

التوصية ITU-R P.526-16 (2025/11)

السلسلة P: انتشار الموجات الراديوية

الانتشار بالانعراج

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 مدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها. ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

حقوق الملكية الفكرية

يستعري 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/ar>)

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

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

النشر الإلكتروني
جنيف، 2026

التوصية ITU-R P.526-16*

الانتشار بالانعراج

(المسألة ITU-R 202-5/3)

(2025-2019-2018-2013-2012-2009-2007-2005-2003-2001-1999-1997-1995-1994-1992-1982-1978)

مجال التطبيق

تقدم هذه التوصية العديد من النماذج التي تمكن القارئ من تقييم أثر الانعراج على شدة المجال المستقبل. ويمكن تطبيق هذه النماذج على الأنماط المختلفة للعوائق وعلى مسيرات ذات هندسة مختلفة.

مصطلحات أساسية

انعراج، تضاريس أرضية غير منتظمة، عوائق، حد السكين، فتحة، شاشة

توصيات الاتحاد الدولي للاتصالات ذات الصلة

التوصية ITU-R P.310 - تعاريف لمصطلحات تتعلق بالانتشار في الأوساط غير المؤيئة

التوصية ITU-R P.368 - طريقة للتنبؤ بانتشار الموجات الأرضية للترددات ما بين 10 kHz و 30 MHz

التوصية ITU-R P.834 - آثار الانكسار التروبوسفيري على انتشار الموجات الراديوية

التوصية ITU-R P.1546 - طريقة للتنبؤ من نقطة إلى منطقة لخدمات الأرض في مدى الترددات بين 30 MHz و 4 000 MHz

ملاحظة - ينبغي استخدام أحدث طبعة من التوصية السارية.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أن ثمة حاجة لتوفير معلومات هندسية من أجل حساب قيم شدة المجال على مسيرات الانعراج،

توصي

بأن الطرائق الموضحة في الملحق 1 ينبغي استخدامها من أجل حساب قيم شدة المجال على مسيرات الانعراج التي قد تشمل مساحة أرضية كروية، أو تضاريس أرضية غير منتظمة تنطوي على أنواع مختلفة من العوائق.

* التوصية ITU-R P.526-15 مضمنة بالإحالة إليها في المجلد 4 من طبعة 2024 من لوائح الراديو.

الملحق 1

جدول المحتويات

الصفحة

3	.....	1	مقدمة
3	.....	2	مفاهيم أساسية
3	.....	1.2	المجسمات الإهليلجية لفرينل ومناطق فرينل (Fresnel)
4	.....	2.2	عرض الظليل (شبه الظل)
4	.....	3.2	منطقة الانعراج
4	.....	4.2	معيار سلاسة سطح العائق
5	.....	5.2	العائق المعزول
5	.....	6.2	أنماط التضاريس الأرضية
5	.....	7.2	تكامليات فرينل
6	.....	3	الانعراج فوق أرض كروية
6	.....	1.3	خسارة الانعراج بالنسبة إلى المسيرات عبر الأفق
15	.....	2.3	خسارة الانعراج بالنسبة لأي مسافة عند تردد 10 MHz فما فوق
17	.....	4	الانعراج فوق عوائق معزولة أو مسير أرضي عام أو مسير أرض-فضاء
17	.....	1.4	عائق وحيد كحد السكين
21	.....	2.4	عائق مدور وحيد
22	.....	3.4	حافتان معزولتان
24	.....	4.4	أسطوانات معزولة متعددة
27	.....	5.4	الطريقة لمسير أرضي عام
31	.....	6.4	الطريقة لمسير عام مائل أرض-فضاء
34	.....	5	الانعراج بواسطة حواجز رفيعة
34	.....	1.5	حواجز ذات عرض محدود
34	.....	2.5	الانعراج بواسطة فتحات مستطيلة أو فتحات أو حواجز مركبة
38	.....	6	الانعراج على إسفين ذي إيصالية محدودة
42	.....	7	دليل الانتشار بالانعراج
44	.....	المرفق 1 للملحق 1 -	حساب معلمات الأسطوانات
44	.....	1	زاوية الانعراج وموقع القمة
45	.....	2	معلمات الأسطوانات
46	.....	المرفق 2 للملحق 1 -	خسائر انعراج المسير الفرعي

46	مقدمة	1
46	الطريقة	2

1 مقدمة

على الرغم من أن الانعراج لا ينتج إلا عن سطح الأرض أو عن عوائق أخرى، يجب أن يؤخذ في الاعتبار متوسط الانكسار الجوي على مسير الإرسال لتقدير المعلومات الهندسية التي تقع في المستوي الرأسي للمسير (زاوية الانعراج، ونصف قطر الانحناء، وارتفاع العائق). ويجب، لتحقيق هذا الغرض، أن يرسم المظهر الجانبي للمسير مع نصف قطر الأرض المكافئ المناسب (التوصية ITU-R P.834). وإذا لم تيسر معلومات أخرى، يمكن الاستناد إلى نصف قطر أرض مكافئ قدره 8 500 km.

2 مفاهيم أساسية

يتأثر انعراج الموجات الراديوية على سطح الأرض بعدم انتظام التضاريس الأرضية. وفي هذا الصدد، وقبل التعمق في تناول طرق التنبؤ الخاصة بآلية الانتشار، نورد في هذا القسم بعض المفاهيم الأساسية.

1.2 المجسمات الإهليلجية لفرينل ومناطق فرينل (Fresnel)

عند دراسة انتشار الموجات الراديوية بين نقطتين A و B، يمكن تقسيم الفضاء المعني إلى عائلة من المجسمات الإهليلجية تُعرف باسم إهليلجيات فرينل، تحمل جميعها نقاطاً بؤرية عند A و B وعلى نحو تستجيب فيه أية نقطة M على المجسم الإهليلجي للعلاقة التالية:

$$(1) \quad AM + MB = AB + n \frac{\lambda}{2}$$

حيث تمثل n رقماً صحيحاً يميز الإهليلج المعني وحيث تتطابق $n = 1$ مع الإهليلجي الأول لفرينل، إلخ، وتمثل λ طول الموجة. وكقاعدة عملية، نفترض أن الانتشار يحدث في خط البصر (LoS) أي مصحوباً بظواهر انعراج يمكن إهمالها، إذا لم يوجد أي عائق داخل المجسم الإهليلجي الأول لفرينل.

ويمكن تقريب نصف قطر إحدى المجسمات الإهليلجية عند نقطة بين المرسل والمستقبل في وحدات متنسقة ذاتياً بواسطة:

$$(2) \quad R_n = \left[\frac{n \lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right]^{1/2}$$

أو في شكل وحدات عملية:

$$(3) \quad R_n = 550 \left[\frac{n d_1 d_2}{(d_1 + d_2) f} \right]^{1/2}$$

حيث تمثل f التردد (MHz) و d_1 و d_2 المسافتان (km) بين المرسل والمستقبل عند النقطة التي يُحسب فيها نصف قطر المجسم الإهليلجي (m).

وتتطلب بعض المشكلات مراعاة مناطق فرينل وهي المناطق التي يُحصل عليها من خلال تقاطع عائلة من المجسمات الإهليلجية مع سطح مستوٍ. وتكون المنطقة ذات الرتبة n هي الجزء الواقع بين المنحنيات التي يُحصل عليها بواسطة المجسمين الإهليلجين n و $n - 1$ ، على التوالي.

2.2 عرض الظليل (شبه الظل)

يحدد الانتقال من الضوء إلى الظل منطقة الظليل. ويحدث هذا الانتقال على طول شريط ضيق (عرض الظليل) داخل حدود الظل الهندسي. ويبين الشكل 1 عرض الظليل (W) في حالة وجود مرسل عند ارتفاع، h ، فوق أرض دائرية سلسلة، التي تُعطى بواسطة:

$$(4) \quad w = \left[\frac{\lambda a_e^2}{\pi} \right]^{1/3} \text{ m}$$

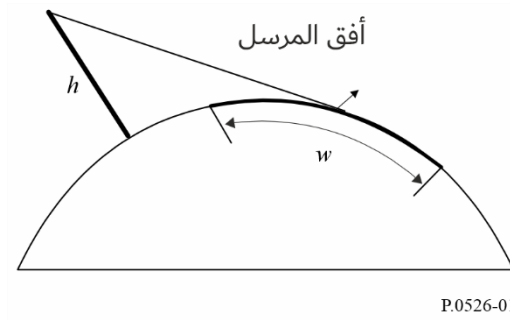
حيث:

λ : طول الموجة (m)

a_e : نصف قطر الأرض الفعال (m)

الشكل 1

تعريف عرض الظليل



3.2 منطقة الانعراج

تمتد منطقة انعراج المرسل من مسافة خط البصر (LoS) حيث يساوي خلوص المسير 60% من نصف قطر منطقة فرينل الأولى (R_1)، إلى مسافة أبعد بكثير من أفق المرسل حيث تهيمن آلية الانتثار التروبوسفيري.

4.2 معيار سلاسة سطح العائق

إذا كانت لسطح العائق أشكال غير منتظمة لا تتجاوز Δh ،

حيث:

$$(5) \quad \Delta h = 0.04 \left[R \lambda^2 \right]^{1/3} \text{ m}$$

وحيث:

R : نصف قطر انحناء العائق (m)

λ : طول الموجة (m)؛

يمكن عندئذ اعتبار العائق سلساً ويمكن استعمال الطرق الموضحة في الفقرتين 3 و 2.4 لحساب التوهين.

5.2 العائق المعزول

يمكن اعتبار عائق ما معزولاً إذا لم يكن أي تفاعل بين العائق في حد ذاته والتضاريس الأرضية المحيطة به. وبعبارة أخرى، لا ينتج توهين المسير إلا بسبب العائق وحده دون أي إسهام من باقي التضاريس الأرضية. ويجب أن تُستوفى الشروط التالية:

- انعدام التراكب بين عروض الظليل المرتبطة بكل مطراف وبأعلى العائق؛
- يتعين أن يبلغ خلوص المسير على كلا الجانبين 0,6 من نصف قطر منطقة فرينل الأولى؛
- انعدام انعكاس مرآوي على جانبي العائق معاً.

6.2 أنماط التضاريس الأرضية

يمكن تصنيف أنماط التضاريس الأرضية، تبعاً للقيمة الرقمية للمعلمة Δh (انظر التوصية ITU-R P.310) المستعملة لتحديد درجة عدم انتظام التضاريس الأرضية، ضمن ثلاثة أنواع:

(أ) تضاريس أرضية سلسلة

يمكن أن نعتبر أن سطحاً أرضياً سلساً إذا كان مقدار عدم انتظام التضاريس الأرضية يبلغ 0,1R أو أقل، حيث R القيمة القصوى لنصف قطر منطقة فرينل الأولى في مسير الانتشار. وفي هذه الحالة، يستند نموذج التنبؤ إلى الانعراج على أرض كروية (انظر الفقرة 3).

(ب) عوائق معزولة

يتكون المظهر الجانبي للتضاريس الأرضية المتعلقة بمسیر الانتشار من عائق واحد أو أكثر. وينبغي في هذه الحالة، وتبعاً للمخططات المبسطة للمثالية المستعملة بهدف تمييز العوائق التي تعترض مسير الانتشار، استعمال نماذج التنبؤ الموضحة في الفقرة 4.

(ج) تضاريس أرضية متعرجة

يتكون المظهر الجانبي من عدة تلال صغيرة لا يمثل أي منها عائقاً مهماً. وتلاءم التوصية ITU-R P.1546 داخل مدى تردداتها مع التنبؤ بشدة المجال ولكنها ليست طريقة انعراج.

7.2 تكاملات فرينل

تُعطى تكاملية فرينل المركبة بواسطة:

$$(6) \quad F_c(v) = \int_0^v \exp\left(j \frac{\pi s^2}{2}\right) ds = C(v) + jS(v)$$

حيث j العامل المركب المساوي للقيمة $\sqrt{-1}$ ، و $C(v)$ و $S(v)$ تكامليتا فرينل لجيب التمام وجيب الزاوية اللذان يعرفان بواسطة:

$$(7a) \quad C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi s^2}{2}\right) ds$$

$$(7b) \quad S(v) = \int_0^v \sin\left(\frac{\pi s^2}{2}\right) ds$$

ويمكن تقييم تكاملية فرينل المركبة $F_c(v)$ بواسطة تكامل رقمي، أو بدقة كافية لمعظم الأغراض بالنسبة إلى قيمة v موجبة باستعمال:

$$(8a) \quad F_c(v) = \exp(jx) \sqrt{\frac{x}{4}} \sum_{n=0}^{11} \left[(a_n - jb_n) \left(\frac{x}{4}\right)^n \right] \quad \text{for } 0 \leq x < 4$$

$$(8b) \quad F_c(v) = \left(\frac{1+j}{2} \right) + \exp(jx) \sqrt{\frac{4}{x}} \sum_{n=0}^{11} \left[(c_n - jd_n) \left(\frac{4}{x} \right)^n \right] \quad \text{for } x \geq 4$$

حيث:

$$(9) \quad x = 0,5\pi v^2$$

وتمثل a_n و b_n و c_n و d_n معاملات بورسما (Boersma) الواردة أدناه:

$a_0 =$	+1.595769140	$b_0 =$	-0.000000033	$c_0 =$	+0.000000000	$d_0 =$	+0.199471140
$a_1 =$	-0.000001702	$b_1 =$	+4.255387524	$c_1 =$	-0.024933975	$d_1 =$	+0.000000023
$a_2 =$	-6.808568854	$b_2 =$	-0.000092810	$c_2 =$	+0.000003936	$d_2 =$	-0.009351341
$a_3 =$	-0.000576361	$b_3 =$	-7.780020400	$c_3 =$	+0.005770956	$d_3 =$	+0.000023006
$a_4 =$	+6.920691902	$b_4 =$	-0.009520895	$c_4 =$	+0.000689892	$d_4 =$	+0.004851466
$a_5 =$	-0.016898657	$b_5 =$	+5.075161298	$c_5 =$	-0.009497136	$d_5 =$	+0.001903218
$a_6 =$	-3.050485660	$b_6 =$	-0.138341947	$c_6 =$	+0.011948809	$d_6 =$	-0.017122914
$a_7 =$	-0.075752419	$b_7 =$	-1.363729124	$c_7 =$	-0.006748873	$d_7 =$	+0.029064067
$a_8 =$	+0.850663781	$b_8 =$	-0.403349276	$c_8 =$	+0.000246420	$d_8 =$	-0.027928955
$a_9 =$	-0.025639041	$b_9 =$	+0.702222016	$c_9 =$	+0.002102967	$d_9 =$	+0.016497308
$a_{10} =$	-0.150230960	$b_{10} =$	-0.216195929	$c_{10} =$	-0.001217930	$d_{10} =$	-0.005598515
$a_{11} =$	+0.034404779	$b_{11} =$	+0.019547031	$c_{11} =$	+0.000233939	$d_{11} =$	+0.000838386

ويمكن تقييم $C(v)$ و $S(v)$ بالنسبة إلى قيم سالبة تخص v من خلال الإشارة إلى أن:

$$(10a) \quad C(-v) = -C(v)$$

$$(10b) \quad S(-v) = -S(v)$$

3 الانعراج فوق أرض كروية

يمكن أن تُحسب خسارة الإرسال الإضافية العائدة إلى الانعراج فوق أرض كروية بواسطة الصيغة الكلاسيكية لسلسلة البقايا. ويقدم البرنامج الحاسوبي "LFMF-SmoothEarth" الوارد في التوصية ITU-R P.368، الطريقة بأكملها. وتحتوي التوصية ITU-R P.368 على مجموعة فرعية من نواتج هذا البرنامج (بالنسبة إلى هوائيات قريبة من الأرض وعند ترددات أدنى).

وتصف الأقسام الفرعية التالية طرائق عددية وبيانية يمكن استعمالها مع الترددات 10 MHz وما علاها. وبالنسبة للترددات أدنى من 10 MHz، ينبغي استخدام البرنامج "LFMF-SmoothEarth" دائماً. ويقدم القسم 1.3 طرائق من أجل المسيرات فوق خط الأفق. والقسم 1.1.3 عبارة عن طريقة عددية، بينما يعطي القسم 2.1.3 طريقة بيانية. والقسم 2.3 عبارة عن طريقة تطبق في حالة الأرض المستوية لأي مسافة وعند أي ترددات تساوي 10 MHz وما علاها. وتستعمل هذه الطريقة العددية الواردة في الفقرة 1.1.3.

1.3 خسارة الانعراج بالنسبة إلى المسيرات عبر الأفق

بالنسبة إلى مسافات طويلة عبر الأفق، يكتسي الحد الأول من سلسلة البقايا دون سواء أهمية كبيرة، وحتى على مقربة من الأفق أو عند الأفق، يمكن استعمال هذا التقريب مع خطأ أقصى يبلغ حوالي 2 dB في معظم الأحوال.

ويمكن كتابة الحد الأول كنتاج حد المسافة، F ، وحدي كسب الارتفاع G_T و G_R . ويوضح الجزءان 1.1.3 و 2.1.3 كيفية الحصول على هذه الحدود انطلاقاً من صيغ بسيطة أو من خلال مخططات بيانية (مونيوغرامات).

1.1.3 حسابات رقمية

1.1.1.3 تأثير الخصائص الكهربائية لسطح الأرض

يمكن تحديد مدى تأثير الخصائص الكهربائية لسطح الأرض على خسارة الانعراج، بحساب عامل مقيس لسماحية السطح K ، (السماح بمرور التيار) يُعطى بواسطة الصيغ التالية:

في وحدات متسقة:

$$(11) \quad K_H = \left(\frac{2\pi a_e}{\lambda} \right)^{-1/3} [(\epsilon - 1)^2 + (60 \lambda \sigma)^2]^{-1/4}$$

في الاستقطاب الرأسي

و

$$(12) \quad K_V = K_H [\epsilon^2 + (60 \lambda \sigma)^2]^{1/2}$$

في الاستقطاب الأفقي

أو في وحدات عملية:

$$(11a) \quad K_H = 0,36 (a_e f)^{-1/3} [(\epsilon - 1)^2 + (18\,000 \sigma / f)^2]^{-1/4}$$

$$(12a) \quad K_V = K_H [\epsilon^2 + (18\,000 \sigma / f)^2]^{1/2}$$

حيث:

a_e : نصف قطر الأرض الفعال (km)

ϵ : السماحية النسبية الفعالة

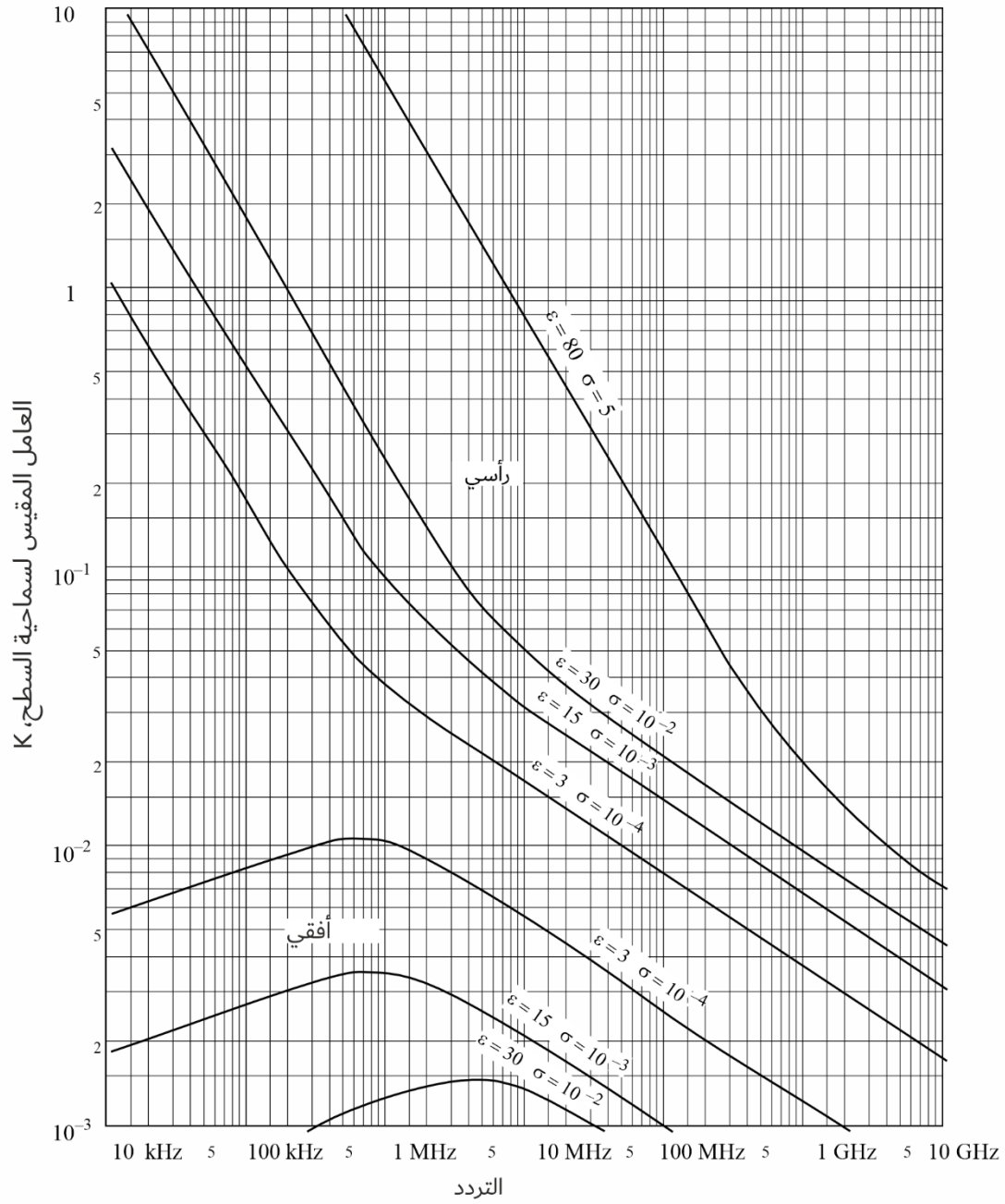
σ : الإيصالية الفعالة (S/m)

f : التردد (MHz).

ويحتوي الشكل 2 على قيم العامل K النمطية.

الشكل 2

حساب K



P.0526-02

إذا كانت قيمة K أقل من 0,001، تكون الخصائص الكهربائية للأرض عديمة الأهمية. أما في الحالة التي تكون فيها قيم K أكبر من 0,001 وأقل من 1، فيجب أن تستعمل الصيغ المناسبة الواردة في الفقرة 2.1.1.3. وعندما تكون قيمة K أكبر من 1 تقريباً، تختلف شدة مجال الانعراج المحسوبة باستعمال الطريقة الواردة في الفقرة 2.1.1.3 عن النتائج المتحصلة من البرنامج "LFMF-SmoothEarth"، ويزيد الاختلاف مع زيادة قيمة K . وينبغي استعمال البرنامج "LFMF-SmoothEarth" لقيم K التي تزيد عن 1. ولا تحدث هذه الحالة إلا في الاستقطاب الرأسي عند ترددات أدنى من 10 MHz فوق سطح البحر أو أقل من 200 kHz فوق اليابسة. وتسري الطريقة الواردة في الفقرة 2.1.1.3 في كل الحالات الأخرى.

2.1.1.3 صيغ شدة مجال الانعراج

تُعطى شدة مجال الانعراج، E ، بالنسبة إلى شدة المجال في الفضاء الحر E_0 بواسطة المعادلة التالية:

$$(13) \quad 20 \log \frac{E}{E_0} = F(X) + G(Y_1) + G(Y_2) \quad \text{dB}$$

حيث X هي الطول المقيس للمسير بين الهوائيات عند ارتفاعين Y_1 و Y_2 مقيسين (وحيث قيمة $20 \log_{10} \frac{E}{E_0}$ سالبة في العادة).
في وحدات متسقة:

$$(14) \quad X = \beta \left(\frac{\pi}{\lambda a_e^2} \right)^{1/3} d$$

$$(15) \quad Y = 2\beta \left(\frac{\pi^2}{\lambda^2 a_e} \right)^{1/3} h$$

أو في وحدات عملية:

$$(14a) \quad X = 2,188\beta f^{1/3} a_e^{-2/3} d$$

$$(15a) \quad Y = 9,575 \times 10^{-3} \beta f^{2/3} a_e^{-1/3} h$$

حيث:

d : طول المسير (km)

a_e : نصف قطر الأرض المكافئ (km)

h : ارتفاع الهوائي (m)

f : التردد (MHz).

β معلمة تأخذ في الاعتبار نمط الأرض والاستقطاب. وترتبط بالعامل K بواسطة الصيغة شبه التجريبية التالية:

$$(16) \quad \beta = \frac{1 + 1,6 K^2 + 0,67 K^4}{1 + 4,5 K^2 + 1,53 K^4}$$

ويمكن أن تؤخذ β على أنها مساوية للقيمة 1 بالنسبة إلى الاستقطاب الأفقي عند جميع الترددات، وبالنسبة إلى الاستقطاب الرأسي فوق 20 MHz على الأرض أو 300 MHz فوق البحر.

أما بالنسبة إلى الاستقطاب الرأسي تحت 20 MHz فوق الأرض أو 300 MHz فوق البحر، فيجب أن تُحسب β باعتبارها دالة لقيم K . غير أنه من الممكن عندئذٍ إهمال ε وكتابة:

$$(16a) \quad K^2 \approx 6,89 \frac{\sigma}{k^{2/3} f^{5/3}}$$

حيث يُعبر عن σ بواسطة S/m، و f (MHz) و k العامل المضاعف لنصف قطر الأرض.

ويُعطى حد المسافة بواسطة الصيغة التالية:

$$(17a) \quad F(X) = 11 + 10 \log_{10} (X) - 17.6 \quad \text{for } X \geq 1.6$$

$$(17b) \quad F(X) = -20 \log_{10} (X) - 5.6488 X^{1.425} \quad \text{for } X < 1.6$$

ويُعطى حد كسب الارتفاع $G(Y)$ بواسطة الصيغة التالية:

$$(18) \quad G(Y) \cong 17.6(B - 1.1)^{1/2} - 5 \log_{10}(B - 1.1) - 8 \quad \text{for } B > 2$$

$$(18a) \quad G(Y) \cong 20 \log_{10}(B + 0.1B^3) \quad \text{for } B \leq 2$$

$$\text{If } G(Y) < 2 + 20 \log K, \text{ set } G(Y) \text{ to the value } 2 + 20 \log K$$

حيث:

$$(18b) \quad B = \beta Y$$

ودقة شدة المجال المنعرج المعطاة بالمعادلة (13) محدودة بالتقريب المتأصل في استعمال الحد الأول فقط من سلسلة أنصاف الأقطار. والمعادلة (13) تعتبر أكثر دقة لأكثر من 2 dB لقيم X و Y_1 و Y_2 التي تقيدها المعادلة التالية:

$$(19) \quad X - (\beta Y_1)^{1/2} \Delta(Y_1, K) - (\beta Y_2)^{1/2} \Delta(Y_2, K) > X_{lim}$$

حيث:

$$(19a) \quad X_{lim} = 1,096 - 1,280 (1 - \beta)$$

$$(19b) \quad \Delta(Y, K) = \Delta(Y, 0) + 1,779 (1 - \beta) [\Delta(Y, \infty) - \Delta(Y, 0)]$$

وتعطى قيم $\Delta(Y, 0)$ و $\Delta(Y, \infty)$ كما يلي:

$$(19c) \quad \Delta(Y, 0) = 0,5 \left[1 + \tanh \left(\frac{0,5 \log(\beta Y) - 0,255}{0,3} \right) \right]$$

$$(19d) \quad \Delta(Y, \infty) = 0,5 \left[1 + \tanh \left(\frac{0,5 \log(\beta Y) + 0,255}{0,25} \right) \right]$$

وعلى ذلك، فإن المسافة الدنيا d_{min} التي تسري عليها المعادلة (13) تعطى بالمعادلة:

$$(19e) \quad X_{min} = X_{lim} + (\beta Y_1)^{1/2} \Delta(Y_1, K) + (\beta Y_2)^{1/2} \Delta(Y_2, K)$$

ويحصل على d_{min} من X_{min} باستعمال المعادلة (14a).

2.1.3 الحساب بواسطة المخططات البيانية

يمكن أن نجري الحساب أيضاً في ظل نفس شروط التقريب (هيمنة الحد الأول من سلسلة البقايا) باستعمال الصيغة التالية:

$$(20) \quad 20 \log \frac{E}{E_0} = F(d) + H(h_1) + H(h_2) \quad \text{dB}$$

حيث:

E : شدة المجال المستقبل

E_0 : شدة المجال في الفضاء الحر عند نفس المسافة

d : المسافة بين طرفي المسير

h_1 و h_2 : ارتفاعا الهوائيين فوق أرض كروية.

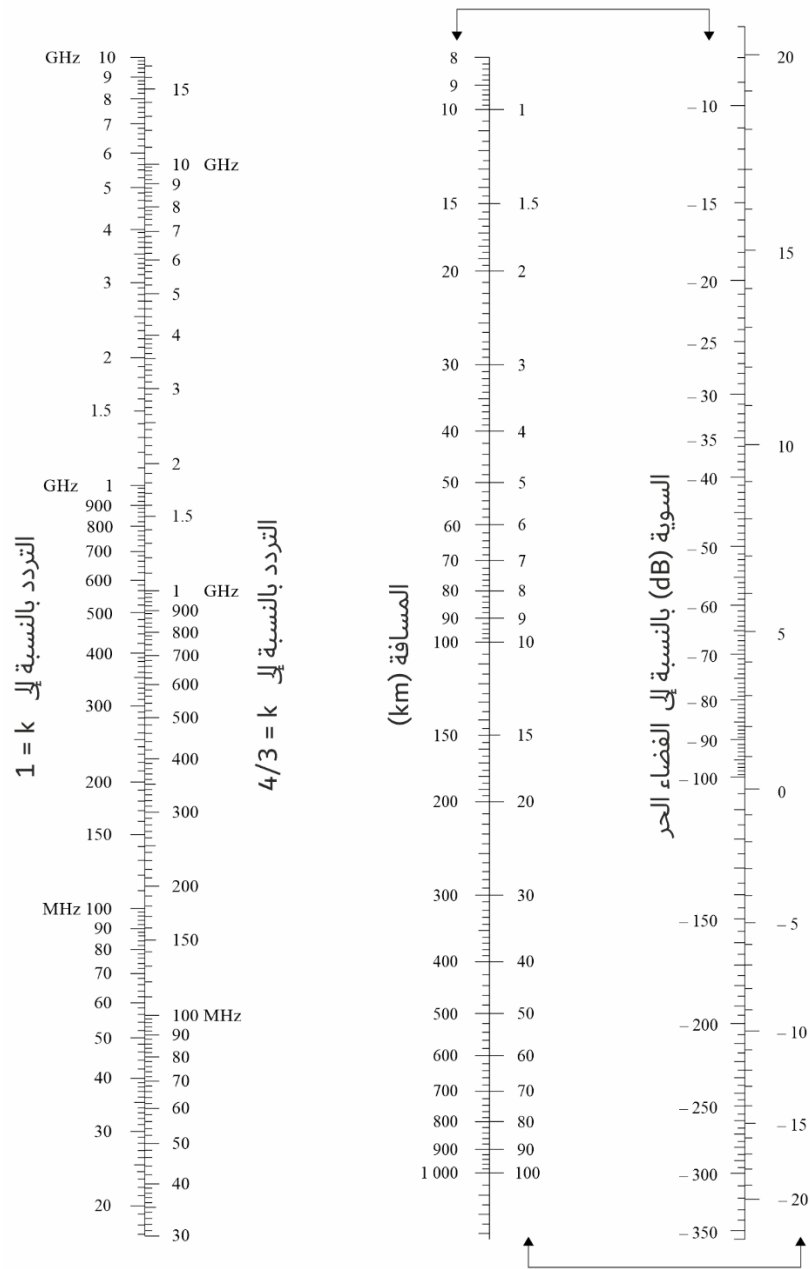
و تُعطى الدالة F (تأثير المسافة) والدالة H (كسب الارتفاع) بواسطة المخططات البيانية التي تحتوي عليها الأشكال 3 و 4 و 5 و 6. وتُعطى هذه المخططات البيانية (الأشكال من 3 إلى 6) مباشرة سوياً الإشارة المستقبلية بالنسبة إلى الفضاء الحر، بالنسبة إلى $k = 1$ و $k = 4/3$ ، وبالنسبة إلى ترددات أعلى من 30 MHz تقريباً. و k عامل نصف قطر الأرض الفعال الذي يرد تعريفه في التوصية ITU-R P.310. غير أنه يمكن حساب سوياً الإشارة المستقبلية بالنسبة إلى قيم أخرى تخص k باستعمال سلم الترددات بالنسبة إلى $k = 1$ ، مع الاستعاضة عن التردد المعني بتردد افتراضي يساوي f/k^2 بالنسبة إلى الشكلين 3 و 5، و $f/\sqrt{k}$ بالنسبة إلى الشكلين 4 و 6. وبالقرب من الأرض، تكون شدة المجال مستقلة عملياً عن الارتفاع. وتكتسي هذه الظاهرة أهمية كبيرة بالنسبة إلى الاستقطاب الرأسى فوق البحر. ولهذا السبب، يتضمن الشكل 6، خطأ رأسياً AB غليظاً. فإذا تقاطع الخط المستقيم مع هذا الخط الغليظ AB، يجب أن يُستعاض عن الارتفاع الحقيقي بقيمة أكبر بحيث يمس الخط المستقيم بالكاد أعلى خط الحد عند A.

الملاحظة 1 - يُعطى التوهين بالنسبة إلى الفضاء الحر بقلب قيم المعادلة (20) إلى قيم سالبة. ولا تصح هذه الطريقة إذا أعطت المعادلة (20) قيمة فوق شدة المجال في الفضاء الحر.

الملاحظة 2 - تأثير الخط AB مدرج في الطريقة العددية الواردة في الفقرة 1.1.3.

الشكل 3

الانعراج فوق أرض كروية - تأثير المسافة



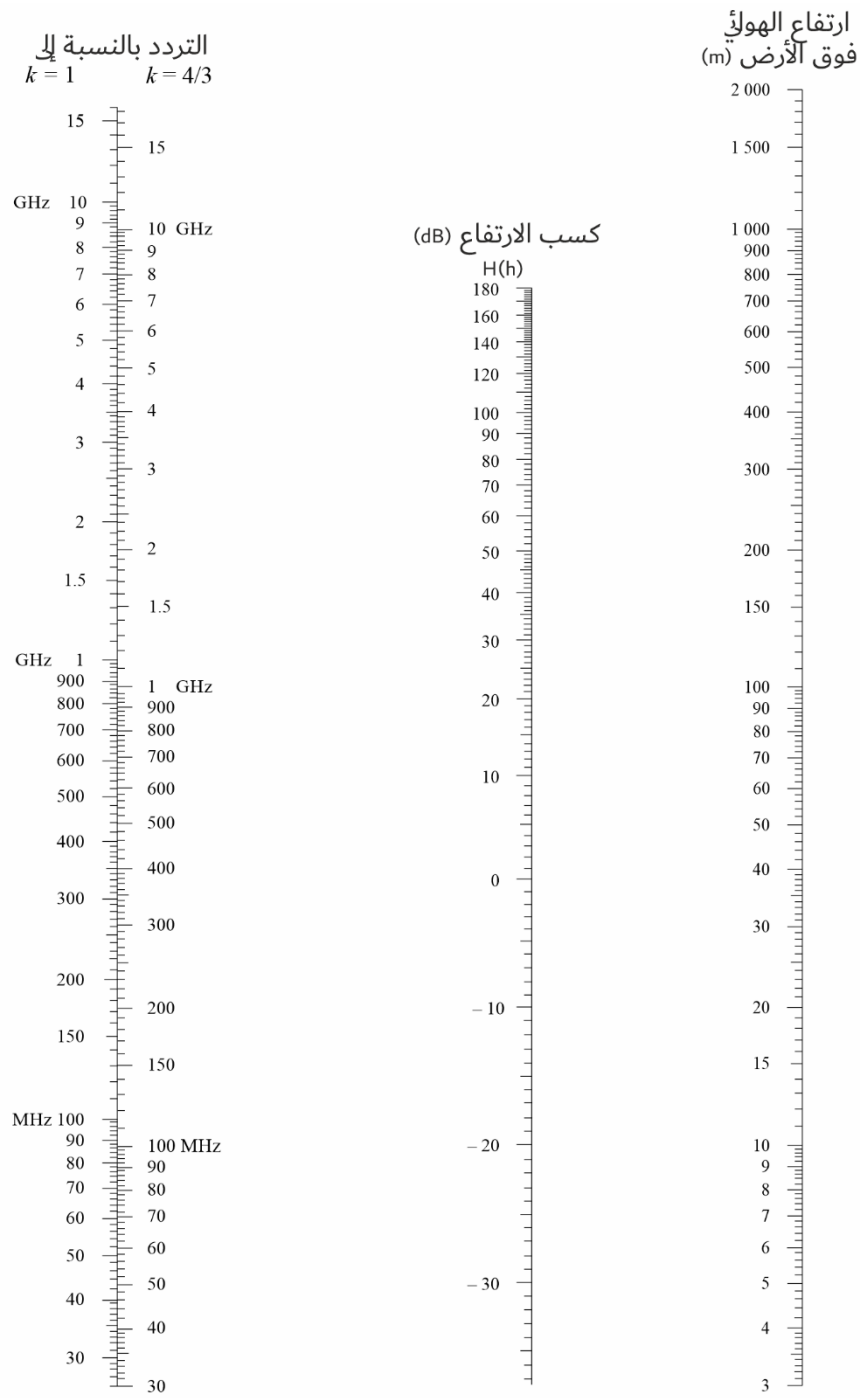
الاستقطاب الأفقي على الأرض
وفوق البحر الاستقطاب الرأسي على الأرض

(المقاييس الموسومة بأسهم ينبغي أن تستخدم معاً)

P.0526-03

الشكل 4

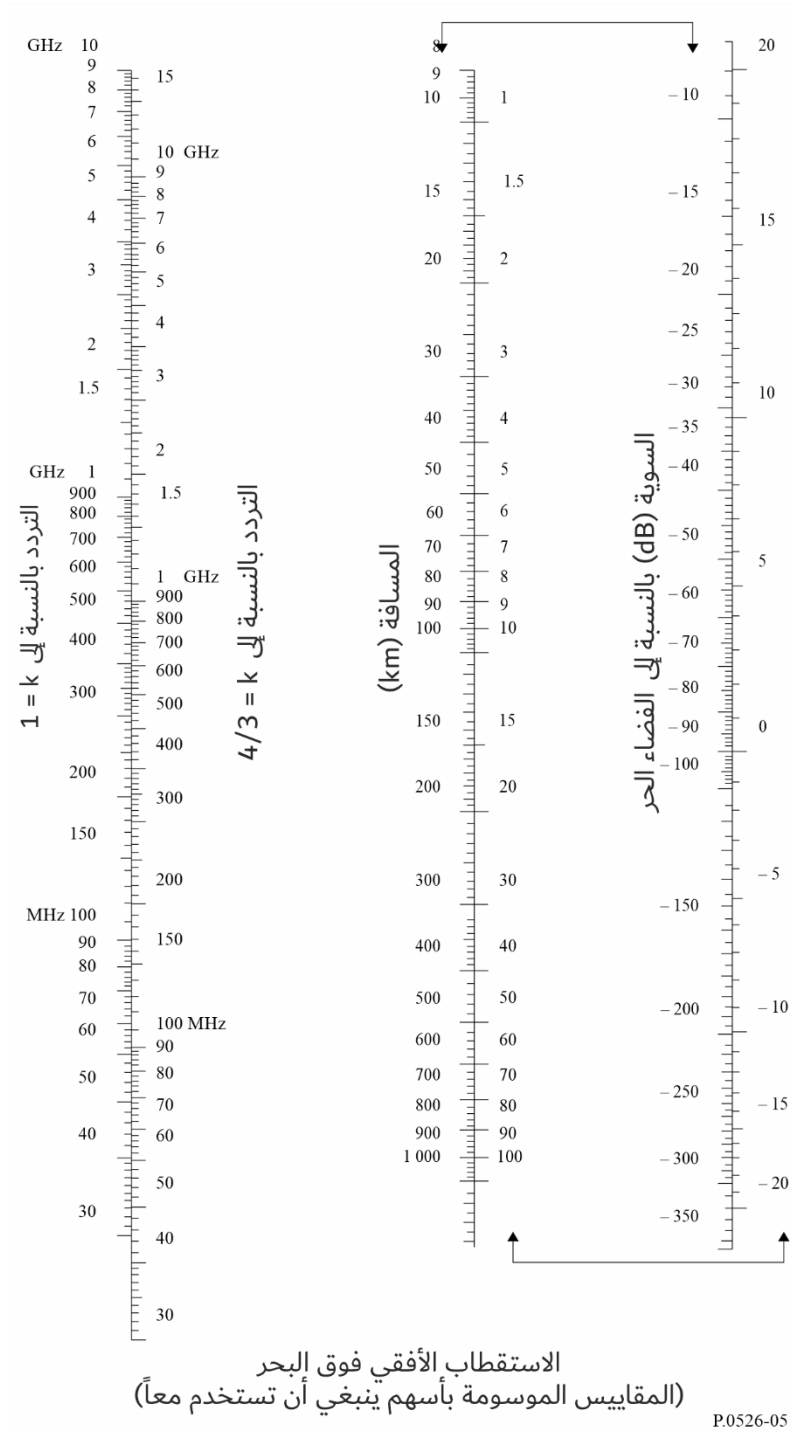
الانعراج فوق أرض كروية - كسب الارتفاع



الاستقطاب الأفقي - الأرض والبحر
الاستقطاب الرأسي - الأرض

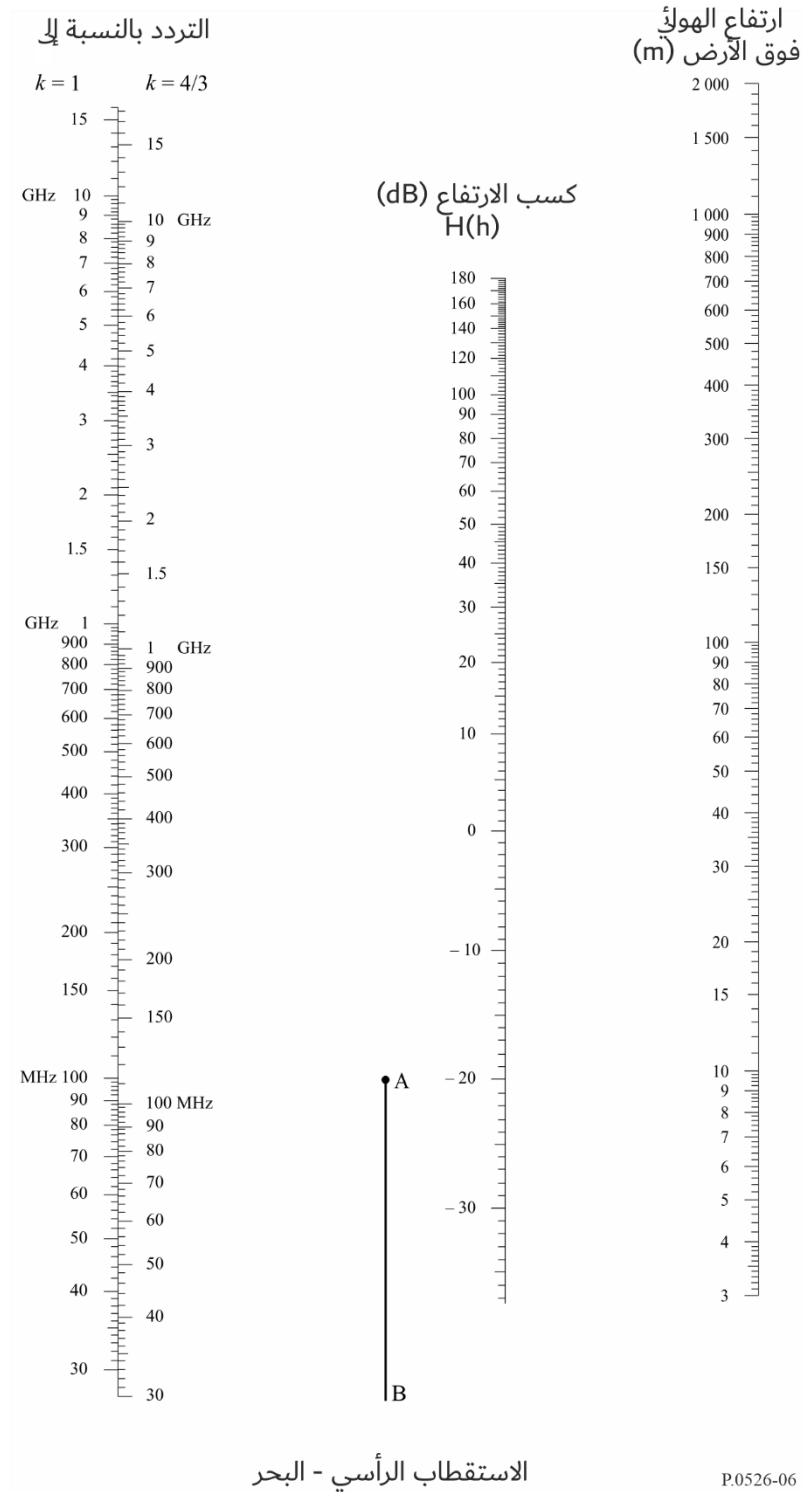
الشكل 5

الانعراج فوق أرض كروية - تأثير المسافة



الشكل 6

الانعراج فوق أرض كروية - كسب الارتفاع



2.3 خسارة الانعراج بالنسبة لأي مسافة عند تردد 10 MHz فما فوق

ينبغي استخدام إجراء الخطوة-خطوة التالي لمسير أرضي كروي بأي طول عند ترددات تساوي أو تزيد عن 10 MHz، بالنسبة لنصف قطري فعلي للأرض يزيد عن الصفر ($a_e > 0$). وتستعمل هذه الطريقة الحساب الوارد في الفقرة 1.1.3 لحالات فوق خط الأفق، وخلاف ذلك، يستعمل إجراء استكمال داخلي يقوم على نصف قطر وطني فعال للأرض.

ويستعمل الإجراء وحدات متسقة ذاتياً ويتم على النحو التالي:

تُحسب المسافة الهامشية على خط البصر من المعادلة:

$$(21) \quad d_{los} = \sqrt{2a_e} \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} \right)$$

وإذا كانت $d \geq d_{los}$ ، تُحسب خسارة الانعراج باستعمال الطريقة الواردة في الفقرة 1.1.3. لا توجد ضرورة لإجراء حسابات أخرى. وخلاف ذلك:

تُحسب أقل قيمة في فرق الارتفاع بين المسير الأرضي المنحني والشعاع بين الهوائيين، h (انظر الشكل 7)، ويتحصل على هذه القيمة من المعادلة:

$$(22) \quad h = \frac{\left(h_1 - \frac{d_1^2}{2a_e} \right) d_2 + \left(h_2 - \frac{d_2^2}{2a_e} \right) d_1}{d}$$

$$(22a) \quad d_1 = \frac{d}{2} (1 + b)$$

$$(22b) \quad d_2 = d - d_1$$

$$(22c) \quad b = 2\sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right\}$$

$$(22d) \quad c = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}$$

$$(22e) \quad m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)}$$

تُحسب فرق الارتفاع المطلوب لخسارة انعراج مقدارها صفر، h_{req} ، من المعادلة:

$$(23) \quad h_{req} = 0,552 \sqrt{\frac{d_1 d_2 \lambda}{d}}$$

فإذا كانت $h_{req} < h$ ، فإن خسارة الانعراج للمسير تساوي صفراً. ولا يحتاج الأمر إلى إجراء حسابات أخرى.

وخلاف ذلك:

تُحسب نصف قطر الأرض الفعّال المعدل، a_{em} ، والذي يعطي خط بصر هامشي عند المسافة d من المعادلة:

$$(24) \quad a_{em} = 0,5 \left(\frac{d}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}} \right)^2$$

وتُستعمل الطريقة الواردة في الفقرة 1.1.3 لحساب شدة مجال الانعراج بالنسبة إلى الفضاء الحر للمسار باستعمال نصف قطر الأرض الفعّال المعدل a_{em} بدلاً من نصف قطر الأرض الفعّال، a_e ، وتُحسب الخسارة A_h من خلال المعادلة $A_h = -20 \log_{10} \frac{E}{E_0}$.

فإذا كانت A_h سالبة، فإن خسارة الانعراج للمسير تساوي صفراً، ولا توجد ضرورة لإجراء مزيد من الحسابات.

أما خلاف ذلك، تُحسب خسارة الانعراج المستكملة داخلياً، A (dB) بالمعادلة:

$$A = [1 - h/h_{req}]A_h \quad (25)$$

4 الانعراج فوق عوائق معزولة أو مسير أرضي عام أو مسير أرض-فضاء

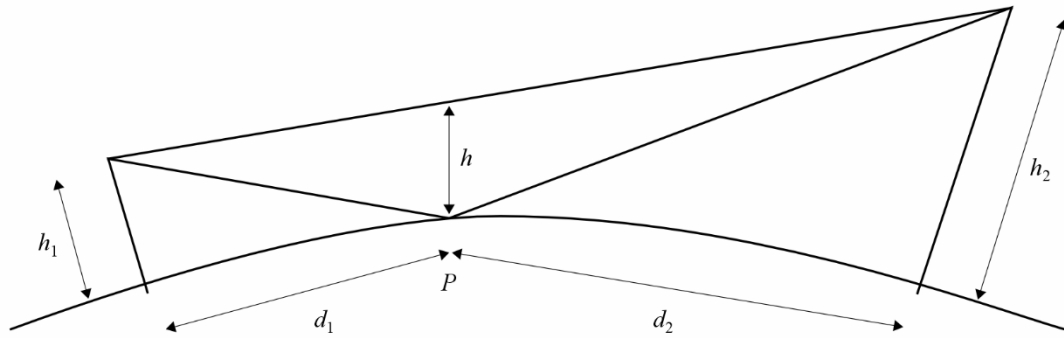
يواجه العديد من مسيرات الانتشار عائقاً واحداً أو عدة عوائق منفصلة، ومن المفيد أن تقدر الخسائر التي تسببها هذه العوائق. وإن من الضروري لأداء هذه الحسابات، معالجة أشكال العوائق بناءً على نسق تخطيطي، سواء بافتراض عائق كحد السكين ذي ثخانة لا يعتد بها أو عائق مدور وأملس مع نصف قطر انحناء في الجزء الأعلى يحدد بدقة. وبالنظر إلى أن العوائق الحقيقية تتخذ أشكالاً أكثر تعقيداً، يجب أن ينظر إلى البيانات التي ترد في هذه التوصية على أنها بيانات تقريبية فقط. ولا تراعي هذه النماذج اعتراض المظاهر الجانبية لاتجاه وصلة الراديو، التي قد يكون لها أثر كبير على خسارة الانعراج.

إن من الضروري في الحالات التي يكون فيها المسير المباشر بين طرفين أقصر بكثير من مسير الانعراج، أن تحسب خسارة الإرسال الإضافية العائدة إلى المسير الأطول.

وتنطبق المعطيات الواردة أدناه عندما يكون طول الموجة صغيراً جداً بالنسبة إلى حجم العوائق أي بصفة أساسية، بالنسبة إلى الموجات المترية (VHF) والموجات الأقصر ($f < 30$ MHz).

الشكل 7

خلوص المسير



P: نقطة الانعكاس

P.0526-07

1.4 عائق وحيد كحد السكين

في هذه الحالة المثالية القصوى (الشكلان 8أ و8ب)، تتحد جميع المعلومات الهندسية في معلمة واحدة بلا أبعاد يُرمز إليها عادة بواسطة v التي قد تتخذ مجموعة متنوعة من الأشكال المكافئة وفقاً للمعلومات الهندسية المختارة:

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (26)$$

$$v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (27)$$

$$(28) \quad v = \sqrt{\frac{2 h \theta}{\lambda}} \quad (v \text{ has the sign of } h \text{ and } \theta)$$

$$(29) \quad v = \sqrt{\frac{2 d}{\lambda} \cdot \alpha_1 \alpha_2} \quad (v \text{ has the sign of } \alpha_1 \text{ and } \alpha_2)$$

حيث:

h : ارتفاع قمة العائق فوق خط مستقيم يربط بين طرفي المسير. فإذا كان الارتفاع تحت هذا الخط، تكون h سالبة؛

d_1 و d_2 : مسافتنا طرفي المسير عند قمة العائق؛

d : طول المسير؛

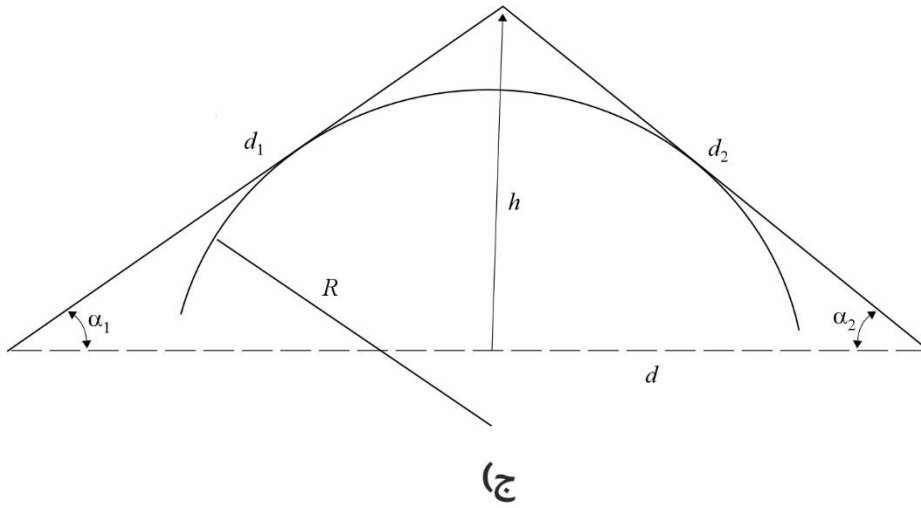
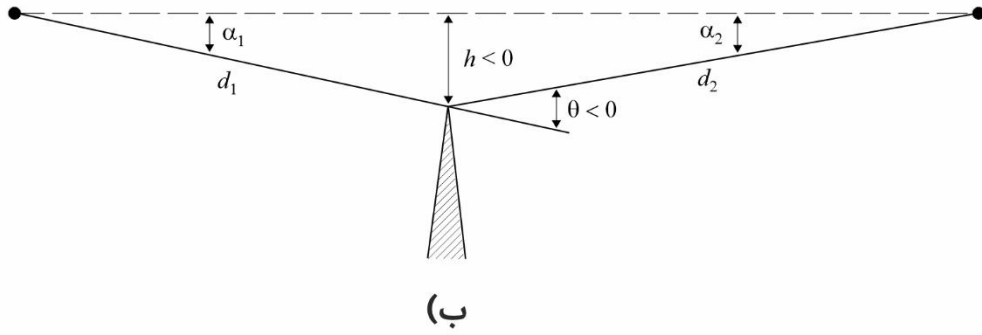
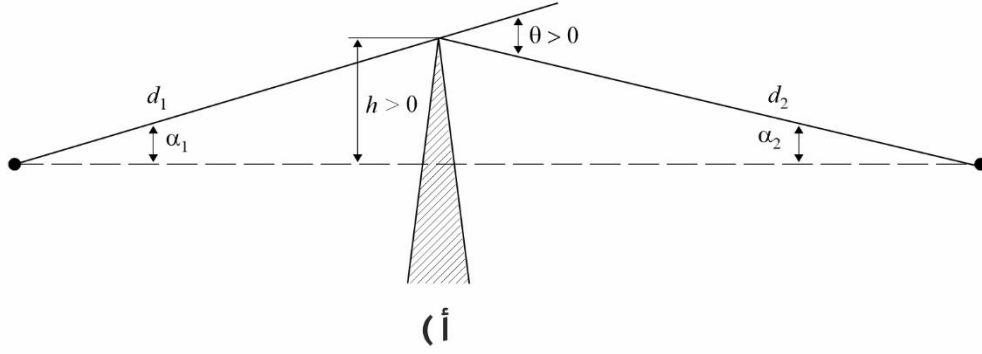
θ : زاوية الانعراج (rad)؛ علامتها هي نفس علامة h . ويفترض في الزاوية θ أن تكون أقل من 0,2 rad أو 12° تقريباً؛

α_1 و α_2 : الزاويتان بوحدة راديان بين قمة العائق وأحد الطرفين كما ينظر إليه من الطرف الآخر. وعلامات α_1 و α_2 هي نفسها علامة h في المعادلات أعلاه.

الملاحظة 1 - يجب أن يعبر بوحدة متسقة عن h و d و d_1 و d_2 و λ في المعادلات من (26) إلى (29).

الشكل 8

عناصر هندسية

(بالنسبة إلى تعاريف θ , α_1 , α_2 , d , d_1 , d_2 و R , راجع الفقرتين 1.4 و 2.4)

P.0526-08

يعطي الشكل 9 بوصفه دالة لقيمة ν الخسارة $J(\nu)$ (dB).

وتعطى $J(v)$ بواسطة:

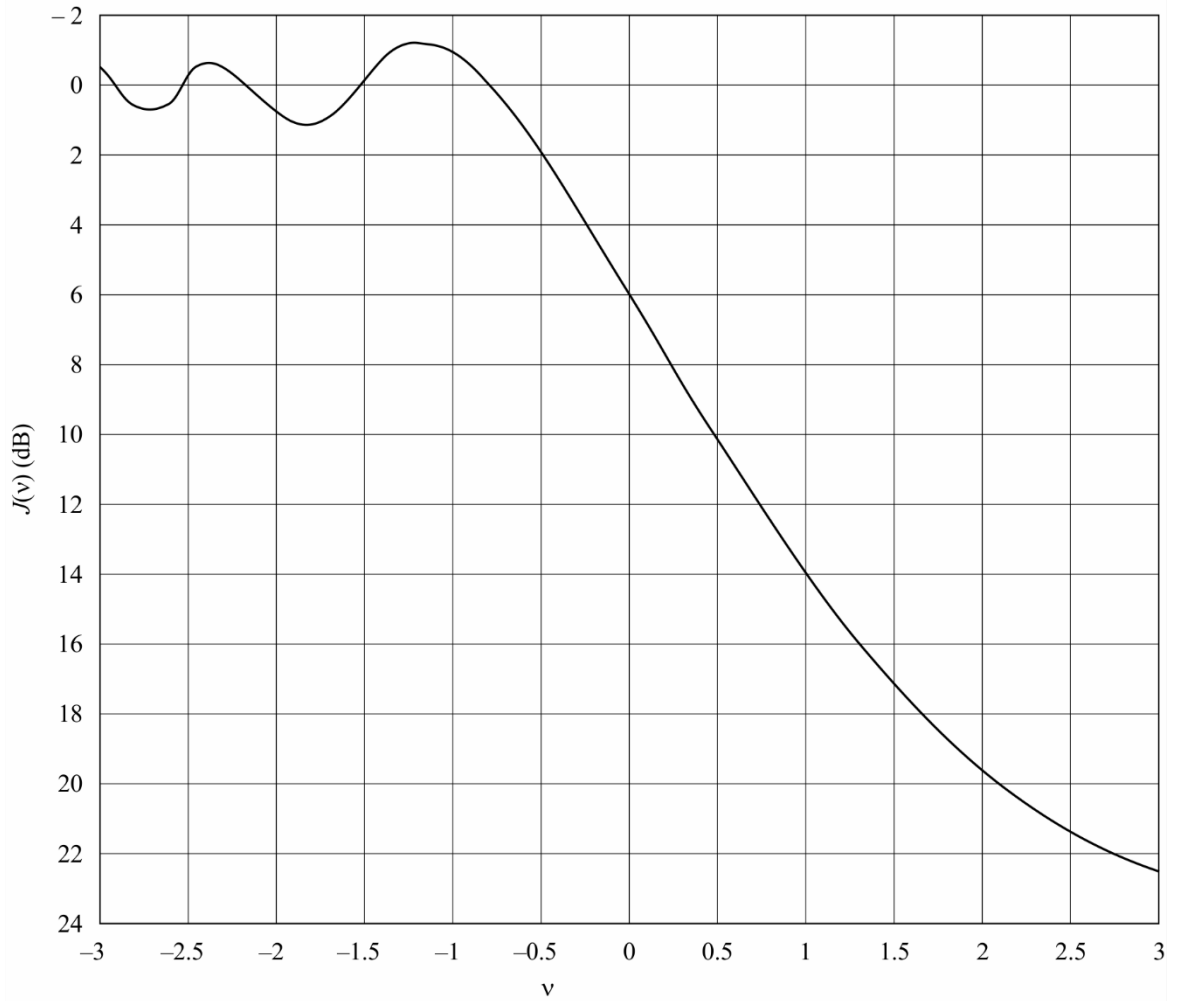
$$(30) \quad J(v) = -20 \log \left(\frac{\sqrt{[1 - C(v) - S(v)]^2 + [C(v) - S(v)]^2}}{2} \right)$$

حيث $C(v)$ الجزء الحقيقي و $S(v)$ الجزء الخيالي من تكاملية فريزل المركبة $F(v)$ التي ورد تعريفها في الفقرة 7.2. وبالنسبة إلى v أكبر من -0,78، يمكن الحصول على قيمة تقريبية انطلاقاً من الصيغة التالية:

$$(31) \quad J(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \quad \text{dB}$$

الشكل 9

خسارة انعراج على حافة كحد السكين



2.4 عائق مدور وحيد

يوضح الشكل (8 ج) هندسة عائق مدور لنصف القطر R . وجدير بالملاحظة أن المسافتين d_1 و d_2 والارتفاع h فوق الخط الأساسي تُقاس جميعاً بالنسبة إلى القمة حيث تتقاطع الأشعة المسقطية فوق العائق. ويمكن حساب خسارة الانعراج بالنسبة إلى هذه الهندسة على النحو التالي:

$$(32) \quad A = J(v) + T(m, n) \quad \text{dB}$$

حيث:

أ) $J(v)$ خسارة Fresnel-Kirchfff العائدة إلى حافة كحد السكين مكافئة توضع على نحو تكون فيه ذروتها عند نقطة القمة. ويمكن تقييم المعلمة v بلا أبعاد انطلاقاً من أي معادلة من المعادلات (26) إلى (29). ويمكن أن تكتب المعادلة (26)، على سبيل المثال، في وحدات عملية على النحو التالي:

$$(33) \quad v = 0,0316 h \left[\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2} \right]^{1/2}$$

حيث تُقاس h و λ بالأمتار و d_1 و d_2 بالكيلومترات.

ويمكن الحصول على $J(v)$ من الشكل 9 أو من المعادلة (31). مع الإشارة إلى أنه في حالة وجود عائق يحجب الانتشار في خط البصر، تكون v موجبة، والمعادلة (31) صحيحة.

ب) $T(m, n)$ التوهين الإضافي العائد إلى انحناء العائق:

$$(34a) \quad T(m, n) = 7,2m^{1/2} - (2 - 12,5n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{dB} \quad \text{for } mn \leq 4$$

$$(34b) \quad T(m, n) = -6 - 20 \log(mn) + 7,2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{dB} \quad \text{for } mn > 4$$

و

$$(35) \quad m = R \left[\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right] \left/ \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{1/3} \right.$$

$$(36) \quad n = h \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{2/3} \left/ R \right.$$

و R و d_1 و d_2 و h و λ في وحدات متسقة.

مع الإشارة إلى أنه عندما تنحو R نحو الصفر، وكذلك $T(m, n)$ ، تصبح المعادلة (32) انعراج حافة كحد السكين بالنسبة إلى أسطوانة يبلغ نصف قطرها صفراً.

ويتطابق نصف قطر عائق الانحناء مع نصف قطر الانحناء عند قمة القطع المكافئ الذي يتلاءم مع المظهر الجانبي للعائق قرب القمة. وفي حالة ملائمة القطع المكافئ، يجب أن تكون المسافة العمودية القصوى من القمة التي يتعين استعمالها في هذا الإجراء من رتبة نصف قطر منطقة فرينل الأولى حيث يوجد مكان العائق. ويحتوي الشكل 10 على مثال على هذا الإجراء، حيث:

$$(37) \quad y_i = \frac{x_i^2}{2r_i}$$

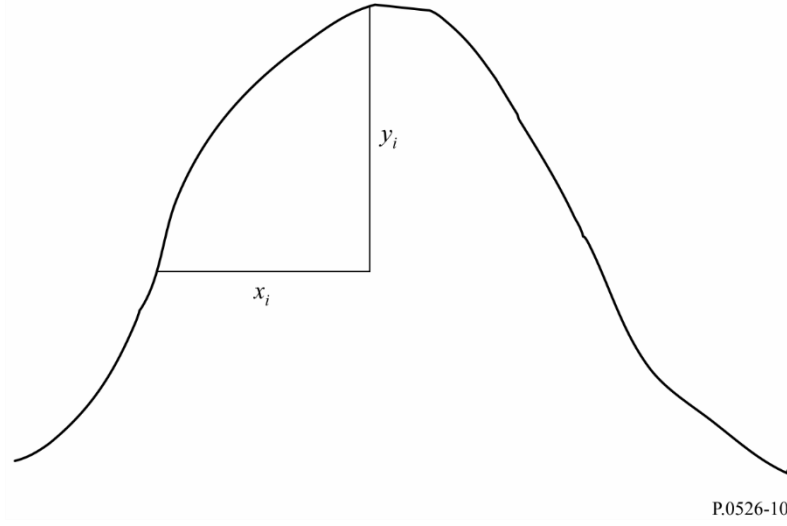
و r_i نصف قطر الانحناء الذي يتطابق مع العينة i للمظهر الجانبي الرأسي لقمة التل. ويُعطى متوسط نصف قطر انحناء العائق، في حالة العينات N ، بواسطة:

(38)

$$r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{2y_i}$$

الشكل 10

المظهر الجانبي الرأسى للعائق



3.4 حافتان معزولتان

تتمثل هذه الطريقة في تطبيق نظرية انعراج حافة وحيدة كحد السكين على العائقين على التوالي، وتعمل قمة العائق الأول كمصدر للانعراج على العائق الثاني (انظر الشكل 11). ويعطي مسير الانعراج الأول الذي تحدده المسافتان a و b والارتفاع h'_1 ، الخسارة L_1 (dB). ويُعطي مسير الانعراج الثاني الذي تحدده المسافتان b و c والارتفاع h'_2 ، الخسارة L_2 (dB). وتحسب L_1 و L_2 بواسطة الصيغ التي ترد في الفقرة 1.4. ويجب أن تضاف عبارة تصحيح L_c (dB) لكي يؤخذ في الحسبان الفصل b بين الحافتين. ويمكن تقدير L_c بواسطة الصيغة التالية:

(39)

$$L_c = 10 \log_{10} \left[\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right]$$

التي تصح عندما يتجاوز كل من L_1 و L_2 ، القيمة 15 dB تقريباً. وتُعطى بالتالي خسارة الانعراج الكلية بواسطة:

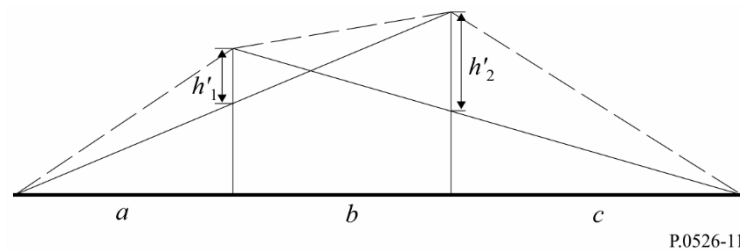
(40)

$$L = L_1 + L_2 + L_c$$

وتعتبر الطريقة الواردة أعلاه مفيدة بصفة خاصة في الحالة التي تعطي فيها الحافتان خسائر مماثلة.

الشكل 11

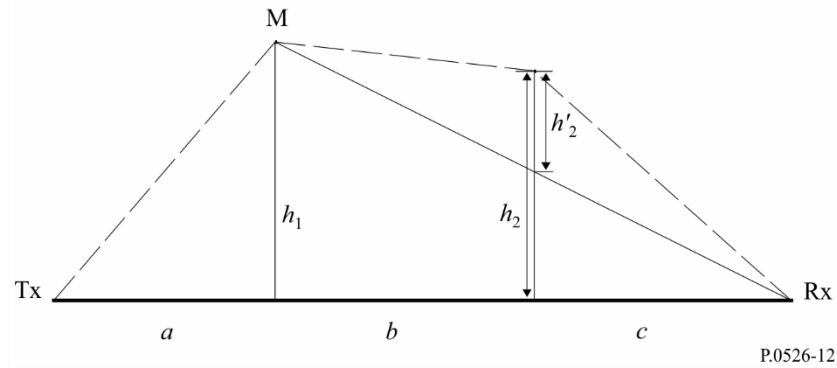
طريقة الحافتين المعزولتين



وإذا كانت إحدى الحافتين أعلى من الأخرى (انظر الشكل 12)، يحدد مسير الانعراج الأول بواسطة المسافتين a و $b + c$ ، والارتفاع h_1 . ويحدد مسير الانعراج الثاني بواسطة المسافتين b و c والارتفاع h'_2 .

الشكل 12

العائق الرئيسي والعائق الثانوي



تتمثل هذه الطريقة في تطبيق نظرية انعراج حافة وحيدة كحد السكين على العائقين على التوالي. أولاً، تحدد النسبة h/r العائق الرئيسي، M، حيث h ارتفاع الحافة انطلاقاً من المسير المباشر TxRx مثلما يتضح في الشكل 12، و r نصف قطر الجسم الإهليلجي الأول لفرينل الذي تعطيه المعادلة (2). ثم تُستعمل h'_2 ، ارتفاع العائق الثانوي انطلاقاً من المسير الفرعي MR لحساب الخسارة التي يسببها هذا العائق الثانوي. ويجب حذف عبارة تصحيح T_c (dB)، حتى يؤخذ في الحسبان المسافة بين الحافتين وكذلك ارتفاعهما. ويمكن تقدير T_c (dB) بواسطة الصيغة التالية:

$$(41) \quad T_c = \left[12 - 20 \log_{10} \left(\frac{2}{1 - \frac{\alpha}{\pi}} \right) \right] \left(\frac{q}{p} \right)^{2p}$$

وكذلك:

$$(42a) \quad p = \left[\frac{2}{\lambda} \frac{(a+b+c)}{(b+c)a} \right]^{1/2} h_1$$

$$(42b) \quad q = \left[\frac{2}{\lambda} \frac{(a+b+c)}{(a+b)c} \right]^{1/2} h_2$$

$$(42c) \quad \tan \alpha = \left[\frac{b(a+b+c)}{ac} \right]^{1/2}$$

h_1 و h_2 ارتفاعا الحافتين من المسير المباشر مرسل-مستقبل.

وتُعطى خسارة الانعراج الكلي بواسطة:

$$(43) \quad L = L_1 + L_2 - T_c$$

ويمكن تطبيق الطريقة نفسها في حالة العوائق المدورة باستعمال الطريقة الواردة في الفقرة 3.4.

وفي الحالات التي يمكن فيها التعرف بوضوح على عائق الانعراج كمبنى ذي سقف مسطح، لا يكون التقريب بواسطة حافة وحيدة كحد السكين كافياً. ومن الضروري حساب مجموع المطاوعة للمكونتين: إحداها تتعرض إلى انعراج مزدوج بحافتين كحد السكين، والأخرى إلى انعكاس إضافي من سطح السقف. وقد تبين في الحالة التي لا تعرف فيها انعكاسية سطح السقف وأي فرق في الارتفاع بين سطح السقف والجدران الجانبية معرفة دقيقة، أن نموذج الحافتين كحد السكين يؤدي إلى التنبؤ بشدة المجال المنعرجة تنبؤاً حسناً، مع تجاهل المكونة المنعكسة.

4.4 أسطوانات معزولة متعددة

يُوصى بهذه الطريقة فيما يتعلق بتقدير خسارة الانعراج على تضاريس أرضية غير منتظمة تكوّن عائقاً واحداً أو أكثر للانتشار في خط البصر حيث يمكن تمثيل كل عائق بواسطة أسطوانة يساوي نصف قطرها نصف قطر الانحناء عند قمة العائق، يُوصى بها في حالة تيسر المظهر الجانبي الرأسي التفصيلي عبر قمة التل.

ويجب أن ييسر المظهر الجانبي لارتفاع التضاريس الأرضية في شكل مجموعة من عينات ارتفاع الأرض فوق مستوى سطح البحر، حيث تمثل العينة الأولى والأخيرة ارتفاع كل من المرسل والمستقبل فوق مستوى سطح البحر. وينبغي أن يؤخذ تدرج الانكسارية للغلاف الجوي بالحسبان عبر مفهوم نصف قطر الأرض الفعال. وتوصف قيم المسافة والارتفاع في شكل صفيقة تحمل رموزاً من 1 إلى N ، حيث تساوي N عدد عينات المظهر الجانبي.

وفيما يلي، تُستخدم "المبادئ التالية" بصفة منتظمة:

h_i : ارتفاع فوق مستوى سطح البحر للنقطة i -th؛

d_i : المسافة بين المرسل والنقطة i -th؛

d_{ij} : المسافة من النقطة i -th إلى النقطة j -th.

تتمثل المرحلة الأولى في أداء تحليل "السلسلة الممددة" للمظهر الجانبي. وهو ما يسمح بالتعرف على نقاط العينة التي يمكن أن تتماس مع سلسلة ممتدة فوق المظهر الجانبي من المرسل إلى المستقبل. ويمكن القيام بهذا الأمر بواسطة الإجراء الآتي، الذي تكون فيه جميع قيم الارتفاع والمسافة في وحدات متسقة، وتقاس جميع الزوايا بواسطة وحدة الراديان. وتشمل الطريقة تقريبات تصحح بالنسبة إلى مسيرات راديوية مكوّنة زوايا صغيرة بالنسبة إلى الخط الأفقي. وإذا كان للمسیر تدرجات شعاعية تتجاوز حوالي 5°، فقد يقتضي الأمر هندسة أكثر دقة.

ويتم التعرف على كل نقطة من نقاط السلسلة بوصفها نقطة المظهر الجانبي ذات الارتفاع الزاوي الأعلى فوق الأفق المحلي منظوراً إليها من نقطة السلسلة السابقة، ابتداءً من أحد طرفي المظهر الجانبي وانتهاءً بالطرف الآخر. ويُعطى ارتفاع عينة المظهر الجانبي (i -th s)، منظوراً إليها من النقطة s ، بواسطة:

$$(44) \quad e = [(h_i - h_s)/d_{si}] - [d_{si}/2a_e]$$

حيث:

a_e : نصف قطر الأرض الفعال، يُعطى بواسطة:

$$k \times 6371 \text{ (km)} =$$

و

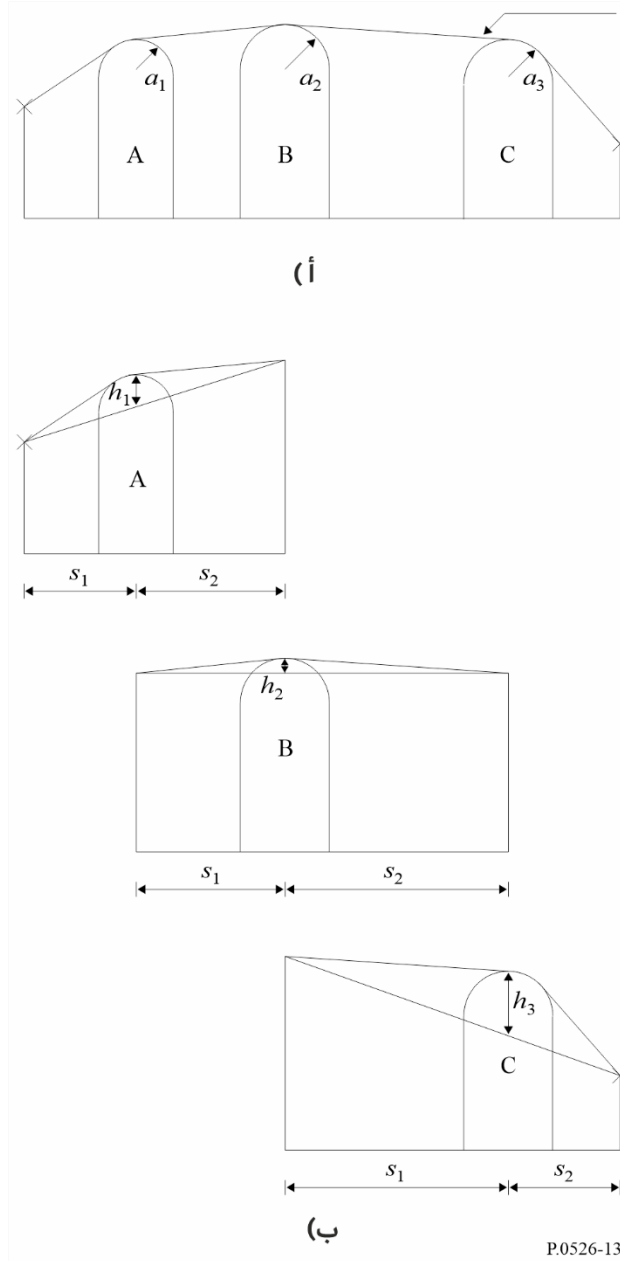
k : عامل نصف قطر الأرض الفعال.

ويُطبق الآن اختبار لتحديد ما إذا كان يجب أن تمثل أية مجموعة تتكون من نقطتي سلسلة أو أكثر نفس العائق الأرضي. وبالنسبة إلى العينات التي تبلغ المبعادة بينها 250 m أو أقل، يجب أن تعامل أية مجموعة من نقاط السلسلة التي تمثل عينات متعاقبة للمظهر الجانبي، بخلاف المرسل أو المستقبل، كعائق واحد.

وقد تمت الآن نمذجة كل عائق في شكل أسطوانة (انظر الشكل 13). وتتطابق هندسة كل واحد من الأسطوانات مع الشكل 8ج). مع الإشارة إلى أن المسافتين s_1 و s_2 ، في الشكل 13 بالنسبة إلى كل واحدة من الأسطوانات تظهران مقاستين أفقياً بين نقاط القمة، وأن هذه المسافات تقارب، بالنسبة إلى الأشعة الأفقية القريبة، مسافتا الميل d_1 و d_2 في الشكل 8ج). وقد يكون من الضروري بالنسبة إلى زوايا الأشعة بالنسبة إلى أفق أكبر من حوالي 5° تقريباً، أن تحدد s_1 و s_1 عند مسافتا ميل ما بين القمة، d_1 و d_2 .

الشكل 13

نموذج الأسطوانات المتسلسلة أ) المشكلة الإجمالية، ب) التفاصيل



مثلاً هو الحال في الشكل 13، يظهر ارتفاع h لكل واحدة من الأسطوانات مقاساً عمودياً انطلاقاً من القمة نزولاً إلى الخط المستقيم الذي يربط بين القمة المجاورة أو النقاط المطرافية. وتتطابق قيمة h بالنسبة إلى كل أسطوانة مع h في الشكل 8ج). ويمكن

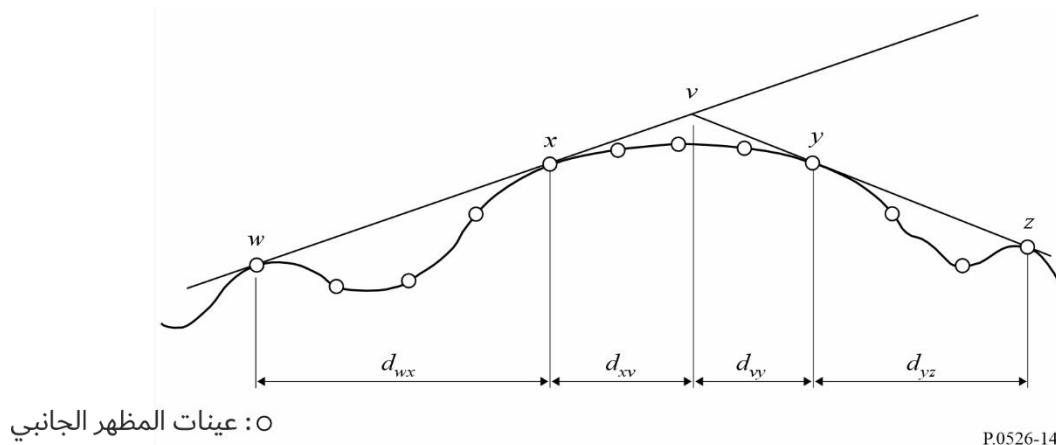
مرة أخرى بالنسبة إلى الأشعة الأفقية القريبة، أن تحسب ارتفاعات الأسطوانة على نحو عمودي، ولكن بالنسبة إلى زوايا أشعة شديدة الانحدار، من الضروري حساب h عند الزوايا الصحيحة بالنسبة إلى الخط الأساسي للأسطوانة.

ويوضح الشكل 14 هندسة عائق يتكون من أكثر من نقطة سلسلة. ويشار إلى النقاط التالية بواسطة:

- w : نقطة السلسلة الأقرب أو المطراف على جانب مرسل العائق الذي لا يمثل جزءاً من العائق؛
- x : نقطة السلسلة التي تكوّن جزء العائق الأقرب إلى المرسل؛
- y : نقطة السلسلة التي تكوّن جزء العائق الأقرب إلى المستقبل؛
- z : نقطة السلسلة الأقرب أو المطراف على جانب مستقبل العائق الذي لا يمثل جزءاً من العائق؛
- v : نقطة القمة التي يتم الحصول عليها بواسطة التقاطع بين الأشعة الساقطة فوق العائق.

الشكل 14

هندسة عائق متعدد النقاط



وستكون الأحرف w و x و y و z أيضاً رموزاً لصفائف مسافة المظهر الجانبي وعينات الارتفاع. وبالنسبة إلى عائق يتكون من نقطة سلسلة معزولة، سيكون لكل من x و y نفس القيمة وسيشيران إلى نقطة مظهر جانبي تتطابق مع القمة. ويلاحظ في حالة الأسطوانات المتسلسلة، أن النقطتين y و z بالنسبة إلى أسطوانة واحدة هما نقطتا w و x بالنسبة إلى الأسطوانة التي تليها، إلخ.

ويرد في المرفق 1 للملحق 1 وصف طريقة التدرج لتواءم الأسطوانات مع المظهر الجانبي العام للتضاريس الأرضية. ويتميز كل عائق بواسطة w و x و y و z . وتستعمل بالتالي الطريقة الواردة في المرفق 1 للملحق 1 للحصول على معلمات الأسطوانات s_1 و s_2 و h و R . ونظراً إلى أن نمذجة المظهر الجانبي أُعدت على هذا النحو، تُحسب خسارة الانعراج بالنسبة إلى المسير كمجموع لثلاثة حدود:

- مجموع خسائر الانعراج على الأسطوانات؛
- مجموع انعراج المسير الفرعي بين الأسطوانات (وبين الأسطوانات والمطارييف المجاورة)؛
- عبارة التصحيح.

ويمكن كتابة خسارة الانعراج الكلية، dB، بالنسبة إلى خسارة الفضاء الحر، كما يلي:

$$L_d = \sum_{i=1}^N L'_i + L''(wx)_1 + \sum_{i=1}^N L''(yz)_i - 20 \log C_N \quad \text{dB} \quad (45)$$

حيث:

L'_i : خسارة الانعراج على الأسطوانة i -th المحسوبة بواسطة الطريقة الواردة في الفقرة 2.4؛

$L''(wx)1$: خسارة انعراج المسير الفرعي بالنسبة إلى جزء المسير بين النقطتين w و x بالنسبة إلى الأسطوانة الأولى؛
 $L''(yz)i$: خسارة انعراج المسير الفرعي بالنسبة إلى جزء المسير بين النقطتين y و z بالنسبة إلى جميع الأسطوانات؛
 CN : عامل التصحيح الذي يستخدم في حالة خسارة الانتشار التي تعزى إلى الانعراج على الأسطوانات المتتالية.

ويحتوي المرفق 2 للملحق 1 على طريقة لحساب L'' بالنسبة إلى كل أجزاء خط البصر للمسير بين العوائق.
ويُحسب عامل التصحيح، C_N ، بواسطة:

$$(46) \quad C_N = (P_a/P_b)^{0.5}$$

حيث:

$$(47) \quad P_a = s_1 \prod_{i=1}^N [(s_2)_i] \left(s_1 + \sum_{j=1}^N [(s_2)_j] \right)$$

$$(48) \quad P_b = (s_1)_1 (s_2)_N \prod_{i=1}^N [(s_1)_i + (s_2)_i]$$

وتشير الأقواس الدائرية إلى أسطوانات فردية.

5.4 الطريقة لمسير أرضي عام

يوصى بهذه الطريقة من أجل الحالات التي تتطلب عملية تلقائية لتوقع خسارة الانعراج في أي نوع من المسيرات على النحو المحدد في مظهر جانبي سواء كانت على خط البصر أو عابرة للأفق وسواء كانت التضاريس وعرة أو ملساء. ويستند هذا النموذج إلى بناء بولينغتون (Bullington)، ولكنه يستفيد أيضاً من نموذج الانعراج فوق أرض كروية على النحو الموضح في الفقرة 2.3. وتُدمج هذه النماذج بحيث تكون النتيجة لمسير أملس تماماً هي نفسها لنموذج الأرض الكروية.

ويجب وصف المسير بمظهر جانبي يتكون من عينات من ارتفاع التضاريس بالأمتار فوق مستوى سطح البحر لسلسلة من المسافات بين مطراف وآخر. وبخلاف المظهر الجانبي المطلوب في الفقرة 4.4 يجب على النقطتين الأولى والأخيرة في هذا المظهر الجانبي، (d_1, h_1) و (d_n, h_n) ، أن تعطيان ارتفاع التضاريس تحت الهوائيين، ويجب تقديم علو الهوائيين فوق سطح الأرض بشكل منفصل.

وفي هذا النموذج، لا يُطلب تساوي تباعد نقاط المظهر الجانبي. ومع ذلك، فمن المهم ألا يكون التباعد الأقصى بين النقاط كبيراً مقارنة مع تباعد عينة البيانات الطبوغرافية التي تستخرج منها. ومن غير المستحسن بوجه خاص تمثيل مقطع ذي ارتفاع ثابت من المظهر الجانبي كمسطح مائي بنقطتين أولى وأخيرة يفصلهما طول مقطع مستو من المسير. ولا يؤدي هذا النموذج استكمالاً داخلياً بين نقاط المظهر الجانبي، ونظراً لانحناء الأرض عبر مسافة كبيرة بين نقاط المظهر الجانبي، فإن استواء المظهر الجانبي البيني يمكن أن يتسبب بأخطاء كبيرة.

وحيثما يصادف وجود منشآت حضرية أو غطاء نباتي على طول المظهر الجانبي، تُحسن الدقة عادة بإضافة ارتفاعات متناثرة تمثل الوضع إلى مرتفعات تضاريس الأرض الجرداء. وينبغي عدم القيام بذلك في المواقع الطرفية (النقطتان الأولى والأخيرة في المظهر الجانبي) وينبغي توخي الحرص على مقربة من المطاريف للتأكد من أن إضافة مرتفعات غطائية لا تسبب زيادة غير واقعية في زوايا الارتفاع عن الأفق كما يراها كل هوائي. وإذا كان المطراف في منطقة ذات غطاء أرض تحت ارتفاع الغطاء الممثل، قد يكون من الأفضل رفع المطراف إلى ارتفاع الغطاء لتطبيق هذا النموذج، واستخدام تصحيح منفصل لكسب الارتفاع يحسب الخسارة الإضافية التي يتكبدها المطراف في الواقع في موضعه الفعلي (الأدنى).

وينبغي أن تستخدم هذه الطريقة عند عدم توفر معلومات مسبقة عن طبيعة مسير الانتشار أو عوائق التضاريس المحتملة. وهذا ما درجت عليه العادة عند استخدام برنامج حاسوبي للمظاهر الجانبية المختارة من قاعدة بيانات ارتفاع التضاريس على أساس

تلقائي بالكامل دون تفقد فردي لخصائص المسير. وتعطي هذه الطريقة نتائج يمكن الاعتماد عليها لجميع المسيرات على خط البصر أو العابرة للأفق، وسواء كانت التضاريس وعرة أو ملساء، أو فوق البحر أو مسطحات مائية واسعة.

وتحتوي الطريقة على اثنين من النماذج الفرعية:

- أ) طريقة انعراج بولينغتن المستخدمة مع تصحيح مدبب لتوفير انتقال سلس بين خط البصر و خط عبر الأفق؛
 ب) طريقة الأرض الكروية الواردة في الفقرة 2.3.

ويُستخدم جزء بولينغتن من هذه الطريقة مرتين. ويرد في الفقرة الفرعية التالية وصف عام لحساب بولينغتن.

1.5.4 نموذج بولينغتن

في المعادلات التالية، تُحسب المنحدرات بوحدة m/km نسبة إلى خط الأساس الواصل لمستوى سطح البحر عند المرسل بمستوى سطح البحر عند المستقبل. وتكون المسافة والارتفاع للنقطة ذات الترتيب i -th في المظهر الجانبي d_i و h_i m فوق مستوى سطح البحر على التوالي، ويتخذ المتحول i قيمة تتراوح بين 1 و n حيث n هو عدد نقاط المظهر الجانبي والطول الكامل للمسير هو d km. وتسهيلاً للعمل، يشار إلى المطرافين في بداية ونهاية المظهر الجانبي كمرسل ومستقبل بارتفاعين بالأمتار فوق مستوى سطح البحر h_{rs} و h_{ts} على التوالي. ويعطى انحناء الأرض الفعال، C_e km⁻¹، بالكسر $1/r_e$ حيث r_e هو نصف قطر الأرض الفعال بالكيلومترات. ويمثل طول الموجة بالأمتار بالرمز λ .

يُيجاد النقطة الوسيطة في المظهر الجانبي ذات أعلى ميل للخط من المرسل إلى النقطة.

$$(49) \quad S_{tim} = \max \left[\frac{h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{ts}}{d_i} \right] \quad \text{m/KM}$$

حيث يتخذ مؤشر المظهر الجانبي i قيمة تتراوح بين 2 و $(1 - n)$.

ويُحسب ميل الخط من المرسل إلى المستقبل بافتراض مسير على خط البصر:

$$(50) \quad S_{tr} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} \quad \text{m/KM}$$

ويجب الآن أن تؤخذ حالتان بعين الاعتبار.

الحالة 1. المسير هو على خط البصر

في حال $S_{tim} < S_{tr}$ ، يكون المسير على خط البصر.

يُيجاد النقطة الوسيطة في المظهر الجانبي ذات أعلى معلمة انعراج v :

$$(51) \quad v_{\max} = \max \left\{ \left[h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\}$$

حيث يتخذ مؤشر المظهر الجانبي i قيمة تتراوح بين 2 و $(1 - n)$.

وفي هذه الحالة، تُعطى خسارة حد السكين لنقطة بولينغتن كما يلي:

$$(52) \quad L_{uc} = J(v_{\max}) \quad \text{dB}$$

حيث تُعطى الدالة J بالمعادلة (31) من أجل v_b أكبر من -0,78، وتكون صفراً خلاف ذلك.

الحالة 2. المسير عبر الأفق

في حال $S_{tim} \geq S_{tr}$ ، يكون المسير عبر الأفق.

يُيجاد النقطة الوسيطة في المظهر الجانبي ذات أعلى ميل للخط من المستقبل إلى النقطة.

$$(53) \quad S_{rim} = \max \left[\frac{h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{rs}}{d - d_i} \right] \quad \text{m/km}$$

حيث يتخذ مؤشر المظهر الجانبي i قيمةً تتراوح بين 2 و $(1 - n)$.

تُحسب مسافة نقطة بولينغتن من المرسل:

$$(54) \quad d_b = \frac{h_{rs} - h_{ts} + S_{rim} d}{S_{rim} + S_{rim}} \quad \text{km}$$

تُحسب معلمة الانعراج، v_b ، لنقطة بولينغتن:

$$(55) \quad v_b = \left[h_{ts} + S_{rim} d_b - \frac{h_{ts}(d - d_b) + h_{rs} d_b}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002d}{\lambda d_b (d - d_b)}}$$

وفي هذه الحالة، تُعطى خسارة حد السكين لنقطة بولينغتن كما يلي:

$$(56) \quad L_{uc} = J(v_b) \quad \text{dB}$$

ومن أجل الخسارة L_{uc} المحسوبة باستخدام إحدى المعادلتين (52) أو (56)، تُعطى خسارة انعراج بولينغتن في المسير كما يلي:

$$(57) \quad L_b = L_{uc} + [1 - \exp(-L_{uc}/6)](10 + 0.02 d)$$

2.5.4 الطريقة الكاملة

تُستخدم الطريقة المذكورة في الفقرة 1.5.4 للمظهر الجانبي الفعلي للتضاريس وارتفاعات الهوائي. وتُضبط خسارة انعراج بولينغتن الناتجة في المسير الفعلي L_{ba} dB عند L_b على النحو المعطى في المعادلة (57).

ويتحصل على ارتفاعي المرسل والمستقبل الفعليين نسبة إلى سطح أملس موائم مع المظهر الجانبي.

وتُحسب القيم المؤقتة الأولية لارتفاعات السطح الأملس في طرفي الإرسال والاستقبال للمسير كالتالي:

$$(58) \quad v_1 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1})$$

$$(59) \quad v_2 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1}) [h_i (2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1} (d_i + 2d_{i-1})]$$

$$(60a) \quad h_{stip} = \left(\frac{2v_1 d - v_2}{d^2} \right)$$

$$(60b) \quad h_{srip} = \left(\frac{v_2 - v_1 d}{d^2} \right)$$

إيجاد أعلى ارتفاع لعائق فوق مسير خط مستقيم من المرسل إلى المستقبل، h_{obs} ، وزاويتي الارتفاع عن الأفق α_{obr} و α_{obt} ، وكل ذلك على أساس هندسة الأرض المستوية، وفقاً لما يلي:

$$(61a) \quad h_{obs} = \max \{h_{obi}\} \quad \text{m}$$

$$(61b) \quad \alpha_{obt} = \max \{h_{obi} / d_i\} \quad \text{mrad}$$

$$(61c) \quad \alpha_{obr} = \max \{h_{obi} / (d - d_i)\} \quad \text{mrad}$$

حيث:

$$(61d) \quad h_{obi} = h_i - [h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i] / d \quad m$$

ويتخذ مؤشر المظهر الجانبي i قيمة تتراوح بين 2 و $(1 - n)$.

وتُحسب القيم المؤقتة لارتفاعات السطح الأملس في طرفي الإرسال والاستقبال للمسير:

إذا كان h_{obs} أقل من الصفر أو يساويه، عندئذ:

$$(62a) \quad h_{stp} = h_{stip} \quad \text{masl}$$

$$(62b) \quad h_{srp} = h_{srip} \quad \text{masl}$$

وإلا:

$$(62c) \quad h_{stp} = h_{stip} - h_{obs}g_t \quad \text{masl}$$

$$(62d) \quad h_{srp} = h_{srip} - h_{obs}g_r \quad \text{masl}$$

حيث:

$$(62e) \quad g_t = \alpha_{obt} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr})$$

$$(62f) \quad g_r = \alpha_{obr} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr})$$

وتُحسب القيم النهائية لارتفاعات السطح الأملس في طرفي الإرسال والاستقبال للمسير:

إذا كان h_{stp} أكبر من h_1 ، عندئذ:

$$(63a) \quad h_{st} = h_1 \quad \text{masl}$$

وإلا:

$$(63b) \quad h_{st} = h_{stp} \quad \text{masl}$$

إذا كان h_{srp} أكبر من h_n ، عندئذ:

$$(63c) \quad h_{sr} = h_n \quad \text{masl}$$

وإلا:

$$(63d) \quad h_{sr} = h_{srp} \quad \text{masl}$$

تُستخدم الطريقة المذكورة في الفقرة 1.5.4 للمظهر الجانبي الأملس بتصغير جميع ارتفاعات المظهر الجانبي، h_i ، مع تعديل ارتفاعات الهوائي:

$$(64a) \quad h'_{ts} = h_{ts} - h_{st} \quad \text{masl}$$

$$(64b) \quad h'_{rs} = h_{rs} - h_{sr} \quad \text{masl}$$

وتُضبط خسارة انعراج بولينغتن الناتجة في المسير الأملس L_{bs} dB عند L_b على النحو المعطى في المعادلة (57).

وتُستخدم طريقة الانعراج فوق أرض كروية على النحو الموضح في الفقرة 2.3 للطول الفعلي للمسير، $km d$ ، وبما يلي:

$$(65a) \quad h_1 = h'_{ts} \quad m$$

$$(65b) \quad h_2 = h'_{rs} \quad m$$

وتُضبط خسارة الانعراج الناتجة للأرض الكروية L_{sph} dB عند A على النحو المعطى في المعادلة (25).
وتعطى خسارة الانعراج للمسير العام الآن كما يلي:

$$(66) \quad L = L_{ba} + \max\{L_{sph} - L_{bs}, 0\} \quad dB$$

6.4 الطريقة لمسير عام مائل أرض-فضاء

يوصى بهذه الطريقة للتنبؤ بخسارة الانعراج لأي نوع من المسيرات المائلة على النحو المحدد في مظهر جانبي في منطقة الجزء الأرضي من المسير، سواء كانت على خط البصر أو عابرة للأفق وسواء كانت التضاريس وعرة أو ملساء، وتُفضّل عندما يكون الطرف المرتفع من المسير أبعد بكثير عن التضاريس العائقة من الطرف المنخفض منه. ويستند هذا النموذج إلى خسارة حد السكين وفق بناء بولينغتون، مقترناً ببناء مماثل يتنبأ بخسارة الأرض المستوية لمسير عام، ويُشار إليه باسم "نموذج الأرض المستوية الفعّال". وينبغي توخي الحذر بالقرب من المطارييف لضمان ألا تسبب ارتفاعات التضاريس المحلية في زوايا ارتفاع للأفق غير واقعية كما تُرى من كل هوائي.

وثبت أن هذه الطريقة دقيقة بدرجة معقولة في حالة التضاريس الوعرة التي قد تصل فيها العوائق إلى 50 dB بالنسبة إلى الفضاء الحر، وفي حالة التضاريس الملساء التي قد تصل فيها العوائق إلى 30 dB بالنسبة إلى الفضاء الحر، ولذلك فهي مناسبة لجميع المسيرات أرض-فضاء التي تكون فيها زاوية الارتفاع بين صفر و90 درجة. وقد تؤدي هذه الطريقة إلى تقدير خسارة الانعراج بأقل من قيمتها الفعلية عند زوايا ارتفاع سالبة، ولا سيما في التضاريس الملساء.

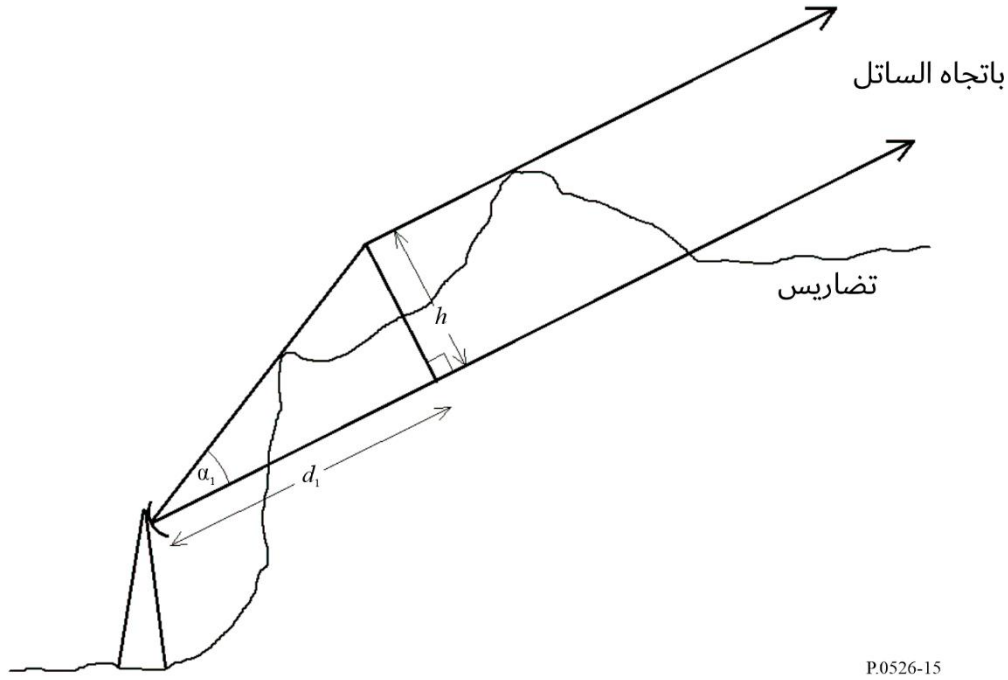
1.6.4 نموذج بولينغتون لمسير مائل أرض-فضاء

يمكن تطبيق بناء حد السكين لمثلث بولينغتون على التضاريس في منطقة الطرف الأسفل من مسار مائل يقع طرفه العلوي على مسافة بعيدة، وذلك بافتراض وجود أشعة متوازية باتجاه الطرف العلوي، كما هو مبين في الشكل 15، مع شعاع يغادر الهوائي عند الطرف السفلي من المسير متجهاً نحو الهوائي عند الطرف العلوي، ويمر عبر التضاريس إذا لم يكن المسير في خط البصر. وفي هذه الحالة، يُرسم شعاع آخر موازٍ لهذا الشعاع بحيث يكون مماساً للتضاريس، وتُستخدم المسافة العمودية h بين هذين الشعاعين المتوازيين لحساب معلمة الانعراج v باستخدام المعادلة (26)، مع d_1 كما هو مبين في الشكل 15. ويمكن إهمال الحد d_2 في المعادلة (26) إذا كان كبيراً جداً؛ وإلا فإن d_2 هو طول الجزء المتبقي من المسير المباشر، ويتقارب الشعاعان المتجهان إلى الطرف الأعلى من المسير عند هوائي الطرف الأعلى.

وإذا كان خط البصر خالياً من العوائق، تكون h سالبة، وتُقيّم عند النقطة التي يكون فيها خلوص فرينل في حدّه الأدنى. ويُقاس h عمودياً على شعاع خط البصر. وجميع القيم في المعادلة (26)، أي h و d_1 و d_2 و λ ، تكون بالوحدات نفسها.

وبعد حساب v باستخدام المعادلة (26)، تُقدّر خسارة حد السكين لبولينغتون $J(v)$ بالمعادلة (31)، شريطة أن تكون v أكبر من -0,78؛ وإلا فيُفترض أن $J(v) = 0$ وأن خسارة الانعراج تساوي صفراً. وإذا كانت v أكبر من -0,78، فيُنقل إلى الفقرتين 4.6.2 و4.6.3 لتقدير خسارة الانعراج الناجمة عن التضاريس.

الشكل 15
هندسة بولينغتون لمسير مائل



P.0526-15

2.4.6 نموذج الأرض المستوية الفعال

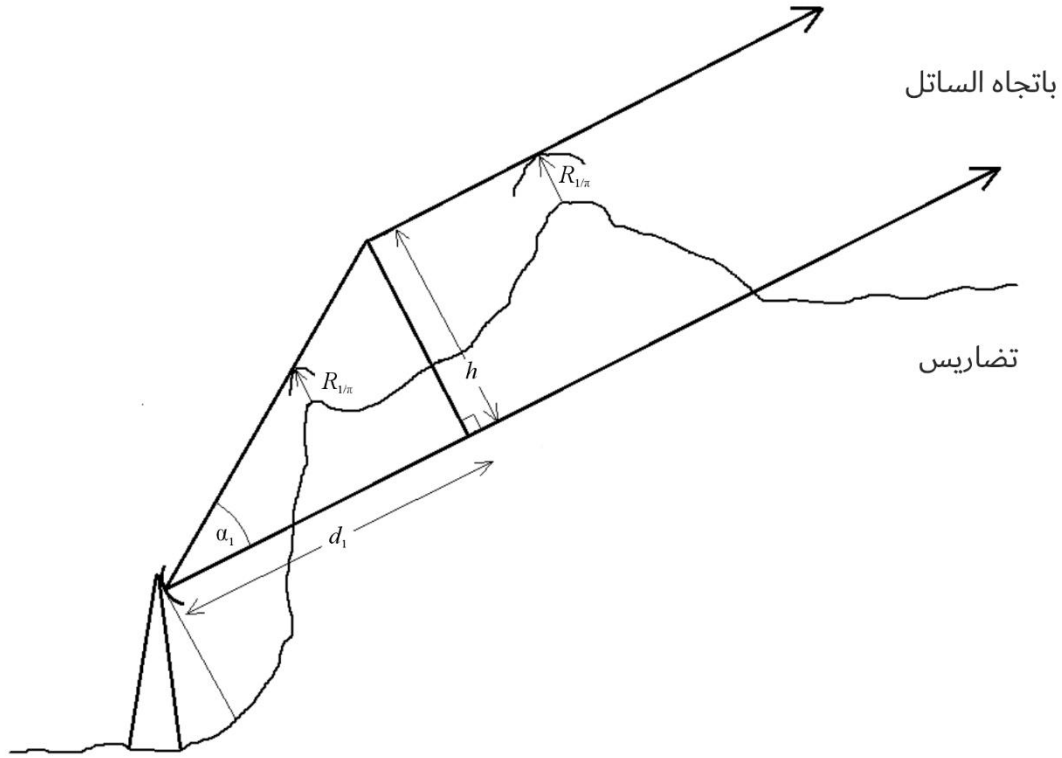
طريقة خسارة حد السكين لمثلث بولينغتون المبينة في الفقرة 1.6.4 هي طريقة بسيطة لتقدير خسارة الانعراج، ويمكن تطبيقها على أي تضاريس كيفما كانت، ولكن لا يمكن افتراض دقتها إلا في حالة وجود عائق حقيقي وحيد كحد السكين. وفيما يخص التضاريس العائقة الأخرى، فإن خسارة حد السكين لبولينغتون $J(v)$ تمثل عموماً تقديراً أقل من القيمة الفعلية لخسارة الانعراج. ويُبدرك هذا القصور في الطريقة التالية، لا سيما بالنسبة للتضاريس الملساء في منطقة الطرف الأسفل من المسير.

ونموذج الأرض المستوية الفعال الموصوف هنا هو طريقة بسيطة لتقدير خسارة الانعراج يمكن تطبيقها على أي تضاريس كيفما كانت، ولكن لا يمكن افتراض دقتها إلا في حالة أي مسير على أرض مستوية يكون خلوصه منخفضاً بما يكفي للتسبب في خسارة الانعراج. وفيما يخص التضاريس العائقة غير المنتظمة، غالباً ما يؤدي هذا النموذج البسيط إلى المبالغة في تقدير خسارة الانعراج، بخلاف معادلة خسارة حد السكين لبولينغتون (56)، التي غالباً ما تقدر الخسارة بأقل من قيمتها الفعلية.

والإجراء المتبع لتقدير الخسارة في نموذج الأرض المستوية الفعال هي طريقة مثلث العائق، المشابهة لبناء بولينغتون، باستثناء أن نقاط المظهر الحائبي للتضاريس تُرفع بمقدار نصف قطر فريزل الأول مقسوماً على $1/\sqrt{\pi}$ ، وتُعطى من خلال الصيغة $R_{1/\pi} \approx \sqrt{\lambda d_1/\pi}$ في حالة الساتل مع استخدام وحدات متسقة، في اتجاه متعامد مع خط الشعاع المباشر، قبل إيجاد الأشعة المماسية انطلاقاً من كل هوائي. وهذا البناء مبين في الشكل 16.

الشكل 16

هندسة نموذج الأرض المستوية الفعال لمسير مائل



P.0526-16

زاويتا هذه الأشعة المماسية لخط الشعاع المباشر هما α_1 و α_2 ، بوحدة الراديان. وإذا كان طول المسير الكلي هو d وطول الموجة هو λ ، وكلاهما بالوحدات نفسها، فإن الخسارة الناجمة عن العوائق في نموذج الأرض المستوية الفعال بالنسبة إلى الفضاء الحر تُعطى من خلال المعادلة التالية:

$$(67) \quad L_e = -40 \log_{10} [\sqrt{\pi \alpha_1 \alpha_2 d / \lambda + 1} - \sqrt{\pi \alpha_1 \alpha_2 d / \lambda}]$$

وفي حالة مسير مائل كبير الطول، يمكن تقريب الارتفاع h لمثلث العائق على نحو $h \approx \alpha_2 d$ ، ما يؤدي إلى الصيغة التالية:

$$(68) \quad L_e \approx -40 \log_{10} [\sqrt{\pi \alpha_1 h / \lambda + 1} - \sqrt{\pi \alpha_1 h / \lambda}]$$

وكما هو مبين في الشكل 16، يكون الارتفاع h والزاوية α_1 هنا بتضاريس مرفوعة بمقدار $1/\sqrt{\pi}$ من نصف قطر منطقة فريزل الأولى $(R_{1/\pi})$. وللتيسير، يمكن قياس المسافات مثل d_1 في اتجاه الشعاع المباشر إلى الساتل، ويجب قياس الارتفاعات مثل h أو $R_{1/\pi}$ عمودياً على الشعاع المباشر.

3.6.4 نموذج المسير المائل الكامل

تُدمج خسارة حد السكين لبولينغتون $J(v)$ المبينة في الفقرة 1.6.4 مع خسارة الأرض المستوية الفعالة L_e المبينة في الفقرة 2.6.4 للحصول على خسارة الانعراج L_{eb} على النحو التالي:

$$(69) \quad L_{eb} = k_b J(v) + (1 - k_b) L_e$$

حيث

$$(70) \quad k_b = \max \left\{ \frac{(L_e - 26)}{70}, 0 \right\}$$

وقد تبين أن الخسارة المدجة L_{eb} توفر دقة معقولة في التنبؤ بخسارات الانعراج الناجمة عن التضاريس قد تصل إلى زيادة بمقدار 50 dB للفضاء الحر في حالة التضاريس غير المنتظمة. وقد تؤدي إلى تقدير خسارة الانعراج بأقل من قيمتها الفعلية في التضاريس الملساء خارج خط البصر، أي عند زوايا ارتفاع سالبة.

5 الانعراج بواسطة حواجز رقيقة

تفترض الطرق التالية أن العائق يتخذ شكل حواجز رقيقة. ويمكن أن تُطبق هذه الطرق على الانتشار حول عائق أو عبر فتحة.

1.5 حواجز ذات عرض محدود

يمكن كبت التداخل الذي يتعرض له موقع استقبال (محطة أرضية صغيرة مثلاً) بواسطة حاجز اصطناعي محدود العرض يعترض اتجاه الانتشار. ويمكن في هذه الحالة، حساب المجال في ظل الحاجز من خلال الأخذ بحواف ثلاث كحد السكين في الاعتبار، أي أعلى الحاجز وجانباه. وتؤدي التداخلات البناءة وغير البناءة للإسهامات الثلاثة المستقلة إلى تقلبات سريعة في شدة المجال عبر مسافات تعادل طول الموجة. ويقدم النموذج المبسط التالي تقديرات لقيم خسارة الانعراج الأدنى والمتوسطة حسب الموقع. ويتمثل هذا النموذج في جمع اتساع الإسهامات الفردية لتقدير خسارة الانعراج الأدنى، وجمع أسى للحصول على تقدير يخص متوسط خسارة الانعراج. وقد اختُبر هذا النموذج في ظروف من الحسابات الدقيقة بواسطة نظرية الانعراج الموحدة (UTD) وقياسات عالية الدقة.

المرحلة 1: حساب المعلمة الهندسية v بالنسبة إلى حواف ثلاث كحد السكين (الذروة والجانب الأيسر والجانب الأيمن) باستعمال أي من المعادلات من (26) إلى (29).

المرحلة 2: حساب عامل الخسارة $J(v) = 10^{J(v)/20}$ الذي يرتبط بكل حافة بالاستناد إلى المعادلة (31).

المرحلة 3: حساب أدنى خسارة الانعراج J_{min} انطلاقاً من:

$$(71) \quad J_{min}(v) = -20 \log_{10} \left[\frac{1}{J_1(v)} + \frac{1}{J_2(v)} + \frac{1}{J_3(v)} \right] \quad \text{dB}$$

أو بطريقة أخرى،

المرحلة 4: حساب خسارة الانعراج المتوسطة J_{av} انطلاقاً من:

$$(72) \quad J_{av}(v) = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{J_1^2(v)} + \frac{1}{J_2^2(v)} + \frac{1}{J_3^2(v)} \right] \quad \text{dB}$$

2.5 الانعراج بواسطة فتحات مستطيلة أو فتحات أو حواجز مركبة

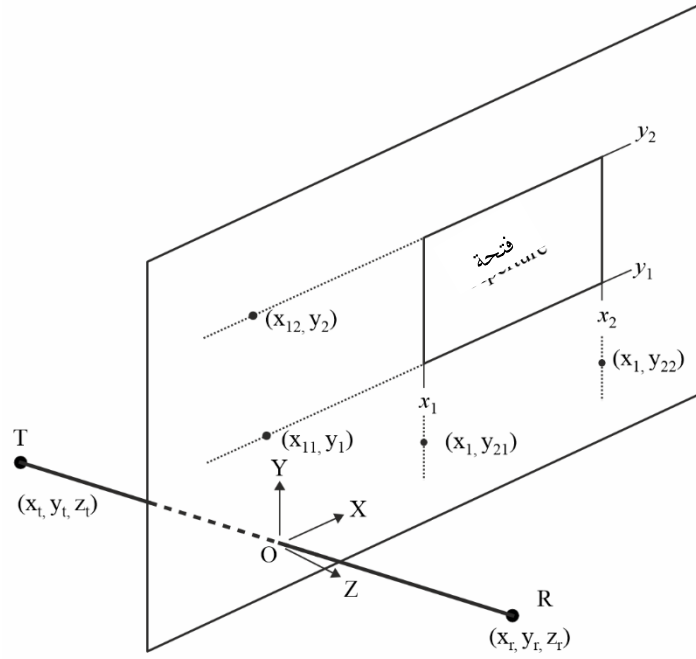
يمكن استعمال الطريقة الموصوفة أدناه للتنبؤ بخسارة الانعراج الناتجة عن فتحة مستطيلة "تمتص بالكامل" حاجزاً رقيقاً. ويمكن استعمال هذه الطريقة لتغطية العديد من الفتحات المستطيلة أو الحواجز الرفيعة، وهي تُعدّ بالتالي طريقة بديلة بالنسبة إلى حاجز ذي عرض محدود. وقد نوقشت هذه الطريقة في الفقرة 1.5.

1.2.5 الانعراج بواسطة فتحة مستطيلة وحيدة

يبين الشكل 17 الهندسة المستعملة لتمثيل فتحة مستطيلة "تمتص بالكامل" حاجزاً رقيقاً.

الشكل 17

هندسة فتحة مستطيلة وحيدة



P.0526-17

تُعطى مواقع حواف الفتحات، x_1 و x_2 و y_1 و y_2 داخل نظام إحداثيات ديكارتي حيث يقع المصدر عند النقطة التي يمر عندها الخط المستقيم من المرسل T عند الإحداثيات x_t و y_t و z_t إلى المستقبل R عند الإحداثيات x_r و y_r و z_r عبر الحاجز في المستوى X-Y، مع انتشار لا يوازي بالضرورة المحور Z. والأصل هو على مستوى الحاجز.

والزاوية θ_p بين اتجاه الانتشار والمحور Z هي

$$(73) \quad \theta_p = \arctan\left(\frac{\sqrt{(x_r - x_t)^2 + (y_r - y_t)^2}}{z_r - z_t}\right) \quad \text{rad}$$

وإن شدة المجال، e_a ، عند المستقبل في وحدات خطية مقيسة بالنسبة إلى الفضاء الحر وبصيغة مركبة يمكن تقديره لزاوية θ_p صغيرة عن طريق أسلوب تكاملات فريزل للفقرة 1.1.2.5، أو بدقة معقولة لأي زاوية θ_p باستعمال الطريقة شبه تجريبية للفقرة 2.1.2.5.

وتُعطى خسارة الانعراج المقابل L_a بواسطة:

$$(74) \quad L_a = -20 \log_{10}(|e_a|) \quad \text{dB}$$

1.1.2.5 طريقة تكاملات فريزل

$$e_a(x_1, x_2, y_1, y_2) = 0.5(C_x S_y + S_x C_y) + j 0.5(S_x S_y - C_x C_y) \quad (75) \quad e_a(x_1, x_2, y_1, y_2) = 0.5(C_x S_y + S_x C_y) + j 0.5(S_x S_y - C_x C_y)$$

حيث:

$$(76a) \quad C_x = C(v_{x2}) - C(v_{x1})$$

$$(76b) \quad C_y = C(v_{y2}) - C(v_{y1})$$

$$(76c) \quad S_x = S(v_{x2}) - S(v_{x1})$$

$$(76d) \quad S_y = S(v_{y2}) - S(v_{y1})$$

ويمكن تقييم قيمتي $C(v)$ و $S(v)$ كما يردان في المعادلتين (7a) و (7b)، ويمكن تقييمها انطلاقاً من معامل فريزل المركب باستعمال المعادلتين (8a) و (8b).

ومعلمات الانعراج الأربع v_{x1} و v_{x2} و v_{y1} و v_{y2} هي:

$$(77a) \quad v_{x1} = \text{sgn}(x_1) \sqrt{\frac{2}{\lambda} |x_1|^{1.18} \left(\frac{1}{z_r} - \frac{1}{z_t} \right)^{0.18} |\phi_{21}|^{0.82}}$$

$$(77b) \quad v_{x2} = \text{sgn}(x_2) \sqrt{\frac{2}{\lambda} |x_2|^{1.18} \left(\frac{1}{z_r} - \frac{1}{z_t} \right)^{0.18} |\phi_{22}|^{0.82}}$$

$$(77c) \quad v_{y1} = \text{sgn}(y_1) \sqrt{\frac{2}{\lambda} |y_1|^{1.18} \left(\frac{1}{z_r} - \frac{1}{z_t} \right)^{0.18} |\phi_{11}|^{0.82}}$$

$$(77d) \quad v_{y2} = \text{sgn}(y_2) \sqrt{\frac{2}{\lambda} |y_2|^{1.18} \left(\frac{1}{z_r} - \frac{1}{z_t} \right)^{0.18} |\phi_{12}|^{0.82}}$$

مع:

$$(77e) \quad \phi_{21} = \arctan\left(\frac{x_1 - x_r}{z_r}\right) - \arctan\left(\frac{x_1 - x_t}{z_t}\right) \quad \text{rad}$$

$$(77f) \quad \phi_{22} = \arctan\left(\frac{x_2 - x_r}{z_r}\right) - \arctan\left(\frac{x_2 - x_t}{z_t}\right) \quad \text{rad}$$

$$(77g) \quad \phi_{11} = \arctan\left(\frac{y_1 - y_r}{z_r}\right) - \arctan\left(\frac{y_1 - y_t}{z_t}\right) \quad \text{rad}$$

$$(77h) \quad \phi_{12} = \arctan\left(\frac{y_2 - y_r}{z_r}\right) - \arctan\left(\frac{y_2 - y_t}{z_t}\right) \quad \text{rad}$$

2.1.2.5 الطريقة شبه التجريبية

ولدقة معقولة لأي زاوية θ_p ، لا تتطلب الطريقة التالية تكاملات فريزل $C(v)$ و $S(v)$:

$$(78) \quad e_a = \prod_{i=1}^2 \left[\text{sgn}(\phi_{i1}) \left(\frac{1}{2} - \frac{ph_{i1}}{Ph} G_{i1} \right) - \text{sgn}(\phi_{i2}) \left(\frac{1}{2} - \frac{ph_{i2}}{Ph} G_{i2} \right) \right]$$

حيث:

$$(79) \quad G_{ij} = \cos\left(\frac{\phi_{ij}}{2}\right) \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctan(1.4v_{ij}) \right]$$

مع ϕ_{ij} من المعادلتين (77e) إلى (77h)، و

$$(80) \quad v_{ij} = 2 \sqrt{\frac{1}{\lambda} (D_{t-proj-ij} + D_{r-proj-ij} - r_{proj-i})}$$

$$(81a) \quad r_{proj-1} = \sqrt{(z_r - z_t)^2 + (y_r - y_t)^2}$$

$$(81b) \quad r_{proj-2} = \sqrt{(z_r - z_t)^2 + (x_r - x_t)^2}$$

$$(82a) \quad D_{t-proj-11} = \sqrt{z_t^2 + (y_1 - y_t)^2}$$

$$(82b) \quad D_{t-proj-12} = \sqrt{z_t^2 + (y_2 - y_t)^2}$$

$$(82c) \quad D_{t-proj-21} = \sqrt{z_t^2 + (x_1 - x_t)^2}$$

$$(82d) \quad D_{t-proj-22} = \sqrt{z_t^2 + (x_2 - x_t)^2}$$

$$82e) \quad D_{r-proj-11} = \sqrt{z_r^2 + (y_1 - y_r)^2}$$

$$82f) \quad D_{r-proj-12} = \sqrt{z_r^2 + (y_2 - y_r)^2}$$

$$(82g) \quad D_{r-proj-21} = \sqrt{z_r^2 + (x_1 - x_r)^2}$$

$$(82h) \quad D_{r-proj-22} = \sqrt{z_r^2 + (x_2 - x_r)^2}$$

تقييم D₂₂ و D₂₁ و D₁₂ و D₁₁:

$$(83) \quad D_{ij} = \sqrt{(z_r)^2 + (y_r - y_{ij})^2 + (x_r - x_{ij})^2} + \sqrt{(z_t)^2 + (y_t - y_{ij})^2 + (x_t - x_{ij})^2}$$

حيث، إذا $D_{r-proj-1j} \neq D_{t-proj-1j}$

$$(84a) \quad x_{1j} = \frac{x_t (D_{r-proj-1j})^2 - x_r (D_{t-proj-1j})^2 - D_{t-proj-1j} D_{r-proj-1j} (x_t - x_r)}{(D_{r-proj-1j})^2 - (D_{t-proj-1j})^2}$$

أو إذا $D_{r-proj-1j} = D_{t-proj-1j}$

$$(84b) \quad x_{1j} = \frac{x_t + x_r}{2}$$

وإذا $D_{r-proj-2j} \neq D_{t-proj-2j}$

(81a)

$$(85a) \quad y_{2j} = \frac{y_t (D_{r-proj-2j})^2 - y_r (D_{t-proj-2j})^2 - D_{t-proj-2j} D_{r-proj-2j} (y_t - y_r)}{(D_{r-proj-2j})^2 - (D_{t-proj-2j})^2}$$

أو إذا $D_{r-proj-2j} = D_{t-proj-2j}$

$$(85b) \quad y_{2j} = \frac{y_t + y_r}{2}$$

و

$$(86) \quad x_{2j} = x_j, y_{1j} = y_j$$

باستعمال ph_{11} و ph_{12} و ph_{21} و ph_{22} ، من

$$(87) \quad ph_{ij} = \exp\left(\frac{-j2\pi D_{ij}}{\lambda}\right)$$

و Ph :

$$(88) \quad Ph = \exp\left(\frac{-j2\pi r}{\lambda}\right)$$

2.2.5 الانعراج بواسطة فتحات أو حواجز مركبة

يمكن توسيع نطاق الطريقة الخاصة بفتحة مستطيلة وحيدة على النحو التالي:

بما أنه في حالة الوحدات الخطية المقيسة بالنسبة إلى الفضاء الحر للمعادلتين (75) أو (78)، يُعطى مجال الفضاء الحر بواسطة $z, 0, 1, 0$ ، ويُعطى المجال المركب المقيس e_s الناتج عن حاجز مستطيل وحيد (معزولة عن الأرض) بواسطة:

$$(89) \quad e_s = 1.0 - e_a$$

حيث تُحسب e_a باستعمال المعادلتين (75) أو (78) بالنسبة إلى فتحة لها نفس الحجم والموقع مثلما هو الحال بالنسبة إلى الحاجز.

- يمكن حساب المجال المقيس الناتج عن تركيبات مكونة من العديد من الفتحات المستطيلة أو الحواجز المعزولة بإضافة نتائج المعادلة للمعادلتين (75) أو (78).

- يمكن تقريب الفتحات أو الحواجز ذات الأشكال العشوائية بواسطة تركيبات ملائمة تتكون من فتحات أو حواجز مستطيلة.

- بما أن تكاملينا $C(v)$ و $S(v)$ تميلان إلى الالتقاء عند $0.5 + 0.5j$ مع اقتراب v من اللانهاية، يمكن تطبيق المعادلة (75) على المستطيلات ذات المدى غير المحدود في اتجاه واحد أو أكثر.

6 الانعراج على إسفين ذي إيصالية محدودة

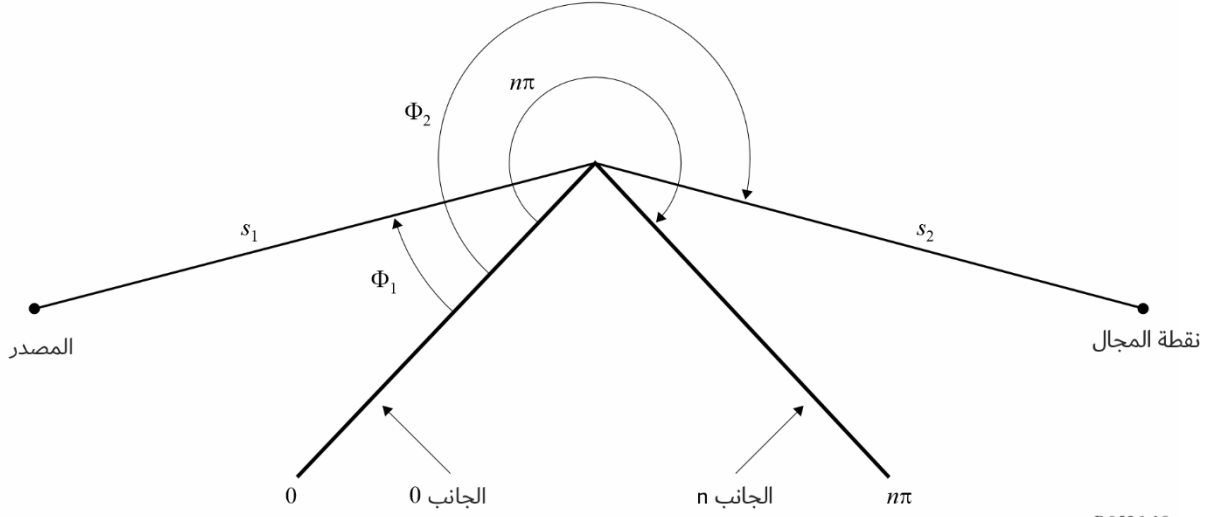
ويمكن استعمال الطريقة الموصوفة أدناه للتنبؤ بخسارة الانعراج الناتجة عن إسفين ذي إيصالية محدودة. ونجد من بين التطبيقات التي تتناسب مع هذه الطريقة دراسة الانعراج حول زاوية مبنى معين، أو على قمة السقف، أو عندما تختص التضاريس الأرضية بربوة ذات شكل إسفيني. وتتطلب هذه الطريقة معرفة الإيصالية والسماحية للإسفين المعيق، وتفترض عدم وجود أي إرسال عبر هذا العائق.

وتستند هذه الطريقة إلى النظرية المنتظمة للانعراج. ويُؤخذ في الاعتبار الانعراج في كلٍّ من منطقتي الظل وخط البصر، وتتاح طريقة للانتقال السلس بين المناطق.

ويوضح الشكل 18 الرسم الهندسي لعائق إسفيني الشكل له إيصالية محدودة.

الشكل 18

هندسة انعراج الإسفين وفقاً للنظرية المنتظمة للانعراج



P.0526-18

الصيغة التي تعطيها النظرية المنتظمة للانعراج (UTD) بالنسبة إلى المجال الكهربائي عند نقطة المجال، مع الاقتصار على مجال ذي بعدين، هي:

$$(90) \quad e_{UTD} = e_0 \frac{\exp(-jks_1)}{s_1} D_{||}^{\perp} \cdot \sqrt{\frac{s_1}{s_2(s_1 + s_2)}} \cdot \exp(-jks_2)$$

حيث

e_{UTD} : المجال الكهربائي عند نقطة المجال؛

e_0 : الاتساع النسبي للمصدر؛

s_1 : المسافة بين نقطة المصدر وحافة الانعراج؛

s_2 : المسافة بين حافة الانعراج ونقطة المجال؛

k : عدد الموجات $2\pi/\lambda$ ؛

$D_{||}^{\perp}$: معامل الانعراج تبعاً لاستقطاب (مواز أو متعامد مع مستوى السقوط) مجال السقوط على الحافة؛

و s_1 و s_2 في وحدات متسقة.

ويُعطى معامل الانعراج بالنسبة إلى إسفين الإيصالية المنتهية بواسطة:

$$(91) \quad D_{||}^{\perp} = \frac{-\exp(-j\pi/4)}{2n\sqrt{2\pi k}} \left\{ \begin{aligned} & \cot\left(\frac{\pi + (\Phi_2 - \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^+(\Phi_2 - \Phi_1)) \\ & + \cot\left(\frac{\pi - (\Phi_2 - \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^-(\Phi_2 - \Phi_1)) \\ & + R_0^{\perp} \cdot \cot\left(\frac{\pi - (\Phi_2 + \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^-(\Phi_2 + \Phi_1)) \\ & + R_n^{\perp} \cdot \cot\left(\frac{\pi + (\Phi_2 + \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^+(\Phi_2 + \Phi_1)) \end{aligned} \right\}$$

حيث:

Φ_1 : زاوية السقوط، مقيسة من جهة السقوط (الجهة 0)

Φ_2 : زاوية الانعراج، مقيسة من جهة السقوط (الجهة 0)

n : الزاوية الخارجية للإسفين كمضاعف π راديان (الزاوية الحقيقية = $n\pi$ (rad))

$$\sqrt{-1} = j$$

وحيث $F(x)$ هي تكاملية فريزل:

$$F(x) = 2j\sqrt{x} \cdot \exp(jx) \cdot \int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-jt^2) dt \quad (92)$$

$$\int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-jt^2) dt = \sqrt{\frac{\pi}{8}}(1 - j) - \int_0^{\sqrt{x}} \exp(-jt^2) dt \quad (93)$$

ويمكن حساب التكاملية بواسطة التكامل الرقمي.

ويمكن أيضاً الاستعانة بالتقريب المفيد التالي:

$$\int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-jt^2) dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}} A(x) \quad (94)$$

حيث:

$$A(x) = \begin{cases} \frac{1-j}{2} - \exp(-jx) \sqrt{\frac{x}{4}} \sum_{n=0}^{11} \left[(a_n + jb_n) \left(\frac{x}{4} \right)^n \right] & \text{if } x < 4 \\ -\exp(-jx) \sqrt{\frac{4}{x}} \sum_{n=0}^{11} \left[(c_n + jd_n) \left(\frac{4}{x} \right)^n \right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (95)$$

وتعطى المعاملات a و b و c و d في الجزء 7.2.

$$L = \frac{s_2 \cdot s_1}{s_2 + s_1} \quad (96)$$

$$a^{\pm}(\beta) = 2 \cos^2 \left(\frac{2n\pi N^{\pm} - \beta}{2} \right) \quad (97)$$

حيث:

$$\beta = \Phi_2 \pm \Phi_1 \quad (98)$$

في المعادلة (45)، $N^{\pm}$ هي الأعداد الصحيحة التي تستجيب على الوجه الأفضل إلى المعادلة التالية:

$$N^{\pm} = \frac{\beta \pm \pi}{2n\pi} \quad (99)$$

$R_0^\perp$ و $R_n^\perp$ معاملا الانعكاس بالنسبة إلى الاستقطاب المتعامدي والاستقطاب الموازي، يعطيان بواسطة:

$$(100) \quad R^\perp = \frac{\sin(\Phi) - \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}}{\sin(\Phi) + \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}}$$

$$(101) \quad R^\parallel = \frac{\eta \cdot \sin(\Phi) - \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}}{\eta \cdot \sin(\Phi) + \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}}$$

حيث:

$$\Phi = \Phi_1 \quad \text{بالنسبة إلى } R_0 \quad \text{و} \quad \Phi = (n\pi - \Phi_2) \quad \text{بالنسبة إلى } R_n$$

$$\eta = \epsilon_r - j \times 18 \times 10^9 \sigma / f$$

ϵ_r : خاصية العزل النسبية الثابتة لمادة الإسفين

σ : إيصالية مادة الإسفين (S/m)

f : التردد (Hz).

وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن لجانب الإسفين، عند الضرورة، أن يكون ذا خصائص كهربائية مختلفة.

وعند حدود منطقتي الظل والانعكاس، تصبح إحدى دوال ظل التمام في المعادلة (91) مفردة.

غير أن $D^\perp$ تظل مع ذلك محدودة ويمكن تقييمها بسهولة. ويعطى الحد الذي يحتوي على دالة ظل التمام المفردة بالنسبة إلى ϵ الصغير، على النحو التالي:

$$(102) \quad \cot\left(\frac{\pi \pm \beta}{2n}\right) \cdot F(kLa^+(\beta)) \cong n \cdot \left[\sqrt{2\pi kL} \cdot \text{sign}(\epsilon) - 2kL\epsilon \cdot \exp(j\pi/4) \right] \cdot \exp(j\pi/4)$$

حيث تعرف ϵ بواسطة:

$$(103) \quad \epsilon = \pi + \beta - 2\pi nN^+ \quad \text{for} \quad \beta = \Phi_2 + \Phi_1$$

$$(104) \quad \epsilon = \pi - \beta + 2\pi nN^- \quad \text{for} \quad \beta = \Phi_2 - \Phi_1$$

وستكون قيمة معامل الانعراج الناتج متواصلة عند حدود منطقتي الظل والانعكاس، بشرط أن يستعمل نفس معامل الانعكاس عند حساب الأشعة المنعكسة.

ويعطى المجال e_{LD} الناتج عن شعاع الانعراج، زائد شعاع خط البصر بالنسبة إلى $(\Phi_2 - \Phi_1) < \pi$ بواسطة:

$$(105) \quad e_{LD} = \begin{cases} e_{UTD} + \frac{\exp(-jks)}{s} & \text{for } \Phi_2 < \Phi_1 + \pi \\ e_{UTD} & \text{for } \Phi_2 \geq \Phi_1 + \pi \end{cases}$$

حيث:

s : مسافة الخط المستقيم بين المصدر ونقاط المجال.

وجدير بالذكر أنه في الحالة $(\Phi_2 - \Phi_1) = \pi$ ، يصبح الحد الثاني لظل التمام في المعادلة (91) مفرداً، ويتعين استعمال التقريب الذي تعطيه المعادلة (102).

وتعطى شدة المجال عند نقطة المجال (dB) بالنسبة إلى المجال الذي قد يوجد عند نقطة المجال في غياب عائق إسفيني الشكل (أي dB بالنسبة إلى الفضاء الحر) بتثبيت e_0 عند وحدة المعادلة (90) وبحساب:

$$E_{UTD} = 20 \log \left(\left| \frac{s \cdot e_{UTD}}{\exp(-jks)} \right| \right) \quad (106)$$

حيث:

s : مسافة الخط المستقيم بين المصدر ونقاط المجال.

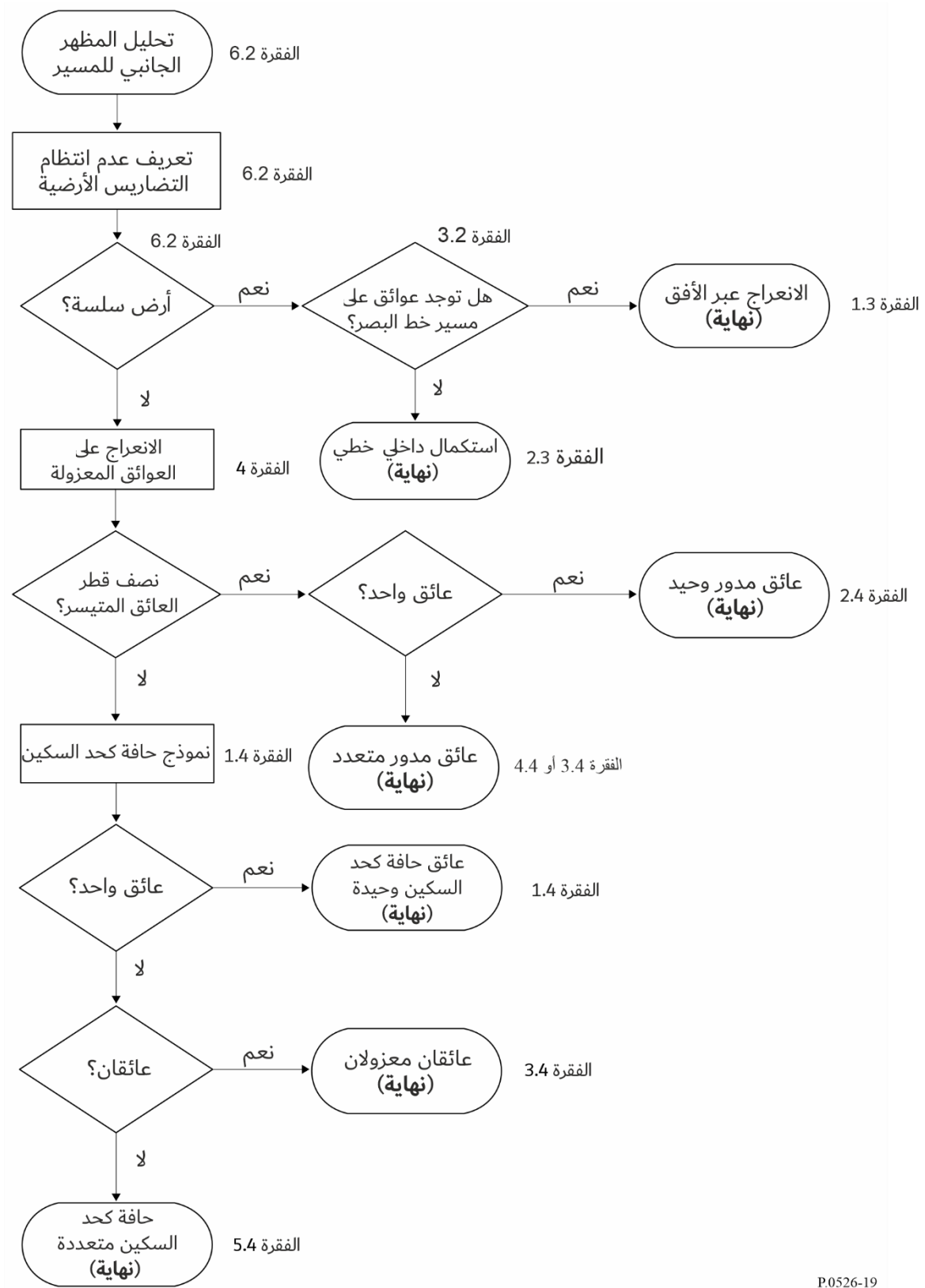
مع الملاحظة إلى أنه بالنسبة إلى $n = 2$ ومعاملات انعكاس عديدة القيمة، يجب أن تُعطي هذه العبارة نفس النتائج التي يعطيها منحنى خسارة الانعراج على حافة كحد السكين (انظر الشكل 9).

ويوجد لدى مكتب الاتصالات الراديوية صيغة نظرية الانعراج الموحدة (UTD) أعدت بواسطة برنامج MathCAD.

7 دليل الانتشار بالانعراج

يحتوي الشكل 19 على دليل عام لتقييم خسارة الانعراج التي ورد توضيحها في الفقرتين 3 و4. ويلخص هذا الشكل الإجراء الواجب اعتماده في كل حالة.

الشكل 19
دليل الانتشار بالانعراج



المرفق 1

للملحق 1

حساب معلمات الأسطوانات

يمكن استعمال الإجراء التالي لحساب معلمات الأسطوانات التي يوضحها الشكلان 8 ج) و 14 بالنسبة إلى كل عائق من عوائق التضاريس الأرضية. وتُستعمل الوحدات المتسقة، وتستخدم جميع الزوايا وحدة الراديان. وتصح كل التقريبات المستعملة بالنسبة إلى المسيرات الراديوية التي توجد بين حوالي 5° من الأفق.

1 زاوية الانعراج وموقع القمة

مع أن زاوية الانعراج على الأسطوانة وموقع القمة لا يُستعملان مباشرة كمعاملات أسطوانية، إلا أنهما ضروريان. وتُعطى زاوية الانعراج على العائق بواسطة:

$$(107) \quad \theta = \alpha_w + \alpha_z + \alpha_e$$

حيث تُعطى α_w و α_z الارتفاع الزاوي للنقطتين x و y فوق الأفق المحلي منظوراً إليهما من النقطتين w و z على التوالي بواسطة:

$$(108) \quad \alpha_w = \frac{(h_x - h_w)}{d_{wx}} - \frac{d_{wx}}{2a_e}$$

$$(109) \quad \alpha_z = \frac{(h_y - h_z)}{d_{yz}} - \frac{d_{yz}}{2a_e}$$

وتُعطى α_e ، الزاوية التي تقع قبالة مسافة الدائرة العظمى بين النقطتين w و z بواسطة:

$$(110) \quad \alpha_e = \frac{d_{wz}}{a_e}$$

وتحسب مسافة القمة من النقطة w وفقاً لما إذا كان العائق مثلاً بعينة مظهر جانبي وحيدة أو بعينات أكثر: بالنسبة إلى عائق نقطة وحيدة:

$$(111) \quad d_{wv} = d_{wx}$$

بالنسبة إلى عائق متعدد النقاط، من الضروري الاحتماء ضد قيم صغيرة جداً من الانعراج:

$$(112a) \quad d_{wv} = \frac{\left[\left(\alpha_z + \frac{\alpha_e}{2} \right) d_{wz} + h_z - h_w \right]}{\theta} \quad \text{for } \theta \cdot a_e \geq d_{xy}$$

$$(112b) \quad d_{wv} = \frac{(d_{wx} + d_{wy})}{2} \quad \text{for } \theta \cdot a_e < d_{xy}$$

وتُعطى مسافة النقطة z من نقطة القمة بواسطة:

$$(113) \quad d_{vz} = d_{wz} - d_{wv}$$

ويُحسب ارتفاع نقطة القمة فوق مستوى سطح البحر وفقاً لما إذا كان العائق مثلاً بعينة مظهر جانبي وحيدة أو بعينات أكثر.

بالنسبة إلى عائق نقطة وحيدة:

$$(114) \quad h_v = h_x$$

بالنسبة إلى عائق متعدد النقاط:

$$(115) \quad h_v = d_{wv} \alpha_w + h_w + \frac{d_{wv}^2}{2a_e}$$

2 معلمات الأسطوانات

يمكن الآن حساب معلمات الأسطوانات التي يرد توضيحها في الشكل 8 ج) لكل واحد من عوائق التضاريس الأرضية التي يحددها تحليل السلسلة:

d_1 و d_2 مسافتنا ما بين القمة الموجبة بالنسبة إلى العوائق (أو المطاريق) على المرسل وعلى جانب ي مستقبل العائق على التوالي، و:

$$(116) \quad h = h_v + \frac{d_{wv} d_{vz}}{2a_e} - \frac{(h_w d_{vz} + h_z d_{wv})}{d_{wz}}$$

ولحساب نصف قطر الأسطوانة، تُستعمل عينتان إضافيتان من عينات المظهر الجانبي:

p : النقطة المجاورة لـ x على جانب المرسل،

و:

q : النقطة المجاورة لـ y على جانب المستقبل.

وهكذا تُعطى دلائل المظهر الجانبي p و q بواسطة:

$$(117) \quad p = x - 1$$

و:

$$(118) \quad q = y + 1$$

وإذا كانت نقطة معطاة بواسطة p أو q تمثل مطراً، يجب أن تكون قيمة h المقابلة ارتفاع التضاريس الأرضية عند تلك النقطة، وليس ارتفاع الهوائي فوق مستوى سطح البحر.

ويُحسب نصف قطر الأسطوانة بوصفه الفارق في الانحدار بين جزء المظهر الجانبي $p-x$ و $y-q$ ، مع الأخذ في الاعتبار انحناء الأرض، مقسوماً على المسافة بين p و q .

وتتمثل المسافات بين عينات المظهر الجانبي التي يتطلبها هذا الحساب فيما يلي:

$$(119) \quad d_{px} = d_x - d_p$$

$$(120) \quad d_{yq} = d_q - d_y$$

$$(121) \quad d_{pq} = d_q - d_p$$

ويعطى فارق الانحدار بين جزئي $p-x$ و $y-q$ بالراديان (وحدة قياس الزوايا):

$$(122) \quad t = \frac{(h_x - h_p)}{d_{px}} + \frac{(h_y - h_q)}{d_{yq}} - \frac{d_{pq}}{a_e}$$

حيث a_e نصف قطر الأرض الفعال.

ويُعطى نصف قطر الأسطوانة الآن بواسطة:

$$R = [d_{pq} / t] [1 - \exp(-4v)]^3 \quad (123)$$

حيث v معلمة حافة كحد السكين بلا أبعاد في المعادلة (32).

ويمثل العامل الثاني، في المعادلة (123)، دالة سلسلة تجريبية تطبق على نصف قطر الأسطوانة لتفادي حدوث تقطُّع في عوائق خط البصر الهامشية (LoS).

المرفق 2

للملحق 1

خسائر انعراج المسير الفرعي

1 مقدمة

يعرض هذا المرفق طريقة لحساب خسارة انعراج المسير الفرعي بالنسبة إلى جزء فرعي لخط البصر يتعلق بمسير انعراج. وقد تمت نمذجة المسير بواسطة أسطوانات متسلسلة تختص كل واحدة منها بنقاط مظهر جانبي w و x و y و z مثلما يرد توضيح ذلك في الشكلين 13 و 14. ويجب حساب انعراج المسير الفرعي لكل جزء فرعي للمسير الإجمالي بين النقاط الممثلة بواسطة w و x أو y و z . وتمثل هذه أجزاء خط البصر للمسير بين العوائق، أو بين مطراف وعائق.

ويمكن استعمال هذه الطريقة أيضاً بالنسبة إلى خط البصر مع انعراج مسير فرعي، وفي هذه الحالة تُطبق هذه الطريقة على المسير بأكمله.

2 الطريقة

تتمثل المهمة الأولى، بالنسبة إلى جزء خط البصر للمظهر الجانبي بين عينات المظهر الجانبي التي يرمز إليها بواسطة u و v ، في التعرف على عينة المظهر الجانبي البينية ولكن استبعاد u و v اللذان يعيقان الجزء الأكبر من منطقة فرينل الأولى بالنسبة إلى شعاع يتحرك من u إلى v .

ولتفادي اختيار نقطة تمثل جزءاً جوهرياً من عوائق التضاريس الأرضية التي سبقت نمذجتها كأسطوانة، ينحصر المظهر الجانبي بين u و v في جزء بين اثنين من الرموز الإضافية p و q ، يُحدَّدان على النحو التالي:

$$1 + u = p \quad -$$

$$\text{إذا كان كل من } v > p \text{ و } hp+1 < h_p, \text{ نزيد } 1 \text{ إلى } p \text{ ونكرر.} \quad -$$

$$1 - v = q \quad -$$

$$\text{إذا كان كل من } u < q \text{ و } h_{q-1} < h_q, \text{ ننقص } 1 \text{ من } q \text{ ونكرر.} \quad -$$

وإذا كانت $q = p$ ، تحدد خسارة عائق المسير الفرعي بالتالي عند القيمة 0. ويجري الحساب في الحالات الأخرى كالاتي.

ومن الضروري الآن إيجاد القيمة الدنيا للخلوص المعياري، CF ، المعطاة بواسطة h_z/F_1 ، بالوحدات المتسقة:

h_z : ارتفاع الشعاع فوق نقطة المظهر الجانبي

F_1 : نصف قطر منطقة فريزل الأولى

ويمكن كتابة الخلووص المعياري الأدنى على نحو ما يلي:

$$C_F = \min_{i=p}^q [(h_z)_i / (F_1)_i] \quad (124)$$

حيث:

$$(h_z)_i = (h_r)_i - (h_t)_i \quad (125)$$

$$(F_1)_i = \sqrt{\lambda \cdot d_{ui} \cdot d_{iv} / d_{uv}} \quad (126)$$

وتعطى $(h_r)_i$ ، ارتفاع الشعاع فوق خط مستقيم يربط بين مستوى سطح البحر عند u و v عند نقطة المظهر الجانبي i -th بواسطة:

$$(h_r)_i = (h_u \cdot \text{div} + h_v \cdot \text{dvi}) / \text{duv} \quad (127)$$

وتعطى $(h_t)_i$ ، ارتفاع التضاريس الأرضية فوق خط مستقيم يربط بين مستوى سطح البحر عند u و v عند نقطة المظهر الجانبي i -th بواسطة:

$$(h_t)_i = h_i + \text{dvi} \cdot \text{div} / 2ae \quad (128)$$

وتُستعمل القيمة الدنيا للخلوص المعياري لحساب المعلمة الهندسية لانعراج حد السكين لعائق المسير الفرعي الأكثر دلالة:

$$v = -C_F \cdot \sqrt{2} \quad (129)$$

ويتم الحصول في هذه الحالة على خسارة انعراج المسير الفرعي "L من المعادلة (31) أو الشكل 9.

وقد لا يكون مرغوباً بالنسبة لبعض التطبيقات إدخال تحسينات على انعراج المسير الفرعي. وفي هذه الحالة تضبط قيمة الخسارة "L على الصفر بدلاً من أن تكون سالبة.