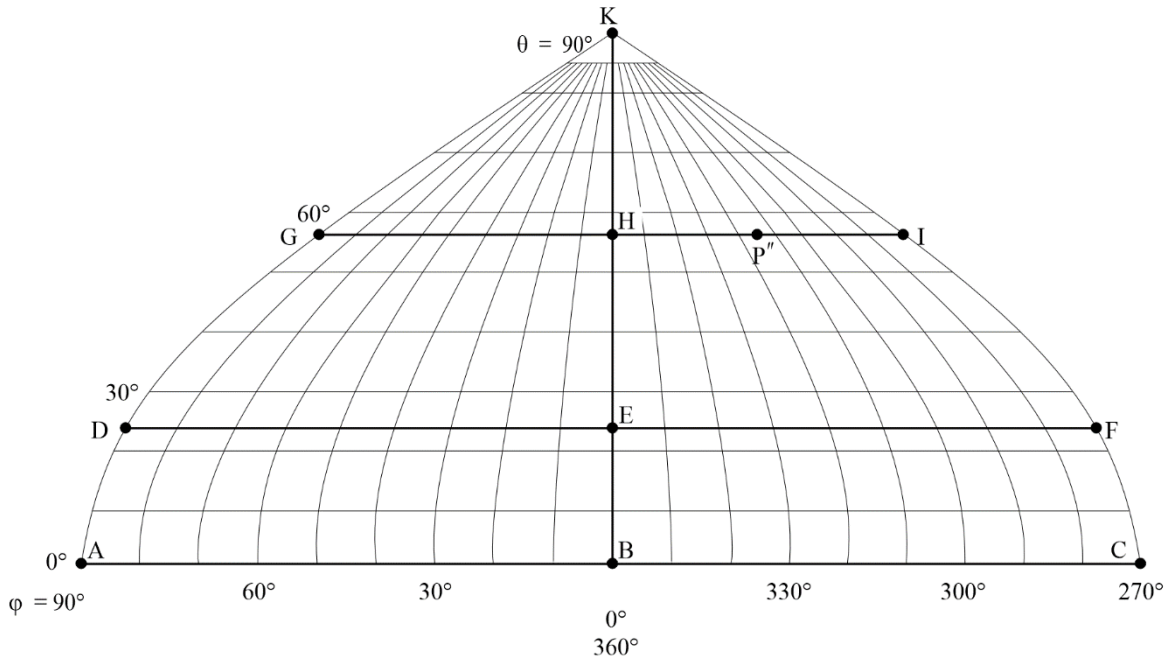
هناك خاصيتان مهمتان لهذا الإسقاط تتمثلان في أن مناطق متساوية داخل نصف الكرة تبقى متساوية في مستوي الورق، وأن المخططات السمتية لزوايا ارتفاع ثابتة، أي أقسام مخروطية، تُمثل كخطوط مستقيمة متوازية مع خط الاستواء.

يكون المستوي المرجعي الأفقي الذي يمر عبر السمت 270° إلى 90° في أغلب الحالات مستوي توازٍ للهوائي. ولتمثيل نصف الكرة كاملاً، هناك حاجة إلى مخططين: مخطط الإشعاع الأمامي ومخطط الإشعاع الخلفي. يمثل الأول الإشعاع في الكرة الربعية فوق الأرض بين زوايا السمت 270° و0° و90°، بينما يتضمن الثاني الإشعاع في الكرة الربعية الأخرى فوق الأرض (90° و360° و270°).

توسم الأكفة ذات شدة مجال متساوية بقيم كسب نسبية بالمقارنة مع القيمة المقابلة للإشعاع الأقصى، التي تحمل العلامة 0 dB.

الشكل 3

إسقاط سانسون – فلامستيد



BS.0705-03

إن القيم المعتمدة للأكفة هي التالية (بالوحدة dB للتوهين بالنسبة للقيمة القصوى):

3 و6 و10 و15 و20 و25 و30.

يبين كل مخطط:

- قيمة زاوية الارتفاع θ (بالدرجات) لاتجاه الإشعاع الأقصى؛
- القيمة (dB) لكسب الاتجاهية بالنسبة لهوائي متناحٍ[2] في الفضاء الحر، G_i.

[2] للتعاريف انظر الرقم **160.1** من لوائح الراديو والتوصية ITU-R V.573.

3 حساب مخططات الإشعاع والكسب

1.3 اعتبارات عامة

تم استعمال الافتراضات التالية لحساب مخططات الإشعاع وكسب أنماط الهوائي المدرجة في هذا الجزء:

- يقع الهوائي على أرض منبسطة متجانسة (تتطابق مع المستوي x-y). في حالة أرض غير مثالية نمطية، تم استعمال توصيلية $\sigma = 0{,}01$ S/m وثابتة عازل كهربائي (سماحية نسبية) ($\varepsilon = 4{,}0$) (أرض متوسطة)، كقيمتين بالتغيب؛
- إن عناصر الهوائي أسلاك خطية رقيقة؛
- توزع التيارات في العناصر المشعة توزيعاً جيبياً.

2.3 مخططات الإشعاع

في نظام الإحداثيات المرجعية للشكل 1، تُعطى وظيفة مخطط الإشعاع المقيسة بواسطة العبارة التالية:

$$F(\theta, \varphi) = K|E(\theta, \varphi)| = K|f(\theta, \varphi)| \cdot |S|$$

حيث:

K: المعامل المقيس للحصول على ($|F(\theta, \varphi)|_{max} = 1$)، أي 0 dB

$E(\theta, \varphi)$: المجال الإجمالي الناتج عن الصفيف

$f(\theta, \varphi)$: وظيفة اتجاهية العناصر

S: عامل صفيف يتوقف على التوزيع الفضائي للعناصر.

إن التعبير عن المجال الإجمالي بدلالة مكوناته في نظام إحداثيات كروي يعطي:

$$|E(\theta, \varphi)| = \left[|E_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |E_\varphi(\theta, \varphi)|^2\right]^{1/2}$$

الملاحظة 1 – في الأقسام التالية سوف يجب أن تُحد مخططات الإشعاع المحسوبة وفقاً للصيغة السابقة في سوية الإشعاع الأدنى المشار إليها في الفقرة 3.5 من الجزء 2 من هذا الملحق.

3.3 الاتجاهية والكسب

تُعرف الاتجاهية، D، لهوائي ما على أنها نسبة شدة إشعاعه القصوى (أو كثافة تدفق القدرة) إلى شدة الإشعاع لمصدر متناحٍ يشع نفس القدرة الإجمالية. ويمكن التعبير عنها على النحو التالي:

$$D = \frac{4\pi \cdot |E(\theta,\varphi)|^2_{max}}{W_0} = \frac{4\pi \cdot |E(\theta,\varphi)|^2_{max}}{\int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |E(\theta,\varphi)|^2 \cos\theta \, d\theta \, d\varphi}$$

حيث:

W_0: شدة الإشعاع للمصدر المتناحي.

إن التعريف السابق للاتجاهية يتوقف فقط على قالب مخطط إشعاع الهوائي.

يُعطى كسب الاتجاهية بالنسبة لهوائي متناحٍ في الفضاء الحر بواسطة:

$$G_i = 10 \log_{10} D$$

يفترض التعريف السابق فعالية 100% لنظام الهوائي. ولتؤخذ في الحسبان فعالية هوائي تقل عن 100%، من الضروري تعريف كسب الهوائي على أنه نسبة شدة إشعاعه القصوى إلى شدة الإشعاع القصوى لهوائي مرجعي مع نفس القدرة عند الدخل.

4.3 أثر الأرض

باستعمال الافتراضات الواردة في الفقرة 1.3، وكذلك بافتراض أن الهوائي يقع في نظام إحداثيات الشكل 1، حيث يمثل المستوي x-y أرضاً منبسطة متجانسة، فإن المجال البعيد الناتج عن نقطة الرصد P(r, θ, φ)، بما في ذلك الجزء المنعكس على الأرض، يمكن أن يُشتق على النحو التالي.

إذا افترض أن الإشعاع الوارد على الأرض له جبهة مستوٍ، يمكن اعتبار الحالتين المختلفتين التاليتين:

أ) الاستقطاب الأفقي،

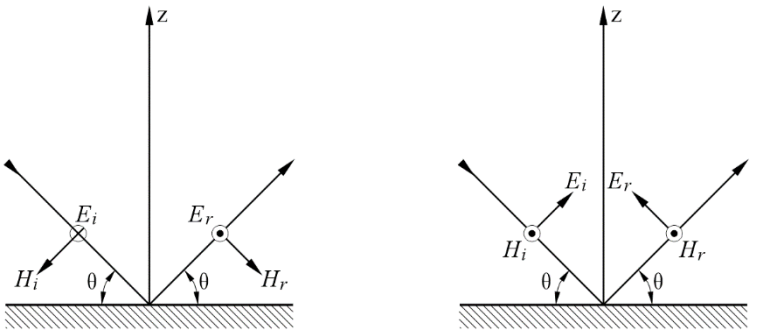
ب) الاستقطاب العمودي.

في حالة *الاستقطاب الأفقي*، تكون المتجهة الكهربائية الواردة (المباشرة) الواردة متوازية مع مستوي الانعكاس x-y (ومن ثم فإنها تكون متعامدة مع مستوي الورود، أي المستوي الذي يتضمن اتجاه الانتشار والمتعامد مع السطح العاكس، كما هو مبين في الشكل 4أ)).

في حالة *الاستقطاب العمودي*، تكون المتجهة الكهربائية الواردة متوازية مع مستوي الورود بينما تكون المتجهة المغنطيسية الواردة المصاحبة متوازية مع السطح العاكس، كما هو مبين في الشكل 4ب).

الشكل 4

الانعكاس الموجي على أرض غير مثالية



أ) استقطاب أفقي

ب) استقطاب عمودي

BS.0705-04

عندئذ يمكن التعبير عن إجمالي مكونات المجال البعيد فوق الأرض على النحو التالي:

أ) *الاستقطاب الأفقي*

$$E_h = E_i(r_1) + E_r(r_2) = E_i(r_1) + R_h\, E_i(r_2)$$

حيث:

E_h: المكونة الأفقية الإجمالية

r_1: المسافة المباشرة بين الهوائي ونقطة الرصد

r_2: المسافة من صورة الهوائي إلى نقطة الرصد

E_i: المجال الكهربائي المباشر

E_r: المجال الكهربائي المنعكس

R_h: معامل انعكاس معقد للموجات ذات الاستقطاب الأفقي، يُعطى بالمعادلة التالية:

$$R_h = \frac{\sin\theta - \left[(\varepsilon - \cos^2\theta) - j\frac{18\,000\cdot\sigma}{f_{MHz}}\right]^{1/2}}{\sin\theta + \left[(\varepsilon - \cos^2\theta) - j\frac{18\,000\cdot\sigma}{f_{MHz}}\right]^{1/2}}$$

حيث:

θ: زاوية التماس

ε: السماحية النسبية (أو ثابتة العازل الكهربائي) للأرض

σ: إيصالية الأرض (S/m)

f_{MHz}: تردد التشغيل (MHz).

ب) *الاستقطاب العمودي*

$$E_h' = E_i(r_1) - R_v\, E_i(r_2)$$
$$E_v = E_i(r_1) - R_v\, E_i(r_2)$$

حيث:

E'_h: المكونة الأفقية الإجمالية

E_v: المكونة العمودية الإجمالية

R_v: معامل انعكاس معقد للموجات ذات الاستقطاب العمودي، يُعطى بالمعادلة التالية:

$$R_v = \frac{\left[\varepsilon - j\frac{18\,000\cdot\sigma}{f_{MHz}}\right]\sin\theta - \left[(\varepsilon - \cos^2\theta) - j\frac{18\,000\cdot\sigma}{f_{MHz}}\right]^{1/2}}{\left[\varepsilon - j\frac{18\,000\cdot\sigma}{f_{MHz}}\right]\sin\theta + \left[(\varepsilon - \cos^2\theta) - j\frac{18\,000\cdot\sigma}{f_{MHz}}\right]^{1/2}}$$

4 صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية

1.4 اعتبارات عامة

يمثل ثنائي الأقطاب نصف الموجي أحد العناصر المشعة الأكثر استعمالاً في الموجات الديكامترية.

على الرغم من أن ثنائي أقطاب أفقي غالباً ما يُستعمل وحده، فإن صفائف من ثنائيات الأقطاب غالباً ما تُستعمل للحصول على:

- كسب متزايد؛
- مخططات اتجاهية وإمكانيات إمالة محسنة.

عندما تُستعمل صفائف أكثر تعقيداً، يتمثل جانب مهم في إمكانية التشغيل في حدود أداء معينة على مدى ترددات محددة فوق وتحت تردد التصميم. وتتوقف مقدرة التشغيل هذه ذات النطاق الواسع على عوامل متعددة، مثل ترتيبات التغذية، وبنية ثنائي الأقطاب، إلخ.

يمكن الحصول على كسوب عليا بترتيب عناصر ثنائيات الأقطاب بشكل متسامت و/أو تكويم ثنائيات أقطاب متوازية لتخفيض فتحة حزمة الفص الرئيسي ومن ثم زيادة اتجاهية الهوائي.

يمكن للحزمة الرئيسية لبعض شبكات ثنائيات الأقطاب الأفقية التي لها أكثر من نقطة تغذية أن تميل كهربائياً إذا تم تغذية كل بطارية أو صف من ثنائيات الأقطاب بتيارات ذات شدة متساوية لها أطوار مختلفة.

على العموم يمكن الحصول على المخططات أحادية الاتجاه باستعمال عاكس. ويمكن أن يتكون هذا الأخير إما:

- من صفيف متشابه من ثنائيات الأقطاب موالفة لتوفير نسبة مثلى للإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي على مدى محدود من الترددات المشتغلة. عملياً يكون للهوائيات من هذا الشكل مدى ترددات تشغيل قصوى يغطي نطاقات إذاعة متجاورة، مما يعطي مدى ترددات من التردد الأدنى إلى التردد الأعلى يبلغ تقريباً 1,25:1. ويجب ملاحظة أن هذا النمط من العاكس يوالف على العموم لتوفير نسبة مثلى للإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي لتردد وحيد داخل نطاق الترددات المطلوب ويمكن توقع أن تنخفض نسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي إذا كان الهوائي مشغلاً عند أي تردد آخر. يُعرف هذا النمط من العاكسات على أنه إما "ثنائي أقطاب موالف" أو "طفيلي". ويمكن كذلك أن يُستعمل لتحسين الأداء. لكن هذه التقنية لا تُستعمل بصورة عامة؛ أو
- من شاشة تتكون من أسلاك أفقية تشتغل كعاكس غير موالف. عملياً يمكن تشغيل عدة هوائيات من هذا النمط على عدد أقصاه خمسة نطاقات إذاعة متتالية تعطي مدى ترددات يمكن أن يبلغ 2:1. يُحد هذا المدى بأداء العناصر المشعة. ويُعرف هذا النمط من العاكسات على أنه "عاكس لا دوري" أو "عاكس شاشة".

تتوقف نسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي لعاكس لا دوري على عوامل مثل: عدد الأسلاك لكل طول موجة، ومقياس معدني، والمسافة بين العناصر المشعة والعاكس، وقد العاكس. لتحقيق نسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي، التي تقارب قيمة كسب الهوائي، هناك حاجة إلى كثافة شاشة تبلغ حوالي 40 إلى 50 سلكاً لكل طول موجة لأعلى نطاق تشغيل للهوائي.

2.4 تسمية صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية

1.2.4 صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية المرتبة عمودياً (الهوائيات الستارية)

تسمية النمط: H(R)(S) *m/n/h*

حيث:

H: صفيف من ثنائيات الأقطاب الأفقية المرتبة عمودياً

R: إذا تم تحديده، يدل على وجود عاكس

S: إذا تم تحديده، يدل على أنه تم إدخال زحزحة طور في التيار تغذي عناصر متسامتة متجاورة بحيث ينتج إمالة لسمت الحزمة الرئيسية

m: عدد العناصر المتسامتة في كل صف

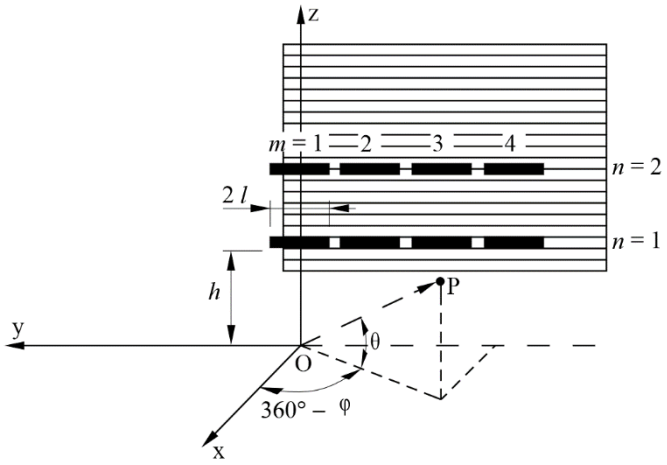
n: عدد العناصر المتوازية الموضوعة عادة على فواصل نصف طول موجة فوق بعضها البعض

h: ارتفاع صف ثنائيات الأقطاب الأدنى فوق الأرض (أطوال الموجات).

على سبيل المثال يمكن أن يُلاحظ من الشكل 5 أن HR 4/2/1,0 يدل على صفيف من ثنائيات الأقطاب الأفقية المرتبة عمودياً مع عاكس. في هذه الحالة، هناك صفان أفقيان من أربعة عناصر نصف موجية ذات طول 2l عند التردد الاسمي، والارتفاع (*h*) للصف الأدنى هو طول موجة واحد فوق الأرض.

الشكل 5

الهوائي الستاري



BS.0705-05

2.2.4 صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية المرتبة أفقياً (الهوائيات المدارية)

تسمية النمط: T(S) *m/n/h*

حيث:

T: صفيف من ثنائيات الأقطاب الأفقية المرتبة أفقياً (الهوائي المداري)

S: إذا تم تحديده، يدل على أنه تم إدخال زحزحة طور في التيار تغذي عناصر مسامتة متجاورة لإنتاج إمالة لزاوية ارتفاع الحزمة الرئيسية بالنسبة للعمودي

m: عدد العناصر المتسامتة في كل صف

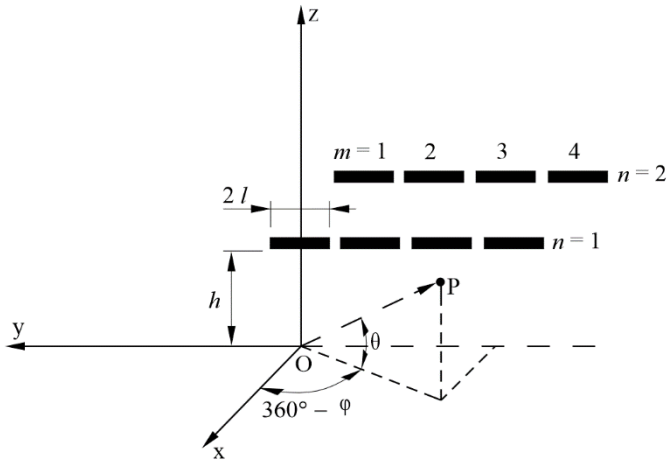
n: عدد الصفوف المتوازية الموضوعة على فواصل نصف طول موجة

h: ارتفاع ثنائيات الأقطاب فوق الأرض (أطوال الموجات).

على سبيل المثال يمكن أن يلاحظ من الشكل 6 أن T 4/2/0,2 تدل على صفيف أفقي دون إمالة لأربعة ثنائيات أقطاب أفقية متسامتة ذات طول 2*l* عند التردد الاسمي بصفين متوازيين، وحيث الارتفاع، *h*، هو 0,2 أطوال الموجات فوق الأرض.

الشكل 6

الهوائي المداري



BS.0705-06

3.2.4 الصفائف شاملة الاتجاهات لثنائيات الأقطاب الأفقية

1.3.2.4 الهوائيات الربعية

تسمية النمط: HQ *n/h*

حيث:

HQ: الهوائي الربعي

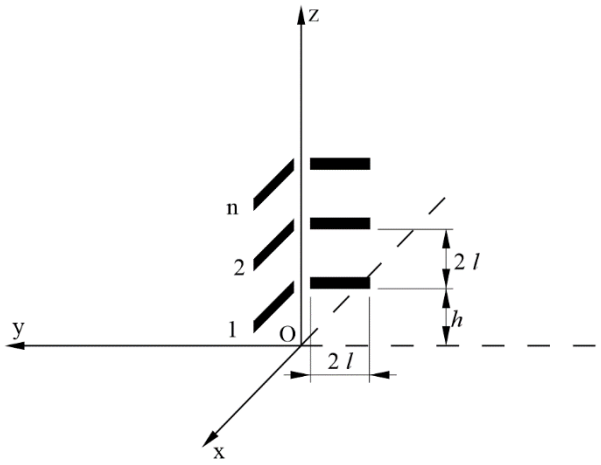
n: عدد العناصر المكومة فوق بعضها

h: ارتفاع الصف الأدنى لثنائيات الأقطاب فوق الأرض (أطوال الموجات).

على سبيل المثال يمكن أن نلاحظ من الشكل 7 أن HQ 3/0,2 تدل على هوائي ربعي مكون من ثلاث ثنائيات أقطاب أفقية بطول 2*l* عند التردد الاسمي مكومة عمودياً حيث الارتفاع، *h*، لثنائيات الأقطاب الدنيا هو 0,2 طول موجة فوق الأرض.

الشكل 7

الهوائي الربعي



BS.0705-07

2.3.2.4 هوائيات ثنائيات الأقطاب المتقاطعة

تسمية النمط: HX *h*

حيث:

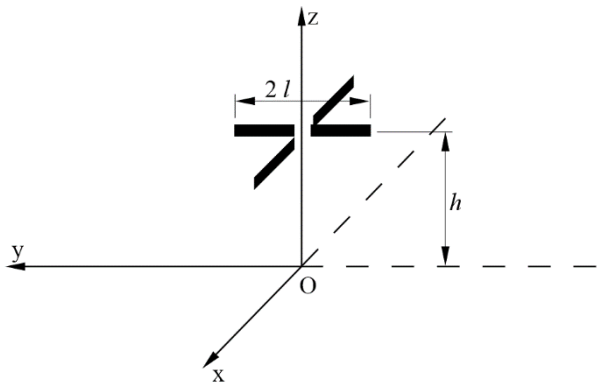
HX: الهوائي ثنائي الأقطاب المتقاطع

h: ارتفاع ثنائيات الأقطاب فوق الأرض (أطوال الموجات).

على سبيل المثال يمكن أن نلاحظ من الشكل 8 أن HX 0,3 تدل على هوائي ثنائي أقطاب متقاطع مكون من ثنائيي أقطاب بطول 2l يتقاطعان بزوايا مستقيمة عند وسطهما، حيث الارتفاع، *h*، يساوي 0,3 طول موجة فوق الأرض.

الشكل 8

هوائي ثنائي الأقطاب متقاطع



BS.0705-08

3.4 الإمالة

يمكن للحزمة الرئيسية لبعض صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية التي تتضمن أكثر من نقطة تغذية واحدة أن تميل كهربائياً بتغذية كل بطارية أو صف من ثنائيات الأقطاب بتيارات ذات أطوار مختلفة.

غالباً ما تُنفذ الإمالة في المستوي السمتي لصفائف ثنائيات أقطاب أفقية مرتبة عمودياً. غير أن المستوي العمودي المائل كذلك ممكن ويطبق على الخصوص في حالة الهوائيات المدارية.

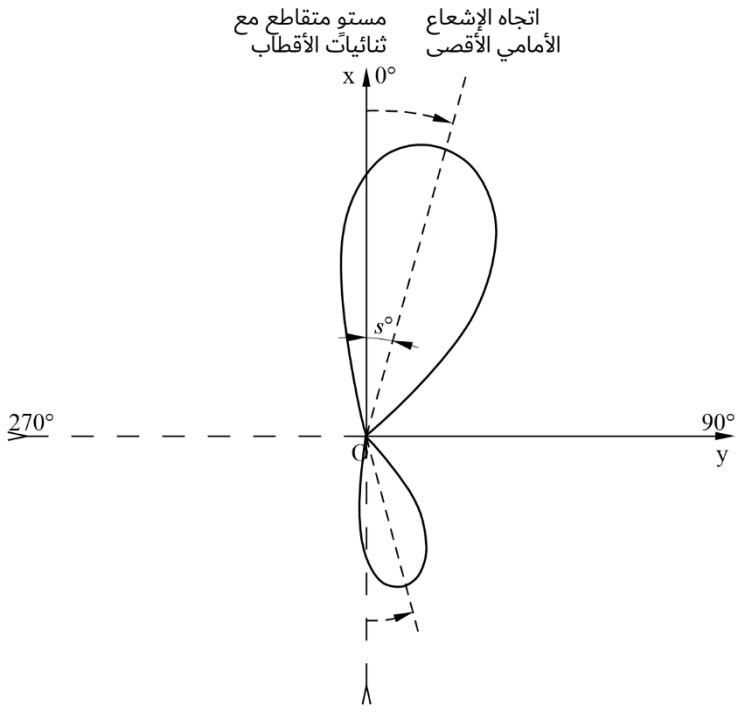
الخصائص الرئيسية للهوائيات المائلة أفقياً هي:

- الحزمة الرئيسية لم تعد في الاتجاه المتقاطع مع مستوي ثنائيات الأقطاب،
- مخطط الإشعاع الأفقي الأمامي لم يعد متناظراً بالنسبة للاتجاه المتقاطع مع مستوي ثنائيات الأقطاب،
- مخطط الإشعاع الخلفي لم يعد متناظراً بالنسبة للاتجاه المتقاطع مع مستوي ثنائيات الأقطاب، وليس على محور اتجاه أقصى إمالة في المخطط الأمامي. وإمالة الإشعاع الأمامي لهوائي في اتجاه ما (مثلاً في اتجاه عقارب الساعة) سوف يجعل الإشعاع الخلفي يميل في الاتجاه المعاكس (أي في الاتجاه المعاكس لعقارب الساعة). يبين الشكل 9 أثر إمالة الإشعاع الأمامي في اتجاه عقارب الساعة.

طبقاً لطرائق الحساب التقليدية، تكون زاوية إمالة الإشعاع الأقصى في حالة الهوائيات المائلة أفقياً دائماً أقل من زاوية الإمالة الاسمية المدخلة في الحساب. يُشار بعض الأحيان إلى زاوية الإمالة الاسمية هذه بواسطة المصمم ومن ثم فإنها لا تقابل بالضرورة القيمة التي يتم الحصول عليها في الواقع. نمطياً، تُحقق إمالة $s = 25{,}5°$ إذا تم الحساب التقليدي بزاوية إمالة اسمية تبلغ 30° لصفيف من نمط HRS 4/*n/h*.

الشكل 9

مخطط سمتي لهوائي مائل أفقياً



BS.0705-09

يجب كذلك ملاحظة أن زاوية الإمالة s لا تحدد دائماً بدقة مركز المخطط الأفقي المعطى بواسطة الزوايا التي يُخفض عندها الكسب الأقصى في مخطط الإشعاع الأمامي بقدر 6 dB. هذه القيمة المتوسطة التي تُسمى "الإمالة الفعلية"، S_{eff}، توفر دلالة أكثر دقة عن التغير في التغطية التي تؤمنها الحزمة الرئيسية.

سوف تتوقف زاوية الإمالة المحققة عملياً على النسبة F_R بين تردد التشغيل والتردد الاسمي. على سبيل المثال، تكون قيمة زاوية الإمالة بالمقارنة مع القيمة المحصل عليها عند $F_R = 1{,}0$ أصغر من أجل $F_R < 1{,}0$ وأكبر من أجل $F_R > 1{,}0$.

في حالة هوائي محدد، ينخفض الكسب الأقصى بالنسبة لقيم متزايدة لزاوية الإمالة. ويجب كذلك ملاحظة أن زاوية الارتفاع التي يحدث عندها الإشعاع الأقصى سوف تتأثر بقيمة F_R، لكن ليس بزاوية الإمالة s. إضافة إلى ذلك فإن نسبة الفص الرئيسي إلى الفص الجانبي للهوائي تنخفض بتناسب عكسي للإمالة.

4.4 صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية المرتبة عمودياً

يتم تحقيق صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية المرتبة عمودياً (الهوائيات الستارية) برصف و/أو بتكويم عدة ثنائيات أقطاب بنصف طول موجة في مستوٍ عمودي.

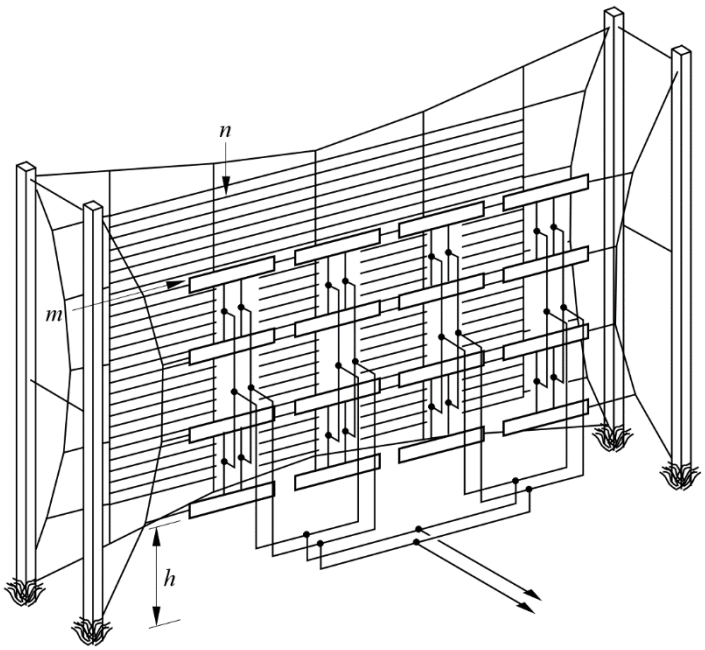
يُستعمل ترتيبان أساسيان مختلفان للتغذية.

- ثنائيات الأقطاب المغذاة من المركز،
- ثنائيات الأقطاب المغذاة من الطرف.

في الصفيف المغذى من المركز، يكون لكل عنصر ثنائي أقطاب نقطة تغذيته الخاصة كما هو مبين في الشكل 10. والهوائيات التي تتضمن عدداً من ثنائيات الأقطاب نصف الموجية يساوي أو يزيد على اثنين لكل صف (m) يمكن أن تسمح بالإطلاق المائل.

الشكل 10

صفيف ثنائيات أقطاب مغذاة من المركز مع عاكس لا دوري

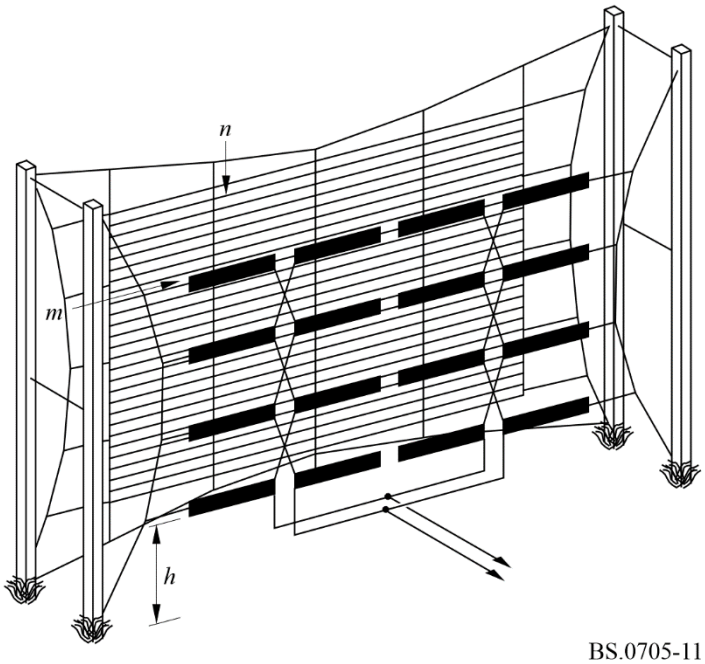


BS.0705-10

في حالة الصفيف المغذى من الطرف، يوفر ثنائيا أقطاب متجاوران نقطة تغذية موصولة بخط إرسال وحيد كما هو مبين في الشكل 11 في حالة عاكس لا دوري. يوضح الشكل 12 حالة صفيف ثنائي الأقطاب مغذى مع عاكس موالف. وليس هناك إمكانية الإمالة إلا إذا كان عدد أزواج ثنائيات الأقطاب نصف الموجية في صف (m) زوجياً.

الشكل 11

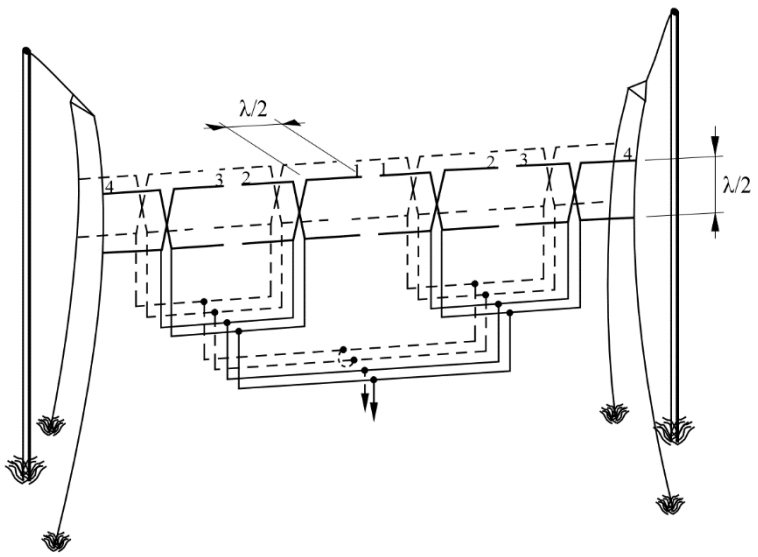
صفيف ثنائيات أقطاب مغذاة من الطرف مع عاكس لا دوري



BS.0705-11

الشكل 12

صفيف ثنائيات أقطاب مغذاة من الطرف مع عاكس موالف



BS.0705-12

إن لبعض الهوائيات الستارية التي تستعمل عناصر مغذاة من المركز تصميماً أكثر حداثة، وفي مقابل ترتيب تغذية أكثر تعقيداً، فإنها توفر مقدرات إمالة أكبر بالمقارنة مع النمط المقابل المغذى من الطرف.

على سبيل المثال، فإن صفيف ثنائيات الأقطاب HRS 4/*n/h* المغذاة من المركز بأربع نقاط تغذية يمكن أن يميل بما يبلغ ±30° مع الاحتفاظ بسويات مقبولة للفص الجانبي.

لا يوفر صفيف ثنائيات الأقطاب مقابل HRS 4/*n/h* المغذاة من الطرف سوى نقطتي تغذية متباعدتين بحوالي طول موجة واحد. هذه المباعدة ونظام التغذية ذو الصلة الذي يضع اختلافاً في الطور بين نصفي الصفيف، يؤديان إلى مقدرة إمالة عملية تبلغ حوالي ±15° في المستوي السمتي. وتؤدي إمالة أكبر إلى فص جانبي ذي اتساع كبير بكيفية غير مطلوبة له قيمة كسب أقصى تبلغ حوالي 6 dB بالنسبة لقيمة الحزمة الرئيسية.

وأداء صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية المرتبة عمودياً يتوقف كذلك على مقدرات تشغيلها بنطاقات متعددة.

صُممت أنماط الهوائيات الستارية الأولى لتشتغل على ترددات قريبة جداً من التردد الاسمي الأمثل بحيث كانت تُسمى هوائيات "النطاق الوحيد". هذا النمط من الهوائيات، الذي ما زال مشغلاً، عادة ما يكون مجهزاً بعاكس ثنائي الأقطاب موالف.

تُصمم هوائيات ستارية ثنائية الأقطاب ذات عاكس موالف أكثر حداثة للتشغيل على نطاقين متجاورين، أي لنسب ترددات تتراوح بين 0,9 و1,1.

يمكن حالياً تحقيق مديات ترددات ذات تشغيل أوسع (نمطياً لنسب ترددات تصل حتى 2:1) بفضل تصميم متمعن للعناصر المشعة (عادة ثنائيات أقطاب نصف موجية مغذاة من المركز). غالباً ما تكون الهوائيات متعددة النطاقات حديثة التصميم مجهزة بعاكس لا دوري شبكي موضوع على مسافة مناسبة (حوالي 0,25 طول موجة عند التردد الاسمي) من العناصر النشيطة.

يمكن أن يتكون عاكس الشاشة نمطياً من شبكية أسلاك أفقية مع قطر يتراوح بين 2,7 و4,7 mm ومباعدة تتراوح بين 25 سلكاً لكل طول موجة وأكثر من 100 سلك لكل طول موجة عند التردد الاسمي. يوصى بشاشة 40 سلكاً على الأقل لكل طول موجة للحصول على أداء مقبول.

5.4 صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية المرتبة أفقياً (الهوائيات المدارية)

يتم تحقيق الإشعاع المركز أساساً عند زوايا الارتفاع العالية (حتى 90°) وفي معظم الأحوال المصاحب لمخطط إشعاع سمتي دائري تقريباً باستعمال صفائف ثنائيات أقطاب أفقية في مستوٍ أفقي عند ارتفاع معين فوق الأرض.

هذه الهوائيات التي تُسمى كذلك هوائيات مدارية، غالباً ما تُستعمل للإذاعة على المدى القصير في المناطق المدارية وتتكون من صف واحد أو أكثر من ثنائيات الأقطاب الأفقية نصف الموجية عند ارتفاع فوق الأرض غالباً ما لا يتجاوز 0,5 طول موجة.

يمكن الحصول على إمالة الحزمة الرئيسية في المستوي z-y بتنويع أطوار تيار التغذية في عناصر نفس الصف (على طول المحور الصادي).

يبين المخطط الناتج عن ذلك ميلاً بارزاً إلى حد ما للحزمة الرئيسية في المستوي z-y مما يوفر أثراً اتجاهياً مفيداً لحالات تغطية خاصة.

6.4 الصفائف شاملة الاتجاهات لثنائيات الأقطاب الأفقية

1.6.4 اعتبارات عامة

إن التغطية قصيرة المدى غير الاتجاهية في الإذاعة بالموجات الديكامترية تتطلب على العموم استعمال هوائيات شاملة الاتجاهات أو شبه شاملة الاتجاهات.

يوفر الهوائي أحادي القطب العمودي (انظر الفقرة 7) مخططاً شامل الاتجاهات لكنه يتميز بنواحي قصور ملازمة. يمكن تحقيق مخطط سمتي شبه شامل الاتجاهات ومرونة أكبر بهوائيات ربعية وذات ثنائيات أقطاب متقاطعة. وهي تتكون من ترتيبات بسيطة لثنائيات أقطاب أفقية يحدد ارتفاعها فوق الأرض زاوية الارتفاع التي يحدث عندها الإشعاع الأقصى.

على العموم، تُستعمل الهوائيات من هذا النمط في الجزء الأدنى للطيف HF حيث تحدث على العموم الإذاعة قصيرة المدى. مع تصميم عناصر الإشعاع بعناية، يمكن تحقيق هوائيات تشتغل على نطاقي ترددات متجاورين (أو حتى ثلاثة). لكن قالب المخطط الناتج يبين اعتماداً واضحاً على نسبة التردد.

2.6.4 الهوائيات الربعية

يُمثل أبسط شكل للهوائيات الربعية بترتيب ثنائي الأقطاب نصف موجيين مغذيين من المركز موضوعين عند زاوية مستقيمة، كما يبين ذلك الشكل 13. هناك شكل آخر من الهوائي الربعي يُصادف أحياناً في الواقع، وهو مبين تخطيطياً في الشكل 14. وهو يتكون من أربعة عناصر موضوعة على شكل مربع ومغذاة من الأركان المتقابلة.

يمكن كذلك أن تُكوم الهوائيات الربعية لتحقيق مخطط إشعاع عمودي أكثر اتجاهية وكسب ذي اتجاهية أعلى.

للتبسيط، عند حساب مخطط (انظر الفقرة 1.5.7.4) هوائي ربعي، لا تُؤخذ في الاعتبار سوى حالة الهوائي البسيط المبين في الشكل 13.

3.6.4 هوائيات ثنائيات الأقطاب المتقاطعة

يتكون هوائي ثنائيات الأقطاب المتقاطعة من ثنائيي أقطاب نصف موجيين مغذيين من المركز موضوعين عند زاوية مستقيمة لتشكيل صليب. وتقابل نقطة التقاطع نقطة تغذية عنصر الإشعاع، كما يبين ذلك الشكل 15.

7.4 حساب مخططات صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية

1.7.4 اعتبارات عامة

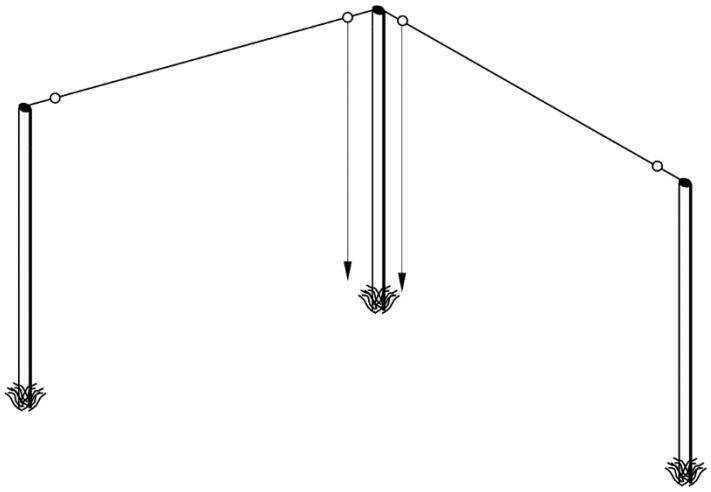
يوصف في القسم التالي إجراء الحساب المستعمل لاشتقاق مخطط الإشعاع ذي الصلة لمختلف صفائف ثنائيات الأقطاب الأفقية والذي تم تنفيذه في برامج الحاسوب.

سوف يُؤخذ صفيف ثنائي الأقطاب HF في الاعتبار في نظام إحداثيات الشكل 1 للحالات التالية:

- صفائف ستارية ثنائيات الأقطاب نصف موجية مغذاة من المركز بشاشة لا دورية (الشكل 16)؛
- صفائف ستارية ثنائيات الأقطاب نصف موجية مغذاة من المركز بعاكس موالف (الشكل 17)؛
- صفائف ستارية ثنائيات الأقطاب نصف موجية مغذاة من الطرف بعاكس موالف (الشكل 18)؛
- صفائف ثنائيات الأقطاب نصف موجية مغذاة من المركز للإذاعة المدارية (الشكل 19).

الشكل 13

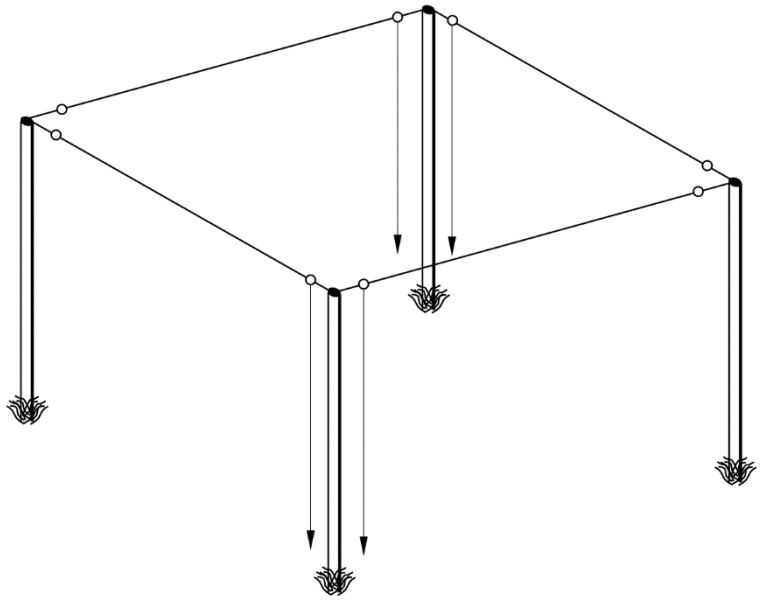
هوائي ربعي ذو ذراعين



BS.0705-13

الشكل 14

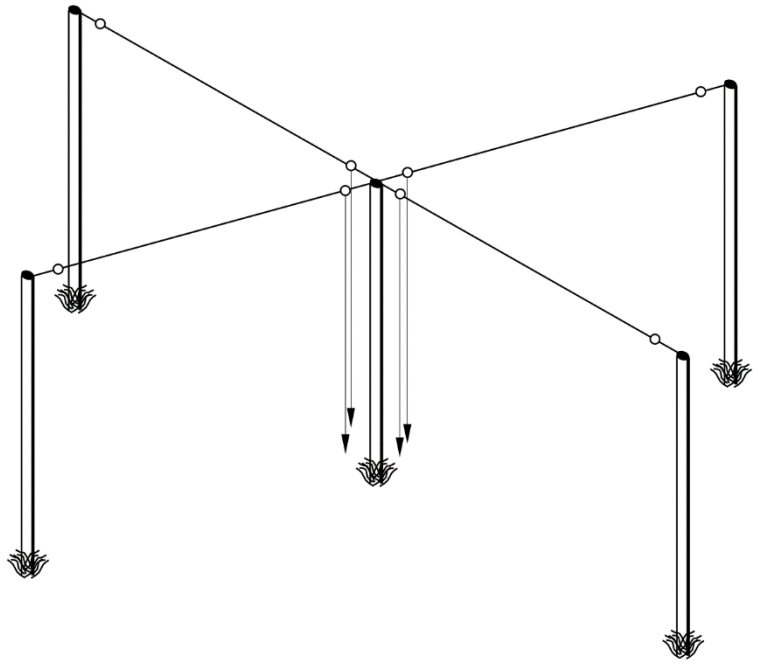
هوائي ربعي ذو أربعة أذرع



BS.0705-14

الشكل 15

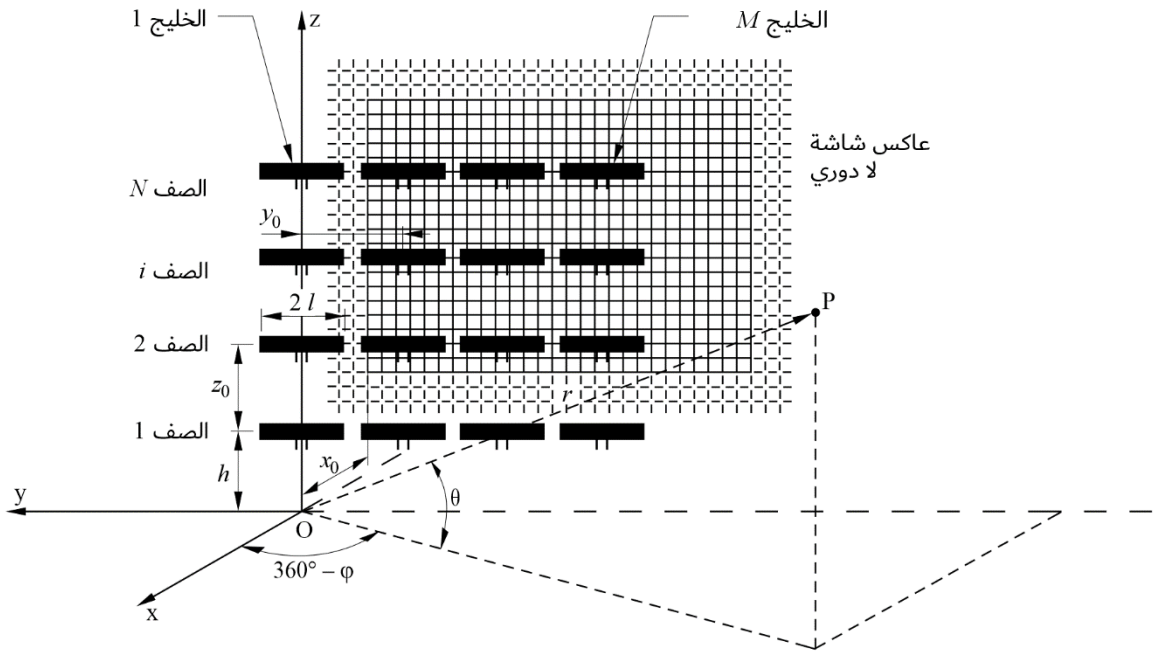
هوائي ثنائي الأقطاب المتقاطعة



BS.0705-15

الشكل 16

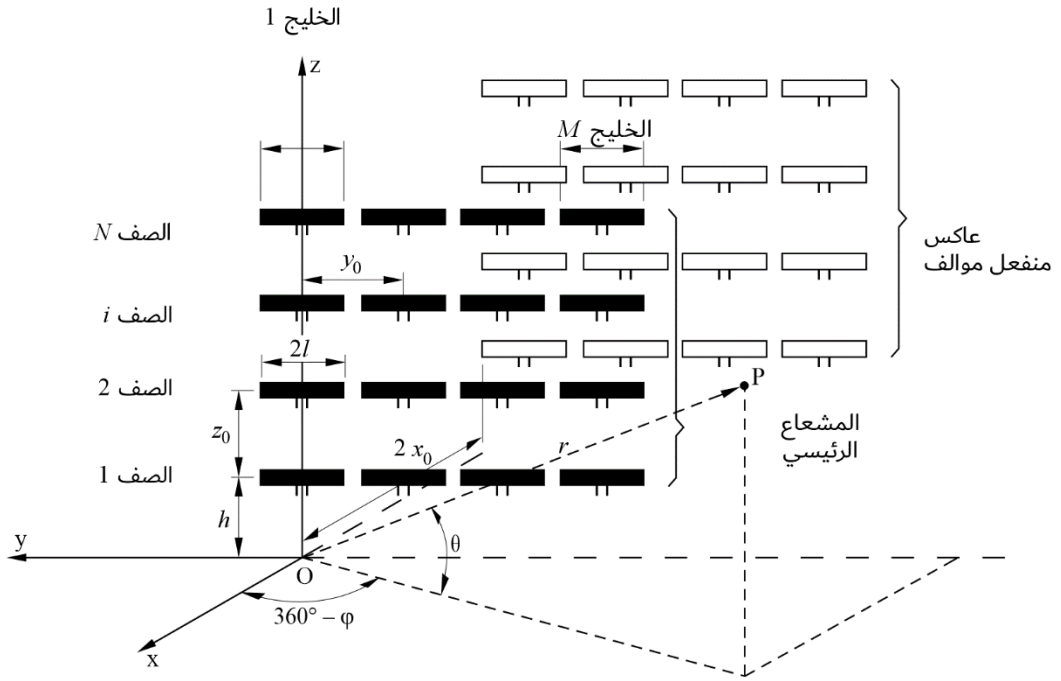
صفيف ثنائيات الأقطاب HR 4/4 مغذاة من المركز مع عاكس شاشة لا دوري



BS.0705-16

الشكل 17

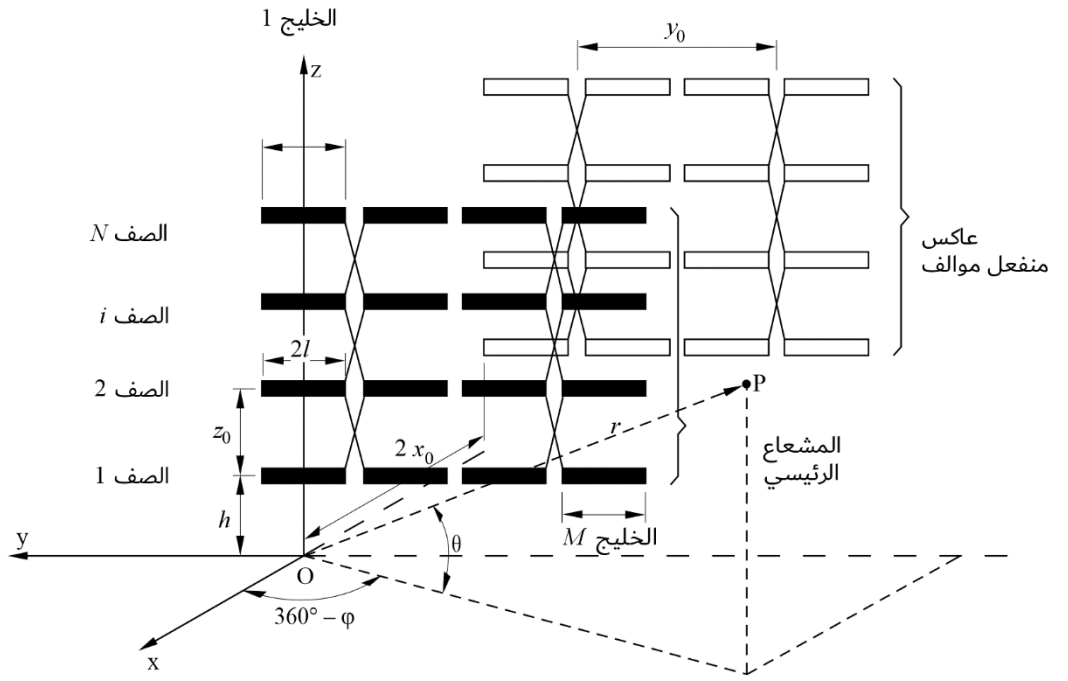
صفيف ثنائيات الأقطاب HR 4/4 مغذاة من المركز مع عاكس ثنائي الأقطاب موالف



BS.0705-17

الشكل 18

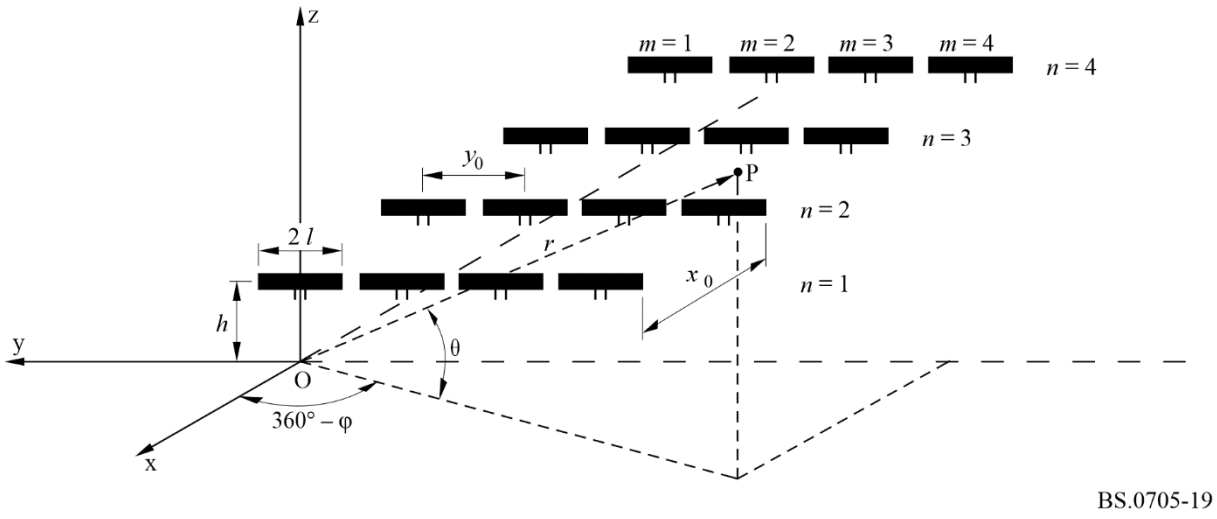
صفيف ثنائيات الأقطاب HR 4/4 مغذاة من الطرف مع عاكس موالف



BS.0705-18

الشكل 19

صفيف ثنائيات الأقطاب HR 4/4 مغذاة من المركز للإذاعة المدارية



يُعتبر أن للصفيف تردداً اسمياً f_d (أو طول موجة λ_d) وتردد تشغيل f (أو طول موجة λ). تُعطى نسبة التردد F_R بالمعادلة التالية:

$$F_R = f/f_d = \lambda_d/\lambda$$

يمكن التعبير عن مخطط إشعاع صفيف ثنائيات الأقطاب على أرض منبسطة ومتجانسة وغير مثالية بدالة مخطط الإشعاع المقيس التالية:

$$F(\theta, \varphi) = K \cdot f(\theta, \varphi) \cdot S_x \cdot S_y \cdot S_z$$

حيث:

K: عامل مقيس لضبط ($|F(\theta, \varphi)|_{max} = 1$)، أي 0 dB

$f(\theta, \varphi)$: دالة مخطط العنصر الأفقي

S_x: عامل الصفيف للاتجاه x، مع أخذ وجود عناصر أخرى أو عاكس في الاعتبار

S_y: عامل الصفيف للاتجاه y، مع أخذ وجود عناصر أخرى على طول المحور الصادي في الاعتبار

S_z: عامل الصفيف للاتجاه z، مع أخذ وجود عناصر الصورة في الاعتبار بسبب أرض غير مثالية وعناصر أخرى على طول المحور العيني.

يُعبر عن دالة مخطط الإشعاع، $F(\theta, \varphi)$، كذلك كنتيجة لمكونتي مجال كهربائيتين E_θ وE_φ عند نقطة بعيدة P في نظام الإحداثيات للشكل 1، أي:

$$F(\theta, \varphi) = K \cdot |E(\theta, \varphi)| = K \cdot \left[; |E_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |E_\varphi(\theta, \varphi)|^2 \right]^{1/2}$$

حيث:

$$E_\theta(\theta, \varphi) = E_{\theta 1}(\theta, \varphi) \cdot S_x \cdot S_y \cdot S_\theta$$

$$E_\varphi(\theta, \varphi) = E_{\varphi 1}(\theta, \varphi) \cdot S_x \cdot S_y \cdot S_\varphi$$

حيث $E_{\theta 1}(\theta, \varphi)$ و$E_{\varphi 1}(\theta, \varphi)$ مكونتا دالة مخطط العنصر الأفقي $f(\theta, \varphi)$ وS_θ وS_φ هما المكونتان ذاتي الصلة لعامل الصفيف S_z.

بالنسبة لثنائي الأقطاب ذي طول 2l عند التردد الاسمي، تُعطى مكونات المجال البعيد الكهربائي بالعبارة التالية:

$$E_{\theta 1}(\theta, \varphi) = - \mathrm{j}\, 60\ I\ \frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\, k\, r}}{r}\ \sin\varphi\ \sin\theta\ C_d$$

$$E_{\varphi 1}(\theta, \varphi) = - \mathrm{j}\, 60\ I\ \frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\, k\, r}}{r}\ \cos\varphi\ C_d$$

حيث:

I: اتساع التيار في ثنائي الأقطاب

r: المسافة بين المصدر ونقطة الرصد

C_d: دالة توزيع التيار لعنصر الإشعاع.

مع افتراض دالة توزيع تيار جيبية:

$$C_d = \frac{\cos(k\ell \sin\varphi\ \cos\theta) - \cos k\ell}{1 - \sin^2\varphi\ \cos^2\theta}$$

حيث $k = 2\,\pi/\lambda$ (ثابتة الطور).

تعطي الفقرات التالية عبارات دالة توزيع التيار حسب أنماط الصفائف، بما في ذلك تعريف k l.

1.1.7.4 صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من المركز

تشمل صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من المركز:

- صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من المركز مع شاشة لا دورية،
- صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من المركز مع عاكس موالف،
- صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من المركز للإذاعة المدارية.

بالنسبة لهذه الحالات $2l = \lambda_d/2$ وكذلك

$$kl = 2\pi / \lambda \cdot \lambda_d / 4 = F_R \cdot \pi / 2$$

$$C_d = \frac{\cos(F_R \cdot \pi/2 \cdot \sin\varphi\ \cos\theta) - \cos(F_R \cdot \pi/2)}{1 - \sin^2\varphi\ \cos^2\theta}$$

2.1.7.4 صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من الطرف

بالنسبة لصفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من الطرف، $2l = \lambda_d$ وكذلك

$$kl = F_R \cdot \pi$$

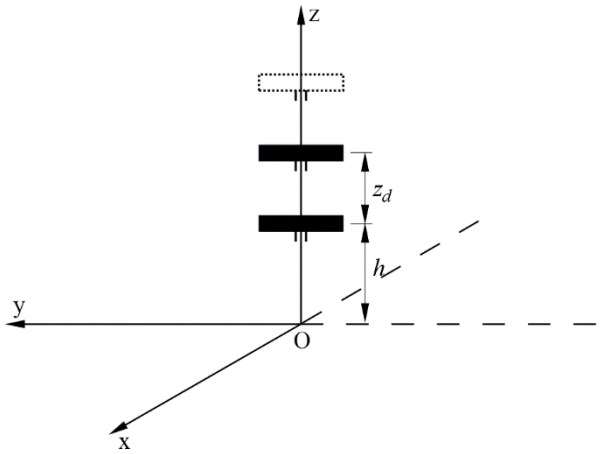
$$C_d = \frac{\cos(F_R \cdot \pi \cdot \sin\varphi \cos\theta) - \cos(F_R \cdot \pi)}{1 - \sin^2\varphi \cos^2\theta}$$

2.7.4 حساب عامل الصفيف S_z

يأخذ عامل الصفيف S_z في الاعتبار أثر تكويم n من العناصر على طول المحور العيني العمودي بما في ذلك مكوناتها المعكوسة من الأرض.

الشكل 20

تكويم العناصر على طول المحور العيني



BS.0705-20

لعامل الصفيف S_z مكونتان S_θ وS_φ تقابلان مكونتي المجال الكهربائي المتتاليتين:

$$S_\theta = \sum_{i=0}^{n-1} e^{j(kh + ikz_d)\sin\theta} \cdot \left[1 - R_v \; e^{-2j(kh + ikz_d)\sin\theta}\right]$$

$$S_\varphi = \sum_{i=0}^{n-1} e^{j(kh + ikz_d)\sin\theta} \cdot \left[1 + R_h \; e^{-2j(kh + ikz_d)\sin\theta}\right]$$

حيث:

h: ارتفاع العنصر الأدنى فوق الأرض

z_d: مباعدة العنصر العمودي

R_v: معامل الانعكاس العمودي

R_h: معامل الانعكاس الأفقي

تُعطى العبارات المتعلقة بالمكونات المتتالية لمكونات عامل الصفيف لمختلف أنماط الصفائف في القسم التالي.

1.2.7.4 صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المرتبة عمودياً

تشمل صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المرتبة عمودياً ما يلي:

- صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من المركز مع شاشة لا دورية؛
- صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من المركز مع عاكس موالف؛

– صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من الطرف مع عاكس موالف.

بالنسبة لهذه الحالات $z_d = \lambda_d / 2$ و$k\,h + i\,k\,z_d = 2\pi\,h / \lambda + i\,\pi\,F_R$.

إذا تم التعبير عن h بأطوال الموجات عند f_d (أي على شكل: h / λ_d)، عندئذ:

$$k\,h\ +\ i\,k\,z_d\ =\ 2\pi\,F_R\,h / \lambda_d\ +\ i\,\pi\,F_R$$

وتُعطى المكونتان S_θ وS_φ على النحو التالي:

$$S_\theta\ =\ \sum_{i=0}^{n-1}\ e^{j\,\pi\,F_R\,(2h/\lambda_d + i)\,\sin\theta}\ .\ \left[1 - R_v\ \ e^{-2j\,\pi\,F_R\,(2h/\lambda_d + i)\,\sin\theta}\right]$$

$$S_\varphi\ =\ \sum_{i=0}^{n-1}\ e^{j\,\pi\,F_R\,(2h/\lambda_d + i)\,\sin\theta}\ .\ \left[1 - R_h\ \ e^{-2j\,\pi\,F_R\,(2h/\lambda_d + i)\,\sin\theta}\right]$$

2.2.7.4 صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية للإذاعة المدارية

بالنسبة لصفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية للإذاعة المدارية $n = 1$ وتُبسَّط المعادلات على النحو التالي:

$$S_\theta\ =\ e^{j\,\pi\,F_R\,\cdot\,2h/\lambda_d\,\cdot\,\sin\theta}\ .\ \left[\,;1 - R_v\ \ e^{-j\,4\pi\,F_R\,\cdot\,h/\lambda_d\,\cdot\,\sin\theta}\right]$$

$$S_\varphi\ =\ e^{j\,\pi\,F_R\,\cdot\,2h/\lambda_d\,\cdot\,\sin\theta}\ .\ \left[\,;1 - R_h\ \ e^{-j\,4\pi\,F_R\,\cdot\,h/\lambda_d\,\cdot\,\sin\theta}\right]$$

3.7.4 حساب عامل الصفيف S_y

يأخذ عامل الصفيف S_y في الاعتبار أثر العدد m من العناصر على طول المحور الصادي (انظر الشكل 21) ويمكن التعبير عنه على النحو التالي:

$$S_y\ =\ \sum_{i=1}^{m}\ e^{j\,k\,y_i\,\cos\theta\,(\sin\varphi - \sin s)}$$

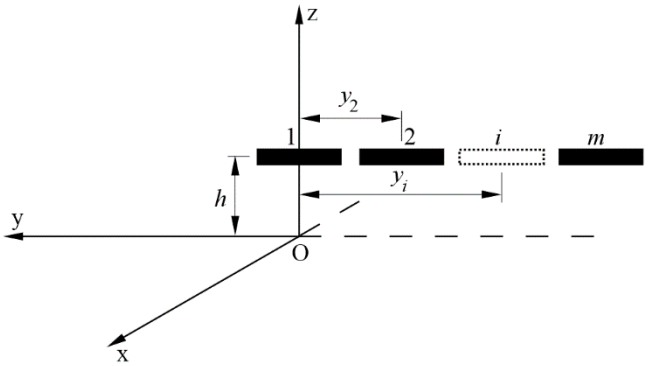
حيث:

s: زاوية الإمالة

y_i: المسافة بين مركز العنصر من الرتبة i والمحور العيني.

الشكل 21

العناصر المرصوفة على طول المحور الصادي



BS.0705-21

تُعطى عبارات عامل الصفيف S_y لمختلف أنماط الصفائف في الأقسام التالية.

1.3.7.4 صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من المركز

بالنسبة لصفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من المركز:

$$k\,y_i = i\,2\pi / \lambda \cdot \lambda_d / 2 = i\,\pi\,F_R$$

ويمكن أن يُعبر عن S_y على النحو التالي:

$$S_y = \sum_{i=1}^{m} e^{j\,i\,\pi\,F_R \cos\theta\,(\sin\varphi - \sin s)}$$

2.3.7.4 صفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من الطرف

بالنسبة لصفائف ثنائيات الأقطاب نصف الموجية المغذاة من الطرف:

$$k\,y_i = i\,2\pi / \lambda \cdot \lambda_d = i\,2\pi\,F_R$$

ويمكن أن يُعبر عن S_y على النحو التالي:

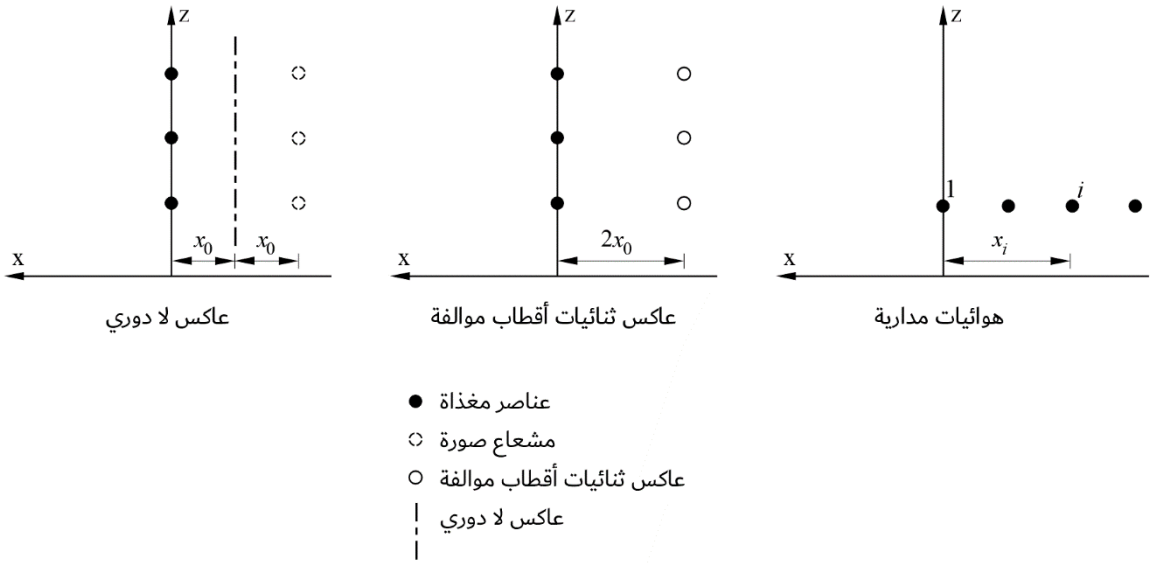
$$S_y = \sum_{i=1}^{m} e^{j\,i\,2\pi\,F_R \cos\theta\,(\sin\varphi - \sin s)}$$

4.7.4 حساب عامل الصفيف S_x

يأخذ عامل الصفيف S_x في الاعتبار أثر وضع n من العناصر على طول المحور السيني في حالة صفائف للإذاعة المدارية ووجود عاكس (ثنائيات الأقطاب موالفة أو شاشة لا دورية) في الحالات المتبقية.

الشكل 22

عناصر أو عناصر صورة مرصوفة على طول المحور السيني



BS.0705-22

تُعطى عبارات عامل الصفيف S_x لمختلف أنماط الصفائف في الأقسام التالية.

1.4.7.4 هوائيات بعاكس ذي شاشة لا دوري

يمكن حساب أداء العاكسات ذات الشاشة اللادورية من نموذج رياضي باستعمال مفهوم "مشعاع صورة" وراء شاشة لا متناهية. لكن ذلك لا يعطي سوى المخطط الأمامي بدقة كافية. واتساع الإشعاع الخلفي نحو الجانب الخلفي للشاشة يتوقف على فعالية الشاشة ومسافة ثنائي الأقطاب من الشاشة العاكسة. في حالة شاشة ذات أبعاد عملية سوف تنعرج كذلك بعض الطاقة حول حافة الشاشة. والطريقة المستعملة أدناه لحساب الإشعاع الخلفي تحتفظ لدالة الاتجاهية بقالب شبيه على العموم بالقالب المحسوب للمخطط الأمامي.

عامل انعكاس الشاشة

إن شاشة عاكسة مكونة من موصلات مستقيمة ذات مباعدة صغيرة متوازية مع ثنائيات الأقطاب سوف تعكس معظم الطاقة الواردة عليها، بينما تمر الطاقة المتبقية عبر الشاشة.

يُعرف عامل انعكاس الشاشة q_r على أنه نسبة الطاقة المنعكسة إلى الطاقة الواردة، على النحو التالي:

$$q_r = \frac{I_r}{I_i} = 1 - \frac{I_t}{I_i} = 1 - \frac{1}{\left[1 + \frac{1}{\left[\log_e\left(\frac{a}{\pi \cdot d}\right) \cdot \frac{2a}{\lambda}\cos\theta\right]^2}\right]^{1/2}}$$

حيث:

d: قطر السلك (mm)

a: المباعدة بين الأسلاك (m)

D_r: مسافة ثنائيات الأقطاب من الشاشة العاكسة (m)

I_i: شدة الموجة الواردة

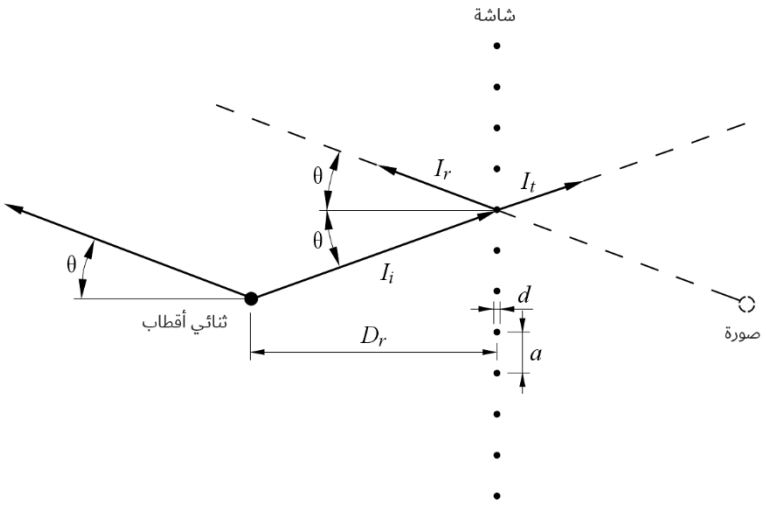
I_r: شدة الموجة المنعكسة

I_t: شدة الموجة المرسلة

θ: زاوية الورود (أو الارتفاع).

الشكل 23

الشاشة العاكسة اللادورية وثنائي الأقطاب (مشهد طرفي)



BS.0705-23

يمكن التعبير عن مخطط الإشعاع على النحو التالي:

$$F(\theta, \varphi) = F_D \cdot S_x$$

حيث:

F_D: وظيفة اتجاهية جزئية للهوائي

S_x: عامل الصفيف على طول المحور السيني.

يمكن التعبير عن عامل الصفيف أمام الشاشة على النحو التالي:

$$S_x = \left[;1 + q_2;^r - 2q_r \cos(2k D_r \cos\varphi \cos\theta) \right]^{½}$$

وعامل الصفيف خلف الشاشة على النحو التالي:

$$S_x = (1 - q_r)$$

يمكن التعبير عن نسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي على النحو التالي[3]:

$$FTBR = 20 \log_{10} \cdot \frac{\left[F_D \left[1 + q_r^2 - 2q_r \cos (2k D_r \cos \varphi \cos \theta) \right]^{1/2} \right]_{max}}{\left[F_D (1 - q_r) \right]_{max}}$$

في الحالة الخاصة التي يكون فيها:

$$F_R = 1 \text{ و} D_r = \lambda/4 \text{ و} \varphi = 0° \text{ و} \theta = 0° \text{ (أو } 0° \leq \theta \leq 20° \text{ مع خطأ صغير)}$$

يصبح مخطط الإشعاع أمام الشاشة:

$$F(\theta, \varphi) = F_D \left[;1 + q2;^{r} - 2q_r \cos \pi \right]^{1/2} = F_D (1 + q_r)$$

ومخطط الإشعاع خلف الشاشة:

$$F(\theta, \varphi) = F_D (1 - q_r)$$

سيكون لنسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي العبارة التالية:

$$FTBR = 20 \log_{10} \frac{F_D (1 + q_r)}{F_D (1 - q_r)} = 20 \log_{10} \frac{1 + q_r}{1 - q_r} \quad (1)$$

الانعراج

سوف يؤدي استعمال شاشات عاكسة لا دورية ذات أبعاد محدودة إلى الانعراج حول حافات الشاشة. يمكن في معظم الأحيان توقع أن يتسبب ذلك في تخفيض نسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي. ويبدو أن الأثر يتعلق بقرب العناصر المشعة إلى حافة الشاشة.

حالياً، لا يُؤخذ أثر الانعراج هذا في الاعتبار في النموذج الرياضي المستخدم. وهناك حاجة إلى دراسات إضافية قبل صياغة الخلاصات.

الشاشة المرجعية

إذا كانت المعلمات الفيزيائية للشاشة اللادورية، مثل قطر السلك والمباعدة ومسافة ثنائي الأقطاب من الشاشة المشعة، معروفة، يمكن لأغراض التخطيط إجراء الحسابات باستعمال القيم المرجعية التالية (انظر الفقرة 4.4):

- قطر السلك d = 3 mm؛
- مباعدة الأسلاك $\lambda/40$ (عند التردد الاسمي)؛
- المسافة بين ثنائيات الأقطاب والشاشة العاكسة، ($D_r = 0{,}25\lambda$) (عند التردد الاسمي).

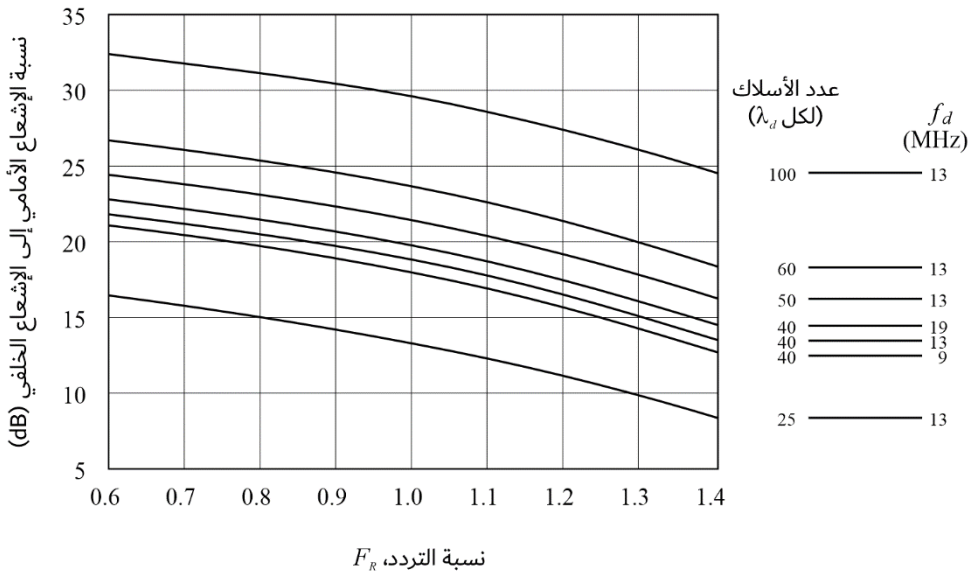
تغير نسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي مع معلمات الشاشة اللادورية ونسبة التردد

يبين الشكل 24، بالنسبة لقيم مختارة لمباعدة الأسلاك (عند التردد الاسمي)، تغير نسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي مع نسبة التردد F_R والتردد الاسمي f_d، محسوباً وفقاً للمعادلة (1).

[3] تعرف نسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي (FTBR) على أنها نسبة شدة المجال القصوى في مخطط الإشعاع الأمامي إلى شدة المجال القصوى في مخطط الإشعاع الخلفي.

الشكل 24

نسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي، بدلالة
عدد الأسلاك لكل طول موجة عند التردد الاسمي f_d، ونسبة التردد F_R



BS.0705-24

2.4.7.4 الهوائيات ذات عاكس موالف

تتضمن الهوائيات ذات عاكس موالف:

- صفائف ثنائيات أقطاب مغذاة من المركز؛
- صفائف ثنائيات أقطاب مغذاة من الطرف.

في هذه الحالات، تُعطى عبارة عامل الصفيف S_x على طول المحور السيني بما يلي:

$$S_x = \left[1 + q^2 + 2q \cos (A - 2 x_0 k \cos \varphi \cos \theta) \right]^{½}$$

حيث:

q: نسبة التيار في العاكس إليه في العنصر المغذى

A: زاوية الطور النسبية للتيار في العاكس بالنسبة للتيار في العنصر المغذى

$2x_0$: المباعدة بين العنصر المغذى والعاكس.

على العموم تُستعمل القيم $q = 0,7$ و$A = \pi/2$ و$2x_0 k = \pi/2$ لهذه الهوائيات.

3.4.7.4 صفائف ثنائيات الأقطاب المغذاة من المركز للإذاعة المدارية

يمكن التعبير عن عامل الصفيف لصفائف ثنائيات الأقطاب المغذاة من المركز للإذاعة المدارية بالمعادلة التالية:

$$S_x = \sum_{i=0}^{n-1} e^{-j k x_i \cos \varphi \cos \theta}$$

حيث:

x_i: المسافة بين مركز العنصر من الرتبة i والمحور العيني.

تُعطى هذه المسافة بواسطة العبارة:

$$x_i = i \lambda_d / 2$$

بحيث أن:

$$k x_i = i 2\pi / \lambda \cdot \lambda_d / 2 = i \pi F_R$$

ومن ثم:

$$S_x = \sum_{i=0}^{n-1} e^{-j i \pi F_R \cos\varphi \cos\theta}$$

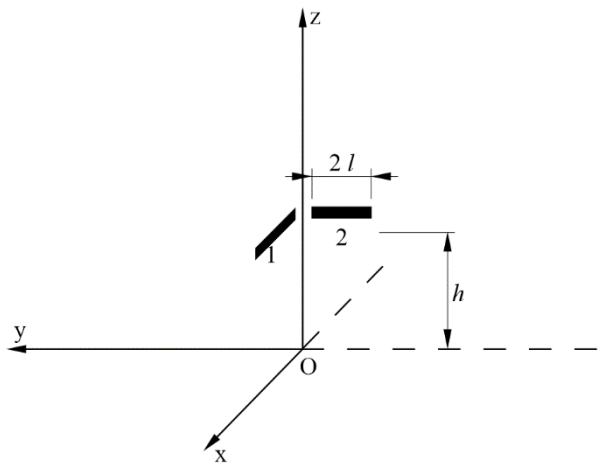
5.7.4 حساب مخططات الصفائف شاملة الاتجاهات لثنائيات أقطاب أفقية

1.5.7.4 الهوائيات الربعية

يُبين الهوائي الربعي مخططياً في الشكل 25، في نظام إحداثيات الشكل 1. يكون المجال الإجمالي المشع بواسطة الصفيف نتيجة للمجال المشع بواسطة كل ثنائي أقطاب بطول $2l = \lambda_d/2$ عند التردد الاسمي.

الشكل 25

الهوائي الربعي



BS.0705-25

نظراً لثنائي الأقطاب رقم 1 المرصوف على طول المحور السيني عند ارتفاع h، يُعبر عن مكونات المجال الكهربائي بالعبارة التالية:

$$E_{1\theta}(\theta, \varphi) = - j\,60\, I \frac{e^{-j k r}}{r} \cos\varphi \sin\theta\, C_d\, e^{j \Delta x}\, S_\theta$$

$$E_{1\varphi}(\theta, \varphi) = - j\,60\, I \frac{e^{-j k r}}{r} \sin\varphi\, C_d\, e^{j \Delta x}\, S_\varphi$$

حيث C_d هي دالة توزيع التيار للعنصر المشع. إذا افترضنا دالة توزيع جيبي للتيار:

$$C_d = \frac{\cos\left(F_R \cdot \pi/2 \cdot \cos\varphi \cos\theta\right) - \cos\left(F_R \cdot \pi/2\right)}{1 - \cos^2\varphi \cos^2\theta}$$

يأخذ الحد $e^{j\Delta x}$ في الاعتبار زحزحة الطور المقابلة للمسافة الأفقية انطلاقاً من مصدر مركز ثنائي الأقطاب. ويُعبر عنها على النحو التالي:

$$e^{j\Delta x} = e^{-j\,k\,l\cos\theta\cos\varphi}$$

سوف يُعبر عن عوامل الصفيف بالمعادلتين التاليتين:

$$S_\theta = e^{j\,\pi F_R \cdot 2h/\lambda_d \cdot \sin\theta} \cdot \left[1 - R_v\, e^{-j\,4\pi F_R \cdot h/\lambda_d \cdot \sin\theta}\right]$$
$$S_\varphi = e^{j\,\pi F_R \cdot 2h/\lambda_d \cdot \sin\theta} \cdot \left[1 + R_h\, e^{-j\,4\pi F_R \cdot h/\lambda_d \cdot \sin\theta}\right]$$

فيما يتعلق بثنائي الأقطاب رقم 2 المرصوف على طول المحور السيني عند ارتفاع h، سوف يُعبر عن مكونات المجال الكهربائي بالعبارتين التاليتين:

$$E_{2\theta}(\theta,\varphi) = -\,j\,60\,I\,\frac{e^{-j\,k\,r}}{r}\sin\varphi\,\sin\theta\,C_d\,e^{j\,\Delta y}\,S_\theta$$

$$E_{2\varphi}(\theta,\varphi) = -\,j\,60\,I\,\frac{e^{-j\,k\,r}}{r}\cos\varphi\,C_d\,e^{j\,\Delta y}\,S_\varphi$$

وسوف يُعبر عن دالة توزيع التيار بالعبارة التالية:

$$C_d = \frac{\cos\left(F_R \cdot \pi/2 \cdot \sin\varphi \cos\theta\right) - \cos\left(F_R \cdot \pi/2\right)}{1 - \sin^2\varphi \cos^2\theta}$$

يأخذ الحد $e^{j\,\Delta y}$ في الاعتبار زحزحة الطور المقابلة للمسافة الأفقية من مصدر مركز ثنائي الأقطاب. ويُعبر عنه على النحو التالي:

$$e^{j\,\Delta y} = e^{-j\,k\,l\cos\theta\sin\varphi}$$

سوف يُعبر عن عوامل الصفيف بنفس الطريقة التي يعبر بها عن ثنائي الأقطاب رقم 1.

من ثم يكون المجال الإجمالي المشع بالصفيف:

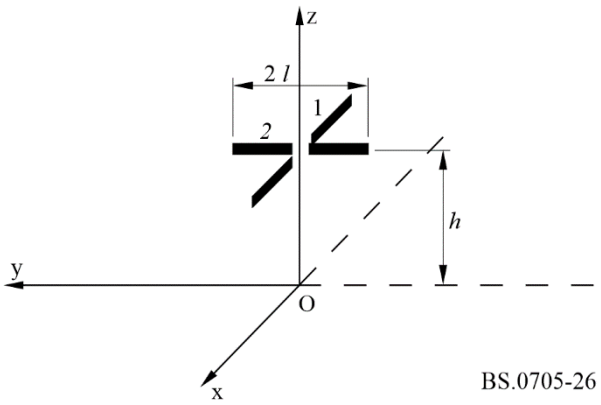
$$|E(\theta,\varphi)| = \left[\left|E_{1\theta}(\theta,\varphi) + E_{2\theta}(\theta,\varphi)\right|^2 + \left|E_{1\varphi}(\theta,\varphi) + E_{2\varphi}(\theta,\varphi)\right|^2\right]^{1/2}$$

2.5.7.4 الهوائيات ذات ثنائيات الأقطاب المتقاطعة

تعرض الهوائيات ذات ثنائيات الأقطاب المتقاطعة بيانياً في الشكل 26، في نظام إحداثيات الشكل 1. والمجال الإجمالي المشع بواسطة الصفيف ينتج عن المجال المشع بواسطة كل ثنائي أقطاب بطول $2l = \lambda_d / 2$ عند التردد الاسمي.

الشكل 26

هوائي ذو ثنائي أقطاب متقاطع



فيما يتعلق بثنائي الأقطاب رقم 1 المرصوف على طول المحور السيني عند ارتفاع h، يُعبر عن مكونات المجال الكهربائي على النحو التالي:

$$E_{1\theta}(\theta, \varphi) = - \text{j}\,60\ I\ \frac{e^{-\text{j}\,k\,r}}{r}\ \cos\varphi\ \sin\theta\ C_d\ S_\theta$$

$$E_{1\varphi}(\theta, \varphi) = \text{j}\,60\ I\ \frac{e^{-\text{j}\,k\,r}}{r}\ \sin\varphi\ C_d\ S_\varphi$$

حيث C_d هو دالة توزيع التيار للعنصر المشع. مع افتراض دالة توزيع تيار جيبية:

$$C_d = \frac{\cos(F_R \cdot \pi/2 \cdot \cos\varphi\ \cos\theta) - \cos(F_R \cdot \pi/2)}{1 - \cos^2\varphi\ \cos^2\theta}$$

سوف يُعبر عن عوامل الصفيف على النحو التالي:

$$S_\theta = e^{\text{j}\,\pi\,F_R \cdot 2h/\lambda_d \cdot \sin\theta} \cdot \left[;1 - R_v\ e^{-\text{j}\,4\pi\,F_R \cdot h/\lambda_d \cdot \sin\theta}\right]$$

$$S_\varphi = e^{\text{j}\,\pi\,F_R \cdot 2h/\lambda_d \cdot \sin\theta} \cdot \left[;1 + R_h\ e^{-\text{j}\,4\pi\,F_R \cdot h/\lambda_d \cdot \sin\theta}\right]$$

فيما يتعلق بثنائي الأقطاب رقم 2 المرصوف على طول المحور الصادي عند ارتفاع h، سوف يُعبر عن مكونات المجال الكهربائي على النحو التالي:

$$E_{2\theta}(\theta, \varphi) = - \text{j}\,60\ I\ \frac{e^{-\text{j}\,k\,r}}{r}\ \sin\varphi\ \sin\theta\ C_d\ S_\theta$$

$$E_{2\varphi}(\theta, \varphi) = - \text{j}\,60\ I\ \frac{e^{-\text{j}\,k\,r}}{r}\ \cos\varphi\ C_d\ S_\varphi$$

وسوف يعبر عن دالة توزيع التيار على النحو التالي:

$$C_d = \frac{\cos(F_R \cdot \pi/2 \cdot \sin\varphi\ \cos\theta) - \cos(F_R \cdot \pi/2)}{1 - \sin^2\varphi\ \cos^2\theta}$$

سوف يعبر عن عوامل الصفيف بنفس الطريقة التي يعبر بها عن ثنائي الأقطاب رقم 1.

لذلك يكون المجال الإجمالي المشع بواسطة الصفيف:

$$|E(\theta, \varphi)| = \left[;|E_{1\theta}(\theta, \varphi) + E_{2\theta}(\theta, \varphi)|^2 + |E_{1\varphi}(\theta, \varphi) + E_{2\varphi}(\theta, \varphi)|^2 \right]^{½}$$

5 الهوائيات اللوغاريتمية الدورية

1.5 اعتبارات عامة

إن صفائف ثنائيات الأقطاب اللوغاريتمية الدورية صفائف خطية مستدقة من عناصر ثنائيات أقطاب ذات أطوال مختلفة تشتغل على مدى ترددات واسع. يتم التشغيل على النطاق الواسع بافتراض أن مختلف زمر العناصر تشع عند مختلف الترددات. والمباعدة بين العناصر متناسبة مع طولها ويُغذى النظام باستعمال خط إرسال. حسب تغير نسبة التردد، فإن العناصر التي توجد عند تردد الطنين أو عند جواره تقرن الطاقة القادمة من خط الإرسال. يكون مخطط الإشعاع الناتج عن ذلك اتجاهياً وله خاصية إشعاع ثابتة تقريباً على كل مدى ترددات التشغيل.

2.5 تسمية الهوائيات اللوغاريتمية الدورية

1.2.5 الهوائيات اللوغاريتمية الدورية الأفقية

تسمية النمط: LPH $N / L / h_1 / h_N / \mathrm{l}_1 / \mathrm{l}_N / Z$

حيث:

LPH: هوائي لوغاريتمي دوري أفقي

N: عدد العناصر

L: المسافة بين مركزي أقصر وأطول عنصر (m)

h_1: علو أقصر عنصر (m)

h_N: علو أطول عنصر (m)

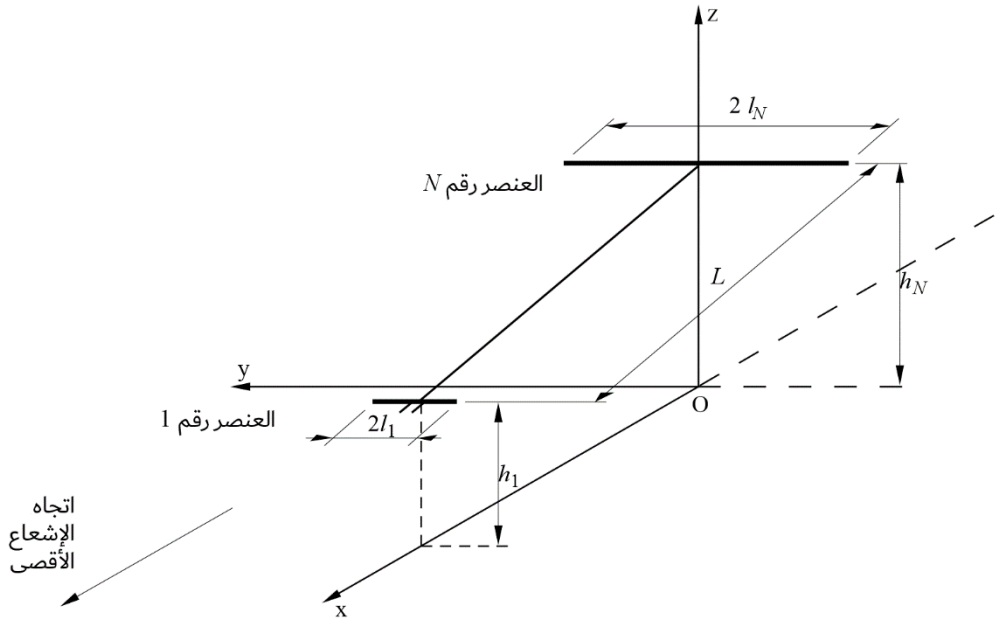
l_1: نصف طول أقصر عنصر (m)

l_N: نصف طول أطول عنصر (m)

Z: معاوقة خط المغذي الداخلي للهوائي (Ω).

الشكل 27

تسمية الصفيف اللوغاريتمي الدوري الأفقي



BS.0705-27

2.2.5 الهوائيات اللوغاريتمية الدورية العمودية

نمط التسمية: LPV N / L / h_1 / h_N / l_1 / l_N / Z

حيث:

LPV: هوائي لوغاريتمي دوري عمودي

N: عدد العناصر

L: المسافة بين مركزي أقصر وأطول عنصر (m)

h_1: علو أقصر عنصر (m)

h_N: علو أطول عنصر (m)

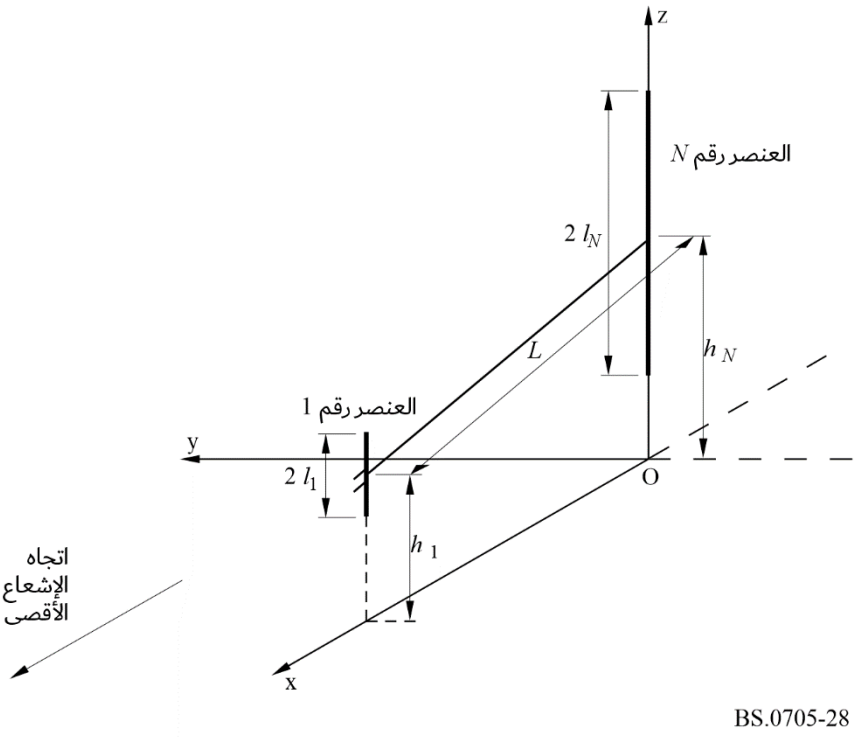
l_1: نصف طول أقصر عنصر (m)

l_N: نصف طول أطول عنصر (m)

Z: معاوقة خط المغذي الداخلي للهوائي (Ω).

الشكل 28

تسمية الصفيف اللوغاريتمي الدوري العمودي



3.5 حساب مخططات الهوائيات اللوغاريتمية الدورية الأفقية

يبين الشكل 29 صفيفاً مكوناً من عناصر ثنائيات أقطاب أفقية طولها l ومباعدتها d مرتبطان بنسبة التصميم τ.

تُبين كل من المعلمات الهندسية للصفيف اللوغاريتمي الدوري في الشكل 29. تتم المباعدة بين العناصر داخل مثلث وفقاً لنسبة التصميم τ التي تُعطى بنسبة أطوال العناصر:

$$\tau = l_i / l_{i+1} \tag{2}$$

نظرياً يجب أن تكون هذه أيضاً نسبة أنصاف قطر ثنائيات الأقطاب، رغم أن ذلك غالباً ما لا يوجد عملياً. وعامل المباعدة هو:

$$\sigma = d_i / 4 l_{i+1} = 0.25(l - \tau)/\tan\alpha \tag{3}$$

حيث:

d_i: المسافة من ثنائي الأقطاب من الرتبة i إلى القمة

α: زاوية نصف القمة.

يُحدد عدد العناصر أساساً بنسبة التصميم τ. مع ارتفاع τ، يرتفع كذلك عدد العناصر. يتم تحديد قد الهوائي قبل كل شيء بعامل المباعدة σ. مع زيادة طول الذراع تزيد قيمة σ.

يُغذى الصفيف باستقطاب متناوب، أي أن ثنائيات أقطاب متجاورة توصل في ترتيب "اعتكاس الطور" عبر خط إرسال ذي معاوقة Z_0. يكون ارتفاع ثنائي الأقطاب الأول (الأدنى والأقصر) هو h_1. والارتفاع h_i لثنائي الأقطاب من الرتبة i هو:

$$h_i = h_1 + x_i \tan\theta' \tag{4}$$

حيث θ′ هي زاوية ارتفاع محور الصفيف (وتقترن بذراعه).

تُعطى الزاوية ψ بين ثنائيات أقطاب الهوائي واتجاه نقطة الرصد $P(r, \theta, \varphi)$ بواسطة:

$$\cos \psi = \cos \theta \cos \varphi \quad (5)$$

الزاوية ψ_a بين محور الهوائي واتجاه نقطة الرصد هي:

$$\cos \psi_a = - \cos \theta \cos \theta' \cos \varphi + \sin \theta \sin \theta' \quad (6)$$

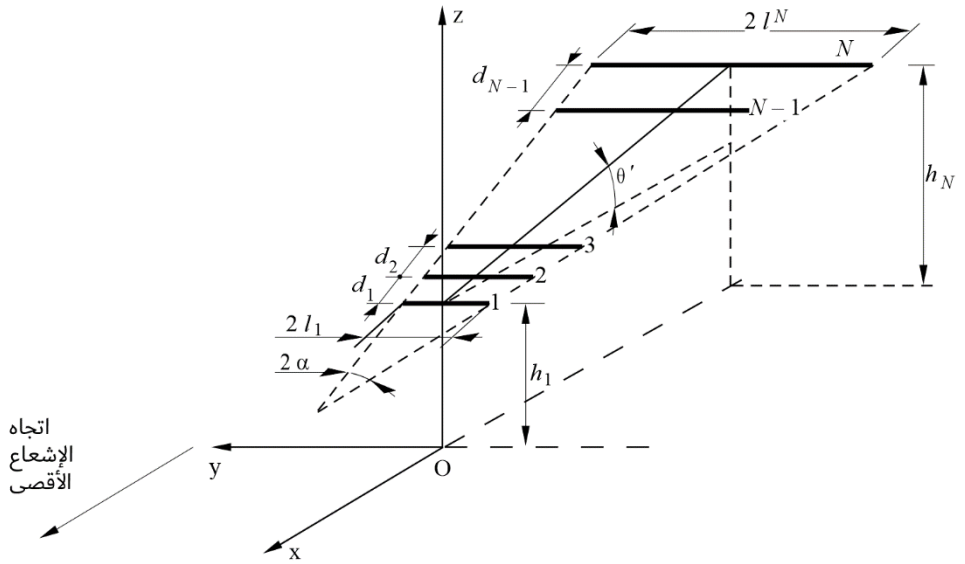
المسافة من مركز ثنائي الأقطاب من الرتبة i إلى نقطة الرصد في ظروف المجال البعيد تُعطى بواسطة:

$$r_i = r_1 + \cos \psi_a / \cos \theta' \quad (7)$$

تُستعمل العلاقات السابقة في حساب المخطط.

الشكل 29

الصفيف اللوغاريتمي الدوري الأفقي



BS.0705-29

1.3.5 النظرية الأساسية

في صفيف لوغاريتمي دوري من ثنائيات أقطاب أفقية أو عمودية، تنتقل الطاقة RF عند تردد معين على طول المغذي حتى تبلغ إقليماً (إقليماً نشيطاً) حيث الأطوال الكهربائية وعلاقات الطور تنتج إشعاعاً نحو الطرف القصير عبر عناصر أقصر من $\lambda/2$. نظراً للتوصيل ذي التغذية المتقاطعة، فإن المجالات المنتجة أمام هذا الإقليم (تلك الموجودة في إقليم الإرسال) سوف تُلغى. والإقليم المتبقي عند الطرف الطويل (إقليم الانعكاس) له أثر قليل إذ إن قدرة قليلة جداً تنتقل ما وراء الإقليم النشيط.

بافتراض بنية دون خسارة، يمكن وصف سلوك الأقاليم الثلاثة من منطلق نظرية خط الإرسال. يتصرف إقليم الإرسال (الطرف القصير) مثل خط إرسال مغذٍ محمل بمرادة سعوية، والإقليم النشيط مثل سعة موازية لمقاومة وإقليم الانعكاس مثل محاثة تحويل. والأثر الإجمالي هو أثر شبكة مرشاح.

عندما يوضع الهوائي فوق مستوي الأرض، يميل محور الصفيف بحيث تكون ثنائيات الأقطاب عند علو كهربائي ثابت فوق الأرض. في المستوي السمتي يكون مخطط الحزمة الرئيسية داخل مدى تردد الهوائي مماثلاً لمخطط ثنائي أقطاب $\lambda/2$ عند علو $\lambda/4$ فوق الأرض. غالباً ما يتم تحليل بنية الهوائي اللوغاريتمي الدوري بفصل المشكل إلى جزأين:

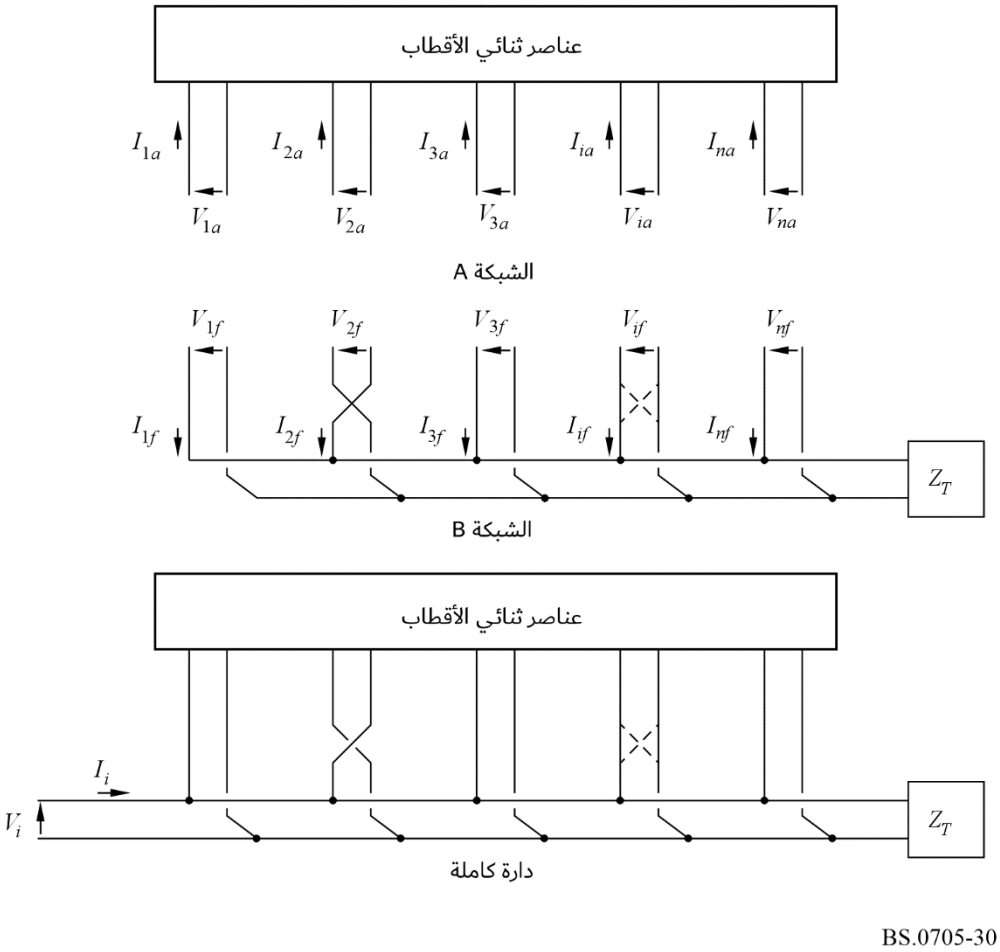
– مشكل (الدارة) الداخلي الذي يعالج التفاعل البيني للتيارات والتوترات، الخ، داخل نظام الهوائي نفسه؛

– مشكل (الإشعاع) الخارجي الذي يعالج التفاعل البيني للهوائي مع وسط الانتشار.

يمكن التعبير عن المشكل الداخلي كمشكل مصفوفة، حيث يُمثل الصفيف بواسطة الشبكتين A وB كما هو مبين في الشكل 30.

الشكل 30

مخطط إجمالي لشبكة الصفيف



BS.0705-30

تتكون الشبكة A من العناصر المشعة المتوازية التي يمكن التعبير عن توترات وتيارات تغذيتها من وجة نظر المعاوقات الذاتية والمتبادلة بحيث:

$$[V_a] = [Z_a] \cdot [I_a] \quad \text{or} \quad [I_a] = [Z_a]^{-1} \cdot [V_a] \tag{8}$$

حيث:

I_a: مصفوفة 1 على N لتيارات التغذية عند الأساس

V_a: مصفوفة 1 على N لتوترات أساس متتالية

N_a: عدد ثنائيات الأقطاب

Z_a: مصفوفة N على N في دارة مفتوحة للمعاوقات.

تمثل عناصر المصفوفة على الخط القطري الرئيسي لـ $[Z_a]$ المعاوقة الذاتية لثنائيات الأقطاب وتمثل العناصر خارج الخط القطري المعاوقات المتبادلة بين ثنائيات الأقطاب التي تبينها المؤشرات.

بطريقة مماثلة يمكن التعبير عن علاقات التيار–التوتر لدارة المغذي المبينة في الشكل 30 بواسطة:

$$[I_f] = [Y_f] \cdot [V_f] = [Y_f] \cdot [V_a] \tag{9}$$

حيث I_f وV_f هما على التوالي مصفوفة 1 على N لتيارات التغذية ولتوترات الاستجابة لكل قسم لخط الإرسال يكون دارة تغذية كاملة، و $[Y_f]$ هو سماحية الدارة القصيرة N على N المصاحبة للمغذي. تتوقف عناصر $[Y_f]$ على أطوال خط الإرسال في كل قسم والسماحية المميزة Y_0، التي تُعرف قيمتها بمجرد القيام باختيار أو تصميم لخط الإرسال.

يتم الحصول على الحل التحليلي للمشكل بالقيام أولاً بحساب الدخل الإجمالي لمصفوفة التيار $[I]$ بإضافة المعادلة (8) والمعادلة (9):

$$\begin{aligned}[I] &= [I_a] + [I_f] = [I_a] + [Y_f] \cdot [V_a] \\ &= [I_a] + [Y_f] \cdot [Z_a] \cdot [I_a] \\ &= \left([U] + [Y_f] \cdot [Z_a]\right) \cdot [I_a] \end{aligned} \tag{10}$$

حيث $[U]$ هو مصفوفة الوحدة N على N.

تمثل عناصر $[I]$ تيارات الدخل عند كل نقطة عقدة (أسس ثنائيات الأقطاب) حيث الهوائي ودارات التغذية مركبة. في الحالات العملية تكون كل عناصر المصفوفة في $[I]$ صفراً باستثناء I_1، الذي هو مصدر التيار الوحيد (عند أساس أقصر ثنائي أقطاب) للصفيف بأكمله. دون فقدان التعميم يمكن افتراض $I_1 = 1$، بحيث أن تيارات أساس ثنائي الأقطاب $[I_a]$ يمكن أن تُحدد انطلاقاً من المعادلة (10) بعكس المصفوفة:

$$[I_a] = \left([U] + [Y_f] \cdot [Z_a]\right)^{-1} \cdot [I] = \left([U] + [Y_f] \cdot [Z_a]\right)^{-1} \cdot [1\ 0 \ldots 0]^t \tag{11}$$

بالإحالة إلى الشكل 30، يمكن التعبير عن توزيع التيار (الجيبي) على ثنائي الأقطاب التنوعي بواسطة:

$$\begin{aligned} I_i(x) &= I_{mi}\ [\sin k\,(l_i - |x|)] && \text{for } k\,l_i <> \pi/2 \\ I_i(x) &= I_{mi}\ [\sin k\,(|x|) - 1] && \text{for } k\,l_i = \pi/2 \end{aligned} \tag{12}$$

حيث يجب ملاحظة أن $I_i(0) = I_{ai}$، مع I_{ai} كما هي محسوبة بواسطة المعادلة (11).

يمكن التعبير عن مخطط الإشعاع للصفيف اللوغاريتمي الدوري الأفقي على أرض منبسطة متجانسة وغير مثالية بواسطة دالة مخطط الإشعاع المقيسة التالية:

$$F(\theta, \varphi) = K \cdot f(\theta, \varphi) \cdot S_\theta \cdot S_\varphi$$

حيث:

K: عامل التقييس للحصول على $|F(\theta, \varphi)|_{max} = 1$، أي 0 dB

$f(\theta, \varphi)$: دالة مخطط عنصر أفقي

S_θ: عامل الصفيف للاتجاه θ

S_φ: عامل الصفيف للاتجاه φ.

يُعبر كذلك عن دالة مخطط الإشعاع على النحو التالي (انظر الفقرة 1.7.4):

$$F(\theta, \varphi) = K \cdot |E(\theta, \varphi)| = K \cdot \left[;|E_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |E_\varphi(\theta, \varphi)|^2 \right]^{1/2}$$

مع:

$$F(\theta, \varphi) = K \cdot |E(\theta, \varphi)| = K \cdot \left[|E_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |E_\varphi(\theta, \varphi)|^2 \right]^{1/2}$$

و:

$$E_\varphi(\theta, \varphi) = -\,\mathrm{j}\,60\,\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,k\,r}}{r}\,\cos\varphi \cdot S_\varphi$$

أو، بإهمال الحد المتوقف على المسافة (غير ضروري لتحديد مخطط الإشعاع):

$$E_\theta(\theta, \varphi) = |S_\theta|\,\sin\theta\,\sin\varphi$$

$$E_\varphi(\theta, \varphi) = -\,|S_\varphi|\,\cos\varphi$$

مع أخذ المعادلات (4) و (5) و (6) و (7) في الحسبان، يمكن إعادة كتابة عوامل الصفيف على النحو التالي:

$$S_\theta = \sum_{i=1}^{Na} I_{mi}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\,k\,x_i\cos\psi_a/\cos\theta} \cdot \left(1 - R_v\,\mathrm{e}^{-2\mathrm{j}\,k\,h_i\sin\theta}\right) \cdot F_i$$

$$S_\varphi = \sum_{i=1}^{Na} I_{mi}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\,k\,x_i\cos\psi_a/\cos\theta} \cdot \left(1 + R_h\,\mathrm{e}^{-2\mathrm{j}\,k\,h_i\sin\theta}\right) \cdot F_i \qquad (13)$$

حيث F_i هي دالة إشعاع ثنائي الأقطاب من الرتبة i معبراً عنها على النحو التالي:

$$F_i = \frac{\cos(k\,\ell_i\,\cos\theta\,\cos\theta') - \cos(k\,\ell_i)}{1 - \cos^2\theta\,\cos^2\theta'}$$

2.3.5 إجراء الحساب

إن حساب مخطط الإشعاع وفقاً للمعادلة السابقة أكثر تعقيداً منه في حالة صفيف من ثنائيات الأقطاب الأفقية. في الواقع، إن تيار الدخل لكل ثنائي أقطاب ليس قيمة ثابتة ويجب أن يُحدد ترددا بتردد بواسطة مصفوفة عكس. يمكن أن يؤدي هذا التعقيد إلى برنامج حاسوب ثقيل، ومن ثم إلى بعض الصعوبات لإدماج برامج الحساب في الوقت الفعلي في نظام تخطيط أعم.

علاوة على ذلك، يتعين ملاحظة أنه حتى في حالة حساب دقيق قائم على الخوارزميات السابقة، فإن بعض الانحرافات لا مفر منها بين المخطط المحسوب والواقع. هذه الانحرافات يمكن أن تكون أكثر أهمية مما هي عليه في حالة ثنائي الأقطاب الأفقي لأن نسبة الأطوال τ (انظر المعادلة (2)) هي نظرياً كذلك نسبة أنصاف أقطار ثنائيات الأقطاب، بحيث أن البعد المستعرض للعنصر المشع يلعب كذلك دوراً في الأداء الإجمالي.

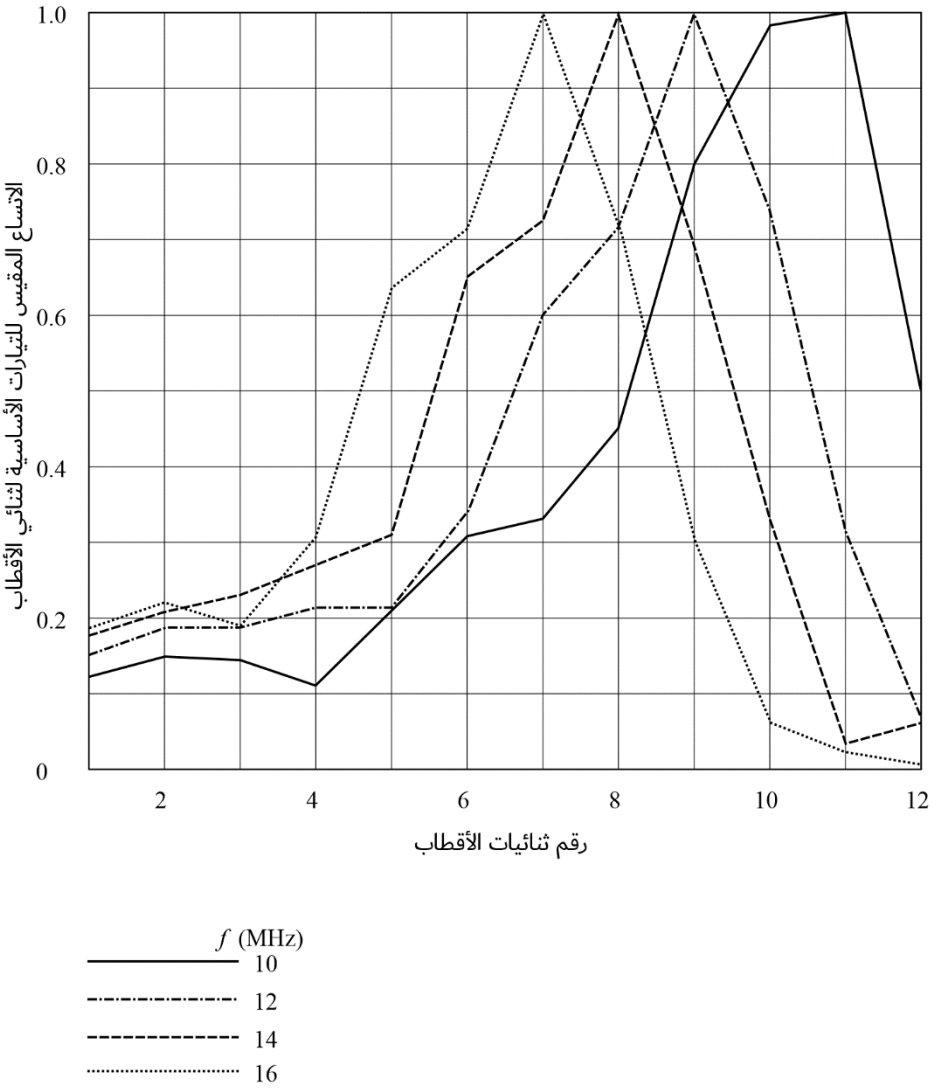
بما أنه يجب قبول انحراف بارز إلى حد ما، وإذا أخذنا كذلك بعين الاعتبار سياق التخطيط الذي يجب أن تُطبق فيه النتائج، سوف يوصف في القسم التالي حل تقريبي لكن أبسط وأسرع للمشكل الداخلي.

1.2.3.5 حل تقريبي للمشكل الداخلي

لقد تم قياس وحساب توزيع اتساع وطور التيارات الأساسية لثنائي الأقطاب لصفيف لوغاريتمي دوري جيد التصميم نمطي. يبين الشكلان 31 و32 أمثلة عن توزيعات الاتساع والطور المحسوبة بدلالة وضع ثنائي الأقطاب لهوائي معين.

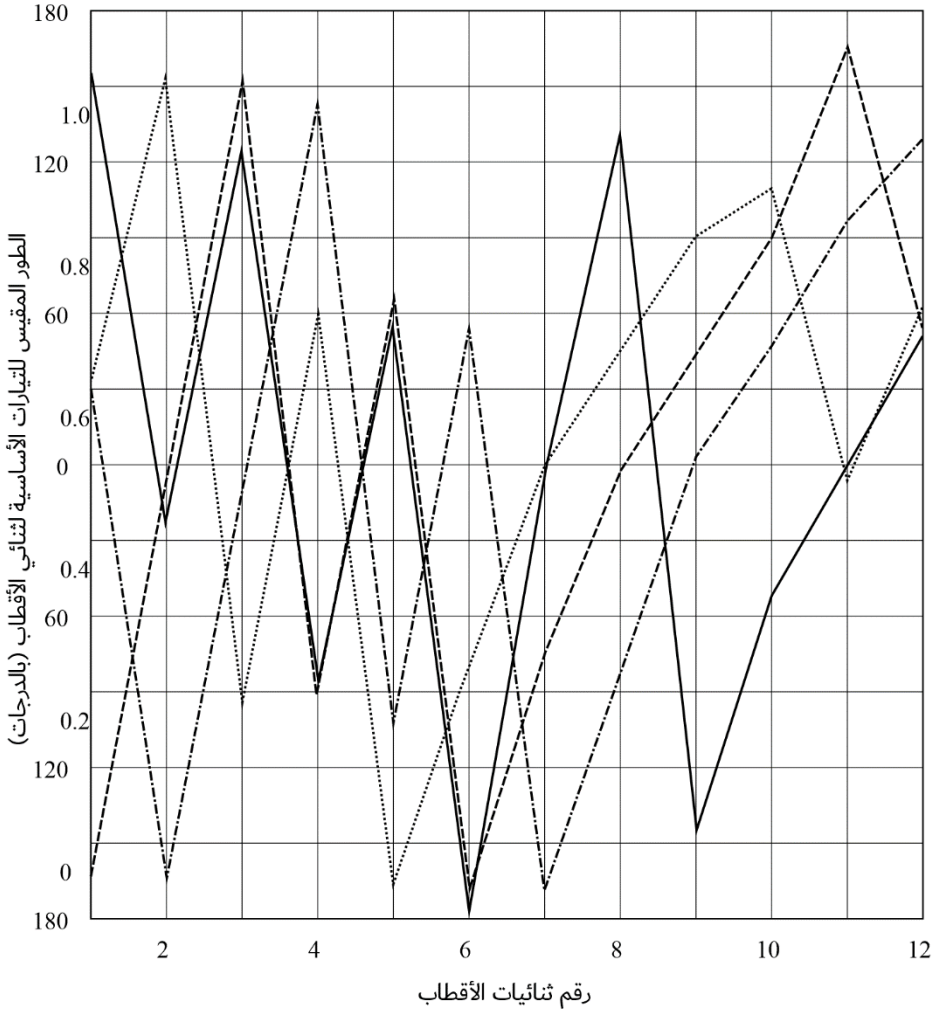
الشكل 31

الاتساع المقيَّس للتيارات الأساسية لثنائي الأقطاب لصفيف ثنائيات الأقطاب اللوغاريتمية الدورية في الفضاء الحر بدلالة موقع ثنائيات الأقطاب والترددات



الشكل 32

الطور المقيس للتيارات الأساسية ثنائية الأقطاب لنفس صفيف
ثنائيات الأقطاب اللوغاريتمية الدورية في الفضاء الحر بدلالة موقع ثنائيات الأقطاب والترددات

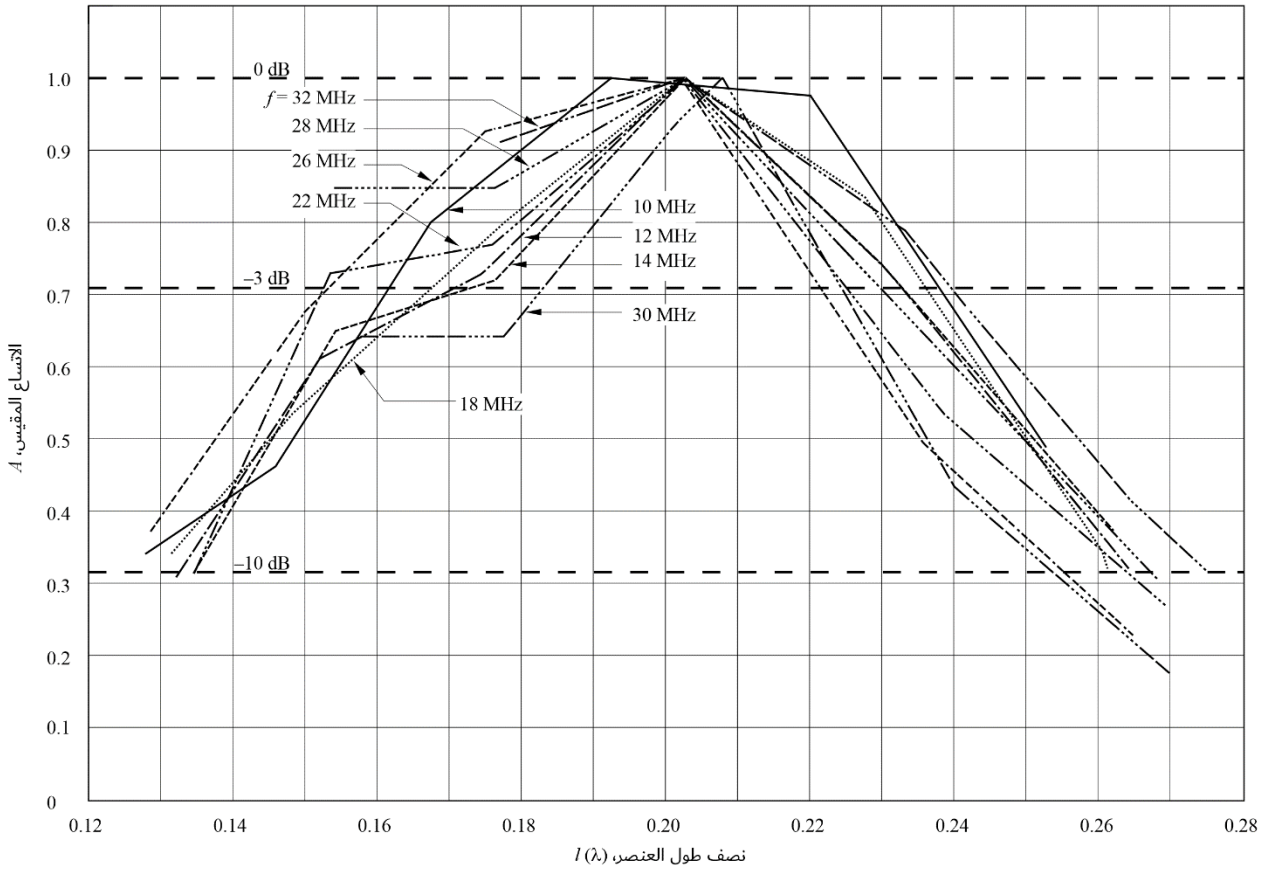


يبين الشكلان 33 و34 نفس التوزيعات بدلالة نصف طول العنصر عند مختلف ترددات التشغيل لنفس الحالة عند مديات التردد 10-32 MHz.

رغم أن هذه المنحنيات حُسبت في ظروف الفضاء الحر، من الممكن اشتقاق منحنى توزيع تيار عام ينطبق على أي صفيف لوغاريتمي دوري جيد التصميم كما هو مبين في الشكل 35. يمكن الحصول على ذلك بتكييف منحنيات مناسبة مع الشكلين 33 و34.

الشكل 33

الاتساع المقيس للتيارات الأساسية لثنائيات أقطاب الصفيف اللوغاريتمي الدوري في الفضاء الحر، بدلالة نصف طول العنصر والتردد

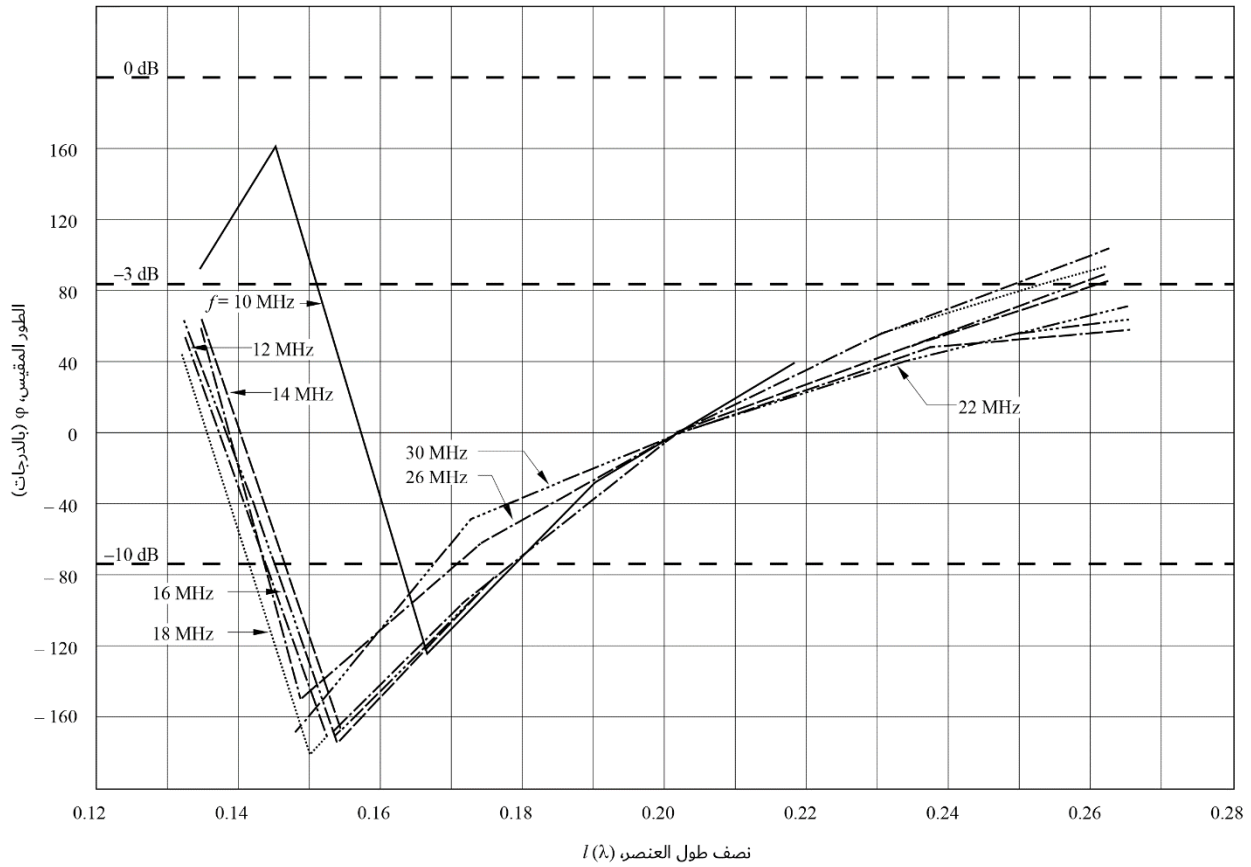


تم تقييس الاتساع بالنسبة مع اتساع العنصر ذي اتساع التيار الأوسع.

BS.0705-33

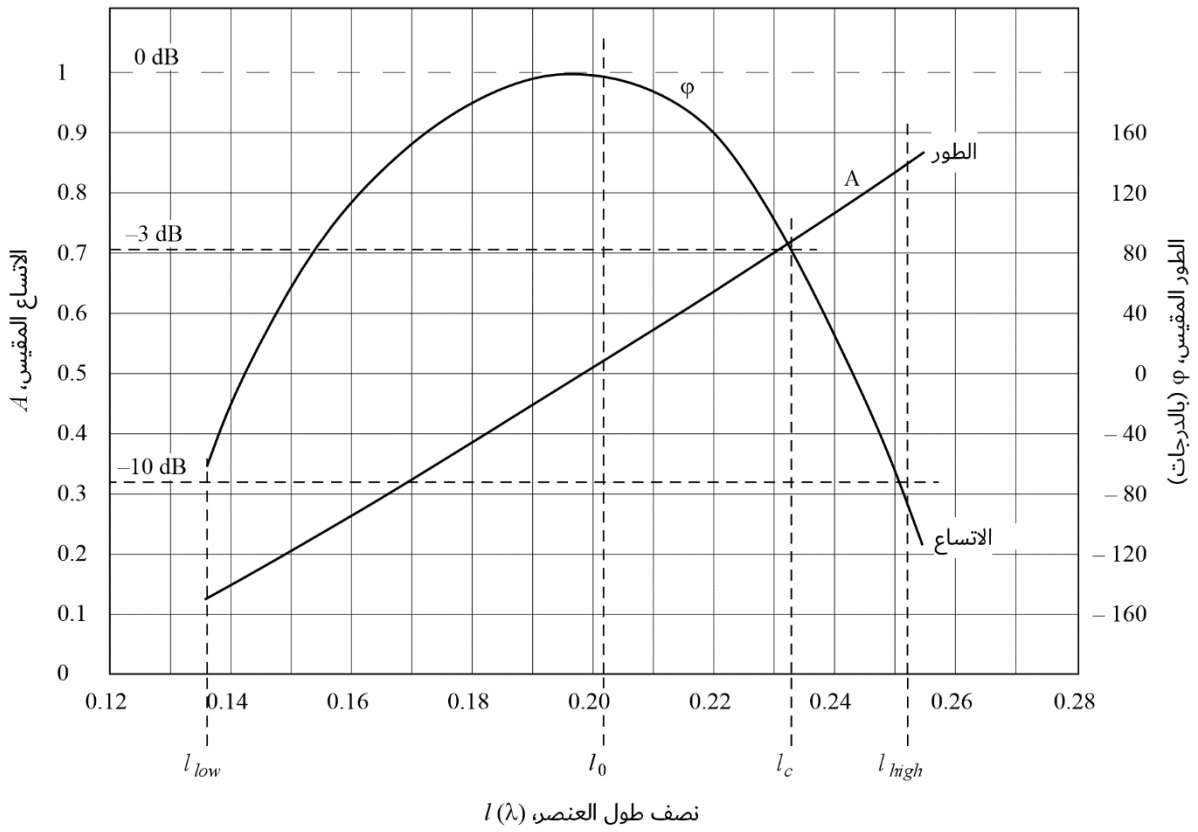
الشكل 34

الطور المقيس للتيارات الأساسية لثنائيات أقطاب الصفيف اللوغاريتمي الدوري بدلالة نصف طول العنصر والتردد



الشكل 35

المنحنى العام المستقرأ للاتساع والطور المقيَّسين للتيارات الأساسية بدلالة طول العنصر



BS.0705-35

يتوقف عرض النطاق القابل للاستعمال B_{ar} لهوائي ما على عرض النطاق النسبي الذي يمكن للهوائي أن يغطيه قبل أن تُسبب آثار غير مقبولة بواسطة العنصر الأصغر أو الأكبر. يتم بلوغ حد التردد الأعلى عندما يكون تيار أصغر عنصر 10 dB تحت الحد الأقصى. ويحدث ذلك عند طول ثنائي الأقطاب l_{low} (تُستعمل الأطوال هنا لأن المسافة من القمة تتغير مع زاوية القمة α). يتم بلوغ حد التردد الأدنى عندما يكون العنصر الأطول 3 dB أقل من الحد الأقصى. يكون هذا الطول l_c. يقع الحد الأقصى عند طول l_0 و10 dB العليا عند طول l_{high}. تُستعمل المعادلات التجريبية التالية:

$$l_c = 0.5\, S_h\, (Z_0 l/a)$$

حيث Z_0 هي معاوقة خط الإرسال، وl/a هي نسبة طول العنصر إلى القطر وS_h عامل تقليص. يبين الشكل 36 S_h كدالة لـ Z_0 لمختلف قيم l/a المقيسة والمحسوبة.

$$l_{low} = l_c/B_{ar}$$

$$B_{ar} = 1.1 + 30.7\sigma(1-\tau) \tag{14}$$

B_{ar} هو عرض نطاق الإقليم النشيط القابل للاستعمال للهوائي. ويبين الشكل 37 القيم المقيسة لـ B_{ar} بالمقارنة مع تلك المعطاة بواسطة المعادلة (14).

$$l_{high} = 1.1\, l_c \tag{15}$$

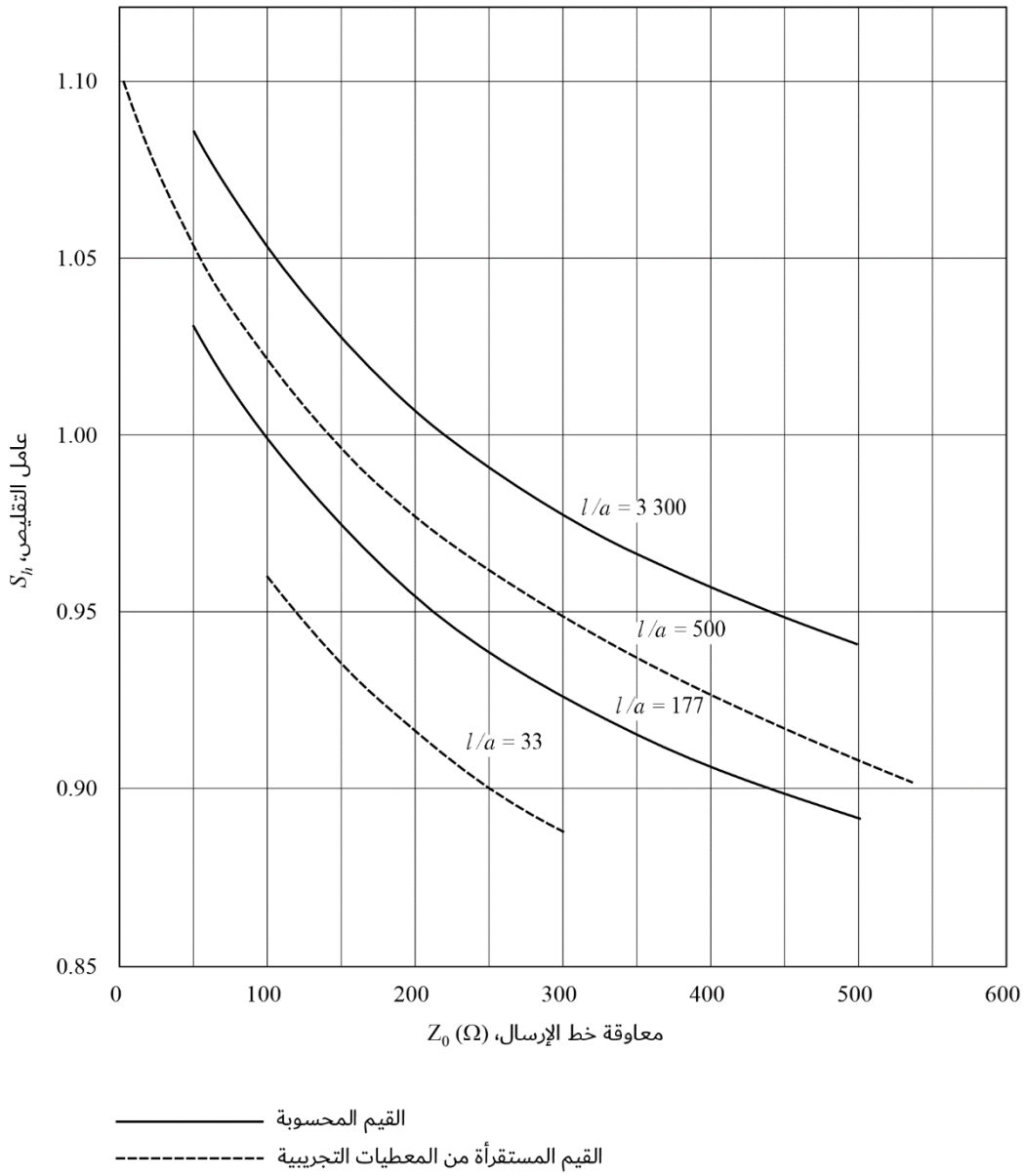
و

$$l_0 = l_{low} + 0.7166\, (l_c - l_{low}) \tag{16}$$

صممت المعادلتان (15) و(16) لتوليد كلا المنحنيين. والمعامل 0,7166 هو من أجل $l/a = 500$. وتُستعمل هذه القيمة كالقيمة بالتغيب في الحسابات.

الشكل 36

عامل التقليص S_h كدالة لـ Z_0 و l/a



BS.0705-36

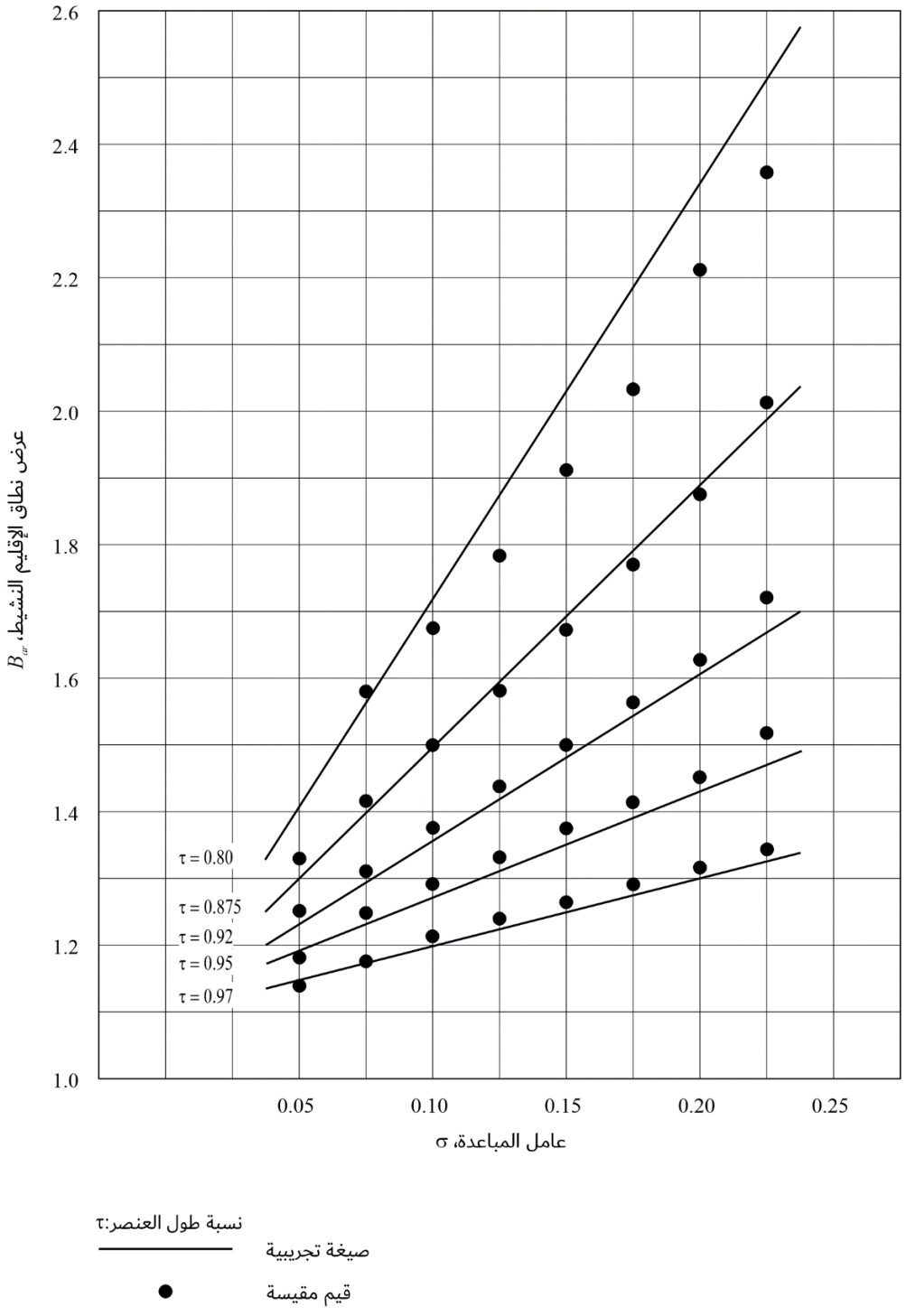
يأخذ الإجراء في الاعتبار فقط ثنائيات الأقطاب التي تقع في الإقليم النشيط بين l_{low} وl_{high}. لكل حالة هوائي يتم حساب منحنى شبيه بمنحنى الشكل 35 وتقييم تيار I_{bi} وطور لكل ثنائي أقطاب داخل الإقليم النشيط. بعد ذلك يتم إعادة تقييس تيارات ثنائي الأقطاب بحيث يكون التيار الأقصى 1، إذ إن طول ثنائي الأقطاب لن يقابل دائماً l_0.

يجب التذكير بأن تيارات ثنائي الأقطاب السابقة تمثل التيارات الأساسية المقيسة لثنائيات الأقطاب النشيطة. إن التيارات I_{mi} الواردة في العبارة (13) لعوامل الصفيف هي تيارات (العروة) القصوى في كل ثنائي أقطاب. لذلك سيكون من الضروري حسابها بتطبيق (12) من أجل $x = 0$، أي:

$$I_{mi} = I_{bi}/\sin(kl_i)$$

الشكل 37

عرض نطاق الإقليم النشيط B_{ar} كدالة لـ σ و τ

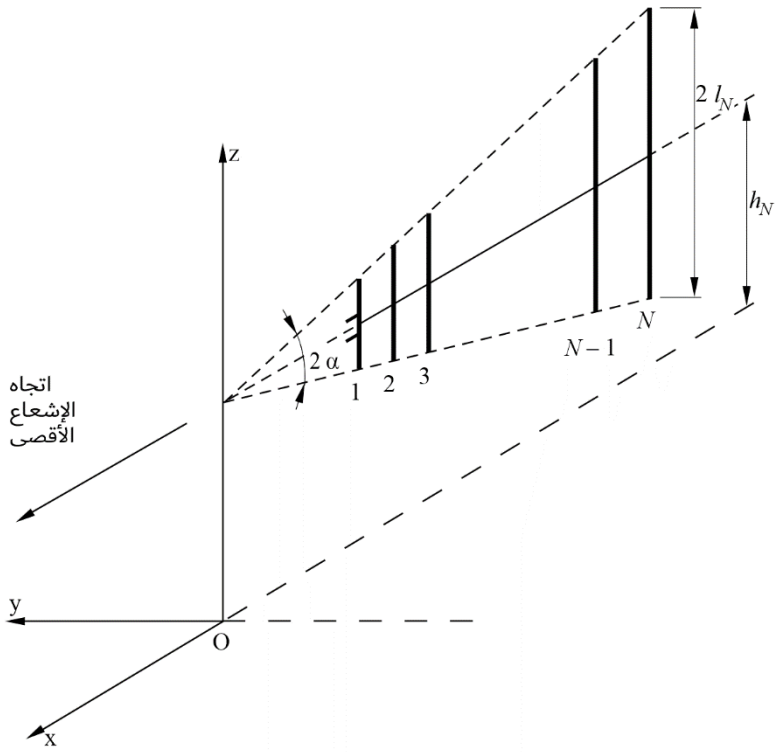


4.5 حساب مخططات الهوائيات اللوغاريتمية الدورية العمودية

يمكن تحقيق الصفيف اللوغاريتمي الدوري العمودي بطريقتين كما هو مبين في الشكلين 38 و39. إذا تم بناء الصفيف عند ارتفاع مركز عنصر ثابت فوق الأرض كما هو مبين في الشكل 38، ستكون له خصائص نطاق عريض، لكن عامل الارتفاع الناتج عن انعكاس الأرض سوف يكون متوقفاً على التردد. لتخفيف هذا المشكل، يمكن بناء الصفيف مع ترتيب عناصره عند ارتفاع متغير كما يبين ذلك الشكل 39.

الشكل 38

الهوائي اللوغاريتمي الدوري العمودي (مراكز العناصر عند ارتفاع ثابت)



BS.0705-38

في القسم التالي سوف يُعتبر الهوائي اللوغاريتمي الدوري العمودي مع مراكز العناصر عند ارتفاع متغير على أنه الحالة الأعم.

وإذا رجعنا إلى الشكل 39 فإن هندسة الصفيف تُحدد بالزوايا الثلاث α_1 وα_2 وα_3. ويمكن أن يُكتب عامل المباعدة σ' (انظر المعادلة (3)) على النحو التالي:

$$\sigma' = d_i / 4\, l_{i+1} = (1 - \tau) / 4 \left[\sin(\alpha_2 + \alpha_3) - \tan\alpha_3 \cos(\alpha_2 + \alpha_3)\right]$$

عندئذ يعبر عن ارتفاع كل عنصر على النحو التالي:

$$h_i = l_i \left[1 + \sin\alpha_3 \cos(\alpha_2 + \alpha_3) / \sin\alpha_2\right]$$

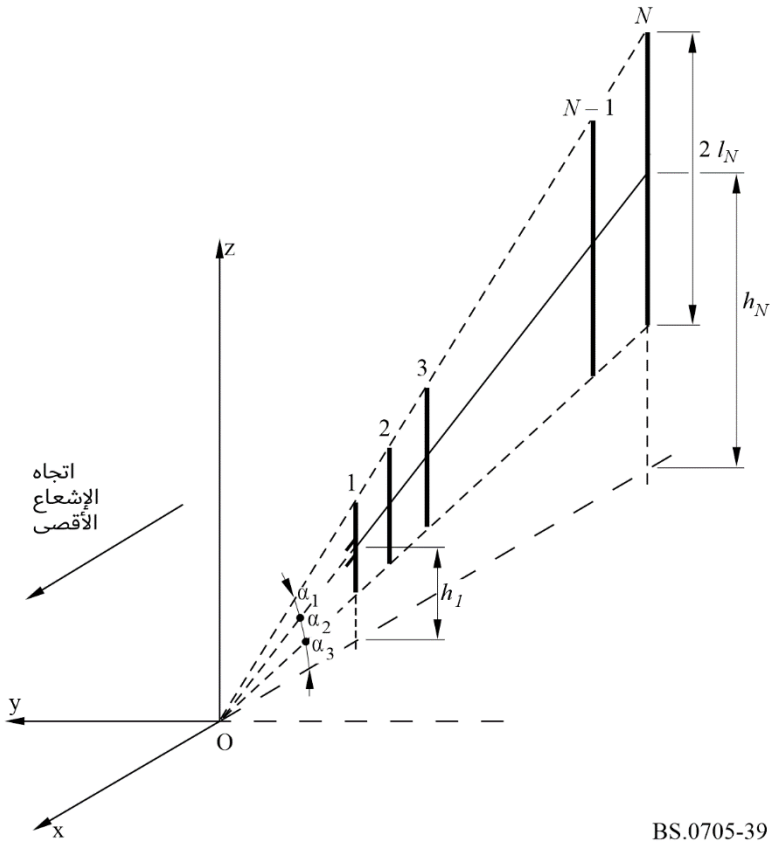
تكون الزاوية ψ_b بين محور الهوائي ونقطة الرصد هي:

$$\cos\psi_b = \sin\theta \sin(\alpha_2 + \alpha_3) - \cos\theta \cos(\alpha_2 + \alpha_3) \cos\varphi$$

من الواضح أنه عندما تكون $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ و$\alpha_3 = -\alpha$ فإن الحالة سوف تتحول إلى حالة صفيف لوغاريتمي دوري عمودي مع مراكز العناصر عند ارتفاع ثابت.

الشكل 39

الهوائي اللوغاريتمي الدوري العمودي (مراكز العناصر عند ارتفاع متغير)



1.4.5 النظرية الأساسية

إن النظرية الأساسية هي جوهرياً نفس تلك الموصوفة في الفقرة 1.3.5، مع الاستثناءات التالية.

يُعبر عن مكونات المجال الكهربائي على النحو التالي:

$$E_\theta(\theta, \varphi) = 0$$

و

$$E_\varphi(\theta, \varphi) = \mathrm{j}\,60\,\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,k\,r}}{r}\,S_v$$

أو، إذا أهملنا الحد الذي يتوقف على المسافة (غير مطلوب لتحديد مخطط الإشعاع):

$$E_\theta(\theta, \varphi) = 0$$

$$E_\varphi(\theta, \varphi) = S_v$$

يمكن التعبير عن عامل الصفيف S_v بواسطة:

$$S_v = \sum_{i=1}^{N} I_{mi}\ e^{j\,k\,x_i \cos \psi_b / \cos(\alpha_2 + \alpha_3)} \cdot e^{j\,k\,h_i \sin \theta} \cdot \left(1 + R_v\ e^{-2j\,k\,h_i \sin \theta}\right) \cdot F_i \quad (17)$$

حيث F_i هي دالة إشعاع ثنائي الأقطاب من الرتبة i:

$$F_i = \frac{\cos(k\,\ell_i \sin \theta) - \cos k\,\ell_i}{\cos \theta} \quad (18)$$

2.4.5 إجراء الحساب

يتبع إجراء الحساب تماماً إجراء حساب الهوائي اللوغاريتمي الدوري الأفقي الموصوف في الفقرة 2.3.5. الفرق الوحيد هو طبعاً العبارات المختلفة لـ S_v وF_i التي يجب تقييمها وفقاً للمعادلتين (17) و(18).

6 الهوائيات المعينية

1.6 اعتبارات عامة

تم استعمال الهوائي المعيني على نطاق واسع للاتصالات بالموجات الديكامترية. ويستمر استعماله لوصلات الخدمة الثابتة من نقطة إلى نقطة. واستُعمل كذلك للإذاعة بالموجات الديكامترية لكن لم يعد يوصى به لهذا الغرض (انظر الجزء 2 من هذا الملحق، الفقرة 3.6). يتكون الهوائي من أربعة أسلاك مستقيمة لها نفس الطول l مرتبة في شكل معين (انظر الشكل 40).

يستعمل تصميم هوائي معيني نمطي أطوال جانبية ذات أطوال موجات عدة ويكون عند ارتفاع يتراوح بين 0,5-1,0 λ عند وسط مدى ترددات الاشتغال.

يختلف الهوائي المعيني عن صفيف ثنائيات الأقطاب لأنه ينتمي إلى فئة الهوائيات ذات الموجة المتنقلة، أي أن التيارات في موصلات الهوائي هي أساساً موجات متنقلة قادمة من نقطة التغذية وتنتشر عبر الأسلاك نحو المقاومة الانتهائية.

يمكن أن تُفقد كمية كبيرة من القدرة في المقاومة الانتهائية وهي تمثل الثمن الذي يجب دفعه عن بعض الخصائص المطلوبة مثل بساطة البناء وعرض نطاق تشغيل واسع نسبياً وكسب اتجاهية مرتفع.

2.6 تسمية الهوائيات المعينية

تسمية النمط: RH l / γ / h

حيث (انظر الشكل 40):

RH: الهوائي المعيني الأفقي

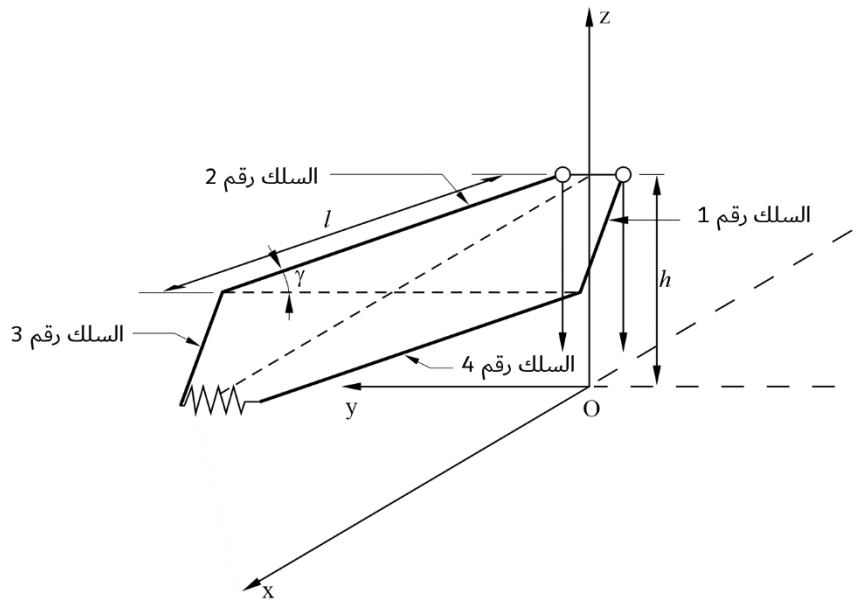
l: طول جانب واحد من المعين (m)

γ: نصف الزاوية المنفرجة الداخلية للمعين

h: ارتفاع المعين فوق الأرض (m).

الشكل 40

الهوائي المعيني الأفقي



BS.0705-40

3.6 حساب مخططات الهوائي المعيني

على الرغم من أن الحالة الأعم تُمثل بواسطة هوائي معيني مائل، فإن هذه التشكيلة لا تُصادف كثيراً ولن ندرس سوى حالة الهوائي المعيني الأفقي.

سوف يُحسب مخطط الهوائي المعيني مع مراعاة المساهمة في المجال الإجمالي الذي تنتجه الموصلات المختلفة في حالة أرض متجانسة منبسطة غير مثالية.

بالرجوع إلى الشكل 40، تم تعرف هوية موصلات الهوائيات الأربعة على التوالي بالأرقام من 1 إلى 4.

ليكن:

$$\cos \psi_1 = \cos \theta \ \sin (\varphi - \gamma)$$

$$\cos \psi_2 = \cos \theta \ \sin (\varphi + \gamma)$$

حيث γ هو نصف الزاوية المنفرجة للمعين، وليكن كذلك:

$$F_1 = \frac{1 - e^{-j k \ell (1 - \cos \psi_1)}}{1 - \cos \psi_1}$$

$$F_2 = \frac{1 - e^{-j k \ell (1 - \cos \psi_2)}}{1 - \cos \psi_2}$$

تكون مكونات المجال الناتجة عن مساهمات السلك رقم 1 والسلك رقم 2 هي:

$$E'_\theta = E_{\theta 1} + E_{\theta 2} = 30 \, I_m \frac{e^{-j k r}}{r} F'_\theta$$

$$E'_{\varphi} = E_{\varphi 1} + E_{\varphi 2} = 30\, I_m \frac{e^{-j\,k\,r}}{r} F'_{\varphi}$$

حيث:

$$F'_{\theta} = -\sin\theta \sin(\gamma+\varphi)\cdot F_1 \cdot \left(1 - R_v\, e^{-2j\,k\,h\sin\theta}\right) + \sin\theta \sin(\gamma-\varphi)\cdot F_2 \cdot \left(1 - R_v\, e^{-2j\,k\,h\sin\theta}\right)$$

$$F_{\varphi;}' = -\cos(\gamma+\varphi)\cdot F_1 \cdot \left(;1 + R_h\, e^{-2j\,k\,h\sin\theta}\right) - \cos(\gamma-\varphi)\cdot F_2 \cdot \left(;1 + R_h\, e^{-2j\,k\,h\sin\theta}\right)$$

بنفس الطريقة، تُعطى مكونات المجال الناتجة عن مساهمات السلك رقم 3 والسلك رقم 4 بواسطة:

$$E''_{\theta} = E_{\theta 3} + E_{\theta 4} = 30\, I_m \frac{e^{-j\,k\,r}}{r} F''_{\theta}$$

$$E''_{\varphi} = E_{\varphi 3} + E_{\varphi 4} = 30\, I_m \frac{e^{-j\,k\,r}}{r} F''_{\varphi}$$

حيث:

$$F''_{\theta} = e^{-j\,k\ell(1-\cos\psi_2)} \sin\theta \sin(\gamma+\varphi)\cdot F_1 \cdot \left(1 - R_v\, e^{-2j\,k\,h\sin\theta}\right) -$$

$$e^{-j\,k\ell(1-\cos\psi_1)} \sin\theta \sin(\gamma-\varphi)\cdot F_2 \cdot \left(1 - R_v\, e^{-2j\,k\,h\sin\theta}\right)$$

$$F''_{\varphi} = -e^{-j\,k\ell(1-\cos\psi_2)} \cos(\gamma+\varphi)\cdot F_1 \cdot \left(1 + R_h\, e^{-2j\,k\,H\sin\theta}\right) -$$

$$e^{-j\,k\ell(1-\cos\psi_1)} \cos(\gamma-\varphi)\cdot F_2 \cdot \left(1 + R_h\, e^{-2j\,k\,H\sin\theta}\right)$$

يمكن التعبير عن مكونات المجال الإجمالية بنفس الطريقة على النحو التالي:

$$E_{\theta} = E_{\theta 1} + E_{\theta 2} + E_{\theta 3} + E_{\theta 4} = 30\, I \frac{e^{-j\,k\,r}}{r} (F'_{\theta} + F''_{\theta})$$

$$E_{\varphi} = E_{\varphi 1} + E_{\varphi 2} + E_{\varphi 3} + E_{\varphi 4} = 30\, I \frac{e^{-j\,k\,r}}{r} (F'_{\varphi} + F''_{\varphi})$$

يُعطى التعبير النهائي لمكونات المجال الكهربائي الإجمالي بواسطة:

$$E_{\theta} = -240\,j\,I \frac{e^{-j\,k\,r}}{r} e^{-j\,k\ell(1-\cos\psi_1)}\, e^{-j\,k\ell(1-\cos\psi_2)} \cdot \left(1 - R_v\, e^{-2j\,k\,h\sin\theta}\right) \cdot$$

$$\sin\theta \sin\varphi \sin\gamma \cdot \frac{\sin(k\ell(1-\cos\psi_1)/2)}{1-\cos\psi_1} \cdot \frac{\sin(k\ell(1-\cos\psi_2)/2)}{1-\cos\psi_2}$$

$$E_{\varphi} = -240\,j\,I \frac{e^{-j\,k\,r}}{r} e^{-j\,k\ell(1-\cos\psi_1)}\, e^{-j\,k\ell(1-\cos\psi_2)} \cdot \left(1 + R_h\, e^{-2j\,k\,h\sin\theta}\right) \cdot$$

$$\sin\gamma(\cos\varphi - \cos\gamma\cos\theta) \cdot \frac{\sin(k\ell(1-\cos\psi_1)/2)}{1-\cos\psi_1} \cdot \frac{\sin(k\ell(1-\cos\psi_2)/2)}{1-\cos\psi_2}$$

في حالة ظروف الإشعاع في الفضاء الحر ($R_v = R_h = 0$)، يعطي الجدول 1 قيماً للزاوية الداخلية المثلى بدلالة l/λ.

الجدول 1

القيم المثلى لنصف الزاوية الداخلية المنفرجة γ بدلالة الطول في جانب المعين l / λ (طول الموجة)

l / λ	γ_{opt} (بالدرجات)
2	51,5
	58,6
4	62,9
5	65,8
6	67,9
7	69,5

تجدر ملاحظة أن كسب الاتجاهية بطبيعته وكما هو محسوب لا يأخذ في الاعتبار القدرة المبددة في المقاومة الانتهائية.

على الرغم من أن إجراء الحساب يعالج حالة هوائي معيني أفقي وحيد، يتم أحياناً تكويم هوائيين معينين. في هذه الحالة، يكون الكسب الإجمالي حوالي 1 أو 2 dB أكبر من معيني وحيد؛ ويقارب مخطط الإشعاع السمتي مخطط معيني وحيد ويبين مخطط الإشعاع العمودي فتحة حزمة مقلصة بعض الشيء.

7 الهوائيات أحادية الأقطاب العمودية

قليلاً ما تُستعمل الهوائيات أحادية الأقطاب في الإرسال الإذاعي HF نظراً لكسبها المنخفض وخصائصها غير الاتجاهية. وينحصر تطبيقها الرئيسي في الإذاعة شاملة الاتجاهات قصيرة المدى حيث القيود الاقتصادية و/أو الموقعية لا تسمح بتركيب بنى مشعة أحسن أداء.

1.7 اعتبارات عامة

يُعتبر أن الهوائي أحادي الأقطاب العمودي يتكون من عنصر مشع عمودي رقيق جداً، قصير كهربائياً (أقل من نصف موجة)، منصوب على مستوٍ عاكس.

للحصول على إشعاع فعال من الهوائي، إذا كان منصوباً على أرض ضعيفة الانعكاس، يجب استعمال نظام أرض يتكون عادة من عدد من الأسلاك نصف قطرية. ولأغراض حساب مخططات الإشعاع، يفترض غالباً أن قدرة الدخل تطبق على أساس الهوائي.

يوفر الهوائي أحادي الأقطاب العمودي مخططاً شامل الاتجاهات على المستوي السمتي، غير أن المخطط العمودي المصاحب يكون دائماً متأثراً كثيراً بالثوابت الأرضية وكذلك بالمعلمات المادية الأخرى، مثلاً ارتفاع الهوائي الكهربائي، إلخ.

إن وجود نظام أرض لا يؤثر بصورة ملحوظة في القالب الهندسي للمخطط، لكنه يؤثر كثيراً في قيمة الكسب المطلق.

سوف تتم دراسة الهوائيات أحادية الأقطاب العمودية في ظرفين أساسيين:

- فوق أرض منبسطة متجانسة غير مثالية، مع أخذ انعكاس الأرض فقط في الحسبان؛
- فوق أرض منبسطة متجانسة غير مثالية مع نظام أرض يتكون إما من قرص دائري ذي توصيلية لا متناهية، أو من عدد من الأسلاك نصف القطرية ذات طول وقطر معينين.

2.7 تسمية الهوائيات أحادية الأقطاب العمودية

تسمية النمط: VM h / a_s / N / d

حيث (انظر الشكل 41):

VM: هوائي أحادي الأقطاب عمودي

h: ارتفاع الهوائي أحادي الأقطاب (m)

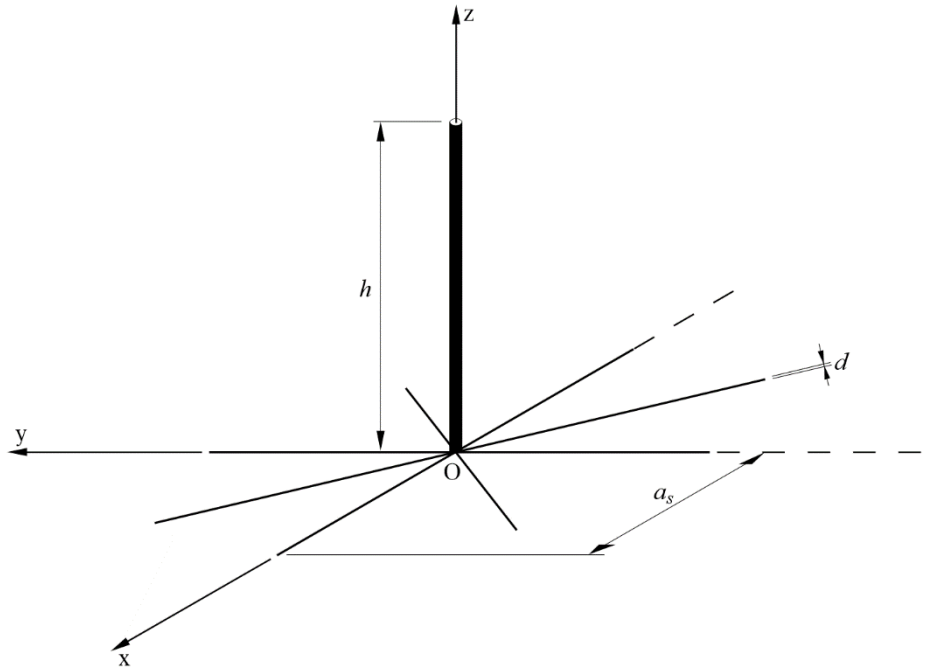
a_s: نصف قطر نظام الأرض (m)

N: عدد الأسلاك نصف القطرية في نظام الأرض

d: قطر الأسلاك نصف القطرية (mm).

الشكل 41

تسمية الهوائيات أحادية الأقطاب العمودية



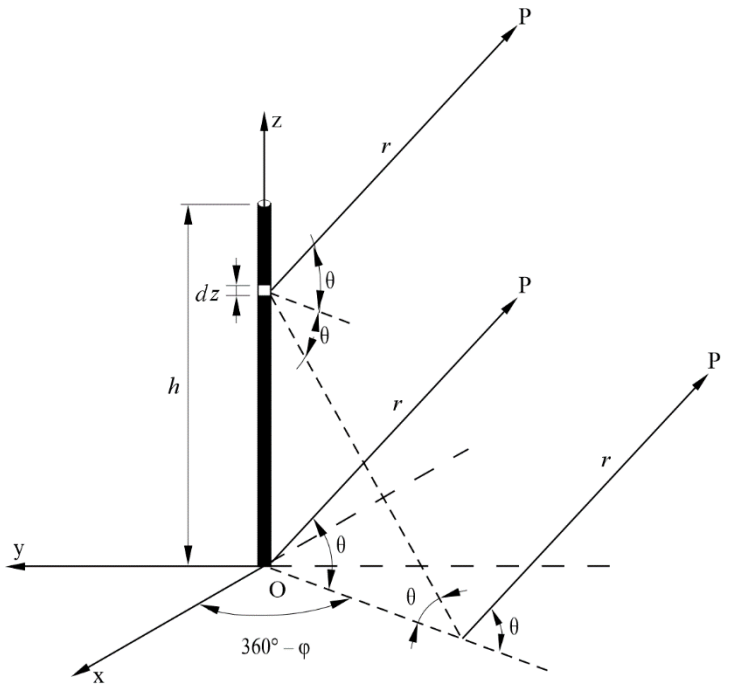
BS.0705-41

3.7 هوائي أحادي الأقطاب دون نظام أرض

بالرجوع إلى الشكل 42، يوضع الهوائي أحادي الأقطاب ذو ارتفاع h، افتراضياً، على أرض منبسطة متجانسة غير مثالية ذات توصيلية σ، ونفوذية مغنطيسية μ، وثابتة عازل كهربائي ε.

الشكل 42

هوائي أحادي الأقطاب دون نظام أرض على أرض غير مثالية



BS.0705-42

إن العبارة العامة لمكونات المجال الكهربائي هي:

$$E_\theta^0 = \mathrm{j}\,\frac{30\,k}{r}\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,k\,r}\,\cos\theta\int_0^h I(z)\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\,k\,z\sin\theta}\cdot\left[1 + R_v\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,k\,z\sin\theta}\right]\mathrm{d}z$$

$$E_\varphi = 0$$

حيث:

E_θ^0: المجال الكهربائي المشع دون نظام الأرض.

إذا كان القسم الأفقي للهوائي أحادي الأقطاب العمودي صغيراً جداً بالنسبة لارتفاعه، يمكن افتراض أن توزيع التيار جيبي.

مع هذا الافتراض فإن الحد الصحيح للمعادلة السابقة يمكن أن يُحسب بسهولة وتصبح المعادلة التي تنتج عنه:

$$E_\theta^0 = \mathrm{j}\,30\,I\,\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,k\,r}}{r}\cdot\frac{A_2 + \mathrm{j}\,B_2 + R_v\,(A_2 - \mathrm{j}\,B_2)}{\cos\theta} = \mathrm{j}\,30\,I\,\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,k\,r}}{r}\cdot f_\theta^0 \qquad (19)$$

حيث:

$$A_2 = \cos(k\,h\sin\theta) - \cos k\,h$$

$$B_2 = \sin(k\,h\sin\theta) - \sin\theta\sin k\,h$$

R_v: معامل الانعكاس للموجات المستقطبة عمودياً.

يعبر عن دالة مخطط الإشعاع في المستوي العمودي بالحد الثاني للمعادلة التالية. في حالة أرض موصلة تماماً، $R_V = 1$، يصبح المجال الكهربائي:

$$E_\theta^\infty = \mathrm{j}\,60\,I\,\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,k\,r}}{r}\cdot\frac{\cos(k\,h\sin\theta)\;-\;\cos k\,h}{\cos\theta} = \mathrm{j}\,60\,I\,\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,k\,r}}{r}\cdot f_\theta^\infty \tag{20}$$

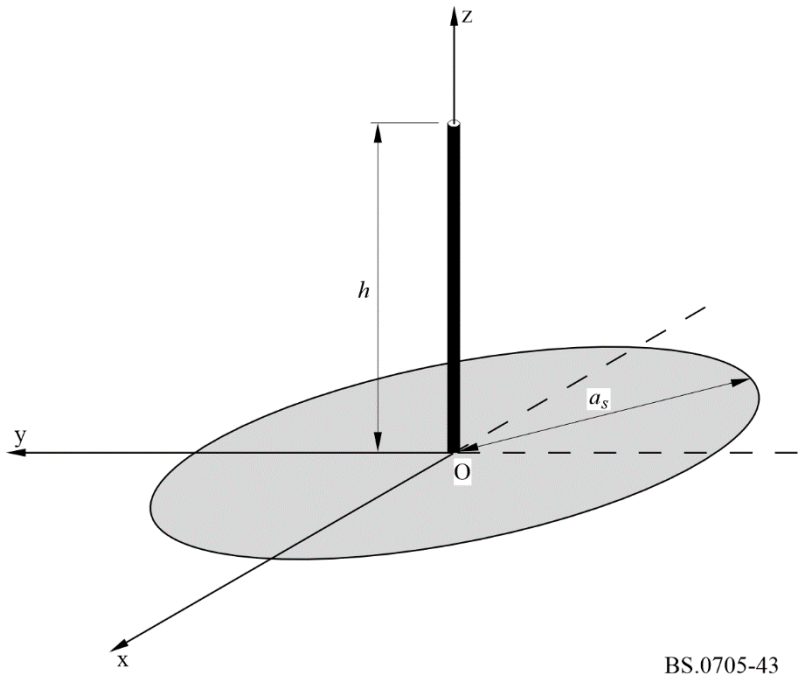
4.7 الهوائيات أحادية الأقطاب بنظام أرض

1.4.7 الهوائيات أحادية الأقطاب بنظام أرض المكونة من قرص دائري صلب بتوصيلية لا متناهية

يمثل نظام الأرض المدروس في هذا القسم بالمخطط الإجمالي الوارد في الشكل 43.

الشكل 43

هوائي أحادي الأقطاب عمودي بنظام أرض مكون من قرص دائري بتوصيلية لا متناهية



يمكن التعبير عن المجال الكهربائي E_θ في هذه الظروف على النحو التالي:

$$E_\theta \simeq E_\theta^0 + \Delta E_\theta = E_\theta^0\left[1 + \frac{\Delta E_\theta}{E_\theta^0}\right] \tag{21}$$

حيث:

E_θ^0: المجال الكهربائي المشع دون نظام الأرض كما تعطيه المعادلة (19)

ΔE_θ: تغير المجال الكهربائي الناتج عن وجود نظام الأرض.

وفقاً لخاصية التعويض، يمكن كتابة المجال الكهربائي على النحو التالي:

$$E_\theta \simeq E_\theta^0\cdot\left[1 - k\cdot\eta_g\cdot\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,k\,r}}{r}\cdot\frac{1}{E_\theta^\infty}\int_{\rho=0}^{a_s} H_\varphi^\infty(\rho, 0)\cdot \mathrm{J}_1(k\,\rho\cos\theta)\,\rho\cdot\mathrm{d}\rho\right] \tag{22}$$

حيث:

k: $2\pi / \lambda$، ثابتة الطور في ظروف الفضاء الحر

λ: طول الموجة في ظروف الفضاء الحر

a_s: نصف قطر نظام الأرض

η_g: معاوقة سطح الأرض

${}^{\infty}_{\theta}E$: المجال الكهربائي المشع في حالة أرض موصلة تماماً

$H^{\infty}_{\varphi}(\rho, 0)$: المجال المغنطيسي معبراً عنه بإحداثيات أسطوانية (ρ, φ, z) مشعة في حالة أرض موصلة تماماً، غير متغيرة مع φ، ومحسوبة عند $z = 0$

J_1: دالة بيسيل من النوع الأول.

في حالة توزيع تيار جيبي، يمكن التعبير عن المجال المغنطيسي $H^{\infty}_{\varphi}(\rho, 0)$ على النحو التالي:

$$H^{\infty}_{\varphi}(\rho, 0) = \frac{j I}{2\pi \rho} \cdot \left[e^{-j k [\rho^2 + h^2]^{1/2}} - e^{-j k \rho} \cos k h \right] \tag{23}$$

حيث I تمثل تيار عروة الهوائي.

إذا أدخلنا في المعادلة (22) الصيغ التي سبق تحديدها في المعادلتين (19) و(20) للمجالين الكهربائي والمغنطيسي، نحصل على الصيغة التالية:

$$E_{\theta} \simeq j\, 30\, I \frac{e^{-j k r}}{r} \cdot f^{0}_{\theta} \left\{ 1 - \frac{\eta_g \cdot k}{\eta_0 \cdot f^{\infty}_{\theta}} \int_{\rho=0}^{a_s} \left[e^{-j k [\rho^2 + h^2]^{1/2}} - e^{-j k \rho} \cos k h \right] \cdot J_1 (k \rho \cos \theta)\, d\rho \right\}$$

حيث العبارة النهائية لدالة مخطط الإشعاع العمودي تُعطى بواسطة:

$$f_{\theta} = f^{0}_{\theta} \left\{ 1 - \frac{k \cdot \eta_g}{\eta_0} \cdot \frac{1}{f^{\infty}_{\theta}} \int_{\rho=0}^{a_s} \left[e^{-j k [\rho^2 + h^2]^{1/2}} - e^{-j k \rho} \cos k h \right] \cdot J_1 (k \rho \cos \theta)\, d\rho \right\}$$

حيث $\eta_0 = 120\, \pi\ (\Omega)$، المعاوقة الملازمة في الفضاء الحر.

لتحديد مخطط الهوائي، فإن معامل العبارة السابقة وحده يجب أن يُحسب. يجب الملاحظة أن التكامل المبين لا يمكن أن يُحسب إلا بالطرائق الرقمية.

2.4.7 الهوائي أحادي الأقطاب بنظام أرض يتكون من عدد من الأسلاك نصف القطرية ذات طول وقطر معينين

يمثل نظام الأرض المدروس في هذا القسم بالمخطط الإجمالي الوارد في الشكل 44.

يمكن مرة أخرى التعبير عن المجال الكهربائي E_{θ} (انظر المعادلة (21)) على النحو التالي:

$$E_{\theta} \simeq E^{0}_{\theta} + \Delta E_{\theta} = E^{0}_{\theta} \left[1 + \frac{\Delta E_{\theta}}{E^{0}_{\theta}} \right]$$

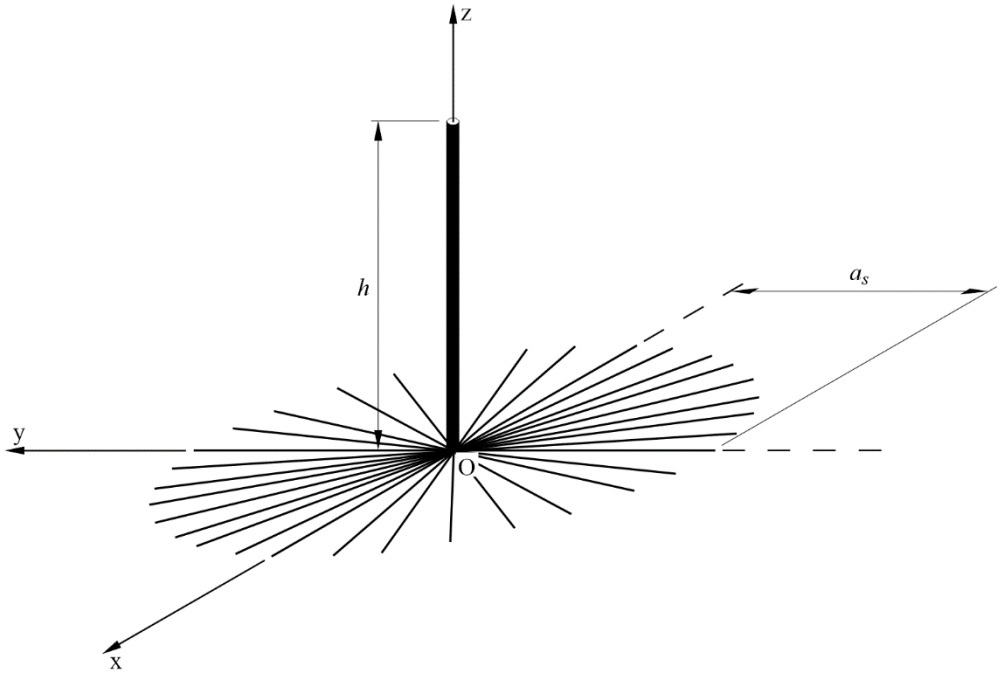
حيث:

${}^{0}_{\theta}E$: مجال كهربائي مشع دون نظام الأرض

ΔE_θ: تغير المجال الكهربائي الناتج عن وجود نظام الأرض.

الشكل 44

هوائي أحادي الأقطاب عمودي بنظام أرض يتكون من أسلاك نصف قطرية



BS.0705-44

وفقاً لخاصية التعويض، يمكن كتابة العبارة السابقة على النحو التالي:

$$E_\theta = E_\theta^0 \cdot \left[1 - \frac{e^{-j\,k\,r}}{r} \cdot \frac{k}{E_\theta^\infty} \int_{\rho=0}^{a_s} W'(k, \rho) \left(\eta_g - \eta_\rho(\rho) \right) \cdot H_\varphi^\infty(\rho, 0) \cdot J_1(k\,\rho \cos\theta)\, \rho\, d\rho \right] \quad (24)$$

حيث:

$W'(k\,\rho)$: دالة التوهين لموجة الأرض

$k = 2\pi/\lambda$: ثابتة الطور في ظروف الانتشار في الفضاء الحر

λ: طول الموجة في الفضاء الحر

a_s: نصف قطر نظام الأرض

η_g: معاوقة سطح الأرض

η_ρ: معاوقة ناتجة عن موازاة η_g و η_w

E_θ^∞: المجال الكهربائي المشع في حالة أرض موصلة تماماً

$H_\varphi^\infty(\rho, 0)$: المجال المغنطيسي معبراً عنه بإحداثيات أسطوانية (ρ, φ, z) مشعة في حالة أرض موصلة تماماً، غير متغيرة مع φ، ومحسوبة عند $z = 0$

J_1: دالة بيسيل من النوع الأول.

بافتراض توزيع تيار جيبي فإن عبارة $H_\varphi^\infty(\rho, 0)$ تُعطى بالمعادلة (23).

إن التقييم الدقيق لـ $W'(k, \rho)$ صعب، غير أنه عند المسافات ذات الأهمية يقارب قيمة الوحدة وطور صفر. تُفترض هذه المقاربة بتطوير العبارات التالية.

يتم الحصول على المعاوقة η_ρ بوضع مرادة سطح نظام الأرض η_w بالتوازي مع معاوقة سطح الأرض η_g، المعبر عنها على التوالي في:

$$\eta_w = j\,\eta_0 \frac{2\pi\rho}{N\lambda} \log_e\left(\frac{2\rho}{N d}\right)$$

حيث:

ρ: المسافة نصف القطرية

N: عدد الأسلاك

d: قطر السلك

و

$$\eta_g = \frac{\eta_0}{\varepsilon_{rc}} (\varepsilon_{rc} - 1)^{1/2}$$

حيث

ε_{rc}: ثابتة العازل الكهربائي النسبي المعقد للأرض.

بإدخال الصيغ (19) و (20) في المعادلة (24)، يمكن كتابة:

$$E_\theta \simeq J\,30\,I \frac{e^{-j k r}}{r} \cdot f_\theta^0 \left\{1 - \frac{k}{f_\theta^\infty} \int_{\rho=0}^{a_s} \frac{\eta_g - \eta_\rho(\rho)}{\eta_0} \cdot \left[e^{-j k \left[\rho^2 + h^2\right]^{1/2}} - e^{-j k \rho \cos k h}\right] \cdot J_1\left(k \rho \cos\theta\right) d\rho\right\}$$

ويكون لدالة الإشعاع العمودي العبارة التالية:

$$f_\theta = f_\theta^0 \left\{1 - \frac{k}{f_\theta^\infty} \int_{\rho=0}^{a_s} \frac{\eta_g - \eta_\rho(\rho)}{\eta_0} \cdot \left[e^{-j k \left[\rho^2 + h^2\right]^{1/2}} - e^{-j k \rho \cos k h}\right] \cdot J_1(k \rho \cos\theta)\, d\rho\right\}$$

لتحديد مخطط الهوائي، فإن معامل العبارة السابقة وحده يجب أن يُحسب. يجب ملاحظة أن التكامل المبين لا يمكن أن يُحسب إلا بالطرائق الرقمية.

8 هوائيات ياغي–يودا

1.8 اعتبارات عامة

هناك نمط خاص من الصفيفات الطفيلية هو صفيف ياغي–يودا، كما هو مبين في الشكل 45. ويُرتَّب عنصران أو أكثر باتجاه المحور الصادي على طول المحور السيني. والعنصر الثاني (في الموقع x_2) هو ثنائي أقطاب مُغذّى؛ أما جميع العناصر الأخرى فهي طفيلية وغالباً ما تكون قضباناً صلبة. ويكون طول العنصر الأول (في الموقع x_1) أكبر قليلاً من طول ثنائي الأقطاب المغذّى، ويعمل بمثابة "عاكس". وتكون أطوال العنصر الثالث والعناصر المتبقية بعد ثنائي الأقطاب المُغذّى (في المواقع x_3، ...، x_N)، في حال

وجودها، أقل قليلاً من طول ثنائي الأقطاب المغذّى، وتعمل بمثابة "موجّهات". ويوجّه العاكس والموجّهات الإشعاع على طول الاتجاه الموجب للمحور السيني. وتتراوح المباعدات النمطية بين العناصر من نحو 1/10 إلى 1/4 طول موجة، تبعاً للتصميم المحدد.

ويكون عرض نطاق هوائي ياغي–يودا، وهو مدى الترددات الذي يحافظ فيه الهوائي على كسبه ومعاوقة نقطة تغذيته – ضيقاً، إذ لا يتجاوز نسبة مئوية قليلة من التردد المركزي. وينخفض عرض النطاق في التصاميم ذات الكسب الأعلى، ما يجعله مثالياً للتطبيقات ذات التردد الثابت. ومع ذلك، يمكن لهوائي ياغي–يودا قابل للضبط في الفضاء الحر أن يحقق بفعالية مدى واسعاً من ترددات التشغيل عن طريق التمدد أو الانكماش الدينامي لعناصره.

وتصف الفقرات المتبقية من هذا القسم المتعلق بهوائيات ياغي–يودا خصائص الهوائيات المستقطبة أفقياً.

2.8 تسمية هوائيات ياغي–يودا

تسمية النمط: YU $N/x_1, x_2, \ldots, x_N/h/l_1, l_2, \ldots, l_N$

حيث:

YU: ياغي–يودا

N: عدد العناصر

$x_1, x_2, \ldots, x_N$: الموقع x للعناصر من 1 إلى N (المسافة من العاكس، x_1)

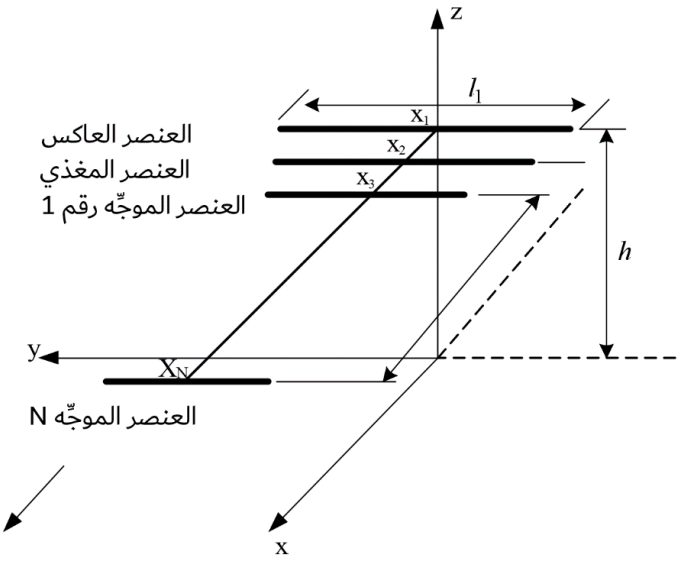
h: ارتفاع العناصر عن الأرض[4]

$l_1, l_2, \ldots, l_N$: أطوال العناصر من 1 إلى N.

ويجب أن تكون المسافات والأطوال والارتفاعات معبَّراً عنها بالوحدات نفسها. علماً أن $x_1, x_2, \ldots, x_N$ هي مسافات مقيسة من نقطة الأصل. وإذا كان العنصر العاكس في الموقع x_1 موجوداً في نقطة الأصل، فإن قيمة x_1 تكون صفراً.

الشكل 45

هوائي ياغي–يودا العام



BS.0705-45

[4] لا يُستخدم ارتفاع الهوائي في صيغة الكسب في الفضاء الحر الواردة هنا، ولكنه يُستخدم في برمجية المحاكاة "الشفرة الكهرمغنطيسية العددية" المستخدمة لاشتقاق المخططات التي تراعي تأثيرات الأرض.

3.8 حساب مخططات هوائيات ياغي–يودا

يُحسب الكسب المقيَّس للصفيف وفقاً للمرجع [1] باستخدام متجه تيار الدخل $\boldsymbol{V} = [V_1, V_2, \ldots, V_N]^T$، حيث $V_1 = V_3 = \cdots = V_N = 0$ وفقط $V_2 = 1$. وتُعطى التيارات على كل عنصر بالمعادلة $\boldsymbol{I} = \boldsymbol{Z}^{-1}\boldsymbol{V}$، حيث $\boldsymbol{Z}$ هي مصفوفة المعاوقة المتبادلة [2].

$$g(\theta, \phi) = \left| \sum_{p=1}^{N} I_p \frac{\cos(kh_p \cos\theta) - \cos kh_p}{\sin kh_p \sin\theta} e^{jkx_p \sin\theta \cos\phi} \right|^2 \quad (25)$$

حيث $\left(k = \frac{2\pi}{\lambda}\right)$ وh_p هو نصف الطول l_p للعنصر p.[5]

ويبين القسم 8 من المرفق 1 بالملحق 1 مثالاً على كسب الصفيف الناتج (مخطط الهوائي) لهوائي من هوائيات ياغي–يودا مستقطب أفقياً ذي ثلاثة عناصر باستخدام المعادلة (25). وفي العمليات المحاكاة أدناه، استُخدمت برمجية EZNEC Pro/2+ v.7.0.1 (64bit)[6] [3].

4.8 المراجع

[1] Orfanidis, S. J. (2016). Electromagnetic Waves and Antennas. United States: Sophocles J. Orfanidis.

[2] C. A. Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design,” 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.

[3] Antenna simulation tool: Online: https://www.eznec.com/

9 أمثلة عن المخططات

يتضمن المرفق 1 بهذا الملحق عدداً من أنماط الهوائيات التي تُعطى لها الأمثلة التالية عن المخططات:

- المخطط العمودي عند الكسب الأقصى،
- والمخطط الأفقي عند الكسب الأقصى،
- وإسقاط سانسون–فلامستيد لمخططات الإشعاع الأمامي والإشعاع الخلفي.

تُدرج كذلك مخططات لمختلف حالات نسبة التردد F_R وزاوية الإمالة s.

---

[5] المعادلة (1) هي المعادلة 9.4.22 في Orfanidis (2016)، مع $y_p = 0$.

[6] EZNEC هي صيغة متاحة للعموم من الشفرة الكهرمغنطيسية العددية (NEC) التي طورها مختبر Lawrence Livermore عام 1981. وللاطلاع على وصف كامل للمعادلات التي تستخدمها الشفرة لمراعاة تأثيرات الأرض، *انظر*: G. J. Burke & A.J. Poggio, NUMERICAL ELECTROMAGNETICS CODE (NEC) METHODS AND MOMENTS: PART II: PROGRAM DESCRIPTION (CODE) 37-61 (يناير، 1981)، المتاح على الرابط:
https://www.dim.uchile.cl/~lsaavedr/archivos/wifi/antenas/NEC/nec2prt1.pdf

الجزء 2
من الملحق 1

الجوانب العملية لهوائيات الإرسال على الموجات الديكامترية (HF)

1 مقدمة

إن مخططات إشعاع هوائيات الموجات الديكامترية الموضحة في الفقرة 8 من الجزء 1 من هذا الملحق هي مخططات نظرية مشتقة من نماذج رياضية. يجب ملاحظة أن هذه المخططات تقابل هوائيات مركبة على أرض منبسطة متجانسة ذات توصيلية متوسطة كما هو موصوف في الفقرة 3 من الجزء 1 من هذا الملحق.

غير أن صفائف الهوائيات وخطوط المغذيات هي أنظمة معقدة جداً ويمكن للإشعاع أن يتأثر بمعلمات متعددة لا يمكن دائماً تحديدها، مثلاً عيوب البناء والبيئة والحالة الحقيقية لظواهر الانعكاس. هذه المواضيع تناقش بمزيد من التفاصيل في الفقرات التالية.

لا يمكن تحديد مخطط الإشعاع الفعلي لهوائي ما عند موقع معين إلا بالقياس في الموقع.

2 قياس مخططات إشعاع الهوائيات

1.2 طريقة القياس

إن الطريقة المستخدمة لتحديد مخطط الإشعاع الفعلي لهوائي ما غالباً ما تكون بتجهيزات قياس محمولة جواً. يُركب مستقبل القياس على طائرة مروحية (نمط الطائرة المفضل لهذه القياسات) ويستقبل إرسالات من الهوائي قيد الاختبار. والعكس صحيح طبعاً. لكن يجب التذكر أنه قد تكون هناك حاجة إلى قدرة إرسال عالية نسبياً لضمان نسبة إشارة إلى الضوضاء كافية خاصة في أصفار المخطط.

من البديهي أن محاولة قياس الإشعاع باستعمال تجهيزات قياس قاعدتها الأرض لن تعطي المخطط الأفقي الحقيقي عند زاوية الارتفاع المقابلة للكسب الأقصى في المخطط العمودي.

2.2 الاعتبارات المتعلقة باستخدام طائرة مروحية للقياسات

عند قياس مخططات الإشعاع للهوائيات HF، يجب أن تُعتبر الانعكاسات على أنها أجزاء مكونة للفصوص المشعة. هكذا فإن مسافة القياس المثلى يجب أن تكون حلاً وسطاً بين الدقة الضرورية (حالة المجال البعيد) ووقت الطيران.

تُستعمل المعادلة التالية غالباً لحساب مسافة القياس الدنيا مع تفاوت كافٍ لحالة المجال البعيد:

$$d = 2h^2/\lambda$$

حيث:

d: مسافة القياس (m)

h: فتحة الهوائي (m) بما في ذلك مشعاع الصورة والمشعاع الطفيلي

λ: طول الموجة (m).

عملياً، غالباً ما تُستعمل مسافة قياس تبلغ 2 000 إلى 2 500 m. غير أنه يجب أخذ المحيط في الاعتبار بعناية. قد تكون هناك حاجة إلى مسافة أكبر إذا كانت هناك مرسلات أخرى عالية القدرة عند الموقع.

في العادة تتكون مجموعة من مخططات الإشعاع المقيسة لهوائي HF من مخطط إشعاع أفقي (HRP) واحد ومخطط إشعاع عمودي (VRP) واحد لكل حالة تشغيل للهوائي. يُقاس مخطط الإشعاع الأفقي عند زاوية الارتفاع للإشعاع الأقصى في الفص الرئيسي ويقاس مخطط الإشعاع العمودي كمقطع عرضي عبر الفص الرئيسي عند الإشعاع الأقصى.

تتوقف دقة النتائج على أداء تجهيزات قياس شدة المجال وموقعها في الطائرة المروحية. لذلك يجب اعتبار النقاط التالية بعناية:

- خصائص هوائي الاستقبال وتركيبه على الطائرة المروحية؛
- مستقبل الاختبار (جهاز قياس شدة المجال)، بما في ذلك الكبلات؛
- نظام تحديد الموقع لإعطاء الإحداثيات ثلاثية الأبعاد الحقيقية على الأقل والإرشاد للطيار.

لضمان الاعتمادية، يجب قياس مخطط الإشعاع الأفقي، على الأقل في الفص الرئيسي، في مناسبتين مختلفتين.

3.2 تجهيزات القياس

يمكن أن يتضمن نظام قياس لمخطط الإشعاع المكونات التالية:

- مستقبل اختبار مع:
  - مدى دينامي عالٍ؛
  - ملاءمة كهرمغنطيسية عالية (EMC)؛
  - متانة واستقرار كبيران (تذبذبات الطائرة المروحية وتغيرات درجة الحرارة)؛
- هوائي استقبال مركب بحيث أن تأثير الطائرة المروحية على مخطط مجال الهوائي يُخفض إلى حد أدنى. على سبيل المثال غالباً ما يُستعمل هوائي مغنطيسي مثل قضيب عروي أو حديدي مركب على الأقل 3 أمتار تحت الطائرة المروحية؛
- تسهيلات تحديد الموقع في الطائرة المروحية و/أو على الأرض. والطرائق شائعة الاستعمال هي إما التتبع أو الاستدلال باستعمال أنظمة الأرض أو الأنظمة الساتلية؛
- تسهيلات التحكم في المعطيات وتسجيلها ومعالجتها بوصل مختلف المكونات بباص معطيات.

مصدر إشارة له سوية قدرة خرج ثابتة ومعايرة. يمكن أن يكون هذا المصدر المرسل العادي.

يبين الشكلان 46 و47 مخططين رئيسيين مبسطين لنظامي قياس ذوي تجهيزات مختلفة لتحديد الموقع.

4.2 إجراءات القياس

قبل القيام بالقياسات، هناك حاجة إلى الإعداد بعناية. يجب مراقبة التجهيزات على متن الطائرة المروحية وكذلك على الأرض كما يجب التحقق من التشغيل السليم. ويجب ضبط مولد الإشارات أو المرسل العادي، أيهما استُعمِل لتغذية الهوائي قيد الاختبار، ومعايرة سوية قدرته. قد يكون من المفيد تشكيل الإرسال لتسهيل معرفته السمعية خلال القياسات.

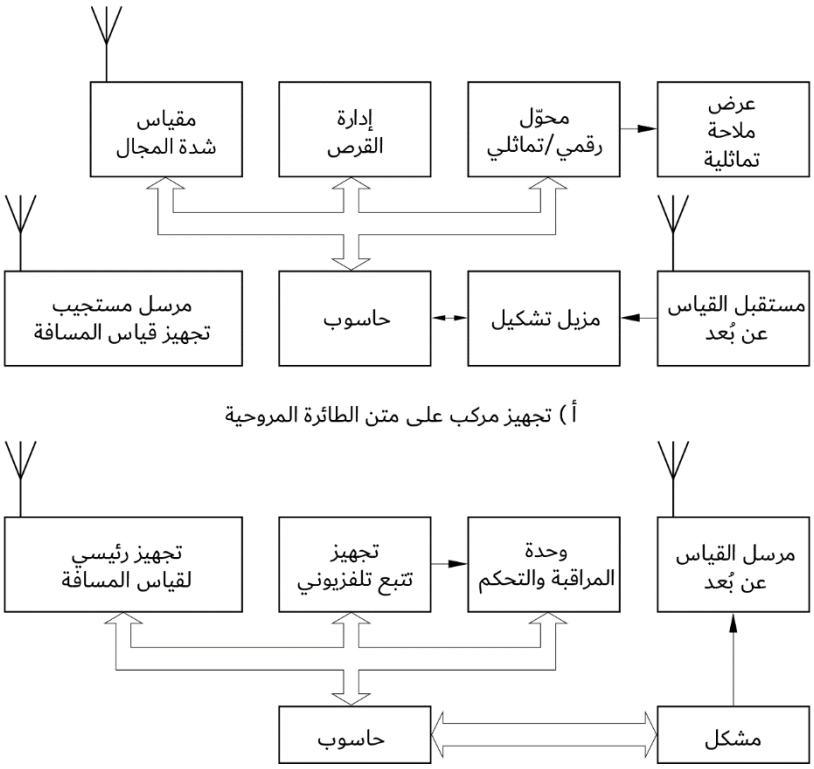
خلال رحلة القياس، على الطائرة المروحية أن تتبع طرقاً محددة مسبقاً، كما هو موصوف أدناه. تُسجل مسيرات الطيران الفعلية باستعمال الخرج من تجهيزات تحديد الموقع التي تعطي الموقع الفعلي للطائرة المروحية بالنسبة للهوائي قيد الاختبار. إن معلومة موقع الطائرة المروحية، المقدمة للطيار في الوقت الفعلي، تسمح بالاحتفاظ بمسار الطيران الصحيح للحصول على أحسن دقة.

مثالياً، يُقاس مخطط الإشعاع العمودي باتباع نصف دائرة فوق الهوائي بدءاً بسمت الإشعاع الأقصى مع أخذ عينات من شدة المجال. لكن بما أنه من الصعب على الطيار أن يبقي على مسير الطيران الدقيق هذا، قد تكون هناك حاجة إلى استعمال مسير طيران معدل. يمكن أن يكون مسير الطيران هذا تركيبة من الصعود العمودي عند موقع معروف وطيران اقتراب عند ارتفاع معروف كما هو مبين في الشكل 48. في هذا النمط من مسير الطيران من المهم الاحتفاظ بالموقع السمتي الصحيح للطائرة المروحية إذ إن الانحراف يمكن أن يفسد نتائج القياس.

تعطي نتائج القياس العمودي زاوية الارتفاع للإشعاع الأقصى (القيمة القصوى في الفص الرئيسي) الذي يجب أن يُقاس عنده مخطط الإشعاع الأفقي. عندئذ تطير الطائرة المروحية في شكل دائرة حول الهوائي عند نصف قطر ثابت عند ارتفاع يقابل زاوية الارتفاع هذه كما يبين ذلك الشكل 49.

الشكل 46

مخطط رئيسي مبسط لتجهيز قياس يستعمل التتبع لتحديد الموقع



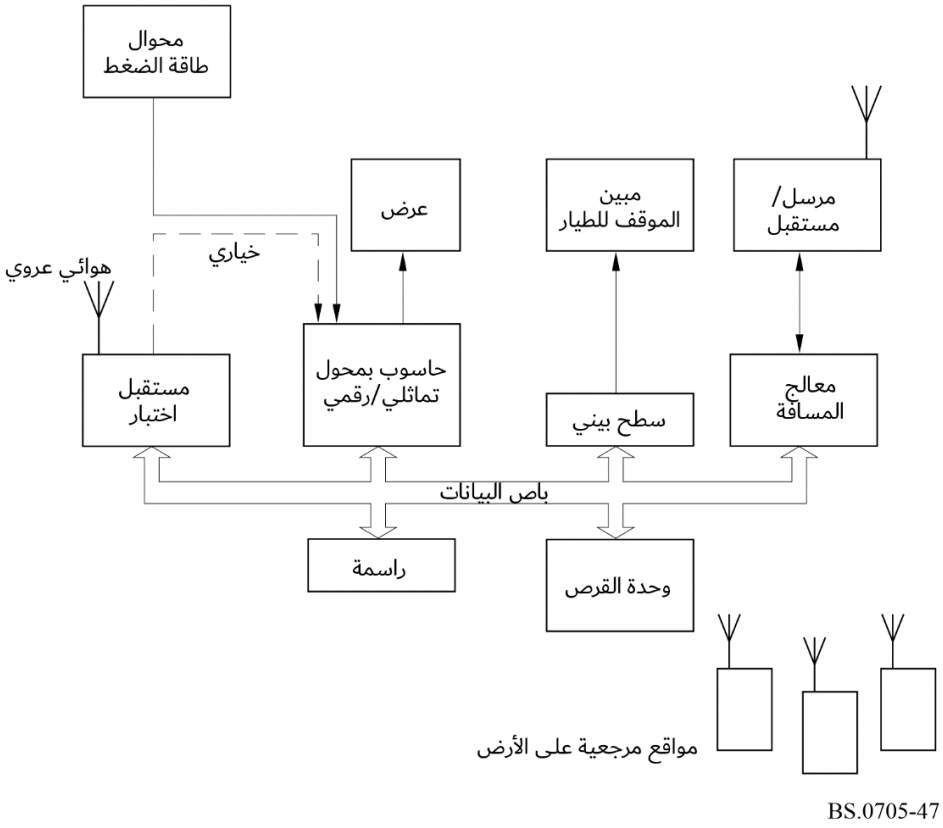
أ) تجهيز مركب على متن الطائرة المروحية

ب) تجهيز مركب على الأرض

BS.0705-46

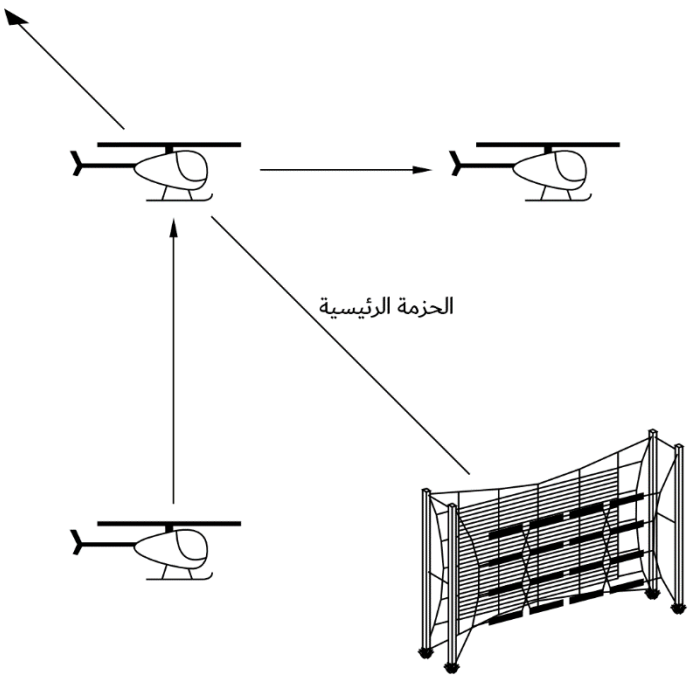
الشكل 47

مخطط رئيسي مبسط لتجهيز قياس يستعمل قياس المسافة على الأرض لتحديد الموقع



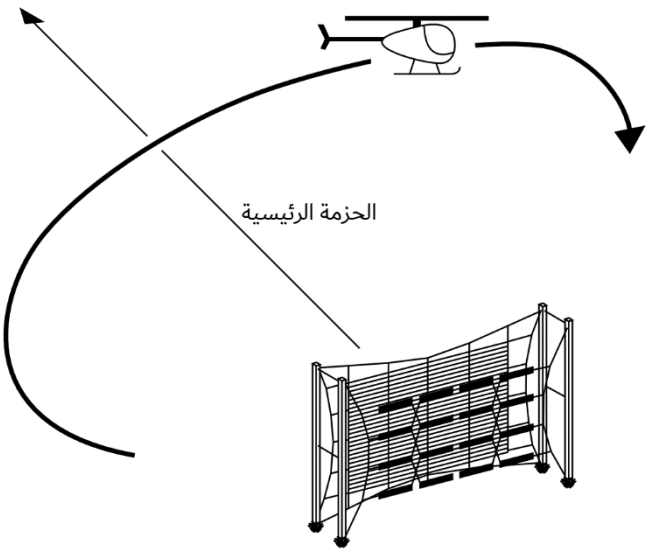
الشكل 48

مسير الطيران لقياس مخطط الإشعاع العمودي



الشكل 49

مسير الطيران لقياس مخطط الإشعاع الأفقي



من المهم لمسير الطيران هذا أن يُبقى على زاوية الارتفاع الصحيح بدقة لأن من الصعب تعويض أي انحراف.

إذا كانت القيم المقيسة، على شكل مخطط هوائي، معروضة للمشغل في الطائرة المروحية، يمكن التحقق من التشغيل الصحيح لنظام القياس خلال الطيران.

يجب أن يكون مستقبل الاختبار قادراً على القياس بأسلوب حساب المتوسط بحيث أن عينة وحيدة لسوية إشارة يمكن أن تتكون من متوسط يمتد على فترة محددة (100 ms مثلاً) لحذف تأثير التشكيل. يجب أن يكون طيران الطائرة المروحية ومقدرات نظام القياس بحيث أن النظام يخزن على الأقل عينتين لكل درجة في المستوي الأفقي وخمس عينات لكل درجة عمودية، مع معطيات موقعها المقابلة.

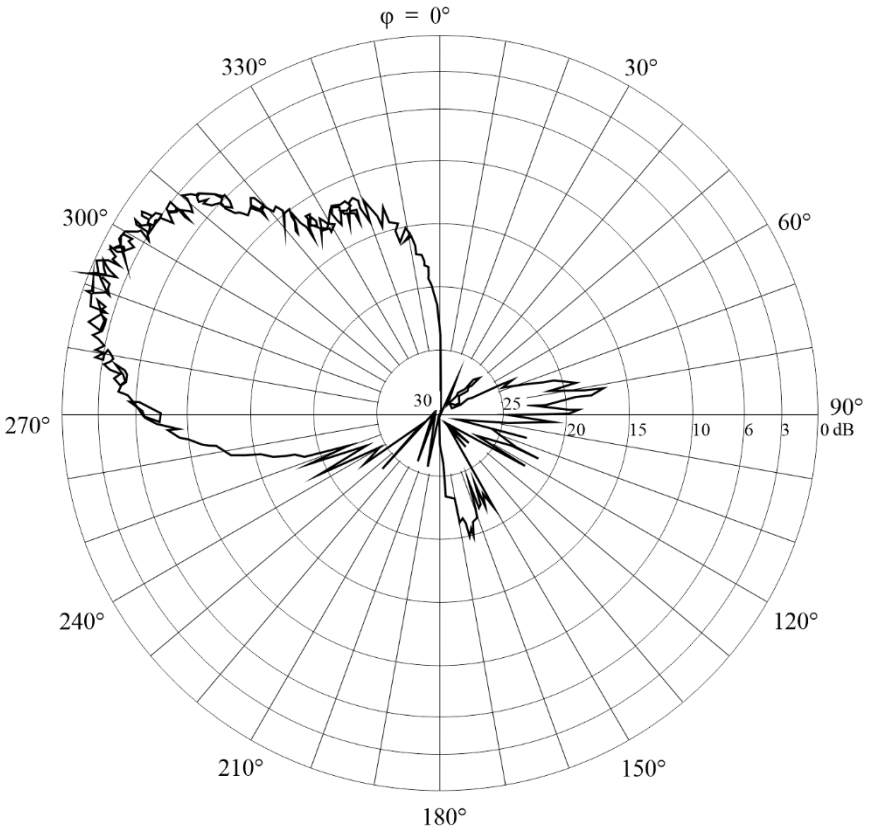
5.2 معالجة المعطيات المقيسة

خلال تحليل لاحق، يتم تحويل عينات سوية الإشارة إلى قيم شدة المجال عند مسافة مقيسة مع أخذ خصائص هوائي الاستقبال ومعلومات الموقع في الاعتبار. عند هذه المرحلة، يتعين استبعاد أي عينات خاطئة بالبداهة.

يتضمن التمثيل البياني المباشر لعينات شدة المجال المتبقية على العموم تموجات كما يبين ذلك الشكل 50.

الشكل 50

مخطط الإشعاع الأفقي باستعمال عينات شدة مجال صحيحة مجمعة خلال ثلاث رحلات كاملة حول الهوائي



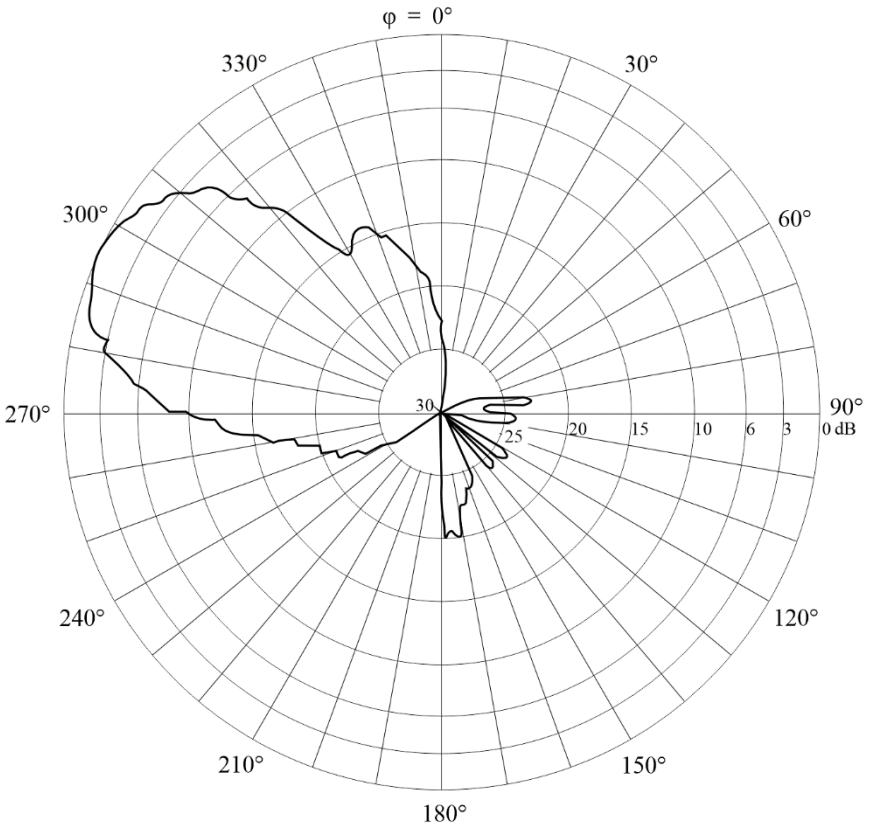
إذا كانت هناك حاجة إلى مخطط أملس، يجب معالجة المعطيات من جديد باستعمال وظيفة ترشيح. يبين الشكل 51 رسماً نهائياً يستعمل هذه القيم المرشحة. رُسم هذا الشكل في إحداثيات قطبية لوغاريتمية، مما يسمح بتفحص الفصوص الجانبية والقيم الدنيا. ويمكن استعمال مقاسات وسلالم أخرى.

يمكن اشتقاق كسب الهوائي في اتجاه الإشعاع الأقصى محسوباً مثل النسبة e.i.r.p./P_{in}، حيث P_{in} هي القدرة المغذاة للهوائي والقدرة e.i.r.p. تُشتق من شدة المجال المقيس والمسافة المقابلة.

يمكن تقييم كسب اتجاهية الهوائي انطلاقاً من قالب مخططات الإشعاع الأفقية والعمودية المقيسة بافتراض أن قالب مخطط الإشعاع العمودي مماثل لكل الاتجاهات السمتية.

الشكل 51

مخطط الإشعاع الأفقي النهائي بعد معطيات الترشيح والتدريج



BS.0705-51

3 مقارنة مخططات الإشعاع النظرية والمقيسة

تبين أنه من الصعب القيام بمقارنات ذات دلالة بين مخططات الإشعاع النظرية والمقيسة.

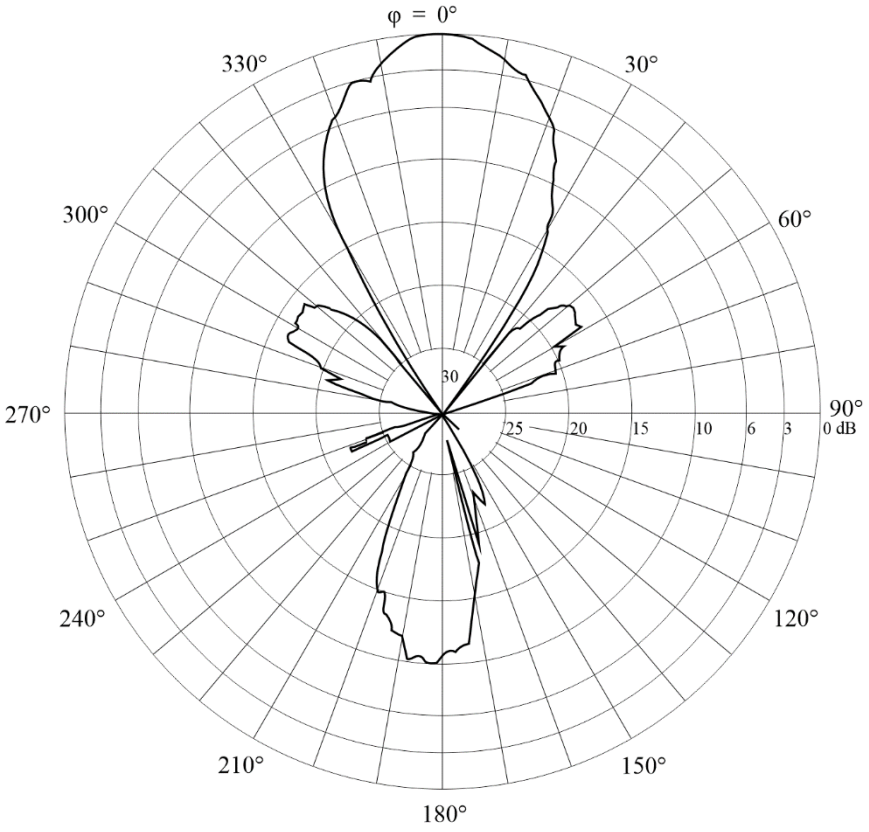
بينت قياسات على الهوائيات الستارية أن تغيرات الأداء هي نتيجة لعدة عوامل ليس من السهل عزلها.

يوضح ذلك في الأشكال 52a و52b و53a و53b التي تعطي مخططات الإشعاع المقيسة والنظرية في المستويين الأفقي والعمودي لهوائي ثنائي الأقطاب الأفقي من نمط HR 4/4/0,6 مجهز بشاشة عاكسة لا دورية.

على الرغم من أن فص الإشعاع الرئيسي له تقريباً نفس القالب، هناك اختلافات في عدد وقد وموقع الفصوص الجانبية.

الشكل 52A

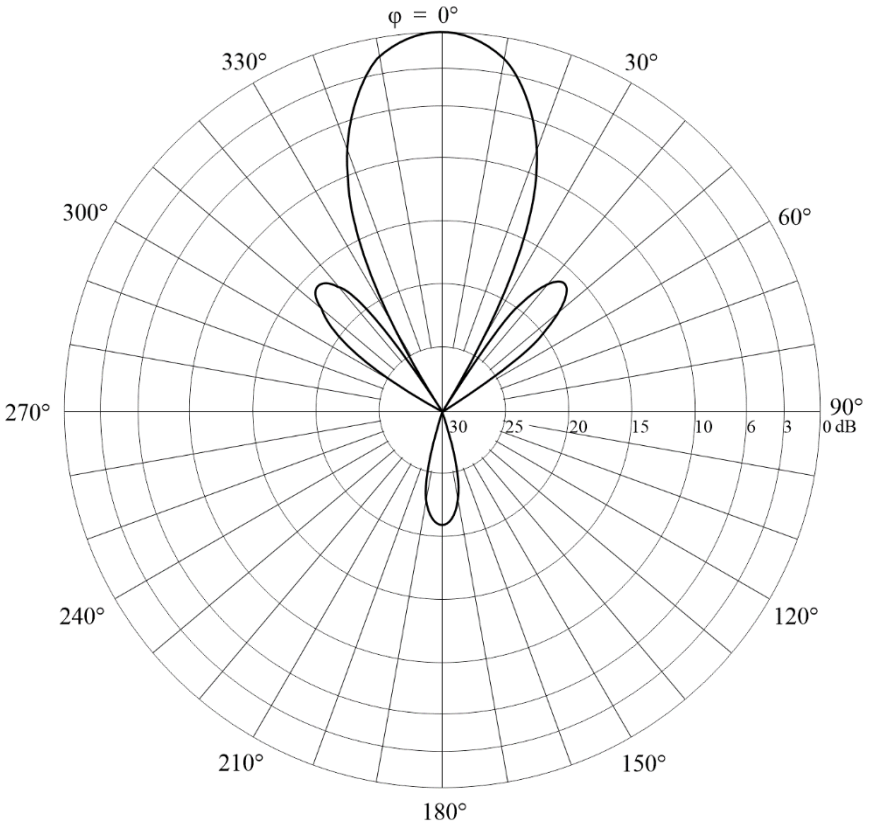
مخطط الإشعاع الأفقي مقيس لهوائي ثنائي أقطاب متعدد النطاقات ذي تغذية من المركز من نمط HR 4/4/0,6 بشاشة عاكسة لا دورية مقيسة عند F_R = 1,0



BS.0705-52a

الشكل 52B

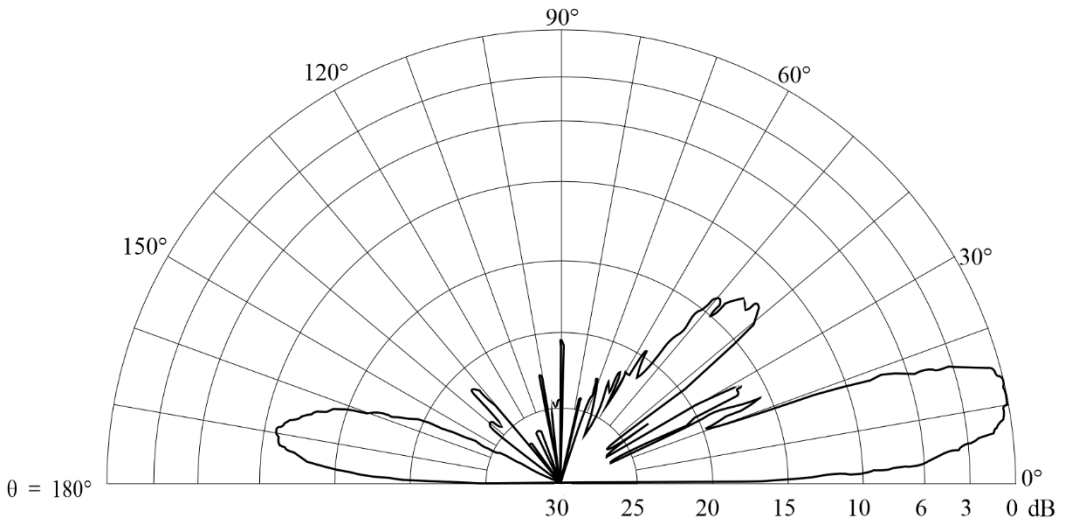
مخطط الإشعاع الأفقي النظري لهوائي الشكل 52a



BS.0705-52b

الشكل 53A

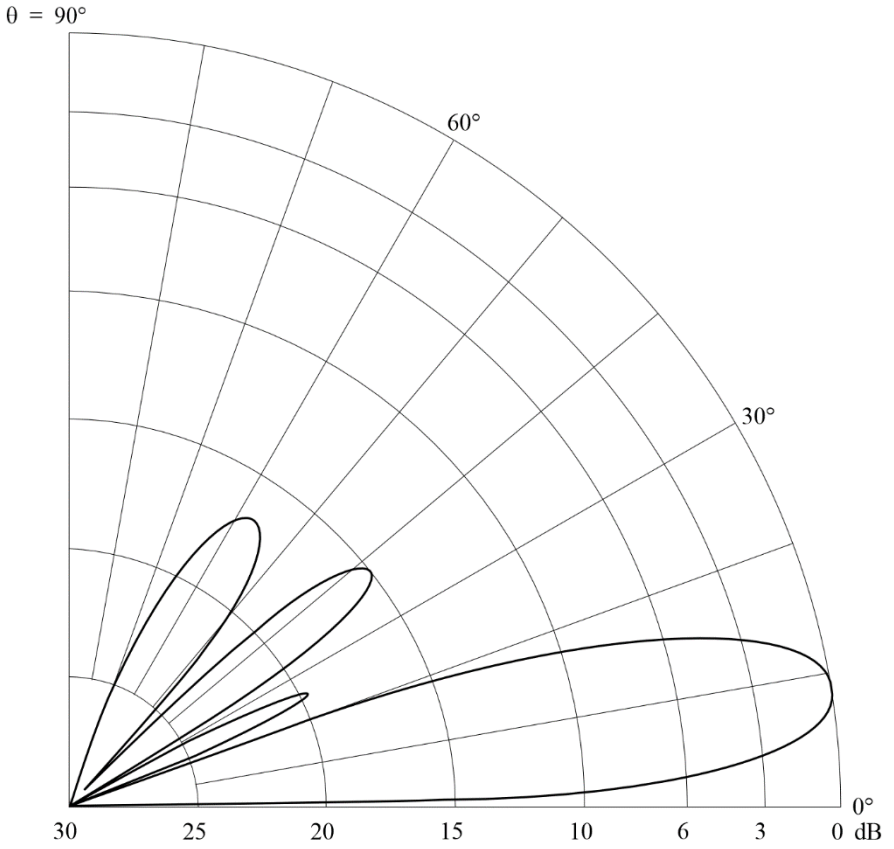
مخطط الإشعاع العمودي المقيس لهوائي الشكل 52a



BS.0705-53a

الشكل 53B

مخطط الإشعاع العمودي النظري لهوائي الشكل 52a

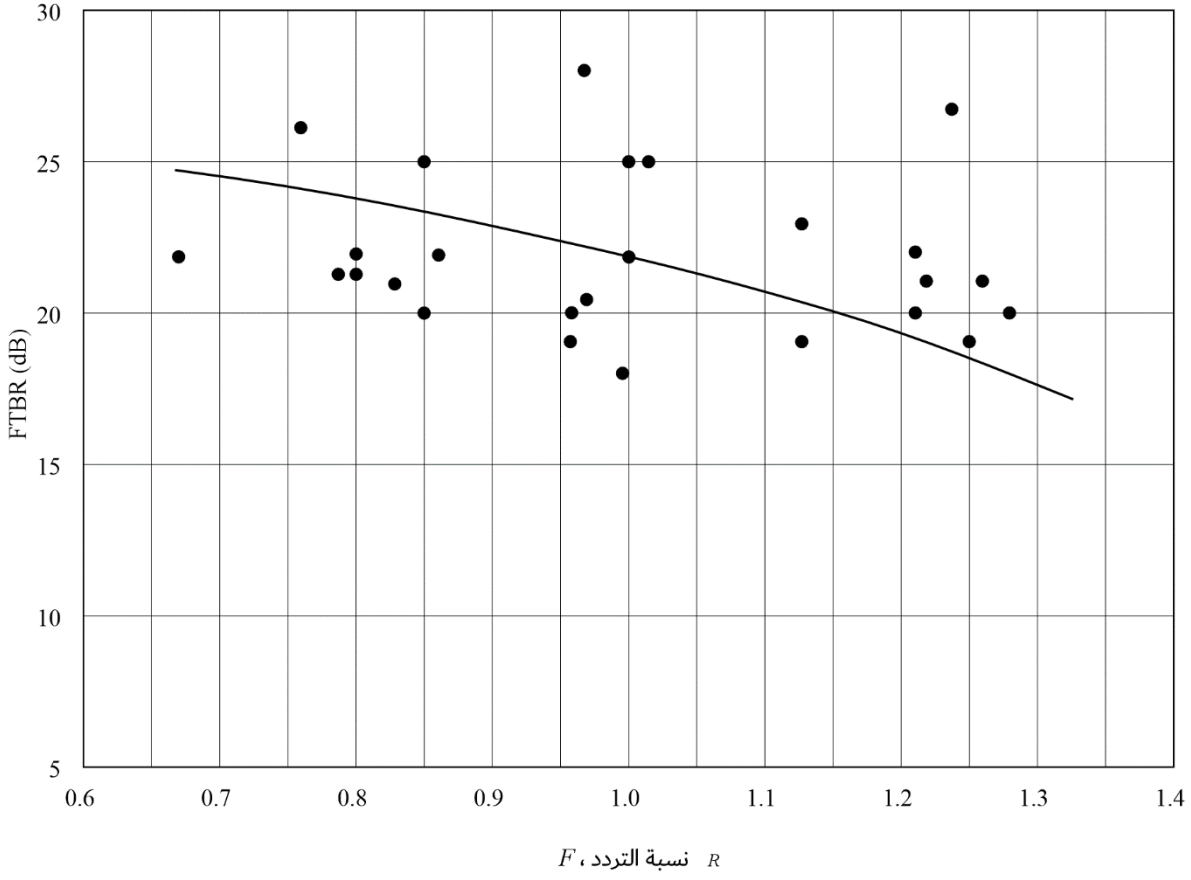


1.3 مقارنة نسب الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي النظرية والمقيسة

يبين الشكل 54 مقارنة بين قيم مقيسة ومحسوبة لنسب الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع الخلفي (FTBR) في حالة هوائي HR 4/4/1,0. يمثل الشكل 55 نفس المقارنة لأنماط هوائيات ستارية أخرى ومعلمات شاشات عاكسة مختلفة. في كلا هذين الشكلين، تقابل النسبة FTBR المحسوبة شاشة لا دورية تتكون من 50 سلكاً لكل طول موجة كما هو الحال في الشكل 23.

الشكل 54

قيم FTBR المقيسة والمحسوبة لهوائي HR 4/4/1,0



BS.0705-54

4 تأثير المحيط على مخططات الإشعاع

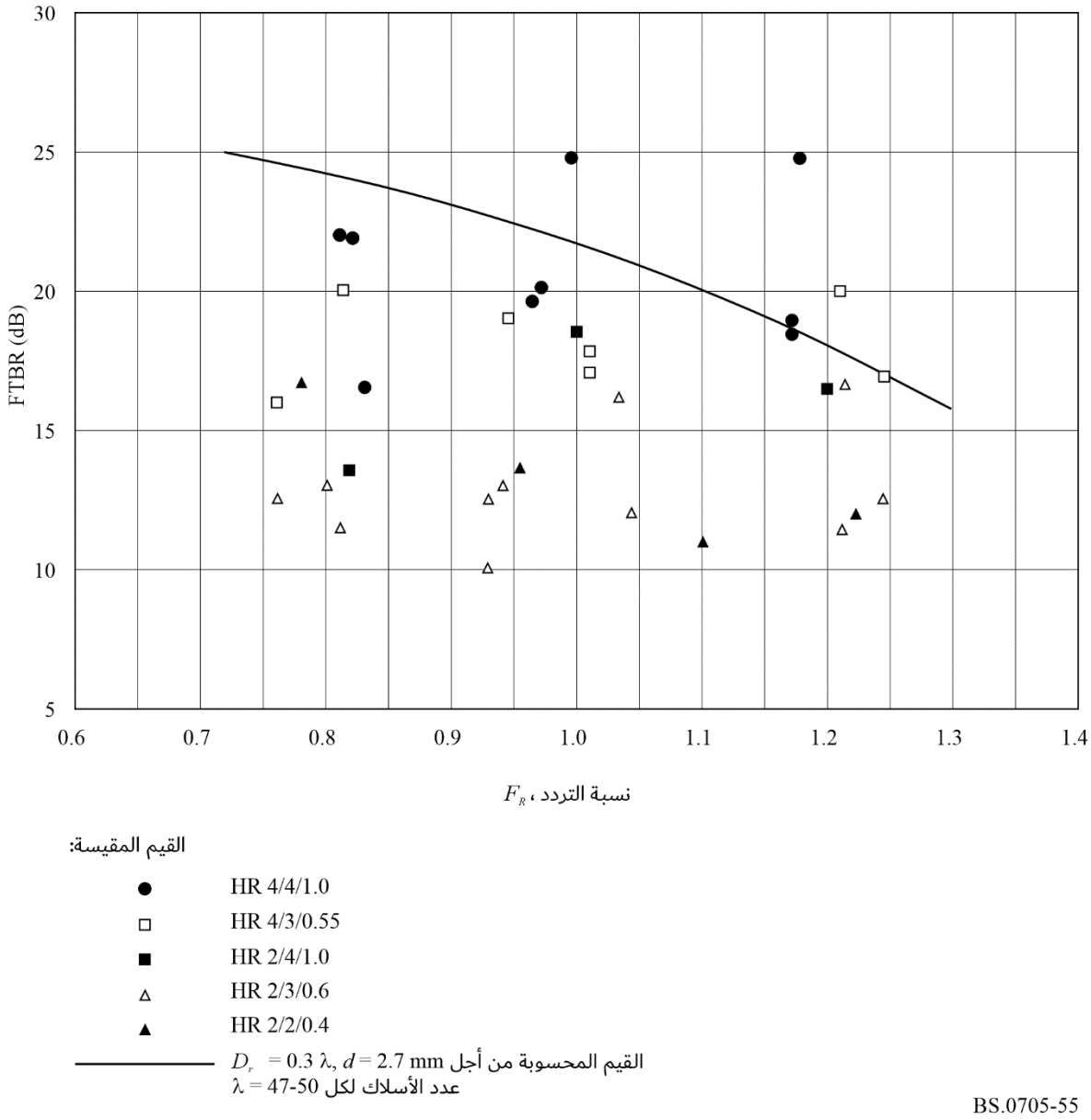
من المعروف أن للعوامل التالية تأثيراً على مخططات إشعاع الهوائي HF.

1.4 طوبوغرافيا الأرض

تقوم الأمثلة النظرية لمخططات الإشعاع المقدمة في الفقرة 9 من الجزء 1 من هذا الملحق على افتراض أن الهوائي مركب على أرض متجانسة منبسطة ذات توصيلية متوسطة. وكل اضطراب في خصائص الأرض (الميول، الهضاب، الأودية، إلخ.) سوف ينتج تيارات صورة تختلف في الموقع والقيمة عن تلك المستعملة في الحسابات. سيؤدي ذلك إلى مخطط إشعاع معدل. وقفاً على نمط الهوائي المستعمل، يمكن أن يُعدل مخطط الإشعاع بصورة ملموسة باضطرابات أرضية تقع حتى على بعد عدة كيلومترات عن الهوائي.

الشكل 55

قيم النسبة FTBR المقيسة والمحسوبة لمختلف أنماط الهوائيات



يوضح الشكل 56 أثر المظهر الجانبي غير المنتظم للأرض على المخطط VRP لهوائي من نمط HR 4/4/0,5.

تنحدر الأرض أمام الهوائي نحو وادٍ قبل الصعود ثانية كما هو مبين في الشكل 57.

في هذه الحالة تكون زاوية الارتفاع عند الكسب الأقصى أقل بكثير من الزاوية النظرية بافتراض أرض منبسطة أمام الهوائي.

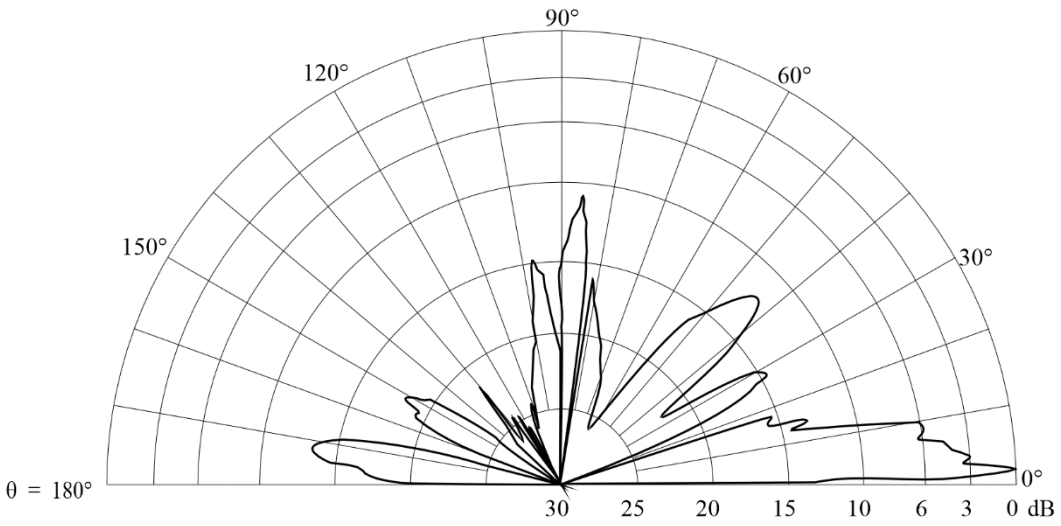
يجب كذلك ملاحظة أن العكس صحيح: إذا كانت الأرض أمام الهوائي ترتفع مع زيادة المسافة انطلاقاً من الهوائي، فإن زاوية الارتفاع تكون أكبر من الارتفاع النظري عند الكسب الأقصى.

2.4 توصيلية الأرض

تقوم مخططات الإشعاع المحسوبة على توصيلية أرض متوسطة. لكن هناك تغيرات في المخطط العمودي، خاصة للهوائيات المستقطبة عمودياً، إذا كانت التوصيلية الفعلية للأرض تختلف كثيراً عن القيم المتوسطة المفترضة.

الشكل 56

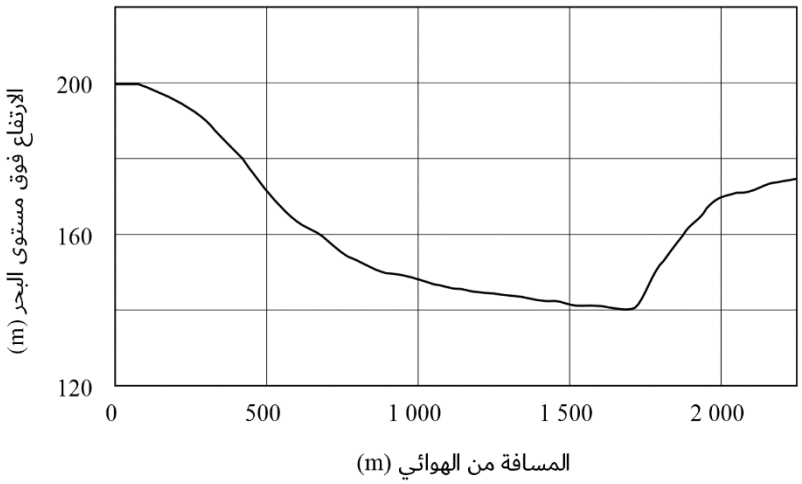
مخطط الإشعاع العمودي المقيس عند 21,56 MHz لهوائي HR 4/4/0,5
(مدى ترددات التشغيل: 11-21 MHz)، مغذى من المركز، بشاشة لا دورية، دون إمالة



BS.0705-56

الشكل 57

المظهر الجانبي للأرض أمام الهوائي HR 4/4/0,5



BS.0705-57

3.4 بنى محلية أخرى

إن الهوائيات HF ذات حجم كبير وتحتاج إلى بنى قوية لتحملها ومساحات واسعة من الأرض.

تحتاج كثير من مواقع الإرسال إلى عدد من الهوائيات لمواجهة مدى النطاقات والسموت المطلوبة لتغطية مدى المناطق المستهدفة خلال اليوم أو الفصل أو الدورة الشمسية.

من المعلوم أن العوامل التالية تؤثر سلباً على أداء إشعاع الهوائي:

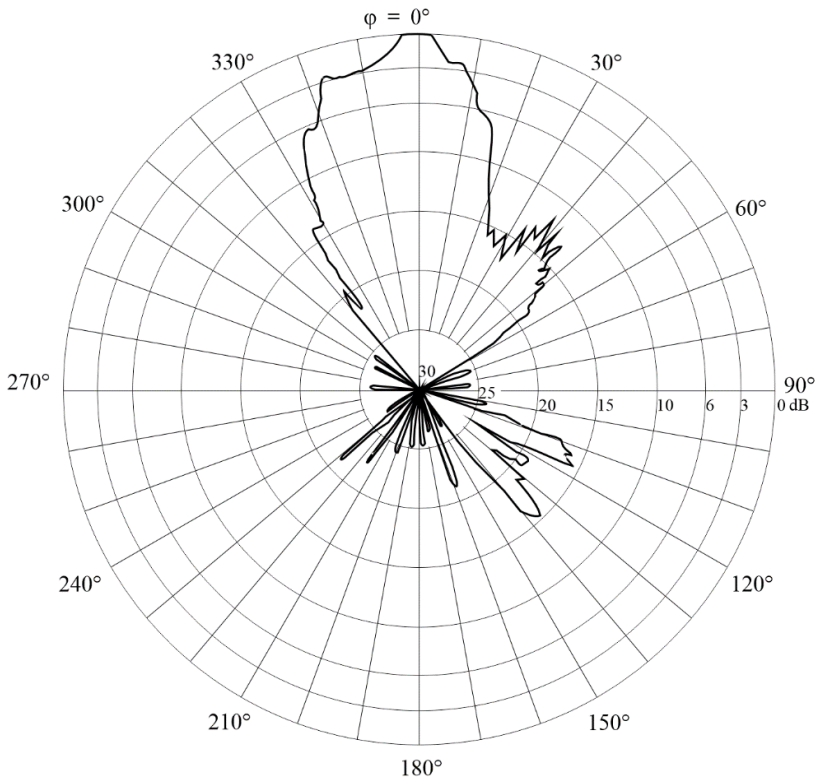
- اقتران الطاقة على الهوائيات المجاورة،
- أي عائق في الأرضية الأمامية للهوائي مثلاً:
  - المباني التي تحتوي على المرسل،
  - البنى العالية، مثلاً أبراج الكنائس،
  - سواري التوتر المرتفع،
  - وثاق الهوائي،
  - الأشجار،
  - خطوط التغذية.

في هذه الحالات الخاصة، يمكن أن يُغير الإشعاع الأمامي لهوائي ما لوجود هوائي آخر أو أكثر.

يوضح الشكل 58 أثر إعاقة بواسطة هوائيات أخرى تقع على بعد حوالي 600 m على المخطط HRP لهوائي HR 4/4/0,5. يبين الشكل 59 مخطط ترتيب الهوائيات. هناك اضطراب في مخطط الإشعاع الأفقي واختلافات ذات دلالة في قد وموقع الفصوص الجانبية بالمقارنة مع المخطط HRP النظري. إن مخطط الإشعاع العمودي كذلك يتأثر. وليست زاوية الارتفاع عند الكسب الأقصى فقط أعلى مما هو متوقع، لكن الفصوص الجانبية للمخطط VRP أيضاً أكبر اتساعاً.

الشكل 58

مخطط الإشعاع الأفقي مقيس عند 15,39 MHz لهوائي HR 4/4/0,5
(مدى ترددات التشغيل: 11-21 MHz)، مغذى من المركز، بشاشة لا دورية، زاوية الإمالة: –20°



BS.0705-58

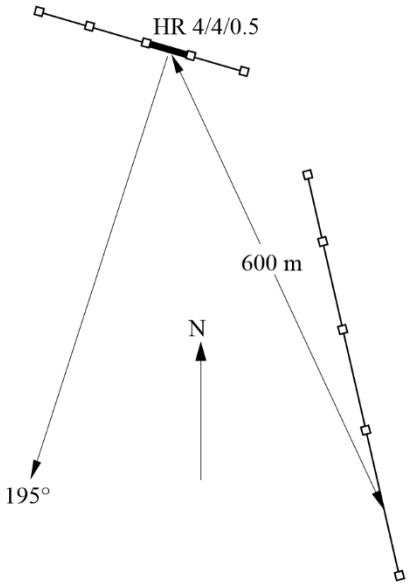
5 التغيرات في الأداء الفعلي للهوائيات

تبين أمثلة مخططات إشعاع الهوائيات HF المتضمنة في الفقرة 9 من الجزء 1 من هذا الملحق الأداء المحسوب للهوائيات ذات معايير التصميم المحددة في الجزء 1 من هذا الملحق.

إن التغيرات في الأداء الفعلي للهوائيات الحقيقية بالنسبة للحالة المثالية ناتجة عن المعلمات المادية والمعلمات الكهربائية التي اختارها المصنعون للحصول على تصميم اقتصادي.

الشكل 59

مخطط ترتيب الهوائيات



BS.0705-59

على سبيل المثال إن المصادر الرئيسية للتغير في أداء الهوائيات الستارية هي:

- مباعدة الأسلاك في الشاشة العاكسة،
- سماكة الأسلاك في الشاشة العاكسة،
- المباعدة بين الشاشة العاكسة وثنائيات الأقطاب،
- قد الشاشة العاكسة بالنسبة لقد صفيف ثنائيات الأقطاب،
- المباعدة بين ثنائيات الأقطاب أفقياً وعمودياً،
- التردد الاسمي للهوائي،
- السماكة الفعلية لثنائيات الأقطاب،
- الترتيب المادي للبنى الداعمة (مثلاً وثائق الهوائي، أسلاك التيار).

1.5 المخطط السمتي

يوضح الشكلان 60 و61 تغير أداء المخطط HRP الذي يمكن توقعه للهوائيات الاسمية HR 4/4/1,0 التي يزودها مختلف مصنعي الهوائيات والمشغلة عند مختلف مواقع الإرسال.

يبين الشكل 62 مخطط الإشعاع الأفقي النظري لهوائي HR 4/4/1,0 يستعمل المعلمات بالتغيب.

2.5 المخطط المائل

يجب كذلك ملاحظة أن مصممي الهوائيات يحصلون على إمالة هوائيات ثنائيات الأقطاب HF بطرائق متنوعة. على العموم تؤدي طريقة الإمالة المستعملة إلى كون زاوية الإمالة الفعلية أقل من تلك المحددة. يرد وصف ذلك في الجزء 1 من هذا الملحق، الفقرة 3.4.

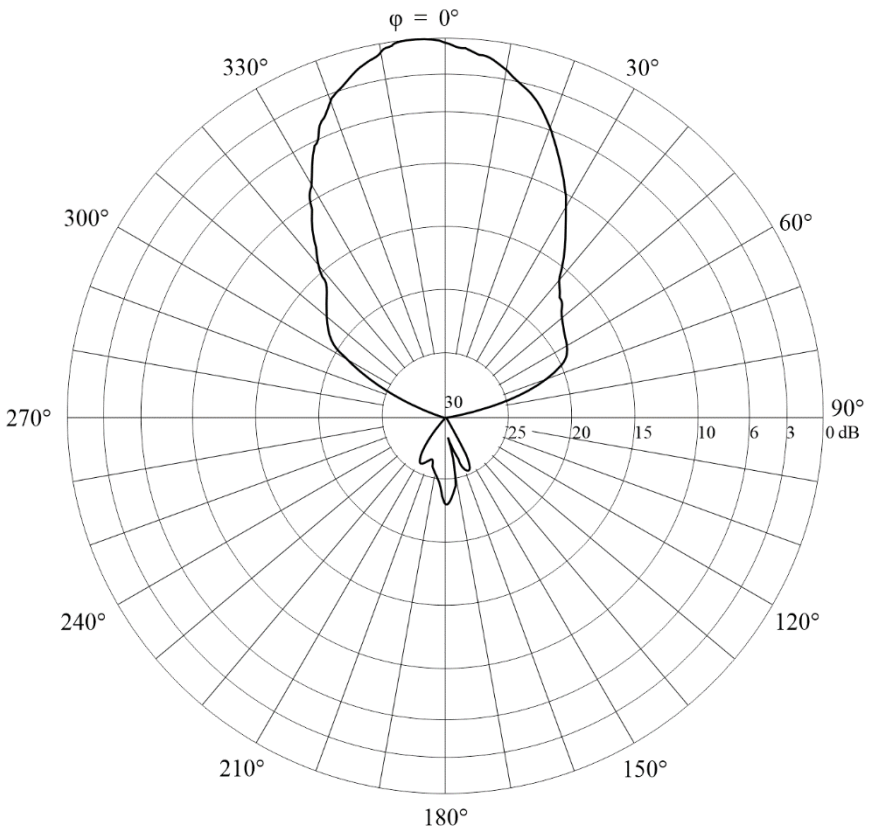
غير أن هذا الانخفاض يمكن أن يعوض في بعض تصميمات الهوائيات بحيث يتم في الواقع تحقيق زاوية الإمالة المحددة على مدى التردد الكامل للهوائي.

ويوضح ذلك في الشكلين 63 و64. إن الشكل 63 هو المخطط HRP المقيس لهوائي HRS 4/4/0,5 مائل أفقياً ذي زاوية إمالة اسمية تبلغ +25°. تكون الإمالة المحققة عملياً تقريباً +25° ويُحتفظ بها على مدى التردد الكامل للهوائي.

إن الشكل 64 هو المخطط HRP المقيس لهوائي HRS 4/4/1,0 مائل أفقياً ذي زاوية إمالة اسمية تبلغ +30°. تكون الإمالة المحققة عملياً تقريباً 25°.

الشكل 60

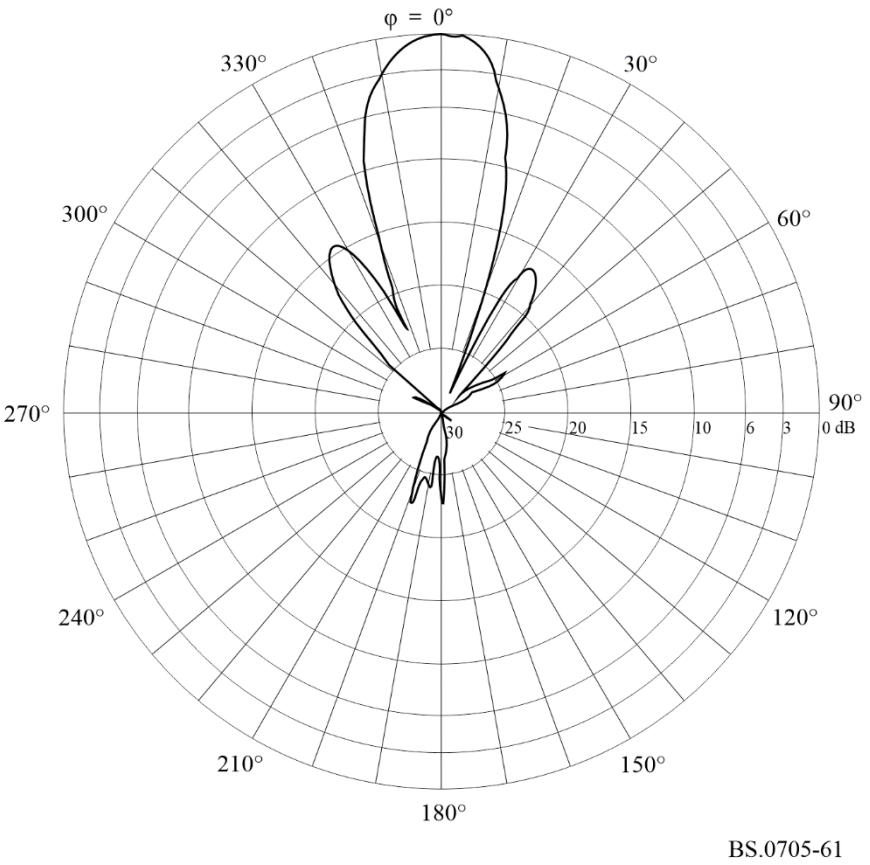
مخطط الإشعاع الأفقي لهوائي HR 4/4/1,0 مغذى من الطرف متعدد النطاقات بشاشة عاكسة لا دورية مقيسة عند F_R = 0,7



BS.0705-60

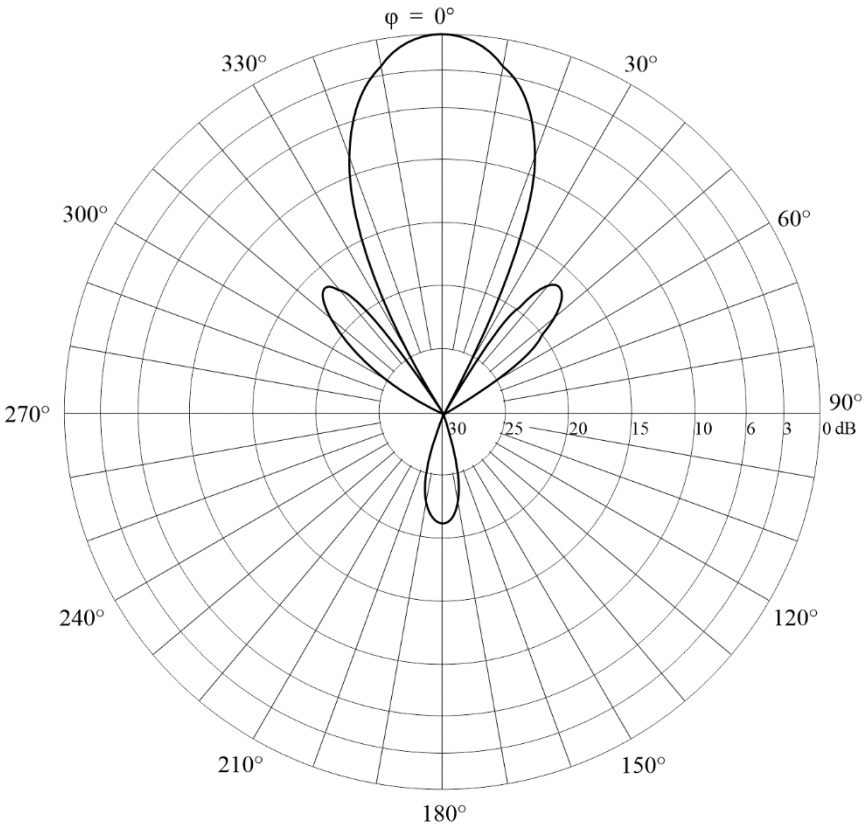
الشكل 61

مخطط الإشعاع الأفقي لمختلف الهوائيات HR 4/4/1,0 المغذاة من الطرف متعددة النطاقات بشاشة عاكسة لا دورية مقيسة عند $F_R = 0,7$



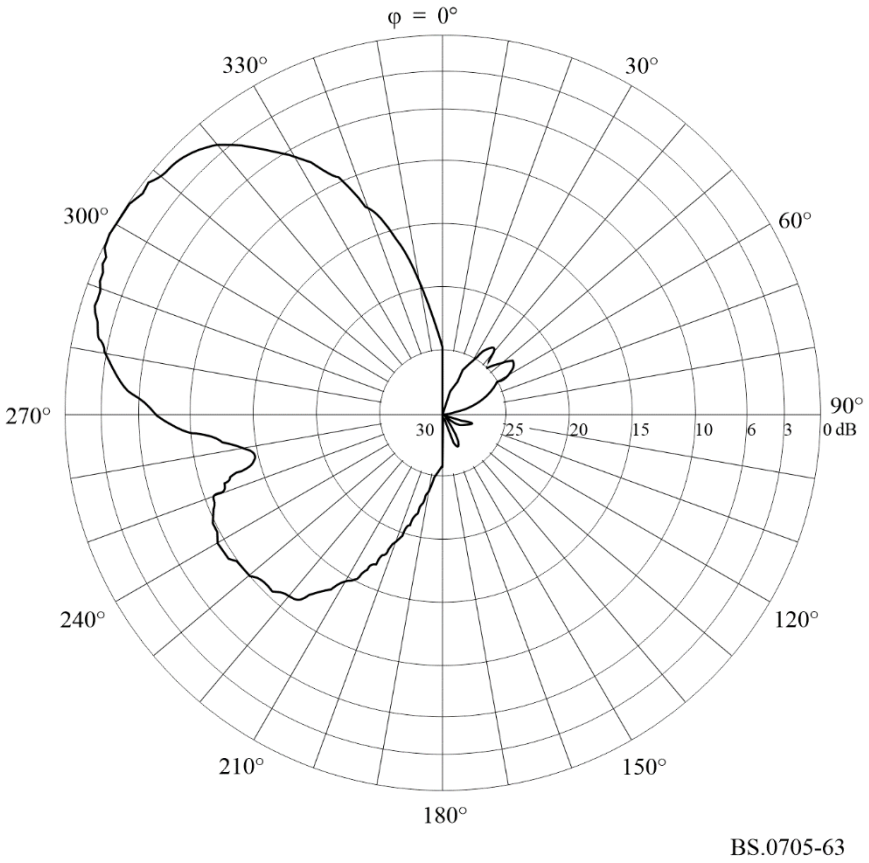
الشكل 62

مخطط الإشعاع الأفقي النظري لهوائي RH 4/4/1,0 مغذى من الطرف
بشاشة عاكسة لا دورية مقيسة عند F_R = 0,7



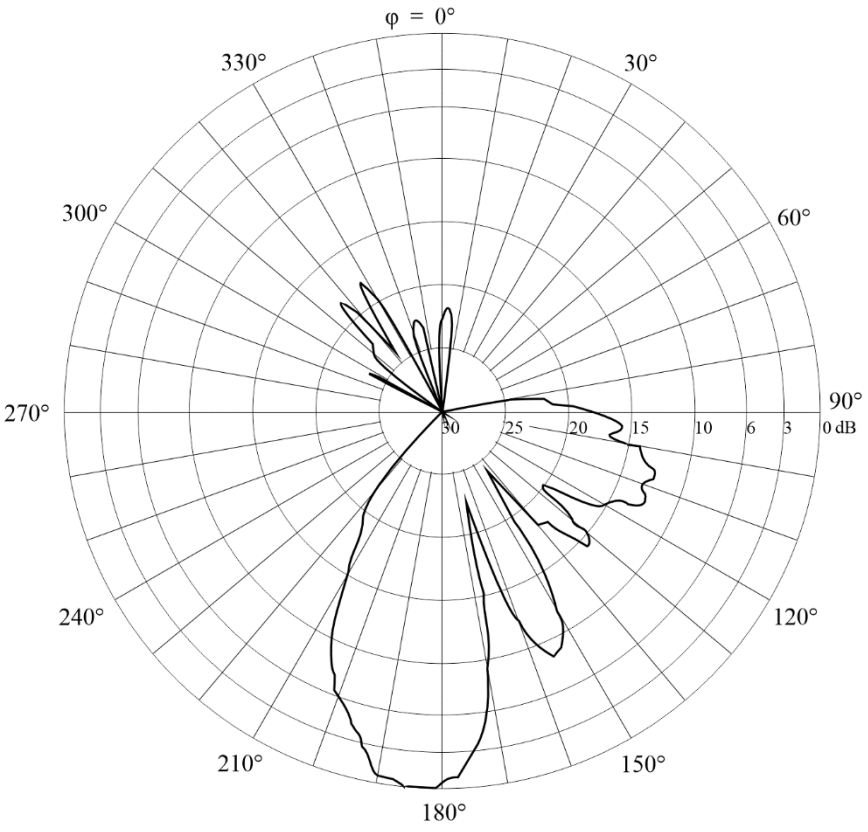
الشكل 63

مخطط الإشعاع الأفقي لهوائي HRS 4/4/0,5 مغذى من المركز متعدد النطاقات بشاشة عاكسة لا دورية مائلة بـ +25° بالنسبة للسمت الأساسي ذي 275°، مقيساً عند F_R = 0,7



الشكل 64

مخطط الإشعاع الأفقي لهوائي HRS 4/4/1,0 مغذى من المركز متعدد النطاقات بشاشة عاكسة لا دورية مائلة بـ +30° بالنسبة للسمت الأساسي ذي 160°، مقيساً عند F_R = 1,3



BS.0705-64

3.5 سوية الإشعاع العملي الدنيا لأغراض التخطيط

نظراً للآثار الموصوفة في الفقرة 5، من الضروري ضبط حد منخفض، أو قيمة دنيا، لكسب الهوائي المحسوب. هذه القيمة الدنيا هي أصغر قيمة تُستعمل لحساب الكسب النسبي للهوائي (انظر الشكل 65). كلما كان الكسب المحسوب في أي اتجاه أصغر من القيمة الدنيا، تُستعمل هذه الأخيرة لحساب شدة المجال. عندما يكون الكسب المحسوب أكبر من القيمة الدنيا، فإنه يُستعمل لحساب شدة المجال.

لاجتناب تحديد:

- هوائيات الكسب الأعلى ذات الكسب الذي يزيد عن 0 dBi في كل الاتجاهات،
- هوائيات الكسب الأدنى دون اتجاهية،

من الضروري التعبير عن القيمة الدنيا كدالة لأقصى كسب للهوائي.

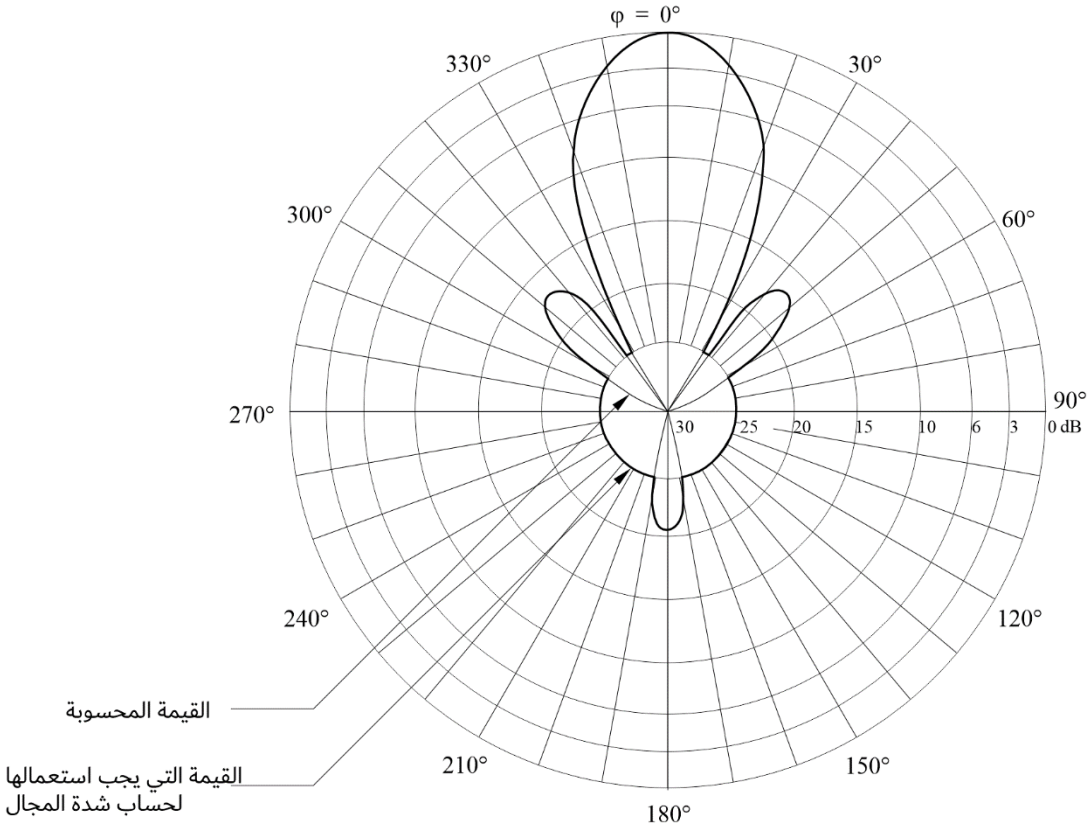
تُعطى القيمة الدنيا على النحو التالي:

- إذا كان الكسب الأقصى للهوائي أكبر من أو يساوي 25 dBi، فإن القيمة الدنيا تكون 0 dBi؛
- إذا كان الكسب الأقصى أصغر من 25 dBi، فإن القيمة الدنيا تكون 25 dB أصغر من قيمة الكسب الأقصى.

يبين الشكل 66 القيمة الدنيا، أو القيمة الدنيا لكسب الهوائي، كدالة للكسب الأقصى للهوائي كما هو موصوف أعلاه.

الشكل 65

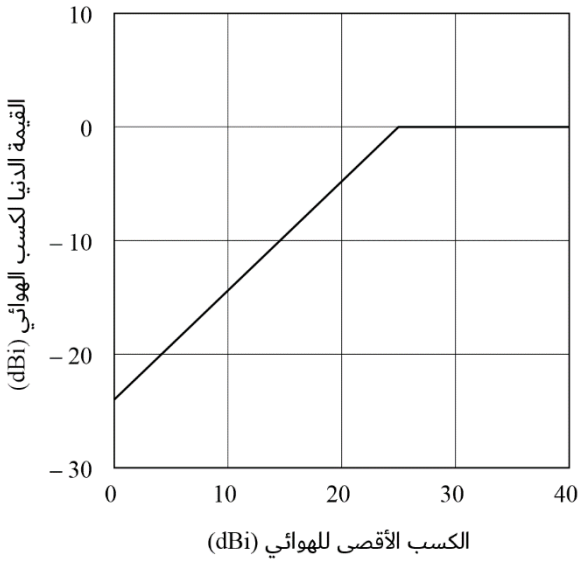
مثال عن القيمة الدنيا في مخطط الهوائي الأفقي



BS.0705-65

الشكل 66

القيمة الدنيا لكسب الهوائي الذي يجب استعماله في الحساب



BS.0705-66

6 الطبيعة المناسبة وتطبيق الهوائيات

1.6 هوائيات ثنائيات الأقطاب الأفقية

إن هوائيات ثنائيات الأقطاب الأفقية هي أكثر أشكال الهوائيات استعمالاً للإذاعة HF. يمكن تصميمها لتقابل تقريباً أي مواصفة أو مخطط أداء مطلوب عادة.

2.6 الهوائيات الستارية القابلة للتوجيه

غالباً ما يكون هوائي ستاري قابل للتوجيه من صفيفي عناصر ثنائيات أقطاب مدعومة من الجانبين بشاشة عاكسة مشتركة. إذا كان لكل من الصفيفين الستاريين مدى تردد تشغيل يبلغ ثمانية واحدة، يمكن تغطية كل نطاقات الموجات الديكامترية بين 6 و26 MHz.

تُوجه هذه الهوائيات بطريقة ميكانيكية بحيث تكون الحزمة الرئيسية للإشعاع عند السمت المطلوب. والوقت الضروري لهذه الحركة الميكانيكية هو نمطياً أقل من 5 دقائق لدورة 360° كاملة.

إن الهوائي الستاري القابل للتوجيه مناسب على الخصوص للمواقع صغيرة المساحة حيث هناك حاجة إلى الإرسال في عدد واسع من الاتجاهات السمتية.

3.6 الهوائيات المعينية

لا يوصى بالهوائيات المعينية للإذاعة HF لأن:

- الفص الرئيسي ضيق في كل من المستويين الأفقي والعمودي، مما قد يتسبب في عدم تغطية منطقة الخدمة المطلوبة على نحو موثوق نظراً للتغيرات في الأيونوسفير؛
- هناك عدد كبير من الفصوص الجانبية ذات قدر كاف للتسبب في تداخل في الإذاعات الأخرى؛
- جزء مهم من قدرة الإرسال تُبدد في المعاوقة الانتهائية.

4.6 الهوائيات اللوغاريتمية الدورية ذات السمت الثابت

للهوائيات اللوغاريتمية الدورية مزية مدى ترددات واسع. وهي شائعة الاستعمال للإذاعات قصيرة المسافة لأن لها فتحة حزمة واسعة وكسب منخفض.

5.6 الهوائيات اللوغاريتمية الدورية القابلة للتوجيه

إن للهوائيات اللوغاريتمية الدورية القابلة للتوجيه على العموم عناصر مشعة أفقية. في الحالة التي تُركب فيها على ذراع عمودي، فإن عدد الفصوص لمخطط الإشعاع العمودي يزيد بدلالة تردد الخدمة.

على الرغم من أن الهوائيات اللوغاريتمية الدورية القابلة للتوجيه تُستعمل لكل من الإذاعة على المدى القصير والمتوسط والطويل فإنه يوصى بها للأغراض الخاصة فقط، مثلاً للمسافات القصيرة عند الترددات المنخفضة والمتوسطة وللمسافات الطويلة عند نطاقات التردد العليا، حيث فتحة الحزمة العريضة مقبولة.

6.6 اختيار الهوائي الأمثل

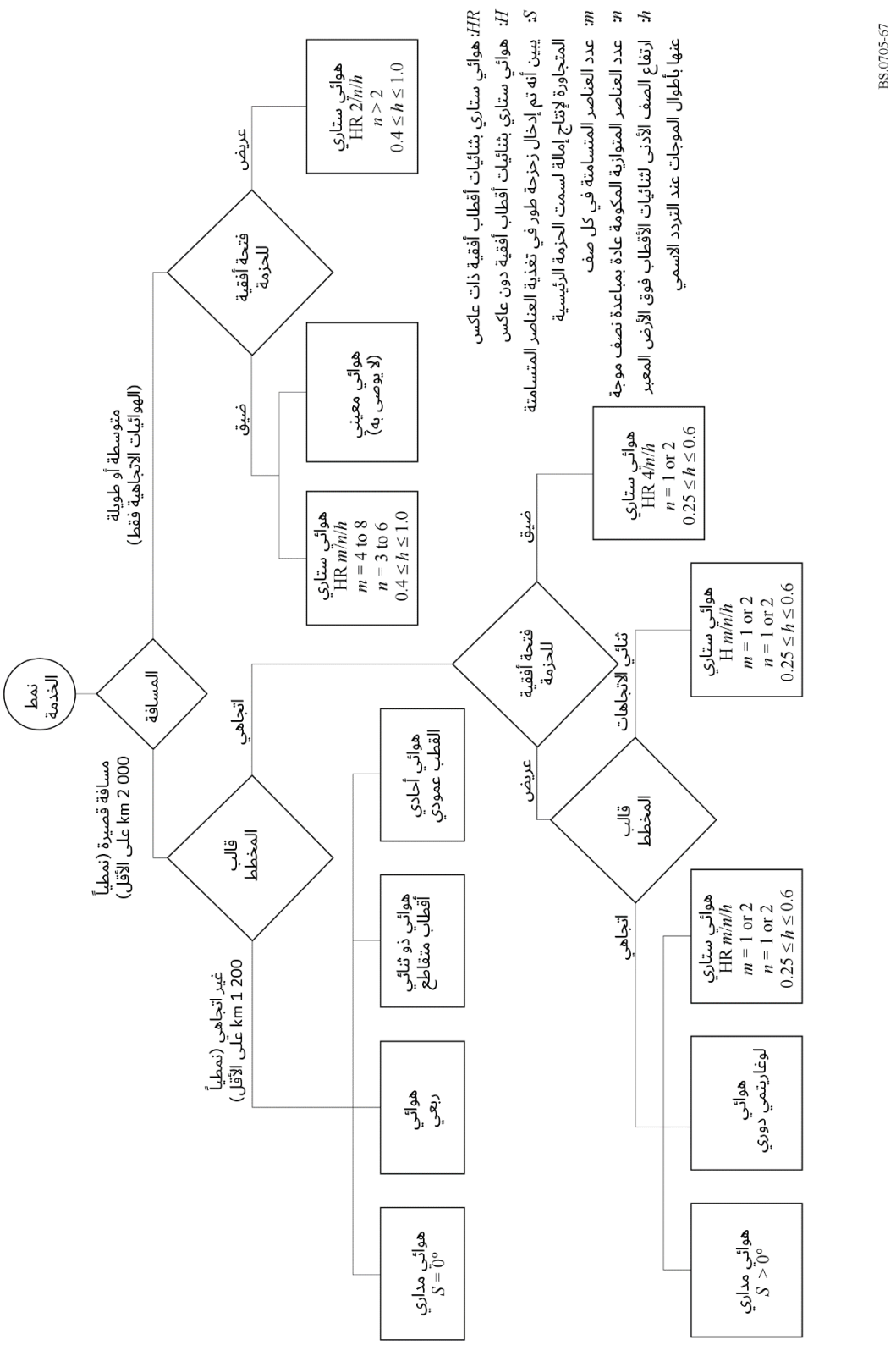
يعطي مخطط اختيار الهوائي في الشكل 67 بعض الخطوط التوجيهية العامة لاختيار هوائي مناسب لنمط معين من الخدمة وفقاً للمدى المطلوب. تؤخذ في الاعتبار فئتان مختلفتان: الخدمة قصيرة المدى والخدمة متوسطة/طويلة المدى.

المعني من الخدمة قصيرة المدى خدمة مدى أقصاه 2 000 km. يمكن أن تُغطى منطقة الخدمة المطلوبة إما بهوائي غير اتجاهي أو اتجاهي فتحة حزمته يمكن اختيارها وفقاً للعرض الزاوي للقطاع الذي يجب خدمته. في حالة هوائي اتجاهي، يمكن استخدام إما هوائي ستاري أفقي ذي ثنائيات أقطاب أو هوائي لوغاريتمي دوري.

يُعتر هنا أن لخدمات المديين المتوسط والطويل مدى أكبر من حوالي 2 000 km. هذه الخدمات تتطلب استعمال هوائيات تكون زاوية ارتفاع فصها الرئيسي نمطياً أقل من 13°. وفقاً لعرض المنطقة التي يجب أن يغطيها المرسل، تكون فتحة الحزمة الأفقية إما واسعة، بين 65° و95°، أو ضيقة، أقل من 45°.

الشكل 67

مخطط اختيار الهوائي



المرفق 1
بالملحق 1

أمثلة المخططات

تُعطى الأمثلة عن المخططات بالنسبة لأنماط الهوائيات الواردة أدناه وبالنسبة لنسب تردد F_R وزاوية الإمالة s المحددة.

1 الهوائيات الستارية

1.1 الهوائيات الستارية دون عاكس

H	1/1/0.3	$F_R = 1$	(انظر الشكل 68)

2.1 الهوائيات الستارية بعاكس موالف

HR	2/1/0.5	$F_R = 1$	$s = 0°$ (انظر الشكل 69)
HRS	2/2/0.5	$F_R = 1$	$s = 0°, 15°$ (انظر الشكلين 70 و71)

3.1 الهوائيات الستارية بشاشة عاكسة لا دورية

HRS	2/2/0.5	$F_R = 1$	$s = 0°, 15°$ (انظر الشكلين 70 و71)
HRS	4/3/0.5	$F_R = 1$	$s = 0°$ (انظر الشكل 74)
HRS	4/4/0.5	$F_R = 0.7; 1.0; 1.4$	$s = 0°, 30°$ (انظر الأشكال من 75 إلى 80)
HRS	4/4/1.0	$F_R = 1$	$s = 0°$ (انظر الشكل 81)

2 الهوائيات المدارية

T	1/2/0.3	$F_R = 1$	$s = 0°$ (انظر الشكل 82)
T	2/2/0.5	$F_R = 1$	$s = 0°, 15°$ (انظر الشكلين 83 و84)

3 الهوائيات اللوغاريتمية الدورية

LPH	18/35/30/30/3/26/89	(انظر الشكل 85)
LPV	18/45/3/17/6/34/220	(انظر الشكل 86)

4 الهوائيات الربعية

HQ	1/0.3	(انظر الشكل 87)

5 هوائيات ثنائيات الأقطاب المتقاطعة

HX	0.3	(انظر الشكل 88)

6 الهوائيات المعينية

RH	90/55/15	(انظر الشكل 89)

7 هوائيات أحادية الأقطاب العمودية

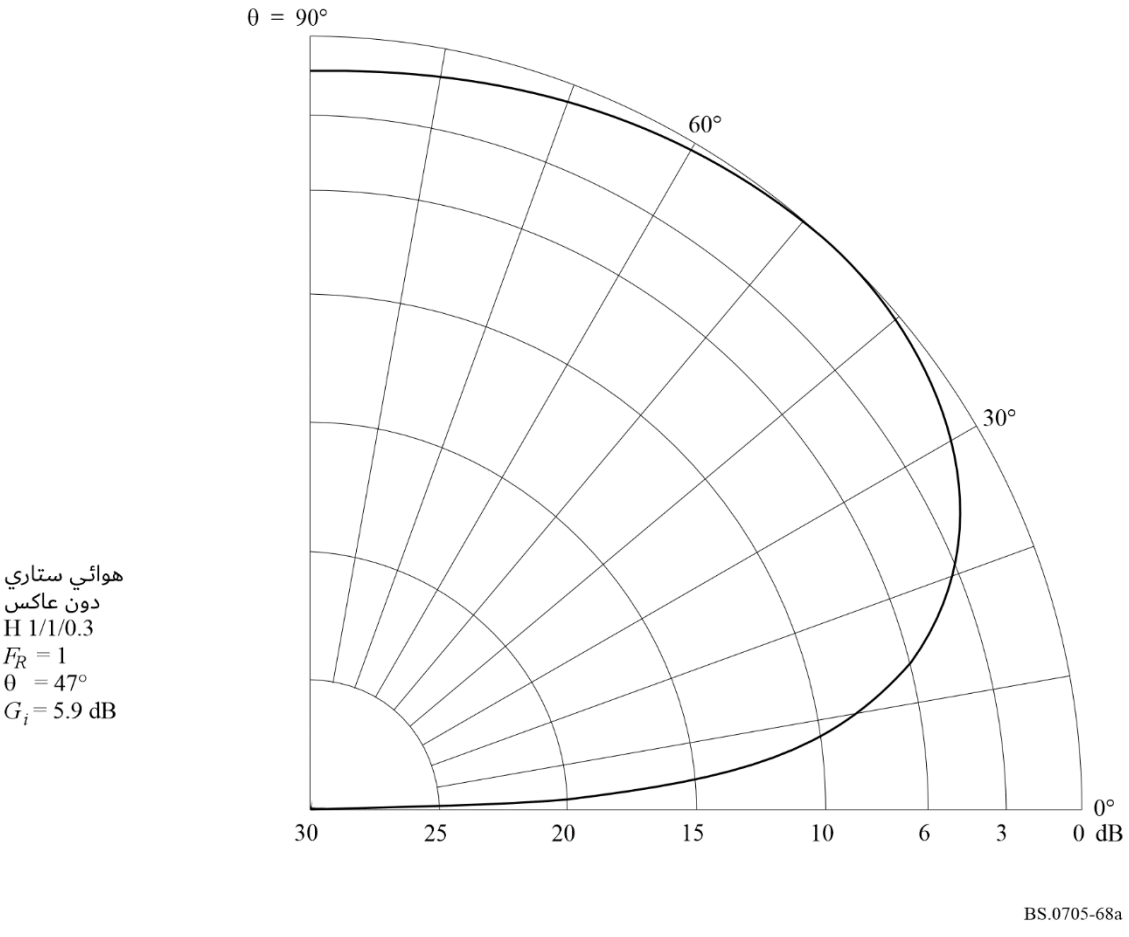
VM	12.5/12.5/120/3	(انظر الشكل 90)

8 هوائيات ياغي–يودا

YU	3/0, 4.2, 11.7/39.6/21.2, 20.5, 19.6	(انظر الشكل 91)

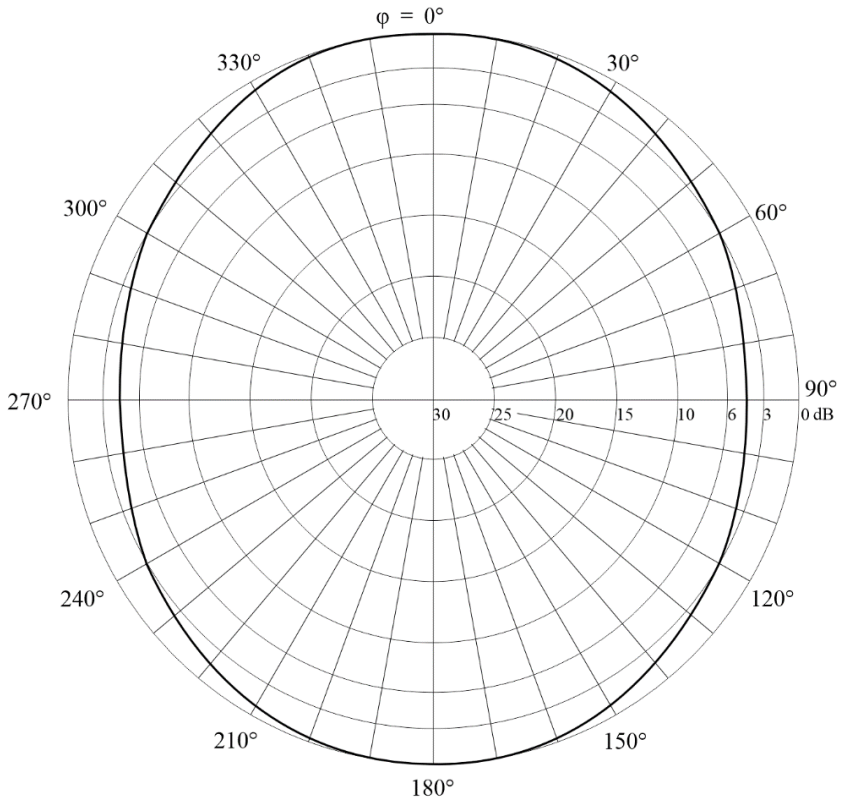
الشكل 68A

المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°



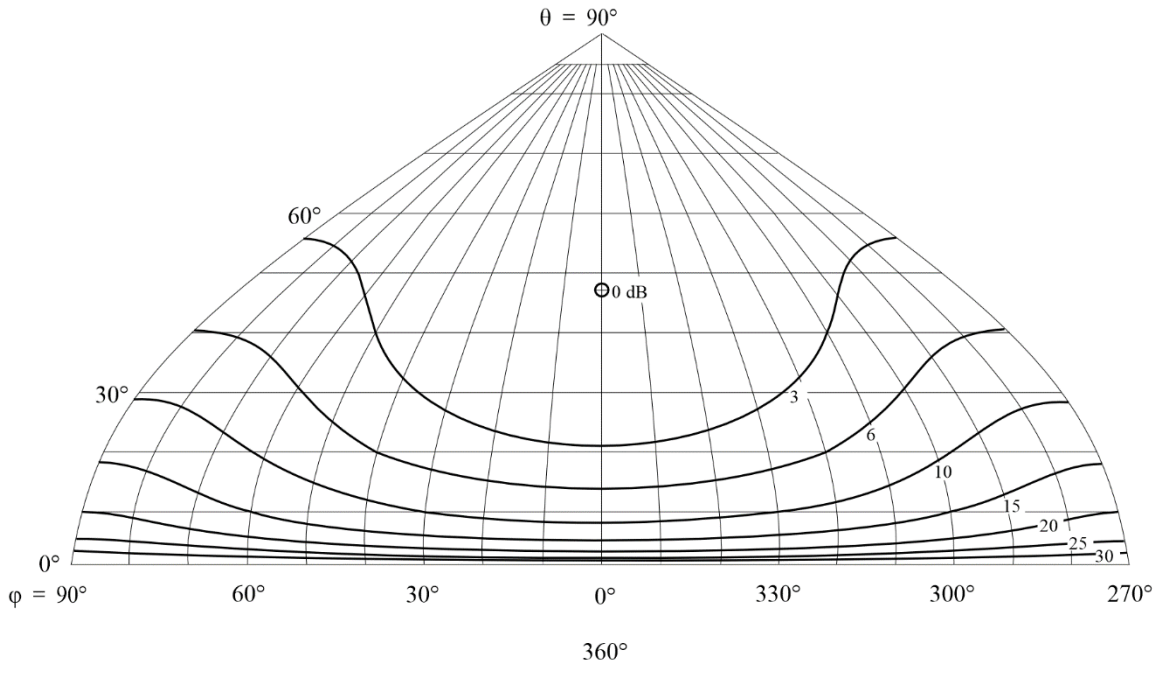
الشكل 68B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 47°



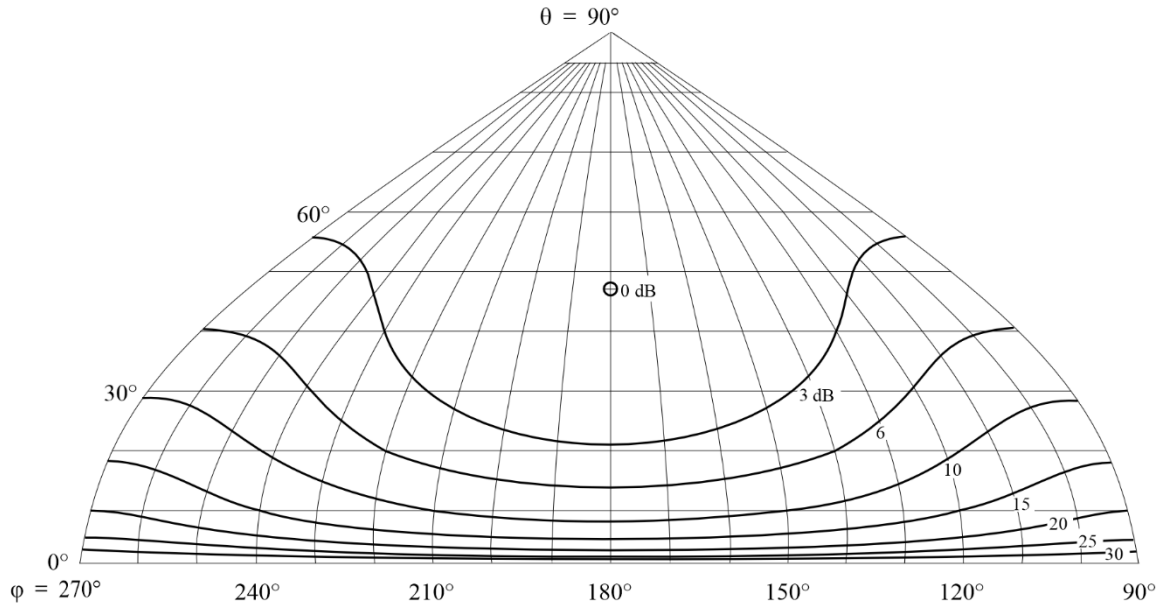
الشكل 68C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 68D

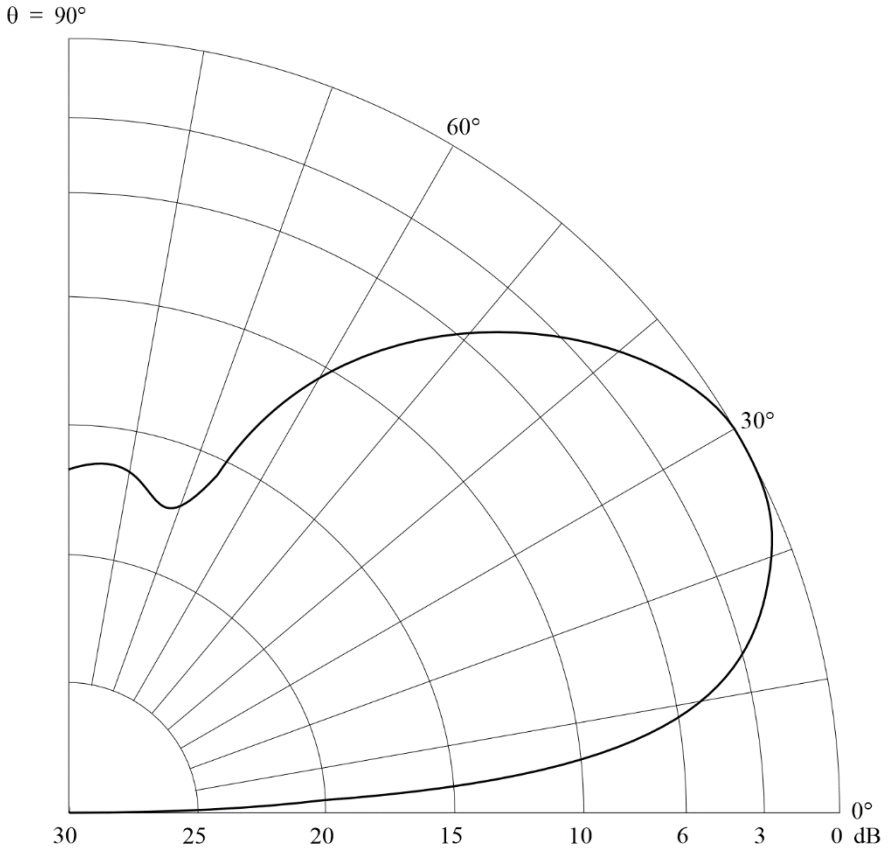
مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-68d

الشكل 69A

المخطط العمودي عند زاوية الارتفاع 0°



هوائي ستاري
بعاكس موالف
HR 2/1/0.5

$F = 1$

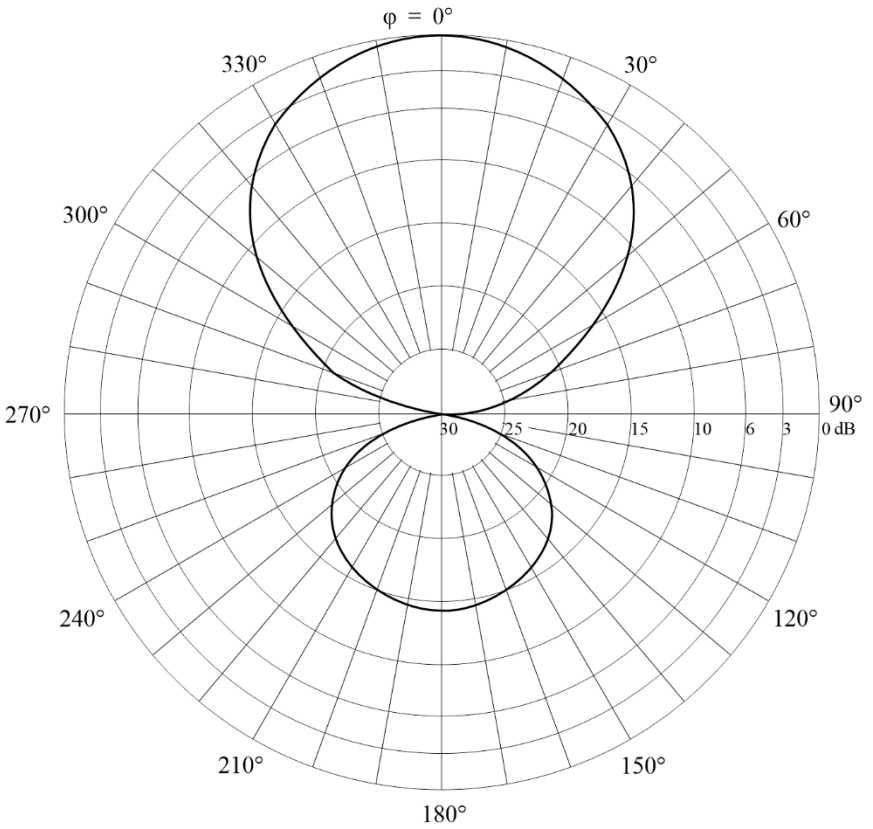
$\theta^R = 27°$

$G_i = 12.6$ dB

BS.0705-69a

الشكل 69B

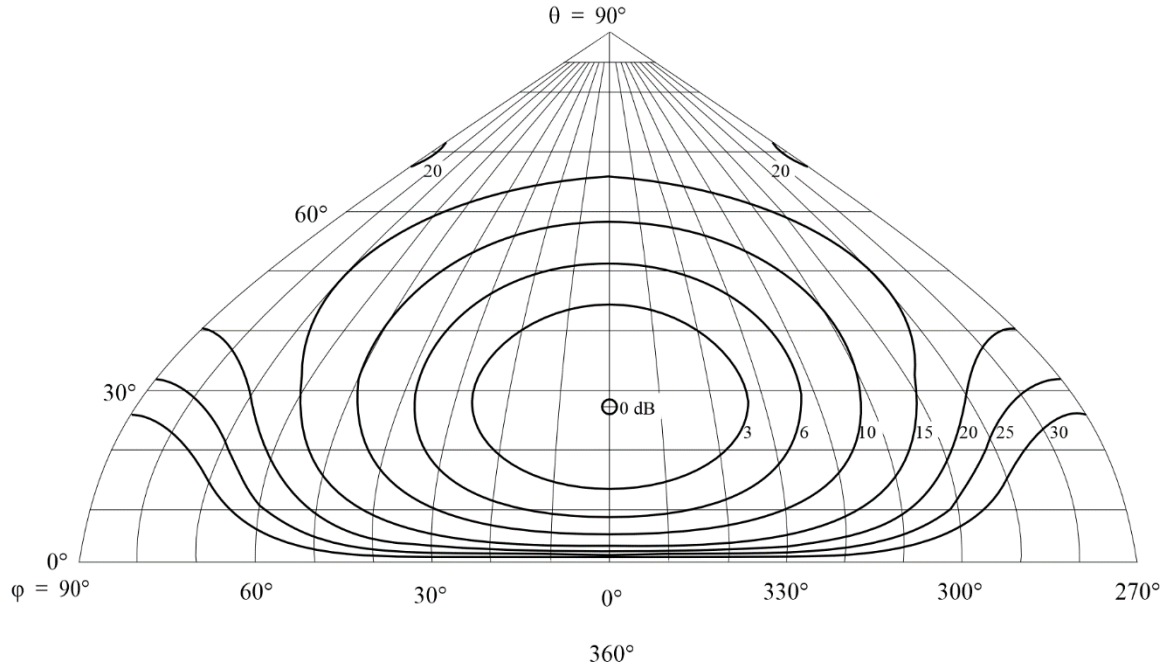
المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 27°



BS.0705-69b

الشكل 69C

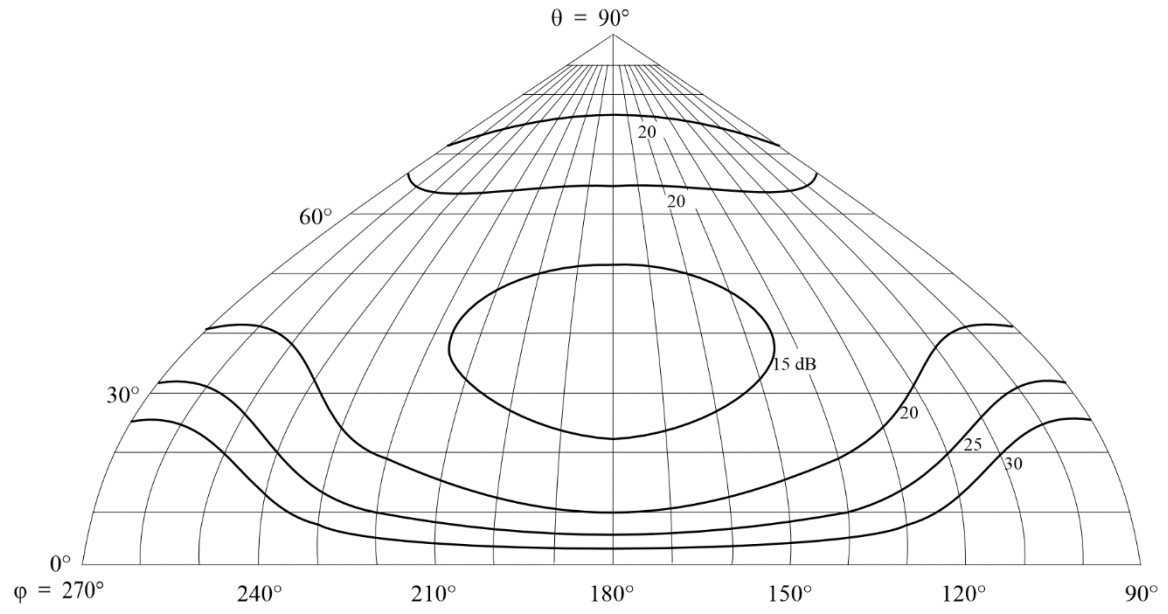
مخطط الإشعاع الأمامي



BS.0705-69c

الشكل 69D

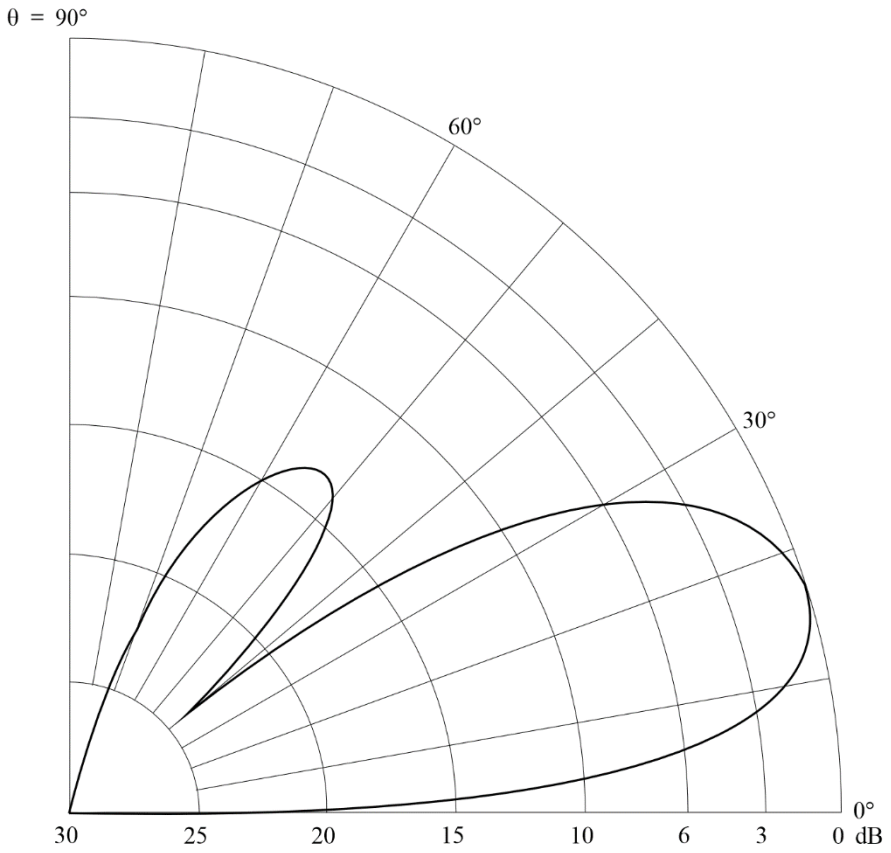
مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-69d

الشكل 70A

المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°



هوائي ستاري
بعاكس موالف
HR 2/2/0.5

F_R = 1

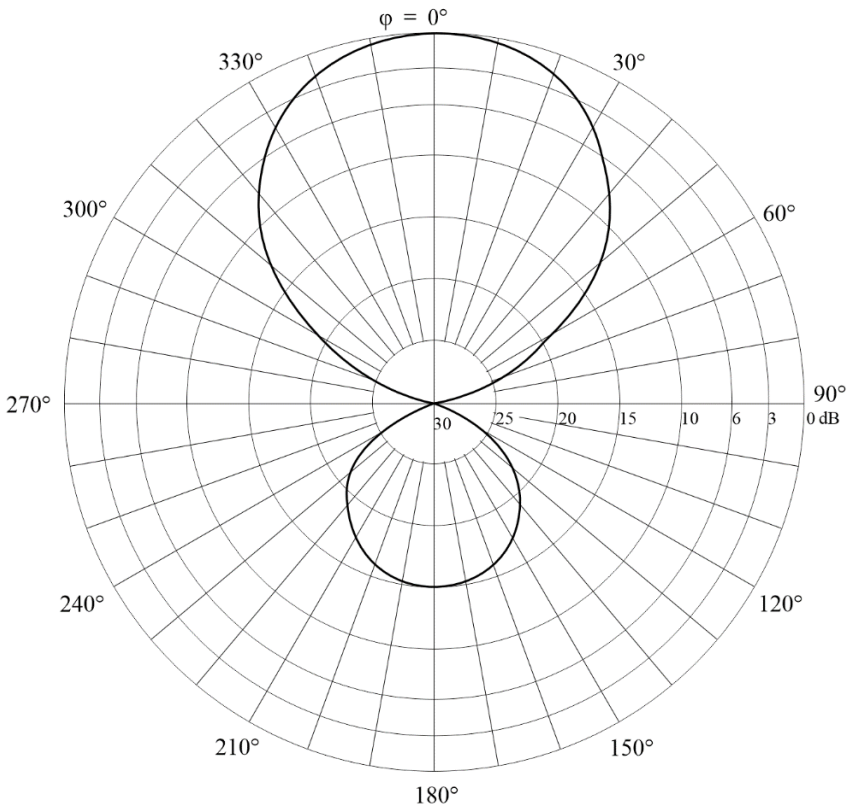
θ = 17°

G_i = 15.5 dB

BS.0705-70a

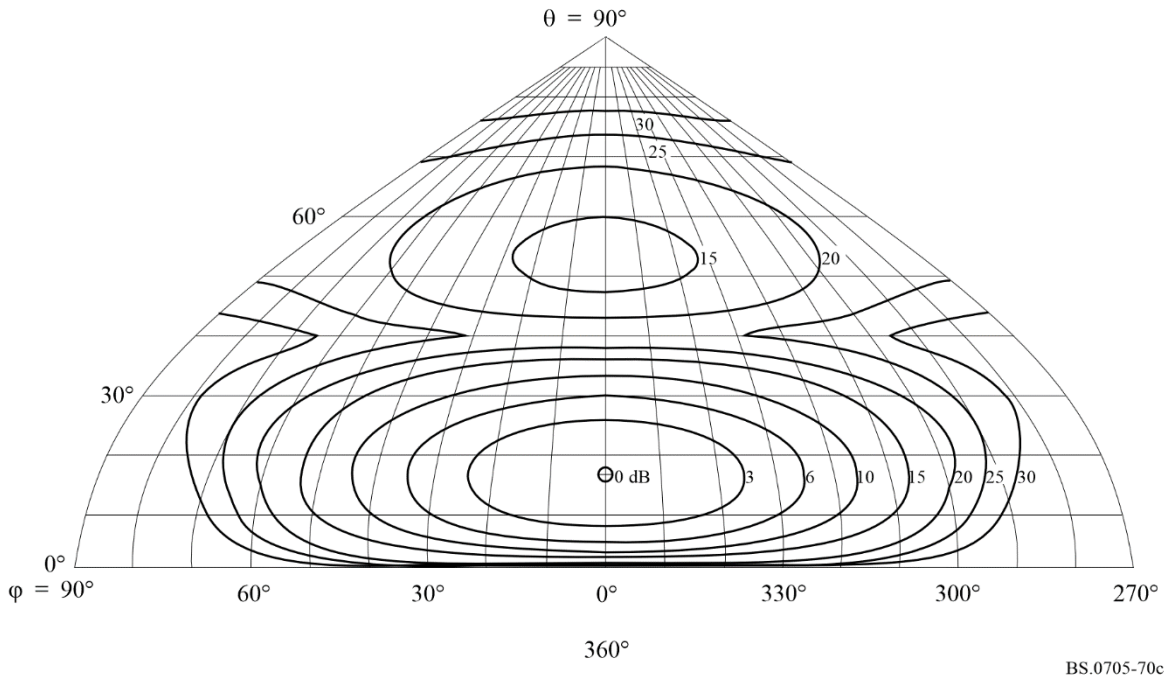
الشكل 70B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 17°



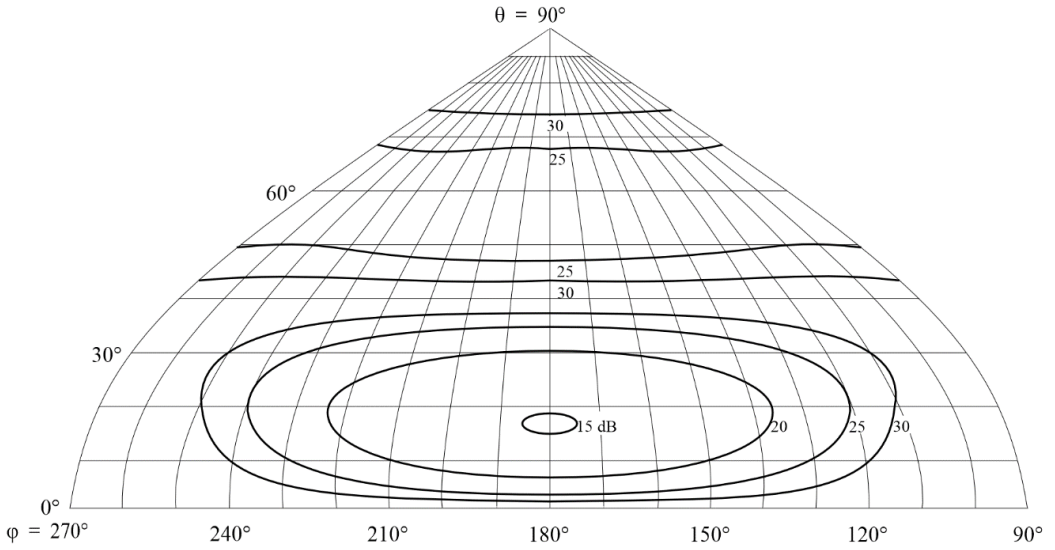
الشكل 70C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 70D

مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-70d

الشكل 71A

المخطط العمودي عند زاوية السمت 9°

هوائي ستاري
بعاكس موالف
HRS 2/2/0.5

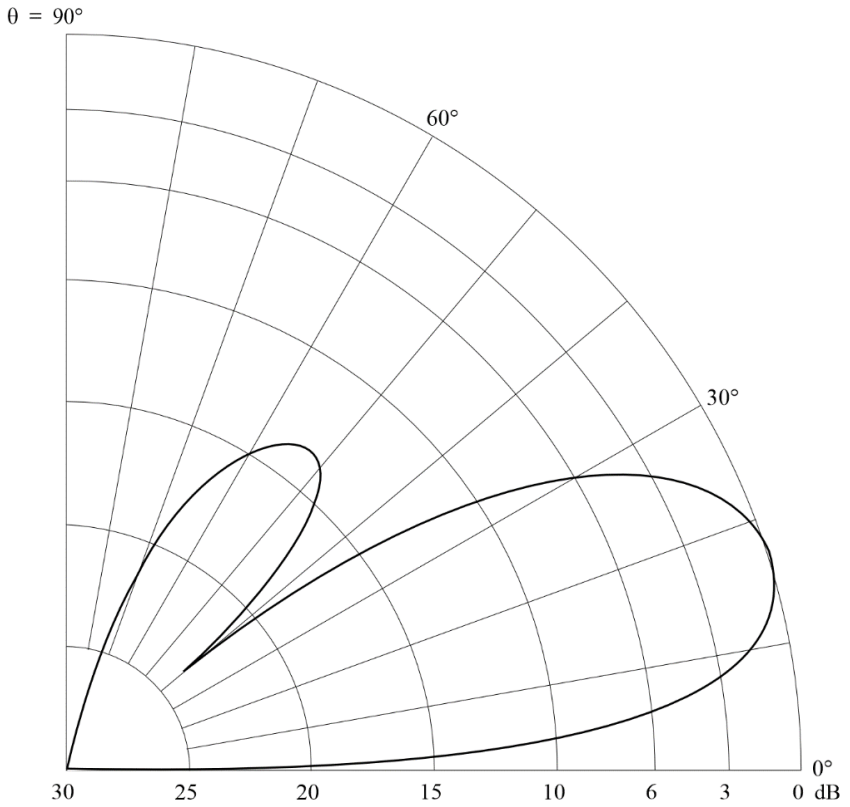
$F_R = 1$

$s = 15°$

$\theta = 17°$

$\varphi = 9°$

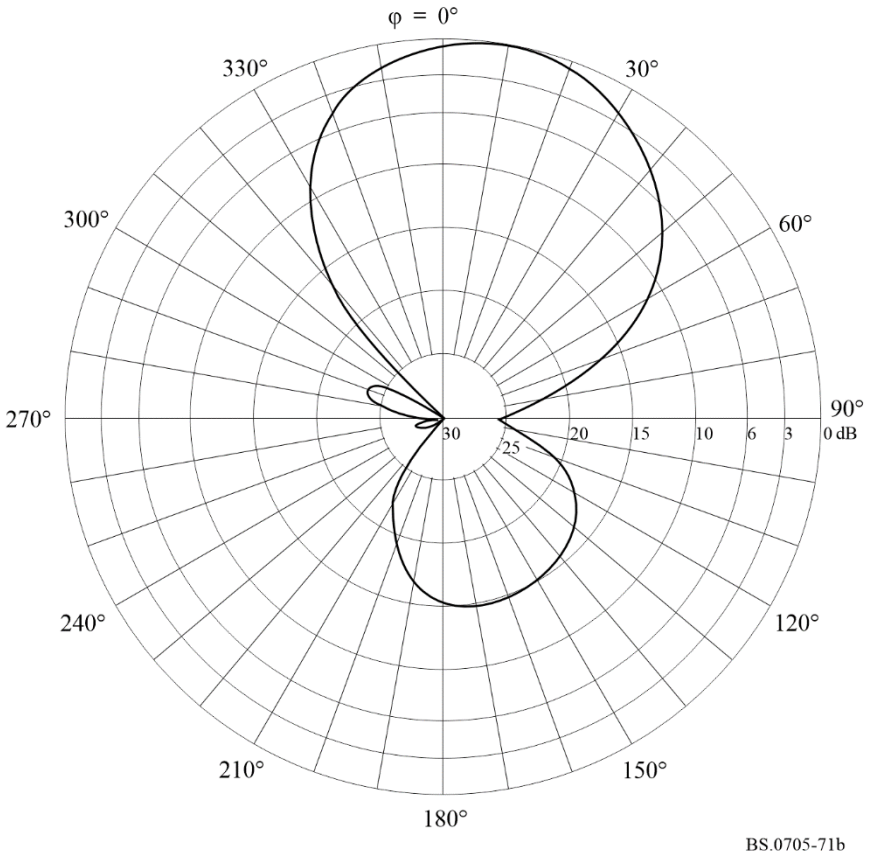
$G_i = 15.5$ dB



BS.0705-71a

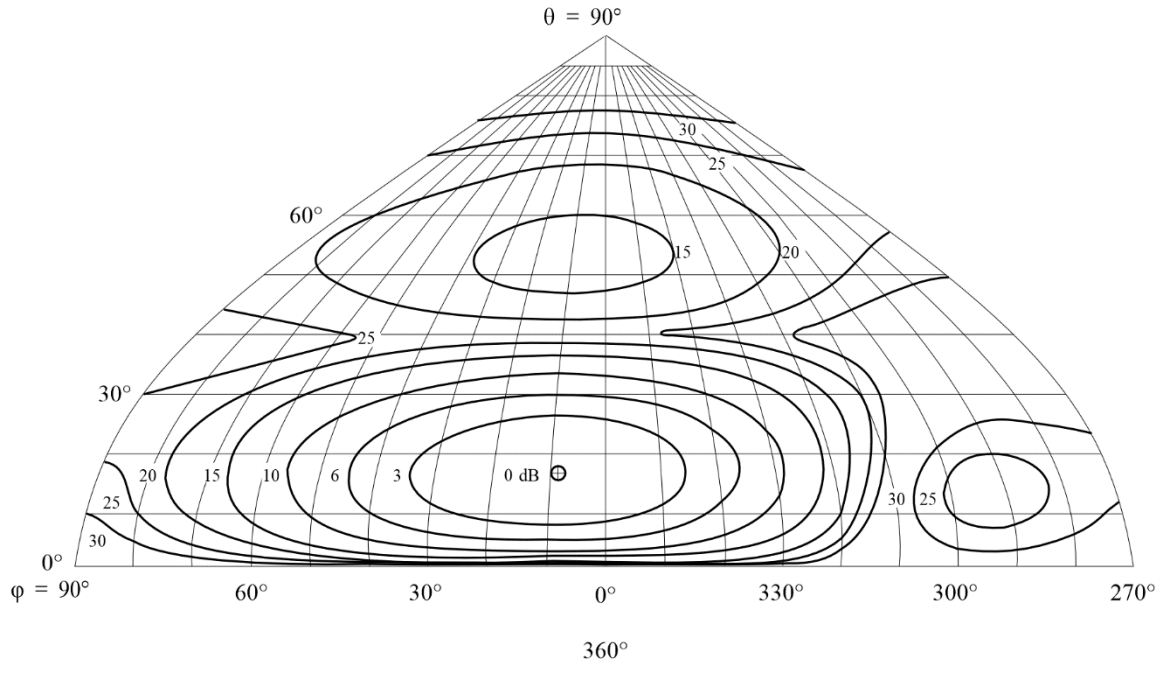
الشكل 71B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 17°



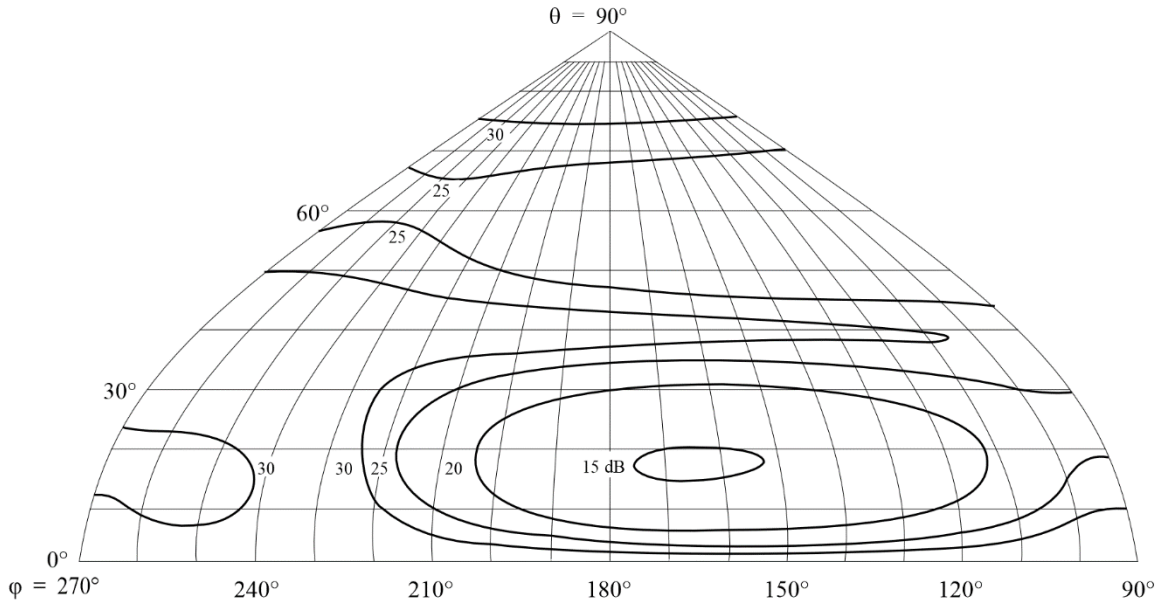
الشكل 71C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 71D

مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-71d

الشكل 72A

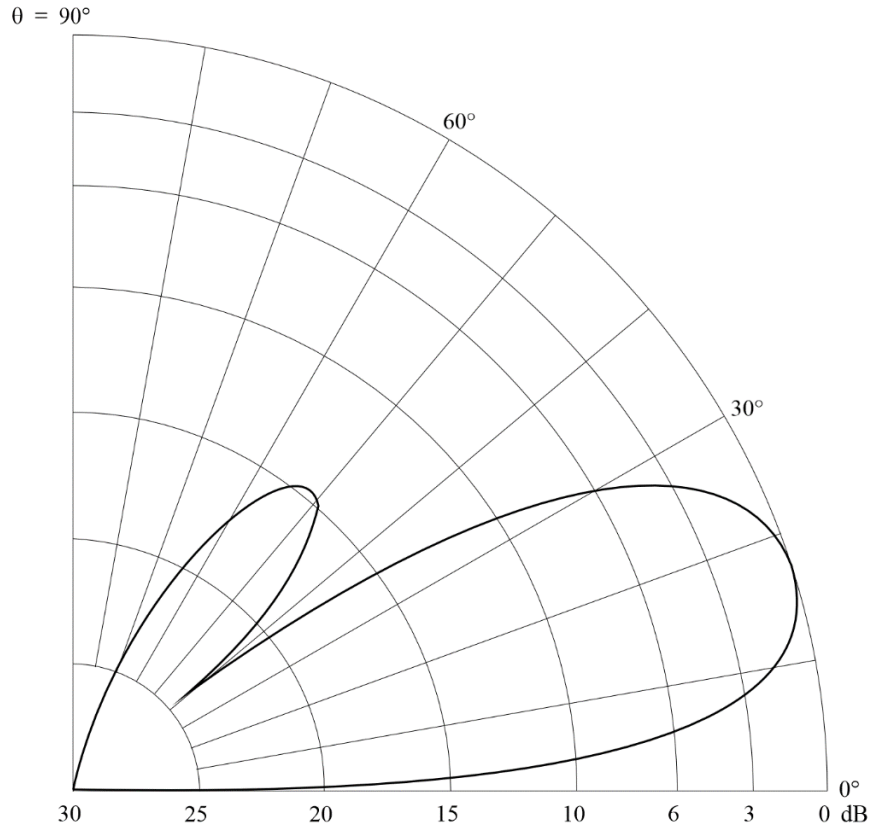
المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°

هوائي ستاري
بشاشة عاكسة
لا دورية
HR 2/2/0.5

$F_R = 1$

θ = 17°

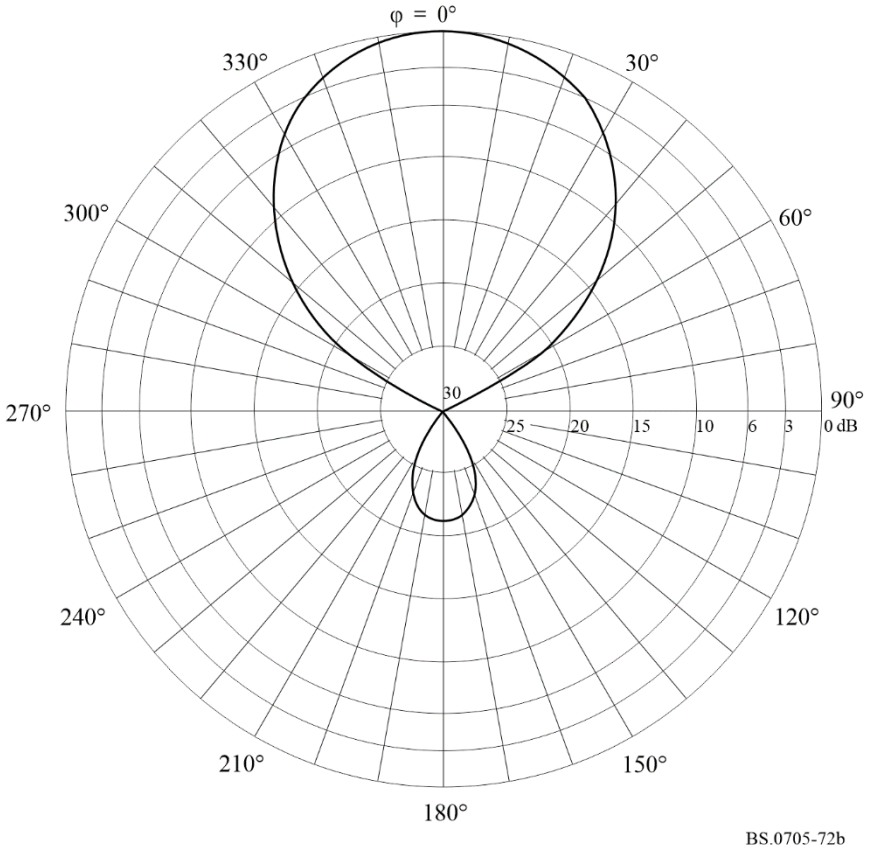
G_i = 16.0 dB



BS.0705-72a

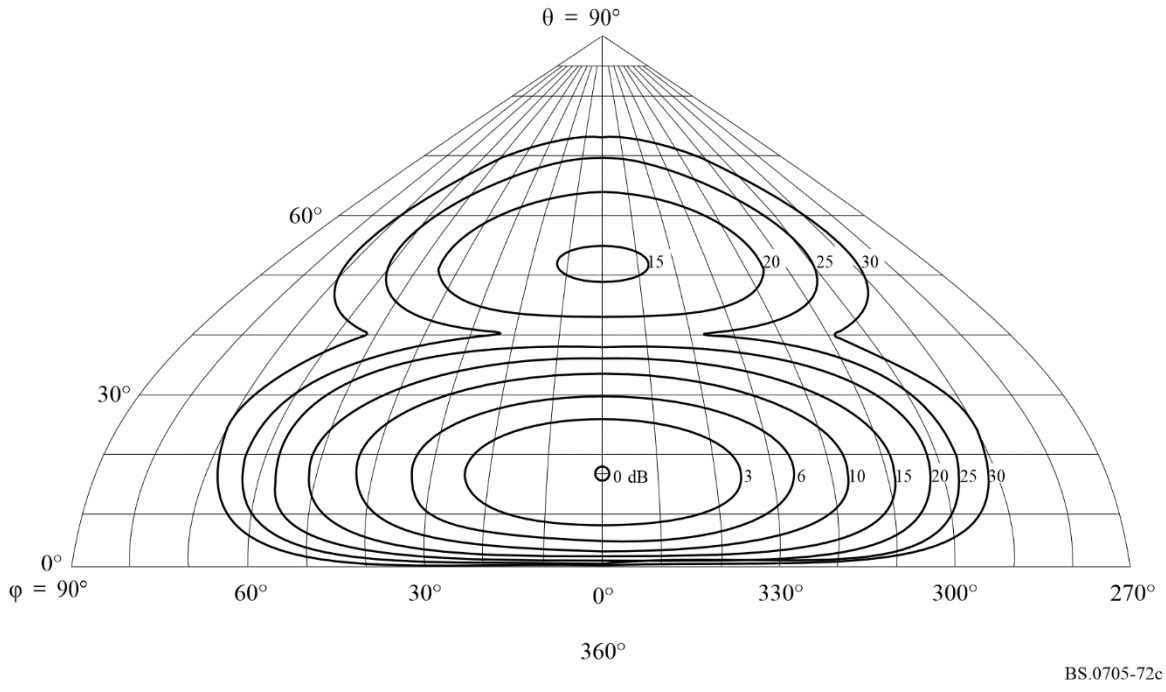
الشكل 72B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 17°



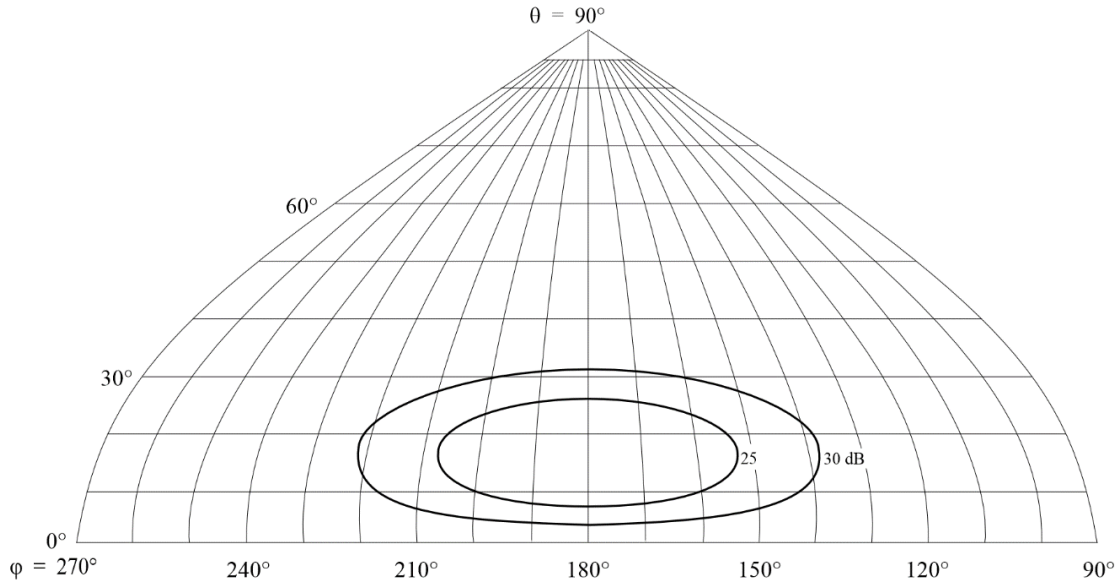
الشكل 72C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 72D

مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-72d

الشكل 73A

المخطط العمودي عند زاوية السمت 9°

هوائي ستاري
بشاشة عاكسة
لا دورية
HRS 2/2/0.5

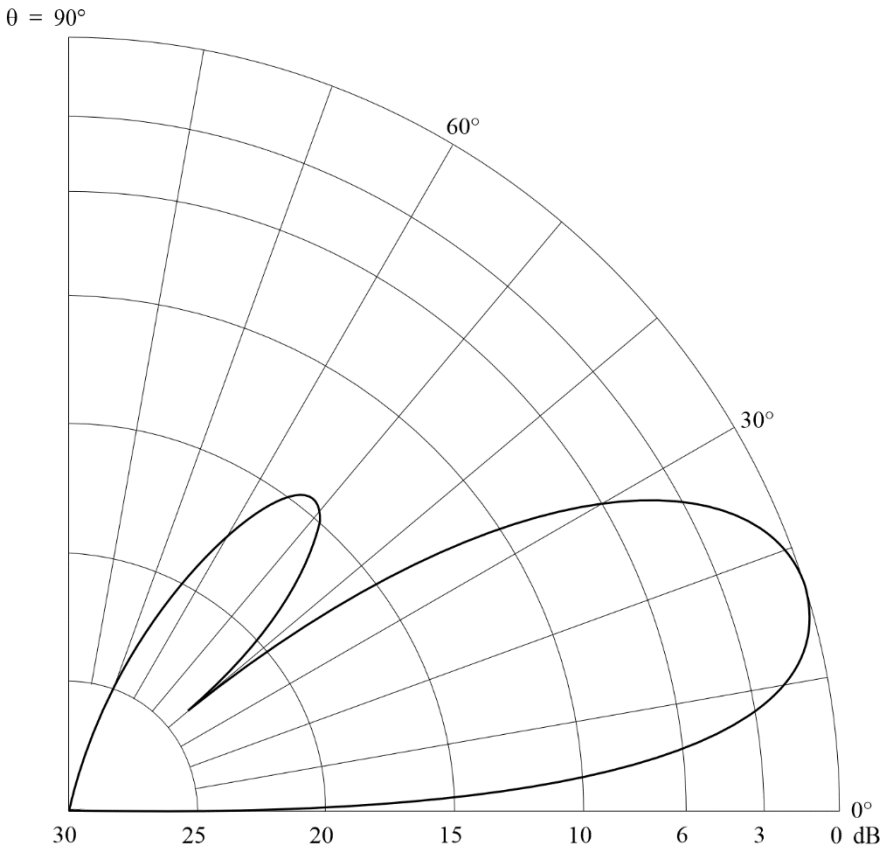
$F_R = 1$

$s = 15°$

$\theta = 17°$

$\varphi = 9°$

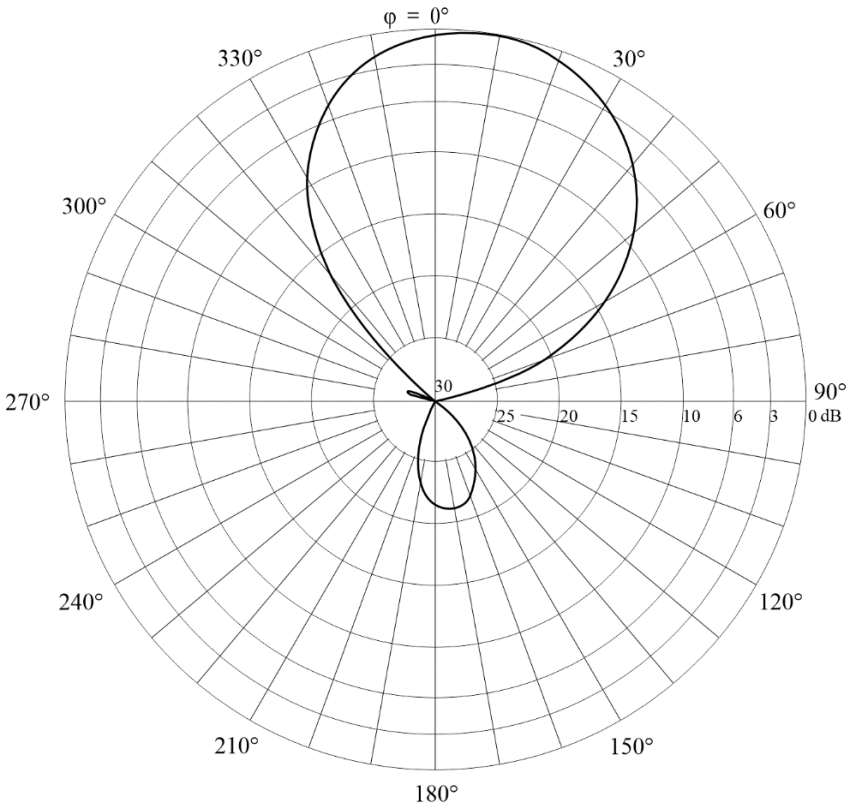
$G_i = 16.0$ dB



BS.0705-73a

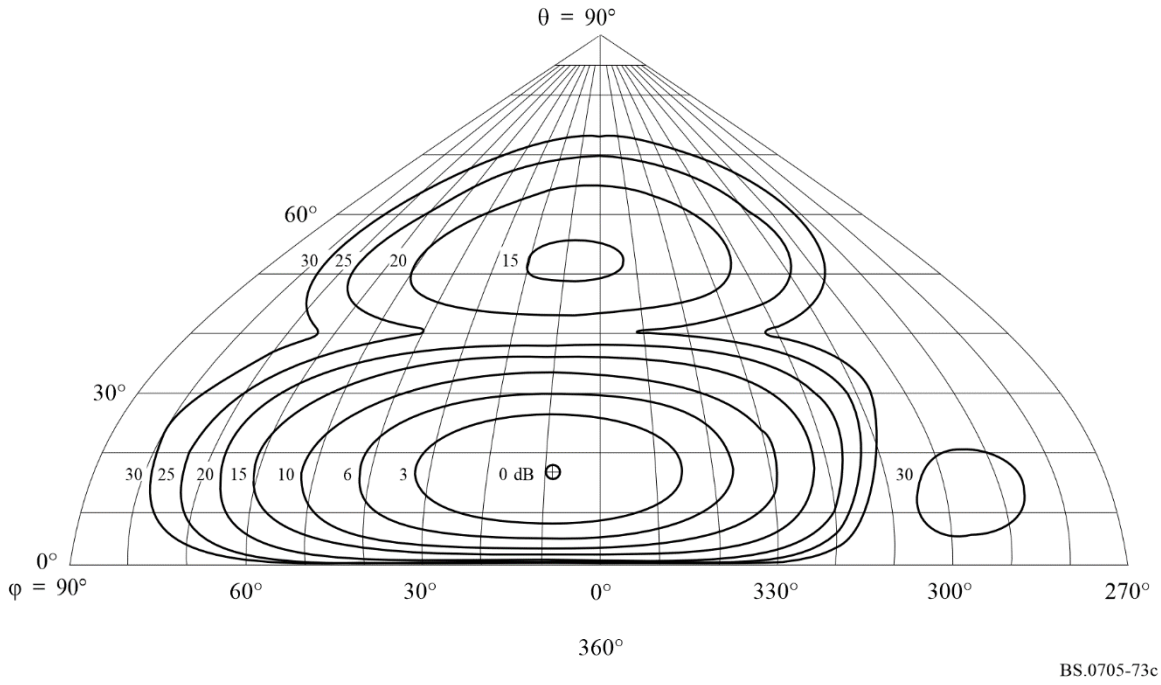
الشكل 73B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 17°



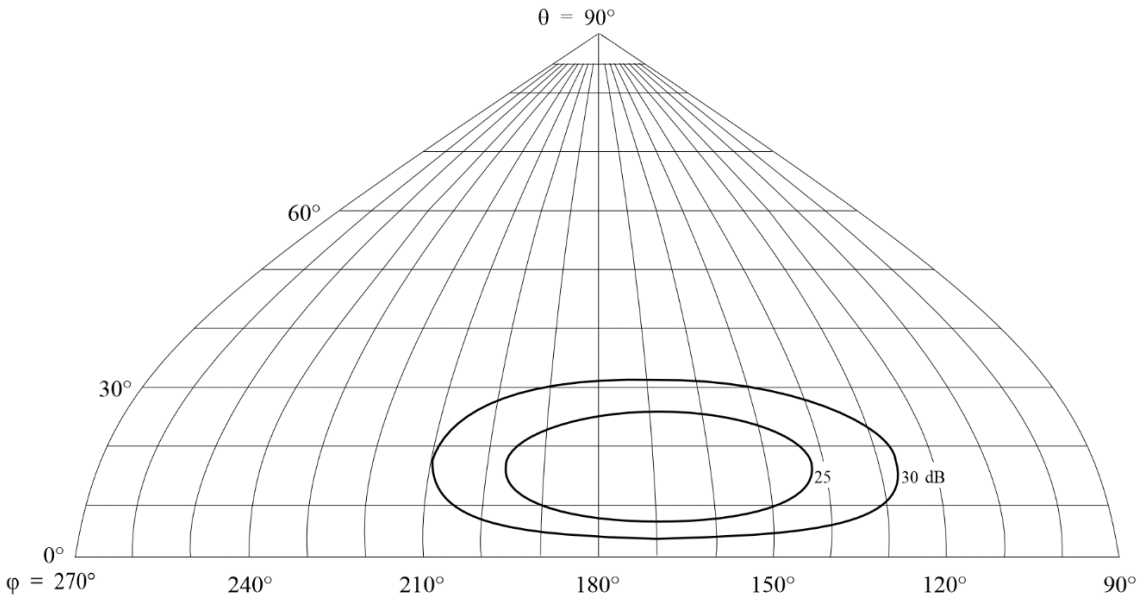
الشكل 73C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 73D

مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-73d

الشكل 74A

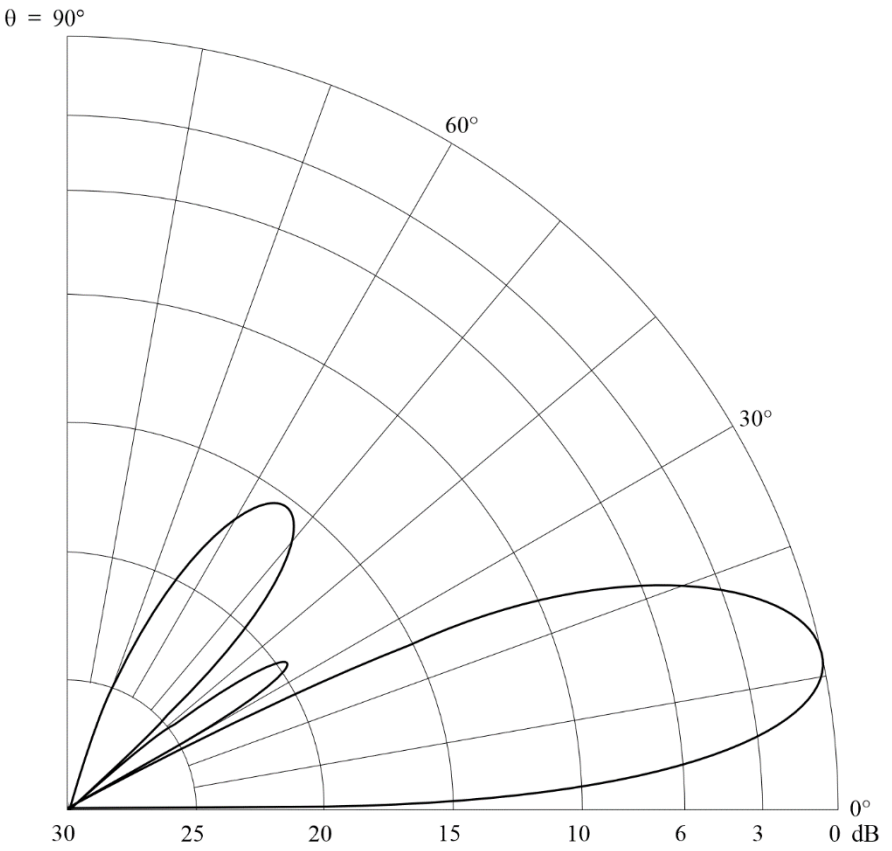
المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°

هوائي ستاري
بشاشة عاكسة
لا دورية
HR 4/3/0.5

$F_R = 1$

$\theta = 12°$

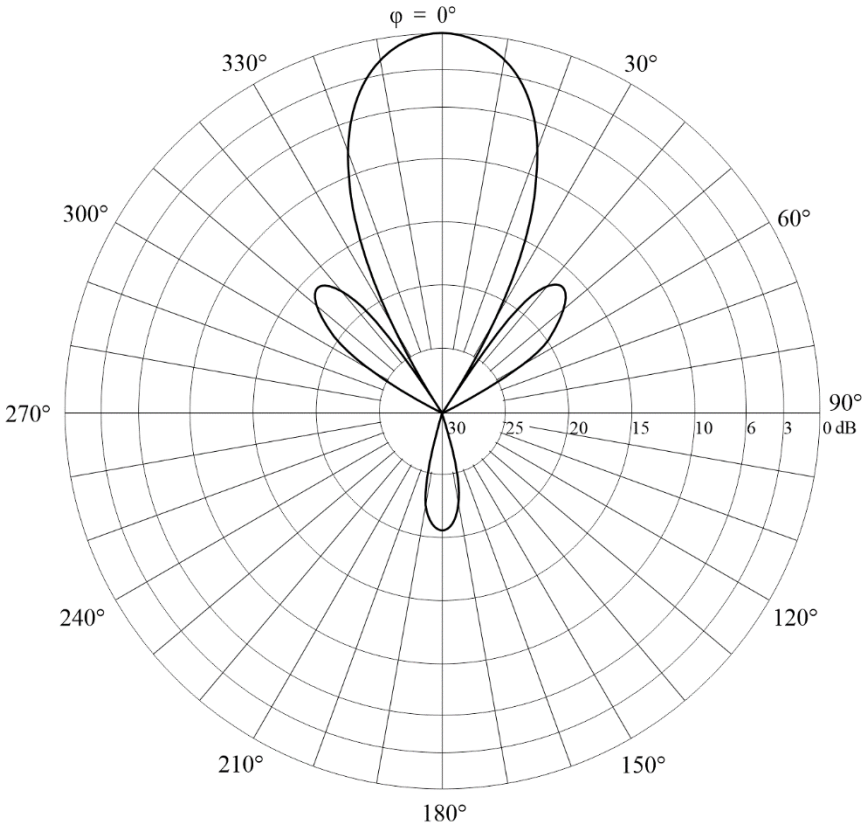
$G_i = 20.1$ dB



BS.0705-74a

الشكل 74B

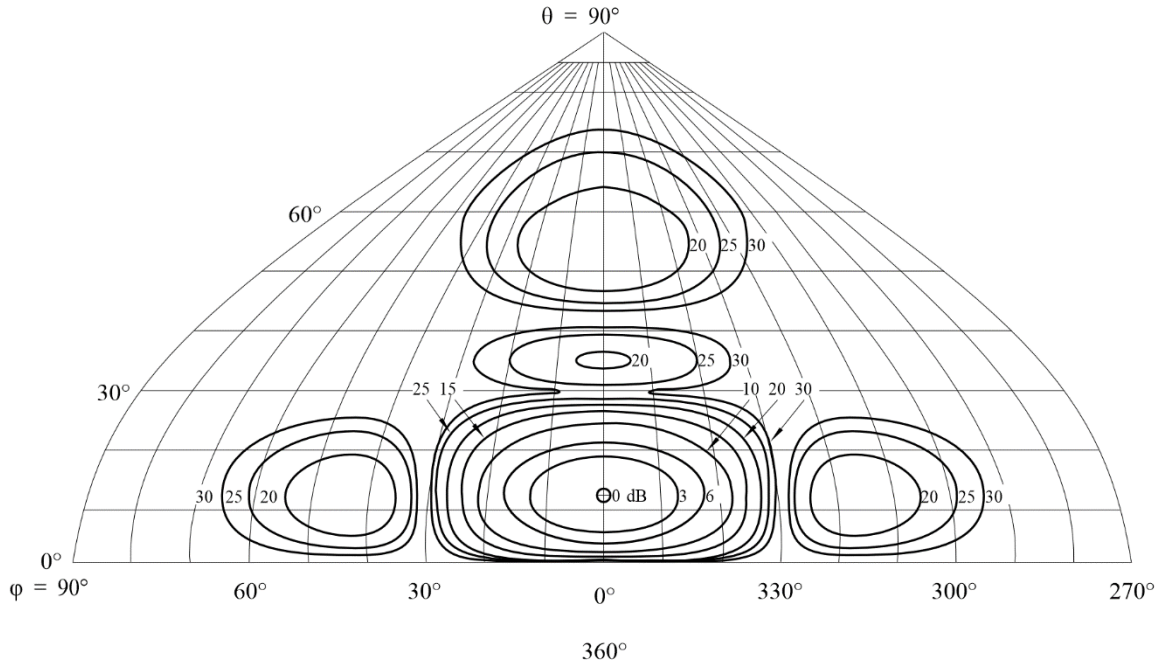
المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 12°



BS.0705-74b

الشكل 74C

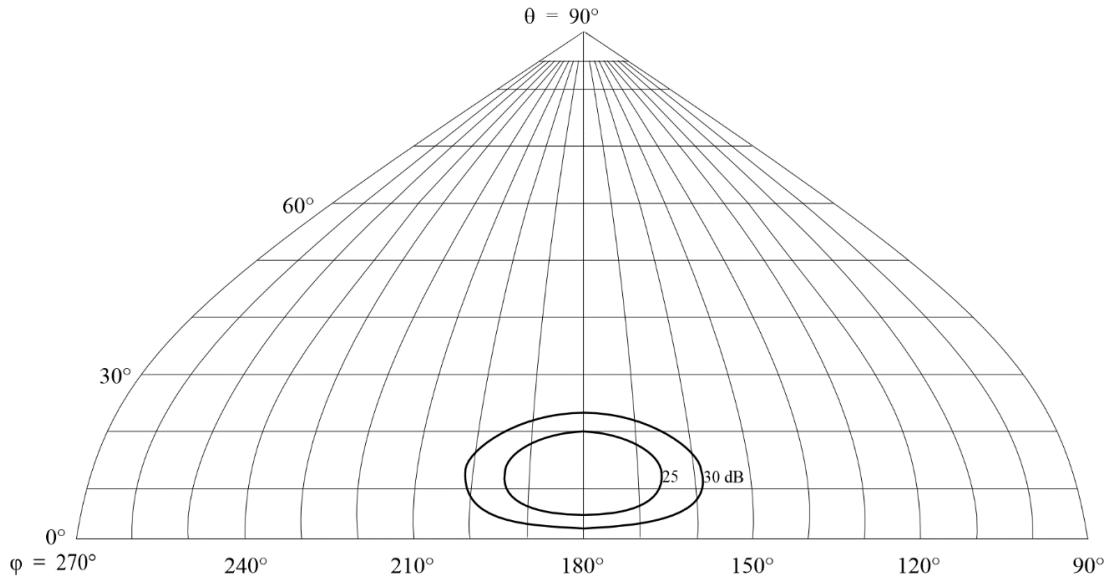
مخطط الإشعاع الأمامي



BS.0705-74c

الشكل 74D

مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-74d

الشكل 75A

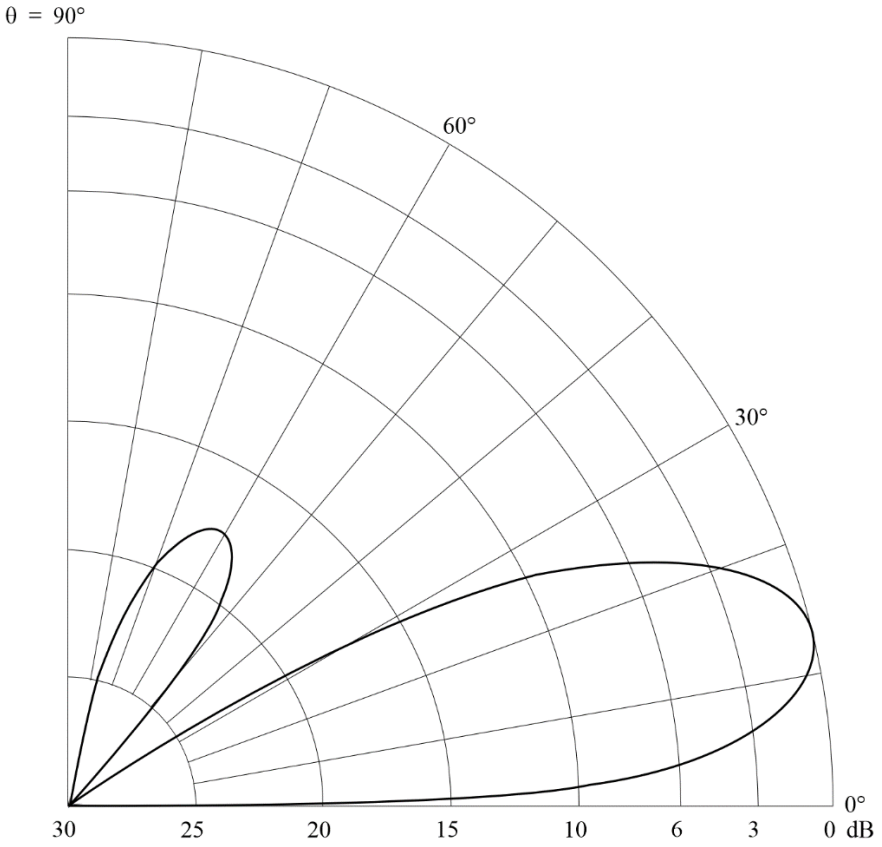
المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°

هوائي ستاري
بشاشة عاكسة
لا دورية
HR 4/4/0.5

$F_R = 0.7$

θ = 13°

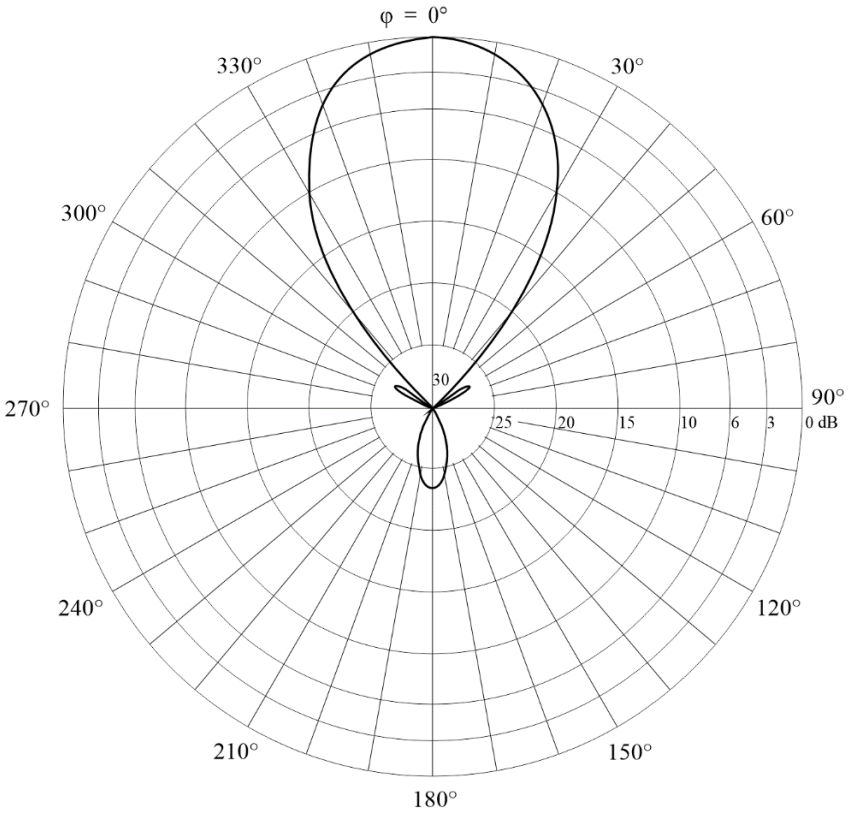
$G_i = 18.6$ dB



BS.0705-75a

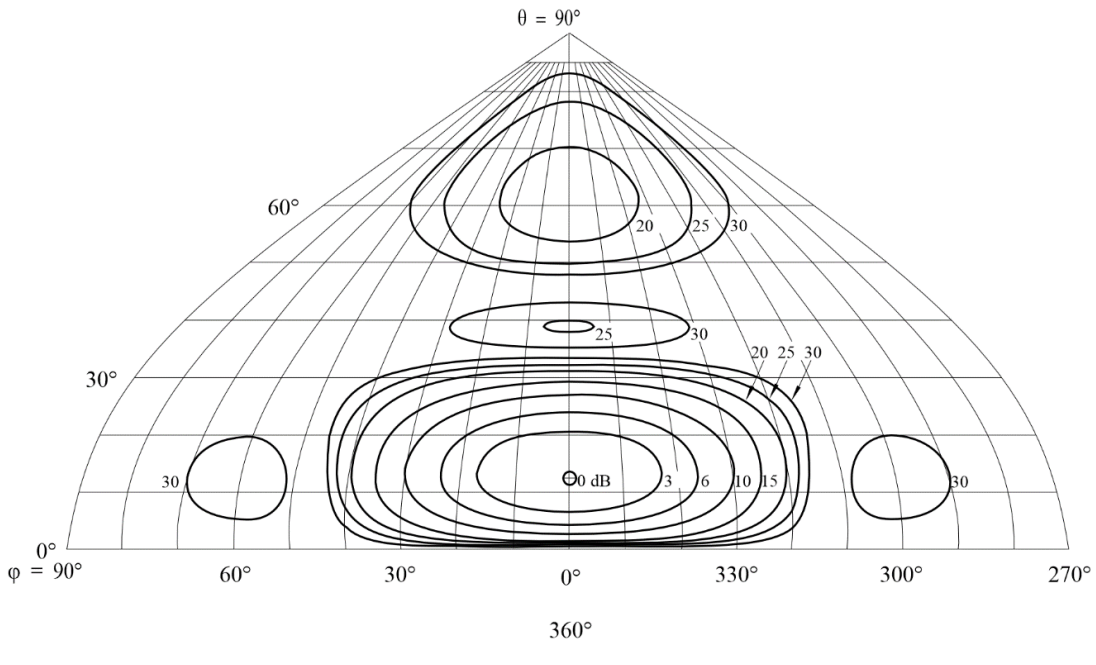
الشكل 75B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 13°



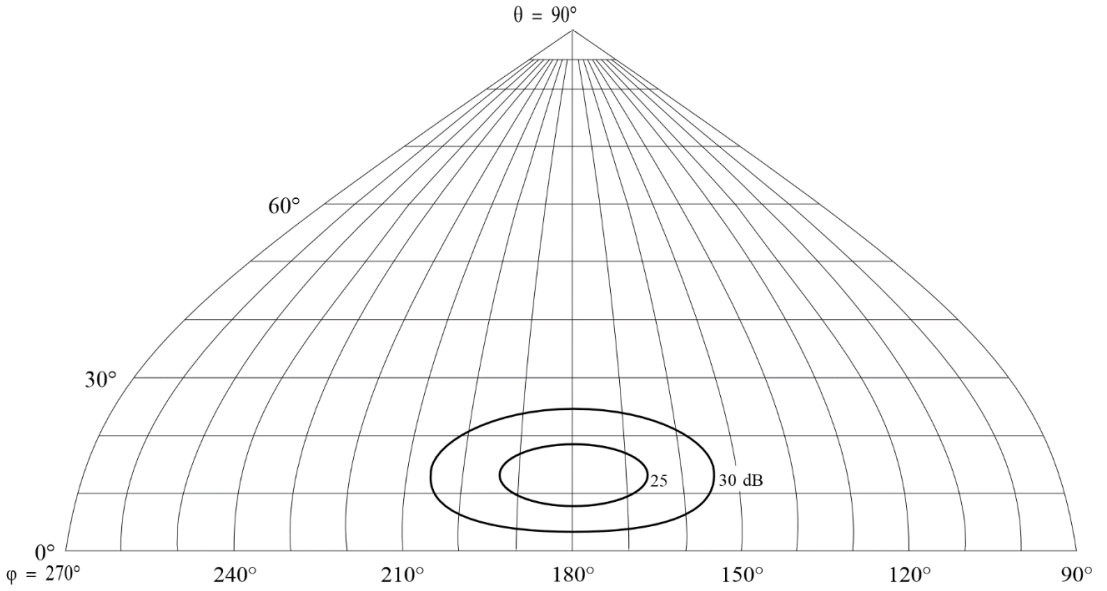
الشكل 75C

مخطط الإشعاع الأمامي



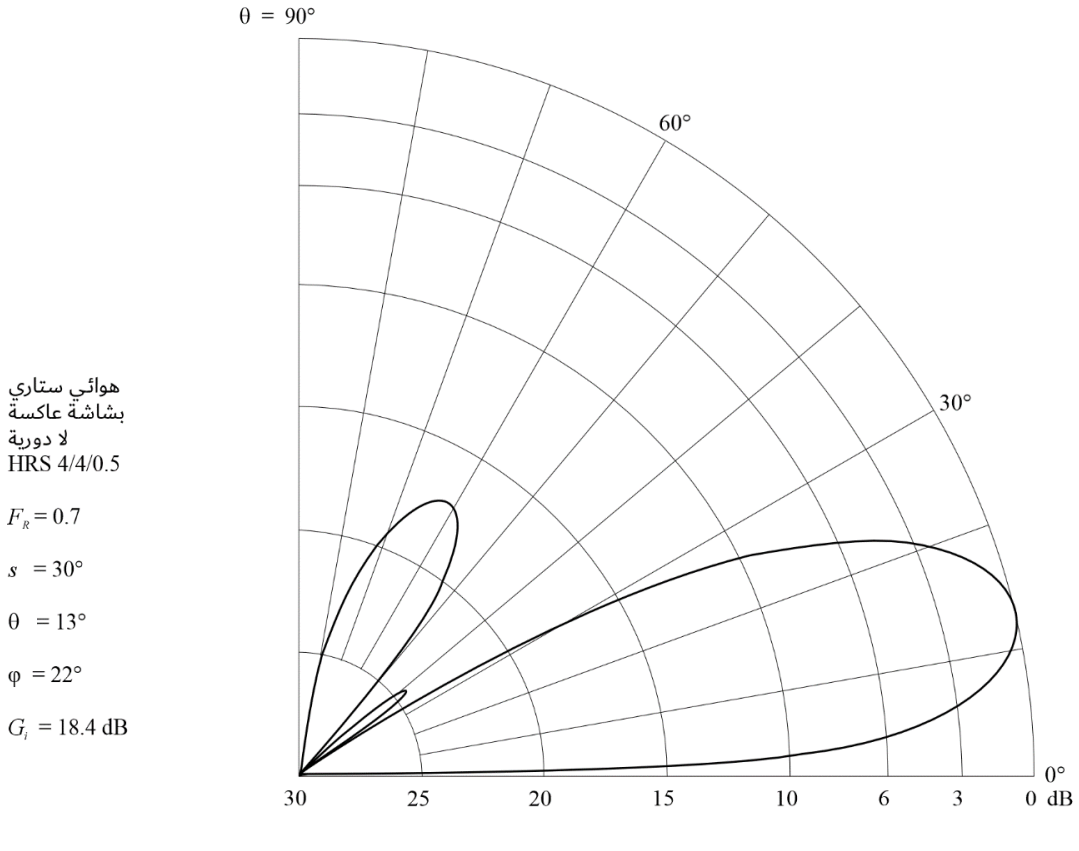
الشكل 75D

مخطط الإشعاع الخلفي



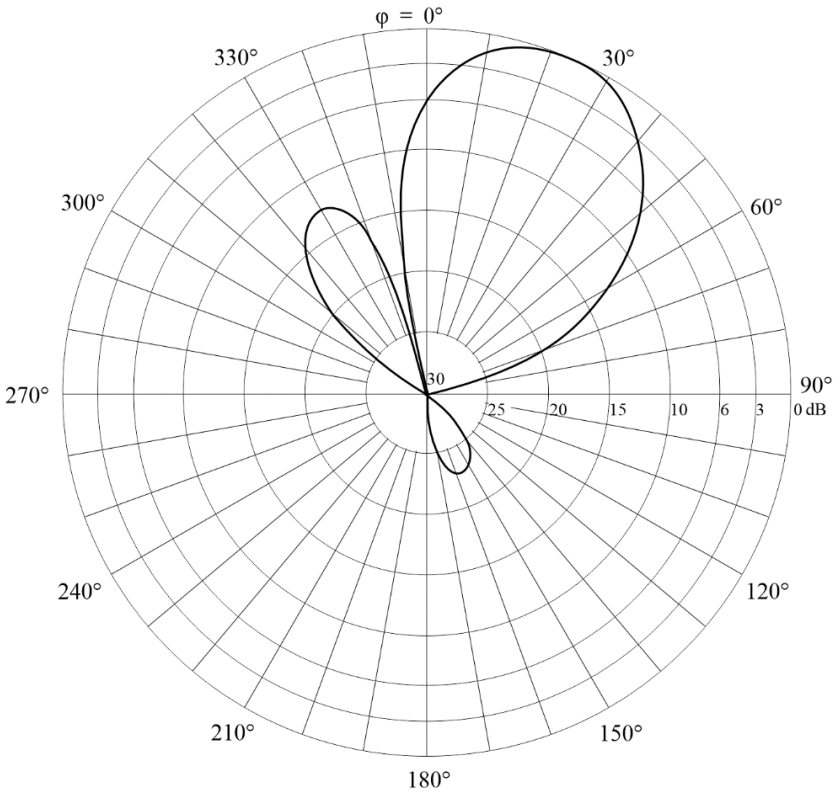
الشكل 76A

المخطط العمودي عند زاوية السمت 22°



الشكل 76B

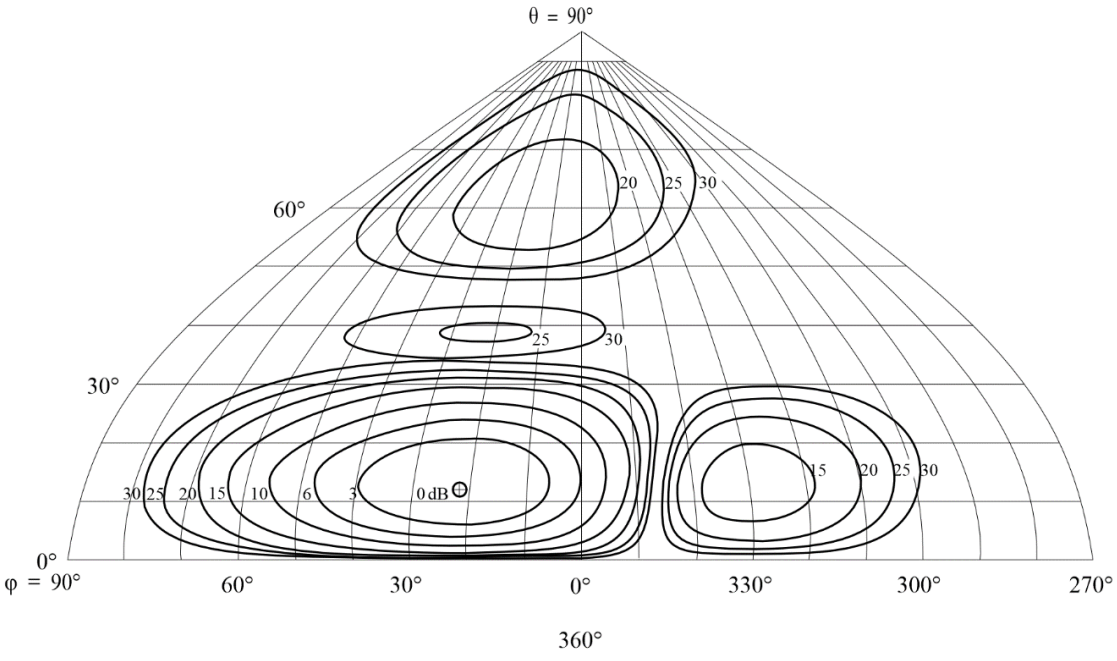
المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 13°



BS.0705-76b

الشكل 76C

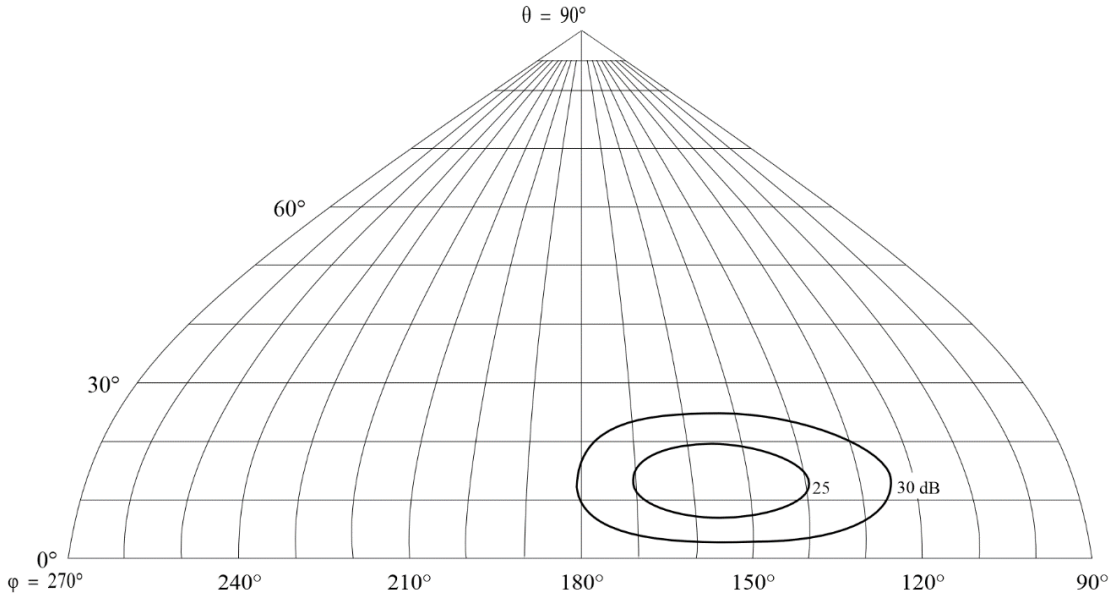
مخطط الإشعاع الأمامي



BS.0705-76c

الشكل 76D

مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-76d

الشكل 77A

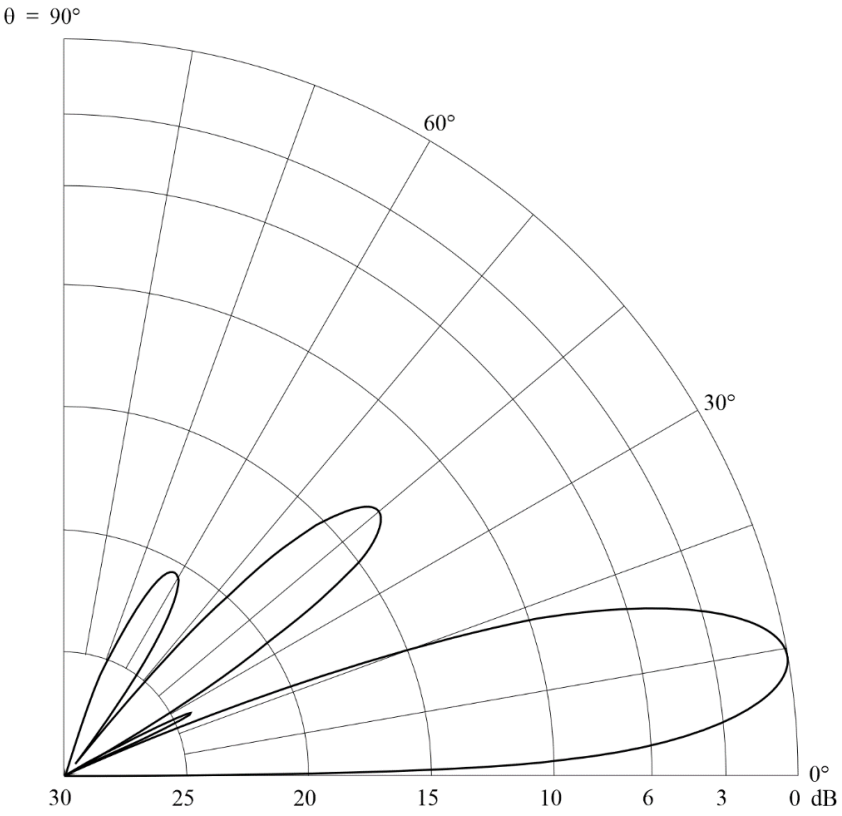
المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°

هوائي ستاري
بشاشة عاكسة
لا دورية
HR 4/4/0.5

$F_R = 1$

θ = 9°

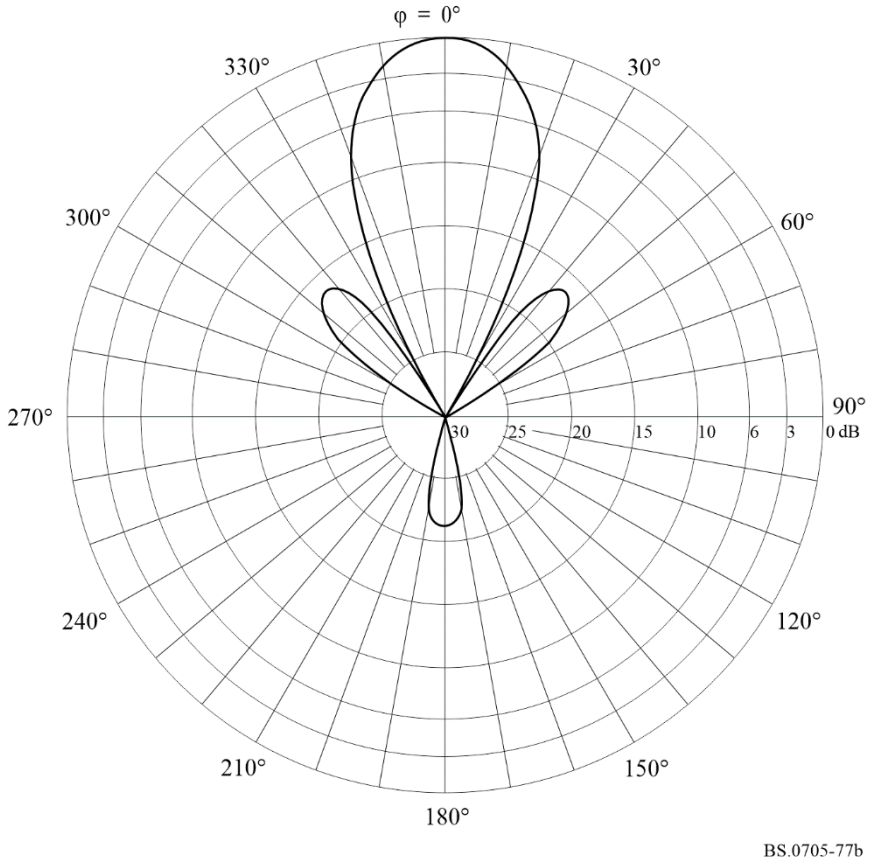
G_i = 21.2 dB



BS.0705-77a

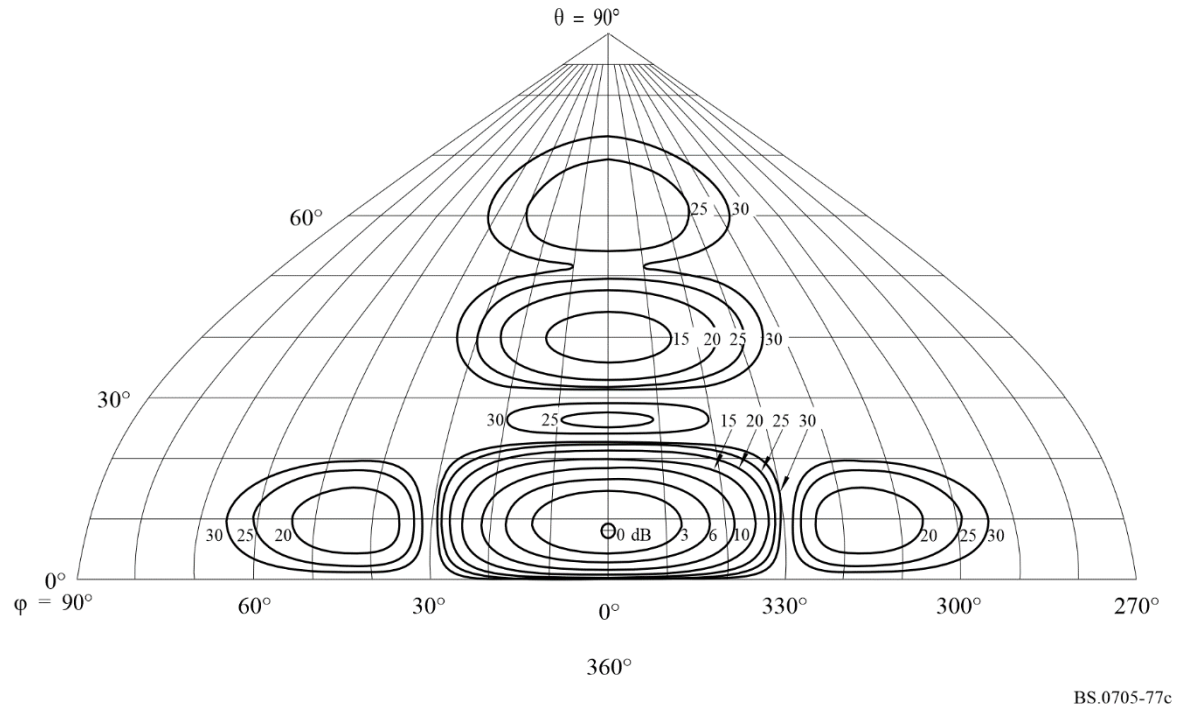
الشكل 77B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 9°



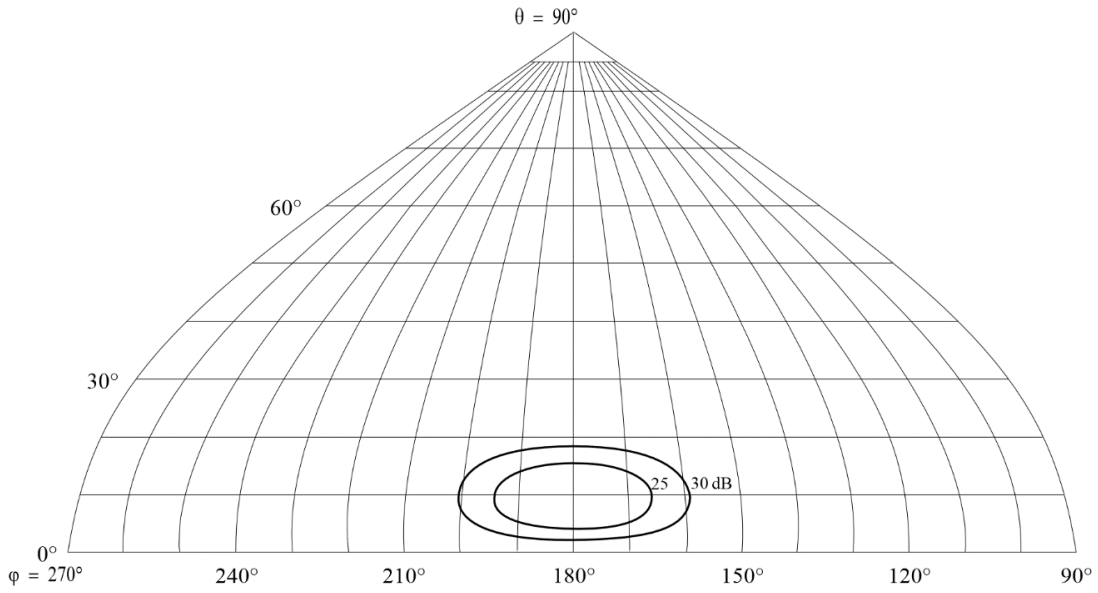
الشكل 77C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 77D

مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-77d

الشكل 78A

المخطط العمودي عند زاوية السمت 26°

هوائي ستاري
بشاشة عاكسة
لا دورية
HRS 4/4/0.5

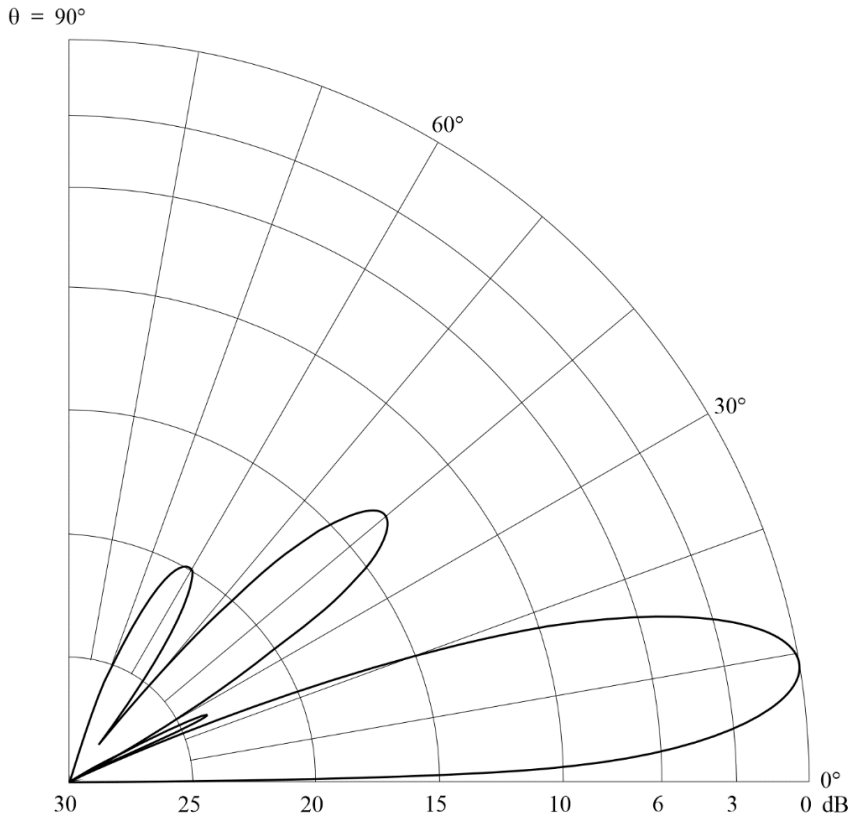
F_R = 1.0

s = 30°

θ = 9°

φ = 26°

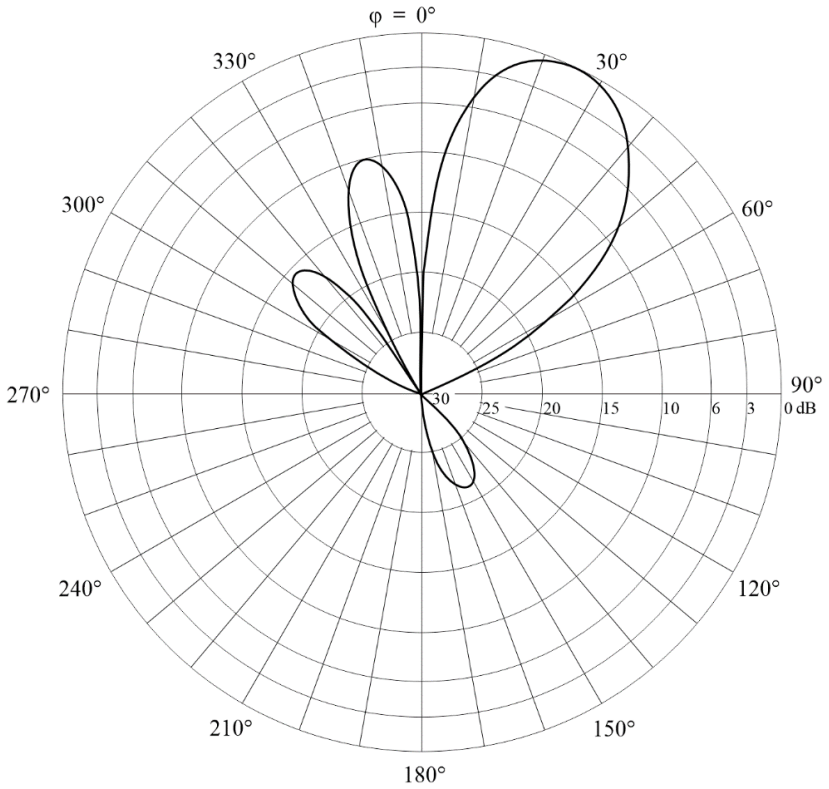
G_i = 20.8 dB



BS.0705-78a

الشكل 78B

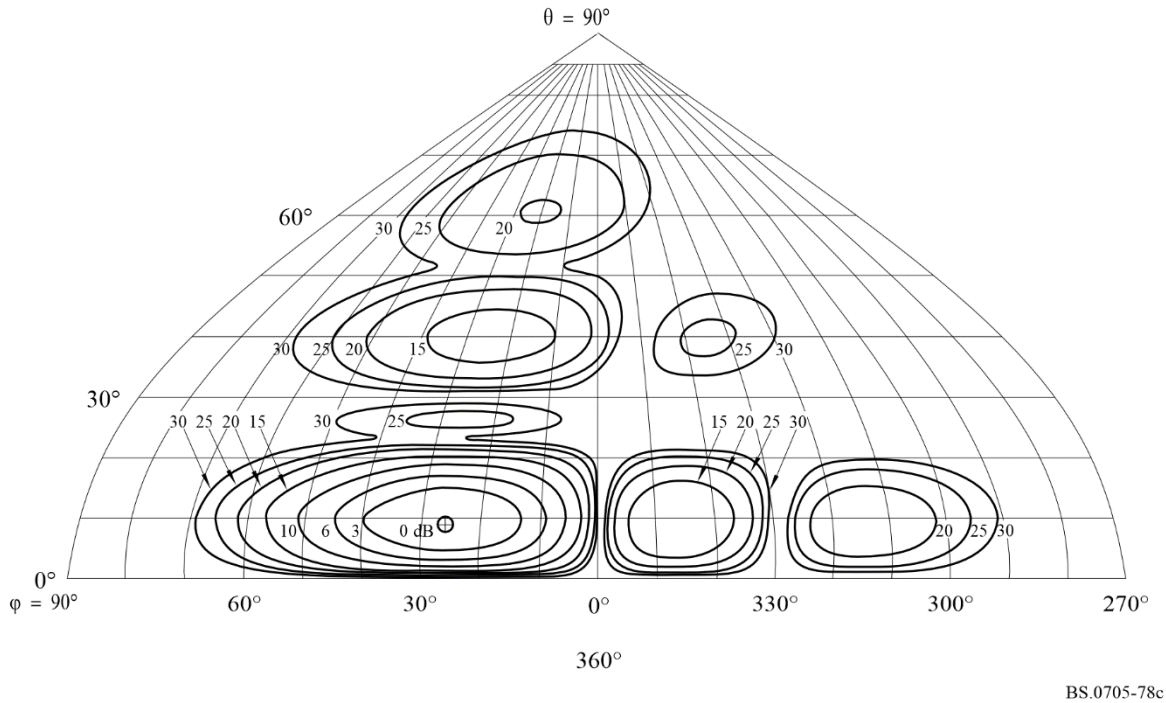
المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 9°



BS.0705-78b

الشكل 78C

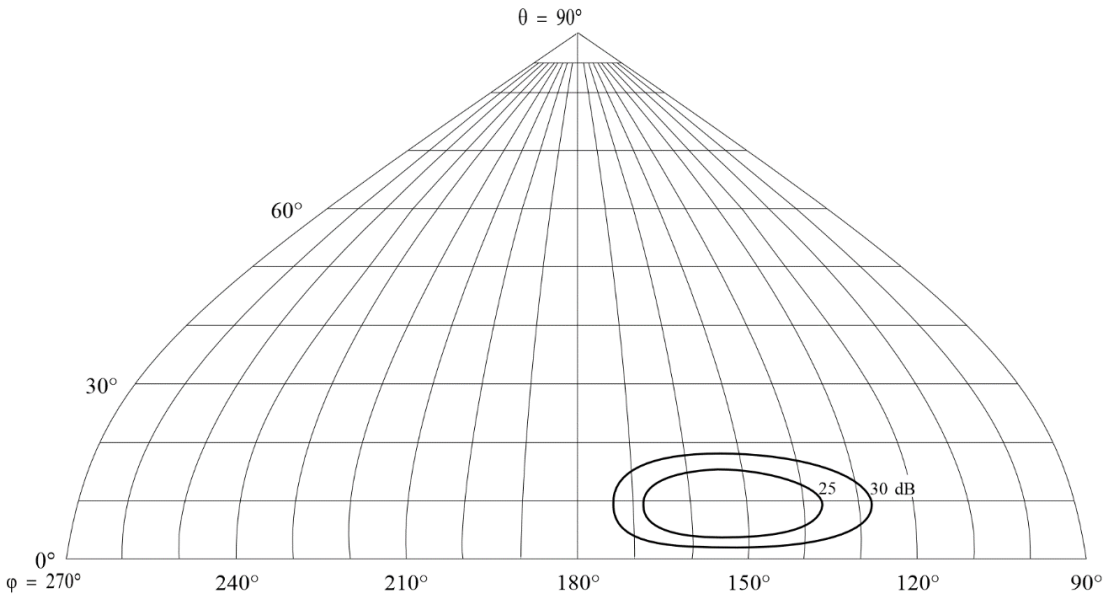
مخطط الإشعاع الأمامي



BS.0705-78c

الشكل 78D

مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-78d

الشكل 79A

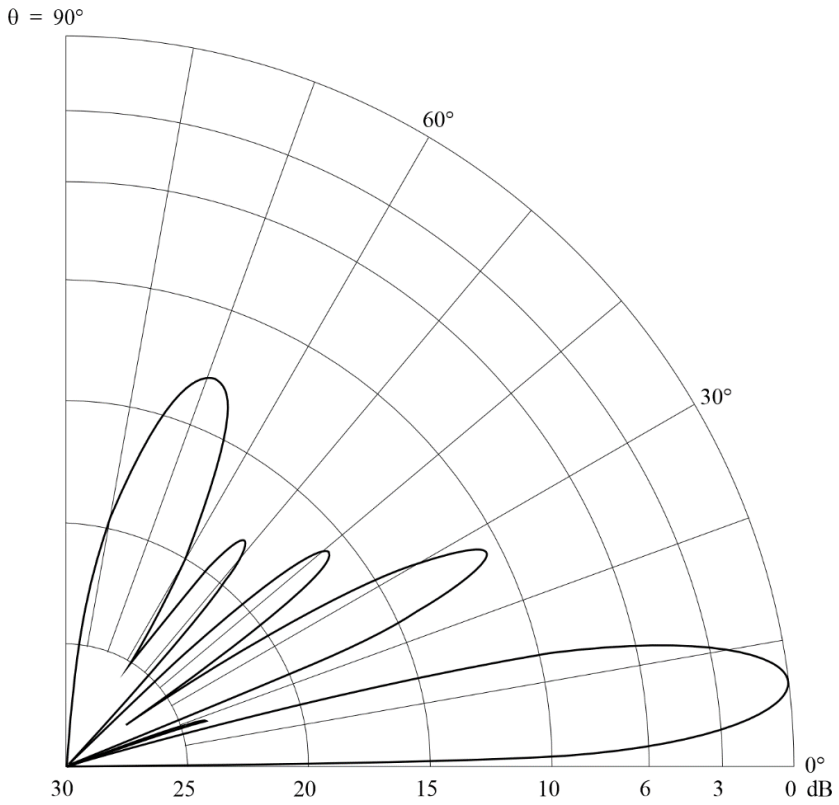
المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°

هوائي ستاري
بشاشة عاكسة
لا دورية
HR 4/4/0.5

F_R = 1.4

θ = 7°

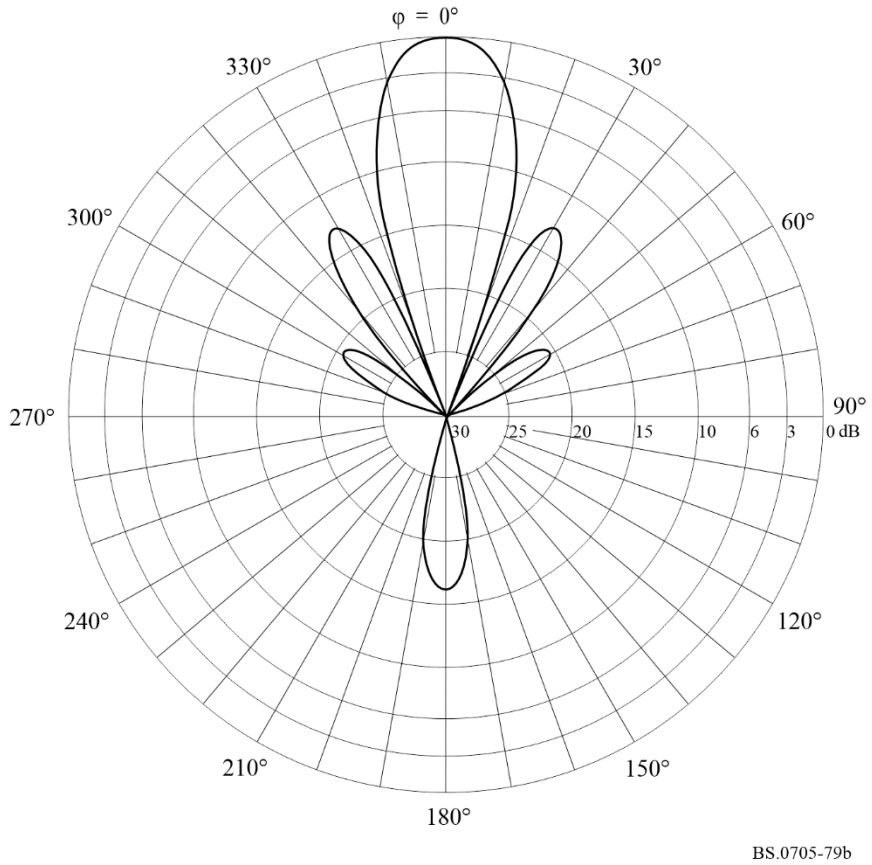
G_i = 23.2 dB



BS.0705-79a

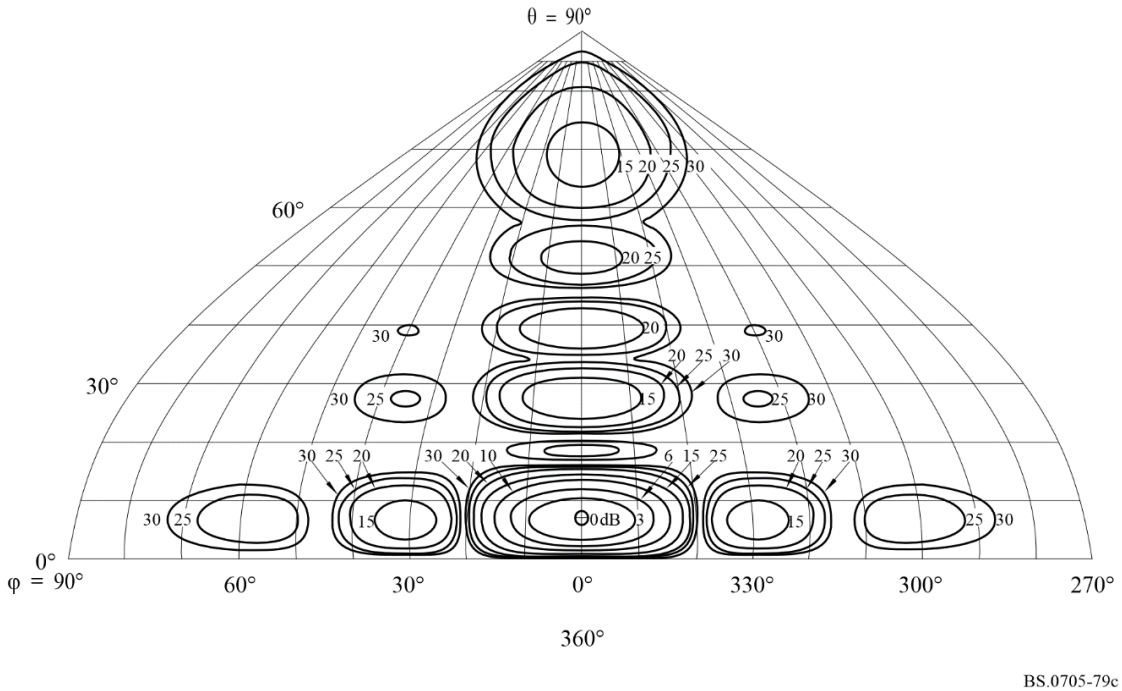
الشكل 79B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 7°



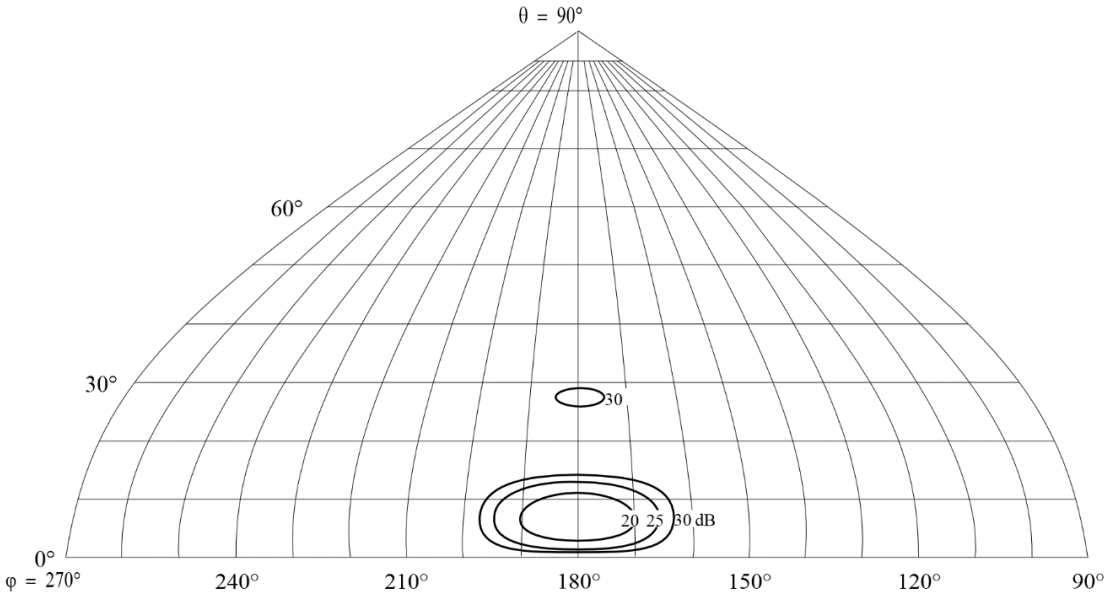
الشكل 79C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 79D

مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-79d

الشكل 80A

المخطط العمودي عند زاوية السمت 28°

هوائي ستاري
بشاشة عاكسة
لا دورية
HRS 4/4/0.5

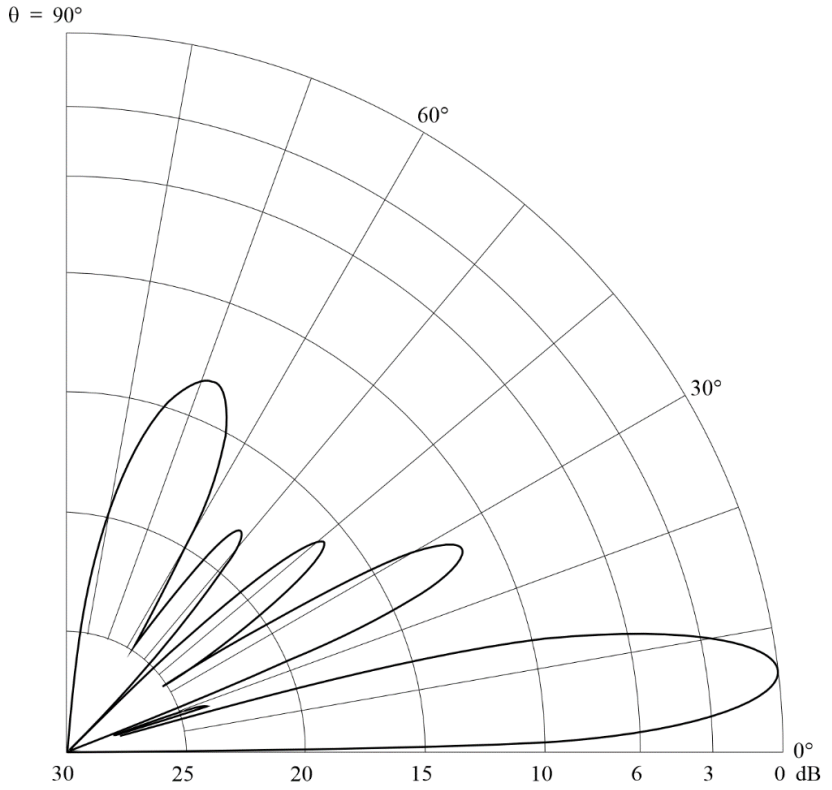
F_R = 1.4

s = 30°

θ = 7°

φ = 28°

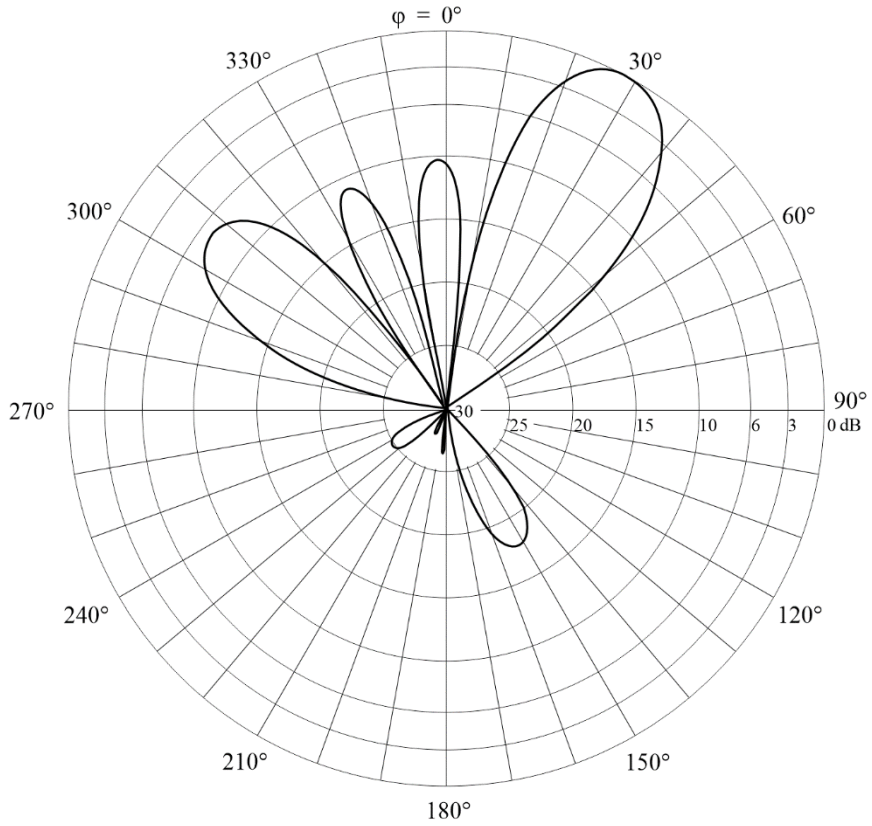
G_i = 22.2 dB



BS.0705-80a

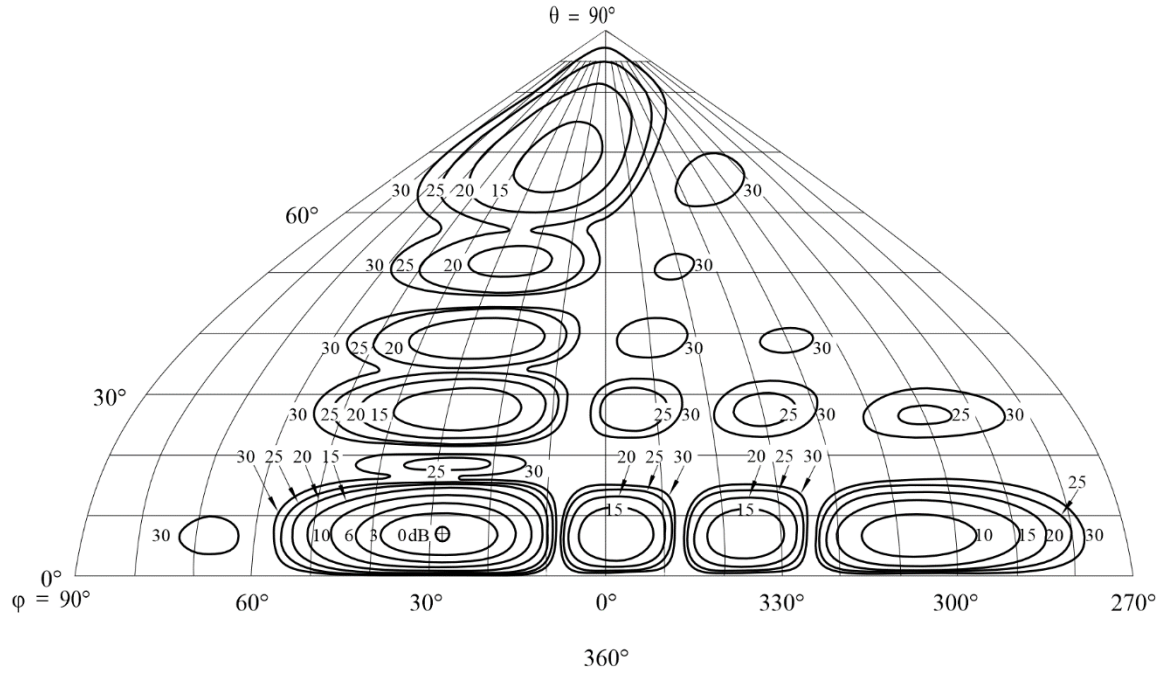
الشكل 80B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 7°



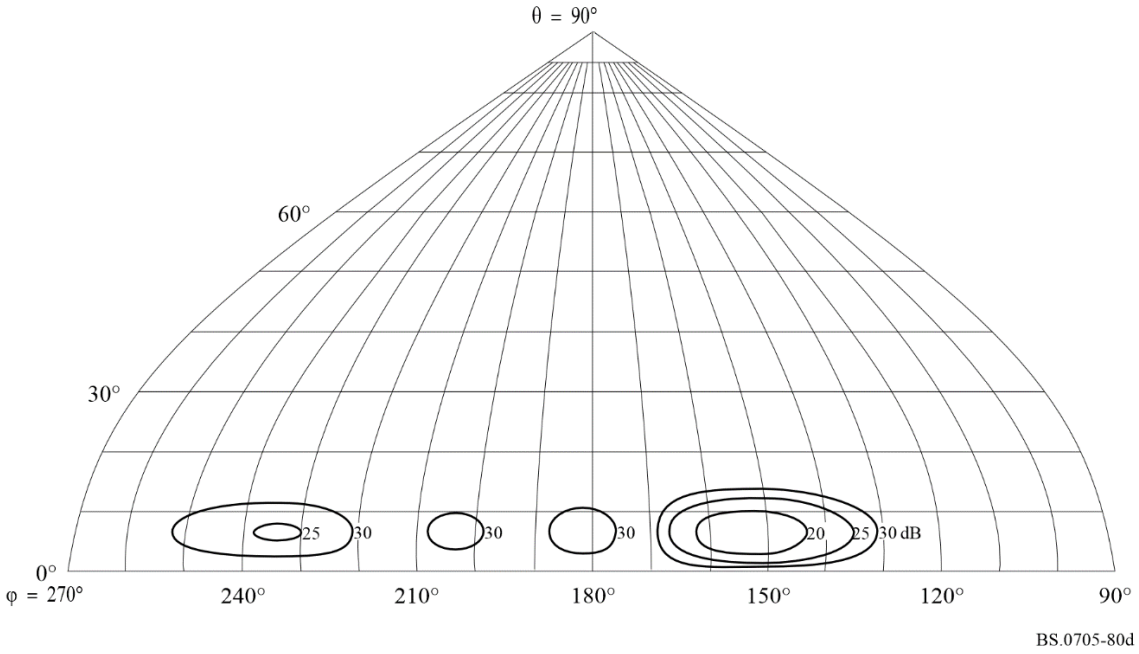
الشكل 80C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 80D

مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-80d

الشكل 81A

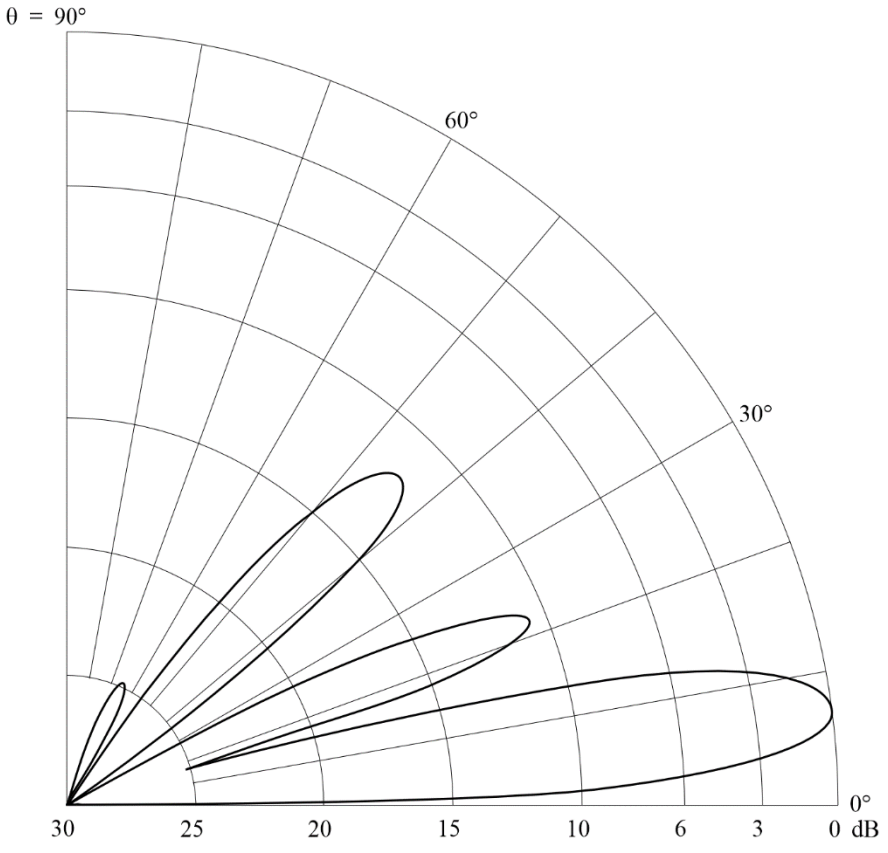
المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°

هوائي ستاري
بشاشة عاكسة
لا دورية
HR 4/4/1.0

$F_R = 1$

θ = 7°

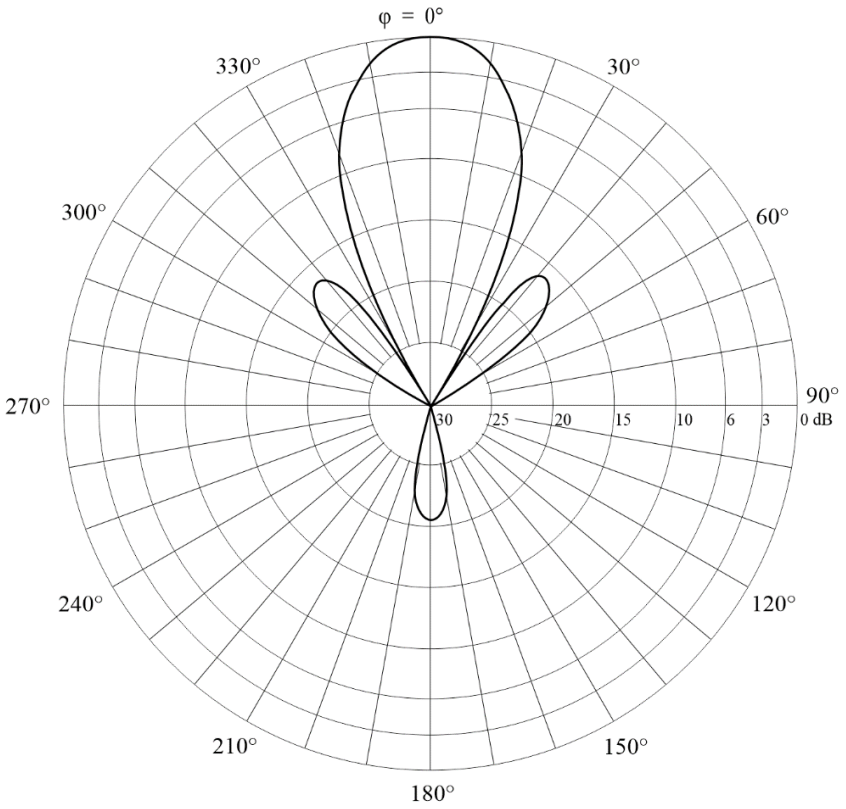
G_i = 22.0 dB



BS.0705-81a

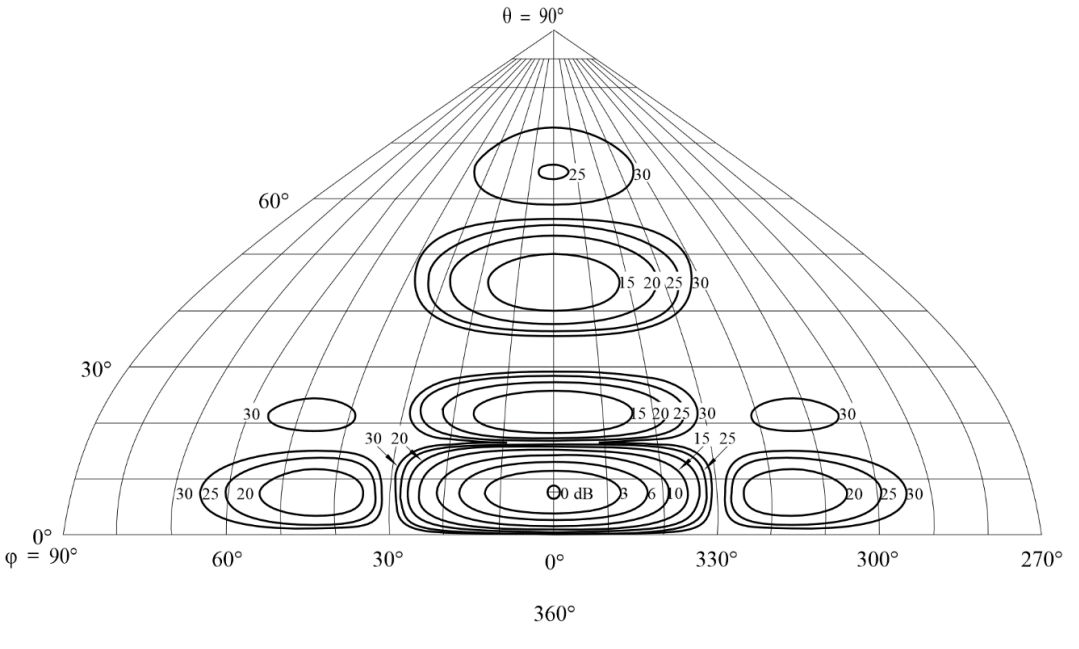
الشكل 81B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 7°



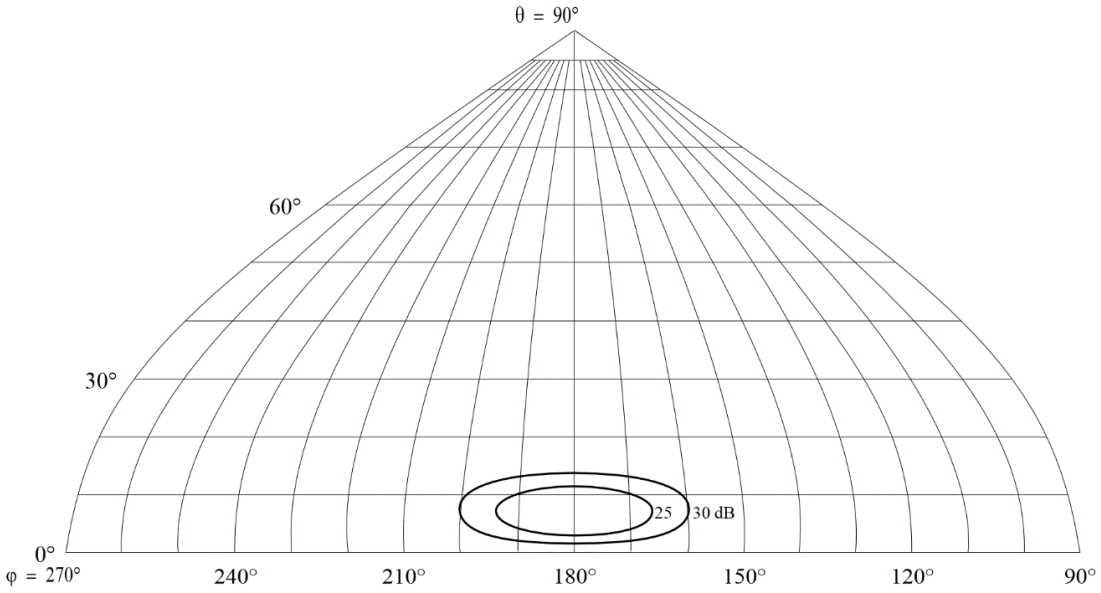
الشكل 81C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 81D

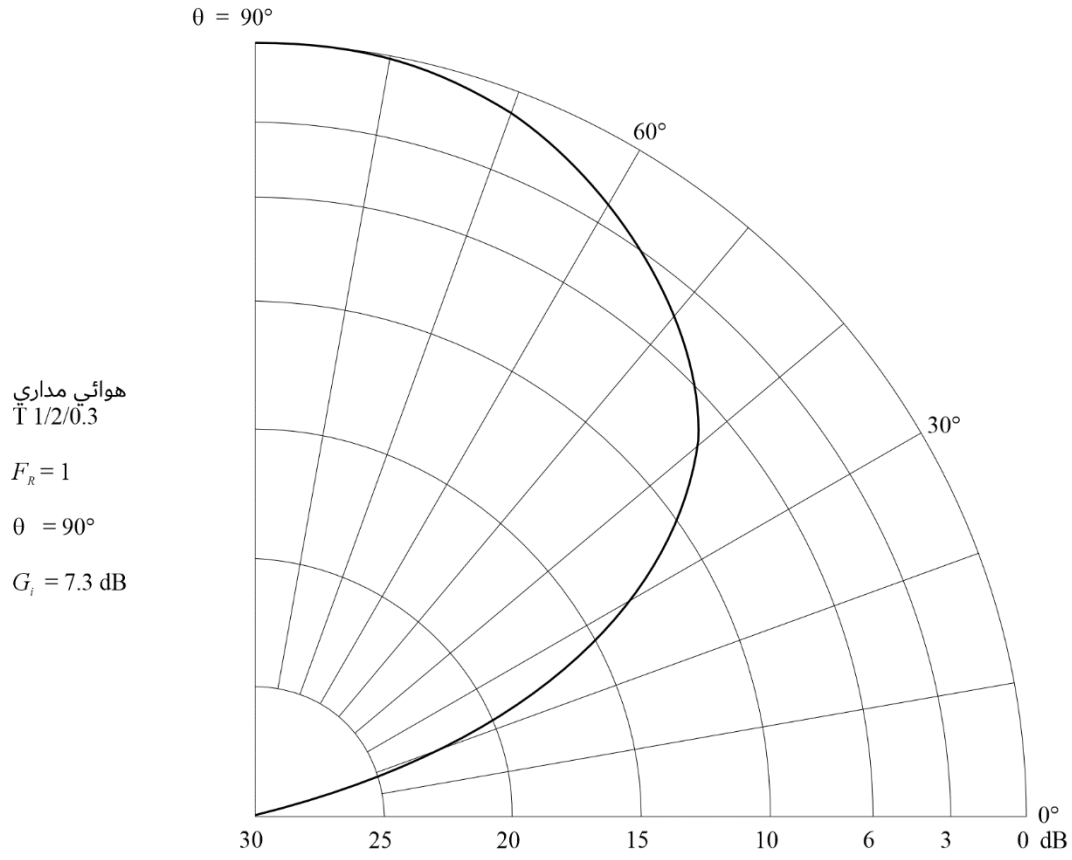
مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-81d

الشكل 82A

المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°



هوائي مداري
T 1/2/0.3

$F_R = 1$

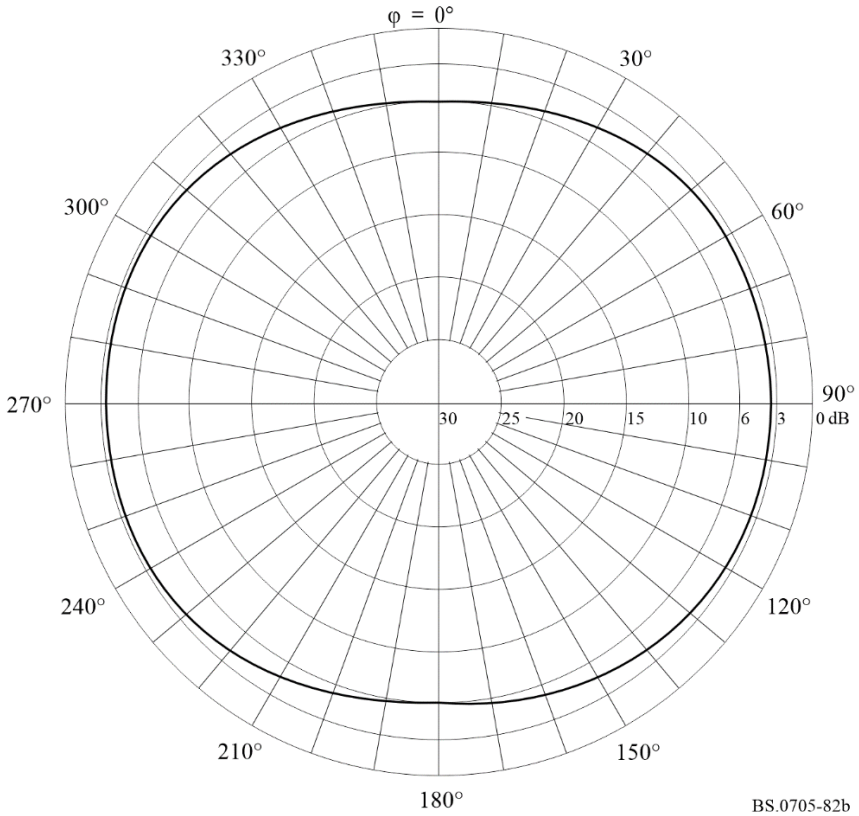
θ = 90°

G_i = 7.3 dB

BS.0705-82a

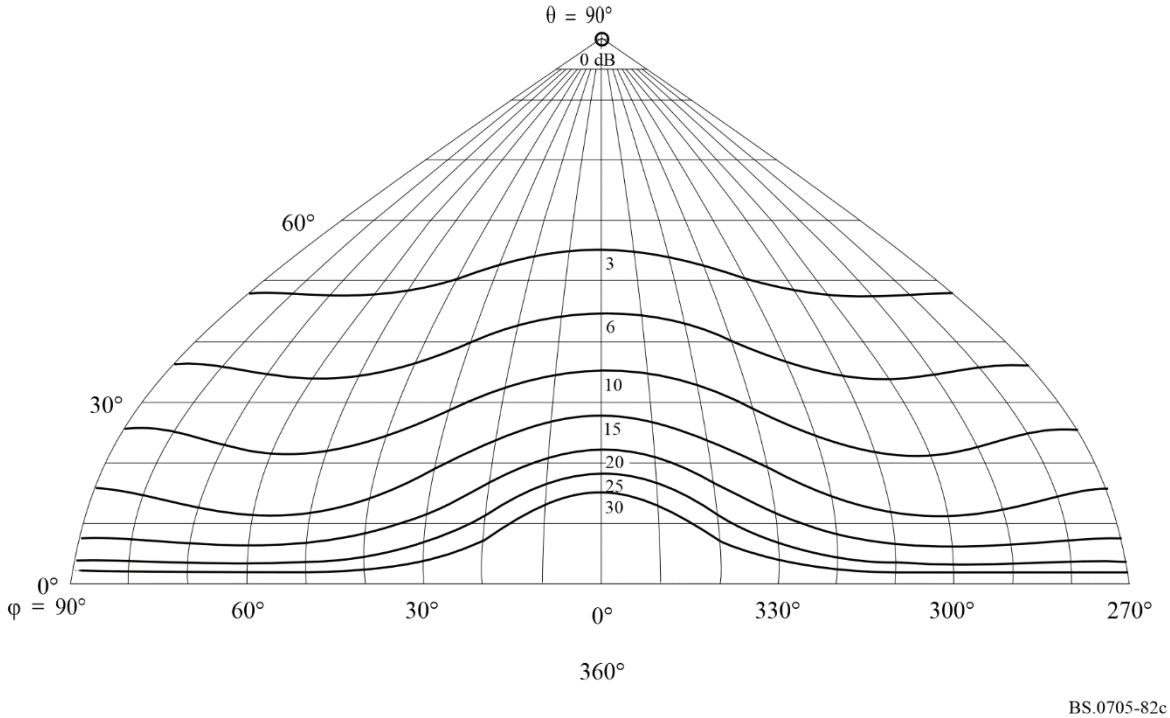
الشكل 82B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 45°



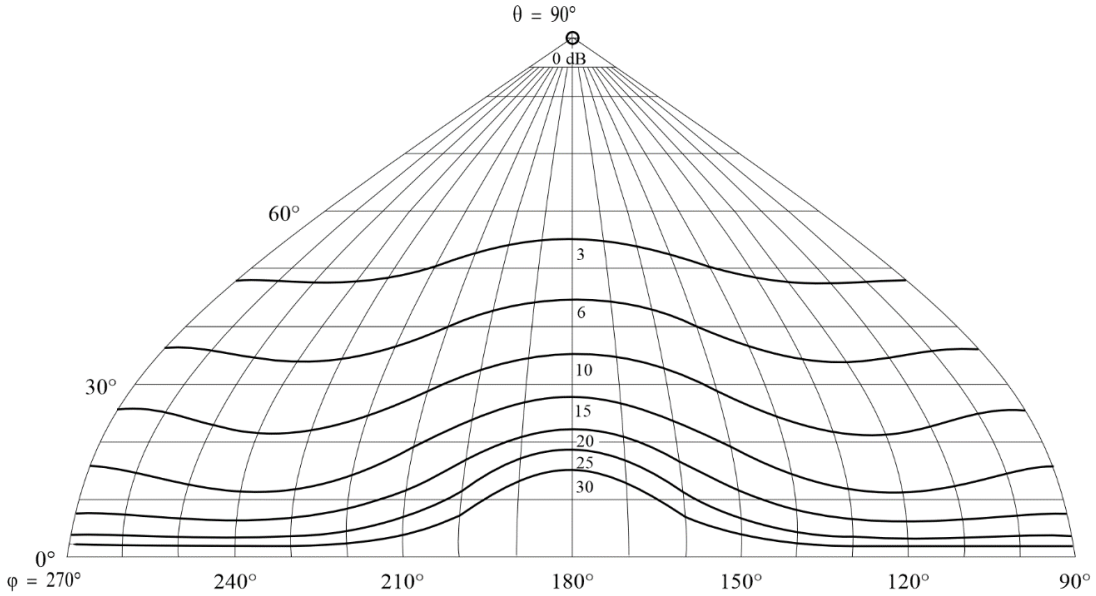
الشكل 82C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 82D

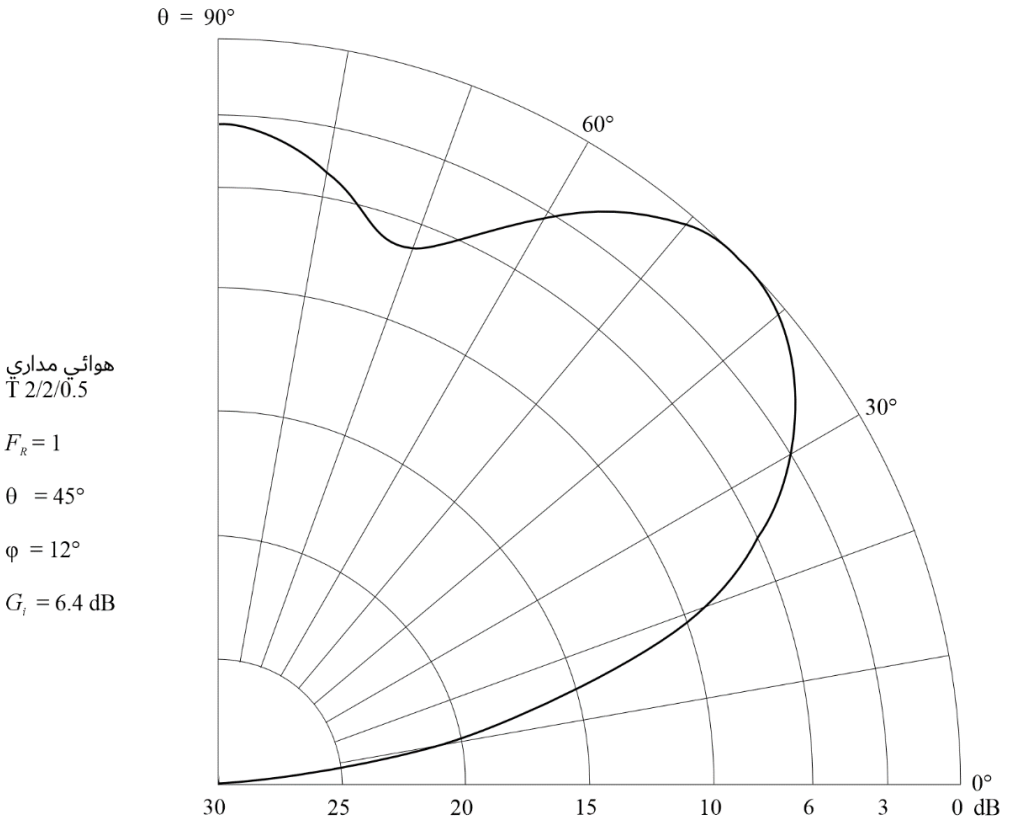
مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-82d

الشكل 83A

المخطط العمودي عند زاوية السمت 12°



هوائي مداري
T 2/2/0.5

$F_R = 1$

θ = 45°

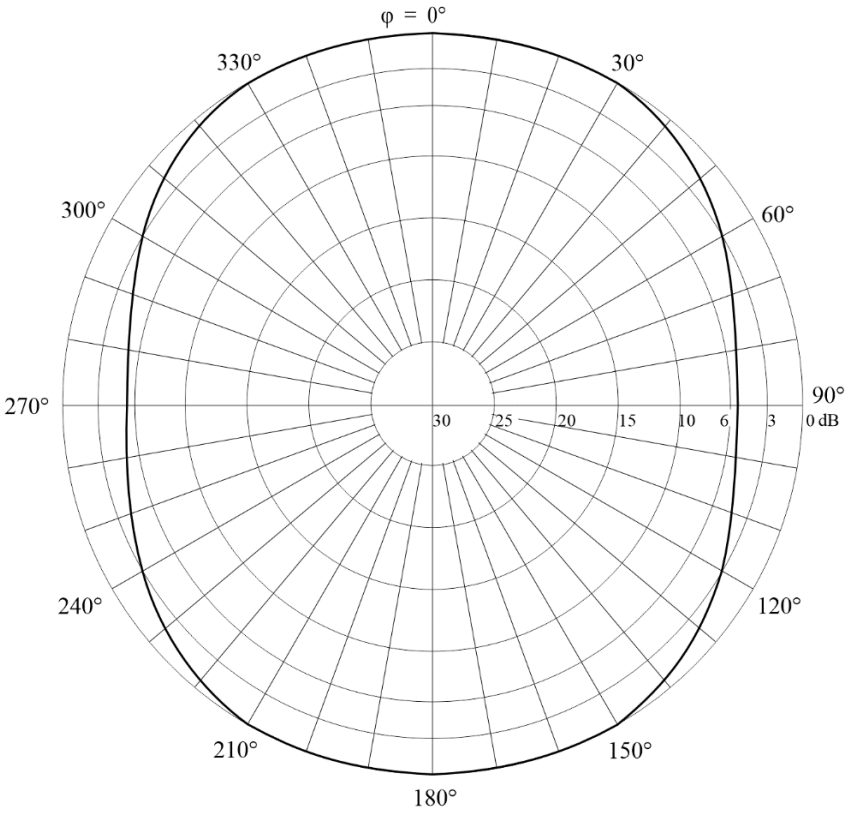
φ = 12°

$G_i = 6.4$ dB

BS.0705-83a

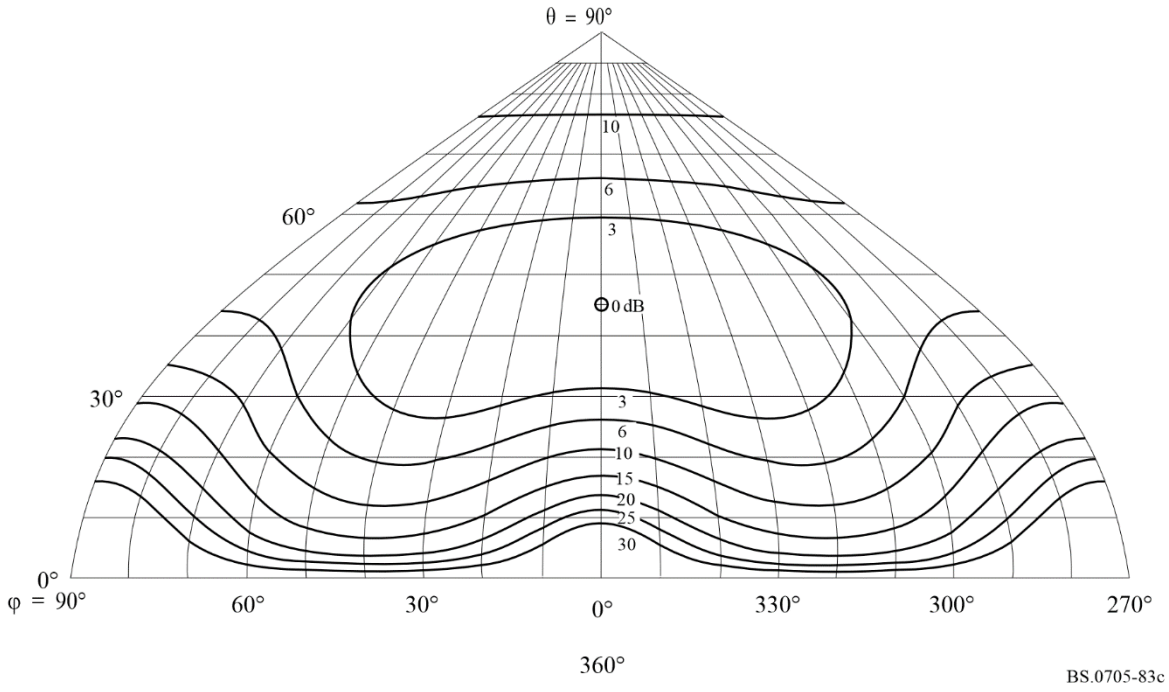
الشكل 83B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 45°



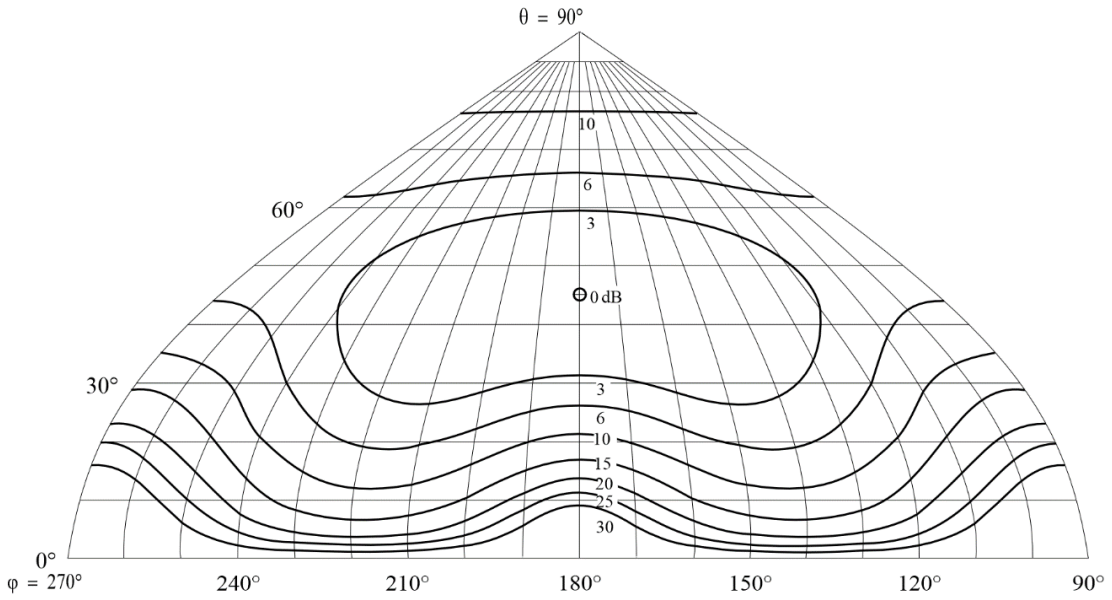
الشكل 83C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 83D

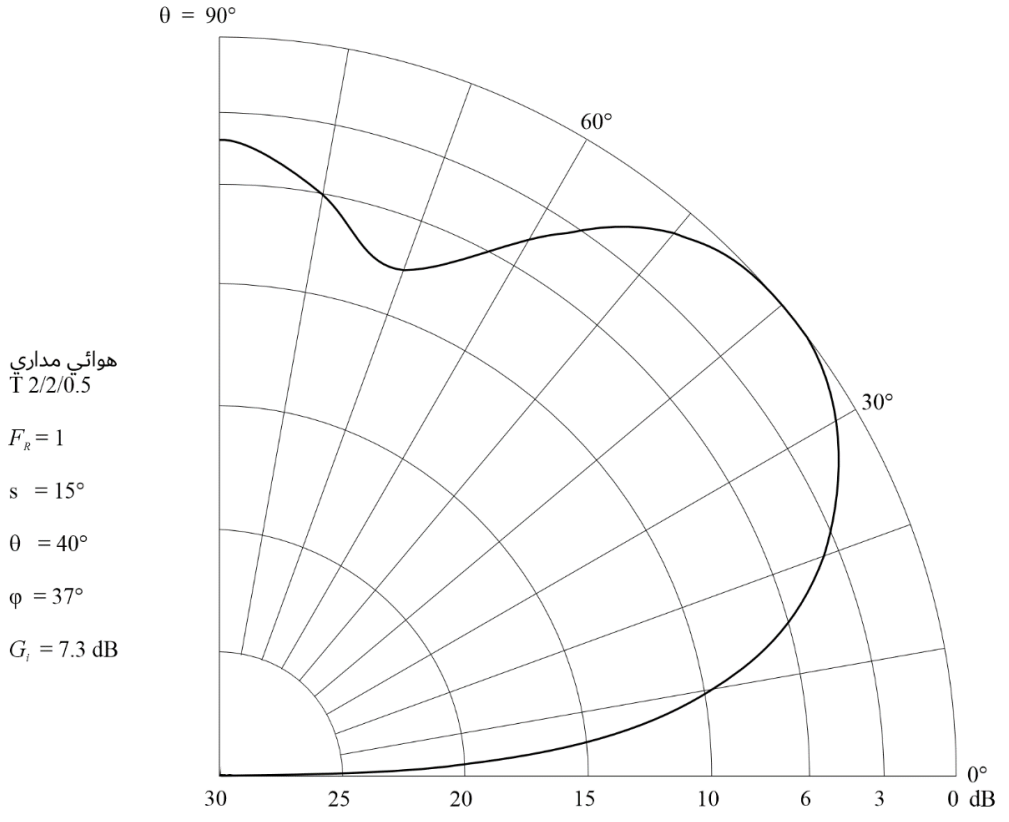
مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-83d

الشكل 84A

المخطط العمودي عند زاوية السمت 37°



هوائي مداري
T 2/2/0.5

$F_R = 1$

s = 15°

θ = 40°

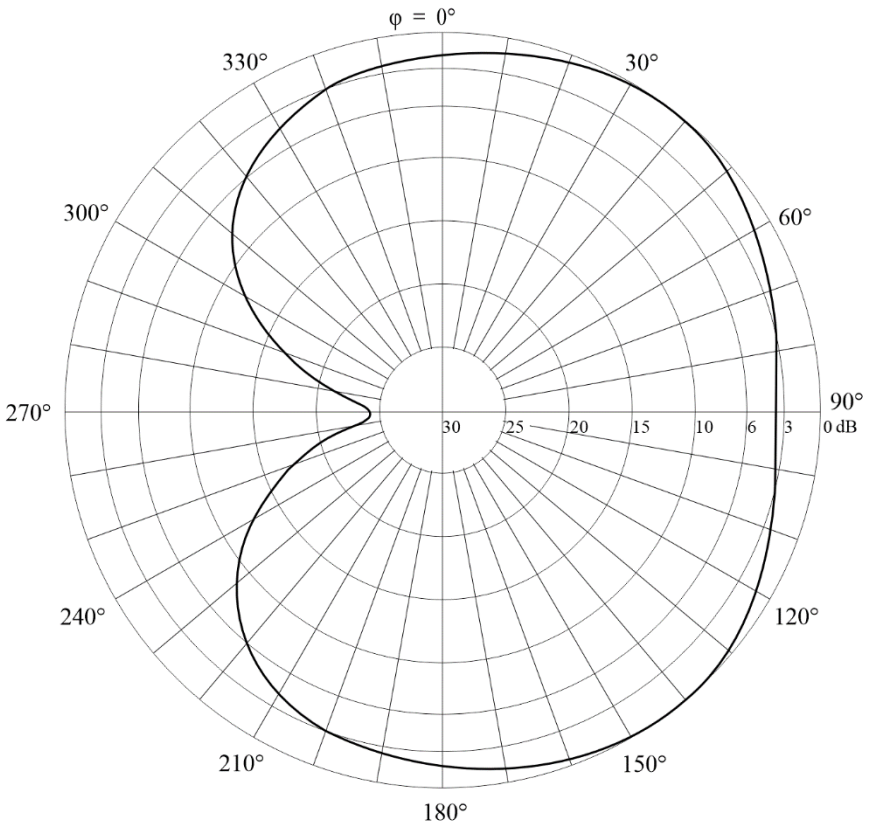
φ = 37°

G_i = 7.3 dB

BS.0705-84a

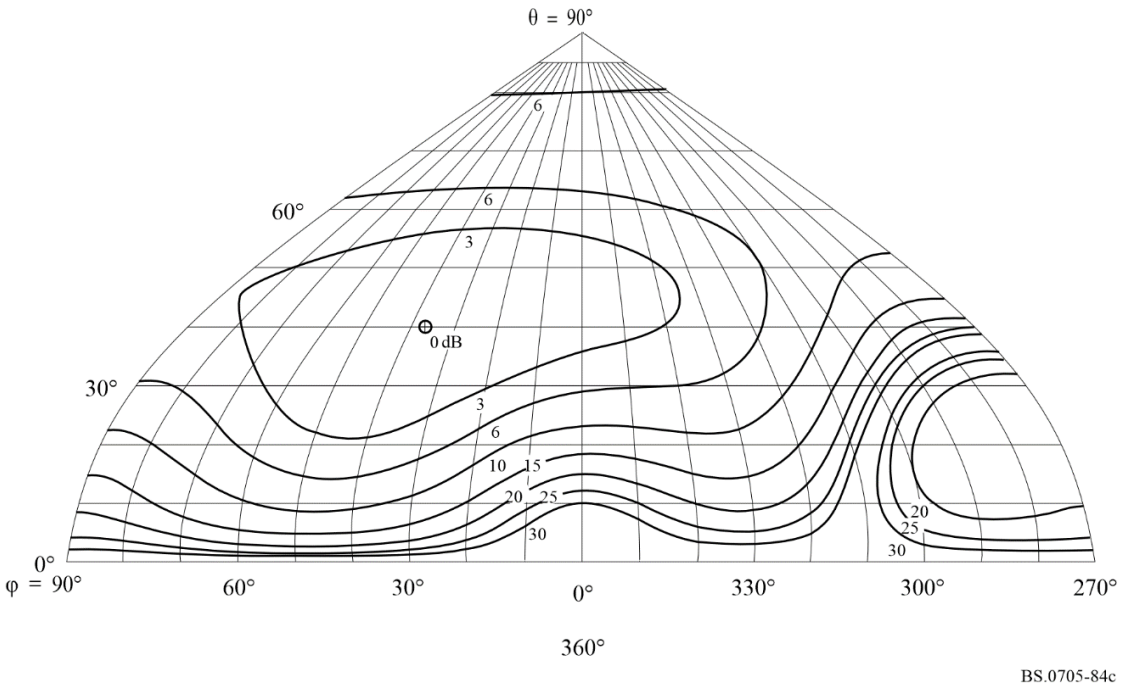
الشكل 84B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 40°



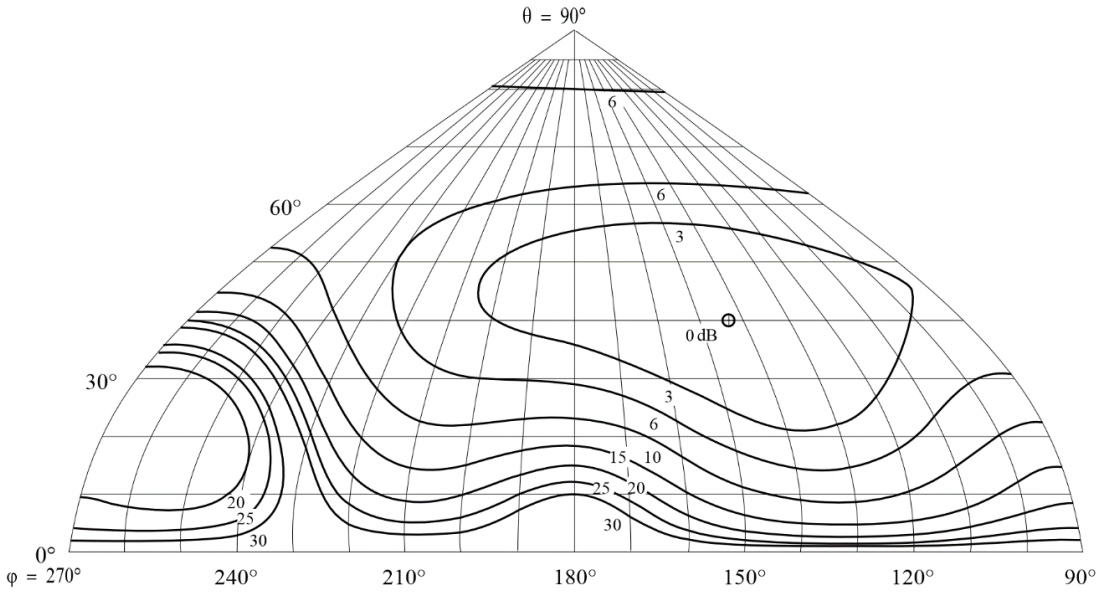
الشكل 84C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 84D

مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-84d

الشكل 85A

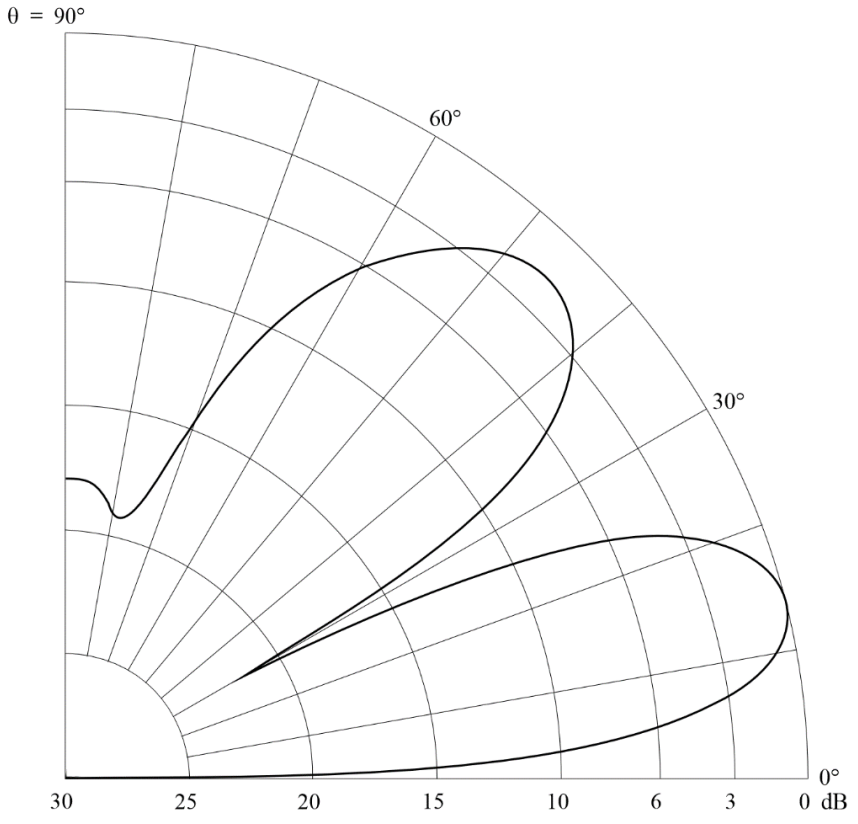
المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°

هوائي لوغاريتمي دوري أفقي
LPH 18/35/30/30/26/89

f = 10 MHz

θ = 14°

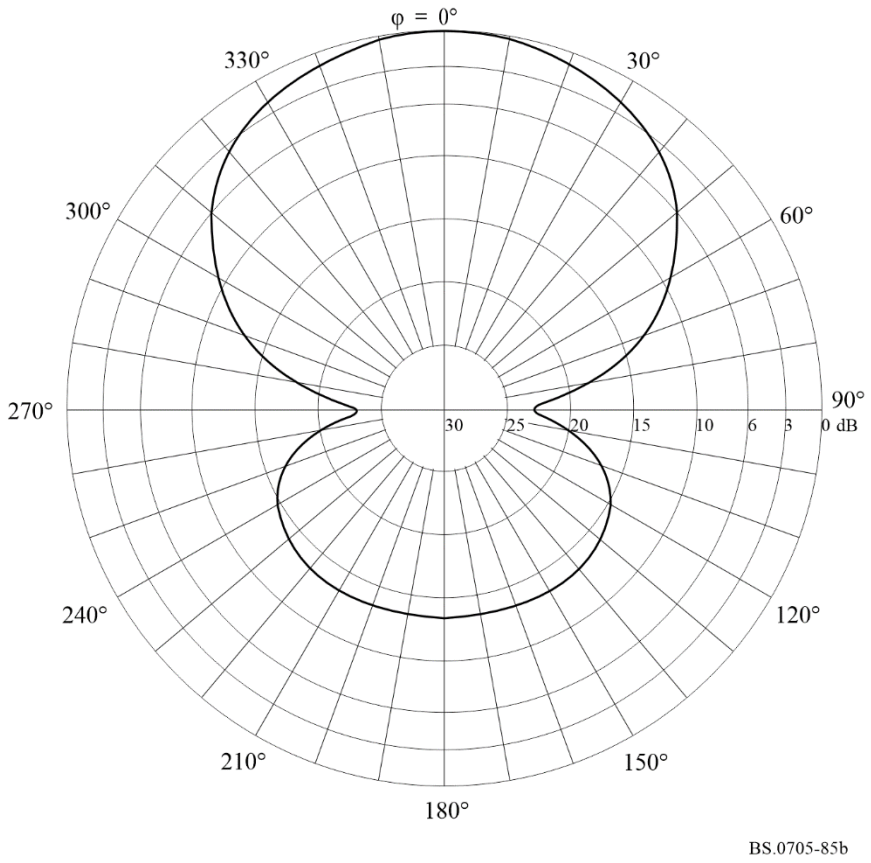
G_i = 17.3 dB



BS.0705-85a

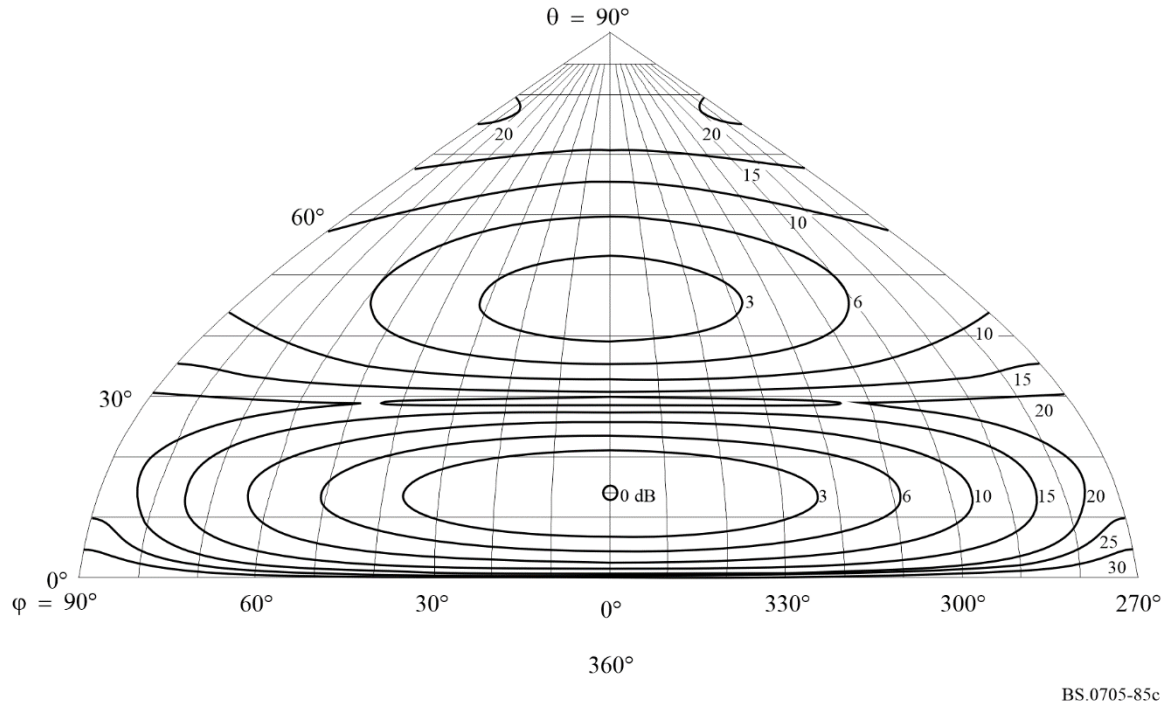
الشكل 85B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 14°



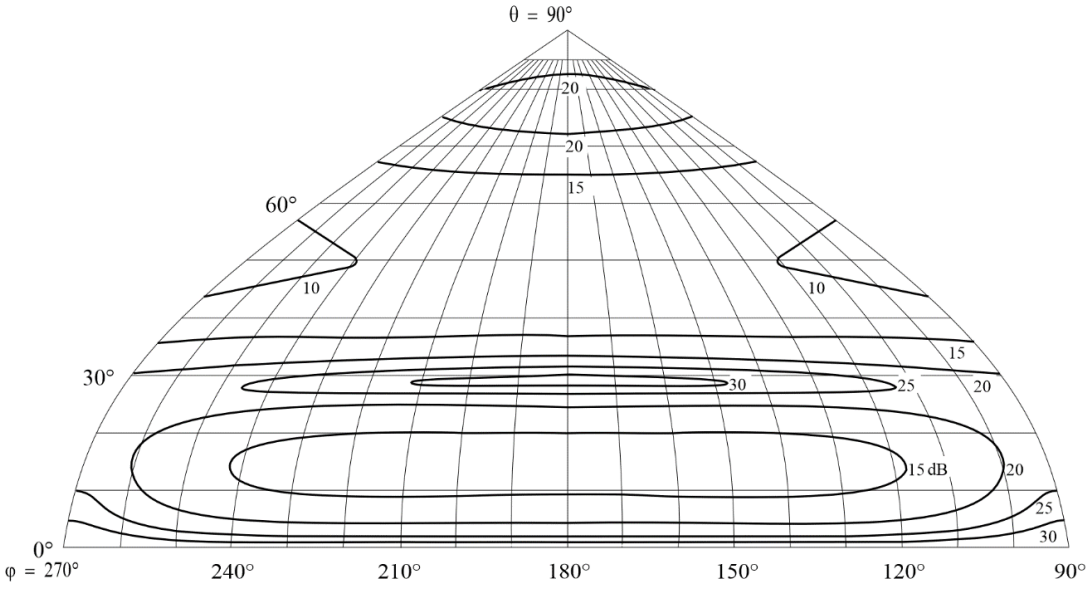
الشكل 85C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 85D

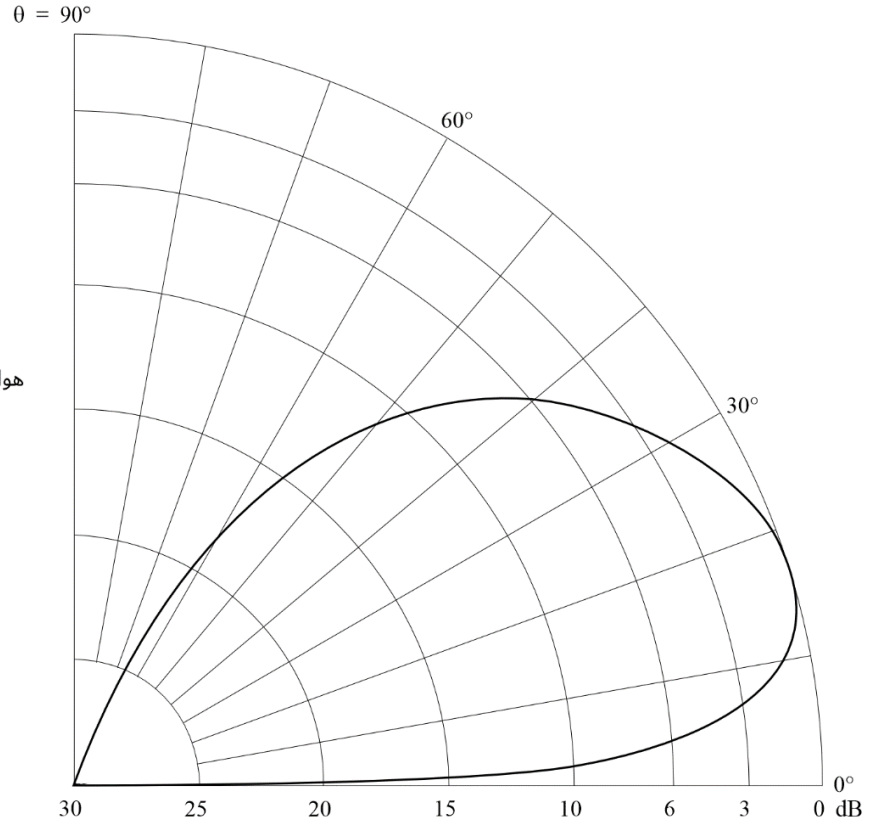
مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-85d

الشكل 86A

المخطط العمودي عند زاوية السمت °0



هوائي لوغاريتمي دوري عمودي
LPV 18/45/3/17/6/34/220

f = 10 MHz

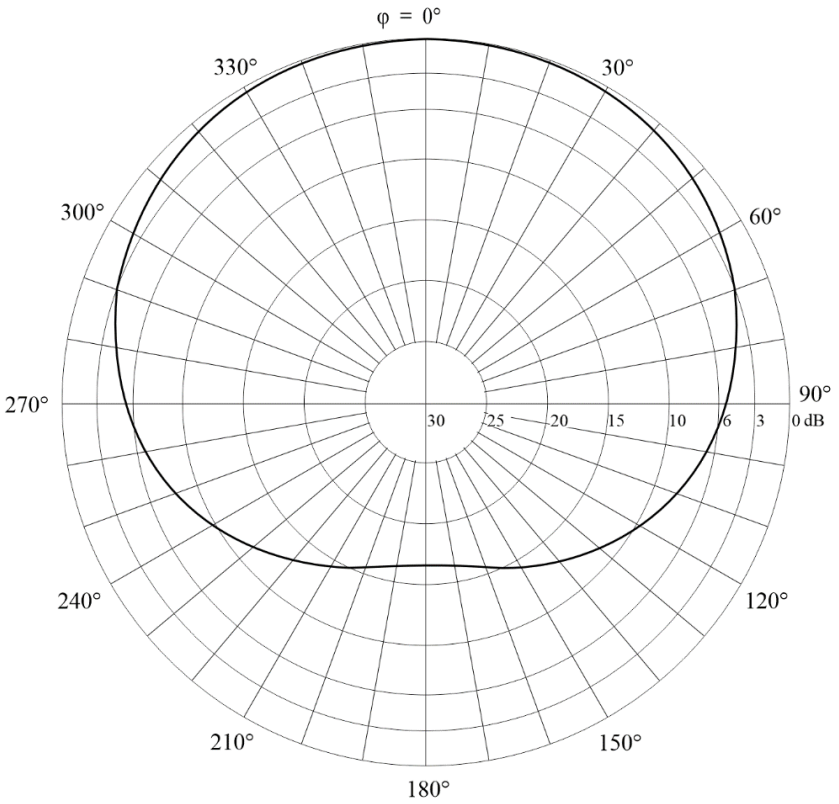
θ = 17°

G_i = 2.4 dB

BS.0705-86a

الشكل 86B

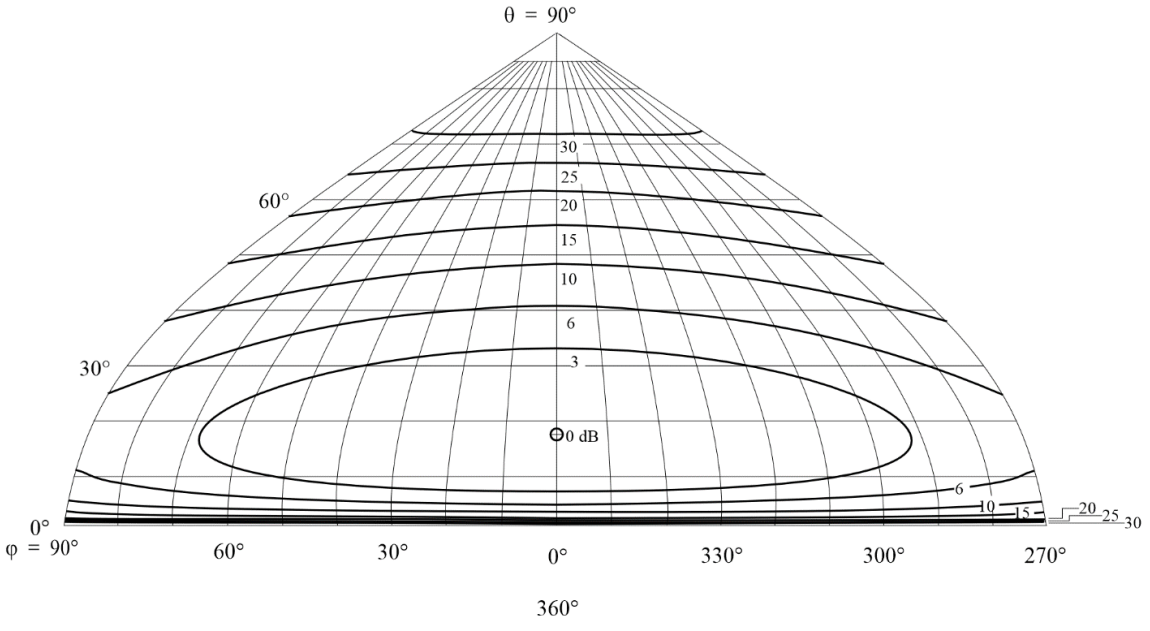
المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 17°



BS.0705-86b

الشكل 86C

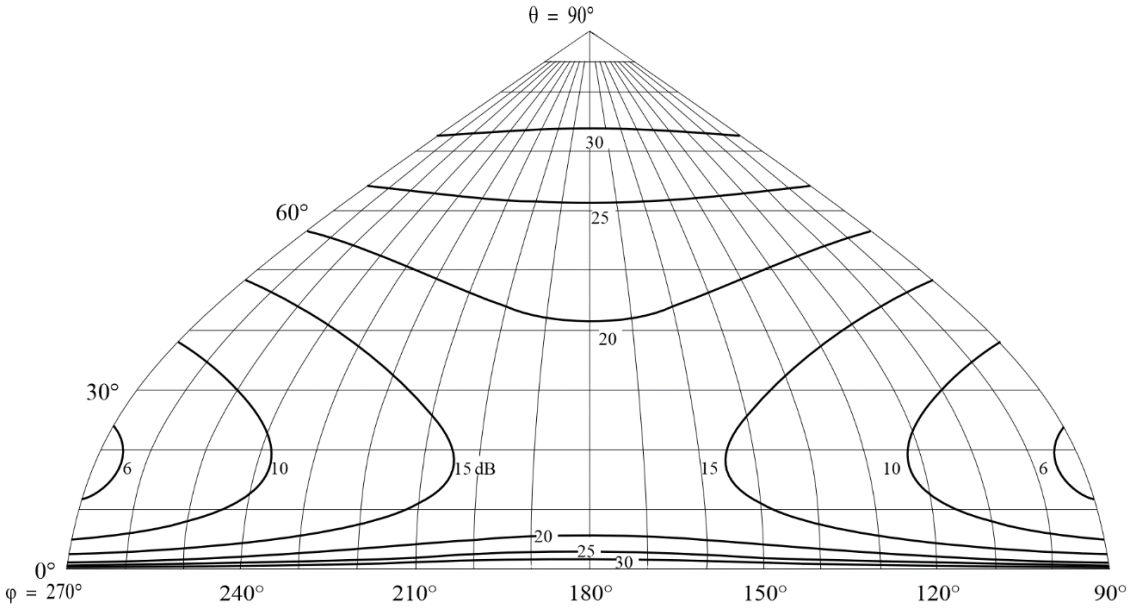
مخطط الإشعاع الأمامي



BS.0705-86c

الشكل 86D

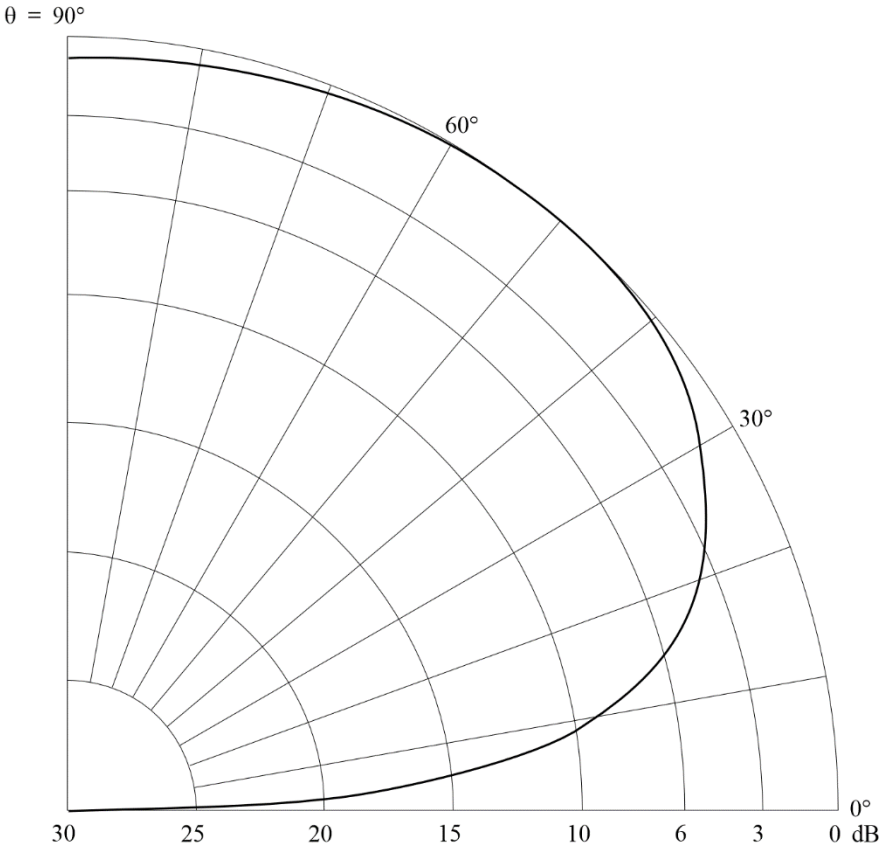
مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-86d

الشكل 87A

المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°



هوائي ربعي
HQ 1/0.3

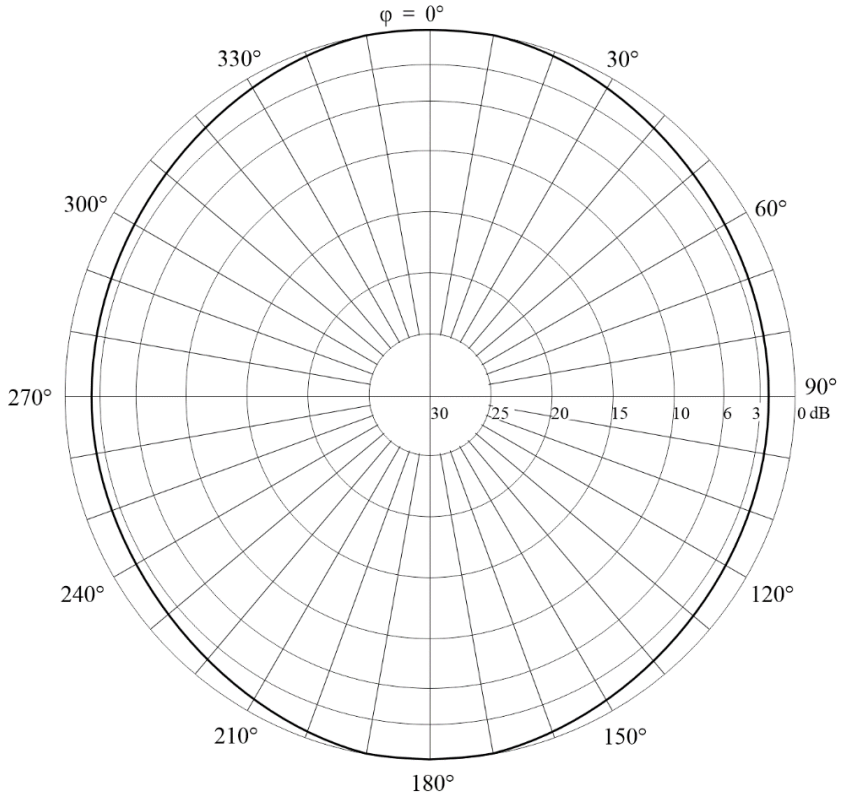
θ = 51°

G_i = 5.3 dB

BS.0705-87a

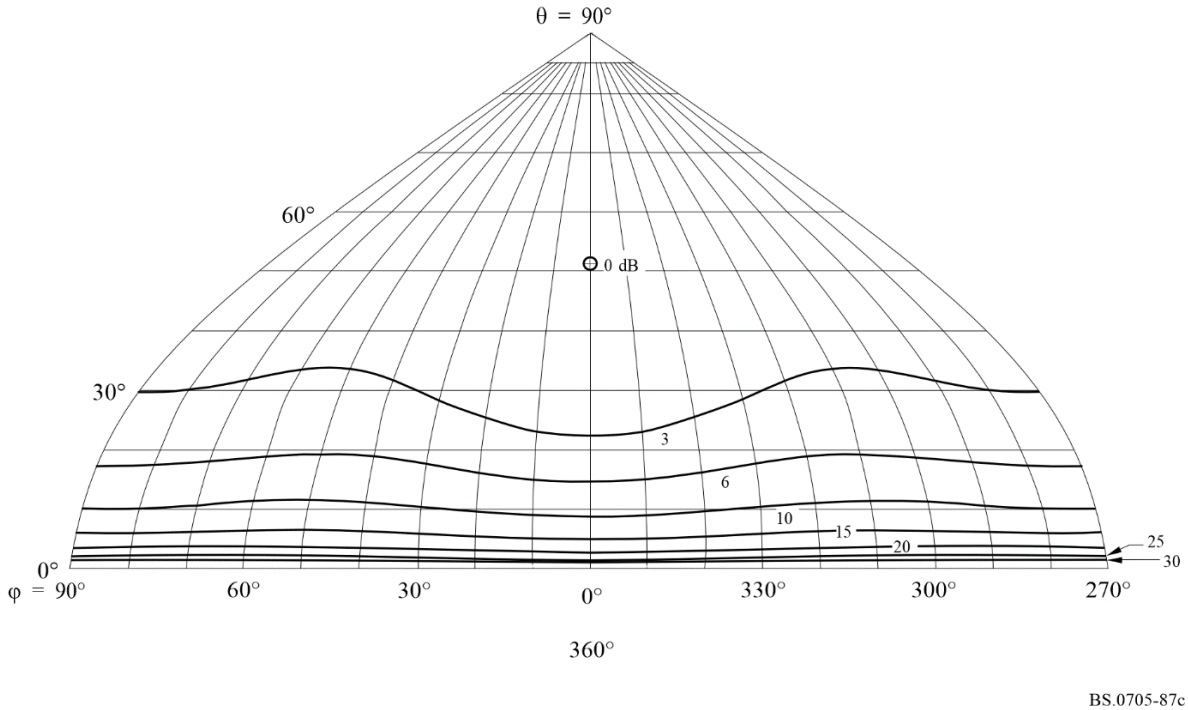
الشكل 87B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 51°



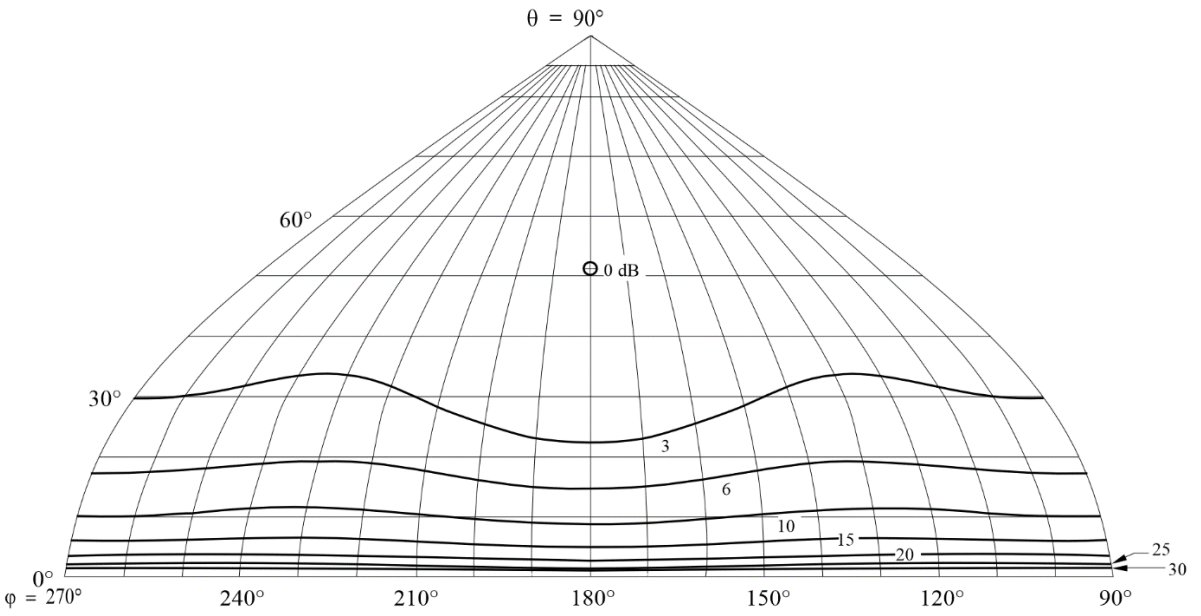
الشكل 87C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 87D

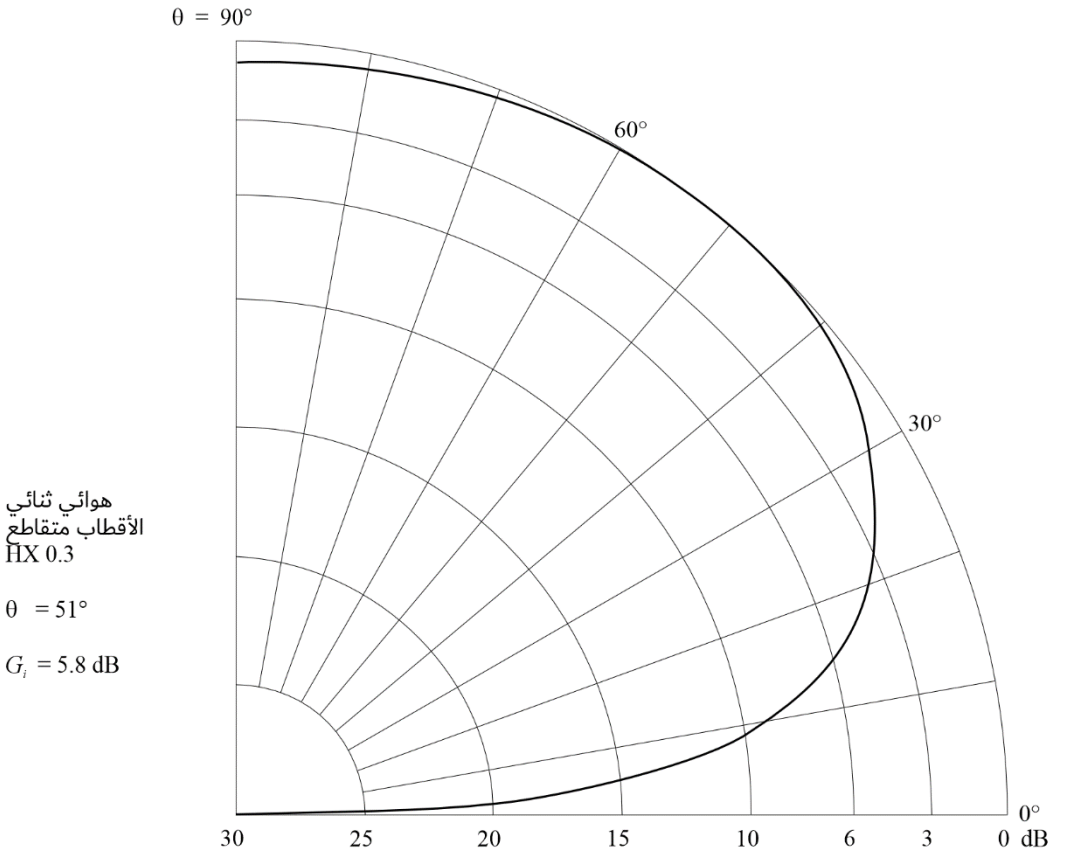
مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-87d

الشكل 88A

المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°



هوائي ثنائي
الأقطاب متقاطع
HX 0.3

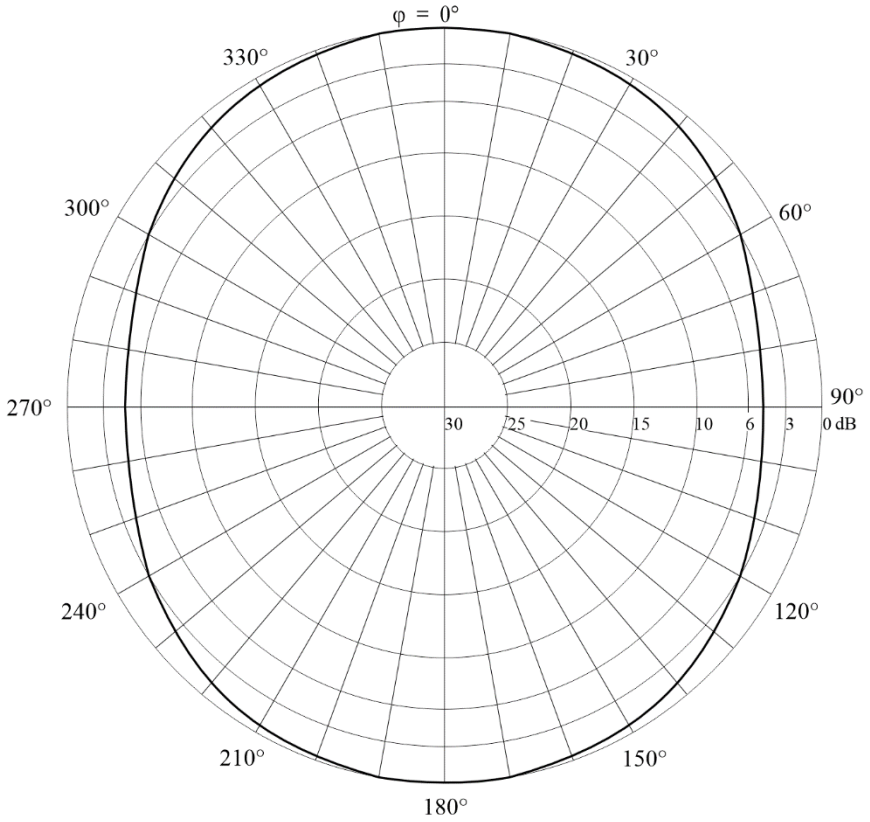
θ = 51°

G_i = 5.8 dB

BS.0705-88a

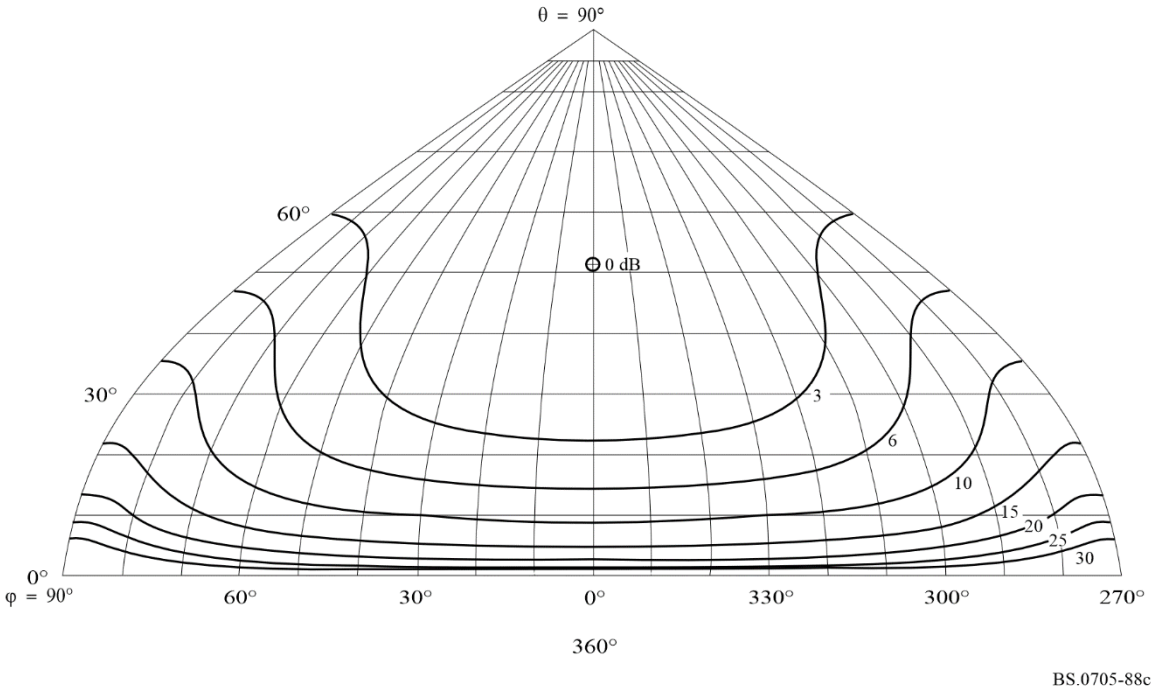
الشكل 88B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 51°



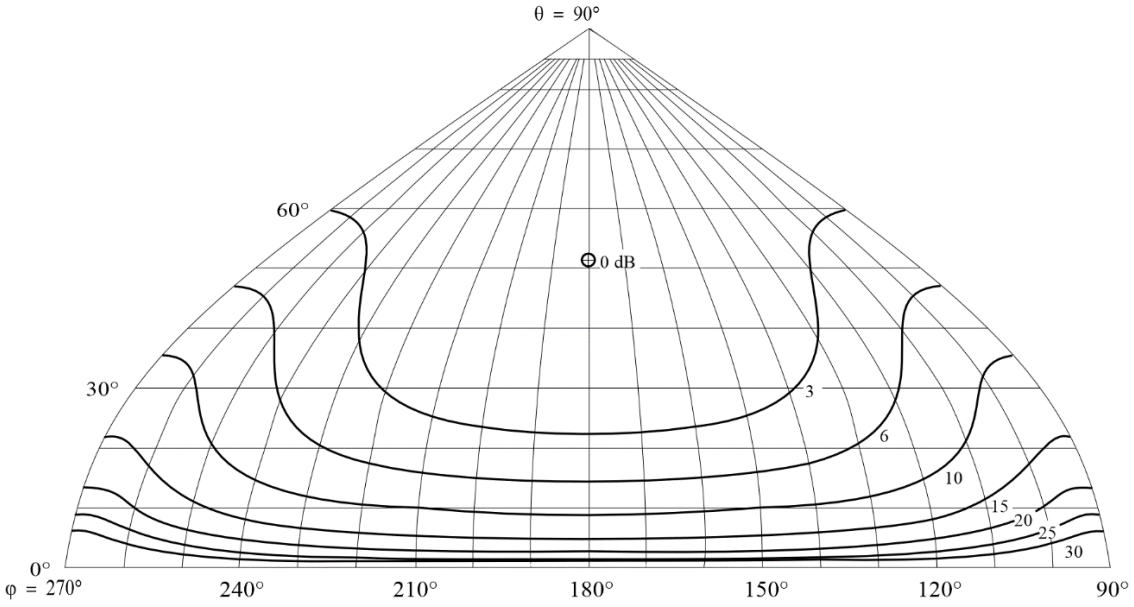
الشكل 88C

مخطط الإشعاع الأمامي



الشكل 88D

مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-88d

الشكل 89A

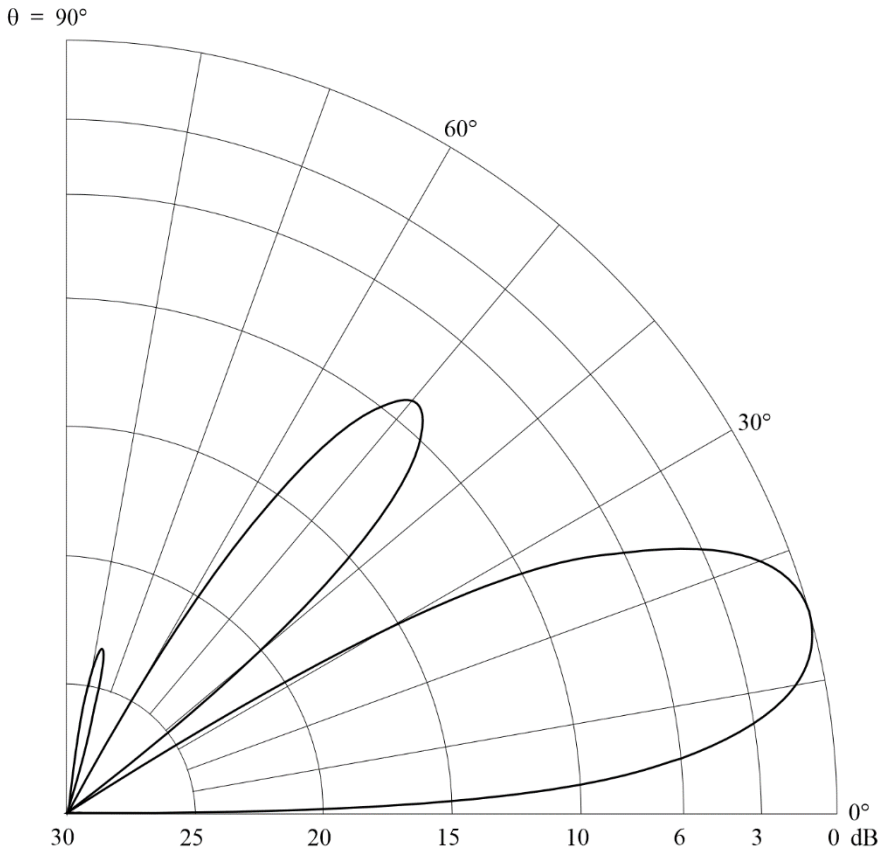
المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°

هوائي معيني
RH 90/55/15

f = 10 MHz

θ = 15°

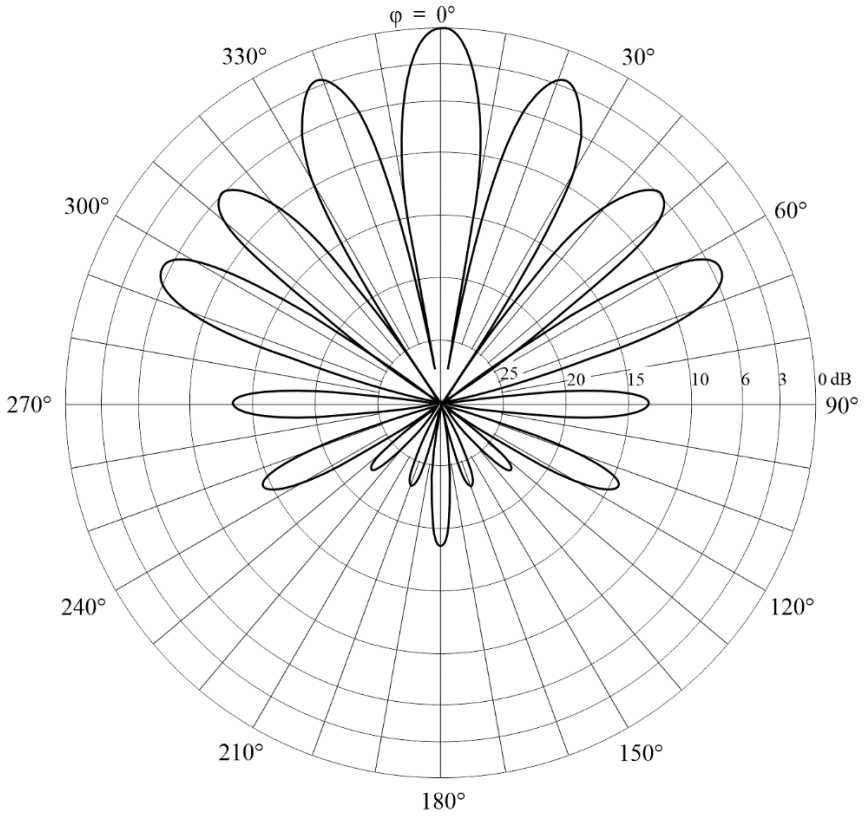
G_i = 14.4 dB



BS.0705-89a

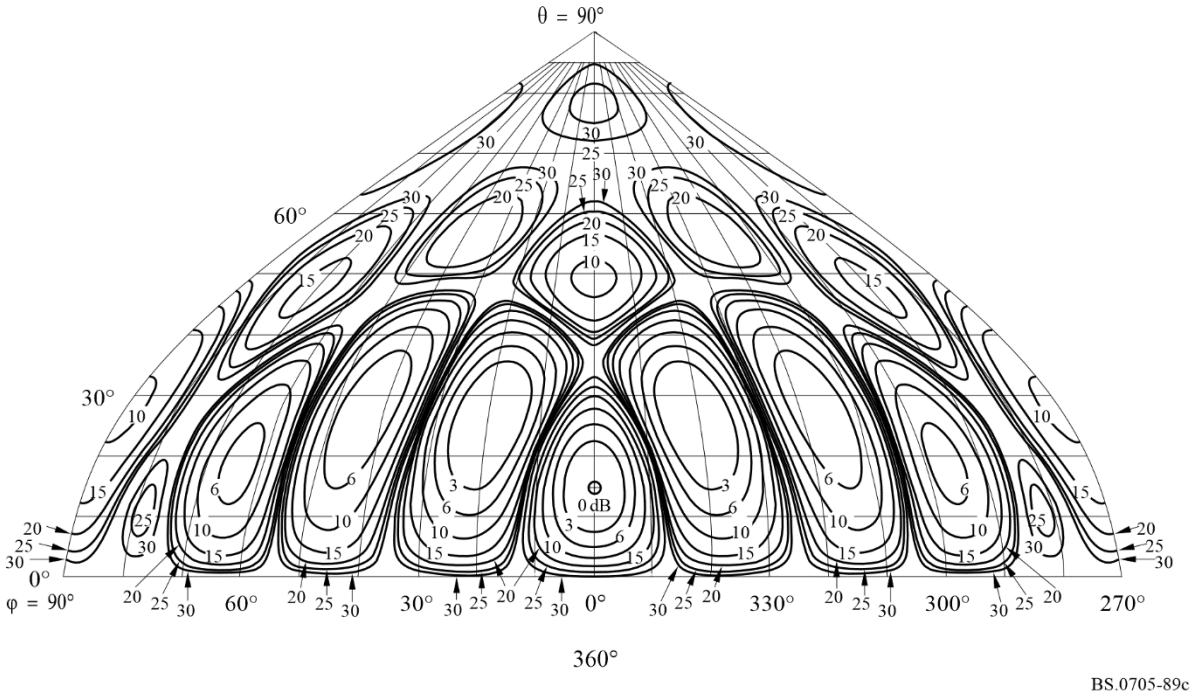
الشكل 89B

المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 15°



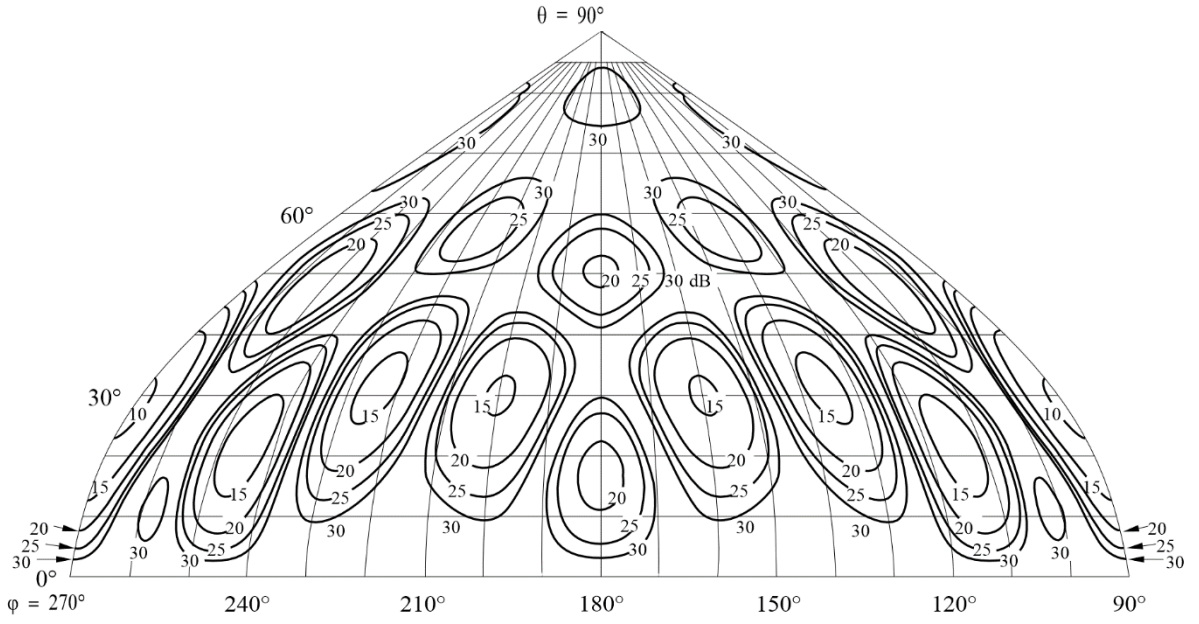
الشكل 89C

مخطط الإشعاع الأمامي



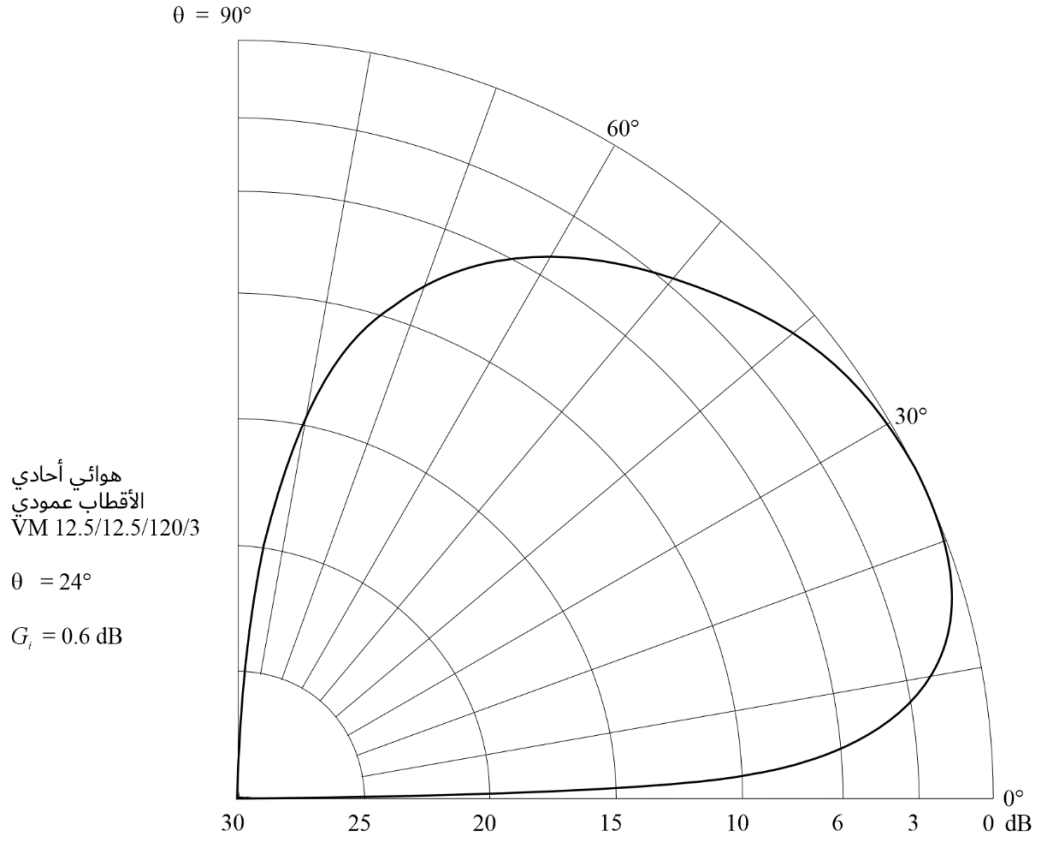
الشكل 89D

مخطط الإشعاع الخلفي



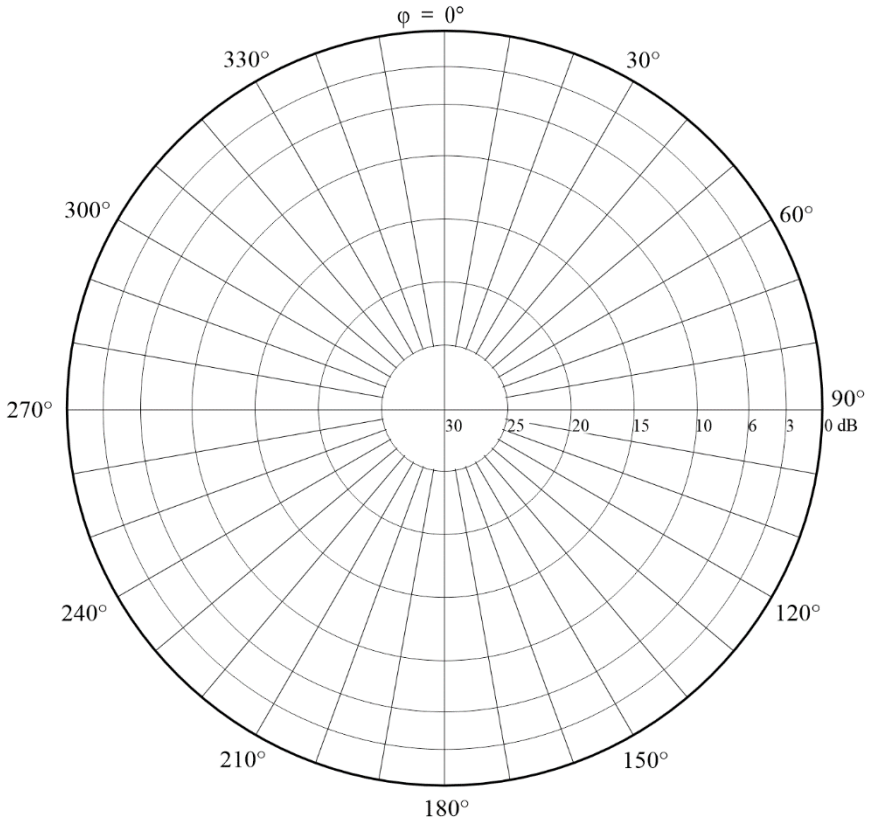
الشكل 90A

المخطط العمودي عند زاوية السمت 0°



الشكل 90B

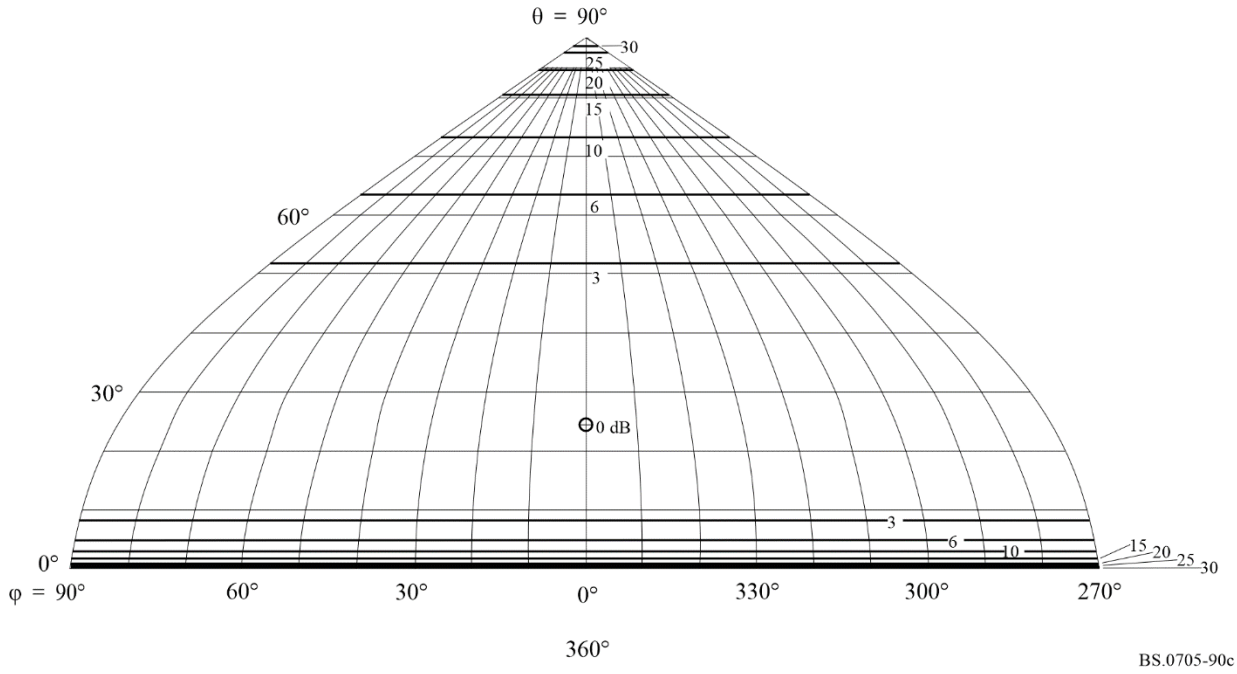
المخطط الأفقي عند زاوية الارتفاع 24°



BS.0705-90b

الشكل 90C

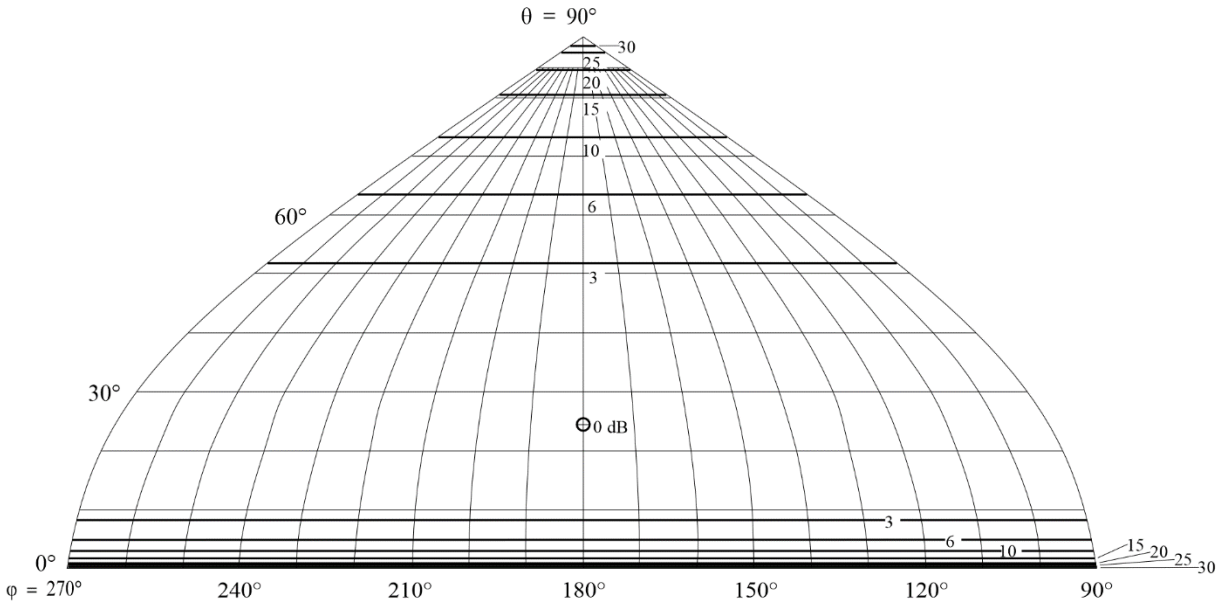
مخطط الإشعاع الأمامي



BS.0705-90c

الشكل 90D

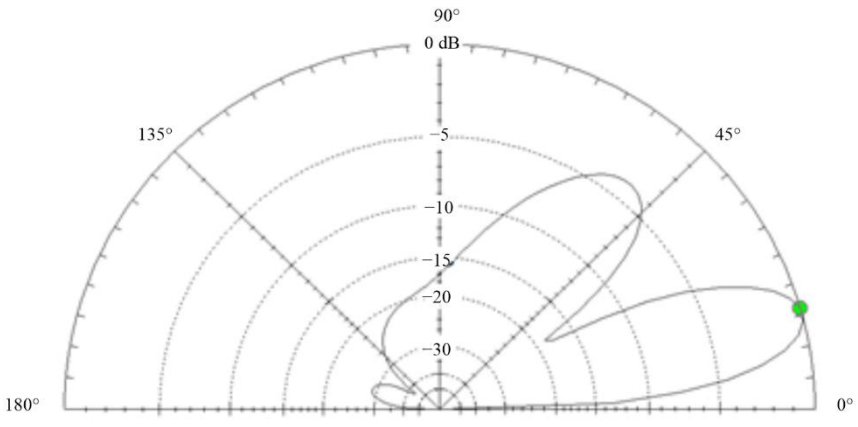
مخطط الإشعاع الخلفي



BS.0705-90d

الشكل 91A

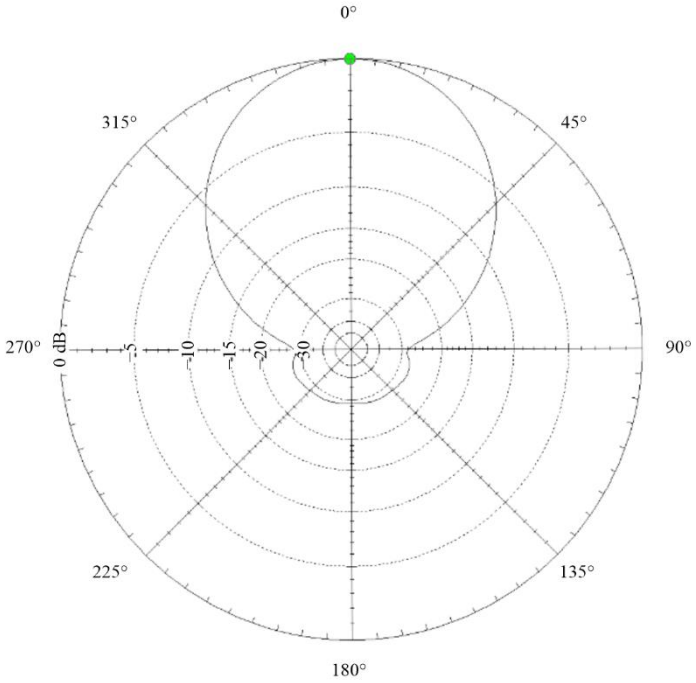
المخطط العمودي لهوائي ياغي–يودا مستقطب أفقياً ذي ثلاثة عناصر وموالف على التردد MHz 6,8، *h* = 39.6 m فوق مستوى الأرض – يتحقق الكسب الأقصى عند زاوية الارتفاع 16°



BS.0705-91a

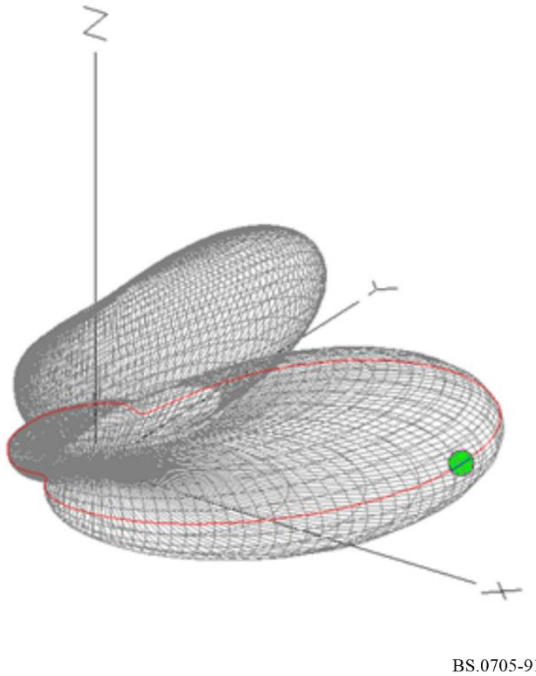
الشكل 91B

مقطع المخطط السمتي عند زاوية الارتفاع 16° على التردد 6,8 MHz، h = 39,6 m فوق مستوى الأرض



الشكل 91C

مخطط هوائي ثلاثي الأبعاد على التردد 6,8 MHz، h = 39,6 m فوق مستوى الأرض



الملحق 2

هوائيات الاستقبال على الموجات الديكامترية (HF)

جدول المحتويات

الصفحة

الجزء 1 من الملحق 2 – خصائص ومخططات إشعاع هوائيات الاستقبال المرجعية على الموجات الديكامترية (HF)..... 140

1 مقدمة 140

2 خصائص هوائي الاستقبال المرجعي الذي يجب استعماله لأغراض التخطيط 140

الجزء 2 من الملحق 2 – أداء هوائي الاستقبال في البيئة الحضرية 142

1 تأثير البيئة على مخطط الإشعاع..... 142

2 عوامل التوهين المصاحبة لهوائي الاستقبال في البيئة الحضرية 142

الجزء 1
من الملحق 2

خصائص ومخططات إشعاع هوائيات الاستقبال المرجعية على الموجات الديكامترية (HF)

1 مقدمة

الهدف من الجزء 1 من هذا الملحق هو تقديم معلومات شاملة ومفصلة عن خصائص هوائي استقبال مرجعي HF للاستعمال لأغراض التخطيط.

نظرياً كل أنماط هوائيات الإرسال الموصوفة في الجزء 1 من الملحق 1 يمكن أن تُستعمل لأغراض الاستقبال نظراً لمبدأ العكسية. عملياً، نظراً لنواحي القصور الناتجة عن التكلفة والقد، فإن هوائيات الاستقبال المستعملة عادة أقل تطوراً من هوائيات الإرسال. غالباً ما تتكون هوائيات الاستقبال هذه من سلك طويل، أو عروة أو ثنائي أقطاب عريض النطاق. غير أن النمط الأكثر استعمالاً من قبل المستمعين هو الهوائي القصير أحادي القطب التلسكوبي أو الهوائي السوطي.

2 خصائص هوائي الاستقبال المرجعي الذي يجب استعماله لأغراض التخطيط

إن الهوائي الموصوف في هذه التوصية، مع الإحصائيات المصاحبة لها، يُنمْذج بدقة مخطط الإشعاع المتوسط النسبي والتوهين الإضافي المتوقع في الوسط الحضري، للهوائيات السوطية الصغيرة (طول أقصر بكثير من طول الموجة).

تقوم الخصائص المقدمة ههنا على نتائج كثيرة شاملة وصحيحة إحصائياً أُجريت في روسيا.

يتعلق الأمر بنموذج *نسبي* لهوائي مرجعي. وهو يصف أداء هذا الصنف من هوائيات الاستقبال في موقع معين *بالمقارنة* مع أداء نفس الهوائي في موقع آخر.

يُصمم هوائي الاستقبال للاستعمال كهوائي استقبال مرجعي لتخطيط أنظمة إذاعة صوتية في النطاق 7 (HF). عندما يُستعمل هذا الهوائي بطريقة مناسبة في برامجيات التنبؤ بالانتشار، فإنها تسهل الاختيار الأمثل لهوائي الإرسال وتردد التشغيل وحساب التوهين النسبي الإجمالي على المسير.

يجب التفكير في هوائي الاستقبال المرجعي هذا على أنه محول طاقة بين الموجات الكهرمغنطيسية الواردة على بيئة الاستقبال والقوة المحركة الكهربائية النسبية (EMF) المطبقة عند دخل المستقبل (دارة مفتوحة). يجب تركيب مخطط إشعاعه العمودي (انظر الفقرة 1.2) في ذلك الجزء من برامجيات التنبؤ بالانتشار حيث يتم حساب اتساع ورود الموجات الكهرمغنطيسية عند زوايا معروفة عند استقبالها في المنطقة. ويجب استعماله لتحويل شدة مجال الموجات الكهرمغنطيسية (EM) الواردة إلى قوة EMF لخرج الهوائي وفقاً لزوايا وصولها. إذاً فهذه القوى EMF عند خرج الهوائي تصبح عندئذ مؤشرات الاتساع *الفعلية* للموجات EM الواردة.

كل الموجات EM الواردة على هذه الهوائيات، بما في ذلك إشارات الإذاعة والإشارات المسببة للتداخل والضوضاء الجوية والضوضاء التي يسببها الإنسان، تُستقبَل بواسطة هذه الهوائيات. نتيجة لذلك فإن الاتساعات الفعالة لكل الموجات الواردة، المستعملة في تقييم المعلمات الخاصة بهذه الأنظمة (الإشارة إلى التداخل والإشارة إلى الضوضاء)، يجب أن تُقيم بكيفية صحيحة انطلاقاً من تطبيق جيد لخصائص الهوائي هذه.

1.2 الأداء النسبي لمخطط الإشعاع العمودي

يُعبر عن الأداء النسبي لمخطط الإشعاع العمودي لهوائي الاستقبال هذا بالمعادلة التالية:

$$F(\theta) = \cos\theta \cdot \left| 1 + R_v(\theta, f_{\mathrm{MHz}}) \right|$$

حيث:

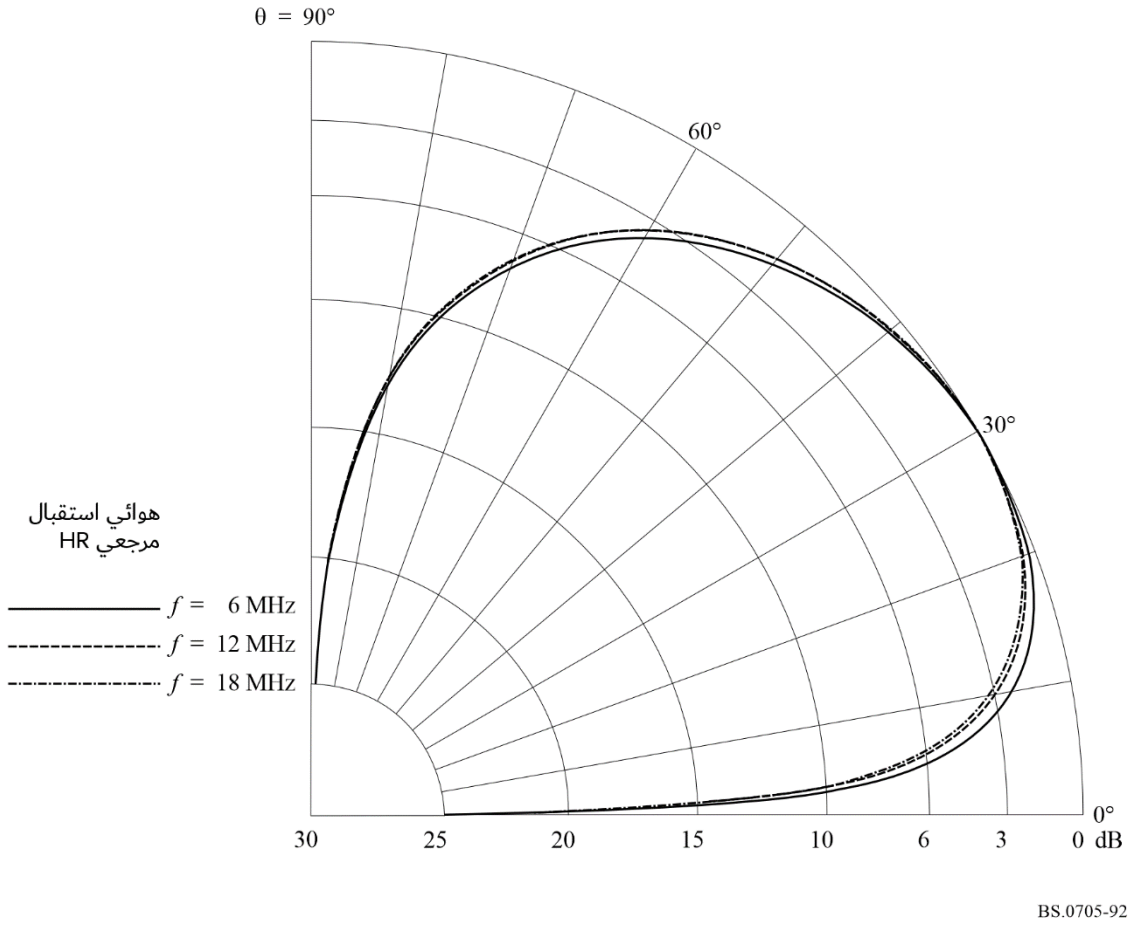
θ: زاوية وصول موجة الورود، في إحداثيات دائرية، كما هو مبين في الفقرة 2 من الجزء 1 من الملحق 1،

و$R_v(\theta, f_{MHz})$: معامل انعكاس معقد للموجات المستقطبة عمودياً، معرف في الفقرة 4.3 من الجزء 1 من الملحق 1، محسوب باستعمال معلمات الأرض المكافئة: $\varepsilon = 10$ و$\sigma = 0{,}01$ S/m.

يبين هذا المخطط بيانياً لثلاثة ترددات تشغيلية في الشكل 92.

الشكل 92

أداء مخطط إشعاع الهوائي المرجعي العمودي عند كل السموت



2.2 الأداء النسبي لمخطط الإشعاع الأفقي

إن أداء مخطط الإشعاع الأفقي لهذا الهوائي مستقل عن الزاوية الأفقية للموجة الواردة. إذاً فمخطط الإشعاع الأفقي شامل الاتجاهات.

الجزء 2
من الملحق 2

أداء هوائي الاستقبال في البيئة الحضرية

1 تأثير البيئة على مخطط الإشعاع

إن الموجات الكهرمغنطيسية الواردة على الهوائيات المركبة في البنايات في المدن تخضع لتوهين، بالمقارنة مع تلك الموجودة في البيئة الريفية. نظراً للطبيعة العشوائية لأثر البيئة الحضرية على الموجات EM، والموقع العشوائي للمستقبلات داخل البنايات، هناك حاجة إلى وصف إحصائي للتوهين الحضري النسبي.

تنطبق إحصائيات التوهين بصورة مستقلة على كل هوائي استقبال لمجموعة كاملة من الهوائيات المركبة في البيئة الحضرية والمعرضة للموجات EM الواردة المنتظمة.

يجب أن يُطبق بانتظام كل عامل توهين مستعمل داخل نموذج التخطيط على كل من إشارات الإذاعة وإشارات الضوضاء.

2 عوامل التوهين المصاحبة لهوائي الاستقبال في البيئة الحضرية

إن الطريقة التي يتم بها توهين الموجات EM المنتظمة الواردة على هوائيات الاستقبال الحضرية بالنسبة لتلك الواردة على هوائيات ريفية مماثلة، موصوفة بواسطة توزيع لوغاريتمي عادي إحصائي. هذه التوزيعات توصف كاملة بواسطة المتوسط الإحصائي والانحراف المعياري.

إن متوسطة التوزيع الإحصائي الحضري لتوهين الإشارة EM لكل هوائي حضري، بالنسبة للهوائيات الريفية هي:

$$A_u = 11 \text{ dB}$$

والانحراف المعياري لهذا التوهين هو:

$$V_u = 7 \text{ dB}$$

1.2 الأداء النسبي للهوائي في البيئة الحضرية

بافتراض اتساع منتظم للمجال EM الوارد وموقع عشوائي تماماً للمستقبل، فإن الإحصائيات السابقة تنطوي على إحصائيات أداء النظام الخاصة التالية:

- 50% من هوائيات الاستقبال الحضرية تستقبل إشارات إذاعة وضوضاء أصغر بـ11 dB أو أكثر من تلك المستقبلة بواسطة الهوائي المرجعي في منطقة ريفية؛
- 90% من هوائيات الاستقبال الحضرية تستقبل إشارات إذاعة وضوضاء أصغر بـ2 dB[7] أو أكثر من تلك المستقبلة بواسطة هوائي استقبال مرجعي في منطقة ريفية؛
- 10% من هوائيات الاستقبال الحضرية تستقبل إشارات إذاعة وضوضاء أصغر بـ20 dB[7] أو أكثر من تلك المستقبلة بواسطة هوائي استقبال مرجعي في منطقة ريفية.

---

[7] انحراف القيمة العشرية العليا (90%) والقيمة العشرية الدنيا (10%) هو $1{,}28 \times V_u \approx 9$ dB.