

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R P.452-16
(2015/07)

إجراء التنبؤ لتقدير التداخل بين المحطات
على سطح الأرض عند ترددات
تفوق 0,1 GHz تقريبا

السلسلة P

انتشار الموجات الراديوية

الاتحاد الدولي للاتصالات



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

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

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

سلسلة توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

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

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

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

R 1.

النشر الإلكتروني

جنيف، 2016

© ITU 2016

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

التوصية ITU-R P.452-16*

إجراء التنبؤ لتقدير التداخل بين المحطات على سطح الأرض عند ترددات تفوق 0,1 GHz تقريباً

(1970-1974-1978-1982-1986-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2005-2007-2009-2013-2015)

مجال التطبيق

تضم هذه التوصية طريقة تنبؤ لتقييم التداخل بين المحطات على سطح الأرض عند ترددات من 0,1 GHz تقريباً إلى 50 GHz ،
أخذة في الحسبان آليتي التداخل في الجو الصافي والتداخل بالانتشار في الماء الجوي.

مصطلحات أساسية

التداخل، الانتشار الموجه، الانتشار التروبوسفيري، الانعراج، الانتشار في الماء الجوي، نواتج بيانات رقمية

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن ازدحام الطيف الراديوي يستوجب تقاسم نطاقات التردد بين مختلف الخدمات للأرض وبين مختلف الأنظمة في الخدمة
نفسها وبين الأنظمة في الخدمات للأرض والخدمات أرض-فضاء؛

ب) أن التعايش المرضي بين الأنظمة التي تتقاسم نطاقات التردد نفسها يتطلب إجراءات للتنبؤ بانتشار التداخلات تكون
دقيقة وموثوقة الاستعمال ومقبولة من كل الأطراف المعنية؛

ج) أن التنبؤات بانتشار التداخلات تطبق في إجراءات التنبؤ بالتداخل التي تكون غالباً ضرورية للاستجابة لأهداف الأداء
والتيسر في أثناء "الشهر الأسوأ"؛

د) أن طرائق التنبؤ ضرورية في التطبيق على كل أنماط المسيرات في كل أنحاء العالم،

توصي

1 باستعمال إجراء التنبؤ بالتداخل الوارد في الملحق 1 من أجل تقدير خسارة الانتشار المتيسرة على مسير الإشارة
غير المرغوبة بين المحطات على سطح الأرض عند ترددات تفوق 0,1 GHz تقريباً.

الملحق 1

1 مقدمة

لقد أصبح تقاسم عدة نطاقات من الترددات ضرورياً بين مختلف الخدمات الراديوية وبين مختلف المشغلين لخدمات راديوية متماثلة
وذلك بسبب ازدحام طيف الترددات الراديوية. ولضمان تعايش مرضٍ بين الأنظمة للأرض والأنظمة أرض-فضاء المعنية، لا بد

* أجرت لجنة الدراسات 3 تعديلات صياغية على هذه التوصية في 2016 طبقاً للقرار ITU-R 1.

من الممكن من التنبؤ، بدقة معقولة، باحتمالات التداخل فيما بين الأنظمة بواسطة تنبؤات بالانتشار ونماذج مقبولة من كل الأطراف المعنية وتكون قد أثبتت دقتها وموثوقيتها.

ويمكن أن توجد عدة أنماط وعدة تركيبات من مسيرات التداخل بين محطات على سطح الأرض، وبين هذه المحطات ومحطات في الفضاء، وتتطلب كل حالة من هذه الحالات وجود طرائق للتنبؤ. ويعالج هذا الملحق إحدى أهم مجموعات مشاكل التداخل، أي الحالات التي يحتمل فيها حصول تداخل بين محطات راديوية تقع على سطح الأرض.

وتعمل النماذج الواردة في التوصية ITU-T R.452 بناء على الافتراض بأن كلاً من المرسل المسبب للتداخل والمستقبل المعرض للتداخل يعملان ضمن الطبقة السطحية للغلاف الجوي. ومن غير المناسب لهذه النماذج استعمال ارتفاعات للهوائيات تكون كبيرة بشكل استثنائي لنمذجة عمليات من قبيل أنظمة الطيران. وقد تم اختبار إجراء التنبؤ لمحطات راديوية تعمل في مدى الترددات بين 0,1 GHz تقريباً و 50 GHz.

وقد صممت النماذج الواردة في التوصية ITU-T R.452 لحساب خسارات الانتشار التي لا يتم تجاوزها لنسبة من الوقت في المدى $0,001 \leq p \leq 50\%$. ولا يعني هذا الافتراض أن الخسارة القصوى تحدث عند $p = 50\%$.

وتشمل الطريقة مجموعة إضافية من نماذج الانتشار التي تضمن تغطية كل آليات انتشار التداخل الهامة التي يمكن أن تظهر. وتتوفر طرائق خاصة بتحليل خصائص المسير المتعلقة بالأرصاء الجوية الراديوية وخصائصه الطبوغرافية وهي تمكن من التنبؤ في أية حالة يقع فيها مسير التداخل عملياً في مجال تطبيق الإجراء المعني حتى مسافة لا تتعدى 10 000 km.

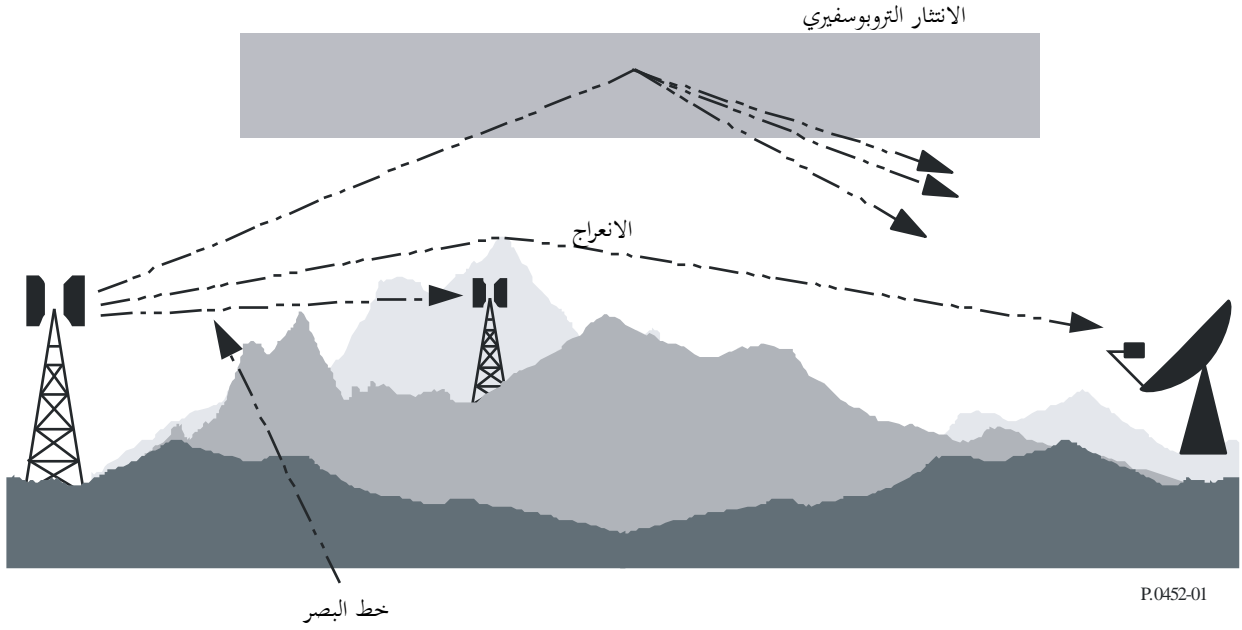
2 آليات انتشار التداخل

يمكن أن يظهر التداخل عبر مجموعة من آليات الانتشار تتعلق أهميتها الفردية بالمناخ والتردد الراديوي وبالنسبة المئوية المعنية من الوقت وبالمسافة وبطوبوغرافيا المسير. ويمكن في أي وقت أن تظهر آلية واحدة أو عدة آليات. وتكون أهم آليات انتشار التداخل هي التالية:

- في خط البصر (الشكل 1): تكون أبسط حالة انتشار للتداخل عندما يوجد مسير إرسال في خط البصر في الظروف الجوية العادية (أي، الجو المختلط فعلاً). غير أن تعقيداً إضافياً يمكن أن يظهر عندما يسبب الانعراج على المسير الفرعي تزايداً في سوية الإشارة يفوق قليلاً السوية المتوقعة عادة. ويمكن أيضاً أن تعزز غالباً سويات الإشارات تعزيزاً كبيراً ما عدا على أقصر المسيرات (أي، على المسيرات الأطول من 5 km تقريباً)، ولفترات قصيرة من الوقت، وذلك بسبب تأثيرات تعدد المسيرات والتركيز الناتجة عن تكون الطبقات الجوية (انظر الشكل 2).
- الانعراج (الشكل 1): تسود عموماً تأثيرات الانعراج وراء خط البصر وفي الشروط العادية، كلما وجدت سويات إشارات ملحوظة. أما في الخدمات التي لا تكون فيها مشكلات الشذوذ قصير الأجل ذات أهمية، تتعلق عادة كثافة الأنظمة التي يمكن تحقيقها بالدقة التي يمكن أن تحدد بها نماذج الانعراج. ويجب أن يكون التنبؤ بالانعراج قادراً على تغطية حالات الأرض المنتظمة، والعوائق المعزولة، والأرض غير المنتظمة (بلا بنية).
- الانتشار التروبوسفيري (الشكل 1): تعرف هذه الآلية سوية تداخل "الخلفية" لمسيرات أطول (أي أطول من 100-150 km، مثلاً) حيث يصبح مجال الانعراج ضعيفاً جداً. ولكن وباستثناء بعض الحالات الخاصة التي تعني مستقبلات حساسة أو مسببات للتداخل عالية القدرة (أنظمة رادار مثلاً)، تكون سوية التداخل عبر الانتشار التروبوسفيري منخفضة جداً بحيث لا تكون ذات دلالة.

الشكل 1

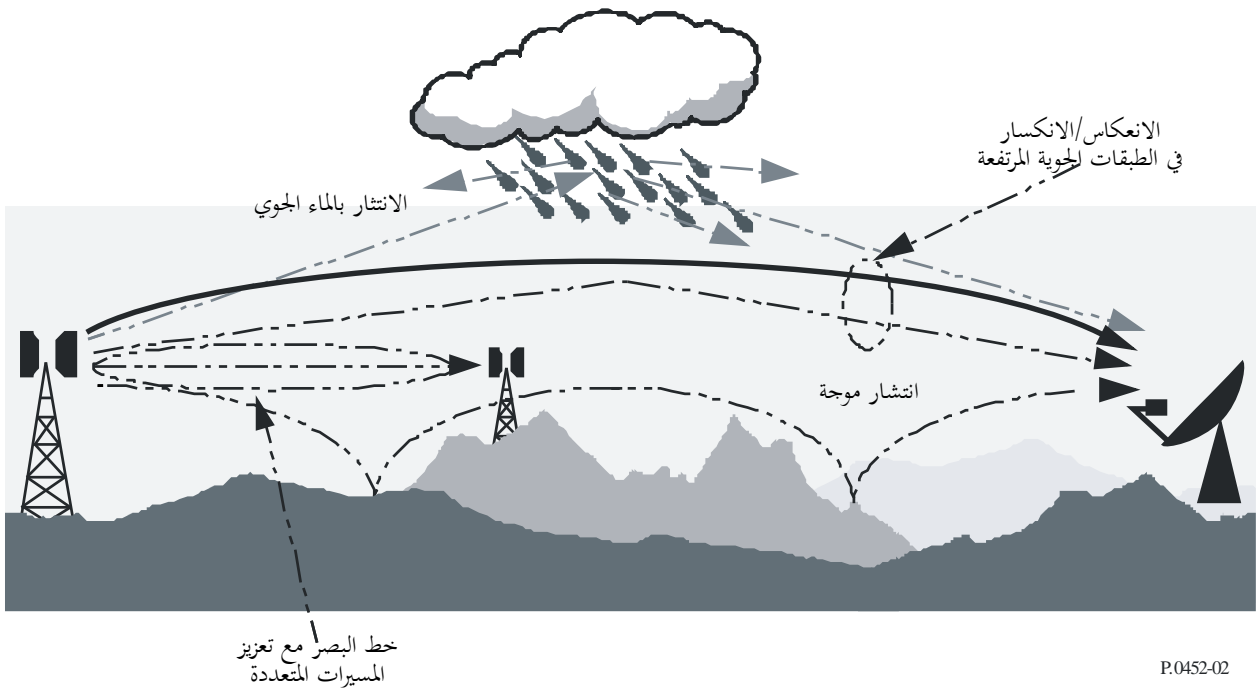
آليات انتشار التداخلات طويلة الأجل



- الانتشار الموجّه على السطح (الشكل 2): وهو أهم آلية للانتشار قصير الأجل الذي يمكن أن يحدث التداخل فوق الماء وفي المناطق الساحلية المنبسطة ويمكن أن يسبب سويات مرتفعة من الإشارات على امتداد مسافات كبيرة (أكثر من 500 km فوق البحر). ويمكن أن تتجاوز هذه الإشارات، في ظروف معينة، سوية "الفضاء الحر" المكافئة.

الشكل 2

آليات انتشار التداخل (قصير الأجل) الشاذة



- الانعكاس والانعكاس على الطبقات الجوية المرتفعة (الشكل 2): تكتسي معالجة الانعكاس و/أو الانكسار على طبقات عند ارتفاعات تصل إلى بضع المئات من الأمتار أهمية كبيرة لأن هذه الآليات تسمح للإشارات بمواجهة خسارة الانعراج على الأرض مواجهة فعالة جداً في ظروف تكون فيها هندسة المسير مؤاتيةً. وهنا أيضاً يمكن أن يكون التأثير كبيراً على مسافات طويلة جداً (تصل إلى 250-300 km).
- الانتثار بالماء الجوي (الشكل 2): يمكن أن يشكل الانتثار بالماء الجوي مصدراً كامناً من مصادر التداخل بين مرسلات الوصلات للأرض والمحطات الأرضية لأنه قد يعمل في كل الاتجاهات تقريباً ومن ثم قد يؤثر خارج مسير التداخل في مستوى الدائرة العظمى. غير أن سويات الإشارات المسببة للتداخل منخفضة جداً ولا تمثل عادة مشكلة ذات أهمية.
- ثمة مشكلة أساسية في التنبؤ بالتداخل (وهي بالفعل مشتركة لكل إجراءات التنبؤ بالانتشار التروبوسفيري)، وهي صعوبة توفير مجموعة موحدة متسقة من الطرائق العملية التي تغطي مدى واسعاً من المسافات ومن النسب المئوية الزمنية، أي في ظروف الجو الفعلي التي تندمج فيها، تدريجياً، إحصائيات هيمنة إحدى الآليات مع آلية أخرى عندما تتغير شروط الأرصاد الجوية و/أو المسير. ويمكن، خاصة في هذه المناطق الانتقالية، أن تأخذ الإشارة سوية معينة لنسبة مئوية كلية من الوقت تمثل مجموع هذه النسب في مختلف الآليات. وكان النهج في هذا الإجراء أن تحدد طرائق منفصلة تماماً للتنبؤ بالتداخل في الجو الصافي وفي الانتثار بالماء الجوي كما يرد وصفها في الفقرتين 4 و 5 على التوالي.
- وتتكون طريقة الجو الصافي من نماذج مختلفة للانعراج والانتشار الموجه/الانعكاس على الطبقات والانتشار التروبوسفيري. وتطبق النماذج الثلاثة كلها في جميع الحالات بغض النظر عما إذا كان المسير في خط البصر أم عبر الأفق. ثم تضم النتائج إلى تنبؤ إجمالي يستخدم تقنية تجمع ما بين مختلف آليات الانتشار وتضمن وصول تعزيز الإشارة في نموذج خط البصر المكافئ النظري إلى أقصى حد ممكن، مهما كانت مسافة المسير أو النسبة المئوية من الوقت.

3 تنبؤ تداخل الهواء الصافي

1.3 اعتبارات عامة

- على الرغم من تطبيق طريقة الجو الصافي من خلال ثلاثة نماذج مستقلة، لكن نتائجها تجمع، ويراعي الإجراء خمسة أنماط أساسية تتعلق بآليات الانتشار وهي:
- خط البصر (بما في ذلك تعزيزات الإشارات بسبب تأثيرات المسيرات المتعددة والتبشير)؛
- الانعراج (ويشمل الأرض المنتظمة والتضاريس الأرضية غير المنتظمة وحالات وجود مسيرات فرعية)؛
- الانتثار التروبوسفيري؛
- الانتشار الشاذ (الانتشار الموجه والانعكاس/الانعكاس على الطبقات)؛
- تغير كسب الارتفاع بسبب مجموعة من العوائق (إن وجدت).

2.3 اشتقاق التنبؤ

1.2.3 عرض عام للإجراء المطبق

تتمثل الخطوات اللازمة لتحقيق التنبؤ بما يلي:

الخطوة 1: بيانات الدخل

يعرض الجدول 1 بيانات الدخل الأساسية اللازمة للإجراء. وتشتق كل المعلومات الأخرى المطلوبة من هذه البيانات الأساسية في أثناء تنفيذ الإجراء.

الجدول 1

بيانات الدخل الأساسية

المعلمة	الاستبانة المفضلة	الوصف
f	0,01	التردد (GHz)
p	0,001	النسبة (أو النسب) المئوية المطلوبة من الوقت التي لا يتم أثناءها تجاوز خسارة الإرسال الأساسية المحسوبة
φ_t, φ_r	0,001	خط عرض المحطة (درجات)
ψ_t, ψ_r	0,001	خط طول المحطة (درجات)
h_{tg}, h_{rg}	1	ارتفاع مركز الهوائي فوق سوية الأرض (m)
h_{ts}, h_{rs}	1	ارتفاع مركز الهوائي فوق متوسط مستوى البحر (m)
G_t, G_r	0,1	كسب الهوائي في اتجاه الأفق على طول مسير التداخل في الدائرة العظمى (dBi)
الاستقطاب	غير متاح	إشارة، مثلاً عمودية أو أفقية

الملاحظة 1 - من أجل المحطات المسببة للتداخل والمحطات المعرضة للتداخل:

t : محطة مسببة للتداخل.

r : محطة معرضة للتداخل.

والاستقطاب في الجدول 1 ليس معلمة ذات قيمة عددية. وتستعمل المعلومات في الفقرة 1.2.2.4 بالتوافق مع المعادلات (30a) و(30b) و(31).

الخطوة 2: الانتقاء بين التنبؤ لسنة متوسطة أو التنبؤ للشهر الأسوأ

يتحدد عادة الاختيار بين التنبؤات السنوية أو التنبؤ للشهر الأسوأ وفقاً لأهداف النوعية (أي الأداء والتيسر) للنظام الراديوي المعرض للتداخل عند طرف استقبال مسير التداخل. ولما كان التداخل غالباً مشكلة ثنائية الاتجاه فقد يتوجب تقدير مجموعتين من هذه الأهداف الخاصة بالنوعية بهدف تحديد اتجاه الحالة الأسوأ التي ينبغي أن تبني عليها أدنى خسارة إرسال يسمح بها. ويعبر عن أهداف النوعية، في أغلب الحالات، بالنسبة المئوية "لأي شهر"، ويجب عندها أن تستعمل بيانات الشهر الأسوأ.

ونماذج التنبؤ بالانتشار هذه تتنبأ بالتوزيع السنوي لخسارة الإرسال الأساسية. وتستعمل مباشرة في إجراء التنبؤ لسنة متوسطة النسب المئوية من الوقت p التي لا يتم في أثنائها تجاوز قيم خاصة من خسارة الإرسال الأساسية. أما في حالة التنبؤ بالشهر الأسوأ المتوسط فيجب أن تحسب النسب المئوية المكافئة السنوية، p ، للنسبة المئوية للشهر الأسوأ p_w من أجل خط عرض نقطة منتصف المسير φ بواسطة الصيغة التالية:

$$(1) \quad p = 10^{\left(\frac{\log(p_w) + \log(G_L) - 0,186\omega - 0,444}{0,816 + 0,078\omega} \right)} \quad \%$$

حيث:

ω : الجزء من المسير الواقع فوق الماء (انظر الجدول 3).

$$(1a) \quad G_L = \begin{cases} \sqrt{1,1 + |\cos 2 \varphi|^{0,7}} & \text{for } |\varphi| \leq 45^\circ \\ \sqrt{1,1 - |\cos 2 \varphi|^{0,7}} & \text{for } |\varphi| > 45^\circ \end{cases}$$

وإذا اقتضى الأمر يجب أن تحدد قيمة p بحيث تكون $p \geq 12p_w$.

وجدير بالإشارة أن خط العرض φ (درجات) يفترض بأنه موجب في النصف الشمالي من الكرة الأرضية. وتمثل عندها النتيجة المحسوبة خسارة الإرسال الأساسية أثناء النسبة المئوية من الوقت p_w % المطلوبة للشهر الأسوأ.

الخطوة 3: بيانات الأرصاد الجوية الراديوية

يستعمل إجراء التنبؤ ثلاث معلمات من الأرصاد الجوية الراديوية لوصف تغير شروط الانتشار الخلفية والشاذة عند مختلف المواقع في العالم.

- ΔN (N-وحدة/km)، هو متوسط معدل التفاوت للدليل الانكسار الراديوي في الكيلومتر الأدنى من الجو الذي يوفر البيانات التي يمكن من خلالها حساب نصف قطر الأرض الفعال المناسب لتحليل المظهر الجانبي للمسير والانعراج بالعوائق. ويشار إلى أن ΔN تمثل في هذا الإجراء كمية موجبة.
- β_0 (%)، هي النسبة المئوية من الوقت التي يتوقع في أنائها وفي المائة متر الأولى من الطبقة المنخفضة من الجو، أن تتجاوز معدلات التفاوت للدليل الانكسار 100 N-وحدة/km. وتستعمل للإشارة لتقدير الورد النسبي للانتشار الشاذ تماماً في منطقة خط العرض المعنية. وقيمة β_0 التي يتعين استخدامها هي التي توافق خط عرض منتصف المسير.
- N_0 (N-وحدة)، هي الانكسارية على سطح البحر وتستعمل فقط في نموذج الانتشار التروبوسفيري كمقياس للتغيرات في آليات الانتشار التروبوسفيري وفقاً للموقع. ولما كان حساب مسير الانتشار مبنياً على هندسة للمسير تحددها القيم السنوية ΔN أو قيم الشهر الأسوأ، فلا حاجة أيضاً لقيم N_0 خاصة بالشهر الأسوأ. وتقابل قيم ΔN و N_0 الصحيحة القيم على منتصف المسير المشتقة من الخريطة المناسبة.

يحدد الورد النقطي للانتشار الشاذ، β_0 (%)، عند منتصف المسير بواسطة الصيغة التالية:

$$(2) \quad \beta_0 = \begin{cases} 10^{-0,015|\varphi|+1,67} \mu_1 \mu_4 & \% \quad \text{for } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 4,17\mu_1 \mu_4 & \% \quad \text{for } |\varphi| > 70^\circ \end{cases}$$

حيث:

φ : خط عرض منتصف المسير (درجات).

وتتعلق المعلمة μ_1 بنسبة المسير فوق البر (في الأراضي الداخلية و/أو الساحلية) والمسير فوق الماء، وتعطى بالصيغة التالية:

$$(3) \quad \mu_1 = \left[10^{\frac{-d_m}{16-6,6\tau}} + \left[10^{-(0,496+0,354\tau)} \right]^5 \right]^{0,2}$$

حيث تقتصر قيمة μ_1 على $\mu_1 \geq 1$ ،

وتكون:

$$(3a) \quad \tau = \left[1 - e^{-\left(4,12 \times 10^{-4} \times d_m^{2,41}\right)} \right]$$

حيث:

d_m : أطول جزء بري مستمر (في الداخل وعلى الساحل) من مسير الدائرة العظمى (km)

d_m : أطول جزء بري مستمر داخل الأراضي من مسير الدائرة العظمى (km).

ويعرّف الجدول 2 مناطق المناخات الراديوية التي يجب استعمالها لاشتقاق d_m و d_m .

$$(4) \quad \mu_4 = \begin{cases} 10^{(-0.935 + 0.017|\varphi|) \log \mu_1} & \text{for } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 10^{0.3 \log \mu_1} & \text{for } |\varphi| > 70^\circ \end{cases}$$

الجدول 2

مناطق المناخات الراديوية

التعريف	الشفرة	نمط المنطقة
الأراضي الساحلية أو المناطق الشاطئية، أي الأراضي المجاورة للبحر حتى ارتفاع 100 m بالنسبة إلى متوسط مستوى البحر أو الماء، لكنها محددة بمسافة 50 km من أقرب منطقة بحرية، ويمكن استعمال قيمة تقريبية أي 300 ft إذا لم تتوفر بيانات دقيقة تتعلق بارتفاع 100 m.	A1	منطقة ساحلية
كل الأراضي غير المناطق الساحلية والشواطئ المعرفة باسم "الأراضي الساحلية" أعلاه.	A2	منطقة داخلية برية
البحار والمحيطات والمساحات الأخرى الكبيرة من الماء (أي التي تغطي دائرة قطرها 100 km، على الأقل).	B	منطقة بحرية

المساحات الكبيرة من المياه الداخلية

تعرف المساحة "الكبيرة" من المياه الداخلية باعتبارها تقع ضمن المنطقة B بأنها منطقة تكون مساحتها 7 800 km² على الأقل، لكنها تستثني منطقة الأنهار. وتدرج الجزر الواقعة داخل هذه الكتلة المائية على أنها مناطق مياه في حساب مساحة هذه المنطقة إذا كان أكثر من 90% من مساحتها على ارتفاع أقل من 100 m فوق مستوى المياه المتوسط. ويجب أن تصنف الجزر التي لا تطابق هذه المقاييس كمناطق برية في حساب مساحة المياه.

مناطق البحيرات الداخلية أو المناطق البرية الرطبة الكبيرة

تعتبر الإدارات المناطق الداخلية الأوسع من 7 800 km² والتي تحتوي على عدة بحيرات صغيرة أو على شبكة من الأنهار بأنها تابعة للمنطقة A1 "الساحلية"، إذا احتوت المنطقة على أكثر من 50% من المياه وكان ارتفاع أكثر من 90% من الأرض أقل من 100 m فوق المستوى المتوسط للماء.

ومن الصعب جداً أن تحدد بدون لبس المناطق المناخية التابعة للمنطقة A1 ومساحات المياه الداخلية الواسعة والبحيرات الداخلية الكبيرة والمناطق البرية الرطبة الواسعة. ولهذا يطلب من الإدارات أن تسجل لدى مكتب الاتصالات الراديوية في الاتحاد المناطق الواقعة داخل حدودها الوطنية والتي ترغب في اعتبارها تابعة لإحدى هذه الفئات. أما في غياب معلومات مسجلة مخالفة لذلك فسوف تعتبر كل المناطق البرية تابعة للمنطقة المناخية A2.

وسعيًا إلى تأمين أقصى اتساق للنتائج فيما بين الإدارات ينبغي أن تستند الحسابات في هذا الإجراء إلى خريطة العالم المرقمنة (IDWM) الصادرة عن الاتحاد والتي يمكن الحصول عليها من مكتب الاتصالات الراديوية. فإذا كانت جميع النقاط على المسير على مسافة لا تقل عن 50 km من البحر أو المساحات الأخرى الكبيرة من الماء، لا تُطبق إلا فئة المنطقة الداخلية البرية.

وإذا ما حُزنت معلومات المنطقة في نقاط متتالية على طول المسير الراديوي، ينبغي افتراض أن التغيرات تحدث في منتصف المسافة بين نقاط ذات رموز منطقة مختلفة.

نصف قطر الأرض الفعال

يحدد متوسط عامل نصف قطر الأرض الفعال k_{50} بالنسبة إلى المسير بواسطة الصيغة التالية:

$$(5) \quad k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N}$$

وإذا افترضنا أن نصف القطر الحقيقي للأرض يبلغ 6 371 km، عندئذ يمكن أن تحدد القيمة المتوسطة لنصف قطر الأرض الفعال a_e بواسطة الصيغة التالية:

$$(6a) \quad a_e = 6,371 \cdot k_{50} \quad \text{km}$$

ويتحدد نصف قطر الأرض الفعال $\beta_0\%$ من الوقت، a_β ، في العلاقة:

$$(6b) \quad a_\beta = 6,371 \cdot k_\beta \quad \text{km}$$

حيث $k_\beta = 3,0$ وهو عامل نصف قطر الأرض الفعال الذي يتم تجاوزه خلال $\beta_0\%$ من الوقت.

وسوف يحدد في الفقرتين 1.2.4 و 2.2.4 نصف قطر عام وفعال للأرض، a_p ، بقيمة a_e خلال 50% من الوقت وقيمة a_β خلال النسبة $\beta_0\%$ من الوقت.

الخطوة 4: تحليل المظهر الجانبي للمسير

يجب أن تستخلص القيم الخاصة بعدد من المعلمات ذات العلاقة بالمسير والضرورية لإجراء الحسابات، كما يشير إليها الجدول 3، بواسطة تحليل أولي للمظهر الجانبي للمسير مبني على قيمة a_e كما تحددها المعادلة (6a). ويقدم المرفق 2 للملحق 1 معلومات حول اشتقاق المظهر الجانبي للمسير وبنائه وتحليله.

الجدول 3

قيم المعلمات المشتقة من تحليل المظهر الجانبي للمسير

المعلمة	الوصف
d	مسافة مسير الدائرة العظمى (km)
d_{lt}, d_{lr}	فيما يتعلق بالمسير عبر الأفق، المسافة بين هوائي الإرسال والاستقبال والأفق المقابل لهما (km). أما فيما يتعلق بالمسارات في خط البصر، فيتحدد كل منها بالمسافة الواقعة بين المطراف والنقطة المعروفة بأنها نقطة بولينغتون (Bullington) في طريقة الانعراج خلال 50% من الوقت.
θ_t, θ_r	فيما يتعلق بالمسير عبر الأفق، زاويتا ارتفاع الأفق عند الإرسال والاستقبال (mrad) على التوالي. أما فيما يتعلق بمسارات خط البصر فيتحدد كل منها بزاوية الارتفاع بالنسبة إلى المطراف الآخر.
θ	المسافة الزاوية للمسير (mrad)
h_{ts}, h_{rs}	ارتفاع مركز الهوائي فوق المستوى المتوسط للبحر (m)
h_{te}, h_{re}	الارتفاع الفعال للهوائي فوق الأرض (m) (انظر التعريف في المرفق 2)
d_b	الطول المجموع لأجزاء المسير فوق الماء (km)
ω	جزء المسير الكلي فوق الماء:
(7)	$\omega = d_b/d$ حيث d هي مسافة الدائرة العظمى (km) المحسوبة في المعادلة (148). من أجل المسيرات البرية بكاملها: $0 = \omega$
$d_{ct,cr}$	المسافة فوق الأرض بين هوائي الإرسال والاستقبال والساحل على طول مسير التداخل في الدائرة العظمى (km). يوضع على صفر في حالة مطراف على متن سفينة أو منصة بحرية

4 نماذج الانتشار في الجو الصافي

تقيّم خسارة الإرسال الأساسية، L_b (dB)، التي لا يتم تجاؤها أثناء النسبة المئوية السنوية المطلوبة في الوقت، p ، حسب الوصف الوارد في الفقرات التالية.

1.4 الانتشار في خط البصر (بما في ذلك التأثيرات قصيرة الأجل)

ينبغي تقييم ما يلي في حالتي مسارات خط البصر والمسارات عبر الأفق.

وتكون خسارة الإرسال الناتجة عن الانتشار في الفضاء الحر والتوهين الناجم عن الغازات الجوية:

$$(8) \quad L_{bfs_g} = 92,5 + 20 \log f + 20 \log d + A_g \quad \text{dB}$$

حيث:

A_g : الامتصاص الغازي الكلي (dB):

$$(9) \quad A_g = [\gamma_o + \gamma_w(\rho)] d \quad \text{dB}$$

حيث:

$\gamma_o, \gamma_w(\rho)$: التوهين النوعي بسبب الجو الجاف وبخار الماء، على التوالي، يستخلص من معادلات

في التوصية ITU-R P.676

ρ : كثافة بخار الماء:

$$(9a) \quad \rho = 7,5 + 2,5 \omega \quad \text{g/m}^3$$

ω : الجزء من المسير الكلي فوق الماء.

تصحيح تأثيرات المسارات المتعددة والتبشير في النقطة p والنسبة المئوية β_0 من الوقت:

$$(10a) \quad E_{sp} = 2,6 [1 - \exp(-0,1 \{d_{lr} + d_{lr}\})] \log (p/50) \quad \text{dB}$$

$$(10b) \quad E_{s\beta} = 2,6 [1 - \exp(-0,1 \{d_{lr} + d_{lr}\})] \log (\beta_0/50) \quad \text{dB}$$

خسارة الإرسال الأساسية التي لم يتم تجاوزها أثناء النسبة $p\%$ من الوقت والناجمة عن الانتشار في خط البصر:

$$(11) \quad L_{b0p} = L_{bfs_g} + E_{sp} \quad \text{dB}$$

خسارة الإرسال الأساسية التي لم يتم تجاوزها خلال النسبة $\beta_0\%$ من الوقت والناجمة عن الانتشار في خط البصر:

$$(12) \quad L_{b0\beta} = L_{bfs_g} + E_{s\beta} \quad \text{dB}$$

2.4 الانعراج

يفترض بأن التغير الزمني للخسارة الفائضة العائدة إلى آلية الانعراج هو نتيجة التغييرات في معدل التفاوت لدليل الانكسار الراديوي الجوي الكلي، أي أنه يفترض تزايد عامل نصف قطر الأرض الفعال $k(p)$ كلما تناقصت النسبة المئوية p من الوقت. ويعتبر هذا الإجراء مقبولاً لقيمة $\beta_0 \geq p \geq 50\%$. أما لنسب الوقت التي تقل عن β_0 فإن سويات الإشارات تكون خاضعة لآليات الانتشار الشاذة أكثر منها لمجموع خصائص الانكسار في الجو. وهكذا يفترض أن تكون خسارة الانعراج التي لم يتم تجاوزها أثناء $p > \beta_0\%$ هي نفسها أثناء $p = \beta_0\%$ من الوقت.

وبناء على ذلك، ففي الحالة العامة حيث $p > 50\%$ ، يجب إجراء حساب الانعراج مرتين، أولاً لعامل نصف قطر الأرض الفعال المتوسط k_{50} (المعادلة 5)، وثانياً لعامل نصف قطر الأرض الفعال المقيد k_{β} الذي يساوي 3. ويعطي هذا الحساب الثاني قيمة تقديرية لخسارة الانعراج التي لا يتم تجاوزها خلال $\beta_0\%$ من الوقت، حيث تعطى β_0 بالمعادلة (2).

وتحسب عندئذ خسارة الانعراج، L_{dp} ، التي لا يتم تجاوزها خلال نسبة $p\%$ من الوقت، حيث $0,001 \leq p \leq 50\%$ ، باستخدام إجراء التقييد أو الاستكمال الداخلي الوارد في الفقرة 4.2.4.

ويحسب نموذج الانعراج الكميات التالية المطلوبة في الفقرة 6.4:

L_{dp} : خسارة الانعراج التي لم يتم تجاوزها أثناء $p\%$ من الوقت

L_{bd50} : خسارة الإرسال الأساسية المتوسطة المصاحبة للانعراج

L_{bd} : خسارة الإرسال الأساسية المصاحبة للانعراج الذي لم يتم تجاوزه أثناء $p\%$ من الوقت.

وتُحسب خسارة الانعراج عن طريق الجمع بين طريقة تعتمد على بناء بولينغتون (Bullington) والانعراج في الأرض الكروية. وجزء بولينغتون من هذه الطريقة هو توسيع لبناء بولينغتون الأساسي للسيطرة على الانتقال بين ظروف الفضاء الحر والظروف التي تتخللها العوائق. ويستخدم هذا الجزء من الطريقة مرتين: للمظهر الجانبي الفعلي للمسير، وللمظهر الجانبي الأملس عدم الارتفاعات ذي ارتفاعات الهوائي المعدلة التي يشار إليها بارتفاعات الهوائي الفعالة. وتستخدم أيضاً ارتفاعات الهوائي الفعالة نفسها لحساب خسارة الانعراج في الأرض الكروية. ويتم الحصول على النتيجة النهائية بجمع ثلاث خسائر تحسب على النحو الوارد أعلاه. وفي المسير الأملس تماماً، تكون خسارة الانعراج النهائية هي خرج نموذج الأرض الكروية.

وتسمح هذه الطريقة بتقدير خسارة الانعراج في جميع أنماط المسارات بما فيها المسارات البحرية أو البرية أو الساحلية، وبغض النظر عن التضاريس الأرضية أو عما إذا كان في خط البصر أو عبر الأفق.

كما نشرت هذه الطريقة أيضاً استعمال تقريب الخسارة الناجمة عن انعراج واحد على حد سكين كدالة لمعلمة دون أبعاد، v ، تعطى في العلاقة:

$$(13) \quad J(v) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v-0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right)$$

تجدر الإشارة إلى أن $J(0,78) \approx 0$ ، وهذا يعرّف الحد الأدنى الذي ينبغي استعمال هذا التقريب عنده. وتعطى $J(v)$ القيمة صفر إذا كان $v > 0,78$.

ويوضّح حساب الانعراج الكلي في الفقرات الفرعية على النحو التالي:

تصف الفقرة 1.2.4 جزء بولينغتون من طريقة الانعراج. وهو يُستخدم مرتين لكل حساب انعراج من أجل قيمة فعالة معينة لنصف قطر الأرض. وفي المرة الثانية يتم تعديل ارتفاعات الهوائي وتصفّر جميع ارتفاعات المظهر الجانبي.

وتصف الفقرة 2.2.4 جزء الأرض الكروية من نموذج الانعراج. وهو يُستخدم مع ارتفاعات الهوائي نفسها المستخدمة في المرة الثانية من جزء بولينغتون في الفقرة 1.2.4.

وتصف الفقرة 3.2.4 كيف تستخدم الطريقتان المذكورتان في الفقرتين 1.2.4 و 2.2.4 معاً لإجراء العملية الحسابية الكاملة للانعراج من أجل قيمة فعالة معينة لنصف قطر الأرض. ونظراً للطريقة التي يُستخدم فيها جزءا بولينغتون والأرض الكروية، بات الحساب الكامل يُعرف بنموذج "دلنا بولينغتون".

وتصف الفقرة 4.2.4 الحساب الكامل لخسارة الانعراج التي لا يتم تجاوزها خلال نسبة مئوية معينة $p\%$ من الوقت.

1.2.4 جزء بولينغتون من حساب الانعراج

في المعادلات التالية، تحسب المنحدرات بوحدة m/km نسبة إلى خط الأساس الذي يصل مستوى سطح البحر عند المرسل بمستوى سطح البحر عند المستقبل. وتكون المسافة والارتفاع للنقطة ذات الترتيب i في المظهر الجانبي $km\ d_i$ و $m\ h_i$ فوق مستوى سطح البحر على التوالي، ويتخذ المؤشر i قيمة تتراوح بين 0 و n حيث $n+1$ هو عدد نقاط المظهر الجانبي والطول الكامل للمسير هو $km\ d$. وتسهيلاً للعمل، يشار إلى المطرافين في بداية ونهاية المظهر الجانبي كمرسل ومستقبل بارتفاعين بالأمتار فوق مستوى سطح البحر h_{rs} و h_{is} على التوالي. ويعطي انحناء الأرض الفعال، $(C_e\ km^{-1})$ ، بالكسر $1/a_e$ حيث a_e هو نصف قطر الأرض الفعال بالكيلومترات. ويمثل طول الموجة بالأمتار بالرمز λ .

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

$$(14) \quad S_{tim} = \max \left[\frac{h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{ts}}{d_i} \right] \quad \text{m/km}$$

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

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

$$(15) \quad S_{tr} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} \quad \text{m/km}$$

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.

يتم إيجاد النقطة الوسيطة في المظهر الجانبي ذات أعلى معلمة انعراج v :

$$(16) \quad v_{\max} = \max \left\{ \left[h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d - d_i) + h_{rs} d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\}$$

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

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

$$(17) \quad L_{uc} = J(v_{\max}) \quad \text{dB}$$

حيث تعطى الدالة J بالمعادلة (13) من أجل v_b أكبر من $-0,78$ ، وتكون صفرًا خلاف ذلك.

الحالة 2: المسير عبر الأفق

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

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

$$(18) \quad S_{rim} = \max \left[\frac{h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{rs}}{d - d_i} \right] \quad \text{m/km}$$

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

تُحسب مسافة نقطة بولينغتن من المرسل:

$$(19) \quad d_{bp} = \frac{h_{rs} - h_{ts} + S_{rim} d}{S_{tim} + S_{rim}} \quad \text{km}$$

وتُحسب معلمة الانعراج، v_b ، لنقطة بولينغتن:

$$(20) \quad v_b = \left[h_{ts} + S_{tim} d_{bp} - \frac{h_{ts}(d - d_{bp}) + h_{rs} d_{bp}}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002d}{\lambda d_{bp} (d - d_{bp})}}$$

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

$$(21) \quad L_{uc} = J(v_b) \quad \text{dB}$$

ومن أجل الخسارة L_{uc} المحسوبة باستخدام إحدى المعادلتين (17) أو (21)، تعطى خسارة انعراج بولينغتن في المسير كما يلي:

$$(22) \quad L_{bull} = L_{uc} + [1 - \exp(-L_{uc}/6)](10 + 0,02 d) \quad \text{dB}$$

2.2.4 خسارة الانعراج في الأرض الكروية

تُحسب خسارة الانعراج، L_{dsph} ، في الأرض الكروية التي لا يتم تجاوزها خلال نسبة مئوية معينة $p\%$ من الوقت لارتفاعي الهوائي h_{re} و h_{te} (m)، على النحو التالي.

تُحسب المسافة الهامشية على خط البصر لمسير أملس:

$$(23) \quad d_{los} = \sqrt{2a_p} \cdot \left(\sqrt{0,001h_{te}} + \sqrt{0,001h_{re}} \right) \quad \text{km}$$

في حال $d \geq d_{los}$ ، تُحسب خسارة الانعراج باستخدام الطريقة المذكورة في الفقرة 1.2.2.4 من أجل $a_{dfi} = a_p$ للحصول على L_{dfi} وتساوى الخسارتان L_{dfi} و L_{dsph} . ولا ضرورة لمزيد من حساب الانعراج في الأرض الكروية.

وبخلاف ذلك، يواصل العمل على النحو التالي:

يُحسب أصغر خلوص ارتفاع بين المسير المنحني على الأرض والشعاع بين الهوائيين، h_{se} ، المعطى بما يلي:

$$(24) \quad h_{se} = \frac{\left(h_{te} - 500 \frac{d_{se1}^2}{a_p} \right) d_{se2} + \left(h_{re} - 500 \frac{d_{se2}^2}{a_p} \right) d_{se1}}{d} \quad \text{m}$$

حيث:

$$(25a) \quad d_{se1} = \frac{d}{2} (1 + b) \quad \text{km}$$

$$(25b) \quad d_{se2} = d - d_{se1} \quad \text{km}$$

$$(25c) \quad b = 2\sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right\}$$

حيث تنتج دالة قوس جيب التمام زاوية بالراديان.

$$(25d) \quad c = \frac{h_{te} - h_{re}}{h_{te} + h_{re}}$$

$$(25e) \quad m = \frac{250d^2}{a_p(h_{te} + h_{re})}$$

يُحسب الخلوص المطلوب عند انعدام خسارة الانعراج، h_{req} ، ويعطى بما يلي:

$$(26) \quad h_{req} = 17,456 \sqrt{\frac{d_{se1} \cdot d_{se2} \cdot \lambda}{d}} \quad \text{m}$$

في حال $(h_{se} > h_{req})$ تنعدم خسارة الانعراج في الأرض الكروية L_{dsph} . ولا ضرورة لمزيد من حساب الانعراج في الأرض الكروية.

وبخلاف ذلك، يواصل العمل على النحو التالي:

يُحسب نصف قطر الأرض الفعال المعدل، a_{em} ، مما يعطي خط بصر هامشي على مسافة d تعطى بما يلي:

$$(27) \quad a_{em} = 500 \left(\frac{d}{\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}}} \right)^2 \quad \text{km}$$

تُستخدم الطريقة المذكورة في الفقرة 1.2.2.4 من أجل ($a_{dft} = a_{em}$) للحصول على الخسارة L_{dft} . فإذا كانت الخسارة L_{dft} سالبة، تعدم خسارة الانعراج في الأرض الكروية L_{dsph} . ولا ضرورة لمزيد من حساب الانعراج في الأرض الكروية.

وبخلاف ذلك، يواصل العمل على النحو التالي:

تُحسب خسارة الانعراج في الأرض الكروية بالاستكمال الداخلي:

$$(28) \quad L_{dsph} = [1 - h_{se}/h_{req}]L_{dft} \quad \text{dB}$$

1.2.2.4 جزء الحد الأول من خسارة الانعراج في الأرض الكروية

تقدم هذه الفقرة الفرعية طريقة لحساب الانعراج في الأرض الكروية باستخدام الحد الأول فقط من سلسلة البقايا. وهي تشكل جزءاً من طريقة الانعراج الكلي الموضحة في الفقرة 2.2.4 أعلاه لتعطي الحد الأول من خسارة الانعراج L_{dft} ، من أجل قيمة معينة لنصف قطر الأرض الفعال a_{dft} . وترد قيمة a_{dft} التي يتعين استخدامها في الفقرة 2.2.4.

وتحدد الخصائص الكهربائية للتضاريس النمطية على البر بالسماحية النسبية $\epsilon_r = 22,0$ والإيصالية النوعية $\sigma = 0,003 \text{ S/m}$ وتُحسب الخسارة L_{dft} باستخدام المعادلات (30) حتى (37) وتدعى النتيجة $L_{dftland}$.

وتحدد الخصائص الكهربائية للتضاريس النمطية في البحر بالسماحية النسبية $\epsilon_r = 80,0$ والإيصالية النوعية $\sigma = 5,0 \text{ S/m}$ وتُحسب الخسارة L_{dft} باستخدام المعادلات (30) حتى (37) وتدعى النتيجة L_{dftsea} .

ويعطى الآن الحد الأول لخسارة الانعراج في الأرض الكروية بما يلي:

$$(29) \quad L_{dft} = \omega L_{dftsea} + (1 - \omega)L_{dftland} \quad \text{dB}$$

حيث ω هو شطر المسير فوق البحر.

يبدأ الحساب الذي يتعين القيام به مرتين، على النحو الموضح أعلاه:

العامل المقيس لسماحية السطح في الاستقطاب الأفقي والرأسي:

$$(30a) \quad (أفقي) \quad K_H = 0,036 (a_{dft} f)^{-1/3} [(\epsilon_r - 1)^2 + (18 \sigma / f)^2]^{-1/4}$$

و:

$$(30b) \quad (رأسي) \quad K_V = K_H \left[\epsilon_r^2 + (18 \sigma / f)^2 \right]^{1/2}$$

وإذا كان متجه الاستقطاب يتضمن مركبات أفقية وعمودية، مثلاً دائرية أو مائلة، يفكك إلى مركبتين أفقية وعمودية، وتحسب كل واحدة بشكل منفصل بدءاً من المعادلتين (30a) و(30b) وتجمع النتائج بالجمع المتجهي لاتساع المجال. وعموماً هذا التفكيك غير ضروري من الناحية العملية لأنه فوق 300 MHz يمكن استعمال القيمة 1 للمعلمة β_{dft} في المعادلة (31).

وتُحسب معلمة الاستقطاب الأرضية:

$$(31) \quad \beta_{dft} = \frac{1 + 1,6K^2 + 0,67K^4}{1 + 4,5K^2 + 1,53K^4}$$

حيث K هو K_H أو K_V وفقاً للاستقطاب.

المسافة المقيّسة:

$$(32) \quad X = 21,88 \beta_{dft} \left(\frac{f}{a_{dft}^2} \right)^{1/3} d$$

والارتفاعان المقيّسان للمرسل والمستقبل:

$$(33a) \quad Y_t = 0,9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{te}$$

$$(33b) \quad Y_r = 0,9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{re}$$

ويُحسب حد المسافة كما يلي:

$$(34) \quad F_X = \begin{cases} 11 + 10 \log(X) - 17,6X & \text{for } X \geq 1,6 \\ -20 \log(X) - 5,6488X^{1,425} & \text{for } X < 1,6 \end{cases}$$

وتحدّد دالة الارتفاع المقيّس بما يلي:

$$(35) \quad G(Y_{t/r}) = \begin{cases} 17,6(B_{t/r} - 1,1)^{0,5} - 5 \log(B_{t/r} - 1,1) - 8 & \text{for } B_{t/r} > 2 \\ 20 \log(B_{t/r} + 0,1B_{t/r}^3) & \text{otherwise} \end{cases}$$

حيث:

$$(36a) \quad B_t = \beta_{dft} Y_t$$

$$(36b) \quad B_r = \beta_{dft} Y_r$$

وإذا كانت $G(Y)$ أقل من $2 + 20 \log K$ ، تُحدّد الدالة $G(Y)$ بحيث أن $G(Y) = 2 + 20 \log K$ ويعطى الآن الحد الأول لخسارة الانعراج في الأرض الكروية بما يلي:

$$(37) \quad L_{dft} = -F_X - G(Y_t) - G(Y_r) \quad \text{dB}$$

3.2.4 نموذج "دلّتا بولينغتن" لخسارة الانعراج الكاملة

تُستخدم الطريقة المذكورة في الفقرة 1.2.4 للمظهر الجانبي الفعلي للتضاريس وارتفاعات الهوائي. وتحدّد خسارة انعراج بولينغتن الناتجة في المسير الفعلي بالمساواة $L_{bull} = L_{bulla}$ على النحو المعطى في المعادلة (22).

وتُستخدم الطريقة المذكورة في الفقرة 1.2.4 مرة ثانية مع تصفير جميع ارتفاعات المظهر الجانبي، h_i ، وتعديل ارتفاعات الهوائي، كما يلي:

$$(38a) \quad h'_{ts} = h_{ts} - h_{std} \quad \text{masl}$$

$$(38b) \quad h'_{rs} = h_{rs} - h_{srd} \quad \text{masl}$$

حيث يعطى ارتفاعا الأرض الملساء عند المرسل والمستقبل h_{std} و h_{srd} في الفقرة 3.6.1.5 من المرفق 2. وتحدّد خسارة الانعراج بطريقة بولينغتن لهذا المسير الأملس، $L_{bull} = L_{bulls}$ ، على النحو المعطى بالمعادلة (22).

وتُستخدم الطريقة المذكورة في الفقرة 2.2.4 لحساب خسارة الانعراج في الأرض الكروية، L_{dsph} ، من أجل طول المسير الفعلي d km ومع ما يلي:

$$(39a) \quad h_{te} = h'_{ts} \quad \text{m}$$

$$(39b) \quad h_{re} = h'_{rs} \quad \text{m}$$

وتعطى الآن خسارة الانعراج في مسير عام بما يلي:

$$(40) \quad L_d = L_{bulla} + \max\{L_{dsph} - L_{bulls}, 0\} \quad \text{dB}$$

4.2.4 خسارة الانعراج التي لا يتم تجاوزها خلال النسبة المئوية $p\%$ من الوقت

تُستخدم الطريقة المذكورة في الفقرة 3.2.4 لحساب خسارة الانعراج L_d في متوسط نصف قطر الأرض الفعال، $a_p = a_e$ ، كما يعطى بالمعادلة (6a). ويحدد متوسط خسارة الانعراج بالمساواة $L_d = L_{d50}$.

وفي حال $p = 50\%$ ، تعطى خسارة الانعراج التي لا يتم تجاوزها خلال نسبة مئوية معينة $p\%$ L_{dp} من الوقت بالخسارة L_{d50} ، ويكمل ذلك حساب الانعراج.

وفي حال ($p < 50\%$)، يُواصل العمل على النحو التالي.

تُستخدم الطريقة المذكورة في الفقرة 3.2.4 لحساب خسارة الانعراج، L_d ، من أجل نصف قطر الأرض الفعال ($a_p = a_\beta$)، كما تعطى بالمعادلة (6b). وتحدد خسارة الانعراج خلال نسبة مئوية معينة $\beta_0\%$ من الوقت بالمساواة $L_d = L_{d\beta}$.

ويتحكم في تطبيق القيمتين المحتملتين لعامل نصف قطر الأرض الفعال عامل استكمال داخلي F_i يستند إلى توزيع عادي لخسارة الانعراج على مدى ($\beta_0\% \leq p < 50\%$)، ويتم الحصول عليه بالمعادلات:

$$(41a) \quad F_i = \frac{I\left(\frac{p}{100}\right)}{I\left(\frac{\beta_0}{100}\right)} \quad \text{for } 50\% > p > \beta_0\%$$

$$(41b) \quad = 1 \quad \text{for } \beta_0\% \geq p$$

حيث $I(x)$ هو مقلوب التوزيع العادي التراكمي التكميلي بدلالة الاحتمال x . ويرد في المرفق 3 للملحق 1 تقريب لدالة $I(x)$ يمكن استعماله بهامش ثقة عندما تكون ($x < 0.5$).

أما خسارة الانعراج، L_{dp} ، التي لا يتم تجاوزها أثناء النسبة المئوية $p\%$ من الوقت، فهي تُعطى هنا بالمعادلة:

$$(42) \quad L_{dp} = L_{d50} + F_i (L_{d\beta} - L_{d50}) \quad \text{dB}$$

حيث يعرف L_{d50} و $L_{d\beta}$ أعلاه ويُحدد العامل F_i بالمعادلتين (41a) و (41b) تبعاً لقيم p و β_0 .

ويتم الحصول على متوسط خسارة الإرسال الأساسية المصاحبة للانعراج، L_{bd50} ، بالمعادلة:

$$(43) \quad L_{bd50} = L_{bfsq} + L_{d50} \quad \text{dB}$$

حيث يتم الحصول على L_{bfsq} بالمعادلة (8).

ويتم الحصول على خسارة الإرسال الأساسية المصاحبة للانعراج والتي لا يتم تجاوزها أثناء النسبة المئوية $p\%$ من الوقت بالمعادلة:

$$(44) \quad L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{dB}$$

حيث يتم الحصول على L_{b0p} بالمعادلة (11).

3.4 الانتشار التروبوسفيري (الملاحظتان 1 و 2)

الملاحظة 1 - من الصعب، عند نسب مئوية أدنى بكثير من 50%، فصل أسلوب الانتشار التروبوسفيري الحقيقي عن ظواهر الانتشار الثانوية الأخرى التي تنتج تأثيرات انتشار مماثلة. وبذلك يعتبر نموذج "الانتشار التروبوسفيري" الذي اعتمده هذه التوصية تعميماً تجريبياً لمفهوم الانتشار التروبوسفيري الذي يشمل أيضاً تأثيرات الانتشار الثانوية. ويسمح ذلك بإجراء تنبؤ مستمر متنسق بخسارة الإرسال الأساسية في أثناء نسب مئوية من الوقت p تتراوح بين 0,001% و 50%، وتؤدي بذلك إلى وصل نموذج الانتشار الموجه والانعكاس على الطبقات عند نسب مئوية صغيرة من الوقت مع "أسلوب الانتشار" الحقيقي المناسب للمجال المتبقي الضعيف الذي يتم تجاوزه في أثناء نسب مئوية أكبر من الوقت.

الملاحظة 2 - لقد تم اشتقاق هذا النموذج للتنبؤ بالانتشار التروبوسفيري من أجل الأهداف الخاصة بالتنبؤ بالتداخل ولا يعتبر مناسباً لحساب شروط الانتشار في أثناء أكثر من 50% من الوقت والتي تؤثر في الجوانب الخاصة بالأداء في أنظمة المرحلات الراديوية عبر الأفق.

تعطي الصيغة التالية خسارة الإرسال الأساسية العائدة إلى الانتشار التروبوسفيري L_{bs} معبراً عنها بوحدة (dB) التي لا يتم تجاؤها أثناء أية نسبة مئوية من الوقت p أدنى من 50%:

$$(45) \quad L_{bs} = 190 + L_f + 20 \log d + 0,573 \theta - 0,15 N_0 + L_c + A_g - 10,1 [-\log (p/50)]^{0,7} \text{ dB}$$

حيث:

L_f : الخسارة بدلالة التردد:

$$(45a) \quad L_f = 25 \log f - 2,5 [\log (f/2)]^2 \text{ dB}$$

L_c : الخسارة بالاقتران بين الفتحة والوسط الحامل (dB):

$$(45b) \quad L_c = 0,051 \cdot e^{0,055(G_t + G_r)} \text{ dB}$$

N_0 : الانكسارية النوعية للسطح على مستوى البحر عند منتصف المسير، تشتق من الشكل 6

A_g : الامتصاص الغازي ويشتق من المعادلة (9) مع $\rho = 3 \text{ g/m}^3$ على طول المسير بكامله.

4.4 الانتشار الموجه/الانعكاس على الطبقات

يستند التنبؤ بخسارة الإرسال الأساسية L_{ba} (dB) التي تحدث في أثناء فترات الانتشار الشاذ (الانتشار الموجه والانعكاس على الطبقات)، إلى الدالة التالية:

$$(46) \quad L_{ba} = A_f + A_d(p) + A_g \text{ dB}$$

حيث:

A_f : مجموع خسائر الاقتران الثابتة (باستثناء الخسائر الناجمة عن العوائق المحلية) بين الهوائيات وبنية الانتشار الشاذ داخل الجو.

$$(47) \quad A_f = 102,45 + 20 \log f + 20 \log (d_{lt} + d_{lr}) + A_{lf} + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \text{ dB}$$

A_{lf} : تصحيح تجريبي لمراعاة زيادة التوهين مع زيادة الطول الموجي في الانتشار عبر مسيرات في طبقات الجو.

$$(47a) \quad A_{lf}(f) = 45,375 - 137,0 \cdot f + 92,5 \cdot f^2 \text{ dB} \quad \text{if } f < 0,5 \text{ GHz}$$

خلافاً لذلك $A_{lf}(f) = 0,0 \text{ dB}$

A_{sr}, A_{st} : خسارتا الانعراج العائد إلى تأثير حجب التضاريس الأرضية للمحطة المسببة للتداخل والمحطة المعرضة للتداخل، على التوالي:

$$(48) \quad A_{st, sr} = \begin{cases} 20 \log \left[1 + 0,361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{t,lr})^{1/2} \right] + 0,264 \theta''_{t,r} f^{1/3} & \text{dB for } \theta''_{t,r} > 0 \quad \text{mrad} \\ 0 & \text{dB for } \theta''_{t,r} \leq 0 \quad \text{mrad} \end{cases}$$

حيث:

$$(48a) \quad \theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0,1 d_{t,lr} \quad \text{mrad}$$

A_{ct}, A_{cr} : قيمتا تصحيح الاقتران بالانتشار الموجه على السطح فوق البحر من أجل المحطة المسببة للتداخل والمحطة المعرضة للتداخل، على التوالي:

$$(49) \quad A_{ct, cr} = -3 e^{-0,25d_{ct, cr}^2} \left[1 + \tanh (0,07 (50 - h_{ts, rs})) \right] \quad \text{dB for } \omega \geq 0,75$$

$$(49) \quad \begin{aligned} d_{ct, cr} &\leq d_{t,lr} \\ d_{ct, cr} &\leq 5 \text{ km} \end{aligned}$$

$$(49a) \quad A_{ct, cr} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{لجميع الشروط الأخرى}$$

وتجدر الإشارة هنا إلى المجموعة المحدودة من الشروط التي تكون فيها المعادلة (49) ضرورية.

$A_d(p)$: الخسائر بدلالة النسبة المتقوية من الوقت والمسافة الزاوية داخل آلية الانتشار الشاذ:

$$(50) \quad A_d(p) = \gamma_d \cdot \theta' + A(p) \quad \text{dB}$$

حيث:

γ_d : التوهين النوعي:

$$(51) \quad \gamma_d = 5 \times 10^{-5} a_e f^{1/3} \quad \text{dB/mrad}$$

θ' : المسافة الزاوية (مصححة وفقاً للحاجة (من خلال المعادلة (52a)) من أجل إتاحة تطبيق نموذج تأثير حجب التضاريس الأرضية في المعادلة (48)):

$$(52) \quad \theta' = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta'_t + \theta'_r \quad \text{mrad}$$

$$(52a) \quad \theta'_{t,r} = \begin{cases} \theta_{t,r} & \text{for } \theta_{t,r} \leq 0,1 d_{t,lr} \quad \text{mrad} \\ 0,1 d_{t,lr} & \text{for } \theta_{t,r} > 0,1 d_{t,lr} \quad \text{mrad} \end{cases}$$

$A(p)$: تغير النسبة المتقوية من الوقت (التوزيع التراكمي):

$$(53) \quad A(p) = -12 + (1,2 + 3,7 \times 10^{-3} d) \log \left(\frac{p}{\beta} \right) + 12 \left(\frac{p}{\beta} \right)^\Gamma \quad \text{dB}$$

$$(53a) \quad \Gamma = \frac{1,076}{(2,0058 - \log \beta)^{1,012}} \times e^{-\left(9,51 - 4,8 \log \beta + 0,198 (\log \beta)^2 \right)} \times 10^{-6} \cdot d^{1,13}$$

$$(54) \quad \beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \quad \%$$

μ_2 : التصحيح بالنسبة إلى هندسة المسير:

$$(55) \quad \mu_2 = \left[\frac{500}{a_e} \frac{d^2}{(\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}})^2} \right]^\alpha$$

ويجب ألا تتجاوز قيمة μ_2 مقدار 1:

$$(55a) \quad \alpha = -0,6 - \varepsilon \cdot 10^{-9} \cdot d^{3,1} \cdot \tau$$

حيث:

$$3,5 = \varepsilon$$

τ : معرفة في المعادلة (3a)

ويجب ألا تقل قيمة a عن 3,4

μ_3 : تصحيح التعرج في التضاريس الأرضية:

$$(56) \quad \mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{for } h_m \leq 10 \text{ m} \\ \exp \left[-4,6 \times 10^{-5} (h_m - 10) (43 + 6 d_i) \right] & \text{for } h_m > 10 \text{ m} \end{cases}$$

$$(56a) \quad d_i = \min (d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{km}$$

A_g : الامتصاص الغازي الكلي الذي تحدده المعادلتان (9) و(9a).

ويرد تعريف المصطلحات الأخرى في الجدولين 1 و2 وفي المرفق 2.

5.4 الخسائر الإضافية بسبب مجموعات من العوائق

1.5.4 اعتبارات عامة

ثمّة فائدة كبيرة بالنسبة إلى الحماية من التداخل يمكن أن تستخلص من خسائر الانعراج الإضافية التي تحدث عند الهوائيات الواقعة داخل مجموعات من العوائق المحلية على الأرض (مبانٍ، نبات، إلخ). ويسمح هذا الإجراء بإضافة هذه الخسائر التي تسببها مجموعات العوائق عند كل طرف من طرفي المسير أو عند الطرفين في الحالات التي تكون فيها بنية مجموعة العوائق معروفة. ويتنبأ بخسارة إضافية كحد أقصى في كلا طرفي المسار تستخدم عبر دالة استكمال داخلي على شكل S ترمي إلى تجنب تقدير زائد عن الحد للخسارة الناجمة عن حجب التضاريس. وتبلغ الخسارة الإضافية القصوى 20 dB فوق 0,9 GHz وتقل تدريجياً عند الترددات الأدنى لتصل إلى 5 dB عند 0,1 GHz. أما في حالات الشك بالنسبة إلى بيئة هذه العوائق فلا تدرج هذه الخسارة الإضافية. وعند استخدام التصحيح، ينبغي توخي الحذر لعدم توقع خسارة كبيرة من جراء العوائق في منطقة حضرية بارزة الارتفاعات تتألف من مبانٍ عالية منعزلة يفصل بينها فضاء مفتوح. وتلاحظ عادةً خسارة أقل من جراء العوائق في هذه المناطق مقارنة بمراكز المدن الأكثر تقليدية والتي تتألف من مبانٍ أقل ارتفاعاً وإن كانت أكثر عدداً وملتصقة ببعضها.

تسمى الخسارة بسبب مجموعة من العوائق A_{ht} (dB) و A_{hr} (dB) من أجل الحطة المسببة للتداخل والحطة المعرضة للتداخل، على التوالي. وتتعلق الحماية الإضافية المتيسرة بالارتفاع وتحدد نماذجها بالتالي بواسطة دالة كسب الارتفاع المقيسة بالنسبة إلى الارتفاع الاسمي لمجموعة العوائق. وتتوفر ارتفاعات اسمية مناسبة من أجل سلسلة من أنماط العوائق.

ويطبق التصحيح على كل التنبؤات في الجو الصافي المذكورة في هذه التوصية، أي في كل أساليب الانتشار وكل النسب المثوية من الوقت.

2.5.4 فئات مجموعات العوائق

يشير الجدول 4 إلى فئات مجموعات العوائق (أو التغطية الأرضية) مثلما ورد تعريفها في التوصية ITU-R P.1058 التي يمكن أن يطبق عليها تصحيح كسب الارتفاع. وتعتبر قيم الارتفاع الاسمي لمجموعة العوائق h_a (m) والمسافة بالنسبة إلى الهوائي d_k (km) بأنها القيم "المتوسطة" الأكثر تمثيلاً لنمط مجموعة العوائق. غير أن نموذج التصحيح يتبنى أدنى التقديرات نظراً إلى الارتباطات المتعلقة بالارتفاع الفعلي المناسب لكل حالة. أما إذا كانت معلمات مجموعة العوائق معروفة بدقة أكبر فيمكن استخدامها مباشرة بدلاً من القيم المحددة في الجدول 4.

والارتفاعات والمسافات الاسمية الواردة في الجدول 4 قريبة من الارتفاع النموذجي H_c وعرض الفجوة النموذجي G_c المعرفين في التوصية ITU-R P.1058. ولكن النموذج المستخدم هنا لتقدير الخسائر الإضافية الناجمة عن الحجب بسبب العوائق (التغطية الأرضية) متحفظ عمداً.

3.5.4 نموذج كسب الارتفاع

تعطي العبارة التالية الخسارة الإضافية العائدة إلى الحماية من مجموعة العوائق المحلية:

$$(57) \quad A_h = 10,25 F_{fc} \cdot e^{-d_k} \left[1 - \tanh \left[6 \left(\frac{h}{h_a} - 0,625 \right) \right] \right] - 0,33 \quad \text{dB}$$

حيث:

$$(57a) \quad F_{fc} = 0,25 + 0,375 \{1 + \tanh[7,5(f - 0,5)]\}$$

و:

d_k : المسافة (km) بين الموقع الاسمي لمجموعة العوائق والهوائي (انظر الشكل 3)

h : ارتفاع الهوائي (m) فوق مستوى الأرض المحلية

h_a : الارتفاع الاسمي لمجموعة العوائق (m) فوق مستوى الأرض المحلية.

الجدول 4

الارتفاعات والمسافات الاسمية لمجموعات العوائق

المسافة الاسمية، d_k (km)	الارتفاع الاسمي، h_a (m)	فئة مجموعات العوائق (أو تغطية الأرض)
0,1	4	حقول زراعية مرتفعة حدائق تغطية ضعيفة الكثافة غير منتظمة بساتين (منتظمة التباعد) مساكن متفرقة
0,07	5	وسط القرية
0,05	15	أشجار طارحة الأوراق (تباعد غير منتظم) أشجار طارحة الأوراق (تباعد منتظم) غابات مكونة من أشجار مختلطة

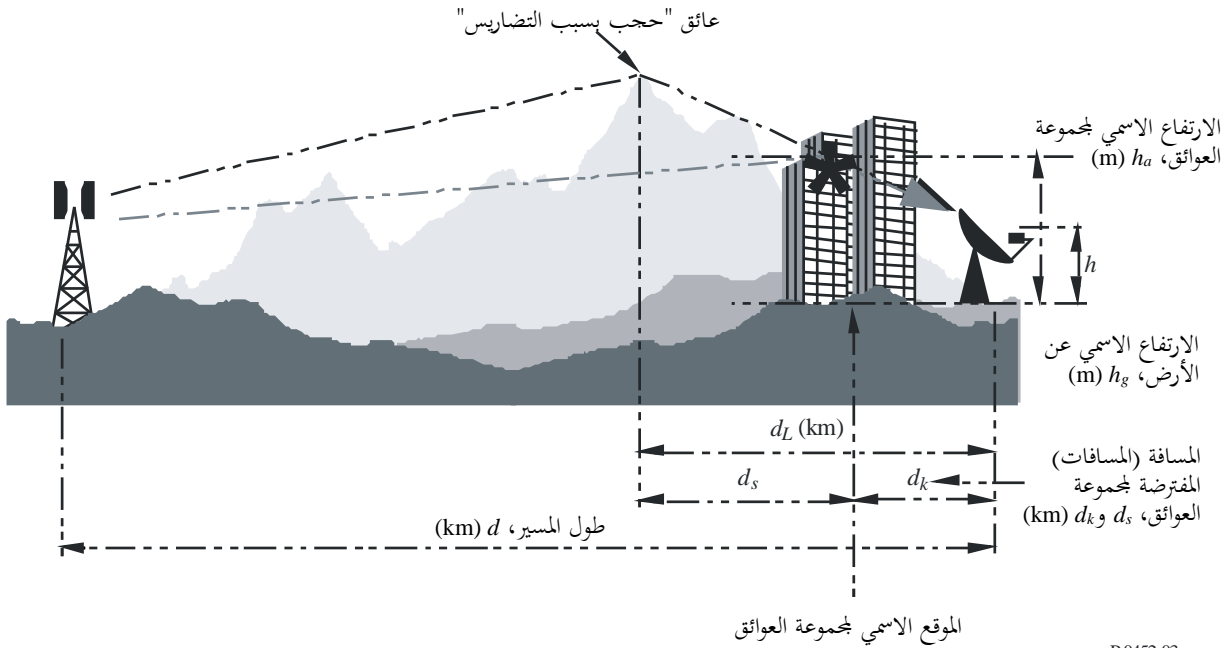
الجدول 4 (تتمة)

المسافة الاسمية، d_k (km)	الارتفاع الاسمي، h_a (m)	فئة مجموعات العوائق (أو تغطية الأرض)
0,05	20	أشجار صنوبرية (غير منتظمة التباعد) أشجار صنوبرية (منتظمة التباعد)
0,03	20	غابة استوائية
0,025	9	منطقة شبه حضرية
0,02	12	منطقة شبه حضرية كثيفة
0,02	20	منطقة حضرية
0,02	25	منطقة حضرية كثيفة
0,02	35	منطقة حضرية ذات مبانٍ مرتفعة
0,05	20	منطقة صناعية

ينبغي ألا تؤخذ في الاعتبار الخسائر الإضافية الناتجة عن الحجب بواسطة مجموعة من العوائق (أو بواسطة التغطية الأرضية) بالنسبة إلى الفئات التي لا ترد في الجدول 4.

الشكل 3

طريقة تطبيق تصحيح كسب الارتفاع A_{hr} أو A_{ht}



P.0452-03

4.5.4 طريقة التطبيق

إن طريقة تطبيق تصحيح الكسب في الارتفاع A_{hr} أو A_{ht} (dB) هي طريقة مباشرة، وهي مبينة في الشكل 3. والخطوات التي ينبغي إضافتها إلى إجراء التنبؤ الأساسي هي التالية:

الخطوة 1: عندما يكون نمط مجموعة العوائق معروفاً أو عندما تكون الفرضية أكيدة في هذا المجال، يستعمل الإجراء الرئيسي في حساب خسارة الإرسال الأساسية حتى الارتفاع الاسمي h_a ومن أجل نمط مجموعة العوائق المناسب الذي يتم اختياره في الجدول 4. ويجب أن يستعمل طول المسير: $d - d_k$ (km). غير أنه من الممكن تجاهل هذا التصحيح الثانوي عندما يكون: $d \gg d_k$.

الخطوة 2: عندما يوفر عائق "تأثير حجب التضاريس الأرضية" الحماية للمطرف ينبغي أن يدرج ذلك في الحساب الأساسي، لكنه ينبغي للخسارة بسبب الحجب (A_{sr} أو $A_{sr}(dB)$) أن تحسب حتى الارتفاع h_a عند المسافة d_s بدلاً من الارتفاع h عند المسافة d_L الذي قد يتم في الحالات الأخرى.

الخطوة 3: يمكن، بعد اكتمال الإجراء الرئيسي، أن يضاف تصحيح الكسب في الارتفاع وفقاً للمعادلة (57) كما تشير إليه المعادلة (64).

الخطوة 4: يتم الحساب الأساسي في حالة غياب المعلومات حول مجموعة العوائق بواسطة المسافتين d و d_L (وفقاً للحاجة) والارتفاع h .

الملاحظة 1 - ينبغي أن تضاف تصحيحات الكسب في الارتفاع لمجموعة العوائق في طرفي المسير حيثما تدعو الحاجة إلى ذلك.

الملاحظة 2 - في الحالات التي تتطلب تصحيحاً لكسب الارتفاع على مسير بري وتصحيح الاقتران بالمجرى على مسير بحري (A_{cr} أو $A_{ct}(dB)$) (أي أن الهوائي قريب من البحر لكن ثمة مجموعة من العوائق فيما بينهما)، يمكن أن يستعمل التصحيحان معاً لأنهما متكاملان ومتلائمان.

الملاحظة 3 - لا يعتبر هذا النموذج مناسباً إذا لم تكن d أكبر من d_k بشكل ملحوظ.

6.4 التنبؤ الإجمالي

ينبغي تطبيق الإجراء التالي على نتائج الحسابات السابقة لجميع المسارات.

يحسب عامل استكمال داخلي، F_j ، لمعرفة المسافة الزاوية للمسير:

$$(58) \quad F_j = 1.0 - 0.5 \left(1.0 + \tanh \left(3.0 \xi \frac{(S_{tim} - S_{tr})}{\Theta} \right) \right)$$

حيث:

ξ : معلمة قابلة للتعديل تضبط حالياً على القيمة 0,8

$(S_{tim} - S_{tr})$: معلمتا الميل في المعادلتين (14) و (15)

Θ : معلمة قابلة للتعديل تضبط حالياً على القيمة 0,3 mrad.

يحسب عامل استكمال داخلي، F_k ، لأخذ طول مسير الدائرة العظمى في الاعتبار:

$$(59) \quad F_k = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \text{th} \left(3,0 \kappa \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right)$$

حيث:

d : طول مسير الدائرة العظمى (km) (معرف في الجدول 3)

d_{sw} : معلمة ثابتة تحدد مدى المسافات لتقنية جميع آليات الانتشار (blending)، وتحدد قيمتها بـ 20

κ : معلمة ثابتة تحدد منحني تقنية الجمع (blending) عند أطراف المدى، وتحدد قيمتها بـ 0,5.

تحسب أدنى قيمة نظرية لخسارة الإرسال الأساسية L_{minb0p} (dB) تصاحب الانتشار في خط البصر وفي انعراج المسير الفرعي فوق البحر.

$$(60) \quad L_{minb0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1 - \omega)L_{dp} & \text{for } p < \beta_0 \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1 - \omega)L_{dp} - L_{bd50}) \cdot F_i & \text{for } p \geq \beta_0 \end{cases} \quad \text{dB}$$

حيث:

L_{b0p} : خسارة الإرسال الأساسية النظرية في خط البصر التي لم يتم تجاوزها خلال $p\%$ من الوقت، وتعطى في المعادلة (11)

$L_{b0\beta}$: خسارة الإرسال الأساسية النظرية في خط البصر التي لم يتم تجاوزها خلال $\beta\%$ من الوقت، وتعطى في المعادلة (12)

L_{dp} : خسارة الانعراج التي لم يتم تجاوزها خلال $p\%$ من الوقت وتحسب باستخدام الطريقة الواردة في الفقرة 2.4.

تحسب القيمة الدنيا النظرية لخسارة الإرسال الأساسية، L_{minbap} (dB)، المصاحبة لتعزيز الإشارة في خط البصر وعبر الأفق:

$$(61) \quad L_{minbap} = \eta \ln \left(\exp \left(\frac{L_{ba}}{\eta} \right) + \exp \left(\frac{L_{b0p}}{\eta} \right) \right) \quad \text{dB}$$

حيث:

L_{ba} : خسارة الإرسال الأساسية الناجمة عن الانتشار الموجه/الانعكاس على الطبقات، التي لم يتم تجاوزها خلال $p\%$ من الوقت، وتعطى في المعادلة (46)

L_{b0p} : خسارة الإرسال الأساسية النظرية في خط البصر التي لم يتم تجاوزها خلال $p\%$ من الوقت، وتعطى في المعادلة (11)

$$\eta = 2,5$$

تحسب خسارة الإرسال الأساسية النظرية، L_{bda} (dB)، المصاحبة للانعراج وتعزيز الإشارة في خط البصر أو في الانتشار التروبوسفيري الموجه/الانعكاس على الطبقات:

$$(62) \quad L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{for } L_{minbap} > L_{bd} \\ L_{minbap} + (L_{bd} - L_{minbap}) F_k & \text{for } L_{minbap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{dB}$$

حيث:

L_{bd} : خسارة الإرسال الأساسية في الانعراج التي لم يتم تجاوزها خلال $p\%$ من الوقت، وتعطى في المعادلة (44)

F_k : عامل استكمال داخلي ينتج عن المعادلة (59) تبعاً لقيم p و β_0 .

تحسب خسارة الإرسال الأساسية المعدلة، L_{bam} (dB)، التي تراعي الانعراج وتعزيز الإشارة في خط البصر أو في الانتشار التروبوسفيري الموجه/الانعكاس على الطبقات:

$$(63) \quad L_{bam} = L_{bda} + (L_{mint0p} - L_{bda}) F_j \quad \text{dB}$$

تحسب خسارة الإرسال الأساسية النهائية التي لم يتم تجاوزها أثناء $p\%$ من الوقت، L_b (dB)، كما في المعادلة التالية:

$$(64) \quad L_b = -5 \log \left(10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{bam}} \right) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB}$$

حيث:

$A_{ht,hr}$: هما الخسارتان الإضافيتان الناجمتان عن حجم التضاريس في المرسل والمستقبل. وينبغي إعطاؤهما قيمة الصفر في حال لم يوجد حجب من هذا القبيل.

7.4 حساب خسارة الإرسال

تمكن الطريقة التي يرد وصفها في الفقرات من 1.4 إلى 6.4 من حساب خسارة الإرسال الأساسية بين المحطتين. ولحساب سوية الإشارة عند محطة واحدة من جراء حدوث تداخل تسببه المحطة الأخرى لا بد من معرفة خسارة الإرسال، التي تأخذ في الاعتبار كسب الهوائي في المحطتين في اتجاه المسير الراديوي (أي التداخل) بينهما.

ويقدم الإجراء التالي طريقة لحساب خسارة الإرسال بين محطتين للأرض. ويقدم هذا الإجراء أيضاً، بوصفه مرحلة وسيطة في هذه الطريقة، صيغاً لحساب طول المسير على طول الدائرة العظمى ولحساب المسافة الزاوية للمسير بالاستناد إلى الإحداثيات الجغرافية للمحطتين بدلاً من اشتقاق هذه الكميات انطلاقاً من المظهر الجانبي للمسير، وفقاً للفرضية التي ترد في الجدول 3.

وتحسب الزاوية التي تقع قبالة المسير عند مركز الأرض، δ ، انطلاقاً من الإحداثيات الجغرافية للمحطتين بواسطة الصيغة التالية:

$$(65) \quad \delta = \arccos(\sin(\varphi_t) \sin(\varphi_r) + \cos(\varphi_t) \cos(\varphi_r) \cos(\psi_t - \psi_r)) \quad \text{rad}$$

وتكون مسافة الدائرة العظمى، d ، بين المحطتين:

$$(66) \quad d = 6371 \cdot \delta \quad \text{km}$$

وتحسب زاوية السميت (اتجاه السميت بحسب الشمال الجغرافي في اتجاه عقارب الساعة) من المحطة t إلى المحطة r كما يلي:

$$(67) \quad \alpha_{tr} = \arccos(\{\sin(\varphi_r) - \sin(\varphi_t) \cos(\delta)\} / \sin(\delta) \cos(\varphi_t)) \quad \text{rad}$$

وبعد تطبيق المعادلة (67)، إذا كانت $\psi_t - \psi_r > 0$ عندئذ:

$$(68) \quad \alpha_{tr} = 2\pi - \alpha_{tr} \quad \text{rad}$$

وتحسب زاوية السميت من المحطة r إلى المحطة t بصفة تناظرية انطلاقاً من المعادلتين (67) و(68).

ويفترض بعد ذلك أن اتجاه الحزمة الرئيسية (اتجاه التسديد) للمحطة t ، يعطى بواسطة زاويتي الارتفاع وتسديد البصر $(\alpha_t, \varepsilon_t)$ ، وأن اتجاه الحزمة الرئيسية للمحطة r يُشار إليه بواسطة الزاويتين $(\alpha_r, \varepsilon_r)$. ومن الضروري، للحصول على زاويتي ارتفاع المسير الراديوي (في هذه الحالة، مسير التداخل) عند المحطتين t و r ، المشار إليهما بواسطة ε_{pt} و ε_{pr} ، على التوالي، التمييز بين مسيرات خط البصر والمسيرات عبر الأفق. فبالنسبة إلى مسيرات خط البصر مثلاً تكون:

$$(69a) \quad \varepsilon_{pt} = \frac{h_r - h_t}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{rad}$$

و:

$$(69b) \quad \varepsilon_{pr} = \frac{h_t - h_r}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{rad}$$

حيث h_t و h_r هما ارتفاعا المحطتين فوق السوية المتوسطة لسطح البحر km، أما بالنسبة إلى المسيرات عبر الأفقية فتكون زاويتي الارتفاع هما زاويتي الأفق، أي:

$$(70a) \quad \varepsilon_{pt} = \frac{\theta_t}{1000} \quad \text{rad}$$

و:

$$(70b) \quad \varepsilon_{pr} = \frac{\theta_r}{1000} \quad \text{rad}$$

وتجدر الإشارة إلى أن زاويتي الأفق الراديوي θ_t و θ_r (mrad) تظهران للمرة الأولى في الجدول 3 ويرد تعريفهما على التوالي في الفقرتين 1.1.5 و 3.1.5 من المرفق 2 للملحق 1.

ولحساب زاويتي الابتعاد عن خط التسديد فيما يتعلق بالمحطتين t و r المشار إليهما بواسطة χ_t و χ_r على التوالي في اتجاه مسير التداخل عند المحطتين t و r ، يوصى باستعمال المعادلتين:

$$(71a) \quad \chi_t = \arccos(\cos(\epsilon_r) \cos(\epsilon_{pt}) \cos(\alpha_{tr} - \alpha_t) + \sin(\epsilon_r) \sin(\epsilon_{pt}))$$

و:

$$(71b) \quad \chi_r = \arccos(\cos(\epsilon_r) \cos(\epsilon_{pr}) \cos(\alpha_{rt} - \alpha_r) + \sin(\epsilon_r) \sin(\epsilon_{pr}))$$

وباستعمال زاويتي الابتعاد عن خط التسديد يحسب كسب هوائي المحطتين t و r ، أي G_t و G_r (dB) على التوالي. وإذا كانت المخططات الحقيقية لإشعاع الهوائي غير متيسرة يمكن الحصول على التغير في الكسب بحسب الزاوية بالنسبة إلى محور التسديد انطلاقاً من المعلومات في التوصية ITU-R S.465.

وللحصول على خسارة الإرسال L تستعمل المعادلة:

$$(72) \quad L = L_b(p) - G_t - G_r \quad \text{dB}$$

وستكون زاويتا الارتفاع، فيما يتعلق بسيناريوهات التداخل في الجو الصافي حيث يهيمن الانتشار التروبوسفيري على الانتشار الراديوي، أعلى قليلاً من زاويتي الأفق الراديوي، θ_r و θ_t . ولا ينبغي لهاتين الأخيرتين أن تؤديا إلى خطأ كبير إلا إذا تطابقتا أيضاً مع اتجاه التسديد لمخطة كل منهما.

5 التنبؤ بالتداخل الذي يسببه الانتشار بالماء الجوي

خلافًا لما تقدم من طرق التنبؤ بالتداخل في الجو الصافي، تستعمل طريقة التنبؤ بالتداخل الناجم عن الانتشار بالماء الجوي (التي يرد وصفها فيما يلي) عبارات تتعلق بخسارة الإرسال بين محطتين مباشرة نظراً لأنها تفترض معرفة مخطط إشعاع كل من المحطة المسببة للتداخل والمحطة المعرضة للتداخل.

وهذه الطريقة عامة جداً من حيث إمكان استعمالها في أي مخطط إشعاع هوائي يوفر طريقة لتحديد كسب الهوائي عند أية زاوية انحراف عن محور التسديد. ويمكن، على سبيل المثال، استعمال كافة مخططات الإشعاع كذلك التي ترد في التوصيات ITU-R P.620 و ITU-R F.699 و ITU-R F.1245 و ITU-R S.465 و ITU-R S.580، مثلما هو الحال بالنسبة إلى مخططات أكثر تعقيداً تستند إلى دوال بيسل (Bessel) أو مخططات حقيقية مقيسة، في حال تيسرها. ويمكن استعمال هذه الطريقة أيضاً في هوائيات شاملة الاتجاهات أو هوائيات قطاعية، مثل الهوائيات التي ترد خصائصها في التوصية ITU-R F.1336 والتي يتحدد كسبها عادةً انطلاقاً من زاوية الانحراف عن محور التسديد الأفقي (أي الارتفاع بالنسبة إلى زاوية الكسب الأقصى).

وهذه الطريقة عامة أيضاً من حيث إنها لا تقتصر على أي هندسة خاصة شرط تيسر مخططات إشعاع هوائي تساوي تغطيتها $\pm 180^\circ$. وبالتالي فهي تشمل كلاً من تغطية اقتران الحزمة الرئيسية بالحزمة الرئيسية و اقتران الفص الجانبي بالحزمة الرئيسية، وكلاً من هندسة الانتشار على الدائرة العظمى وهندسة الانتشار الجانبي. ويمكن بهذه الطريقة حساب سويات التداخل بالنسبة إلى المسيرات الطويلة (> 100 km) والمسيرات القصيرة (حتى بضعة كيلومترات) على حد سواء، ويتم اختيار زوايا الارتفاع والسمت المقيسة عند سوية هذه المخطة أو تلك بصفة عشوائية. وبالتالي، فإن هذه الطريقة مناسبة لفئة عريضة من السيناريوهات والخدمات لا سيما فيما يتعلق بتحديد التداخل الناتج عن الانتشار بالمطر بين محطتين للأرض، وبين محطة للأرض ومحطة أرضية وبين محطتين أرضيتين تعملان في نطاقات ترددات موزعة في اتجاهي الإرسال.

1.5 المقدمة

تستند الطريقة إلى تطبيق معادلة رادار بمحطتين يُعبر فيهما عن القدرة P_r المقیسة عند محطة الاستقبال والناجئة عن الانتشار بالمطر بدالة القدرة P_t التي تشعها محطة الإرسال:

$$(73) \quad P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \iiint_{all\ space} \frac{G_t G_r \eta A}{r_t^2 r_r^2} dV \quad W$$

حيث:

- λ : طول الموجة
- G_t : كسب (خطي) لهوائي الإرسال
- G_r : كسب (خطي) لهوائي الاستقبال
- η : الجزء الفعال للانتشار لكل وحدة حجم، δV (m^3/m^3)
- A : توهين على طول المسير بين المرسل والمستقبل (خطياً)
- r_t : المسافة بين المرسل وعنصر حجم الانتشار
- r_r : المسافة بين عنصر حجم الانتشار والمستقبل.

وتصبح معادلة الرادار بمحطتين عندما يُعبر عنها في شكل خسارة إرسال (dB) بالنسبة إلى الانتشار بين محطتين (محطة 1 ومحطة 2) كما يلي:

$$(74) \quad L = 178 - 10 \log N - 20 \log f - 10 \log Z_R - 10 \log C - 10 \log S + A_g - M \quad dB$$

حيث:

N : حد انتشار رايلي المتوقع على دليل الانكسار

$$(74a) \quad N = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

m : دليل انتشار مركب يعتمد على التردد والظروف الجوية

f : التردد (GHz)

Z_R : انعكاسية الرادار عند مستوى الأرض، ويمكن التعبير عنها في شكل معدل هطول المطر R (mm/h):

$$(75) \quad Z_R = 400R^{1.4}$$

$10 \log S$: تصحيح (dB) كي يُؤخذ في الاعتبار الانحراف بالنسبة إلى انتشار رايلي عند الترددات الواقعة فوق 10 GHz:

$$(76) \quad 10 \log S = \begin{cases} R^{0.4} \cdot 10^{-3} \left[4(f-10)^{1.6} \left(\frac{1+\cos \phi_S}{2} \right) + 5(f-10)^{1.7} \left(\frac{1-\cos \phi_S}{2} \right) \right] & \text{for } f > 10 \text{ GHz} \\ 0 & \text{for } f \leq 10 \text{ GHz} \end{cases}$$

حيث:

ϕ_S : زاوية الانتشار

A_g : توهين ناتج عن الغازات الجوية على طول المسير بين المرسل والمستقبل (dB)، ويُحسب من التوصية ITU-R P.676 (الملحق 2)

M : عدم مواءمة الاستقطاب بين نظامي الإرسال والاستقبال (dB).

ويقتصر الانتثار في هذا النموذج على الانتثار داخل خلية مطر تعرف بأنها ذات جزء فعال دائري يتوقف قطره على معدل هطول المطر:

$$(77) \quad d_c = 3,3R^{-0,08} \quad \text{km}$$

ويُفترض أن يكون معدل هطول المطر، ومن ثم انعكاسية الرادار، في خلية المطر، ثابتين إلى حد ارتفاع المطر h_R . ويُفترض، فوق ارتفاع المطر، أن تتضاءل الانعكاسية خطياً تبعاً للارتفاع بمعدل يصل إلى -6,5 dB/km.

وبالتالي، فإن دالة نقل الانتثار C هي حاصل قسمة تكامل الحجم على خلية المطر، ويمكن كتابتها في شكل إحداثيات أسطوانية كما يلي:

$$(78) \quad C = \int_0^{h_{max}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_1^2 r_2^2} A \zeta \cdot r \, dr d\phi dh$$

حيث:

G_2, G_1 : الكسب الخطي للمحطة 1 والمحطة 2 على التوالي

r_2, r_1 : المسافتان (km) بين عنصر التكامل δV والمحطة 1 والمحطة 2 على التوالي

A : توهين ناتج عن المطر، داخل خلية المطر وخارجها، ويُعبر عنه خطياً

ζ : انعكاسية الرادار تبعاً للارتفاع:

$$(79) \quad \zeta = \begin{cases} 1 & \text{for } h \leq h_R \\ 10^{-0,65(h-h_R)} & \text{for } h > h_R \end{cases}$$

h_R : ارتفاع المطر (km)

h, ϕ, r : متغيرات التكامل في خلية المطر.

ويجري حساب التكامل بصورة رقمية في شكل إحداثيات أسطوانية. غير أنه من الملائم في البداية مراعاة هندسة الانتثار انطلاقاً من محطة الإرسال حتى محطة الاستقبال مروراً بخلية مطر، اعتماداً على إحداثيات ديكارتية، باتخاذ المحطة 1 كنقطة أصل نظراً إلى أن الموقع الفعلي لخلية المطر لن يعرف مباشرة، لا سيما في حالة الانتثار الجانبي.

ومن المستحسن أولاً، في إطار إحداثيات ديكارتية، وسعياً للتبسيط، تحويل مختلف المعلمات الهندسية من القيم التي تراعي انحناء الأرض إلى قيم تمثيل أرضي مستو.

ويستدل على اقتران الحزمة الرئيسية بالحزمة الرئيسية بين الهوائيين من الهندسة، ومن ثم يُحدد موقع خلية المطر عند نقطة التقاطع بين محوري الحزمتين الرئيسيتين. وإذا لم يكن هنالك من اقتران بين هاتين الحزمتين يُحدد عندئذ موقع خلية المطر على طول محور الحزمة الرئيسية للمحطة 1، متمركزاً في نقطة الاقتراب الأعظمي من محور الحزمة الرئيسية للمحطة 2. ويجب في هذه الحالة تحديد خسائر الإرسال بالنسبة إلى حالة ثانية بتبديل معلمات كل محطة، ويفترض في خسائر الحالة الأسوأ أن تكون ممثلة لسويات التداخل المحتملة.

2.5 معلمات الدخل

يحتوي الجدول 5 على قائمة بكل معلمات الدخل اللازمة لتنفيذ الطريقة التي تسمح بحساب التوزيع التراكمي لخسارة الإرسال بين محطتين الناجم عن الانتشار بالمطر.

الجدول 5

قائمة معلمات الدخل

(تشير اللاحقة 1 إلى معلمات المحطة 1 واللاحقة 2 إلى معلمات المحطة 2)

المعلمة	الوحدات	الوصف
d	km	المسافة بين المحطتين
f	GHz	التردد
h_{1_loc}, h_{2_loc}	km	ارتفاع المحطة 1 وارتفاع المحطة 2 فوق السوية المتوسطة لسطح البحر (قيم محلية)
G_{max-1}, G_{max-2}	dB	أقصى كسب لكل هوائي
$h_R(p_h)$	km	التوزيع التراكمي لارتفاع المطر الذي تم تجاوزه ويُعبر عنه في شكل نسبة مئوية من الوقت p_h . (راجع الملاحظة 1)
M	dB	عدم موافقة الاستقطاب بين الأنظمة
P	hPa	الضغط عند السطح (القيمة المفترضة 1013,25 hPa)
$R(p_R)$	mm/h	التوزيع التراكمي لنسبة هطول المطر التي تم تجاوزها ويعبر عنها في شكل نسبة مئوية من الوقت p_R .
T	°C	درجة الحرارة عند السطح (القيمة المفترضة 15°C)
$\alpha_{1_loc}, \alpha_{2_loc}$	rad	التقويم الزاوي المحلي للمحطة 1 بالنسبة إلى المحطة 2 والارتفاع المحلي للمحطة 2 بالنسبة إلى المحطة 1، في اتجاه عقارب الساعة
$\epsilon_{H1_loc}, \epsilon_{H2_loc}$	rad	زاويتا موقع الأفق المحلي للمحطة 1 والمحطة 2
ρ	g/m ³	كثافة بخار الماء عند السطح (القيمة المفترضة 8 g/m ³)
τ	بالدرجات	زاوية استقطاب الوصلة (0° بالنسبة إلى الاستقطاب الأفقي، 90° بالنسبة إلى الاستقطاب العمودي)

الملاحظة 1 - إذا لم يتوفر التوزيع يستخدم متوسط ارتفاع المطر h_R بالاقتران مع الجدول 6.

3.5 الإجراء خطوة خطوة

الخطوة 1: تحديد معلمات الأرصاد الجوية

يعتمد حساب التوزيع التراكمي لخسارة الإرسال الناتجة عن الانتشار بالمطر في شكل نسبة مئوية من الوقت الذي يتم خلاله تجاوز هذه الخسائر، على التوزيعات الاحتمالية لمعدل هطول المطر وارتفاع المطر. وإذا كانت القيم المحلية لهذه التوزيعات متيسرة، فيجب استعمالها. وإلا فيمكن الرجوع إلى التوصية ITU-R P.837 للحصول على التوزيعات التراكمية لمعدل هطول المطر بالنسبة إلى أي موقع، كما يمكن الرجوع إلى التوصية ITU-R P.839 للحصول على القيم المتوسطة لارتفاعات المطر. كما يمكن، بالمبدأ، استعمال توزيع ارتفاع المطر بالنسبة إلى القيمة المتوسطة، الوارد في الجدول 6، فيما يتعلق بالتوزيع التراكمي لارتفاعات المطر.

الجدول 6

التوزيع التراكمي لارتفاع المطر بالنسبة إلى القيمة المتوسطة

احتمال التجاوز (%)	اختلاف ارتفاع المطر (km)
100,0	1,625-
99,1	1,375-
96,9	1,125-
91,0	0,875-
80,0	0,625-
68,5	0,375-
56,5	0,125-
44,2	0,125
33,5	0,375
24,0	0,625
16,3	0,875
10,2	1,125
6,1	1,375
3,4	1,625
1,8	1,875
0,9	2,125
0,0	2,375

تُحوّل التوزيعات التراكمية لكل من معدل هطول المطر وارتفاع المطر في شكل دوال كثافة الاحتمال على النحو الآتي. بالنسبة إلى كل فاصل بين قيمتين متجاورتين من قيم معدل هطول المطر أو ارتفاع المطر، تؤخذ القيمة المتوسطة بوصفها ممثلة لهذا الفاصل ويساوي احتمال حدوثه الفرق بين احتمالين من احتمالات التجاوز المقابلة. وتحدد كل قيمة تكون h_R بالنسبة إليها أقل من 0 km (عند استعمال الجدول 7) بمقدار 0 km مع إضافة الاحتمالات الخاصة بها.

ومن المفترض أن يكون معدل هطول المطر وارتفاع المطر، من الناحية الإحصائية، معلمتين مستقلتين الواحدة عن الأخرى، بحيث يكون احتمال الحدوث بالنسبة إلى أية تركيبة تتألف من زوج معدل هطول المطر/ارتفاع المطر، بكل بساطة، ناتج مختلف الاحتمالات.

وتحسب خسارة المسير بالنسبة إلى كل زوج يتكون من قيم معدل هطول المطر وارتفاع المطر وفقاً للخطوات التالية.

الخطوة 2: تحويل المعلمات الهندسية في تمثيل أرضي مستو

تحدد هندسة الانتشار بالمطر بين محطتين استناداً إلى معلمات الدخول الأساسية لمسافة الدائرة العظمى d بين المحطتين، والقيم المحلية لزاوية ارتفاع هوائي كل محطة ϵ_{1-loc} و ϵ_{2-loc} ، وقيم التخالف السمتي بين محور الحزمة الرئيسية لهوائي كل محطة واتجاه المحطة الأخرى التي تعرف بأنها موجبة في اتجاه عقارب الساعة ϵ_{1-loc} و ϵ_{2-loc} . وتؤخذ المحطة 1 بوصفها الموقع المرجعي، أي الأصل في نظام الإحداثيات الديكارتي، ومن ثم تكون المعلمات المرجعية كما يلي:

$$(80) \quad \epsilon_1 = \epsilon_{1-loc}, \quad \alpha_1 = \alpha_{1-loc} \text{ and: } \epsilon_{H1} = \epsilon_{H1-loc} \quad \text{rad}$$

أولاً، نقوم بتحويل كل المعلومات الهندسية إلى نظام إحداثيات ديكارتية مشترك، مع اعتبار المحطة 1 الأصل، والمستوى الأفقي بوصفه المستوى $x-y$ ، ويسدد المحور x في اتجاه المحطة 2 ويسدد المحور z الذي يؤشر عمودياً نحو الأعلى. ويوضح الشكل 4 الهندسة على الأرض المحدبة (بالنسبة إلى حالة مبسطة من الانتثار نحو الأمام، أي على طول الدائرة العظمى) حيث r_{eff} هي نصف قطر الأرض الفعال،

$$(81) \quad r_{eff} = k_{50} R_E \quad \text{km}$$

حيث:

$$k_{50}: \text{القيمة المتوسطة لعامل نصف قطر الأرض الفعال} = 1,33$$

$$R_E: \text{نصف قطر الأرض الحقيقي} = 6371 \text{ km.}$$

ويُفصل بين المحطتين بواسطة مسافة الدائرة العظمى d (km) التي تقع قبالة الزاوية δ في مركز الأرض.

$$\delta = \frac{d}{r_{eff}} \quad \text{rad}$$

(82)

ويكون الخط العمودي المحلي عند مستوى المحطة 2 مائلاً بمقدار الزاوية δ بالنسبة إلى الخط العمودي المحلي عند مستوى المحطة 1، أي محور Z . وبالتالي، تحول زاوية الارتفاع وزاوية السميت للمحطة 2 إلى تمثيل أرضي مستو على نحو ما يلي، ويشير الرمز loc إلى القيم المحلية.

تحسب زاوية الارتفاع للمحطة 2:

$$(83) \quad \varepsilon_2 = \arcsin(\cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \sin \delta + \sin \varepsilon_{2_loc} \cos \delta)$$

وزاوية الأفق عند المحطة 2:

$$(84) \quad \varepsilon_{H2} = \arcsin(\cos \varepsilon_{H2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \sin \delta + \sin \varepsilon_{H2_loc} \cos \delta)$$

والتخالف السميت للمحطة 2 نسبة إلى المحطة 1:

$$(85) \quad \alpha_2 = \arctan\left(\frac{\cos \varepsilon_{2_loc} \sin \alpha_{2_loc}}{\cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \cos \delta - \sin \varepsilon_{2_loc} \sin \delta}\right)$$

ويُعطي ارتفاع المحطة 2 فوق المستوى المرجعي كما يلي:

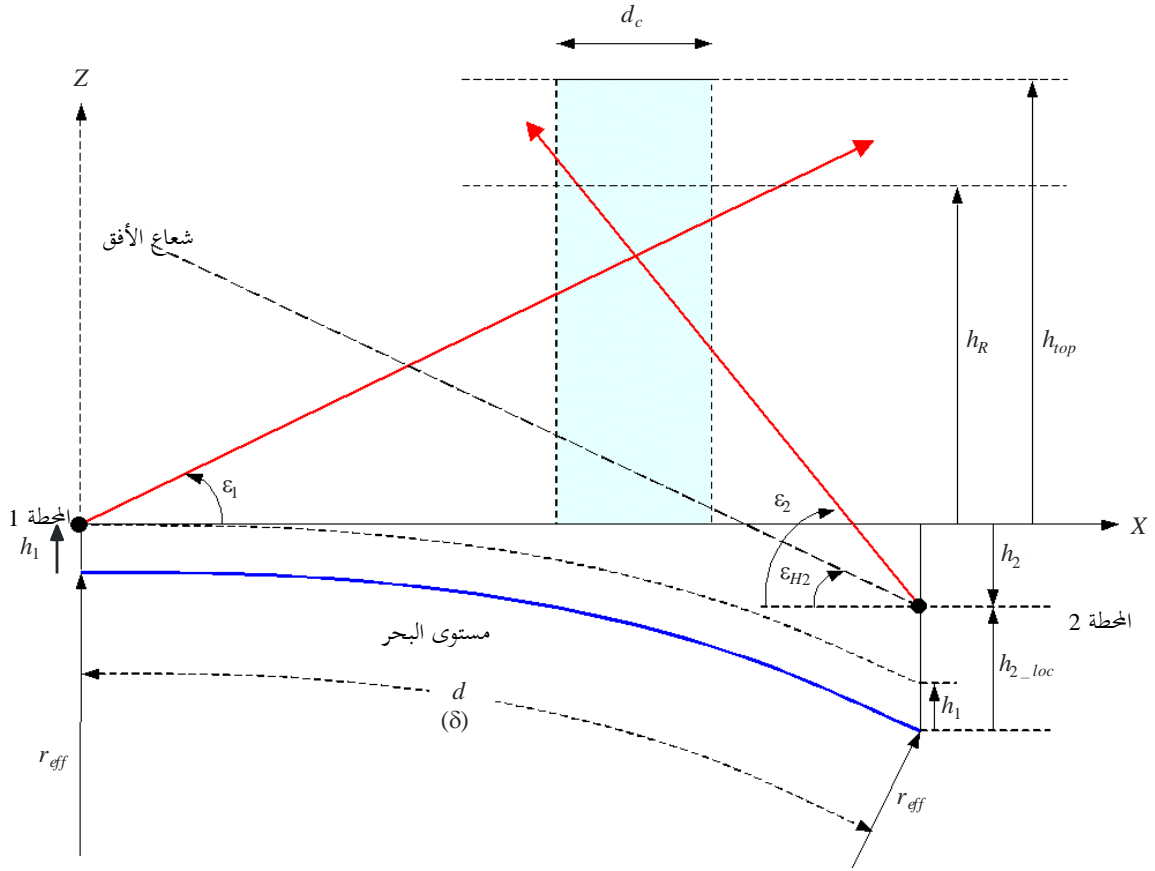
$$(86) \quad h_2 = h_{2_loc} - h_1 - d \frac{\delta}{2} \quad \text{km}$$

ويكون فرق السميت بين المحطتين عند نقطة التقاطع بين إسقاط المستوى الأرضي لمحور كل حزمة رئيسية:

$$(87) \quad \alpha_S = \pi - (\alpha_1 - \alpha_2) \quad \text{rad}$$

الشكل 4

هندسة المحطتين على الأرض المحدبة



P.0452-04

الخطوة 3: تحديد هندسة الوصلات

تستعمل طريقة تحديد هندسة وصلات الانتشار ترميزاً يتمثل فيه متجه في فضاء ذي ثلاثة أبعاد بواسطة مصفوفة ذات عمود واحد مكون من ثلاثة عناصر تحتوي على أطوال الإسقاطات للخط المعني على المحاور x و y و z لنظام الإحداثيات الديكارتي. ويتمثل المتجه بواسطة رمز يكتب بخط غليظ. وهكذا، يمكن بوجه عام كتابة قيمة المتجه كما يلي:

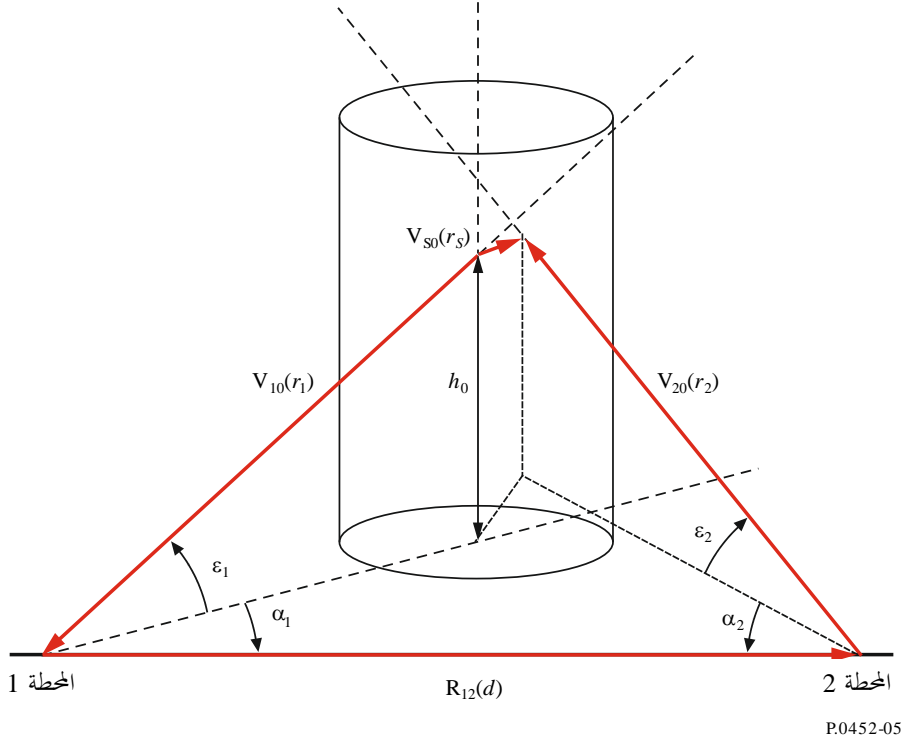
$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

وبصفة عامة، يتمثل متجه وحدة الطول بالرمز \mathbf{V} ، في حين يتمثل متجه عام (يتناول الاتساع مثلاً) بواسطة رمز آخر مناسب، \mathbf{R} مثلاً. ويحتوي الشكل 5 على رسم تخطيطي يوضح الهندسة الأساسية للانتشار بالمطر في الحالة العامة للانتشار الجانبي حيث لا يتقاطع، في الواقع، محورا الحزمتين الرئيسيتين. وبعبارة أخرى، يتناول هذا المثال اقتران الفص الجانبي بالفص الرئيسي. ويمكن لمسير التداخل أن يكون من الفصوص الجانبية للمحطة 2 إلى الفص الرئيسي للمحطة 1 أو العكس.

الشكل 5

رسم تخطيطي لهندسة الانتثار بالمطر في الحالة العامة للانتثار الجانبي

(يلاحظ أن حزمتي الهوائيين لا تتطابقان في هذا المثال،
وأن "زاوية الحول" لا تساوي صفرًا - انظر المعادلتين (89) و(90))



ويقع مركز خلية المطر على طول محور الحزمة الرئيسية لهوائي المحطة 1 عند نقطة التقارب الأعظمي بين حزمتي الهوائيين. وتقوم الهندسة على أساس ترميز المتجه.

ويُعرف المتجه من المحطة 1 إلى المحطة 2 كالتالي:

$$(88) \quad \mathbf{R}_{12} = \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad \text{km}$$

وتُكوّن المتجهات \mathbf{R}_{12} و $r_2 \mathbf{V}_{20}$ و $r_1 \mathbf{V}_{10}$ شكلاً متعدد الأضلاع ذا ثلاثة أبعاد، ويكون المتجه \mathbf{V}_{S0} متعامداً مع المتجهين \mathbf{V}_{10} و \mathbf{V}_{20} . والمتجه \mathbf{V}_{S0} في الشكل 5 غير متعامد مع مستوى الصفحة.

ومع أخذ انحناء الأرض في الاعتبار، يحسب متجه وحدة الطول \mathbf{V}_{10} في اتجاه الحزمة الرئيسية لهوائي المحطة 1.

$$(89) \quad \mathbf{V}_{10} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_1 \cos \alpha_1 \\ -\cos \varepsilon_1 \sin \alpha_1 \\ \sin \varepsilon_1 \end{bmatrix}$$

ويكون متجه وحدة الطول \mathbf{V}_{20} في اتجاه الحزمة الرئيسية لهوائي المحطة 2:

$$(90) \quad \mathbf{V}_{20} = \begin{bmatrix} \sin \varepsilon_{2_loc} \sin \delta - \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \cos \delta \\ \cos \varepsilon_{2_loc} \sin \alpha_{2_loc} \\ \sin \varepsilon_{2_loc} \cos \delta + \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \sin \delta \end{bmatrix}$$

وتستعمل الطريقة الآن الناتج المتدرج للمتجهين، وتكتب وتقيم على نحو ما يلي:

$$\mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{V}_2 = x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2$$

حيث:

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$$

وتحدد زاوية الانتثار φ_S ، أي الزاوية بين حزمتي الهوائيين، من الناتج المتدرج للمتجهين \mathbf{V}_{20} و \mathbf{V}_{10} :

$$(91) \quad \varphi_S = \arccos(-\mathbf{V}_{20} \cdot \mathbf{V}_{10})$$

وفي حالة $\varphi_S > 0,001$ راديان، تكون حزمنا الهوائيين متوازيتين تقريباً ويمكن الافتراض بأن أي افتراض يرتبط بالانتثار بالمطر سيكون مهملاً.

وكما هو موضح في الشكل 5، تُكوّن المتجهات الأربعة \mathbf{R}_{12} و $r_2 \mathbf{V}_{20}$ و $r_S \mathbf{V}_{S0}$ و $r_1 \mathbf{V}_{10}$ شكلاً مغلقاً متعدد الأضلاع ذا ثلاثة أبعاد، أي:

$$(92) \quad \mathbf{R}_{12} + r_2 \mathbf{V}_{20} - r_S \mathbf{V}_{S0} - r_1 \mathbf{V}_{10} = 0$$

ويمكن حل هذه المعادلة بالنسبة إلى المسافات r_i . وتستعمل الطريقة الناتج المتجهي للمتجهين وتكتب وتقيم كما يلي. ويساوي ناتج المتجهين:

$$\mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} y_1 z_2 - z_1 y_2 \\ z_1 x_2 - x_1 z_2 \\ x_1 y_2 - y_1 x_2 \end{bmatrix}$$

ويحسب متجه وحدة الطول \mathbf{V}_{S0} الذي يكون متعامداً مع كلتا حزمتي الهوائيين من جداء المتجهين $\mathbf{V}_{20} \times \mathbf{V}_{10}$:

$$(93) \quad \mathbf{V}_{S0} = \frac{\mathbf{V}_{20} \times \mathbf{V}_{10}}{\sin \varphi_S}$$

ويمكن حل المعادلة (92) باستعمال محددة المتجهات الثلاثة التي تكتب وتقيم كما يلي:

$$\det[\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_2 \quad \mathbf{V}_3] = \det \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} = x_1(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_2(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_2 - y_2 z_1)$$

وتحسب المسافة بين الحزمتين عند نقطة التقارب الأعظمي:

$$(94) \quad r_S = \frac{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{R}_{12}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{S0}]}$$

وتكون مسافة المسير المائل r_1 بين المحطة 1 على طول حزمها الرئيسية ونقطة التقارب الأعظمي من الحزمة الرئيسية للمحطة 2:

$$(95) \quad r_1 = \frac{\det[\mathbf{R}_{12} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{s0}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{s0}]}$$

في حين أن مسافة المسير المائل المقابلة r_2 بين المحطة 2 على طول حزمها الرئيسية ونقطة التقارب الأعظمي من الحزمة الرئيسية للمحطة 1 هي:

$$(96) \quad r_2 = \frac{-\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{R}_{12} \quad \mathbf{V}_{s0}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{s0}]}$$

وتحسب "زاوية الحول" خارج المحور Ψ_1 في المحطة 1 لنقطة التقارب الأعظمي بين محور الحزمة الرئيسية للمحطة 2:

$$(97) \quad \Psi_1 = \arctan\left(\frac{|r_s|}{r_1}\right)$$

وتكون "زاوية الحول" خارج المحور المقابلة في المحطة 2 لنقطة التقارب الأعظمي من محور الحزمة الرئيسية للمحطة 1:

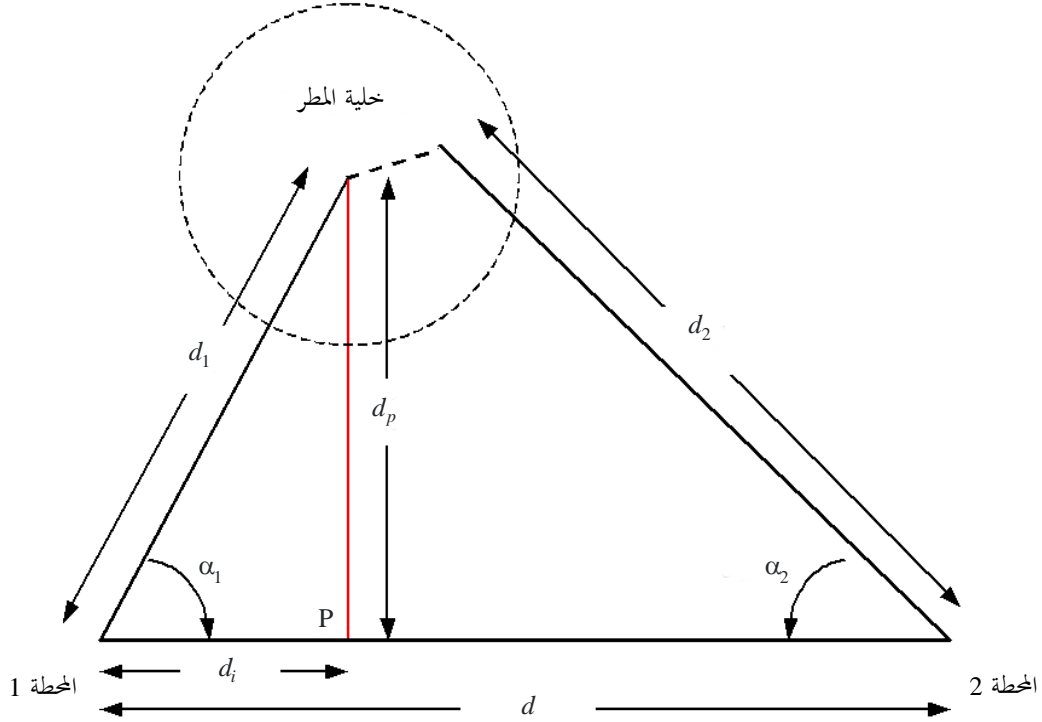
$$(98) \quad \Psi_2 = \arctan\left(\frac{|r_s|}{r_2}\right)$$

وانطلاقاً من هذه المعلومات، نحدد ما إذا كان هناك اقتران للحزمتين الرئيسيتين بين المحطتين أم لا. ولكي يكون هنالك اقتران بين الحزمتين الرئيسيتين، ينبغي لزاوية الحول أن تكون أقل بقيمة 3 dB من عرض حزمة الهوائي المعني. وفيما يتعلق بزوايا حول أكبر فلن يوجد إلا القليل، إن وجد، من اقتران الحزمتين الرئيسيتين، وسيتأثر مسير الإرسال بصفة أساسية باقتران الفص الجانبي بالحزمة الرئيسية. وفي هذه الحالة، ينبغي النظر في إمكانيات على أن يكون مركز خلية المطر على طول محور الحزمة الرئيسية لكل هوائي بدوره وأن يكون أخفض مقدار من خسارة الإرسال يمثل الحالة الأسوأ. ونظراً إلى أن الموقع المفترض مبدئياً لخلية المطر يكون عند نقطة التقارب الأعظمي من محور الحزمة الرئيسية للمحطة 1، فمن الممكن أن نستبدل معلمات المحطة 2 بمعلمات المحطة 1 وبالعكس.

وأخيراً من الضروري أيضاً تحديد الإسقاطات الأفقية لمختلف المسافات المحسوبة أعلاه، والتي يمكن بالاستناد إليها تحديد موقع خلية المطر. ويبيّن الشكل 6 مخطط إسقاط الحالة العامة للانتشار الجانبي.

الشكل 6

مخطط إسقاط هندسة الانتثار الجانبي



P.0452-06

تُحسب المسافة الأفقية بين المحطة 1 ومركز خلية المطر، أي النقطة على الأرض التي تقع مباشرة تحت نقطة التقارب الأعظمي من محور الحزمة الرئيسية للمحطة 1:

$$(99) \quad d_1 = r_1 \cos \varepsilon_1 \quad \text{km}$$

وتكون المسافة الأفقية المقابلة من المحطة 2 إلى الإسقاط على المستوى الأرضي من نقطة التقارب الأعظمي:

$$(100) \quad d_2 = r_2 \cos \varepsilon_2 \quad \text{km}$$

ويكون الارتفاع فوق الأرض من نقطة التقارب الأعظمي من محور الحزمة الرئيسية للمحطة 1:

$$(101) \quad h_0 = |r_1| \sin \varepsilon_1 \quad \text{km}$$

في حين يكون ارتفاع نقطة التقارب الأعظمي من محور الحزمة الرئيسية للمحطة 2 في حالة عدم وجود اقتران الحزمتين الرئيسيتين:

$$(102) \quad h_{2_0} = |r_2| \sin \varepsilon_2 \quad \text{km}$$

وتحتاج معلمات الارتفاع المرتبطة بخلية المطر إلى أن تصحح بالنسبة إلى أي تحالف عن مسير الدائرة العظمي في حالة الانتثار الجانبي بالمطر. وتكون المسافة بين المحطتين على طول الدائرة العظمي:

$$(103) \quad d_p = d_1 \sin \alpha_1$$

ويكون التباعد الزاوي عندئذ:

$$(104) \quad \delta_p = \frac{d_p}{r_{eff}} \quad \text{km}$$

ويحدد الآن التصحيح اللازم في حالة الانتشار الجانبي:

$$(105) \quad h_c = h_1 + d_p \frac{\delta_p}{2} \quad \text{km}$$

وجدير بالذكر أنه يتعين تطبيق هذا التصحيح على المعلومات الأخرى المرتبطة بخلية المطر، أي ارتفاع المطر h_R والحد الأعلى للتكامل h_{top} ، وفي تحديد التوهين بواسطة الغازات (انظر الخطوة 8) الذي يتطلب استعمال معلومات محلية.

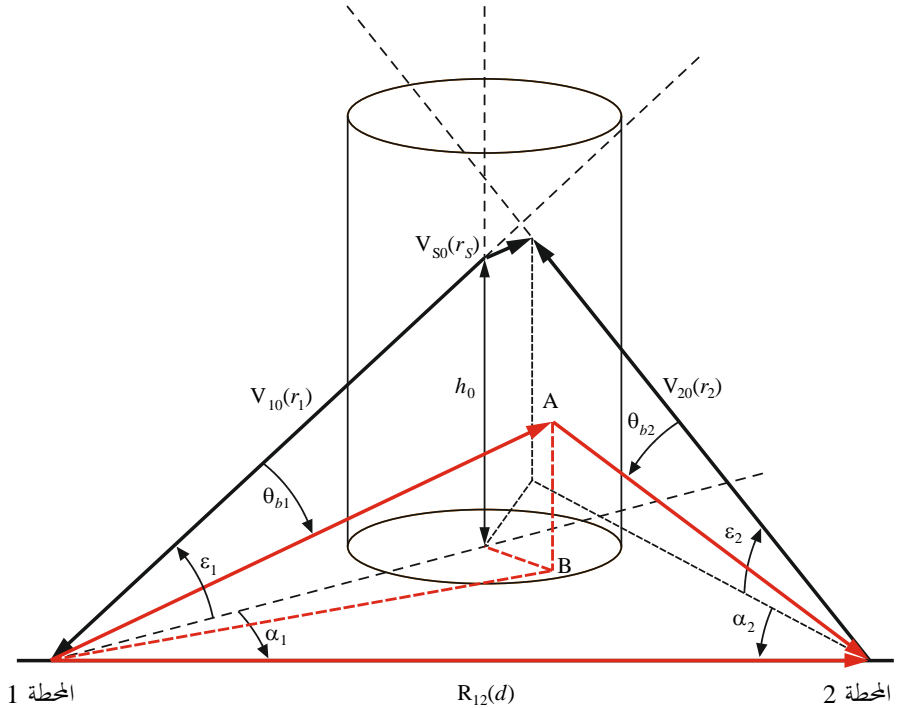
وعلى هذا النحو يتم تحديد المعلومات الأساسية الهندسية الساكنة التي يتعين استعمالها لتحديد موقع خلية المطر بالنسبة إلى المحطات ولتقييم خسارة الإرسال الناجمة عن الانتشار بالمطر. ويجب الآن النظر في الهندسة الخاصة بعنصر التكامل الذي قد يكون في أي مكان من خلية المطر، حتى حد أعلى يتعلق بالتكامل يُعرّف مسبقاً h_{top} كي يتسنى تحديد كسب هوائي كل نقطة في خلية المطر وكذلك توهين المسير في خلية المطر، في اتجاه كل محطة. ولهذا الغاية يتعين تغيير نظام الإحداثيات للانتقال إلى إحداثيات أسطوانية (h, φ, r) متمركزة حول خلية المطر.

الخطوة 4: تحديد هندسة كسب الهوائي

يعتمد حساب كسب كل هوائي عند عنصر تكامل الإحداثيات (h, φ, r) باستعمال مخطط إشعاع هوائي من هذا النمط، وحساب توهين المسير في خلية المطر من ناحية أخرى، على حساب زاوية الانحراف عن محور التسديد عند موقع عنصر التكامل وأطوال المسير من عنصر التكامل إلى حافة خلية المطر، في اتجاه كل محطة. ويوضح الشكل 7 الهندسة التي تمثل فيها النقطة A عنصر التكامل العشوائي عند الإحداثيات (h, φ, r) في حين أن النقطة B هي مسقط هذه النقطة على الأرض. ويبين الشكل 8 مخطط إسقاط هذه الهندسة.

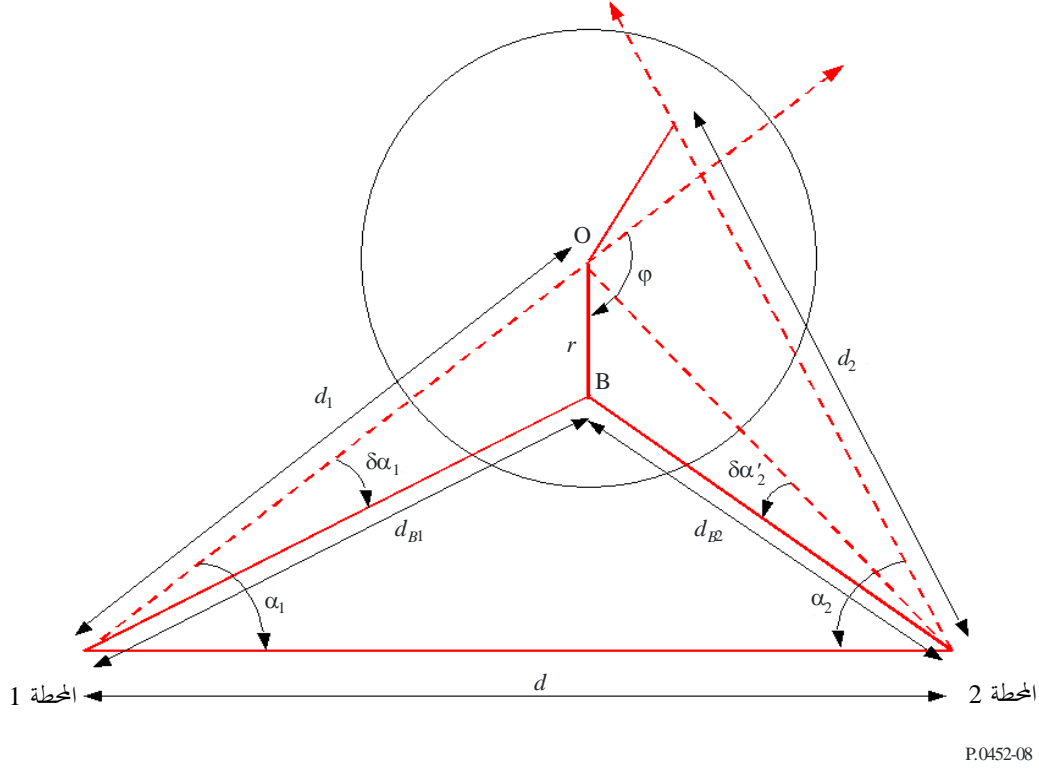
الشكل 7

هندسة تحديد كسب الهوائي وتوهين المسير في خلية المطر



الشكل 8

مخطط إسقاط هندسة تحديد كسب الهوائي



تُحسب المسافة الأفقية من المحطة 1 إلى النقطة B:

$$(106) \quad d_{B1} = \sqrt{r^2 + d_1^2 + 2rd_1 \cos \varphi} \quad \text{km}$$

والزاوية بين هذا المسير والإسقاط الأفقي لمحور الحزمة الرئيسية لهوائي المحطة 1:

$$(107) \quad \delta\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{r \sin \varphi}{d_{B1}}\right)$$

وتُعطى زاوية ارتفاع النقطة A المرئية من المحطة 1 بواسطة:

$$(108) \quad \varepsilon_{A1} = \arctan\left(\frac{h}{d_{B1}}\right)$$

ويُعرف متجه وحدة الطول من المحطة 1 إلى النقطة A كما يلي:

$$(109) \quad \mathbf{V}_{A1} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_{A1} \cos(\alpha_1 - \delta\alpha_1) \\ -\cos \varepsilon_{A1} \sin(\alpha_1 - \delta\alpha_1) \\ \sin \varepsilon_{A1} \end{bmatrix}$$

ونحدد زاوية الانحراف عن محور تسديد الهوائي فيما يتعلق بنقطة الإحداثيات (r, phi, h) بالنسبة إلى هوائي المحطة 1:

$$(110) \quad \theta_{b1} = \arccos(\mathbf{V}_{A1} \cdot \mathbf{V}_{10})$$

وتكون المسافة بين المحطة 1 والنقطة A:

$$(111) \quad r_{A1} = \frac{d_{B1}}{\cos \varepsilon_{A1}} \quad \text{km}$$

ويشار إلى أن المتجهات $r_{A1} \mathbf{V}_{A1} = \mathbf{R}_{A1}$ و \mathbf{R}_{A2} و \mathbf{R}_{12} تكون مثلاً مغلقاً، ويمكن الحصول على المتجه من المحطة 2 في اتجاه النقطة A عند (h, φ, r) من:

$$(112) \quad \mathbf{R}_{A2} = \mathbf{R}_{12} - r_{A1} \mathbf{V}_{A1} \quad \text{km}$$

وبالتالي تحسب المسافة بين المحطة 2 والنقطة A كما يلي:

$$(113) \quad r_{A2} = |\mathbf{R}_{A2}| \quad \text{km}$$

بينما يكون متجه الوحدة من المحطة 1 في اتجاه عنصر التكامل:

$$(114) \quad \mathbf{V}_{A2} = \frac{\mathbf{R}_{A2}}{r_{A2}}$$

وتحدد بعد ذلك زاوية الانحراف عن محور التسديد للمحطة 2 لعنصر التكامل عند النقطة A، ذات الإحداثيات (h, φ, r) :

$$(115) \quad \theta_{b2} = \arccos(-\mathbf{V}_{A2} \cdot \mathbf{V}_{20})$$

ولا تستعمل الطريقة الواردة أعلاه لتحديد كسب الهوائي إلا بالنسبة إلى الهوائيات الدائرية. فإذا كان هوائي المحطة A قطاعياً أو شامل الاتجاهات، مثلما هو الحال بالنسبة إلى أنظمة البث الراديوي من نقطة إلى عدة نقاط، نستعمل عندئذ طريقة تختلف قليلاً لتحديد كسب الهوائي الذي لا يتغير إلا في الاتجاه العمودي فقط (داخل المنطقة التي تغطيها خلية المطر). وفي هذه الحالة، تتحدد زاوية الانحراف عن محور التسديد في الاتجاه العمودي بطريقة أبسط كما يلي:

$$(116) \quad \theta_{b1} = |\varepsilon_{A1} - \varepsilon_1|$$

وبالمثل، إذا كان هوائي المحطة 2 قطاعياً أو شامل الاتجاهات، فإن زاوية الانحراف عن محور التسديد في الاتجاه العمودي تتحدد كما يلي:

$$(117) \quad \theta_{b2} = |\varepsilon_{A2} - \varepsilon_2|$$

حيث:

$$(118) \quad \varepsilon_{A2} = \arctan\left(\frac{h}{d_{B2}}\right)$$

و:

$$(119) \quad d_{B2} = \sqrt{d^2 + d_{B1}^2 - 2d \cdot d_{B1} \cos(\alpha_1 - \delta\alpha_1)} \quad \text{km}$$

ومن المهم التذكير بأن زوايا الانحراف عن محور التسديد يعبر عنها عادة بالدرجات عندما تُستعمل عموماً في مخططات إشعاع الهوائي في حين يعبر عن دوال علم المثلثات في معظم البرمجيات عموماً بوحدة الراديان. ولذلك ينبغي إجراء تحويل بسيط من الراديان إلى الدرجات قبل استعمال هذه الزوايا في إجراءات التكامل.

ويمكن بالتالي حساب كسب الهوائي من مخطط الإشعاع ومن أقصى كسب له ومن زاوية الانحراف عن محور التسديد، وهي دالة في الموقع داخل خلية المطر. ويمكن بالمبدأ أن تستعمل المخططات النموذجية للإشعاع التي ترد في أي من التوصية ITU-R P.620 (وكذلك ITU-R F.699) أو التوصية ITU-R F.1245، علماً بأن سوية الفصوص الجانبية منخفضة في مخطط التوصية الأخيرة. وتجدر الإشارة إلى ضرورة التعبير عن الكسب خطياً بالنسبة إلى التكامل.

الحجم السفلي

يكون عنصر التكامل، في الحجم السفلي، فوق ارتفاع المطر h_R دائماً، وتتعرض جميع المسيرات داخل خلية المطر إلى التوهين بسبب المطر.

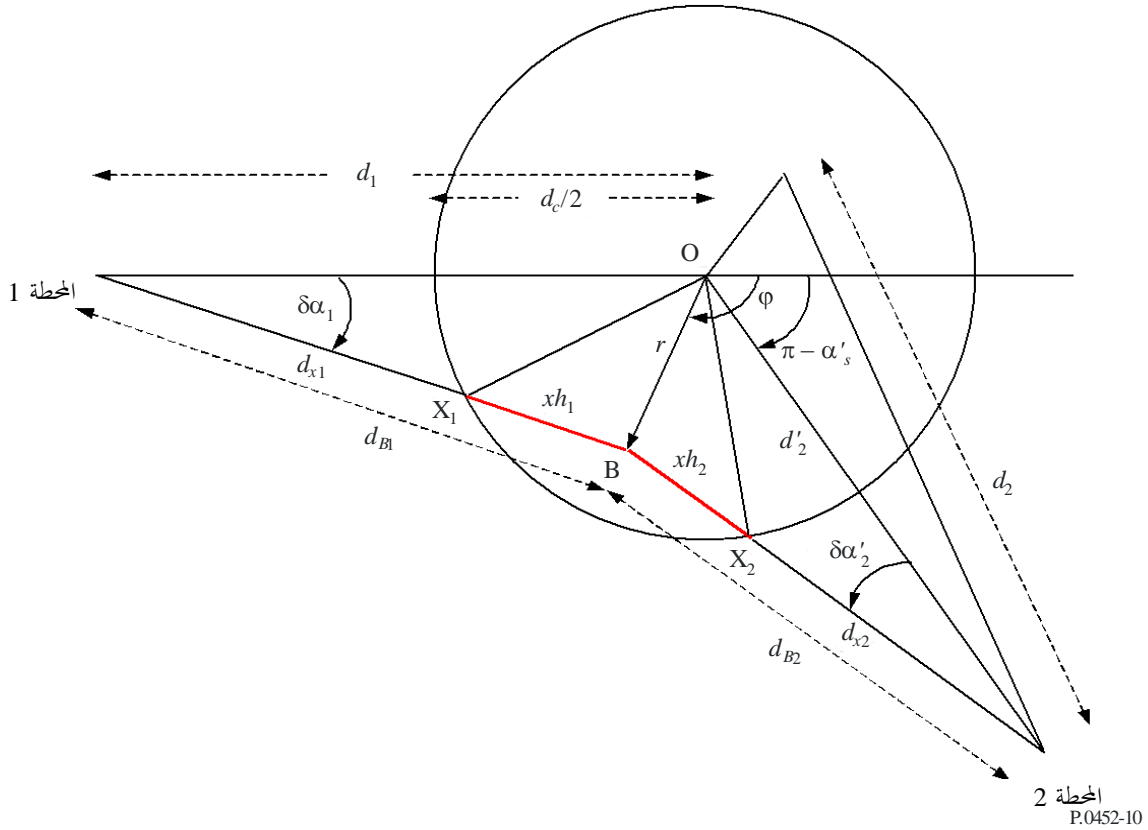
$$(120) \quad A_{1,2} = \gamma_{R1,2} x_{1,2} \quad \text{dB}$$

حيث $\gamma_{R1,2} = k_{1,2} R^{\alpha_{1,2}}$ معامل التوهين بالمطر (dB/km)، ويُعطى المعاملان $k_{1,2}$ و $\alpha_{1,2}$ بدلالة التردد f والاستقطاب τ وزاوية ارتفاع المسير $\varepsilon_{1,2}$ كما في التوصية ITU-R P.838. ونلاحظ أن معامل التوهين بالمطر يتوقف على زاوية ارتفاع المسير وينبغي أن يُحسب من حيث المبدأ بالنسبة إلى كل عنصر تكامل وبالنسبة إلى كل قيمة من قيم الإحداثيات (h, φ, r) . إلا أن التغير بحسب زاوية الارتفاع ضئيل ويكفي تحديد القيم γ_R مرة واحدة بالنسبة إلى المسيرات في اتجاه كل محطة على أساس زاوية ارتفاع هوائي تلك المحطة.

ويتم حساب طول المسيرات r_{x1} و r_{x2} و x_1 و x_2 انطلاقاً من الهندسة على نحو ما يلي. ويبين الشكل 10 منظر المستوى الأفقي لعنصر التكامل A الذي يمر بنقطة الإسقاط B على الأرض. وهنا يفترض أن تكون القيمة المصححة لارتفاع المحطة 2، h_2 ، في البداية صفراً. ويراعى ذلك لاحقاً.

الشكل 10

مخطط إسقاط هندسة الانتشار عبر عنصر التكامل



وتحسب المسافة الأفقية d_{x1} التي تفصل بين المحطة 1 وحافة خلية المطر (النقطة X_1) انطلاقاً من قاعدة جيب التمام (باتخاذ العلامة السالبة لأنها الحافة الأقرب):

$$(121) \quad d_{x1} = d_1 \cos \delta\alpha_1 - \sqrt{d_1^2 \cos^2 \delta\alpha_1 - d_1^2 + \left(\frac{d_c}{2}\right)^2} \quad \text{km}$$

وتكون عندئذ المسافة على المسير المائل إلى حافة خلية المطر:

$$(122) \quad r_{x1} = \frac{d_{x1}}{\cos \varepsilon_{A1}} \quad \text{km}$$

وتحدد زاوية التخالف لعنصر التكامل عند النقطة A بالنسبة إلى المحطة 2:

$$(123) \quad \delta\alpha_2 = \arctan\left(\frac{-r \sin(\varphi + \alpha'_S)}{d'_2 + r \cos(\varphi + \alpha'_S)}\right)$$

حيث تعطى α'_S كما يلي:

$$(124) \quad \alpha'_S = \arcsin\left(\frac{d}{d'_2} \sin \alpha_1\right)$$

و:

$$(125) \quad d'_2 = \sqrt{d^2 + d_1^2 - 2d \cdot d_1 \cos \alpha_1} \quad \text{km}$$

ثم تحسب المسافة الأفقية d_{x2} من قاعدة جيب التمام:

$$(126) \quad d_{x2} = d'_2 \cos \delta\alpha'_2 - \sqrt{\left(\frac{d_c}{2}\right)^2 - d_2'^2 \sin^2 \delta\alpha'_2} \quad \text{km}$$

وتُحسب المسافة من المحطة 2 حتى حافة الخلية:

$$(127) \quad r_{x2} = \frac{d_{x2}}{\cos \varepsilon_{A2}} \quad \text{km}$$

ويتعين الآن النظر في الحالتين التاليتين:

الحالة 1: عندما تكون المحطة 1 خارج خلية المطر، أي عندما تكون $d_1 > d_c/2$. في هذه الحالة، لن يكون في خلية المطر إلا جزء مسير واحد من عنصر التكامل A إلى المحطة 1 ومن ثم يتعرض إلى التوهين؛

الحالة 2: عندما تكون زاوية الارتفاع كبيرة جداً وتقع المحطة 1 في خلية المطر، أي عندما تكون $d_1 \leq d_c/2$. في هذه الحالة، سيكون المسير بأكمله حتى ارتفاع المطر في خلية المطر ويتعرض بالتالي إلى التوهين.

ويُحدد طول المسير x_1 بالنسبة إلى التوهين بالمطر على طول المسير في اتجاه المحطة 1 من:

$$(128) \quad x_1 = \begin{cases} r_{A1} - r_{x1} & \text{if } d_1 > \frac{d_c}{2} \\ r_{A1} & \text{if } d_1 \leq \frac{d_c}{2} \end{cases} \quad \text{km}$$

ويحدد طول المسير x_2 بالنسبة إلى التوهين بالمطر على طول المسير في اتجاه المحطة 2 من:

$$(129) \quad x_2 = \begin{cases} r_{A2} - r_{x2} & \text{if } d_2 > \frac{d_c}{2} \\ r_{A2} & \text{if } d_2 \leq \frac{d_c}{2} \end{cases} \quad \text{km}$$

وهكذا، يمكن أن يحدد التوهين في خلية المطر في الحالة التي يكون فيها عنصر التكامل فوق ارتفاع المطر خطياً من:

$$(130) \quad A_b = \exp[-k(\gamma_{R1}x_1 + \gamma_{R2}x_2)] \quad \text{if } h \leq h_R$$

حيث تمثل $k = 0,23026$ قيمة ثابتة لتحويل التوهين من وحدة dB إلى وحدات نيبير (Nepers).

الحجم الأوسط والحجم العلوي

يكون عنصر التكامل في هذين الحجمين فوق ارتفاع المطر، h_R ، لكن قد تمر بعض أجزاء المسير في اتجاه كل محطة عبر خلية المطر دون الارتفاع h_R . وهذا لا يحدث إلا في الحالة التي تكون فيها زاويتا الارتفاع $\varepsilon_{A1,2}$ لعنصر التكامل A أصغر من الزاويتين $\varepsilon_{C1,2}$ الواقعتين بين ناظم كل محطة وأقرب حافة عليا من خلية المطر، أي إذا كان:

$$\varepsilon_{A1} < \varepsilon_{C1} = \arctan\left(\frac{h_R}{d_{x1}}\right)$$

و:

$$\varepsilon_{A2} < \varepsilon_{C2} = \arctan\left(\frac{h_R - h_2}{d_{x2}}\right)$$

وفي هذه الحالة يجب أن يؤخذ في الاعتبار التوهين الناتج. ويكون هذا الأمر صحيحاً بصفة خاصة بالنسبة إلى الحالة 2 الواردة أعلاه عندما تكون زاوية ارتفاع أحد الهوائيين مرتفعة جداً وعندما تكون المحطة في خلية المطر.

واستناداً إلى الشكل 9 يمكن أن تحدد الارتفاعات التي تمر عندها الأشعة من عنصر التكامل إلى النقطة A عبر حواف خلية المطر، وذلك من نسب المسافات الأفقية بين كل محطة وحافة خلية المطر وبين كل محطة والنقطة B:

$$(131) \quad h_{e1} = h \cdot \frac{d_{x1}}{d_{B1}} \quad \text{km}$$

$$h_{e2} = (h - h_2) \cdot \frac{d_{x2}}{d_{B2}} + h_2$$

ويمكن تحديد أجزاء طول المسيرات $f_{x1,2}$ التي تمر عبر خلية المطر من النسب:

$$(132) \quad f_{x1,2} = \begin{cases} x_{1,2} \left(\frac{h_R - h_{e1,2}}{h - h_{e1,2}} \right) & \text{if } h > h_R > h_{e1,2} \quad \text{and} \quad \varepsilon_{A1,2} < \varepsilon_{C1,2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{km}$$

وأخيراً يُحسب التوهين خطياً في الحالات التي يكون فيها عنصر التكامل فوق ارتفاع المطر، h_R :

$$(133) \quad A = \exp[-k\{6,5(h - h_R) + \gamma_{R1}f_{x1} + \gamma_{R2}f_{x2}\}] \quad \text{for } h \geq h_R$$

وتسمح هذه الخطوة بتحديد مكامل لدالة نقل الانتثار.

الخطوة 6: التوهين خارج خلية المطر

يقتصر المطر في الصيغة المستعملة هنا على خلية قطرها d_c كما حددتها هندسة الخطوة 2 ويعتبر معدل هطول المطر منتظماً داخل هذه الخلية. وعموماً يتجاوز المطر هذه المنطقة ويتضاءل من حيث الشدة كلما ازدادت المسافة من وسط الخلية ويتعين أن يؤخذ ذلك في الاعتبار. ولكن إذا كانت المحطة داخل خلية المطر، عندئذ لا داعي لأن يؤخذ في الاعتبار أي توهين خارجي بسبب المطر بالنسبة إلى هذه المحطة. وعلاوة على ذلك، إذا كان عنصر التكامل بعيداً بشكل كافٍ فوق ارتفاع المطر بحيث لا يمكن لأي جزء من المسير في اتجاه هذه المحطة أو تلك أن يمر عبر خلية المطر، عندئذ لا يؤخذ في الحسبان أي توهين خارجي على طول هذا المسير. وعلى سبيل التقريب، نفترض أن المطر في خارج خلية المطر يتضاءل بتزايد المسافة كما يلي:

$$(134) \quad r_m = 600R^{-0.5}10^{-(R+1)^{0.19}} \quad \text{km}$$

ويُحسب التوهين خارج خلية المطر، بالنسبة إلى الانتثار دون ارتفاع المطر، كما يلي:

$$(135) \quad A_{ext1,2} = \begin{cases} \frac{\gamma_{R1,2} r_m}{\cos \varepsilon_{A1,2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{d_{x1,2}}{r_m}\right) \right] & \text{if } d_{1,2} > \frac{d_c}{2} \text{ and } f_{x1,2} \neq 0 \\ 0 & \text{if } d_{1,2} \leq \frac{d_c}{2} \text{ or } f_{x1,2} = 0 \end{cases} \quad \text{dB}$$

أي أن التوهين على أي من المسيرين يعتبر صفرًا إذا كانت المحطة المعنية في خلية المطر ($d_1 \leq d_c/2$) أو إذا كان عنصر التكامل فوق خلية المطر ولا يمر أي جزء من المسير عبر خلية المطر، وهو ما يتحدد إذا كان جزء المسير $f_{x1,2}$ يساوي صفرًا أم لا.

الخطوة 7: التكامل العددي لدالة نقل الانتثار

ينقسم التكامل إلى قسمين، يتعلق الأول بالانتثار دون ارتفاع المطر ويتعلق الثاني بالانتثار فوق ارتفاع المطر:

$$(136) \quad C_b = \int_{h_{\min}}^{h_R} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp[-k(\gamma_{R1} x_1 + \gamma_{R2} x_2 + A_{ext1} + A_{ext2})] \cdot r dr d\varphi dh$$

$$(137) \quad C_a = \int_{h_R}^{h_{\text{top}}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp[-k(6.5(h - h_R) + \gamma_{R1} f_{x1} + \gamma_{R2} f_{x2} + A_{ext1} + A_{ext2})] \cdot r dr d\varphi dh$$

حيث يعبر عن كسب الهوائي خطياً، بحسب زوايا الانحراف عن محور التسديد $\theta_{b1,2}(r, \varphi, h)$ ، وحيث:

$$(137a) \quad r_{A1,2}(r, h, \varphi) = \sqrt{(r \cos \varphi - d_{1,2})^2 + r^2 \sin^2 \varphi + (h - h_{1,2})^2} \quad \text{km}$$

تجري عملية التكامل، في الإحداثيات الأسطوانية، على مدى القيم التالية: بالنسبة إلى r من 0 إلى نصف قطر خلية المطر $d_c/2$ وبالنسبة إلى φ من 0 إلى 2π . ويمكن وضع بعض القيود على المتغير الثالث للتكامل h وهو الارتفاع داخل خلية المطر. ويتحدد الارتفاع الأدنى h_{\min} تبعاً لإمكانية رؤية خلية المطر من كل محطة. وإذا وجد عائق على مقربة من هذه المحطة أو تلك عندئذ ينبغي استبعاد الانتثار من الارتفاعات داخل خلية المطر غير المرئية من هذه المحطة أو تلك من عملية التكامل. ويمكن بالتالي تحديد الارتفاع الأدنى للتكامل من زوايا الأفق لكل محطة، على نحو ما يلي:

$$(138) \quad h_{\min} = \max(d_{x1} \tan \varepsilon_{H1}, d_{x2} \tan \varepsilon_{H2}) \quad \text{km}$$

ويلاحظ أننا نستعمل هنا قيمة محلية نظراً إلى أن أي حجب متأصل بحكم انحناء الأرض عند زاوية ارتفاع قيمتها صفر قد سبق أن أخذ في الاعتبار عند تحديد زوايا الانحراف عن محور التسديد.

ويمكن تحديد الارتفاع الأقصى للتكامل، h_{top} ، للتقليل إلى أقصى حد من قيود الحساب نظراً إلى أنه ليس من الضروري عموماً إدماج المقطع العرضي للانتشار عند الارتفاعات التي تقل فوقها سويات الفصوص الجانبية للهوائي بشكل ملحوظ. ونفترض، بالمبدأ، أن الارتفاع الذي يمكن فوّه وقف التكامل بدون خسارة من حيث الدقة هو 15 km.

وتعتمد قيم شدة المجال القريب بشكل كبير على التفاصيل المحددة للعتاد، وقد لا تتاح هذه المعلومات بسهولة في تحليل التداخل الأساسي. ومن ثم، من المناسب وضع افتراض بأن شدة المجال ستكون تقريباً في حدود مقدار تلك الموجود في بداية منطقة المجال البعيد. ويبدو أن هذا التقريب صحيح بوجه عام بالنسبة لقياسات فعالية لقيم شدة المجال القريب.

إجراء لتطبيق القدرة التقريبية لانتشار المجال القريب:

(1) تحديد ما إذا كان نصف قطر المجال القريب للمرسل أو المستقبل، $d_{nf} = \frac{2cG}{\pi^2 f}$ يقع داخل نصف قطر خلية المطر. وشرط حدوث ذلك هو $d_{1,2} + d_{nf} < d_c/2$. فإذا كان الوجود جزئياً، مثل $d_{1,2} - d_{nf} < d_c/2$ ، فإنه للتقريب يفترض أن الوجود كلي.

(2) يطبق الشرط التالي على إجراء التكامل بالنسبة للمعادلتين (136) و(137):

$$\text{إذا كان } r_{A1,2} < r_{nf} \text{ إذاً } r_{A1,2} = r_{nf}.$$

التكامل الرقمي: هنالك العديد من طرق التكامل الرقمي وتحتوي العديد من رزم البرمجيات الرياضية على دوال تكامل متأصلة يمكن استعمالها استعمالاً فعالاً. وقد برهنت الطرق التي تستند إلى تقنيات التكرار بواسطة التصنيف المتعاقب لفواصل التكامل عن جدواها عندما يرغب المستعمل في تطوير مجموعة من البرمجيات المتخصصة بواسطة لغات برمجية أخرى. وتنسب هذه الطريقة إلى رومبرغ (Romberg) وهي تمثل متغيراً من رتبة أعلى للطريقة المرجعية لأشباه المنحرف (قاعدة سمسون)، للتكامل بواسطة التصنيف المتعاقب لفواصل التكامل.

وتستعمل طريقة رومبرغ للتكامل توليفة تتألف من طريقتين عدديتين لحساب قيمة تقريبية لتكامل حقيقي، أي:

$$I = \int_a^b y(x) dx$$

وتُستعمل طريقة أشباه المنحرف الموسعة لحساب متتالية من تقريبات التكامل، ويتم في كل مرة تصنيف الفواصل بين القيمتين. ويستعمل بعد ذلك استكمال خارجي حدودي لحساب المتتالية إلى أن يبلغ طول الفاصل صفراً. ويمكن تلخيص هذه الطريقة باستخدام عروة في شبه شفرة:

$$Index = 1$$

WHILE estimated_error > desired_error DO

S(Index) = تقريب بواسطة طريقة شبه المنحرف التي تستعمل فواصل الدليل الثاني

I = استكمال خارجي حدودي لقيمة S

$$Index = Index + 1$$

طريقة شبه المنحرف الموسعة

يمكن حساب تقريب التكامل بواسطة استكمال خطي بين $N + 1$ من الإحداثيات السينية متساوية التباعد (x_i, y_i) على النحو التالي:

$$I \approx T^N = h(N) \left(\frac{1}{2} y_0 + y_1 \cdots y_{N-1} + \frac{1}{2} y_N \right)$$

حيث:

$$h(N) = \frac{b-a}{N}$$

هي الفاصل بين الإحداثيات السينية.

ويمكن أن يضاعف عدد الفواصل بالتكرار:

$$T^{2N} = \frac{1}{2}T^N + h(2N)(y_1 + y_3 \cdots y_{N-3} + y_{N-1})$$

وتمكّن طريقة رومبرغ من بناء متتالية خلال التكرار $S(i) = T^{2^i}$.

الاستكمال الخارجي الحدودي: يكون الخطأ في التقريب على القيمة I في طريقة شبه المنحرف في الفاصل حدودياً h^2 ، أي:

$$I = T^N + \varepsilon^N$$

حيث:

$$\varepsilon^N \cong P(h^2(N))$$

و:

P : حدودية مجهولة.

وتعتبر كذلك متتالية التقريبات بطريقة شبه المنحرف، $T^N = \varepsilon^N$ حدودية أيضاً عند h^2 وبالتالي يمكن استعمال استكمال حدودي لتقدير الفاصل عندما تكون $h \rightarrow 0$. وإذا توفرت m من التقريبات بطريقة شبه المنحرف، يمكن لنا أن نقوم بتمرير حدودية واحدة لا أكثر من الدرجة $M - 1$ بواسطة النقاط $(h^2(n), T^n)$ بالنسبة إلى $n = 1, 2, 4, 8, \dots, 2^{M-1}$. ويعبّر تقييم هذه الحدودية الفريدة في شكل $h = 0$ عن تقريب لحدود طريقة شبه المنحرف.

وتستعمل عادة طريقة نيفيل (Neville) لحساب قيمة الحدودية عند $h = 0$. وهذه الطريقة فعالة وتمكّن من الحصول على تقدير للخطأ يمكن استعماله لإنهاء تكامل رومبرغ. وهي تقريب بواسطة الاستكمالات الداخلية الخطية المتتابعة لحدودية الاستكمال الداخلي للاغرانج من درجة أعلى. ويمكن أن توصف طريقة لاغرانج كما يلي: بالنسبة إلى $M + 1$ من النقاط (x_i, y_i) ، تعرّف حدودية من الدرجة m بوصفها توليفة خطية تتألف من الدوال الأساسية:

$$P(x) \equiv \sum_{i=0}^n y_i L_i(x_i) \equiv \sum_{i=0}^n y_i \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^n \frac{(x - x_k)}{(x_i - x_k)}$$

أي

$$L_i(x) = \frac{(x - x_0) \cdots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \cdots (x - x_n)}{(x_i - x_0) \cdots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \cdots (x_i - x_n)}$$

وينبغي في طريقة الاستكمال الداخلي هذه معرفة كل الإحداثيات الرأسية y_i حتى يتسنى إيجاد تقدير للحل عند $x = 0$ ، أما بالنسبة إلى المشكلات المعقدة فإن هذه الطريقة غير فعالة نظراً لأنها لا تستغل الاستكمالات الداخلية السابقة المتعلقة بالتكرار نحو رتب أعلى. وطريقة نيفيل عملية تكرارية تستند إلى العلاقة بين تقريب حدودية ما والتقريبين السابقين لهذه الحدودية. وهكذا، هنالك حدودية فريدة من الدرجة 0 بالنسبة إلى نقطتين (x_k, y_k) أي خط مستقيم يمر بين هاتين النقطتين $P_k = y_k$. ونجري تكراراً ثانياً

يتم فيه تمرير الحدودية بواسطة زوجين من النقاط يعطيان بواسطة P_{12}, P_{23}, \dots ، ونكرر هذا الإجراء عدة مرات للحصول على بناء هرمي من التقريبات:

$$\begin{array}{cccc} P_1 & & & \\ & P_{12} & & \\ P_2 & & P_{123} & \\ & P_{23} & & P_{1234} \\ P_3 & & P_{234} & \\ & P_{34} & & \\ P_4 & & & \end{array}$$

ويمكن تمثيل النتيجة النهائية كما يلي:

$$P_{i(i+1)\dots(i+m)} = \frac{(x - x_{i+m})P_{i(i+1)\dots(i+m-1)} + (x_i - x)P_{(i+1)(i+2)\dots(i+m)}}{x_i - x_{i+m}}$$

وهكذا، فإن طريقة نيفل هي عملية تكرارية تسمح ببناء الهرم، عموداً تلو الآخر، بصورة حسابية فعالة.

وعملياً يصبح الاستكمال الخارجي الحدودي غير مستقر عندما نمرر الحدودية بعدد كبير من النقاط، ولذلك نستعمل عادة في تكامل رومبرغ استكمالاً خارجياً حدودياً من الدرجة الرابعة يقابل التقريبات الخمسة الأخيرة بطريقة شبه المنحرف.

وفي طرق التكامل العددي مثل تلك التي تستعمل تقنيات تنصيف فاصل التكامل، تستمر عمليات التكرار حتى الحصول على معيار معين من الدقة، وينتهي التكرار عندما يصبح الفرق بين عمليات التكرار المتعاقبة أصغر من جزء معرف مسبقاً من النتيجة السابقة. وعموماً يكون هذا الجزء بين 10^{-3} و 10^{-6} ، وتكون القيمة الأخيرة قريبة من قدرات وحدات المعالجة بمعدل 32 بتة. وينبغي توخي الحذر عند استعمال قيم أكبر من هذا المدى نظراً إلى إمكانية ارتفاع أخطاء القيم المحسوبة لخسارة التوهين. وعموماً تعتبر القيمة 10^{-4} حلاً وسطاً بين الدقة وسرعة الحساب.

ويحتاج الأمر إلى ثلاث عمليات تكامل عديدة متداخلة لإجراء تكامل حتمي ثلاثي الأبعاد على خلية المطر، في إحداثيات أسطوانية، ويحدث التكامل الخارجي على معلمة الارتفاع h ، مثلاً. كما يحدث التكامل على معلمة السم ϕ بالنسبة إلى قيمة h ، وعلى معلمة نصف القطر r فيما يتعلق بقيم حدودية (ϕ, h) .

وجدير بالملاحظة أنه يتعين عموماً إجراء عدة عمليات تكرارية لدالة نقل الانتثار للحصول على الدقة المنشودة، ولا سيما في الحالات التي يكون فيها كسب الهوائي مرتفعاً وعندما يتراوح تغير الناتج المتجهي لكسب الهوائي بين 60 dB أو أكثر على طول قطر خلية المطر. وقد يستغرق الحساب بالتالي عشرات الدقائق، بل بضع ساعات في الحالات القصوى، حتى باستخدام وحدات معالجة سريعة جداً.

الخطوة 8: تحديد عوامل أخرى للخسارة

يُحسب الانحراف بالنسبة إلى انتشار رايلي (Rayleigh) باستعمال المعادلة (76) على أساس زاوية انتشار ϕ_s تُعطىها المعادلة (91).

يُحسب التوهين على طول المسيرات الناجم عن الامتصاص بواسطة الغازات الجوية (الملحق 2 من التوصية ITU-R P.676) بالنسبة إلى معاملي التوهين γ_0 و γ_w والارتفاعات المكافئة h_0 و h_w ، بالنسبة إلى الهواء الجاف وبخار الماء على التوالي. ويُحدد التوهين بواسطة العبارات التالية فيما يتعلق بتوهين المسير بين ارتفاعين فوق مستوى سطح البحر، وتحدد القيمة الأعلى بارتفاع نقطة شبه التقاطع بين محوري الحزمتين الرئيسيتين للهوائيين. وتعتبر هذه الطريقة عملية تقريبية نظراً إلى أن التوهين الفعلي بواسطة الغازات يتغير بالنسبة إلى كل عنصر انتشار في حجم الانتثار. ولكن نظراً إلى أن التوهين بواسطة الغازات يمثل عادة نصيباً ضئيلاً من خسارة الإرسال الإجمالية وأنه لا يتغير إلا قليلاً بالمقارنة مع الارتفاع الذي يميز بعض المعالم الأخرى مثل معدلات هطول المطر وارتفاعات المطر أو هندسة خلية المطر ذاتها، فإن هذا التبسيط يعتبر مبرراً. وتسمح الطريقة التالية بتقديرات التوهين بالغازات بدقة مقبولة بالنسبة إلى الإجراء الإجمالي.

وتُعطى الارتفاعات الأدنى بالنسبة إلى كل محطة بواسطة القيم المحلية $h_{2_loc} = h_{1_loc}$ ويمثل الارتفاع الأعلى h_p ارتفاع نقطة شبه التقاطع، مع مراعاة انحناء الأرض، أي القيمة المحلية التي يتم الحصول عليها من:

$$(139) \quad h_p = h_0 + \sqrt{d_1^2 + r_{eff}^2} - r_{eff} + h_c \quad \text{km}$$

وبالنسبة إلى زوايا الارتفاع التي تتراوح بين 5° و 90°، يتحدد التوهين بين ارتفاعين على أساس الفرق بين مجموع التوهين على المسير المائل في كل ارتفاع:

$$(140) \quad A_{o_i} = \frac{\gamma_o h_o - \gamma_o h_o \left[\exp\left(-\frac{h_{i_loc}}{h_o}\right) - \exp\left(-\frac{h_p}{h_o}\right) \right]}{\sin \varepsilon_{i_loc}} \quad \text{dB}$$

$$(141) \quad A_{w_i} = \frac{\gamma_w h_o - \gamma_w h_o \left[\exp\left(-\frac{h_{i_loc}}{h_w}\right) - \exp\left(-\frac{h_p}{h_w}\right) \right]}{\sin \varepsilon_{i_loc}} \quad \text{dB}$$

حيث يشير الدليل i إلى كل من المحطتين و ε_{i_loc} إلى زاوية الارتفاع المحلي لكل هوائي.

وتكون كثافة بخار الماء، ρ ، المستعملة لتحديد معامل التوهين γ_w هي القيمة الافتراضية عند مستوى سطح البحر المحسوبة من القيمة عند مستوى الأرض بالنسبة إلى المحطات (ويمكن أن نفترض أن تكون هذه القيمة هي ذاتها):

$$(142) \quad \rho = \rho_g \exp\left(\frac{h_{i_loc}}{2}\right) \quad \text{g/m}^3$$

وفيما يتعلق بزوايا ارتفاع تتراوح بين 0° و 5°، ينبغي أن تؤخذ في الاعتبار آثار الانكسار. وتُحدد زوايا الارتفاع بالنسبة إلى المسير الأعلى من:

$$(143) \quad \varepsilon'_i = \arccos\left(\frac{h_1 + r_{eff}}{h_p + r_{eff}} \cos \varepsilon_{i_loc}\right)$$

وهكذا تقدر خسارة المسير على النحو التالي.

بالنسبة إلى التوهين الناتج عن الهواء الجاف:

$$(144) \quad A_{o_i} = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{h_{i_loc} + r_{eff}} \cdot F\left(\tan \varepsilon_i \sqrt{\frac{h_{i_loc} + r_{eff}}{h_o}}\right) \exp\left(-\frac{h_{i_loc}}{h_o}\right)}{\cos \varepsilon_{i_loc}} - \frac{\sqrt{h_p + r_{eff}} \cdot F\left(\tan \varepsilon'_i \sqrt{\frac{h_p + r_{eff}}{h_o}}\right) \exp\left(-\frac{h_p}{h_o}\right)}{\cos \varepsilon'_i} \right] \quad \text{dB}$$

وبالنسبة إلى التوهين الناتج عن بخار الماء:

$$(145) \quad A_{w_i} = \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{h_{i_loc} + r_{eff}} \cdot F \left(\tan \varepsilon_i \sqrt{\frac{h_{i_loc} + r_{eff}}{h_w}} \right) \exp \left(-\frac{h_{i_loc}}{h_w} \right)}{\cos \varepsilon_{i_loc}} - \frac{\sqrt{h_p + r_{eff}} \cdot F \left(\tan \varepsilon'_i \sqrt{\frac{h_p + r_{eff}}{h_w}} \right) \exp \left(-\frac{h_p}{h_w} \right)}{\cos \varepsilon'_i} \right] \text{ dB}$$

حيث تعرف الدالة F بواسطة:

$$(146) \quad F(x) = \frac{1}{0,661x + 0,339\sqrt{x^2 + 5,51}}$$

ويراعى كذلك أي قدر من عدم مواءمة الاستقطاب M قد يعتبر ملائماً.

الخطوة 9: تحديد التوزيع التراكمي لخسارة الإرسال

تُحسب قيم خسارة الإرسال بالنسبة إلى كل زوج من قيم معدل هطول المطر وارتفاع المطر، وفقاً للخطوات من 5 إلى 8، باستعمال العبارة التالية:

$$(147) \quad L = 208 - 20 \log f - 10 \log Z_R - 10 \log (C_b + C_a) + 10 \log S + A_g - M \quad \text{dB}$$

وبعد تقييم جميع التوليفات الممكنة لمعدل هطول المطر وارتفاع المطر تدور قيم خسارة الإرسال الناتجة (dB) إلى أقرب عدد صحيح كامل (dB) أعلى (باستعمال دالة السقف *ceiling* مثلاً) وتُجمع احتمالات كافة التوليفات (في شكل نسبة مئوية) التي تؤدي إلى نفس الخسارة وذلك لحساب الاحتمال الإجمالي لكل سوية من سويات خسارة الإرسال. ثم تُحول دالة كثافة الاحتمال الناتجة إلى توزيع تراكمي لخسارة الإرسال المقابلة من خلال جمع النسب المئوية المتعلقة بقيم توهين متزايدة.

المرفق 1

للملحق 1

بيانات الأرصاد الجوية الراديوية اللازمة لإجراء التنبؤ في الجو الصافي

1 مقدمة

يستند إجراء التنبؤ في الجو الصافي إلى بيانات الأرصاد الجوية الراديوية من أجل تحديد التغير بحكم الموقع. وتقدم هذه البيانات على شكل خرائط واردة في هذا المرفق.

2 خرائط التغير الرأسي لبيانات الانكسار الراديوي وانكسارية سطح الأرض

تكون خصائص بيانات الأرصاد الجوية للمسير في الجو الصافي، في الإجراء العام، وبالنسبة إلى آليات التداخل المستمرة (طويلة الأجل) هي القيمة المتوسطة السنوية ΔN (معدل تفاوت دليل الانكسار على الكيلومتر الأول من الجو) وبالنسبة إلى آليات التداخل الشاذ (قصير الأجل) هي النسبة المئوية من الوقت $\beta_0\%$ التي يكون فيها تدرج دليل الانكسار في الجو المنخفض أقل من $(N - \text{units}/\text{km } 100)$. وتشكل هاتان المعلمتان قاعدة معقولة لبناء نموذج آليات الانتشار في الجو الصافي الموصوفة في الفقرة 2 من الملحق 1. وتستخدم قيمة متوسط الانكسارية للسطح عند مستوى البحر، N_0 ، في حساب نموذج الانتشار التروبوسفيري.

وإذا لم تكن القياسات المحلية متوفرة، يمكن الحصول على هذه الكميات من الخرائط المتضمنة في المنتجات الرقمية المكتملة الواردة مع هذه التوصية في الملف [REC-P.452-16 Supplement ZIP](#) المضغوط بطريقة zip. وقد اشتقت هذه الخرائط الرقمية من تحليل أجري على مدى عشر سنوات (1983-1992) لمجموعة عالمية من بيانات صعود المسبارات الراديوية. وترد الخرائط في الملفين DN50.txt وN050.tx، على التوالي. وتتراوح البيانات من خط الطول 0° إلى 360° ومن خط العرض 90+° إلى 90-°، باستثناء قدرها 1,5° لكل من خط الطول وخط العرض. وتستخدم البيانات بالترافق مع ملفي البيانات المرافقين LAT.txt وLON.txt اللذين يحتويان على خطوط طول وخطوط عرض البنود المقابلة (النقاط الشبكية) في الملفين DN50.txt وN050.tx. وبالنسبة إلى موقع مختلف عن النقاط الشبكية، يمكن اشتقاق المعلمة عند الموضع المطلوب بإجراء استكمال داخلي ثنائي الخطية للقيم الواقعة عند أقرب أربع نقاط شبكية، كما هو وارد في التوصية ITU-R P.1144.

المرفق 2

للملحق 1

تحليل المظهر الجانبي للمسير

1 مقدمة

يتطلب تحليل المظهر الجانبي للمسير توفير مظهر جانبي لارتفاعات التضاريس الأرضية على طول المسير فوق مستوى البحر. ويقدم الجدول 7 المعلومات الواجب اشتقاقها من تحليل المظهر الجانبي للمسير من أجل أهداف نماذج الانتشار.

2 رسم المظهر الجانبي للمسیر

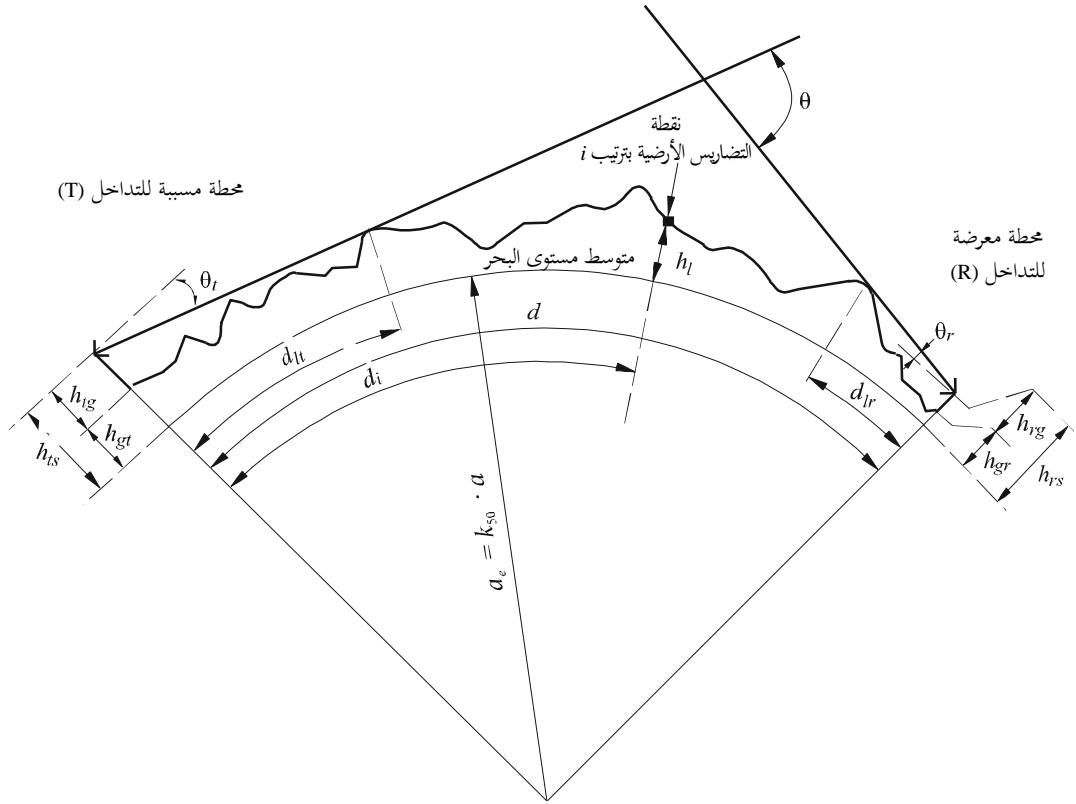
استناداً إلى الإحداثيات الجغرافية للمحطة المسببة للتداخل (ϕ_r, ψ_r) والمحطة المعرضة للتداخل (ϕ_i, ψ_i)، يجب أن تشتق ارتفاعات التضاريس الأرضية (فوق متوسط مستوى البحر) على طول مسير الدائرة العظمى من قاعدة بيانات طوبوغرافية أو من خرائط مناسبة واسعة النطاق للأكفة. وينبغي أن تلتقط المسافة ما بين نقاط المظهر الجانبي، كلما أمكن ذلك عملياً، الخصائص الدلالية للتضاريس الأرضية. وعموماً تعد زيادات أخرى للمسافة تتراوح بين 30 m و 1 km ملائمة. وينبغي للمظهر الجانبي أن يشمل ارتفاع الأرض عند موقعي المحطة المسببة للتداخل والمحطة المعرضة للتداخل باعتبارهما نقطتي المغادرة والوصول. وتراعي المعادلات التالية انحناء الأرض عند الاقتضاء استناداً إلى قيمة a_e في المعادلة (6a).

ورغم أنه من المفضل استعمال نقاط مظهر جانبي متساوية التباعد، فمن الممكن استعمال هذه الطريقة مع نقاط مظهر جانبي غير متساوية التباعد. وقد يكون ذلك مفيداً عندما يستخلص المظهر الجانبي من خريطة رقمية ترتبط أكفتها بارتفاعات التضاريس الأرضية. إلا أنه ينبغي الإشارة إلى أن التوصية قد أعدت استناداً إلى اختبارات تستعمل نقاط مظهر جانبي متساوية التباعد ولا تتوفر أي معلومات عن تأثير النقاط غير متساوية التباعد على الدقة.

ولأغراض هذه التوصية، تعتبر نقطة المظهر الجانبي للمسیر المقابلة للمحطة المسببة للتداخل النقطة صفر، بينما تعتبر النقطة المقابلة للمحطة المعرضة للتداخل النقطة n . وبهذا يتشكل المظهر الجانبي للمسیر من $n + 1$ نقطة. ويعطي الشكل 11 مثلاً للمظهر الجانبي للمسیر عبر ارتفاعات التضاريس الأرضية فوق متوسط مستوى البحر مبيناً العلامات المختلفة المتعلقة بالتضاريس الأرضية المعنية.

الشكل 11

مثال للمظهر الجانبي لمسیر (عبر الأفق)



الملاحظة 1 - تكون قيمة θ كما هي مرسومة قيمة سالبة.

ويعرّف الجدول 7 المعلمات المستعملة أو المشتقة أثناء تحليل المظهر الجانبي للمسير.

الجدول 7

تعريف معلمات المظهر الجانبي للمسير

المعلمة	الوصف
a_e	نصف قطر الأرض الفعال (km)
d	مسافة مسير الدائرة العظمى (km)
d_i	المسافة على الدائرة العظمى بين النقطة من الرتبة i في التضاريس الأرضية والمحطة المسببة للتداخل (km)
d_{ii}	المسافة التدريجية المستعملة في بيانات المظهر الجانبي للمسير المنتظم (km)
f	التردد (GHz)
λ	طول الموجة (m)
h_{ts}	ارتفاع هوائي المحطة المسببة للتداخل (m) فوق متوسط مستوى البحر (amsl)
h_{rs}	ارتفاع هوائي المحطة المعرضة للتداخل (m) فوق متوسط مستوى البحر
θ_t	زاوية ارتفاع الأفق فوق خط الأفق المحلي (mrad) مقيسة من هوائي المحطة المسببة للتداخل
θ_r	زاوية ارتفاع الأفق فوق خط الأفق المحلي (mrad) مقيسة من هوائي المحطة المعرضة للتداخل
θ	المسافة الزاوية للمسير (mrad)
h_{st}	ارتفاع "الأرض المنتظمة" فوق متوسط مستوى البحر عند موقع المحطة المسببة للتداخل (m)
h_{sr}	ارتفاع "الأرض المنتظمة" فوق متوسط مستوى البحر عند موقع المحطة المعرضة للتداخل (m)
h_i	ارتفاع النقطة من الرتبة i في التضاريس الأرضية فوق متوسط مستوى البحر (m) : h_0 ارتفاع المحطة المسببة للتداخل : h_n ارتفاع المحطة المعرضة للتداخل
h_m	وعورة التضاريس الأرضية (m)
h_{te}	الارتفاع الفعال للهوائي المسبب للتداخل (m)
h_{re}	الارتفاع الفعال للهوائي المعرض للتداخل (m)

3 طول المسير

يمكن استخلاص طول المسير باستعمال هندسة الدائرة العظمى من الإحداثيات الجغرافية للمحطة المسببة للتداخل (ψ_t, ϕ_t) والمحطة المعرضة للتداخل (ψ_r, ϕ_r) . وكبدليل لذلك يمكن استخلاص طول المسير من المظهر الجانبي للمسير. ويمكن بصفة عامة استخلاص طول المسير d (km) من بيانات المظهر الجانبي للمسير:

$$(148) \quad d = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) \quad \text{km}$$

غير أن هذه العبارة تبسّط في بيانات المظهر الجانبي للمسير المنتظم التباعد على النحو التالي:

$$(149) \quad d = n \cdot d_{ii} \quad \text{km}$$

حيث d_{ii} هي الزيادة التدريجية في مسافة المسير (km).

4 تصنيف المسيرات

يجب ألا يصنف المسير تبعاً لخط البصر أو عبر الأفق إلا لأغراض تحديد المسافتين d_{lr} و d_{li} وزاويتي الارتفاع θ_r و θ_i ، انظر أدناه. يجب أن يستعمل المظهر الجانبي للمسير لتحديد المسير في خط البصر أو عبر الأفق استناداً إلى نصف قطر الأرض الفعال a_e كما في المعادلة (6a).

يكون المسير عبر الأفق إذا كانت زاوية ارتفاع الأفق المادي مرئية من الهوائي المسبب للتداخل (بالنسبة إلى خط الأفق المحلي) أكبر من الزاوية المرئية من الهوائي المعرض للتداخل (أيضاً بالنسبة إلى خط الأفق المحلي لمسبب التداخل). ويكون الاختبار الخاص بشروط المسير عبر الأفق على النحو التالي:

$$(150) \quad \theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{mrad}$$

حيث:

$$(151) \quad \theta_{max} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad}$$

θ_i : زاوية الارتفاع بالنسبة إلى النقطة من الرتبة i في التضاريس الأرضية

$$(152) \quad \theta_i = 1000 \arctan \left(\frac{h_i - h_{ts}}{10^3 d_i} - \frac{d_i}{2 a_e} \right) \quad \text{mrad}$$

حيث:

h_i : ارتفاع النقطة من الرتبة i في التضاريس الأرضية (m) فوق متوسط مستوى البحر

h_{ts} : ارتفاع الهوائي المسبب للتداخل (m) فوق متوسط مستوى البحر

a_e : المسافة بين المحطة المسببة للتداخل والنقطة من الرتبة i في التضاريس الأرضية (km).

$$(153) \quad \theta_{td} = 1000 \arctan \left(\frac{h_{rs} - h_{ts}}{10^3 d} - \frac{d}{2 a_e} \right) \quad \text{mrad}$$

حيث:

h_{rs} : ارتفاع الهوائي المعرض للتداخل (m) فوق متوسط مستوى البحر

d : المسافة الكلية لمسير الدائرة العظمى (km)

a_e : متوسط نصف قطر الأرض المناسب للمسير (المعادلة (6a)).

5 اشتقاق المعلمات من المظهر الجانبي للمسير

1.5 المسيرات عبر الأفق

يعرض الجدول 7 المعلمات الواجب اشتقاقها من المظهر الجانبي للمسير.

1.1.5 زاوية ارتفاع الأفق لهوائي المحطة المسببة للتداخل، θ_i

زاوية ارتفاع الأفق لهوائي المحطة المسببة للتداخل هي أقصى زاوية لارتفاع أفق الهوائي عندما تطبق المعادلة (151) على ارتفاعات المظهر الجانبي للتضاريس الأرضية $n - 1$.

$$(154) \quad \theta_t = \theta_{max} \quad \text{mrad}$$

وتكون θ_{max} كما هي محددة في المعادلة (151).

2.1.5 مسافة أفق الهوائي المسبب للتداخل، d_{it}

مسافة الأفق هي أدنى مسافة من المرسل حيث تحسب أقصى زاوية لارتفاع أفق الهوائي وفقاً للمعادلة (151).

$$(155) \quad d_{it} = d_i \quad \text{km} \quad \text{for max } (\theta_i)$$

3.1.5 زاوية ارتفاع أفق الهوائي المعرض للتداخل، θ_r

زاوية ارتفاع أفق هوائي الاستقبال هي أقصى زاوية لارتفاع أفق الهوائي عندما تطبق المعادلة (151) على ارتفاعات المظهر الجانبي للتضاريس الأرضية $n - 1$.

$$(156) \quad \theta_r = \max_{j=1}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad}$$

$$(157) \quad \theta_j = 1000 \arctan \left(\frac{h_j - h_{rs}}{10^3(d - d_j)} - \frac{(d - d_j)}{2 a_e} \right) \quad \text{mrad}$$

4.1.5 مسافة أفق الهوائي المعرض للتداخل، d_{ir}

مسافة الأفق هي أدنى مسافة من المستقبل حيث تحسب أقصى زاوية لارتفاع أفق الهوائي وفقاً للمعادلة (151).

$$(158) \quad d_{ir} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{for max } (\theta_j)$$

5.1.5 المسافة الزاوية θ (mrad)

$$(159) \quad \theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad}$$

6.1.5 نموذج "الأرض المستوية" وارتفاعات الهوائي الفعالة

1.6.1.5 اعتبارات عامة

"السطح المستوي" هو سطح مستخلص من المظهر الجانبي لحساب ارتفاعات الهوائي الفعالة لنموذج الانعراج وكذلك لإجراء تقييم لوعورة المسير، وهما أمران يتطلبهما نموذج الانتشار الموجة/الانعكاس على الطبقات. وتختلف تعاريف ارتفاع الهوائي الفعّال في هذين الغرضين. وتصف الفقرة الفرعية 2.6.1.5 اشتقاق ارتفاعي سطح الأرض المستوية غير المصححين عند المرسل والمستقبل، وهما h_{st} و h_{sr} على التوالي. ثم تصف الفقرة الفرعية 3.6.1.5 اشتقاق ارتفاعي الهوائي الفعّالين لنموذج الانعراج، h_{std} ، h_{srd} وتصف الفقرة 4.6.1.5 حساب ارتفاعي الهوائي الفعّالين، h_{te} و h_{re} ، ومعلمة وعورة التضاريس، h_m ، لنموذج الانتشار الموجه.

2.6.1.5 اشتقاق سطح الأرض المنتظمة

يشقق تقريب خطي لارتفاع التضاريس الأرضية (m) فوق متوسط مستوى البحر على الشكل التالي:

$$(160) \quad h_{si} = [(d - d_i)h_{st} + d_i h_{sr}] / d \quad \text{m}$$

حيث:

h_{si} : الارتفاع فوق متوسط مستوى البحر (m) للسطح المضبوط بأقل عدد من المربعات عند مسافة d_i (km) من مصدر التداخل

h_{st} : الارتفاع فوق متوسط مستوى البحر (m) لسطح الأرض المنتظمة عند نقطة أصل المسير أي عند المحطة المسببة للتداخل

h_{sr} : الارتفاع فوق متوسط مستوى البحر (m) لسطح الأرض المنتظمة عند نهاية المسير أي عند محطة المستقبل.

يحسب h_{st} و h_{sr} كما يلي باستخدام المعادلات (161)-(164):

$$(161) \quad v_1 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1})$$

حيث:

h_i : الارتفاع الحقيقي للنقطة من الرتبة i في التضاريس الأرضية (m) فوق متوسط مستوى البحر

d_i : المسافة من مسبب التداخل إلى النقطة من الرتبة i في التضاريس الأرضية (km):

$$(162) \quad v_2 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1})[h_i(2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1}(d_i + 2d_{i-1})]$$

ويعطى ارتفاع سطح الأرض المنتظمة عند المحطة المسببة للتداخل h_{st} :

$$(163) \quad h_{st} = \left(\frac{2v_1 d - v_2}{d^2} \right) \quad \text{m}$$

ومن ثم، تعطي العبارة التالية ارتفاع سطح الأرض المنتظمة عند المحطة المعرضة للتداخل h_{sr} :

$$(164) \quad h_{sr} = \left(\frac{v_2 - v_1 d}{d^2} \right) \quad \text{m}$$

3.6.1.5 ارتفاعا الهوائي الفعالين لنموذج الانعراج

يحدد 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:

$$(165a) \quad h_{obs} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i\} \quad \text{m}$$

$$(165b) \quad \alpha_{obt} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i / d_i\} \quad \text{mrad}$$

$$(165c) \quad \alpha_{obr} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i / (d - d_i)\} \quad \text{mrad}$$

حيث:

$$(165d) \quad H_i = h_i - [h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i] / d \quad \text{m}$$

وتُحسب القيم المؤقتة لارتفاعات السطح الأملس في طرفي الإرسال والاستقبال للمسير:
إذا كان h_{obs} أقل من الصفر أو يساويه، عندئذ:

$$(166a) \quad h_{stp} = h_{st} \quad (\text{m}) \text{ masl}$$

$$(166b) \quad h_{srp} = h_{sr} \quad (\text{m}) \text{ masl}$$

وإلا:

$$(166c) \quad h_{stp} = h_{st} - h_{obs}g_t \quad (\text{m}) \text{ masl}$$

$$(166d) \quad h_{srp} = h_{sr} - h_{obs}g_r \quad (\text{m}) \text{ masl}$$

حيث:

$$(166e) \quad g_t = \alpha_{obt} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr})$$

$$(166f) \quad g_r = \alpha_{obr} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr})$$

وتُحسب القيم النهائية لارتفاعي السطح الأملس في طرفي الإرسال والاستقبال للمسير على النحو المطلوب في نموذج الانعراج:
إذا كان h_{stp} أكبر من h_0 ، عندئذ:

$$(167a) \quad h_{std} = h_0 \quad (\text{m}) \text{ masl}$$

وإلا:

$$(167b) \quad h_{std} = h_{stp} \quad (\text{m}) \text{ masl}$$

إذا كان h_{srp} أكبر من h_n ، عندئذ:

$$(167c) \quad h_{srd} = h_n \quad (\text{m}) \text{ masl}$$

وإلا:

$$(167d) \quad h_{srd} = h_{srp} \quad (\text{m}) \text{ masl}$$

4.6.1.5 معلمات نموذج الانتشار التروبوسفيري الموجه/الانعكاس على الطبقات

يُحسب ارتفاعا الأرض الملساء عند المرسل والمستقبل على النحو المطلوب من أجل عامل الوعورة كما يلي:

$$(168a) \quad h_{st} = \min(h_{st}, h_0) \quad \text{m}$$

$$(168b) \quad h_{sr} = \min(h_{sr}, h_n) \quad \text{m}$$

وإذا تم تصحيح أحد الارتفاعين h_{st} أو h_{sr} أو كليهما بواسطة المعادلة (168a) أو (168b)، فيجب عندها أن يصحح أيضاً ميل سطح الأرض الأملس، m ، كالتالي:

$$(169) \quad m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km}$$

ويتم الحصول على الارتفاعين الفعالين للمطرفين في نموذج الانتشار التروبوسفيري الموجه/الانعكاس على الطبقات، h_{re} و h_{te} بالمعادلتين:

$$(170) \quad h_{te} = h_{tg} + h_0 - h_{st} \quad \text{m}$$

$$h_{re} = h_{rg} + h_n - h_{sr} \quad \text{m}$$

معلمة وعورة التضاريس الأرضية h_m (m) هي أقصى ارتفاع للتضاريس الأرضية فوق سطح الأرض المستوية في قسم المسير الواقع بين نقطتي الأفق، حصراً:

$$(171) \quad h_m = \max_{i=i_{lr}}^{i_{lr}} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad m$$

حيث:

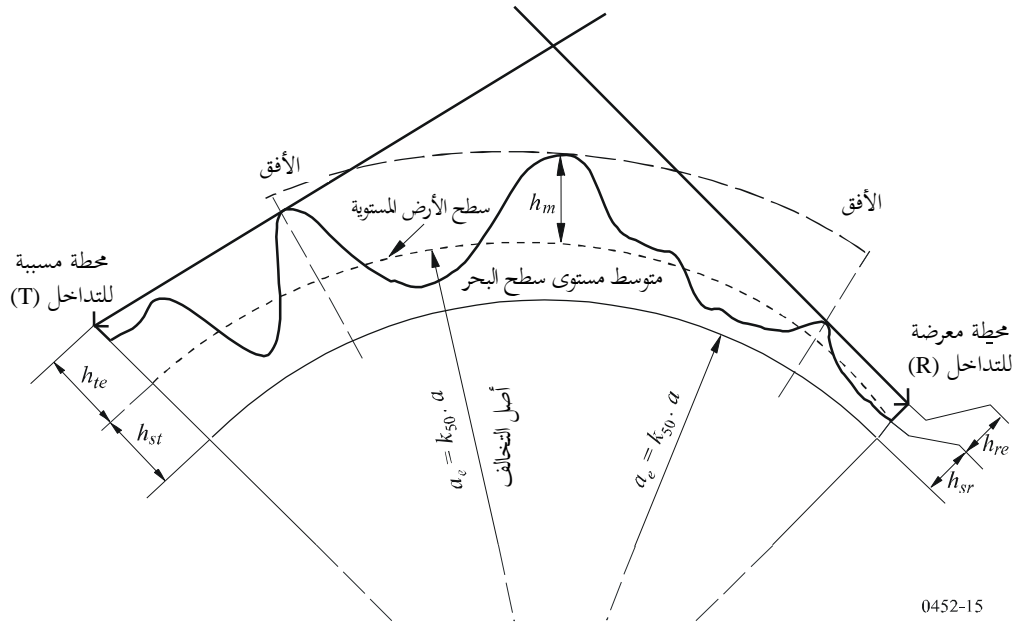
i_{lr} : دليل نقطة المظهر الجانبي عند مسافة d_{lr} من المرسل

i_{lr} : دليل نقطة المظهر الجانبي عند مسافة d_{lr} من المستقبل.

ويمثل الشكل 12 سطح الأرض المستوية ومعلمة وعورة التضاريس الأرضية h_m .

الشكل 12

مثال لسطح الأرض المستوية ومعلمة وعورة التضاريس الأرضية



المرفق 3 للملحق 1

تقريب لدالة التوزيع العادي التراكمي العكسي للقيمة $x \leq 0,5$

يكون التقريب التالي لدالة التوزيع العادي التراكمي العكسي صحيحاً للقيمة $0,000001 \leq x \leq 0,5$ ويكون أقصى مقدار للخطأ $0,00054$. ويمكن الوثوق في استخدامه لحساب دالة الاستكمال الداخلي كما ورد في المعادلة (41b). وإذا كانت $x < 0,000001$ مما يعني أن $\beta_0 < 0,0001\%$ عندئذ يجب ضبط x لتكون $0,000001$. وتستخلص الدالة $I(x)$ كالتالي:

$$(172) \quad I(x) = \xi(x) - T(x)$$

حيث:

$$(172a) \quad T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]}$$

$$(172b) \quad \xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2)T(x) + D_1]T(x) + 1}$$

$$(172c) \quad C_0 = 2,515516698$$

$$(172d) \quad C_1 = 0,802853$$

$$(172e) \quad C_2 = 0,010328$$

$$(172f) \quad D_1 = 1,432788$$

$$(172g) \quad D_2 = 0,189269$$

$$(172h) \quad D_3 = 0,001308$$