التوصية ITU-R P.526-9

الانتشار بالانعراج

(المسألة ITU-R 202/3)

(2005-2003-2001-1999-1997-1995-1994-1992-1982-1978)

إن جمعية الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن ثمة حاجة لتوفير معلومات هندسية من أجل حساب قيم شدة المال على مسيرات الانعراج،

توصي

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

الملحق 1

1 المقدمة

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 المعلمات 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 تتيسر 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 السمات الإهليلجية لفرينل ومناطق فرينل (Fresnel)

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

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

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 أي مصحوباً بظواهر انعراج يمكن إهمالها، إذا لم يوجد أي عائق داخل السم الإهليلجي الأول لفرينل.

ويمكن تقريب نصف قطر إحدى السمات الإهليلجية عند نقطة بين المرسل والمستقبل بواسطة:

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

أو في شكل وحدات عملية:

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

حيث تمثل f التردد (MHz) وd_1 وd_2 المسافتان (km) بين المرسل والمستقبل عند النقطة التي يحسب فيها نصف قطر السم الإهليلجي (m).

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

2.2 عرض الظليل (شبه الظلل)

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 سلسة، التي تُعطى بواسطة:

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

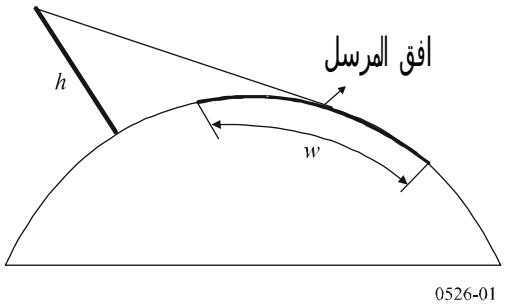
حيث:

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 تيمن آلية الانتشار التربوسفيري.

4.2 معيار سلاسة سطح العائق

إذا كانت لسطح العائق أشكال غير منتظمة لا تتجاوز Δh،

حيث:

$$\Delta h = 0{,}04\left[R\lambda^2\right]^{1/3} \quad \text{m} \tag{5}$$

وحيث:

R: نصف قطر انحناء العائق (m)

λ: طول الموجة (m)

يمكن عندئذ اعتبار العائق سلساً ويمكن استعمال الطرق الموضحة في الفقرتين 3 و4.2 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 الظُلَيل 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 سلسة*

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 (الجزء 3).

ب) *عوائق معزولة*

يتكون المظهر الجانبي للتضاريس الأرضية المتعلقة بمسير الانتشار من عائق واحد أو أكثر. وينبغي في هذه الحالة، وتبعاً للمخططات المبسطة للمثالية المستعملة بدف 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 يُمثل أي منها عائقاً مهيمناً. وتتلاءم التوصية ITU-R P.1546 داخل مدى ترددا تا مع التنبؤ بشدة ال ال ولكنها ليست طريقة انعراج.

7.2 تكامليات فرينل

تُعطى تكاملية فرينل المركبة بواسطة:

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

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

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

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

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

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

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

حيث:

$$x = 0.5\,\pi\,\nu^2 \tag{9}$$

وتمثل a_n، b_n وc_n وd_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 $C(\nu)$ و$S(\nu)$ بالنسبة إلى قيم سالبة تخص ν من خلال الإشارة إلى أن:

$$C(-\nu) = -C(\nu) \tag{10a}$$

$$S(-\nu) = -S(\nu) \tag{10b}$$

3 الانعراج فوق أرض كروية

يمكن أن تحسب خسارة الإرسال الإضافية العائدة إلى الانعراج فوق أرض كروية بواسطة الصيغة الكلاسيكية لسلسلة البقايا. ويقدم البرنامج الحاسوبي GRWAVE، الذي يوجد لدى الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU)، الطريقة بأكملها. وتحتوي التوصية ITU-R P.368 على مجموعة فرعية من نواتج هذا البرنامج (بالنسبة إلى هوائيات قريبة من الأرض وعند ترددات أدنى).

1.3 خسارة الانعراج بالنسبة إلى المسيرات عبر الأفق

بالنسبة إلى مسافات طويلة عبر الأفق، يكتسي الحد الأول من سلسلة البقايا دون سواه 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 كناتج حد المسافة، F، وحدي كسب الارتفاع G_T وG_R. ويوضح الجزءان 1.1.3 و2.1.3 كيفية الحصول على هذه الحدود انطلاقاً من صيغ بسيطة أو من خلال مخططات بيانية (مونوغرامات).

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:

$$K_H = \left(\frac{2\pi a_e}{\lambda}\right)^{-1/3} \left[(\varepsilon - 1)^2 + (60\lambda\sigma)^2\right]^{-1/4} \quad \text{بالنسبة إلى استقطاب أفقي} \tag{11}$$

$$K_V = K_H \left[\varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2\right]^{1/2} \quad \text{بالنسبة إلى استقطاب رأسي} \tag{12}$$

أو في وحدات عملية:

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

$$K_V = K_H \left[\varepsilon^2 + (18\,000\sigma/f)^2\right]^{1/2} \tag{12a}$$

حيث:

a_e: نصف قطر الأرض الفعال (km)

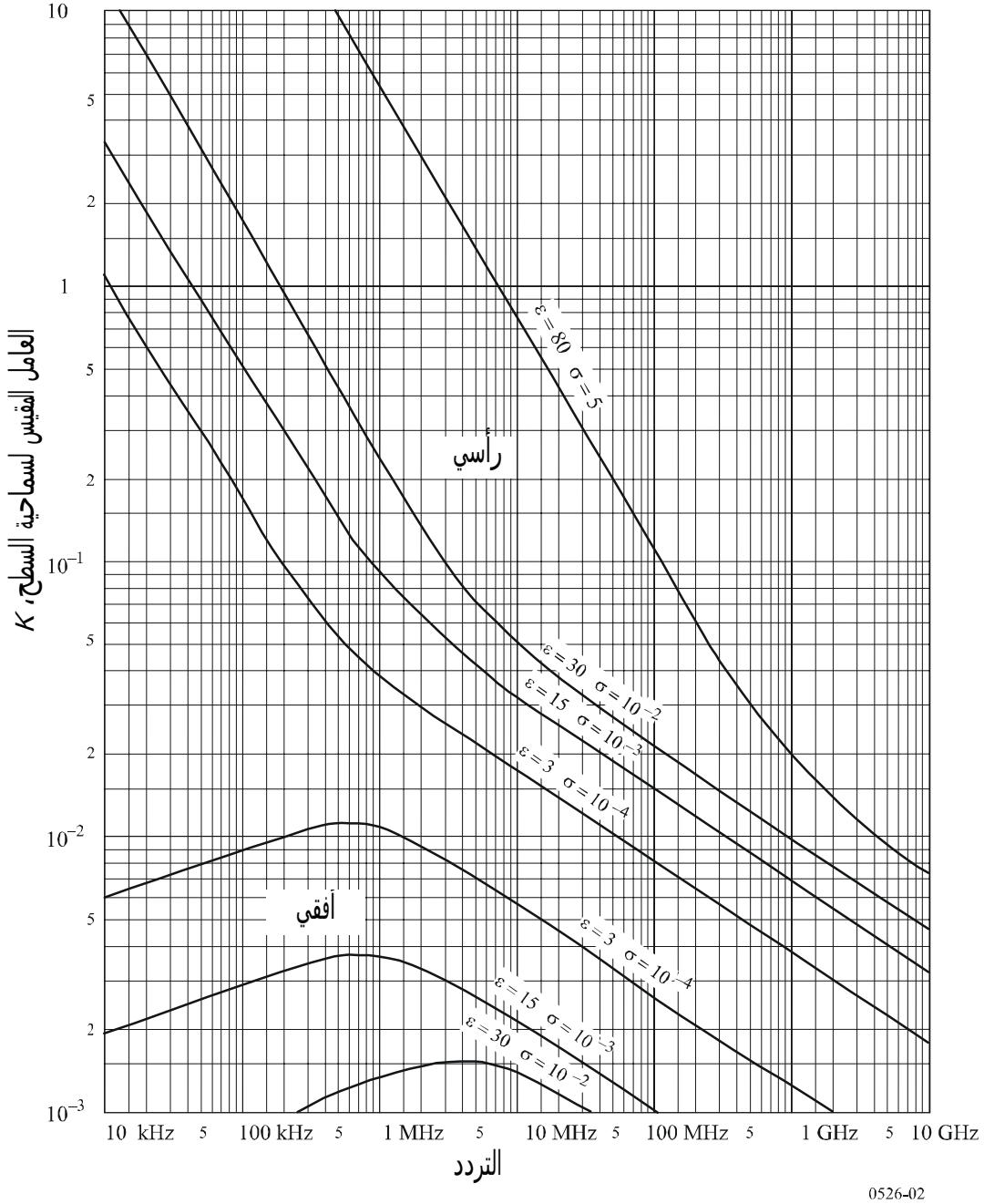
ε: السماحية النسبية الفعالة

σ: الإيصالية الفعالة (S/m)

f: التردد (MHz).

ويحتوي الشكل 2 على قيم العامل K النمطية.

الشكل 2
حساب K



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، فيجب أن تستعمل الصيغ المناسبة المذكورة أدناه.

2.1.1.3 صيغ شدة مجال الانعراج

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

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

حيث X هي الطول المقيس للمسير بين الهوائيات عند ارتفاعين Y_1 وY_2 مقيسين (وحيث قيمة $20\log\frac{E}{E_0}$ سالبة في العادة).

في وحدات متسقة:

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

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

أو في وحدات عملية:

$$X = 2.2\beta f^{1/3} a_e^{-2/3} d \tag{14a}$$

$$Y = 9{,}6 \times 10^{-3} \beta f^{2/3} a_e^{-1/3} h \tag{15a}$$

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:

$$\beta = \frac{1 + 1{,}6K^2 + 0{,}75K^4}{1 + 4{,}5K^2 + 1{,}35K^4} \tag{16}$$

ويمكن أن تؤخذ β على أنا 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 تحسب β باعتبارها دالة لقيم K. غير أنه من الممكن عندئذ إهمال ε وكتابة:

$$K^2 \approx 6.89 \frac{\sigma}{k^{2/3} f^{5/3}} \tag{16a}$$

حيث يُعبر عن σ بواسطة S/m، وf (MHz) وk العامل المضاعف لنصف قطر الأرض.

ويُعطي حد المسافة بواسطة الصيغة التالية:

$$F(X) = 11 + 10 \log(X) - 17.6 X \tag{17}$$

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

$$G(Y) \cong 17.6 (Y - 1.1)^{1/2} - 5 \log(Y - 1.1) - 8 \quad \text{بالنسبة إلى } Y > 2 \tag{18}$$

وبالنسبة إلى $Y > 2$، تكون قيمة $G(Y)$ دالة قيمة K المحسوبة في الجزء 1.3.3:

$$G(Y) \cong 20 \log(Y + 0.1 Y^3) \quad \text{بالنسبة إلى } 2 > Y > K\,10 \tag{18a}$$

$$G(Y) \cong 2 + 20\log K + 9\log(Y/K)[\log(Y/K) + 1] \quad \text{بالنسبة إلى } K\,10 > Y > K/10 \tag{18b}$$

$$G(Y) \cong 2 + 20\log K \quad \text{بالنسبة إلى } K/10 > Y \tag{18c}$$

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:

$$20 \log \frac{E}{E_0} = F(d) + H(h_1) + H(h_2) \quad \text{dB} \tag{19}$$

حيث:

E : شدة المال المستقبَل

E_0 : شدة المال في الفضاء الحر عند نفس المسافة

d : المسافة بين طرفي المسير

h_1 وh_2: ارتفاعاً الهوائيين فوق أرض كروية.

وتُعطى الدالة F (تأثير المسافة) والدالة H (كسب الارتفاع) بواسطة المخططات البيانية التي تحتوي عليها الأشكال 3 و4 و5 و6.

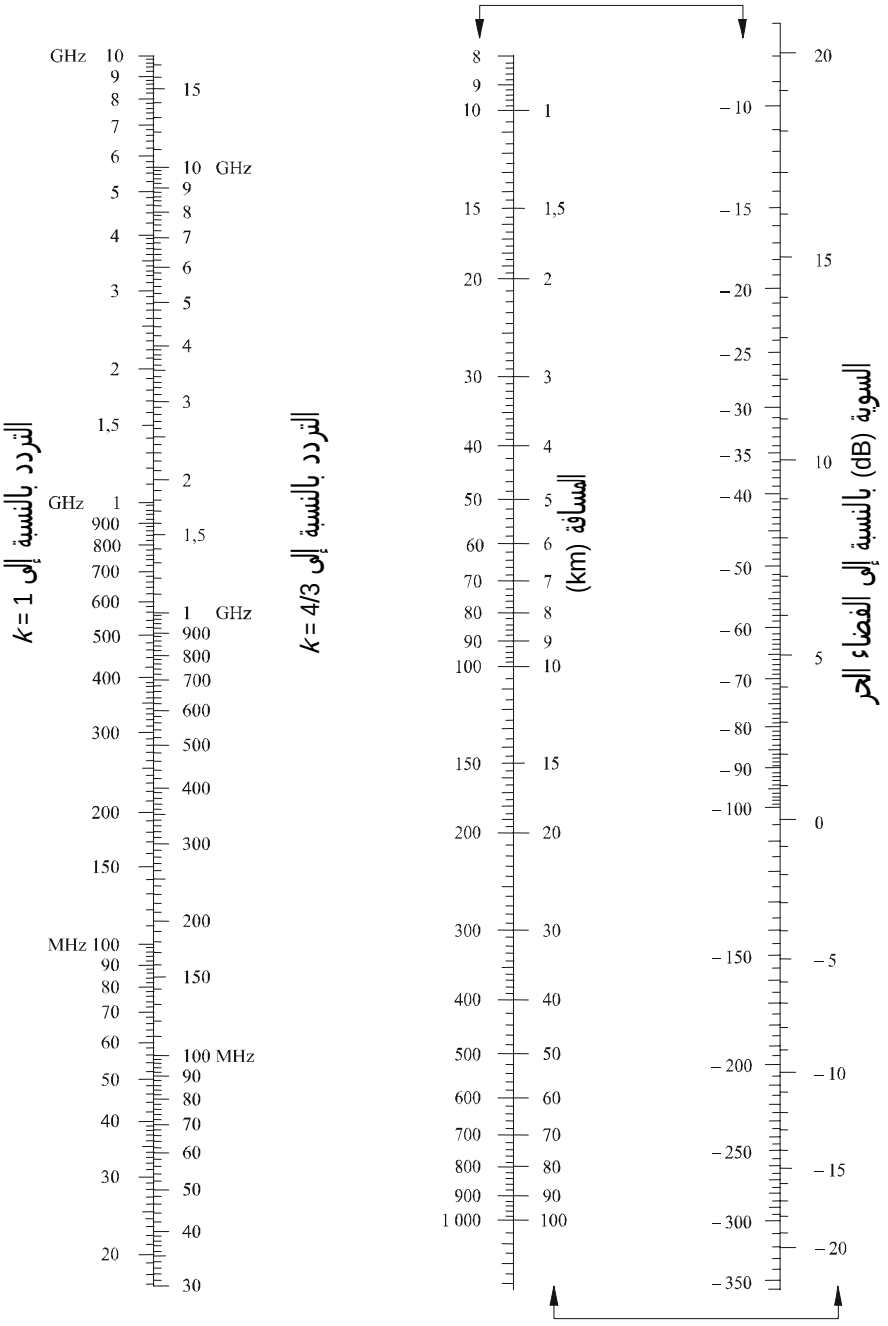
وتُعطي هذه المخططات البيانية (الأشكال من 3 إلى 6) مباشرة سوية الإشارة المستقبلة بالنسبة إلى الفضاء الحر، بالنسبة إلى $k = 1$ و$k = 4/3$، وبالنسبة إلى ترددات أعلى من 30 MHz تقريباً. وk عامل نصف قطر الأرض الفعال الذي يرد تعريفه في التوصية ITU-R P.310. غير أنه يمكن حساب سوية الإشارة المستقبلة بالنسبة إلى قيم أخرى تخص k باستعمال سلالم الترددات بالنسبة إلى $k = 1$، مع الاستعاضة عن التردد المعني بتردد افتراضي يساوي f/k^2 بالنسبة إلى الشكلين 3 و5، و $f/\sqrt{k}$ بالنسبة إلى الشكلين 4 و6.

وبالقرب من الأرض، تكون شدة المال مستقلة عملياً عن الارتفاع. وتكتسي هذه الظاهرة أهمية كبيرة بالنسبة إلى الاستقطاب الرأسي فوق البحر. ولهذا السبب، يتضمن الشكل 6، خطاً رأسياً AB غليظا. فإذا تقاطع الخط المستقيم مع هذا الخط الغليظ AB، يجب أن يستعاض 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 (19) إلى قيم سالبة. ولا تصح هذه الطريقة إذا أعطت المعادلة (19) قيمة فوق شدة المال في الفضاء الحر.

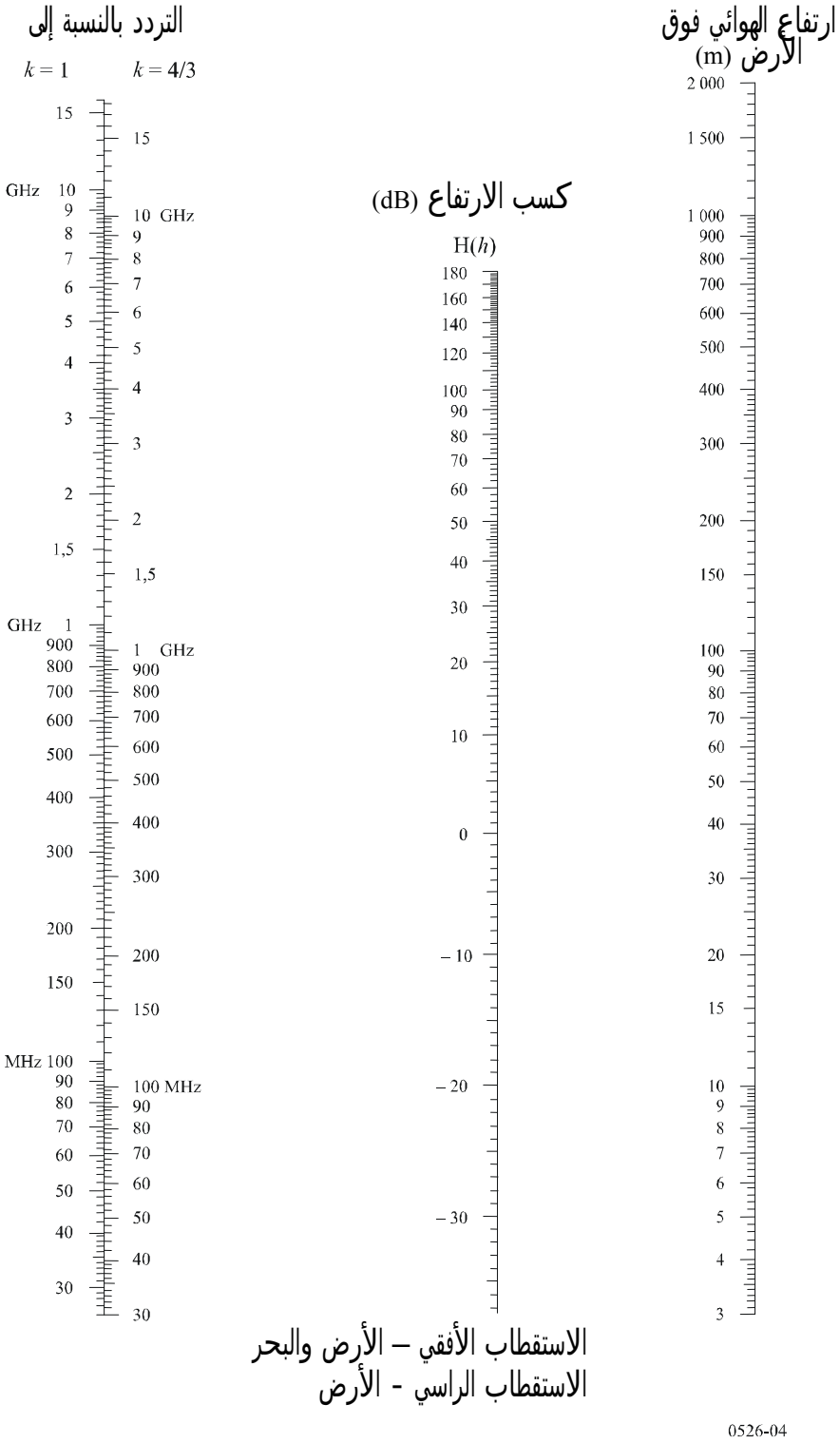
الشكل 3

الانعراج فوق أرض كروية - تأثير المسافة



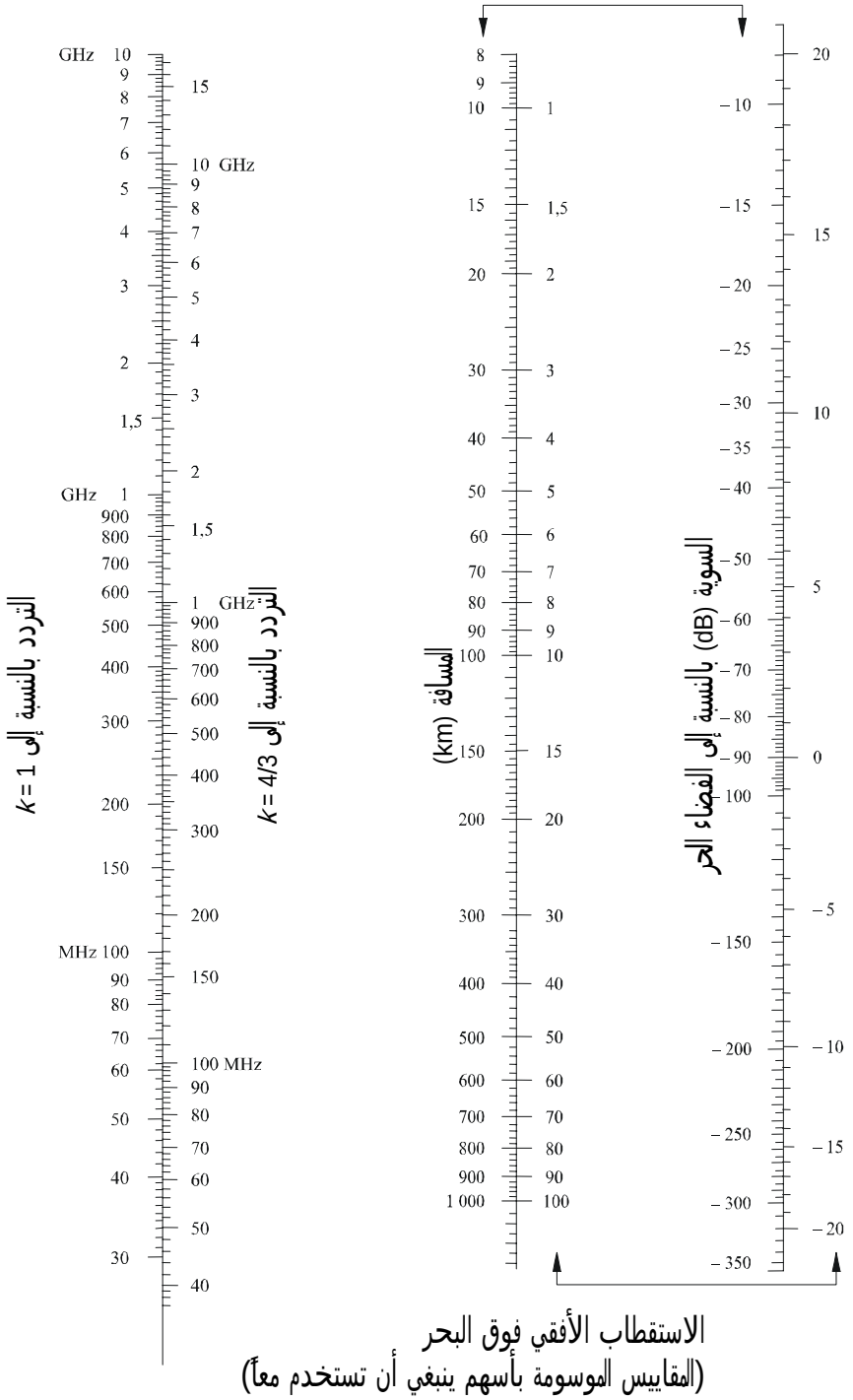
الشكل 4

الانعراج فوق أرض كروية - كسب الارتفاع



الشكل 5

الانعراج فوق أرض كروية – تأثير المسافة



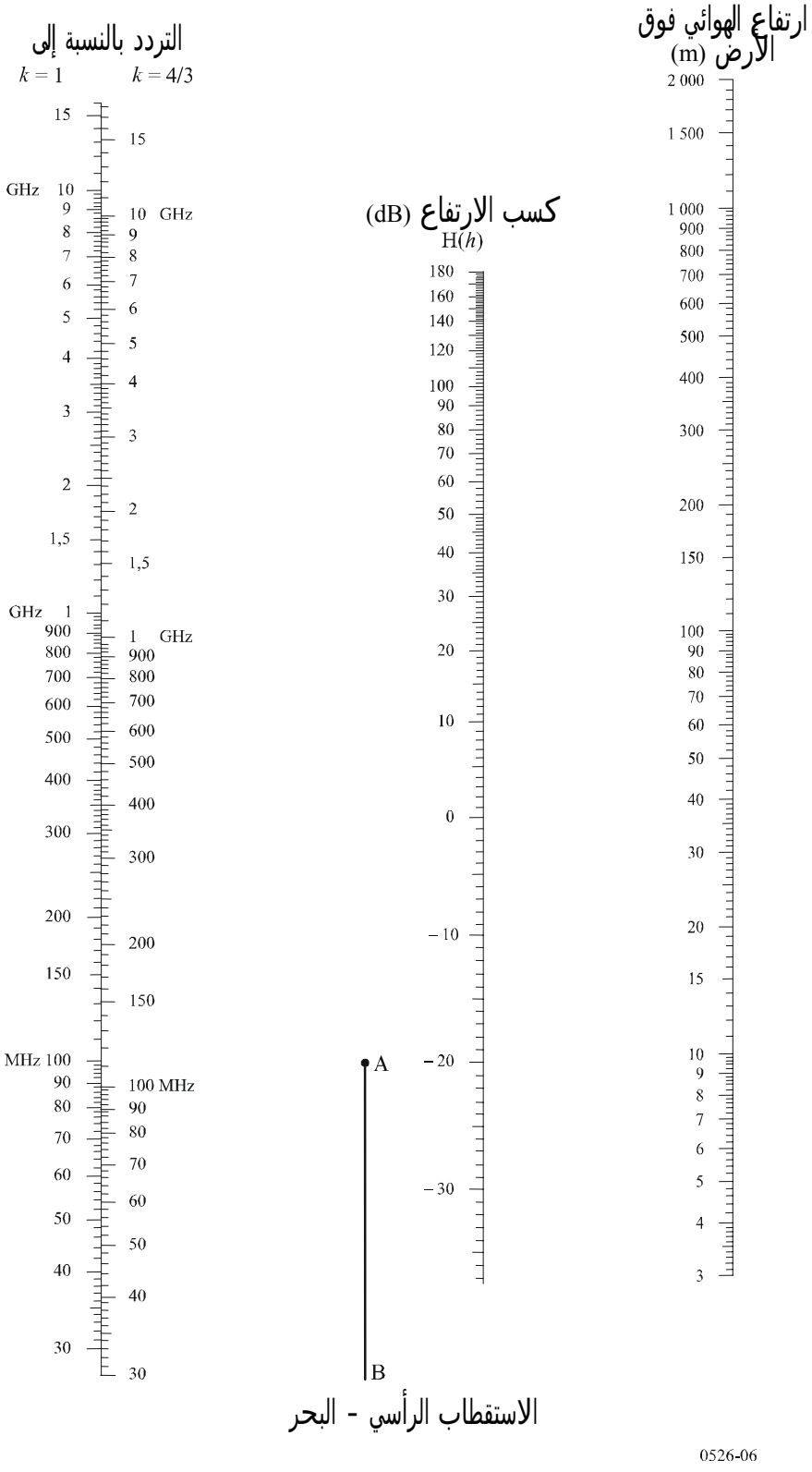
الاستقطاب الأفقي فوق البحر

(المقاييس الموسومة بأسهم ينبغي أن تستخدم معاً)

0526-05

الشكل 6

الانعراج فوق أرض كروية - كسب الارتفاع



2.3 خسارة الانعراج بالنسبة إلى مسيرات خط البصر مع انعراج مسيرات فرعية

يمكن في هذه الحالة ونظراً إلى أن تقارب سلسة البقايا يتطلب حساب العديد من الحدود، استعمال استكمال داخلي خطي بين حد منطقة الانعراج (خلوص قيمته 0,6 من نصف قطر منطقة فرينل الأولى) حيث يساوي التهوين بالنسبة إلى الفضاء الحر صفراً والأفق الراديوي. وتُحسب خسارة الانعراج، وفقاً لهذا الإجراء، من حيث نصف قطر منطقة فرينل الأولى، (R_1)، كالآتي:

$$A(\text{dB}) = \left[1 - \frac{5}{3}\ \frac{h}{R_1}\right] A_h \tag{20}$$

حيث:

h: خلوص المسير

A_h: خسارة الانعراج عند الأفق (انظر الفقرة 1.3)

ويُعطى خلوص المسير بواسطة (انظر الشكل 7):

$$h = \frac{\left(h_1 - \frac{d_1^2}{2a_e}\right)d_2 + \left(h_2 - \frac{d_2^2}{2a_e}\right)d_1}{d} \tag{21}$$

حيث:

$$d_1 = \frac{d}{2}(1 + b) \tag{21a}$$

$$d_2 = d - d_1 \tag{21b}$$

$$b = 2\sqrt{\frac{m+1}{3m}}\cos\left\{\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3}\arccos\left(\frac{3c}{2}\sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}}\right)\right\} \tag{21c}$$

$$c = \frac{|h_1 - h_2|}{h_1 + h_2} \tag{21d}$$

$$m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)} \tag{21e}$$

4 الانعراج فوق عوائق معزولة

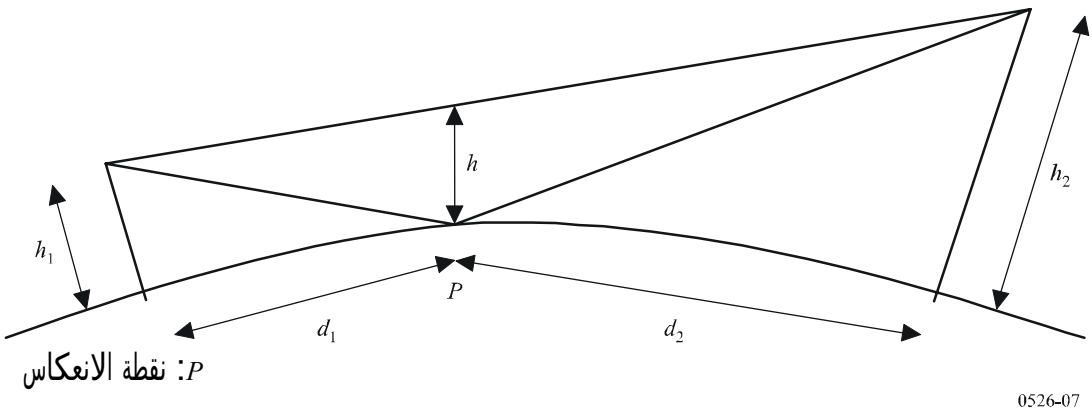
يواجه العديد من مسيرات الانتشار عائقاً واحداً أو عدة عوائق منفصلة، ومن المفيد أن تقدر الخسائر التي تسببها هذه العوائق. وإن من الضروري لأداء هذه الحسابات، معالجة أشكال العوائق بناء على نسق تخطيطي، سواء بافتراض عائق كحد السكين ذي ثخانة لا يعتد با أو عائق مدور وأملس مع نصف قطر انحناء في الجزء الأعلى يحدد بدقة. وبالنظر إلى أن العوائق الحقيقية تتخذ أشكالاً أكثر تعقيداً، يجب أن ينظر إلى البيانات التي ترد في هذه التوصية على أنا بيانات تقريبية فقط.

إن من الضروري في الحالات التي يكون فيها المسير المباشر بين مطرافين 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



1.4 عائق وحيد كحد السكين

في هذه الحالة المثالية القصوى (الشكلان 8a و8b)، تتحد جميع المعلمات الهندسية في معلمة واحدة بلا أبعاد يُرمز إليها عادة بواسطة ν التي قد تتخذ مجموعة متنوعة من الأشكال المكافئة وفقاً للمعلمات الهندسية المختارة:

$$v = h\sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1}+\frac{1}{d_2}\right)} \tag{22}$$

$$v = \theta\sqrt{\frac{2}{\lambda\left(\frac{1}{d_1}+\frac{1}{d_2}\right)}} \tag{23}$$

$$v = \sqrt{\frac{2\,h\,\theta}{\lambda}} \quad \text{(تأخذ ν علامة } h \text{ وθ)} \tag{24}$$

$$v = \sqrt{\frac{2\,d}{\lambda}\cdot\alpha_1\,\alpha_2} \quad \text{(تأخذ ν علامة } \alpha_1 \text{ و} \alpha_2\text{)} \tag{25}$$

حيث:

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

d_1 وd_2: مسافتا 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

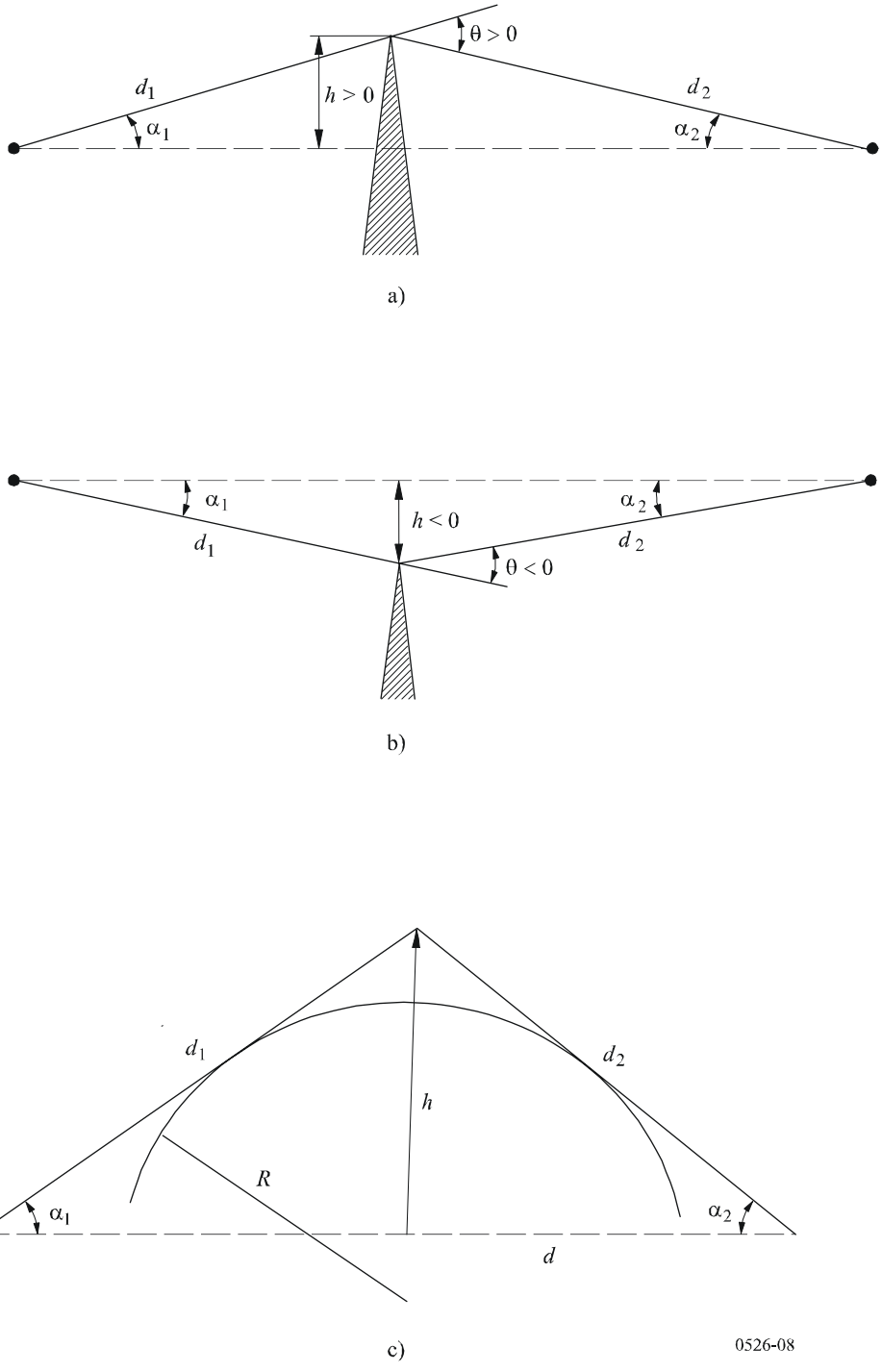
α_1 وα_2: الزاويتان بين قمة العائق وأحد الطرفين كما ينظر إليه من الطرف الآخر. α_1 وα_2 لهما نفس علامة h في المعادلات أعلاه.

الملاحظة 1 - يجب أن يعبر بوحدات متسقة عن h وd وd_1 وd_2 وλ في المعادلات من (22) إلى (23).

الشكل 8

عناصر هندسية

(بالنسبة إلى تعاريف θ، α_1، α_2، d، d_1، d_2، R، راجع الفقرتين 1.4 و2.4)



يعطي الشكل 9 بوصفه دالة لقيمة v الخسارة $J(v)$ (dB).

وتعطى $J(v)$ بواسطة:

$$J(\nu) = -20 \log \left(\frac{\sqrt{[1 - C(\nu) - S(\nu)]^2 + [C(\nu) - S(\nu)]^2}}{2} \right) \quad (26)$$

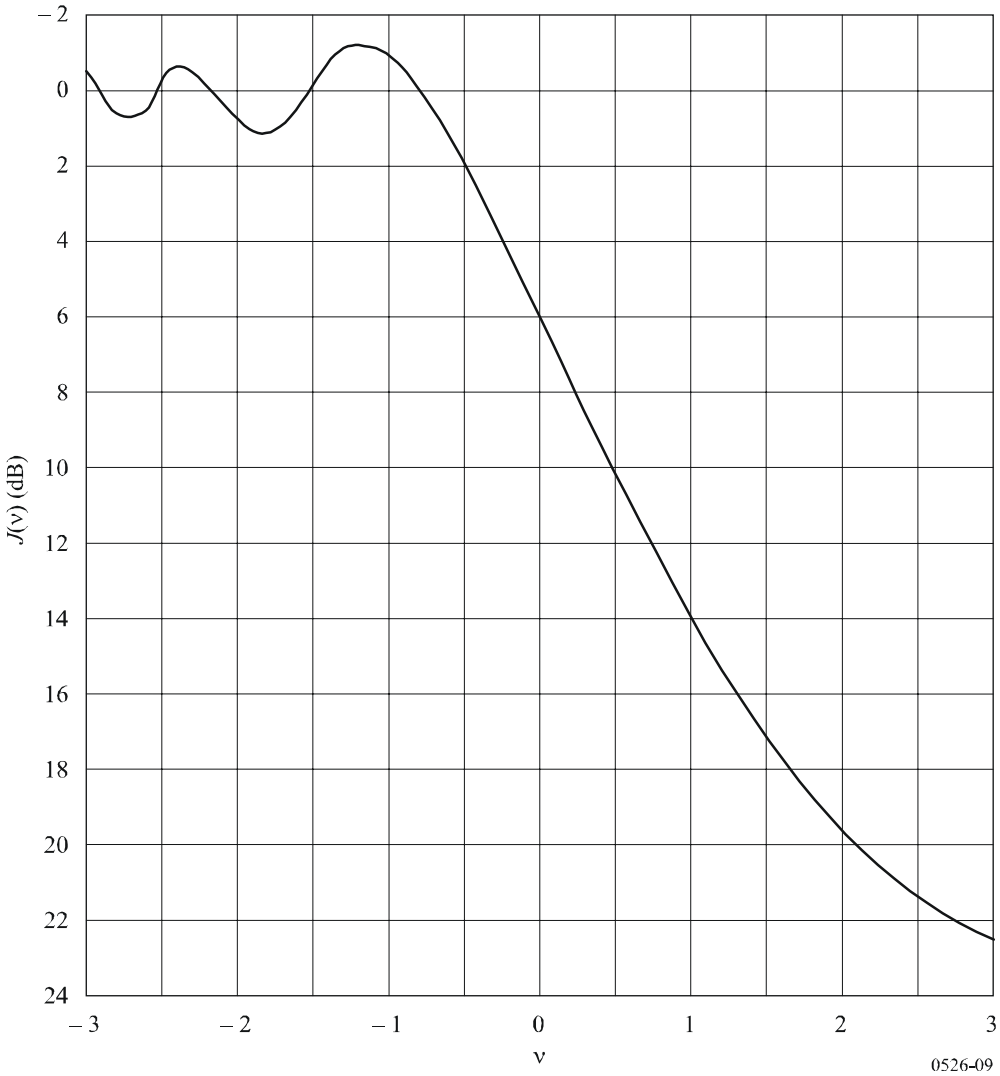
حيث $C(\nu)$ الجزء الحقيقي و$S(\nu)$ الجزء الخيالي من تكاملية فرينل المركبة $F(\nu)$ التي ورد تعريفها في الفقرة 7.2.

وبالنسبة إلى ν أكبر من -0,78، يمكن الحصول على قيمة تقريبية انطلاقاً من الصيغة التالية:

$$J(\nu) = 6.9 + 20\log\left(\sqrt{(\nu - 0.1)^2 + 1} + \nu - 0.1\right) \quad \text{dB} \tag{27}$$

الشكل 9

خسارة انعراج على حافة كحد السكين



2.4 عائق مدور وحيد

يوضح الشكل 8c هندسة عائق مدور لنصف القطر R. وجدير بالملاحظة أن المسافتين d_1 وd_2 والارتفاع h فوق الخط الأساسي تُقاس جميعاً بالنسبة إلى القمة حيث تتقاطع الأشعة المسقطة فوق العائق. ويمكن حساب خسارة الانعراج بالنسبة إلى هذه الهندسة على النحو التالي:

$$A = J(\nu) + T(m,n) \quad \text{dB} \tag{28}$$

حيث:

أ) $J(v)$ خسارة Fresnel-Kirchff العائدة إلى حافة كحد السكين مكافئة توضع على نحو تكون فيه ذروتا عند نقطة القمة. ويمكن تقييم المعلمة v بلا أبعاد انطلاقاً من أي معادلة من المعادلات (22) إلى (25). ويمكن أن تكتب المعادلة (22)، على سبيل المثال، في وحدات عملية على النحو التالي:

$$v = 0{,}0316\,h\left[\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda\, d_1\, d_2}\right]^{1/2} \tag{29}$$

حيث تُقاس h وλ بالأمتار وd_1 وd_2 بالكيلومترات.

ويمكن الحصول على $J(v)$ من الشكل 9 أو من المعادلة (27). مع الإشارة إلى أنه في حالة وجود عائق يحجب الانتشار في خط البصر، تكون v موجبة، والمعادلة (27) صحيحة.

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

$$T(m,n) = 7.2m^{1/2} - (2 - 12.5n)m + 3.6m^{3/2} - 0.8m^2 \quad \text{dB} \quad \text{for } mn \le 4 \tag{30a}$$

$$T(m,n) = -6 - 20\log(mn) + 7.2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3.6m^{3/2} - 0.8m^2 \quad \text{dB} \quad \text{for } mn > 4 \tag{30b}$$

و

$$m = R\left[\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right] \Big/ \left[\frac{\pi R}{\lambda}\right]^{1/3} \tag{31}$$

$$n = h\left[\frac{\pi R}{\lambda}\right]^{2/3} \Big/ R \tag{32}$$

R وd_1 وd_2 وh وλ في وحدات متسقة.

مع الإشارة إلى أنه عندما تنحو R نحو الصفر، وكذلك $T(m,n)$، تصبح المعادلة (28) انعراج حافة كحد السكين بالنسبة إلى اسطوانة يبلغ نصف قطرها صفراً.

يتطابق نصف قطر عائق الانحناء مع نصف قطر الانحناء عند قمة القطع المكافئ الذي يتلاءم مع المظهر الجانبي للعائق قرب القمة. وفي حالة ملاءمة 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:

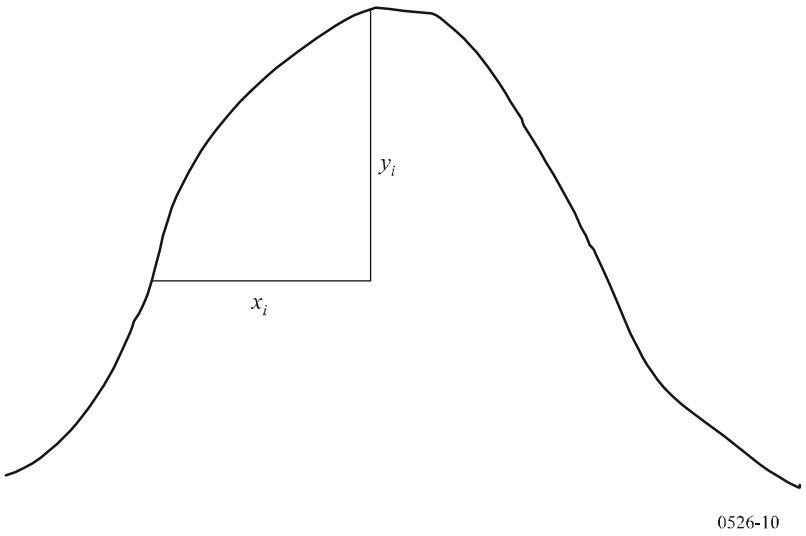
$$y_i = \frac{x_i^2}{2r_i} \tag{33}$$

وr_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:

$$r = \frac{1}{N}\sum_{1}^{N}\frac{x_i^2}{2y_i} \tag{34}$$

الشكل 10

المظهر الجانبي الرأسي 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 وb والارتفاع h'_1، الخسارة L_1 (dB). ويُعطي مسير الانعراج الثاني الذي تحدده المسافتان b وc والارتفاع h'_2، الخسارة L_2 (dB). وتحسب L_1 وL_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:

$$L_c = 10 \log \left[\frac{(a + b)(b + c)}{b(a + b + c)} \right] \tag{35}$$

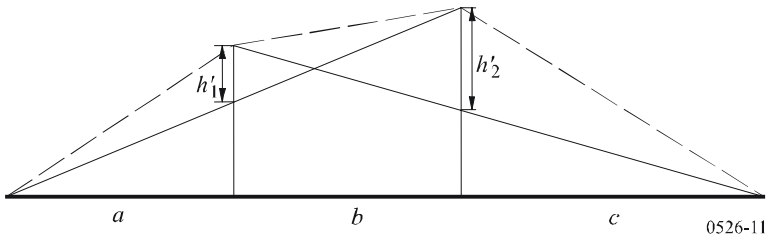
التي تصح عندما يتجاوز كل من L_1 وL_2، القيمة 15 dB تقريباً. وتُعطى بالتالي خسارة الانعراج الكلية بواسطة:

$$L = L_1 + L_2 + L_c \tag{36}$$

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

الشكل 11

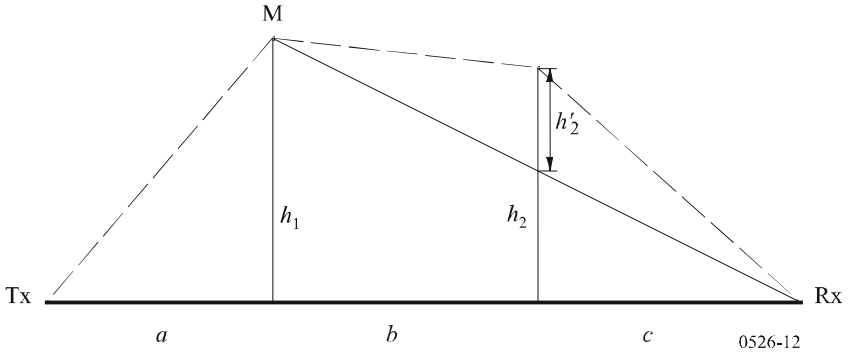
طريقة الحافتين المعزولتين



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 وc 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، وr نصف قطر الرسم 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:

$$T_c = \left[12 - 20\log_{10}\left(\frac{2}{1-\frac{a}{\pi}} \right) \right] \left(\frac{q}{p} \right)^{2p} \tag{37}$$

وكذلك:

$$p = \left[\frac{2}{\lambda} \frac{(a+b+c)}{(b+c)a} \right]^{1/2} h_1 \quad q = \left[\frac{2}{\lambda} \frac{(a+b+c)}{(a+b)c} \right]^{1/2} h_2 \quad \tan\alpha = \left[\frac{b(a+b+c)}{ac} \right]^{1/2} \tag{38}$$

h_1 وh_2 ارتفاعا الحافتين من المسير المباشر مرسل-مستقبل.

وتُعطى خسارة الانعراج الكلي بواسطة:

$$L = L_1 + L_2 - T_c \tag{39}$$

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 المطاورة 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 المال المنعرجة تنبؤاً حسناً، مع تجاهل المكونة المنعكسة.

4.4 عوائق معزولة متعددة

يُوصى بطريقتين فيما يتعلق بتقدير خسارة الانعراج على تضاريس أرضية غير منتظمة تكون عائقاً واحدًا أو أكثر للانتشار في خط البصر. وتفترض الطريقة الأولى أنه يمكن تمثيل كل عائق بواسطة اسطوانة يساوي نصف قطرها نصف قطر الانحناء عند قمة العائق، يُوصى بـا في حالة تيسر المظهر الجانبي الرأسي التفصيلي عبر قمة التل.

بينما تتطابق الطريقة الثانية مع حل تجريبي يستند إلى فرضية عوائق حافة كحد السكين يُضاف إليها تصحيح لتعويض الخسارة الأعلى الناجمة عن نصف قطر انحناء تختلف قيمته عن الصفر. ويأخذ الحساب انحناء الأرض في الاعتبار بواسطة مفهوم نصف قطر الأرض الفعال (انظر الفقرة 3.4 من التوصية ITU-R P.452). وتتلاءم هذه الطريقة مع الحالات التي يلزم فيها إجراء عام وحيد بالنسبة إلى المسيرات الأرضية على الأرض أو البحر لكل من خط البصر وعبر الأفق.

ويجب أن يتيسر المظهر الجانبي للمسير الراديوي في شكل مجموعة من عينات ارتفاع الأرض فوق مستوى سطح البحر عند عدة نقاط منتظمة على طول المسير، حيث تمثل العينة الأولى والأخيرة ارتفاعا المرسل والمستقبل فوق مستوى سطح البحر ومجموعة مطابقة من المسافات الأفقية انطلاقاً من المرسل. ويكون كل زوج من الارتفاع والمسافة نقطة المظهر الجانبي ويسند إليه رمز، مع ازدياد هذه الرموز بين طرفي المسير. ويُفترض في هذه الوصف أن الرموز تزداد من المرسل إلى المستقبل رغم أن ذلك لا يعد ضرورياً بالنسبة إلى هذه الطريقة. ويفضل، ولكن لا يشترط، أن توزع عينات المظهر الجانبي على مسافات متساوية أفقياً.

1.4.4 طريقة الاسطوانات المتسلسلة

يجب أن يتيسر 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. وتوصف قيم المسافة والارتفاع في شكل صفيفة 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 الممدة" 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 بذا الأمر بواسطة الإجراء الآتي، الذي تكون فيه جميع قيم الارتفاع والمسافة في وحدات متسقة، وتقاس جميع الزوايا بواسطة وحدة الراديان. وتشمل الطريقة تقريبات تصح بالنسبة إلى مسيرات راديوية مكونة زوايا صغيرة بالنسبة إلى الخط الأفقي. وإذا كان للمسير تدرجات شعاعية تتجاوز حوالي 5°، فقد يقتضي الأمر هندسة أكثر دقة.

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

$$e = [(h_i - h_s) / d_{si}] - [d_{si} / 2a_e] \quad (40)$$

حيث:

a_e: نصف قطر الأرض الفعال، يُعطى بواسطة:

$$= k \times 6\,371 \text{ (km)}$$

و:

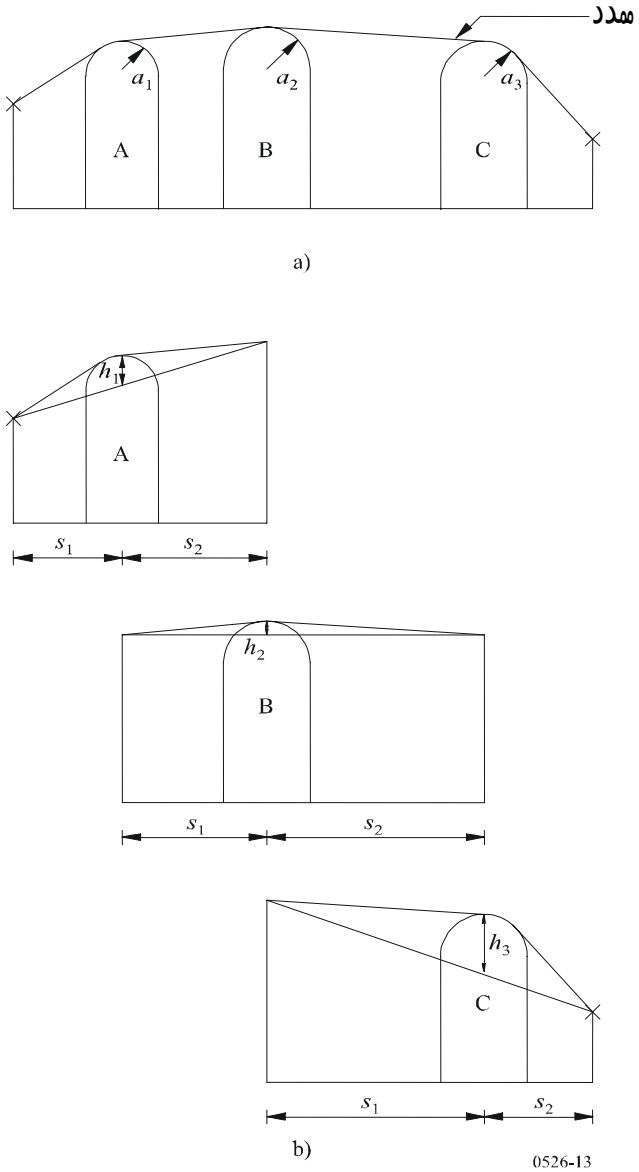
k: عامل نصف قطر الأرض الفعال

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 المباعدة 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 اسطوانة، (انظر الشكل 13). وتتطابق هندسة كل واحد من الاسطوانات مع الشكل 8c. مع الإشارة إلى أن المسافتين s_1 وs_2، في الشكل 13 بالنسبة إلى كل واحدة من الاسطوانات تظهران مقاستين أفقياً بين نقاط القمة، وأن هذه المسافات تقارب، بالنسبة إلى الأشعة الأفقية القريبة، مسافتا الميل d_1 وd_2 في الشكل 8c. وقد يكون من الضروري بالنسبة إلى زوايا الأشعة بالنسبة إلى أفق أكبر من حوالي 5° تقريباً، أن تحدد s_1 وs_2 عند مسافتا ميل ما بين القمة، d_1 وd_2.

الشكل 13

نموذج الاسطوانات المتسلسلة a) المشكلة الإجمالية، b) التفاصيل



مثلما هو الحال في الشكل 13، يظهر ارتفاع h لكل واحدة من الاسطوانات مقاساً عمودياً انطلاقاً من القمة نزولاً إلى الخط المستقيم الذي يربط بين القمة الحاورة أو النقاط المطرافية. وتتطابق قيمة h بالنسبة إلى كل اسطوانة مع h في الشكل 8c. ويمكن مرة أخرى بالنسبة إلى الأشعة الأفقية القريبة، أن تحسب ارتفاعات الاسطوانة على نحو عمودي، ولكن بالنسبة إلى زوايا أشعة شديدة الانحدار، من الضروري حساب h عند الزوايا الصحيحة بالنسبة إلى الخط الأساسي للاسطوانة.

ويوضح الشكل 14 هندسة عائق يتكون من أكثر من نقطة سلسة. 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 تكون جزء العائق الأقرب إلى المرسل

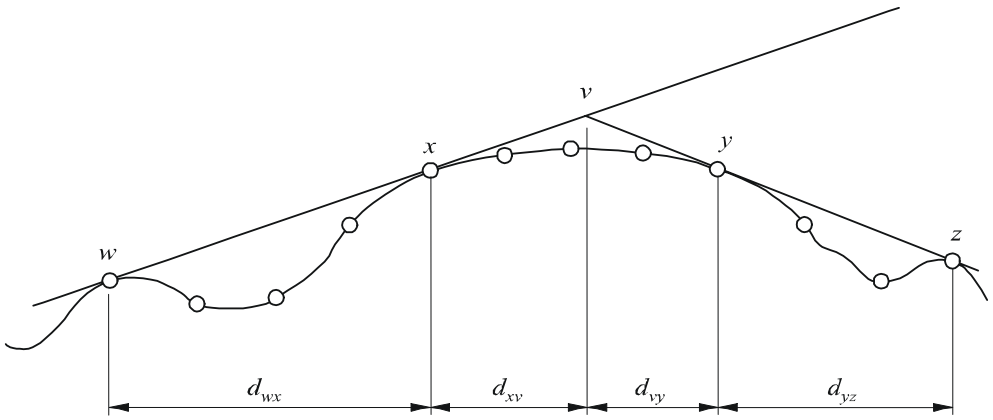
y: نقطة السلسة التي تكون جزء العائق الأقرب إلى المستقبل

z: نقطة السلسة 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



O: عينات المظهر الجانبي 0526-14

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

ويرد في التذييل 1 وصف طريقة التدرج لتواؤم الاسطوانات مع المظهر الجانبي العام للتضاريس الأرضية. ويتميز كل عائق بواسطة w وx وy وz. وتستعمل بالتالي الطريقة الواردة في التذييل 1 للحصول على معلمات الاسطوانات s_1 وs_2 وh وR. ونظراً إلى أن نمذجة المظهر الجانبي أعدت على هذا النحو، تُحسب خسارة الانعراج بالنسبة إلى المسير كمجموع لثلاثة حدود:

- مجموع خسائر الانعراج على الاسطوانات؛
- مجموع انعراج المسير الفرعي بين الاسطوانات (وبين الاسطوانات والمطاريف الحاورة)؛
- عبارة التصحيح.

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

$$L_d = \sum_{i=1}^{N} L'_i + L''(wx)_1 + \sum_{i=1}^{N} L''(yz)_i - 20\log C_N \quad \text{dB} \tag{41}$$

حيث:

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

$L''(wx)_1$: خسارة انعراج المسير الفرعي بالنسبة إلى جزء المسير بين النقطتين w وx بالنسبة إلى الاسطوانة الأولى.

$L''(yz)_i$: خسارة انعراج المسير الفرعي بالنسبة إلى جزء المسير بين النقطتين y وz بالنسبة إلى جميع الاسطوانات.

C_N: عامل التصحيح الذي يستخدم في حالة خسارة الانتشار التي تعزى إلى الانعراج على الاسطوانات المتتالية.

ويحتوي التذييل 2 على طريقة لحساب L'' بالنسبة إلى كل أجزاء خط البصر للمسير بين العوائق.

ويُحسب عامل التصحيح، C_N، بواسطة:

$$C_N = (P_a / P_b)^{0.5} \tag{42}$$

حيث:

$$P_a = s_1 \prod_{i=1}^{N} [(s_2)_i] \left(s_1 + j \sum_{j=1}^{N} [(s_2)_j] \right) \tag{43}$$

$$P_b = (s_1)_1 (s_2)_N \prod_{i=1}^{N} [(s_1)_i + (s_2)_i] \tag{44}$$

وتشير الأقواس الدائرية إلى اسطوانات فردية.

2.4.4 طريقة حواف كحد السكين متسلسة

تستند هذه الطريقة إلى إجراء يُستعمل من مرة إلى ثلاث مرات تبعاً للمظهر الجانبي للمسير. ويتمثل الإجراء في إيجاد نقطة داخل جزء معين للمظهر الجانبي يملك قيمة المعلمة الهندسية الأعلى v مثلما ورد توضيح ذلك في الجزء 1.4. ويعرّف جزء المظهر الجانبي الذي يتعين فحصه انطلاقاً من دليل النقطة a إلى دليل النقطة b (a < b). وإذا كانت a + 1 = b، فلا توجد نقطة وسيطة وتكون خسارة الانتشار بالنسبة إلى جزء المسير المعني صفراً. وفي الحالات الأخرى، يطبق البناء بواسطة تقييم ν_n (a < n < b) واختيار النقطة ذات القيمة الأعلى بالنسبة إلى ν. وتعطى قيمة ν بالنسبة إلى نقطة المظهر الجانبي n-th بواسطة:

$$\nu_n = h\sqrt{2d_{ab}/\lambda d_{an} d_{nb}} \tag{45}$$

حيث:

$$h = h_n + [d_{an}\, d_{nb} / 2\, r_e] - [(h_a\, d_{nb} + h_b\, d_{an}) / d_{ab}] \tag{45a}$$

h_a, h_b, h_n: الارتفاعات الرأسية كما ترد في الشكل 15.

d_{an}, d_{nb}, d_{ab}: المسافات الأفقية كما ترد في الشكل 15.

r_e: نصف قطر الأرض الفعال

λ: طول الموجة

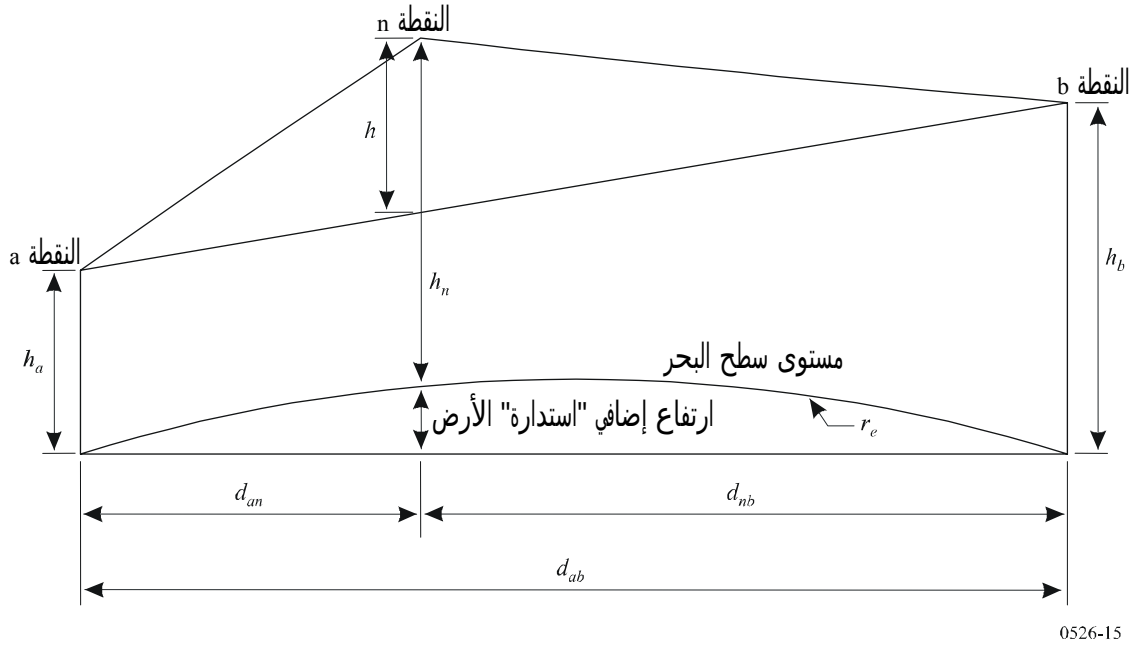
القيم h وd وr_e وλ ، كلها في شكل وحدات متسقة.

وبالتالي، تعطى خسارة الانعراج كخسارة حافة كحد السكين $J(\nu)$ وفقاً للمعادلة (27) بالنسبة إلى $\nu > -0{,}78$، وهي تساوي صفراً في الحالات الأخرى.

وجدير بالملاحظة أن المعادلة (45) مشتقة مباشرة من المعادلة (22). ويرد توضيح هندسة المعادلة (45a) في الشكل 15. ويعتبر الحد الثاني في المعادلة (45a) تقريباً جيداً بالنسبة إلى الارتفاع الإضافي عند النقطة n الناتج عن انحناء الأرض.

الشكل 15

هندسة حافة وحيدة



يطبق الإجراء الوارد أعلاه، أولاً، على المظهر الجانبي للمسير بكامله من المرسل إلى المستقبل. ويُطلق على نقطة v ذات القيمة الأعلى اسم الحافة الرئيسية، p، ونشير بواسطة $J(\nu_p)$ إلى الخسارة المقابلة.

وعندما تكون $\nu_p > -0{,}78$، يُطبق هذا الإجراء مرتين إضافيتين:

- من المرسل إلى النقطة p للحصول على ν_t وبالتالي $J(\nu_t)$؛
- من النقطة p إلى المستقبل للحصول على ν_r وبالتالي $J(\nu_r)$.

وعندئذ، تعطى خسارة الانعراج الإضافية بواسطة:

$$L = J(\nu_p) + T\,[\,J(\nu_t) + J(\nu_r) + C\,] \quad \text{بالنسبة إلى } \nu_p > -0{,}78 \tag{46a}$$

$$L = 0 \quad \text{بالنسبة إلى } \nu_p \le -0{,}78 \tag{46b}$$

حيث:

C: التصحيح التجريبي

$$C = 10{,}0 + 0{,}04D \tag{47}$$

D: طول المسير الإجمالي (km)

و:

$$T = 1{,}0 - \exp\left[-J(\nu_p)/6{,}0\right] \quad (48)$$

وجدير بالملاحظة إلى أن الإجراء الوارد أعلاه يستند، بالنسبة إلى المسيرات عبر الأفقية، إلى طريقة دايغوت (Deygout) التي تقتصر على ثلاث حواف في أقصى تقدير. أما بالنسبة إلى مسيرات خط البصر، فإن هذا الإجراء يختلف عن بناء دايغوت من حيث أنه يمكن استخدم حافتين ثانويتين عندما تؤدي الحافة الرئيسية إلى خسارة انعراج تختلف قيمتها عن الصفر.

وعندما تستعمل طريقة التنبؤ بخسارة الانعراج هذه بالنسبة إلى مختلف قيم نصف قطر الأرض الفعال على نفس المظهر الجانبي للمسير، يوصى بأن تحدد في المقام الأول الحافة الرئيسية، والحواف الثانوية على كلا الجانبين متى وجدت، بالنسبة إلى نصف قطر الأرض الفعال المتوسط. ومن ثم، يجب استعمال هذه الحواف عند حساب خسائر الانعراج بالنسبة إلى القيم الأخرى لنصف قطر الأرض الفعال، دون تكرار الإجراء لتحديد موقع هذه النقاط. وهذا من شأنه أن يؤدي إلى تفادي إمكانية الانقطاع، التي تحدث في بعض الحالات، في خسارة الانعراج المتوقعة حسب نصف قطر الأرض الفعال بسبب اختيار حواف مختلفة.

5 الانعراج بواسطة حواجز رفيعة

تفترض الطرق التالية أن العائق يتخذ شكل حواجز رفيعة. ويمكن أن تطبق 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 المال 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 المال 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 أسي للحصول على تقدير يخص متوسط خسارة الانعراج. وقد اختبر هذا النموذج في ظروف من الحسابات الدقيقة بواسطة نظرية الانعراج الموحدة (UTD) وقياسات عالية الدقة.

المرحلة 1: حساب المعلمة الهندسية ν بالنسبة إلى حواف ثلاث كحد السكين (الذروة والجانب الأيسر والجانب الأيمن) باستعمال أي من المعادلات من (22) إلى (25).

المرحلة 2: حساب عامل الخسارة $j(\nu) = 10^{J(\nu)/20}$ الذي يرتبط بكل حافة بالاستناد إلى المعادلة (27).

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

$$J_{min}(\nu) = -20\log\left[\frac{1}{j_1(\nu)} + \frac{1}{j_2(\nu)} + \frac{1}{j_3(\nu)}\right] \quad \text{dB} \quad (49)$$

أو، بطريقة أخرى،

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

$$J_{av}(\nu) = -10\log\left[\frac{1}{j_1^2(\nu)} + \frac{1}{j_2^2(\nu)} + \frac{1}{j_3^2(\nu)}\right] \quad \text{dB} \quad (50)$$

1.2.5 الانعراج بواسطة فتحات مستطيلة أو فتحات أو حواجز مركبة

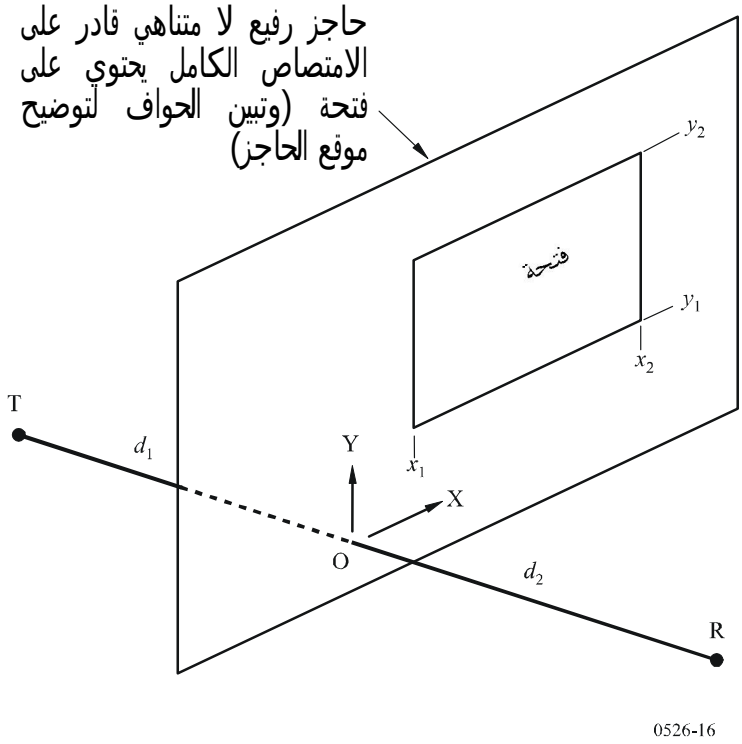
يمكن استعمال الطريقة الموصوفة أدناه للتنبؤ بخسارة الانعراج الناتجة عن فتحة مستطيلة "تمتص بالكامل" حاجزاً رفيعاً. ويمكن استعمال هذه الطريقة لتغطية العديد من الفتحات المستطيلة أو الحواجز الرفيعة، وهي تعد بالتالي طريقة بديلة بالنسبة إلى حاجز ذي عرض محدود . وقد نوقشت هذه الطريقة في الفقرة 1.5.

3.5 الانعراج بواسطة فتحة مستطيلة وحيدة

يبين الشكل 16 الهندسة المستعملة لتمثيل فتحة مستطيلة "تمتص بالكامل" حاجزاً رفيعاً.

الشكل 16

هندسة فتحة مستطيلة وحيدة



تُعطى مواقع حواف الفتحات، x_1، x_2، y_1 وy_2 داخل نظام إحداثيات ديكارتي حيث يقع المصدر عند النقطة التي يمر عندها الخط المستقيم من المرسل T إلى المستقبل R عبر الحاجز، مع انتشار يوازي المحور Z. وT وR عند المسافتين d_1 وd_2 على التوالي وراء الحاجز وأمامه.

وتُعطى شدة المجال، e_a، عند المستقبل في وحدات خطية مقيسة بالنسبة إلى الفضاء الحر في صيغة مركبة بواسطة:

$$e_a(x_1,x_2,y_1,y_2) = 0.5(C_x\, C_y - S_x\, S_y) + j\, 0.5\, (C_x\, S_y + S_x\, C_y) \quad (51)$$

حيث:

$$C_x = C(\nu_{x2}) - C(\nu_{x1}) \quad (52a)$$

$$C_y = C(\nu_{y2}) - C(\nu_{y1}) \quad (52b)$$

$$S_x = S(\nu_{x2}) - S(\nu_{x1}) \quad (52c)$$

$$S_y = S(\nu_y 2) - S(\nu_{y1}) \quad (52d)$$

وتعطى قيم v الأربع بواسطة المعادلة (22) التي تحل محل x_1، x_2، y_1 وy_2 بالنسبة إلى h، و$C(\nu)$ و$S(\nu)$ كما يردان في المعادلتين (7a) و(7b)، ويمكن تقييمها انطلاقاً من معامل فرينل المركب باستعمال المعادلتين (8a) و(8b).

وتعطى خسارة الانعراج المقابلة L_a بواسطة :

$$L_a = -20 \log (e_a) \quad \text{dB} \tag{53}$$

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 للمعادلة (51)، يُعطى مجال الفضاء الحر بواسطة $1{,}0 + j\,0{,}0$، ويُعطى المجال المركب المقيس e_s الناتج عن حاجز مستطيل وحيد (معزولة عن الأرض) بواسطة:

$$e_s = 1{,}0 - e_a \tag{54}$$

حيث تحسب e_a باستعمال المعادلة (51) 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 (51) أو (54).
- يمكن تقريب الفتحات أو الحواجز ذات الأشكال العشوائية بواسطة تركيبات ملائمة تتكون من فتحات أو حواجز مستطيلة.
- بما أن تكامليتا $C(v)$ و$S(v)$ تميلان إلى الالتقاء عند $0{,}5 + j\,0{,}5$ مع اقتراب v من اللاتناهي، يمكن تطبيق المعادلة (50) على المستطيلات ذات المدى غير المحدود في اتجاه واحد أو أكثر.

6 الانعراج على إسفين ذي ايصالية محدودة

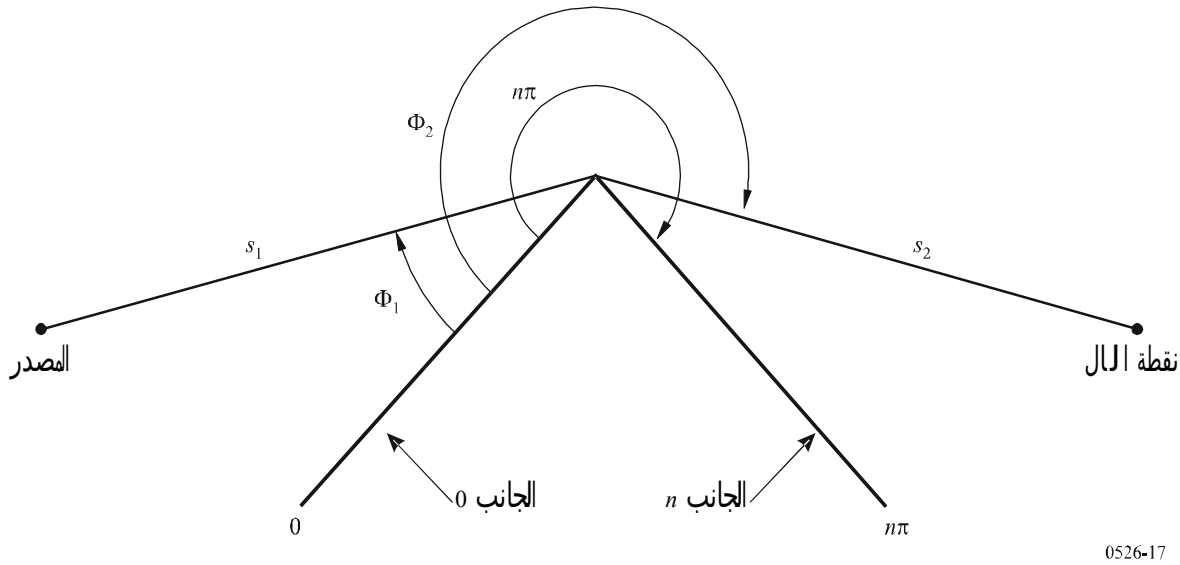
ويمكن استعمال الطريقة الموصوفة أدناه للتنبؤ بخسارة الانعراج الناتجة عن إسفين ذي ايصالية محدودة. ونجد من بين التطبيقات التي تتناسب مع هذه الطريقة دراسة الانعراج حول زاوية مبنى معين، أو على قمة السقف، أو عندما تختص التضاريس الأرضية بربوة ذات شكل إسفيني. وتتطلب هذه الطريقة معرفة الايصالية والسماحية للإسفين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

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

ويوضح الشكل 17 الرسم الهندسي لعائق إسفيني الشكل له ايصالية محدودة.

الشكل 17

هندسة انعراج الإسفين وفقاً للنظرية المنتظمة للانعراج



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

$$e_{UTD} = e_0 \frac{\exp(-\mathrm{j}ks_1)}{s_1} D^{\perp\!\!\!\perp} \cdot \sqrt{\frac{s_1}{s_2(s_1 + s_2)}} \cdot \exp(-\mathrm{j}ks_2) \tag{55}$$

حيث

e_{UTD}: المال الكهربائي عند نقطة المال

e_0: الاتساع النسبي للمصدر

s_1: المسافة بين نقطة المصدر وحافة الانعراج

s_2: المسافة بين حافة الانعراج ونقطة المال

k: عدد الموجات $2\pi/\lambda$

$D^{\perp\!\!\!\perp}$: معامل الانعراج تبعاً لاستقطاب (مواز أو متعامد مع مستوى السقوط) مجال السقوط على الحافة.

s_1، s_2 وλ في وحدات متسقة.

ويُعطى معامل الانعراج بالنسبة إلى إسفين الإيصالية المنتهية بواسطة :

$$D_{||}^{\perp} = \frac{-\exp(-j\pi/4)}{2n\sqrt{2\pi k}} \left\{ \begin{array}{l} \cot\left(\frac{\pi + (\Phi_2 - \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^+(\Phi_2 - \Phi_1)) \\ + \cot\left(\frac{\pi - (\Phi_2 - \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^-(\Phi_2 - \Phi_1)) \\ + R_0^{\perp_{||}} \cdot \cot\left(\frac{\pi - (\Phi_2 + \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^-(\Phi_2 + \Phi_1)) \\ + R_n^{\perp_{||}} \cdot \cot\left(\frac{\pi + (\Phi_2 + \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^+(\Phi_2 + \Phi_1)) \end{array} \right\} \tag{56}$$

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))

$j = \sqrt{-1}$

وحيث $F(x)$ هي تكاملية فرينل.

$$F(x) = 2j\sqrt{x} \cdot \exp(jx) \cdot \int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-jt^2)\, dt \tag{57}$$

$$\int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-jt^2)\, dt = \sqrt{\frac{\pi}{8}}(1 - j) - \int_{0}^{\sqrt{x}} \exp(-jt^2)\, dt \tag{58}$$

ويمكن حساب التكاملية بواسطة التكامل الرقمي.

ويمكن أيضاً الاستعانة بالتقريب المفيد التالي:

$$\int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-jt^2)\, dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}} A(x) \tag{59}$$

حيث:

$$A(x) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1 - j}{2} - \exp(-jx)\sqrt{\frac{x}{4}} \sum_{n=0}^{11} \left[(a_n + jb_n)\left(\frac{x}{4}\right)^n \right] & \text{if } x < 4 \\ -\exp(-jx)\sqrt{\frac{4}{x}} \sum_{n=0}^{11} \left[(c_n + jd_n)\left(\frac{4}{x}\right)^n \right] & \text{otherwise} \end{array} \right\} \tag{60}$$

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

$$L = \frac{s_2 \cdot s_1}{s_2 + s_1} \tag{61}$$

$$a^{\pm}(\beta) = 2\cos^2\left(\frac{2n\pi N^{\pm} - \beta}{2}\right) \tag{62}$$

حيث:

$$\beta = \Phi_2 \pm \Phi_1 \tag{63}$$

في المعادلة (41)، $N^{\pm}$ هي الأعداد الصحيحة التي تستجيب على الوجه الأفضل إلى المعادلة التالية:

$$N^{\pm} = \frac{\beta \pm \pi}{2n\pi} \tag{64}$$

$R_0^{\perp\parallel}, R_n^{\perp\parallel}$ معاملا الانعكاس بالنسبة إلى الاستقطاب التعامدي والاستقطاب الموازي، يعطيان بواسطة:

$$R^{\perp} = \frac{\sin(\Phi) - \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}}{\sin(\Phi) + \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}} \tag{65}$$

$$R^{\parallel} = \frac{\eta \cdot \sin(\Phi) - \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}}{\eta \cdot \sin(\Phi) + \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}} \tag{66}$$

حيث:

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

$$\eta = \varepsilon_r - \mathrm{j} \times 18 \times 10^9 \sigma / f$$

ε_r: خاصية العزل النسبية الثابتة لمادة الإسفين

σ: إيصالية مادة الإسفين (S/m)

f: التردد (Hz)

وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن لجانبي الإسفين، عند الضرورة، أن يكونا ذا خاصيات كهربائية مختلفة.

وعند حدود منطقتي الظل والانعكاس، تصبح إحدى دوال ظل التمام في المعادلة (56) مفردة.

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

حيث تعرف ε بواسطة:

$$\cot\left(\frac{\pi \pm \beta}{2n}\right) \cdot F(kLa^{\pm}(\beta)) \cong n \cdot \left[\sqrt{2\pi kL} \cdot \mathrm{sign}(\varepsilon) - 2kL\varepsilon \cdot \exp(\mathrm{j}\pi/4)\right] \cdot \exp(\mathrm{j}\pi/4) \tag{67}$$

$$\varepsilon = \pi + \beta - 2\pi n N^{+} \quad \text{بالنسبة إلى} \quad \beta = \Phi_2 + \Phi_1 \tag{68}$$

$$\varepsilon = \pi - \beta + 2\pi n N^{-} \quad \text{بالنسبة إلى} \quad \beta = \Phi_2 - \Phi_1 \tag{69}$$

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

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

$$e_{LD} = \begin{cases} e_{UTD} + \dfrac{\exp(-\mathrm{j}ks)}{s} & \text{for} \quad \Phi_2 < \Phi_1 + \pi \\ e_{UTD} & \text{for} \quad \Phi_2 \geq \Phi_1 + \pi \end{cases} \tag{70}$$

حيث:

s: مسافة الخط المستقيم بين المصدر ونقاط الظل.

وجدير بالذكر أنه في الحالة $(\Phi_2 - \Phi_1) = \pi$، يصبح الحد الثاني لظل التمام في المعادلة (56) مفرداً، ويتعين استعمال التقريب الذي تعطيه المعادلة (67).

وتعطى شدة الظل عند نقطة الظل (dB) بالنسبة إلى الظل الذي قد يوجد عند نقطة الظل في غياب عائق إسفيني الشكل (أي dB بالنسبة إلى الفضاء الحر) بتثبيت e_0 عند وحدة المعادلة (55) وبحساب:

$$E_{UTD} = 20\log\left(\left|\frac{s \cdot e_{UTD}}{\exp(-jks)}\right|\right) \quad (71)$$

حيث:

s: مسافة الخط المستقيم بين المصدر ونقاط الظل.

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

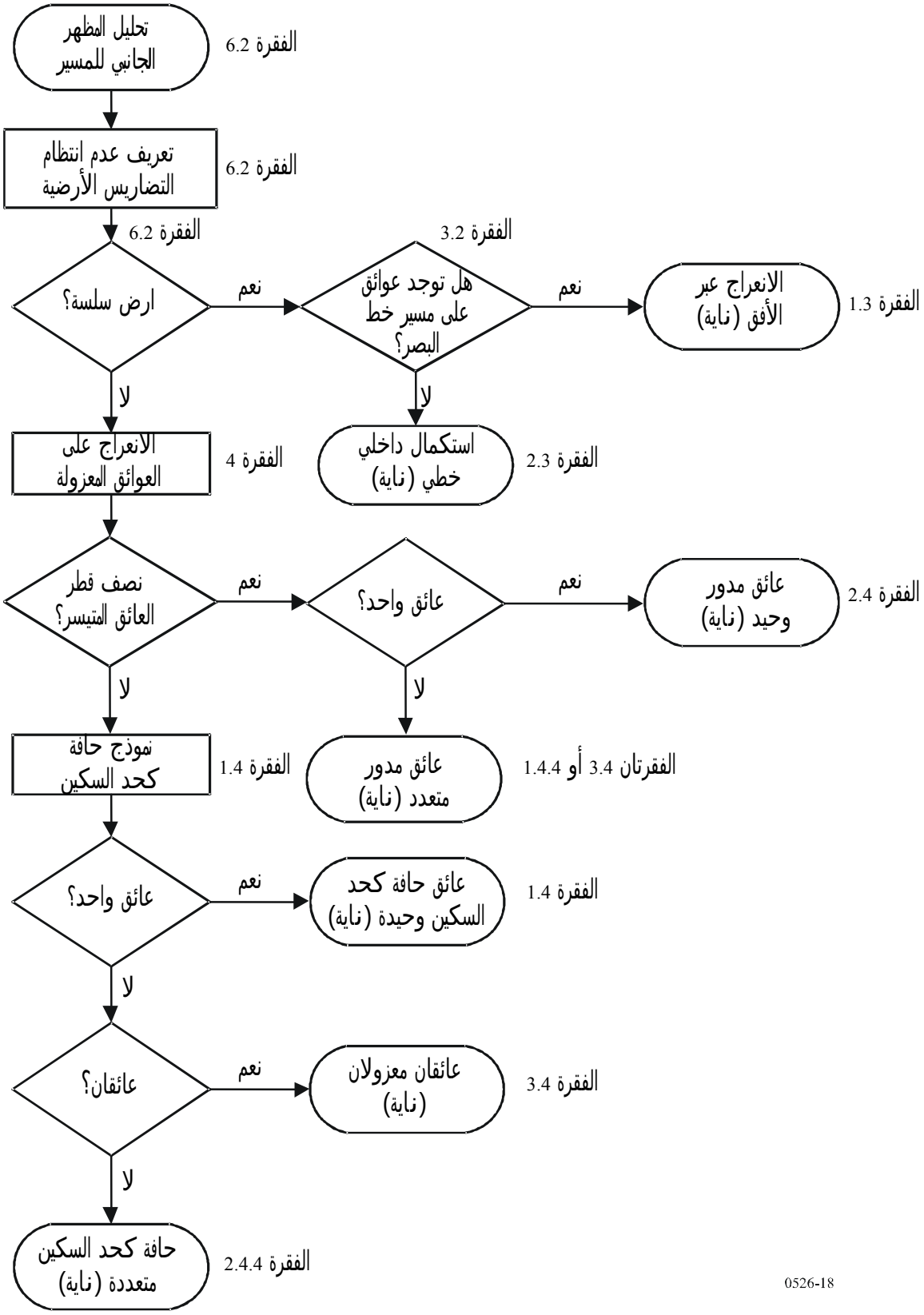
ويوجد لدى مكتب الاتصالات الراديوية صيغة نظرية الانعراج الموحدة (UTD) أعدت بواسطة برنامج MathCAD.

7 دليل الانتشار بالانعراج

يحتوي الشكل 18 على دليل عام لتقييم خسارة الانعراج التي ورد توضيحها في الفقرتين 3 و4.

الشكل 18

دليل الانتشار بالانعراج



التذييل 1
بالملحق 1

حساب معلمات الاسطوانات

يمكن استعمال الإجراء التالي لحساب معلمات الاسطوانات التي يوضحها الشكلان 8c و14 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 الاسطوانة وموقع القمة لا يُستعملان مباشرة كمعلمات اسطوانية، إلا أنما ضروريان.

وتعطى زاوية الانعراج على العائق بواسطة:

$$\theta = \alpha_w + \alpha_z + \alpha_e \tag{72}$$

حيث تعطى α_w وα_z الارتفاع الزاوي للنقطتين x وy فوق الأفق المحلي منظوراً إليهما من النقطتين w وz على التوالي بواسطة:

$$\alpha_w = (h_x - h_w) / d_{wx} - d_{wx} / 2a_e \tag{73}$$

$$\alpha_z = (h_y - h_z) / d_{yz} - d_{yz} / 2a_e \tag{74}$$

وتعطى α_e، الزاوية التي تقع قبالة مسافة الدائرة العظمى بين النقطتين w وz بواسطة:

$$\alpha_e = d_{wz} / a_e \tag{75}$$

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

بالنسبة إلى عائق نقطة وحيدة:

$$d_{wv} = d_{wx} \tag{76}$$

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

$$\text{بالنسبة إلى } \theta \cdot a_e \geq d_{xy} \quad d_{wv} = [(\alpha_z + \alpha_e / 2)\, d_{wz} + h_z - h_w\,] / \theta \tag{77a}$$

$$\text{بالنسبة إلى } \theta \cdot a_e < d_{xy} \quad d_{wv} = (d_x + d_y) / 2 \tag{77b}$$

وتعطى مسافة النقطة z من نقطة القمة بواسطة:

$$d_{vz} = d_{wz} - d_{wv} \tag{78}$$

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:

$$h_v = h_x \tag{79}$$

بالنسبة إلى عائق متعدد النقاط:

$$h_v = d_{wv}\, \alpha_w + h_w + d\,2,^{wv} / 2a_e \tag{80}$$

2 معلمات الاسطوانات

يمكن الآن حساب معلمات الاسطوانات التي يرد توضيحها في الشكل 8c لكل واحد من عوائق التضاريس الأرضية التي يحددها تحليل السلسلة.

d_1 وd_2 مسافتا ما بين القمة الموجبة بالنسبة إلى العوائق (أو المطاريف) على المرسل وعلى جانبي مستقبل العائق على التوالي،

و:

$$h = h_v + d_{wv}\, d_{vz} / 2a_e - (h_w\, d_{vz} + h_z\, d_{wv}) / d_{wz} \quad (81)$$

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

p: النقطة الماورة لـ x على جانب المرسل،

و:

q: النقطة الماورة لـ y على جانب المستقبل.

وهكذا تعطى دلائل المظهر الجانبي p وq بواسطة:

$$p = x - 1 \quad (82)$$

و:

$$q = y + 1 \quad (83)$$

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

ويُحسب نصف قطر الاسطوانة بوصفه الفارق في الانحدار بين جزء المظهر الجانبي p-x وy-q، مع الأخذ في الاعتبار انحناء الأرض، مقسوماً على المسافة بين p وq.

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

$$d_{px} = d_x - d_p \quad (84)$$

$$d_{yq} = d_q - d_y \quad (85)$$

$$d_{pq} = d_q - d_p \quad (86)$$

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

$$t = (h_x - h_p) / d_{px} + (h_y - h_q) / d_{yq} - d_{pq} / a_e \quad (87)$$

حيث a_e نصف قطر الأرض الفعال.

ويُعطى نصف قطر الاسطوانة الآن بواسطة:

$$R = \left[d_{pq} / t\right] \left[1 - \exp(4\nu)\right]^3 \quad (88)$$

حيث ν معلمة حافة كحد السكين بلا أبعاد في المعادلة (28).

ويمثل العامل الثاني، في المعادلة (48)، دالة سلسلة تجريبية تطبق على نصف قطر الاسطوانة لتفادي حدوث تقطع في عوائق خط البصر الهامشية.

التذييل 2
بالملحق 1

خسائر انعراج المسير الفرعي

1 المقدمة

يعرض هذا التذييل 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 وx وz مثلما يرد توضيح ذلك في الشكلين 13 و14. ويجب حساب انعراج المسير الفرعي لكل جزء فرعي للمسير الإجمالي بين النقاط الممثلة بواسطة w وx أو y وz. 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 وv، في التعرف على عينة المظهر الجانبي البينية ولكن استبعاد u وv 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 كاسطوانة، ينحصر المظهر الجانبي بين u وv في جزء بين اثنين من الرموز الإضافية p وq، يُحددان على النحو التالي:

- $p = u + 1$.
- إذا كان كل من $p < v$ و$h_p > h_{p+1}$، نزيد 1 إلى p ونكرر.
- $q = v - 1$.
- إذا كان كل من $q > u$ و$h_q > h_{q-1}$ ، ننقص 1 من q ونكرر.

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

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

h_z: ارتفاع الشعاع فوق نقطة المظهر الجانبي

F_1: نصف قطر منطقة فرينل الأولى.

ويمكن كتابة الخلوص المعياري الأدنى على نحو ما يلي:

$$C_F = \min_{i=p}^{q} [(h_z)_i / (F_1)_i] \quad (89)$$

حيث:

$$(h_z)_i = (h_r)_i - (h_t)_i \quad (90)$$

$$(F_1)_i = \sqrt{\lambda \cdot d_{ui} \cdot d_{iv} / d_{uv}} \quad (91)$$

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

$$(h_r)_i = (h_u \cdot d_{iv} + h_v \cdot d_{ui}) / d_{uv} \quad (92)$$

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

$$(h_t)_i = h_i + d_{ui} \cdot d_{iv} / 2a_e \quad (93)$$

_____