الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R P.530-18
(2021/09)

بيانات الانتشار وطرائق التنبؤ المطلوبة لتصميم أنظمة راديوية للأرض في خط البصر

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 لمدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها.

ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

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 الكهرتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في القرار 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.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

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

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

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

النشر الإلكتروني
جنيف، 2022

© ITU 2022

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.530-18*

بيانات الانتشار وطرائق التنبؤ المطلوبة لتصميم أنظمة راديوية للأرض في خط البصر

(المسألة ITU-R 204/3)

(2021-2017-2015-2013-2012-2009-2007-2005-2001-2001-1999-1997-1995-1994-1992-1990-1986-1982-1978)

مجال التطبيق

تقدم هذه التوصية طرائق التنبؤ المطلوبة بالنسبة لتأثيرات الانتشار التي ينبغي مراعاتها عند تصميم وصلات ثابتة رقمية في خط البصر في كل من ظروف الجو الصافي وهطول الأمطار. كما أنها تقدم توجيهاً لتصميم الوصلة بإجراءات واضحة خطوة بخطوة بما في ذلك استخدام تقنيات التخفيف لتدنية تشوهات الانتشار. ويعتبر الانقطاع النهائي المتنبأ به أساساً لتوصيات أخرى تتصدى للخطأ في الأداء والتوافر.

مصطلحات أساسية

الخبو، التعزيز، تحسين التنوع، تداخل الاستقطاب المتقاطع

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أنه من الضروري أن تتوفر طرائق التنبؤ والبيانات المناسبة لتخطيط ملائم لأنظمة للأرض في خط البصر؛

ب) أن ثمة طرائق وضعت تسمح بالتنبؤ ببعض أهم المعلمات التي تؤثر في تخطيط الأنظمة للأرض في خط البصر؛

ج) أن هذه الطرائق قد خضعت، بقدر الإمكان، لاختبارات تتعلق بالبيانات المتيسرة المقيسة وتبين أنها ذات دقة متلائمة مع التغيرات الطبيعية في ظواهر الانتشار ومناسبة كذلك لأكثرية التطبيقات الحالية في مجال تخطيط الأنظمة،

توصي

بأن يصار إلى تبني طرائق التنبؤ والتقنيات الأخرى المقدمة في الملحق 1 من أجل التخطيط لأنظمة للأرض في خط البصر في مختلف أمدية المعلمات المشار إليها.

الملحق 1

1 المقدمة

يجب أن يؤخذ في الاعتبار عند تصميم أنظمة المرحلات الراديوية في خط البصر، تأثيرات عدة للانتشار منها التأثيرات التالية:

– خبو الانعراج العائد إلى حجب المسير بعوائق في التضاريس الأرضية في حالات غير مؤاتية للانتشار؛

* أدخلت لجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية تعديلات صياغية على هذه التوصية في عام 2022 طبقاً للقرار ITU-R 1.

- التوهين العائد إلى الغازات الجوية؛
- الخبو العائد إلى تعدد المسيرات في الجو أو إلى تمديد الحزمة (الذي يسمى، عادة في النصوص التقنية الإنكليزية، بإزالة التبئير) المصاحب لطبقات انكسارية شاذة؛
- الخبو العائد إلى تعدد المسيرات بسبب الانعكاس على سطح الأرض؛
- التوهين بالهواطل أو بالجسيمات الصلبة في الجو؛
- تغير زاوية الوصول عند مطراف الاستقبال، وزاوية الانطلاق عند مطراف الإرسال بسبب الانكسار؛
- انخفاض التمييز باستقطاب متقاطع (XPD) في حالات تعدد المسيرات أو الهواطل؛
- تشوه الإشارة بسبب الخبو الانتقائي للترددات والتأخر في الانتشار عبر مسيرات متعددة.

يهدف هذا الملحق في أحد جوانبه إلى تقديم موجز وبخطوة تلو الخطوة لطرائق التنبؤ البسيطة بتأثيرات الانتشار التي يجب أن تؤخذ في الاعتبار في أكثرية الوصلات الثابتة في خط البصر، ومعلومات عن مدى صلاحيتها. وثمة هدف آخر لهذا الملحق يكمن في تقديم معلومات وتقنيات أخرى يمكن التوصية بها في تخطيط الأنظمة للأرض في خط البصر.

ويمكن أن تتمتع طرائق التنبؤ المبنية على شروط مناخية وطبوغرافية محددة داخل الأراضي التابعة لإحدى الإدارات بمزايا عدة بالنسبة إلى الطرائق المقدمة في هذا الملحق.

وباستثناء التداخل الناتج عن انخفاض التمييز بالاستقطاب المتقاطع، لا يعالج هذا الملحق إلا التأثيرات في الإشارة المطلوبة. وتعرِّف الفقرة 6.3.2 نسبة سماح إجمالية لتأثير التداخل بين الأنظمة في الأنظمة الرقمية، غير أن هذه المسألة لم تدرس إلى أبعد من ذلك. وتعالج جوانب أخرى من التداخل في توصيات مختلفة منها:

- التوصية ITU-R P.452 التي تعالج التداخل بين الأنظمة المتعلق بوصلات أخرى للأرض وبمحطات أرضية؛
- التوصية ITU-R P.619 التي تعالج التداخل داخل النظام المتعلق بالمحطات الفضائية.

ويستعمل، لتوفير فائدة مثلى لهذا الملحق، ترتيب للمعلومات وفقاً لتأثيرات الانتشار التي يجب أن تؤخذ في الاعتبار، بدلاً من الآليات المادية التي تسبب مختلف هذه التأثيرات.

وتجدر الإشارة إلى أن عبارة "الشهر الأسوأ" المستعملة في هذه التوصية هي مكافئة لتعبير "أي شهر" (انظر التوصية ITU-R P.581).

1.1 النواتج الرقمية التكميلية

ينبغي ألا تستخدم إلا صيغ الملفات الواردة في هذه التوصية. وتعد هذه الصيغ جزءاً لا يتجزأ من التوصية. ويعطي الجدول 1 تفاصيل عن المنتجات الرقمية المستعملة في هذا الأسلوب. ويتم الاستكمال الداخلي لكل من LogK.csv وdN75.csv لإحداثيات مركز المسير عن طريق الاستكمال الداخلي الثنائي الخط، الذي يرد وصفه في التوصية ITU-R P.1144. ويتم توفير الملفين LatitudeQuarterDegree.csv وLongitudeQuarterDegree.csv لأغراض التسهيل فقط في إجراء الاستكمال (انظر R-REC-P.530-18-202109-I!!ZIP-E.zip).

الجدول 1

المنتجات الرقمية

اسم الملف	المرجع	المنشأ	خط العرض (صفوف)			خط الطول (أعمدة)		
			الصف الأول (درجة شمالاً)	درجة الفصل المداري	عدد الصفوف	الصف الأول (درجة غرباً)	درجة الفصل المداري	عدد الأعمدة
LogK.csv	الفقرة 1.3.2	P.530	90	0,25	721	180	0,25	1441
dN75.csv	الفقرة 1.3.2	P.530	90	0,25	721	180	0,25	1441
LatitudeQuarterDegree.csv	الفقرة 1.3.2	P.530	90	0,25	721	180	0,25	1441
LongitudeQuarterDegree.csv	الفقرة 1.3.2	P.530	90	0,25	721	180	0,25	1441

2 خسارة الانتشار

تمثل خسارة الانتشار على مسير أرضي في خط البصر بالنسبة إلى الخسارة في الفضاء الحر (انظر التوصية ITU-R P.525) مجموع مختلف المساهمات على النحو التالي:

— التوهين العائد إلى الغازات الجوية؛

— خبو الانعراج العائد إلى حجب المسير الكامل أو الجزئي بالعوائق؛

— الخبو العائد إلى تعدد المسيرات، وتمديد الحزمة والتلألؤ؛

— التوهين العائد إلى تغير زاويتي الوصول والانطلاق؛

— التوهين العائد إلى الهواطل؛

— التوهين العائد إلى العواصف الرملية والترابية.

وتمتلك كل من هذه المساهمات خصائصها المميزة وفقاً للتردد وطول المسير والموقع الجغرافي، وتوصف في الفقرات التالية.

ويبدو أحياناً أن تعزيز الانتشار مهم. ويعالج في هذه الحالات وفقاً لخسارة الانتشار المصاحبة له.

1.2 التوهين العائد إلى الغازات الجوية

يظهر دائماً توهين يعود إلى الامتصاص بالأكسجين وبخار الماء، ينبغي إدراجه في حساب خسارة الانتشار الكلية عند الترددات ما فوق 10 GHz تقريباً. ويكون التوهين على مسير طوله d (km)، هو التالي:

$$A_a = \gamma_a \, d \qquad \text{dB} \tag{1}$$

ويحصل على التوهين المعين γ_a (dB/km) بواسطة التوصية ITU-R P.676.

الملاحظة 1 – يستحسن، على مسيرات طويلة عند ترددات فوق 20 GHz تقريباً، أن تؤخذ في الاعتبار الإحصائيات المعروفة حول كثافة بخار الماء ودرجة الحرارة في جوار المسير. وتعطي التوصية ITU-R P.836 بعض المعلومات عن كثافة بخار الماء.

2.2 خبو الانعراج

تسبب التغيرات في شروط الانعراج الجوية تغييرات في نصف قُطر الأرض الفعّال أو في العامل k بالنسبة إلى قيمته المتوسطة 4/3 في الجو المعياري (انظر التوصية ITU-R P.310). وعندما يتميز الجو بانكسار دون معياري كافٍ (قيم موجبة مرتفعة لتدرج دليل الانكسار، وقيم منخفضة للعامل k)، تكون مسيرات الأشعة منحنية على نحو يبدو فيه أن الأرض تحجب المسير المباشر بين المرسل والمستقبل وهذا ما يؤدي إلى نوع الخبو المسمى بخبو الانعراج. وهذا الخبو هو العامل الذي يحدد ارتفاعات الهوائيات.

ويمكن أن تحدد إحصائيات العامل k لنقطة وحيدة انطلاقاً من القياسات أو التنبؤات بتدرج دليل الانكسار في المائة متر الأولى من الجو (انظر التوصية ITU-R P.453، حول تأثيرات الانكسار). ويجب تحديد القيم المتوسطة لهذه الدرجات للحصول على قيمة k الفعّالة لطول المسير المعني، k_e. وتناقش قيم k_e التي يتم تجاوزها أثناء 99,9% من الوقت بالنسبة إلى معيار إفساح المسير في الفقرة التالية.

1.2.2 خسارة الانعراج بالنسبة إلى إفساح المسير

تتعلق خسارة الانعراج بنمط التضاريس الأرضية ونوع النبات. وتتغير خسارة الانعراج، لإفساح معين لمسير الشعاع، من قيمة دنيا في حالة عائق وحيد كحد السكين إلى قيمة قصوى لأرض كروية منتظمة. وتناقش التوصية ITU-R P.526 طرائق حساب خسارة الانعراج لهاتين الحالتين وفي المسيرات عبر تضاريس أرضية غير منتظمة كذلك. ويبين الشكل 1 الحدين الأعلى والأدنى لخسارة الانعراج.

ويمكن الحصول على قيمة تقريبية لخسارة الانعراج على أرض متوسطة في حالة خسائر تفوق 15 dB تقريباً بواسطة المعادلة التالية:

$$A_d = -20\, h / F_1 + 10 \qquad \text{dB} \tag{2}$$

حيث h هو فرق الارتفاع (m) بين حجب المسير الأكثر دلالة ومساره (h تكون سالبة إذا وقعت قمة العائق المعني فوق خط البصر التقديري)، وF_1 هي نصف قُطر أول مجسَّم إهليلجي لفرينل، تعطيه الصيغة التالية:

$$F_1 = 17{,}3\sqrt{\frac{d_1\, d_2}{f d}} \qquad \text{m} \tag{3}$$

مع:

f: التردد (GHz)

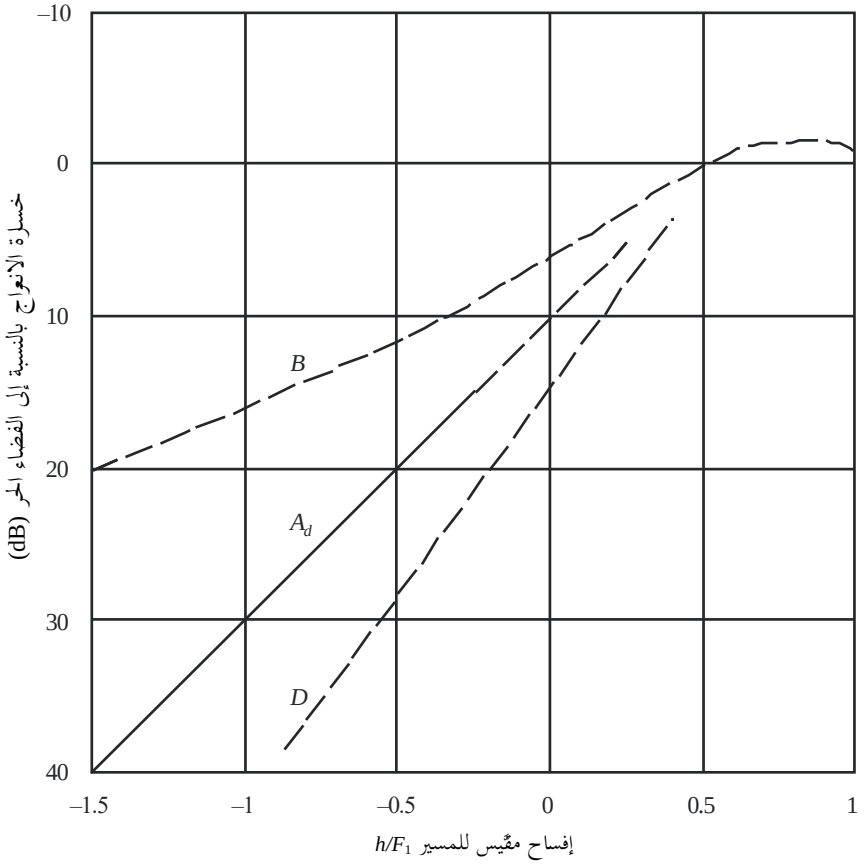
d: طول المسير (km)

d_1 وd_2: المسافتان (km) بين المطرافين ونقطة حجب المسير.

ويبين أيضاً الشكل 1 المنحني A_d، المبني على المعادلة (2). وقد خضع هذا المنحني، الصالح فقط لخسائر أكبر من 15 dB، لاستكمال خارجي حتى قيمة 6 dB للاستجابة لاحتياجات مصممي الوصلات.

الشكل 1

خسارة الانعراج العائدة إلى وجود عوائق على المسيرات الراديوية للموجات الصغرية عند خط البصر



B: منحنى بياني نظري لخسارة عائق كحد السكين

D: منحنى بياني نظري لخسارة أرض كروية منتظمة، عند 6,5 GHz و $k_e = 4/3$

A_d: منحنى بياني تجريبي لخسارة الانعراج التجريبية استناداً إلى المعادلة (2) للتضاريس الأرضية متوسطة الانتظام

h: مقدار إفساح المسير الراديوي إلى سطح الأرض

F_1: نصف قُطر منطقة فرينل الأولى

P.0530-01

2.2.2 معايير التخطيط لإفساح المسير

لقد خُفف في الماضي خبو الانعراج من هذا النمط عند ترددات فوق 2 GHz، من خلال تركيب هوائيات عالية بما يكفي كي لا يقع المستقبل، حتى في حالة أقصى ميل للأشعة، داخل منطقة الانعراج عندما ينخفض نصف قُطر الأرض الفعّال إلى أدنى من قيمته العادية. وتشير نظرية الانعراج إلى أن المسير المباشر بين المرسل والمستقبل يحتاج إلى إفساح فوق الأرض يساوي على الأقل 60% من نصف قُطر منطقة فرينل الأولى كي يحقق شروط الانتشار في الفضاء الحر. وقد عمدت بعض الإدارات في الفترة الأخيرة، مع حصولها على معلومات أوفى حول هذه الآلية وعلى إحصائيات k_e المطلوبة للقيام بتنبؤات إحصائية، إلى تركيز هوائيات عند ارتفاعات تنتج قيمة منخفضة معروفة لفترة الانقطاع.

ويوصى، في غياب إجراء عام يسمح بالتنبؤ بقيمة خسارة الانعراج لنسب مئوية صغيرة مختلفة من الوقت، ومن ثم بتحديد معيار إحصائي لإفساح المسير، أن يتبع الإجراء التالي بالنسبة إلى المناخات المعتدلة والمدارية.

1.2.2.2 تشكيلات هوائيات بدون تنوع مكاني

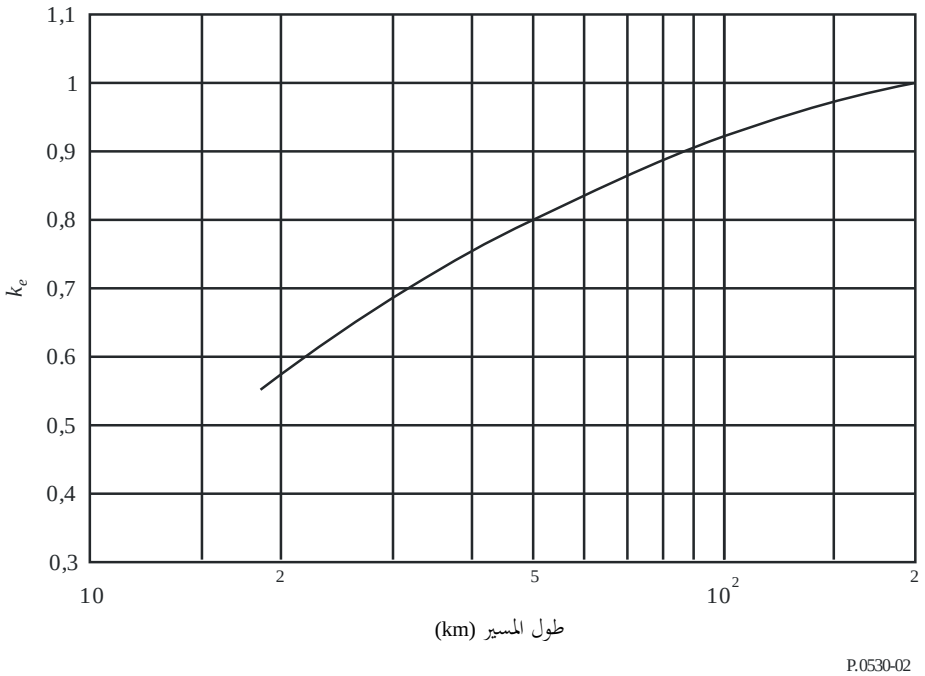
الخطوة 1: يحدد ارتفاع الهوائيات المطلوبة للقيمة المتوسطة المناسبة للعامل النقطي k (انظر الفقرة 2.2؛ يؤخذ k = 4/3 في غياب أية بيانات) والإفساح $1{,}0\ F_1$ فوق أعلى عائق (في المناخات المعتدلة والمدارية).

الخطوة 2: يحصل على قيمة k_e انطلاقاً من الشكل 2، لطول المسير المعني، أو d، أو من:

$$k_e = \frac{157}{144 + {}^{2670}/_{d}} \qquad (4)$$

الشكل 2

قيمة k_e التي يتم تجاوزها أثناء 99,9% تقريباً من أسوأ شهر
(مناخ قاري معتدل)



الخطوة 3: يحسب ارتفاع الهوائيات المطلوب للقيمة k_e المحددة في الخطوة 2 وقيم نصف قُطر إفساح منطقة فرينل التالية:

المناخ المعتدل	المناخ المداري
$0{,}0\ F_1$ (أي ورود تماسي) عندما يكون هناك عائق وحيد معزول على المسير $0{,}3\ F_1$ إذا امتد العائق على طول جزء من المسير	$0{,}6\ F_1$ لمسيرات يفوق طولها 30 km تقريباً

الخطوة 4: تستعمل قيم الارتفاع الأكبر للهوائيات التي حددت في الخطوتين 1 و3 (انظر الملاحظة 1).

ويمكن، في حالة الشك حول نمط المناخ، أن تتبع قاعدة الإفساح الأكثر اعتدالاً (انظر الملاحظة 1) بالنسبة إلى المناخات المدارية، أو على الأقل، قاعدة مبنية على متوسط قيم الإفساح للمناخات المعتدلة والمدارية. وقد يتطلب تجنب استعمال ارتفاعات هوائيات كبيرة غير مقبولة عند الترددات الأدنى من 2 GHz تقريباً، أن تستعمل في الخطوتين 1 و3 قيم كسرية أصغر من F_1.

أما عند ترددات أعلى من 13 GHz تقريباً، فإن دقة تقدير ارتفاع العائق تصبح قريبة من نصف قُطر منطقة فرينل. وينبغي إضافة هذه الدقة إلى الإفساح المذكور أعلاه.

الملاحظة 1 – ينبغي بالرغم من تشدد هذه القواعد بالنسبة لخسارة الانعراج الناجمة عن الخبو في حالات الانكسار دون المعياري أن يكون من الواضح أن المغالاة في التقليل من عدم التيسر الناجم عن خسارة الانعراج في حالات الانكسار دون المعياري قد تؤدي إلى انحطاط أكبر في نوعية الأداء والتيسر في حالات الانتشار في المسيرات المتعددة. ويتعذر حالياً إعطاء معيار عام لحل توافقي بين هاتين الحالتين. غير أن هوامش الحماية من الخبو في النظام قد تصلح لهذه الغاية.

2.2.2.2 تشكيلات ذات هوائيين أو ثلاثة باختلاف مكاني

الخطوة 1: حساب ارتفاع الهوائي الأعلى باتباع إجراء تشكيلة الهوائي الوحيد المذكورة أعلاه.

الخطوة 2: حساب ارتفاع الهوائي الأدنى من أجل القيمة المتوسطة المناسبة للعامل النقطي k (يؤخذ $k = 4/3$ في غياب أية بيانات)، وقيم إفساح منطقة فرينل التالية (انظر الملاحظة 1):

من $0{,}6\ F_1$ إلى $0{,}3\ F_1$ إذا امتد العائق على جزء من المسير؛

من $0{,}3\ F_1$ إلى $0{,}0\ F_1$ إذا كان ثمة عائق واحد أو عائقان معزولين على المسير.

ويمكن، عند الحاجة، اختيار إحدى القيم الدنيا في المديين المشار إليهما أعلاه من أجل تجنب زيادة ارتفاع الأبراج الحالية أو إذا كان التردد أقل من 2 GHz.

ويمكن، أيضاً، اختيار إفساح الهوائي الأدنى على نحو يعطي فيه خسارة انعراج من 6 dB تقريباً، في أثناء شروط الانكسار العادي (أي، في منتصف النهار؛ انظر الفقرة 8)، أو أية قيمة أخرى للخسارة مناسبة لهامش خبو النظام كما تحدده قياسات الاختبار. ويجب أن تتم القياسات في خلال عدة أيام من أجل تجنب شروط انكسار شاذة.

ويمكن، أيضاً، في هذه الحالة البديلة، أن تقدر خسارة الانعراج بواسطة الشكل 1 أو المعادلة (2).

الخطوة 3: التأكد من أن المباعدة بين الهوائيين تستجيب لشروط الاختلاف المكاني ضمن شروط الخبو بسبب تعدد المسيرات (انظر الفقرة 1.2.6). وإذا لم يتحقق ذلك، يصار إلى تعديل المباعدة، وفقاً للحالة.

الملاحظة 1 – تم اختيار أمدية الإفساح هذه بحيث يتراوح مدى خسارة الانعراج بين 3 dB تقريباً و6 dB وتتناقص حالات الخبو بسبب المسيرات المتعددة على سطح الأرض (انظر الفقرة 3.1.6). وبالتأكيد لا تسمح خصائص بعض المسيرات بمثل هذا التناقص في الإفساح لذا ينبغي إيجاد وسائل أخرى لتحسين تأثيرات الخبو الناجم عن المسيرات المتعددة.

وفيما يخص المسيرات التي يرصد فيها وجود سطح عاكس خطير واحد أو أكثر يسبب حالات خبو المسيرات المتعددة على السطح (مسيرات فوق سطح الماء أو في سطوح مستوية جداً) يستحسن أولاً حساب ارتفاع الهوائي الأعلى باستعمال الطريقة المذكورة في الفقرة 1.2.2.2 ثم حساب أدنى مباعدة مثلى لهوائي الاختلاف المكاني، وذلك من أجل تأمين حماية من الانتشار في المسيرات المتعددة على سطح الأرض (انظر الفقرة 3.1.6).

وقد يكون من الضروري في الحالات القصوى (مثل المسيرات الطويلة فوق الماء) استعمال تشكيلات التنوع المكاني مع ثلاثة هوائيات. ويستند إفساح الهوائي الأدنى في هذه الحالة على القاعدة المشار إليها في الخطوة 2، مع العلم بأن الإفساح بالنسبة إلى الهوائي الوسطي قائم على شرط المباعدة المثلى مع الهوائي الأعلى من أجل تحسين تأثيرات الانتشار بالمسيرات المتعددة على سطح الأرض (انظر الفقرة 1.2.6).

3.2 الخبو والتعزيز العائدان لتعدد المسيرات وللآليات ذات الصلة

يجب أن تؤخذ في الاعتبار عدة آليات خبو في جو صافٍ تسببها طبقات جوية شديدة الانكسار، عند تخطيط وصلات راديوية يفوق طولها بضع الكيلومترات؛ وهذه الآليات هي تمديد الحزمة (المعروفة عادة في النصوص الإنكليزية التقنية بإزالة التبئير) وفك اقتران الهوائيات والانتشار السطحي عبر مسيرات متعددة والانتشار الجوي عبر مسيرات متعددة. ويمكن أن تحدث غالبية هذه الآليات بشكل مستقل أو بالائتلاف فيما بينها (انظر الملاحظة 1). ويحدث شكل قوي جداً من الخبو الانتقائي للترددات عندما ينضم تمديد حزمة الإشارة المباشرة مع انعكاس للإشارة على سطح الأرض فينتج خبواً بسبب تعدد المسيرات. ويرافق دائماً هذه الآليات خبو بسبب التلألؤ يعود إلى عدم الانتظام وإلى اضطرابات جوية ضيقة النطاق، لكن تأثيره في توزيع الخبو الإجمالي يبقى غير ذي أهمية عند ترددات تحت 40 GHz تقريباً.

الملاحظة 1 – يحدد فك اقتران الهوائيات أدنى عرض لحزمة الهوائيات الذي يجب اختياره.

تعرض الفقرة 1.3.2 طريقة للتنبؤ بتوزيع الخبو الشديد العمق بتردد واحد (أو بنطاق ضيق) في متوسط الشهر الأسوأ في أي جزء من العالم. ولا تستخدم هذه الطريقة خصائص المسير بينما يمكن استعمالها في المراحل الأولية من التخطيط أو منح الرخص أو التصميم. أما الطريقة الثانية المعروضة في الفقرة 2.3.2 فهي ملائمة لكل قيم عمق الخبو وتستعمل الطريقة لقيم الخبو العميق جداً وتلجأ إلى إجراء استكمال داخلي عندما يكون عمق الخبو منخفضاً.

وتقدم الفقرة 3.3.2 طريقة للتنبؤ بتعزيز الإشارات. وتستعمل الطريقة عمق الخبو الذي تتنبأ به الطريقة المقدمة في الفقرة 1.3.2 باعتباره معلمة الدخل الوحيدة. وأخيراً تقدم الفقرة 4.3.2 طريقة لتحويل الشهر الأسوأ المتوسط إلى متوسط التوزيع السنوي.

1.3.2 الطريقة المطبقة من أجل نسب مئوية صغيرة من الوقت

لا يتحتم حساب الخبو والتعزيز الخاص بتعدد المسيرات إلا للمسيرات الأطول من 5 km، ويمكن ضبطها على الصفر للمسيرات الأقصر.

الخطوة 1: تقدير العامل المناخي الجغرافي K للشهر الأسوأ المتوسط بالنسبة إلى موقع المسير المعني، انطلاقاً من بيانات الخبو في جغرافية المنطقة في حال تيسرها (انظر المرفق 1).

وإذا لم تتوفر البيانات المقيسة للقيمة K، يُقدَّر العامل المناخي الجغرافي للشهر الأسوأ بواسطة antilog الاستكامل الداخلي الخطي الثنائي لأقرب أربع نقاط شبكية من الجدول LogK.csv الذي يشكل جزءا أساسيا من هذه التوصية، وهو اللوغاريتم 10 الأساسي من K%.

الخطوة 2: حساب ميل المسير $|\varepsilon_p|$ (mrad) استناداً إلى ارتفاعي الهوائي h_e وh_r (بالأمتار فوق مستوى سطح البحر)، وذلك بواسطة العلاقة:

$$|\varepsilon_p| = |h_r - h_e| \,/\, d \tag{5}$$

حيث d هو طول المسير (km)، ومتوسط مسيرات خلوص الأرض h_c (m) من:

$$h_c = \frac{h_r + h_e}{2} - \frac{d^2}{102} - h_t \quad \text{m} \tag{6}$$

حيث h_t هو متوسط ارتفاع الأرض (m فوق مستوى سطح البحر) على طول المسير، باستثناء الأشجار.

الخطوة 3: تحسب النسبة المئوية p_w من الوقت التي يتم أثناءها تجاوز عمق الخبو A (dB) في الشهر الأسوأ المتوسط بواسطة العلاقة التالية:

$$p_w = K d^{3.51} (f^2 + 13)^{0.447} \times 10^{-0.376 tanh\left(\frac{h_c - 147}{125}\right) - 0.334 |\varepsilon_p|^{0.39} - 0.00027 h_L + 17.85 v_{sr} - A/10} \quad \% \tag{7}$$

حيث:

f: التردد (GHz)

h_L: ارتفاع الهوائي الأدنى (أي القيمة الأصغر لارتفاعي الهوائي h_e وh_r)

v_{sr}: معامل الانكسار دون المعياري

$$v_{sr} = \min\left\{\left(\frac{dN_{75}}{50}\right)^{1.8} \exp\left[-\frac{h_c}{2.5\sqrt{d}}\right], v_{sr\text{limit}}\right\} \quad (8)$$

الذي له حد أعلى لمسيرات الخلوص المنخفضة جداً، تحدّده خسارة بالانعراج ناجمة عن عوائق، ويُحسب من خلال:

$$v_{sr\text{limit}} = \frac{dN_{75} d^{1.5} f^{0.5}}{24730} \quad \text{m} \quad (9)$$

والمعامل dN_{75} هو تنبؤ تجريبي بنسبة 0,1% من متوسط أسوأ زيادة شهرية في الانكسار مع ارتفاع أعلى من أدنى 75 m من الغلاف الجوي من بيانات نقطة الندى السطحية، التي تُحسب عن طريق الاستكمال الداخلي الخطي الثنائي لأقرب أربع نقاط شبكية من الجدول dN75.csv الذي يشكل جزءاً أساسيا من هذه التوصية. وفي بعض مناطق خطوط العرض العالية، $dN_{75} = 0$. ويمثل إدراج v_{sr} في المعادلة (7) تأثيرات التسديد المتوسط بشكل عام بدلاً من عائق مسير تدرج الانكسار دون المعياري الخطي الكلاسيكي.

الملاحظة 1 – القيمة العالمية للانحراف المعياري لخطأ التنبؤ الناتجان عن استعمال المعادلة (7) هي 5,2 dB (بما في ذلك القيمة الناجمة عن التغيرات من سنة إلى أخرى). ويقل متوسط الخطأ عن 3 dB لجميع أقاليم العالم البالغ عددها 21 إقليماً التي يبلغ نصف قطرها 1 500 km والتي وفرت بيانات عن الخبو لهذا النموذج.

الملاحظة 2 – تنتج المعادلة (7) والعامل المناخي الجغرافي K من تراجعات متعددة لبيانات الخبو في 539 وصلة في مناطق مناخية جغرافية مختلفة في العالم يتراوح طول مسيرها d بين 7,5 و300 km وتتراوح تردداتها f بين 450 MHz و37 GHz ويصل ميل المسير $|\varepsilon_p|$ إلى 37 mrad ويتراوح ارتفاع الهوائي الأدنى h_L بين 17 و300 2 m ومتوسط مسيرات خلوص الأرض h_c بين 26 و180 1 m، ومعامل الانكسار دون المعياري dN_{75} بين صفر و54 وحدات–N. وكان لكل الوصلات على الأقل تحرير تماسي لخط البصر عند $k_e = 1{,}33$.

وتعتبر المعادلة (7) أيضاً صالحة للترددات التي تصل إلى 45 GHz كحد أدنى. وتشير نتائج تحليل شبه تجريبي إلى أن حد التردد الأدنى يتناسب عكساً مع طول المسير. ويمكن الحصول على تقدير تقريبي لهذا الحد للتردد الأدنى، f_{min}، باستعمال المعادلة التالية:

$$f_{min} = 15 / d \quad \text{GHz} \quad (10)$$

2.3.2 الطريقة المطبقة لجميع النسب المئوية من الوقت

إن الطريقة التي يرد وصفها فيما بعد والتي تهدف إلى التنبؤ بالنسبة المئوية من الوقت، التي يتم أثناءها تجاوز عمق الخبو تجمع بين توزيع الخبو العميق، الواردة في الفقرات السابقة وبين إجراء الاستكمال الداخلي التجريبي للخبو قليل العمق والأقل من 0 dB.

الخطوة 1: يحسب عامل الانتشار بالمسيرات المتعددة p_0 (أي القيمة في نقطة تقاطع منحني توزيع الخبو العميق ومحور النسب المئوية للوقت) وذلك باتباع الطريقة الواردة في الفقرة 1.3.2، على النحو التالي:

$$p_0 = K d^{3.51} (f^2 + 13)^{0.447} \times 10^{-0.376 tanh\left(\frac{h_c - 147}{125}\right) - 0.334 |\varepsilon_p|^{0.39} - 0.00027 h_L + 17.85 v_{sr}} \quad \% \quad (11)$$

وبالنسبة إلى تطبيقات التخطيط السريعة تستعمل قيمة K الناتجة من *الخطوة 1* من الفقرة 1.3.2. وتجدر الإشارة إلى أن المعادلة (11) مكافئة للمعادلة (7)، مع $A = 0$.

الخطوة 2: حساب قيمة عمق الخبو، A_t، التي يحدث عندها الانتقال من توزيع الخبو العميق إلى توزيع الخبو قليل العمق حسب الاستكمال الداخلي التجريبي:

$$A_t = 25 + 1.2 \log_{10} p_0 \quad \text{dB} \quad (12)$$

ويتوقف الإجراء عندئذٍ على ما إذا كانت A أكبر أم أصغر من A_t.

الخطوة 3أ): إذا كان عمق الخبو المطلوب A مساوياً لـ A_t أو أكبر منه:

تحسب النسبة المئوية من الوقت p_w التي يتم أثناءها تجاوز القيمة A خلال الشهر الأسوأ المتوسط:

$$p_w = p_0 \times 10^{-A/10} \quad \% \tag{13}$$

يلاحظ أن المعادلة (13) مكافئة للمعادلة (7).

الخطوة 3 ب): إذا كان عمق الخبو المطلوب A، أقل من A_t:

تحسب النسبة المئوية من الوقت p_t التي يتم أثناءها تجاوز القيمة A_t في الشهر الأسوأ المتوسط كالتالي:

$$p_t = p_0 \times 10^{-A_t/10} \quad \% \tag{14}$$

يلاحظ أن المعادلة (14) مكافئة للمعادلة (7) مع $A_t = A$.

تحسب q'_a استناداً إلى قيمة خبو الانتقال A_t والنسبة المئوية لوقت الانتقال p_t كالتالي:

$$q'_a = -20 \log_{10} \left\{ -\ln \left[\left(100 - p_t \right) / 100 \right] \right\} / A_t \tag{15}$$

تحسب q_t استناداً إلى q'_a وقيمة خبو الانتقال A_t كالتالي:

$$q_t = \left(q'_a - 2 \right) \Big/ \left[\left(1 + 0{,}3 \times 10^{-A_t/20} \right) 10^{-0{,}016\, A_t} \right] - 4{,}3 \left(10^{-A_t/20} + A_t/800 \right) \tag{16}$$

وتحسب q_a استناداً إلى قيمة الخبو A المطلوب كالتالي:

$$q_a = 2 + \left[1 + 0{,}3 \times 10^{-A/20} \right] \left[10^{-0{,}016\, A} \right] \left[q_t + 4{,}3 \left(10^{-A/20} + A/800 \right) \right] \tag{17}$$

وتحسب النسبة المئوية من الوقت p_w، التي يتم أثناءها تجاوز عمق الخبو A (dB) في الشهر الأسوأ المتوسط كالتالي:

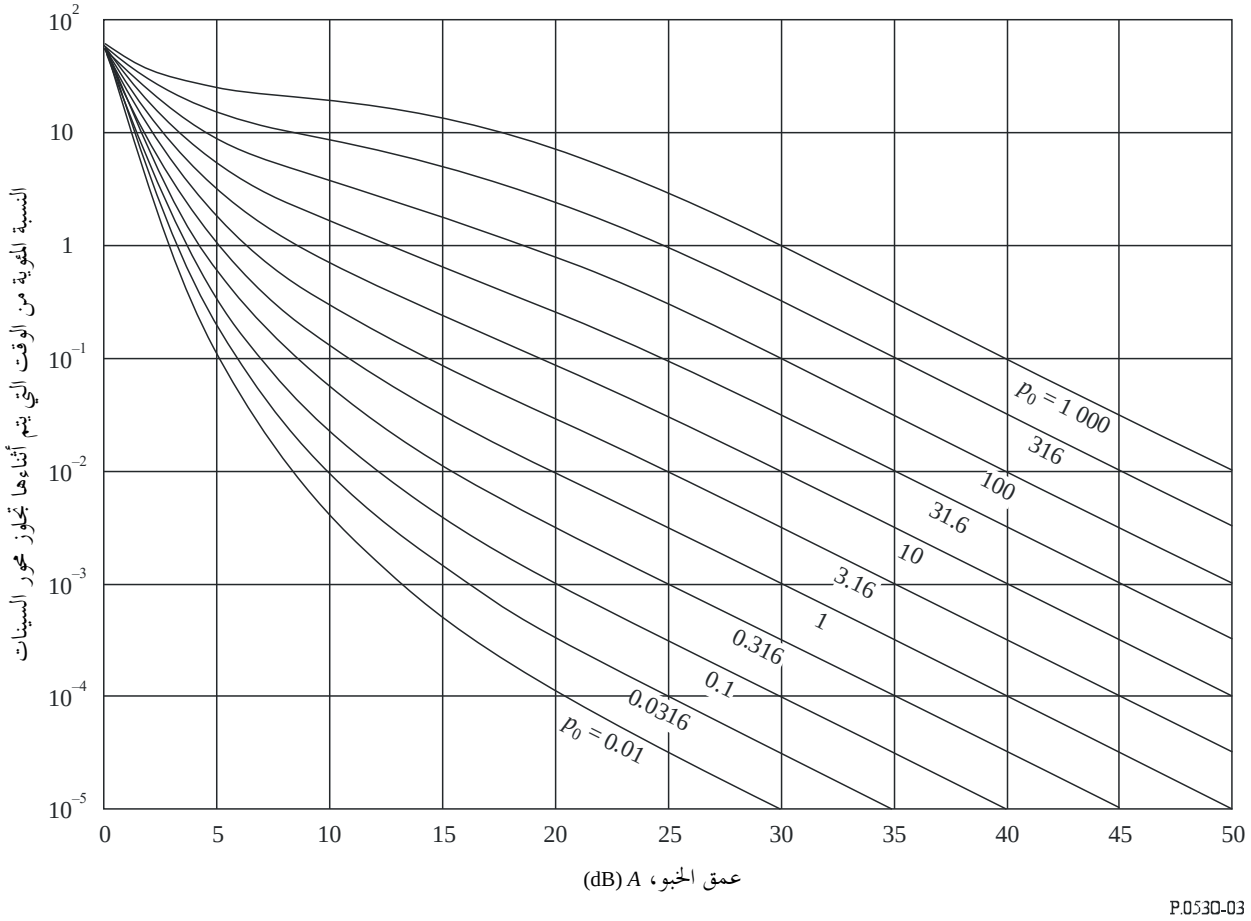
$$p_w = 100 \left[1 - \exp \left(-10^{-q_a\, A/20} \right) \right] \quad \% \tag{18}$$

ويعطي الإجراء المذكور أعلاه شرط أن يكون $p_0 < 2\,000$ تغيراً رتيباً للقيمة p_w بالنسبة إلى A يمكن استعماله من أجل تحديد A لقيمة معينة لـ p_w بواسطة عملية تكرارية بسيطة.

وتقدم مجموعة المنحنيات المبينة في الشكل 3 مع المعلمة p_0 عرضاً بيانياً للطريقة.

الشكل 3

النسبة المئوية من الوقت p_W التي يتم أثناءها تجاوز عمق الخبو A في الشهر الأسوأ المتوسط مع العلم بأن p_0 (في المعادلة (11)) تتراوح بين 0,01 و1 000



3.3.2 طريقة التنبؤ بالتعزيزات

تشاهد تعزيزات شديدة للإشارة خلال الظروف العامة نفسها للمجاري العديدة التي تؤدي إلى الخبو بسبب تعدد المسيرات. ويجب التنبؤ بتعزيزات فوق 10 dB في الشهر الأسوأ المتوسط بواسطة المعادلة التالية:

$$p_w = 100 - 10^{(-1,7 + 0,2\,A_{0,01} - E)/3,5} \quad \% \qquad \text{for} \quad E > 10\ \text{dB} \tag{19}$$

حيث E هو التعزيز (dB) الذي لا يتم تجاوزه أثناء نسبة p% من الوقت، و$A_{0,01}$ هو عمق الخبو المتوقع المحسوب استناداً إلى المعادلة (7) والذي يتم تجاوزه أثناء نسبة مئوية p_w = 0,01% من الوقت.

يستعمل، من أجل التعزيز بين 10 و0 dB، الإجراء خطوة–خطوة التالي:

الخطوة 1: تحسب النسبة المئوية من الوقت p'_w المقابلة لتعزيز يساوي 10 dB أو يقل عن هذه القيمة ($E' = 10$) بواسطة المعادلة (19).

الخطوة 2: تحسب q'_e بواسطة المعادلة التالية:

$$q'_e = -\frac{20}{E'}\left(\log_{10}\left[-\ln\left(1-\frac{100-p'_w}{58{,}21}\right)\right]\right) \tag{20}$$

الخطوة 3: تحسب المعلمة q_s بواسطة المعادلة التالية:

$$q_s = 2.05q'_e - 20.3 \tag{21}$$

الخطوة 4: تحسب q_e من أجل قيمة E المرغوب فيها بواسطة المعادلة التالية:

$$q_e = 8 + \left[1 + 0{,}3 \times 10^{-E/20}\right]\left[10^{-0{,}7E/20}\right]\left[q_s + 12\left(10^{-E/20} + E/800\right)\right] \tag{22}$$

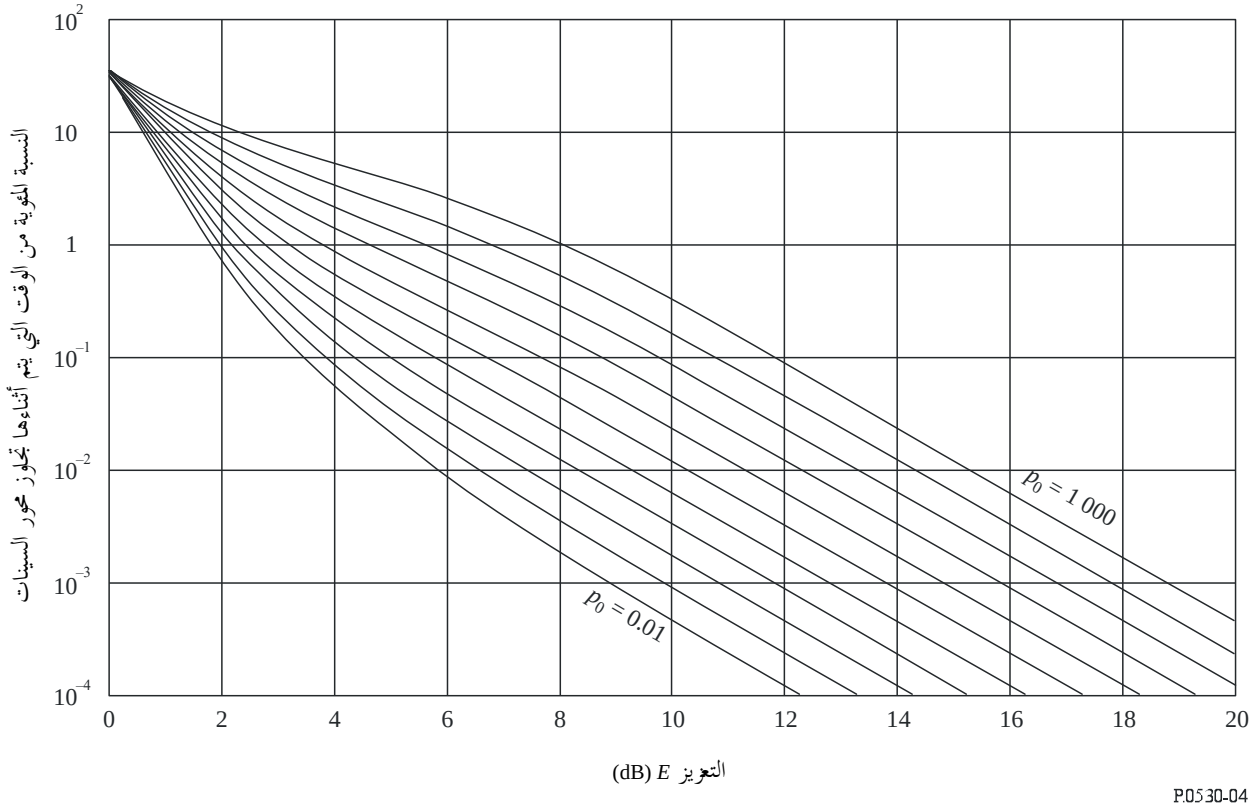
الخطوة 5: يحصل على النسبة المئوية من الوقت التي لا يتم أثناءها تجاوز التعزيز E (dB) بواسطة المعادلة التالية:

$$p_w = 100 - 58{,}21\left[1 - \exp\left(-10^{-q_e E/20}\right)\right] \tag{23}$$

تعطي مجموعة المنحنيات في الشكل 4 تمثيلاً بيانياً للطريقة، مع اعتبار p_0 معلمة (انظر المعادلة (11)). ويعادل كل منحني في الشكل 4 منحني في الشكل 3 له نفس قيمة p_0 . وتجدر الإشارة إلى أن الشكل 4 يقدم النسبة المئوية من الوقت التي يتم أثناءها تجاوز التعزيزات المساوية $(100 - p_w)$، مع العلم بأن p_w تعطى في المعادلتين (19) و(23).

الشكل 4

النسبة المئوية من الزمن (p_w – 100)، التعزيز E الذي يتم تجاوزه في الشهر الأسوأ المتوسط مع العلم بأن p_0 (في المعادلة (11)) تتراوح بين 0,01 و1 000



بالنسبة إلى التنبؤ بالنسب المئوية من التجاوز في السنة المتوسطة بدلاً من الشهر الأسوأ المتوسط، انظر الفقرة 4.3.2.

4.3.2 التحويل من توزيع الشهر الأسوأ المتوسط إلى متوسط التوزيعات السنوية

يمكن تحويل توزيعات الخبو وتعزيز الإشارات للشهر الأسوأ المتوسط المحسوبة بالطرائق المقدمة في الفقرات 1.3.2 إلى 3.3.2، إلى توزيع للسنة المتوسطة بواسطة الإجراء التالي:

الخطوة 1: تحسب النسبة المئوية من الوقت p_w التي يتم أثناءها تجاوز عمق الخبو A في الذيل الأكبر من التوزيع في الشهر الأسوأ المتوسط، بواسطة المعادلة (7).

الخطوة 2: يحسب عامل التحويل اللوغاريتمي المناخي الجغرافي ΔG بواسطة المعادلة التالية:

$$\Delta G = 10.5 - 5.6 \log_{10}(1.1 \pm |\cos 2\xi|^{0.7}) - 2.7 \log_{10} d + 1.7 \log_{10}(1 + |\varepsilon_p|) \quad \text{dB} \qquad (24)$$

حيث $\Delta G \geq 10{,}8$ dB وحيث تستعمل العلامة الموجبة من أجل $\xi \geq 45$، وتستعمل العلامة السالبة من أجل: $\xi > 45$، وحيث:

ξ: خط العرض (°N أو °S)

d: طول المسير (km)

$|\varepsilon_p|$: اتساع ميل المسير (انطلاقاً من المعادلة (6)).

الخطوة 3: تحسب النسبة المئوية من الوقت p التي يتم أثناءها تجاوز عمق الخبو A في ذيل التوزيع ذي عمق الخبو الكبير في السنة المتوسطة بواسطة المعادلة التالية:

$$p = 10^{-\Delta G / 10}\, p_w \qquad \% \tag{25}$$

الخطوة 4: عندما يطلب استعمال مدى الخبو قليل العمق في التوزيع، تتبع الطريقة المقدمة في الخطوة 3b للفقرة 2.3.2 مع إدخال التغييرات التالية:

1) تحول قيمة p_t المتحصل عليها في المعادلة (14) إلى قيمة سنوية باستخدام المعادلة (25) واستخدام هذه القيمة السنوية بدلاً من p_t عندما تظهر في المعادلة (15).

2) قيمة p_w المحسوبة بالمعادلة (18) هي القيمة السنوية المطلوبة p.

الخطوة 5: عندما يطلب التنبؤ بتوزيع تعزيزات الإشارات للسنة المتوسطة، تتبع الطريقة المقدمة في الفقرة 3.3.2. حيث $A_{0,01}$ هو الآن عمق الخبو الذي يتم تجاوزه أثناء 0,01% من الوقت في السنة المتوسطة. ويحصل أولاً على p_w بقلب المعادلة (25) واستعمال $p = 0{,}01\%$. ثم يحصل على عمق الخبو $A_{0,01}$ الذي يتم تجاوزه أثناء 0,01% من الوقت في السنة المتوسطة بقلب المعادلة (7) واستعمال p بدلاً من p_w.

5.3.2 التحويل من الشهر الأسوأ المتوسط إلى الفترات الأسوأ الأقصر

يمكن تحويل النسبة المئوية من الوقت p_w التي يتم أثناءها تجاوز الخبو العميق A خلال الشهر الأسوأ المتوسط إلى نسبة مئوية من الوقت p_{sw} يتم أثناءها تجاوز نفس الخبو العميق في الفترة الأسوأ الأقصر من شهر T وذلك باستعمال المعادلات التالية:

بالنسبة إلى المسيرات في أراضٍ مسطحة نسبياً $p_{sw} = p_w \cdot \left(89.34 T^{-0.854} + 0.676\right) \quad \% \quad 1\text{ h} \le T < 720\text{ h}$ (26)

بالنسبة إلى المسيرات في مناطق تلال $p_{sw} = p_w \cdot \left(119 T^{-0.78} + 0.295\right) \quad \% \quad 1\text{ h} \le T < 720\text{ h}$ (27)

بالنسبة إلى المسيرات في أراضٍ تلالية $p_{sw} = p_w \cdot \left(199.85 T^{-0.834} + 0.175\right) \quad \% \quad 1\text{ h} \le T < 720\text{ h}$ (28)

الملاحظة 1 – تنتج المعادلات من (26) إلى (28) من البيانات التي تتعلق بـ 25 وصلة تقع في مناطق معتدلة قُدِّرت القيمة p_w فيها استناداً إلى بيانات أشهر الصيف.

6.3.2 التنبؤ بالانقطاع غير الانتقائي (انظر الملاحظة 1)

عند تصميم وصلة رقمية، يحسب احتمال الانقطاع P_{ns} العائد إلى مكون الخبو غير الانتقائي (انظر الفقرة 7) بواسطة الصيغة التالية:

$$P_{ns} = p_w / 100 \tag{29}$$

حيث p_w (%) هي النسبة المئوية من الوقت التي يتم أثناءها تجاوز الحماية من الخبو المنتظم $F = A$ (dB) المقابل لمعدل الخطأ في البتات (BER) خلال الشهر الأسوأ المتوسط (يحصل عليها من الفقرة 1.3.2 أو 2.3.2 حسب الحالة). ويمكن التوصل إلى هامش الحماية من الخبو المنتظم F من حساب الوصلة ومن المعلومات المتوفرة مع التجهيزات الخاصة كما يؤخذ في الاعتبار التخفيضات المحتملة العائدة إلى تصميم الوصلة الفعلية.

الملاحظة 1 – يحدد الانقطاع هنا للتبسيط بأنه احتمال أن يكون معدل الخطأ في البتات (BER) أعلى من عتبة معينة مهما كانت هذه العتبة، (لمزيد من المعلومات انظر الفقرة 7).

7.3.2 حدوث خبو متآون على وصلات متعددة القفزات

تشير شواهد تجريبية إلى أنه في ظروف الجو الصافي، فإن عمليات الخبو العميق على القفزات المتجاورة في وصلة متعددة القفزات تكاد تكون غير مترابطة على الإطلاق. وينطبق ذلك سواء حدث خبو لتردد انتقائي أو خبو منتظم أو الاثنين معاً.

وبالنسبة لوصلة متعددة القفزات، يمكن الحصول على حد أعلى لاحتمال الانقطاع الكلي في ظروف الجو الصافي بجمع احتمالات الانقطاع الخاصة بالقفزات الإفرادية. ويمكن تقدير الحد الأعلى الأقرب لاحتمال تجاوز عمق الخبو A (dB) في وصلة من عدد n من القفزات من (انظر الملاحظة 1):

$$P_T = \sum_{i=1}^{n} P_i - \sum_{i=1}^{n-1} \left(P_i P_{i+1}\right)^C \qquad (30a)$$

$$C = 0{,}5 + 0{,}0052A + 0{,}0025(d_A + d_B) \qquad (30b)$$

حيث P_i هي احتمال الانقطاع المتوقع للقفزة i-th من إجمالي n من القفزات وd_i طول المسير (km) للقفزة i-th. ويجب استخدام المعادلة (30b) عندما يكون $A \geq 40$ dB و$(d_i + d_{i+1}) \geq 120$ km وفوق هذه الحدود تكون قيمة $C = 1$.

الملاحظة 1 – تم الحصول على المعادلة (30b) استناداً إلى نتائج قياسات أجريت على 19 زوجاً من القفزات المتجاورة في خط البصر تعمل في النطاقين 4 و6 GHz وبأطوال مسير في حدود من 33 إلى 64 km.

8.3.2 بيانات إحصائية بشأن عدد حالات التوهين التي تستمر لمدة 10 s أو أطول نتيجة للانتشار في مسيرات متعددة

استناداً إلى أن الدراسات التجريبية المتحصل عليها من روسيا والبرازيل واليابان في مدى الترددات 29,3-3,7 GHz وعلى مسيرات تتراوح أطوالها بين 12,5 و166 km، فإن متوسط عدد N_{10s} إزاء احتمال تجاوز التوهين الناجم عن تعدد المسيرات، $p(A)$، خلال سنة يحسب كالتالي:

$$N_{10s} = 3650 \cdot p(A)^{0,95} \qquad (31)$$

حيث يكون الاحتمال $p(A)$ في صورة نسبة مئوية.

4.2 التوهين بسبب الماء الجوي

يمكن أن يحدث أيضاً التوهين نتيجة للامتصاص والانتثار بالماء الجوي مثل المطر والثلوج والبَرَد والضباب. ومع أنه من الممكن تجاهل التوهين بالمطر عند ترددات أدنى من 5 GHz تقريباً، إلا أنه يجب إدراجه في حسابات التصميم عند الترددات الأعلى، حيث تتزايد أهميته بصورة أسرع. وتعطي الفقرة 1.4.2 تقنية تقدير إحصائيات التوهين بالمطر على المدى الطويل. أما على المسيرات عند خطوط عرض عالية، أو في المسيرات المرتفعة عند خطوط عرض أدنى، يمكن أن تسبب الثلوج الرطبة توهيناً دلالياً حتى على مدى أوسع من الترددات. وتقدم التوصية ITU-R P.840 معلومات أكثر تفصيلاً عن التوهين الذي يسببه الماء الجوي من غير المطر.

يمكن، عند الترددات التي يجب أن تراعى فيها تأثيرات التوهين بالمطر والخبو بسبب تعدد المسيرات، أن تضاف النسب المئوية لتجاوز عمق خبو معين المقابلة لكل من هاتين الآليتين.

1.4.2 إحصائيات التوهين بسبب المطر على المدى الطويل

يمكن أن تستعمل التقنية البسيطة التالية لتقدير إحصائيات التوهين بالمطر على المدى الطويل:

الخطوة 1: يحسب معدل المطر $R_{0,01}$ الذي تم تجاوزه أثناء 0,01% من الوقت (مع وقت تكامل من دقيقة واحدة). وإذا لم تتوفر هذه المعلومات حول القياسات على المدى الطويل من مصادر محلية، يمكن إجراء تقدير لها انطلاقاً من المعلومات المقدمة في التوصية ITU-R P.837.

الخطوة 2: يحسب التوهين المعين γ_R (dB/km) من أجل عوامل التردد والاستقطاب ومعدل المطر المعنية بالاستناد إلى التوصية ITU-R P.838.

الخطوة 3: يحسب طول المسير الفعّال d_{eff} للوصلة من خلال ضرب طول المسير الفعلي d بعامل المسافة r. وتعطي العلاقة التالية تقديراً لهذا العامل:

$$r = \frac{1}{0{,}477 d^{0{,}633} R_{0,01}^{0{,}073 \cdot \alpha} f^{0{,}123} - 10{,}579(1-\exp(-0{,}024 d))} \tag{32}$$

حيث f (GHz) هو التردد وα هو الأس في نموذج التوهين المحدد في الخطوة 2.

الخطوة 4: تعطي العلاقة التالية تقديراً للتوهين على المسير الذي يتم تجاوزه أثناء 0,01% من الوقت:

$$A_{0.01} = \gamma_R \, d_{eff} = \gamma_R \, dr \qquad \text{dB} \tag{33}$$

الخطوة 5: يمكن استخلاص قيم التوهين الذي يتم تجاوزه أثناء نسبة مئوية أخرى من الوقت p في المدى من 0,001% إلى 1% استناداً إلى القانون الأسي التالي:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = C_1 \, p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)} \tag{34}$$

مع:

$$C_1 = \left(0{,}07^{C_0}\right)\left[0{,}12^{(1-C_0)}\right] \tag{35a}$$

$$C_2 = 0{,}855 C_0 + 0{,}546(1-C_0) \tag{35b}$$

$$C_3 = 0{,}139 C_0 + 0{,}043(1-C_0) \tag{35c}$$

حيث:

$$C_0 = \begin{cases} 0{,}12 + 0.4\left[\log_{10}(f/10)^{0.8}\right] & f \geq 10\,GHz \\ 0{,}12 & f < 10\,GHz \end{cases} \tag{36}$$

الخطوة 6: عندما يكون الحصول على إحصائيات الشهر الأسوأ مرغوباً فيه، تحسب النسب المئوية السنوية من الوقت p المقابلة للنسب المئوية p_w للشهر الأسوأ، من خلال المعلومات عن المناخ المحددة في التوصية ITU-R P.841. وبالنسبة إلى قيم A التي يتم تجاوزها لنسب مئوية معينة من الوقت p على أساس السنة، يتم تجاوزها أيضاً في أثناء النسب المئوية المقابلة من الوقت p_w على أساس الشهر الأسوأ.

ويعتبر إجراء التنبؤ المشار إليه أعلاه صالحاً في كل أنحاء العالم، على الأقل عند ترددات تصل إلى 100 GHz، ومن أجل قيم لطول المسير تصل إلى 60 km.

2.4.2 طريقة مشتركة للمطر والثلوج الرطبة

يعتبر التوهين الناجم عن المطر A_p الذي يتم تجاوزه لنسبة مئوية من الوقت p على النجو المعطى بالمعادلة (34) في الفقرة 1.4.2 أعلاه سارياً بالنسبة للمسيرات الراديوية التي يحدث خلالها هطول للأمطار السائلة فقط.

ويمكن أن يتأثر الخبو على مسير أرضي بجسيمات الثلج الذائبة أو الثلوج الرطبة في طبقة الذوبان. ويتم تحديد حدوث هذا التأثير بواسطة ارتفاع الوصلة طبقاً لارتفاع المطر وهو ما يختلف بمرور الوقت طبقاً للموقع الجغرافي.

ويمكن لتشكل الجليد على الهوائي أو على غلافه أو نافذته أن يسبب توهينات إضافية كبيرة. وليس من العملي وضع نموذج شامل لهذا المؤثر، لأن الهوائيات أن تبقى بمنأى عن الجليد ليتحقق التشغيل الموثوق في ظروف التجمد. ويسري الأسلوب المذكور هنا، لتقدير مجموع توهين المطر والثلوج الرطبة، على هوائيات الخالية من الجليد.

ويقدر الأسلوب التالي التوهين المتجاوَز خلال نسبة مئوية معينة من الوقت مع أخذ المطر والثلوج الرطبة في الاعتبار. وينبغي استخدام هذا الأسلوب وتفضيله على ذاك المذكور في الفقرة 1.4.2 إلا إذ عُلم مسبقاً أن المسير لا يتأثر بالثلوج الرطبة. ويبدأ الأسلوب المذكور في الفقرات الفرعية التالية باختبار ما إذا كان ينبغي أن تؤخذ الثلوج الرطبة في الاعتبار. وإذا لم تكن تلك هي الحالة، يُفترض أن الأسلوب المتبع هو ذلك المذكور في الفقرة 1.4.2.

ويفترض نموذج المطر/الثلوج الرطبة المشترَك عدم وجود أي ارتباط بين معدل سقوط الأمطار ومتوسط ارتفاع طبقة الذوبان. وإذا أظهرت البيانات المحلية الموثوقة إحصائياً وجود ارتباط، يُفضل استخدام النموذج مع هذه البيانات على أساس موسمي أو شهري، وفقاً للفترات الزمنية التي يمكن أن يفترض فيها الارتباط مهملاً.

1.2.4.2 الاختبارات الأولية

حساب ارتفاعي الهوائي الأخفض والأعلى باستخدام:

$$h_{lo} = min(h_1, h_2) \quad \text{(بالأمتار فوق مستوى سطح البحر)} \tag{37a}$$

$$h_{hi} = max(h_1, h_2) \quad \text{(بالأمتار فوق مستوى سطح البحر)} \tag{37b}$$

حيث $h_{1,2}$ هما ارتفاعا مطرافي الوصلة بالأمتار فوق مستوى سطح البحر.

ويتم الحصول على متوسط ارتفاع المطر، h_{rainm}، بالأمتار فوق مستوى سطح البحر. وإذا تعذر الحصول على هذه الإحصاءات طويلة الأجل من مصادر البيانات المحلية، يمكن الحصول على تقدير لها من التوصية ITU-R P.839.

ويجرى اختبار تقصياً للحالتين، ولا يتطلب أي منهما مواصلة استخدام أسلوب المطر/الثلوج الرطبة:

الحالة 1: إذا كان $h_{hi} \leq h_{rainm} - 3\,600$، تقع طبقة الذوبان دائماً فوق المسير بالكامل. وفي هذه الحالة، يُستخدم الأسلوب المذكور في الفقرة 1.4.2 للحصول على التوهين الناجم عن المطر فقط.

الحالة 2: إذا كان $h_{lo} \geq h_{rainm} + 2\,400$، تقع طبقة الذوبان دائماً تحت المسير بالكامل. وفي هذه الحالة، يمكن اعتبار التوهين الناجم عن الهطولات صفراً.

وفي حال عدم سريان الحالة 1 أو الحالة 2، تابع على النحو التالي.

2.2.4.2 الحسابات الأولية

يجرى كل من الحسابين الأوليين التاليين مرة واحدة فقط.

'1' *التوهين الناجم عن المطر فقط المتجاوَز خلال النسبة المئوية المطلوبة من الوقت*

يُستخدم الأسلوب المذكور في الفقرة 1.4.2 للحصول على التوهين الناجم عن المطر فقط A_{rainp} dB المتجاوَز خلال النسبة المئوية المطلوبة من الوقت، p، على النحو الوارد في المعادلة (34).

'2' *متجهات التوهين الناجم عن المطر فقط وما يقابلها من النسبة المئوية من الوقت*

يتطلب نموذج المطر/الثلوج الرطبة المشترَك قيماً متعددة من النسبة المئوية من الوقت الذي يُتجاوز خلاله التوهين الناجم عن المطر فقط بالقيم المعطاة. وهكذا إذا كانت الدالة $A(p)$ تعبِّر عن نموذج التوهين الناجم عن المطر، فإن نموذج المطر/الثلوج الرطبة يحتاج إلى الدالة التكميلية $p(A)$. ويقيَّم متجهان (مصفوفتان ببعد واحد) كوسيلة فعالة للحصول على ذلك لأي نموذج مطري:

المتجه $\boldsymbol{T}$ الحاوي على قيم النسبة المئوية من الوقت المتناقصة لوغاريتمياً بواقع 10 قيم في كل مقياس عشري؛

المتجه $\boldsymbol{A}$ الحاوي على التوهينات المقابلة الناجم عن المطر فقط المتجاوَزة خلال كل نسبة مئوية من الوقت.

وفي هذا الوصف لنموذج المطر/الثلوج الرطبة، يعيَّن فرادى أعضاء المتجهين بمؤشرات لاحقات سفلية بين أقواس معقوفة. ويبلغ أدنى مؤشر في المتجهين $\boldsymbol{T}$ و$\boldsymbol{A}$ صفراً.

وتُضبط القيمة الأولى لكل متجه وفقاً لما يلي:

$$\boldsymbol{T}_{[0]} = P_0 \qquad (\text{\% من الوقت}) \tag{38}$$

$$\boldsymbol{A}_{[0]} = 0 \qquad (\text{dB}) \tag{39}$$

حيث P_0 هي النسبة المئوية لاحتمال هطول الأمطار في المتوسط السنوي كما ترد في المعادلة (1) من التوصية ITU-R P.837-6 والتي ستكون قد حُسبت خلال الحساب الأولي '1' أعلاه.

وبالنسبة للمؤشرات t = 1، 2، 3 ... وهلم جرا. تُضبط أزواج القيم المتتالية وفقاً لما يلي:

$$\boldsymbol{T}_{[t]} = P_0 10^{-0.1t} \qquad (\text{\% من الوقت}) \tag{40}$$

$$\boldsymbol{A}_{[t]} = A(\boldsymbol{T}_{[t]}) \qquad (\text{dB}) \tag{41}$$

حيث $A(\boldsymbol{T}_{[t]})$ هو التوهين الناجم عن المطر فقط المتجاوَز خلال النسبة المئوية $\boldsymbol{T}_{[t]}$ من الوقت على النحو الوارد في المعادلة (33).

ويُستمر في استخدام المعادلتين (40) و(41) للقيم المتعاقبة للمؤشر t في حين إما $\boldsymbol{T}_{[t]} \geq 0{,}001$ % أو $\boldsymbol{A}_{[t]} - \boldsymbol{A}_{[t-1]} \geq 0{,}1$ dB. وتوقَف العملية عندما لا يصح أي من الشرطين.

ويخصَص ما يلي ليُستخدم لاحقاً في الحساب:

$$N_{last} = N_t - 1 \tag{42}$$

$$A_{last} = \boldsymbol{A}_{[N_{last}]} \qquad (\text{dB}) \tag{42a}$$

$$T_{last} = \boldsymbol{T}_{[N_{last}]} \qquad (\text{\% من الوقت}) \tag{42b}$$

حيث N_t هو عدد الأعضاء في كل من $\boldsymbol{A}$ و$\boldsymbol{T}$.

وكمجرد مسألة كفاءة في الحساب، لا حاجة لتنفيذ سوى المعادلتين (2b) و(2c) من التوصية ITU-R P.837-6 وبالتالي المعادلة (2) كل مرة أثناء الإعمال المتكرر لنموذج المطر في المعادلة (41)، لأن جميع القيم الأخرى تظل ثابتة في خطوط الطول والعرض للمسير الراديوي. وعلاوة على ذلك، تظل قيمتا k وα ثابتتين في المعادلة (33) من الفقرة 1.4.2 أعلاه.

3.2.4.2 تغير ارتفاع المطر

ينبغي استخدام الإحصائيات طويلة الأجل لتغير ارتفاع المطر المقيس، إذا كانت متوفرة. وإذا كانت هذه البيانات غير متوفرة، ينمذَج تغير ارتفاع المطر بتسعة وأربعين ارتفاعاً بالنسبة لمتوسط ارتفاع المطر، مع احتمال مرتبط بكل منها يرد في الجدول 2، الذي يعطي الاحتمالات $\boldsymbol{\Pi}_n$ بأن ارتفاع المطر سيقع ضمن 49 مدىً من 100 m بالنسبة لمتوسط ارتفاع المطر. ويُفترض التوزع الطبيعي، وبالتالي يمكن النفاذ إلى جميع الاحتمالات سوى الاحتمال المركزي بمؤشرين، على النحو الموضح في الجهة اليسرى من الجدول.

الجدول 2

المؤشر n		الاحتمال $\boldsymbol{\Pi}_n$
إما	أو	
0	48	0,000555
1	47	0,000802
2	46	0,001139
3	45	0,001594
4	44	0,002196
5	43	0,002978
6	42	0,003976
7	41	0,005227
8	40	0,006764
9	39	0,008617
10	38	0,010808
11	37	0,013346
12	36	0,016225
13	35	0,019419
14	34	0,022881
15	33	0,026542
16	32	0,030312
17	31	0,034081
18	30	0,037724
19	29	0,041110
20	28	0,044104
21	27	0,046583
22	26	0,048439
23	25	0,049588
24		0,049977

4.2.4.2 تعريف الوظائف المستخدمة في الأسلوب التالي

يلجأ أسلوب الخطوة بخطوة الوارد في الفقرة 3.2.4.2 أدناه إلى استخدامات متعددة للوظائف الثلاث التالية.

الوظيفة 1: مضاعِف التوهين

إن التوهين النوعي كمضاعف توهين بوحدة dB يعرَّف كدالة ارتفاع نسبةً إلى ارتفاع المطر بالأمتار:

$$\Gamma(\Delta h) = \begin{cases} 0 & 0 < \Delta h \\ \dfrac{4\left(1-\mathrm{e}^{\Delta h/70}\right)^2}{\left(1+\left(1-\mathrm{e}^{-(\Delta h/600)^2}\right)^2\left(4\left(1-\mathrm{e}^{\Delta h/70}\right)^2-1\right)\right)} & -1\,200 \le \Delta h \le 0 \\ 1 & \Delta h < -1\,200 \end{cases} \tag{43}$$

حيث $\Delta h = h - h_{rainm}$ و h هو الارتفاع الذي يسترعي الاهتمام.

وتُستخدم هذه الوظيفة مراراً لقيم مختلفة من Δh. وينمذَج تأثير ذوبان جزيئات الجليد على أنه ذو شأن من ارتفاع المطر هبوطاً إلى 1 200 m أقل. ويُفترض التوهين الناجم عن أي ثلوج جافة فوق ارتفاع المطر غير ذي شأن. وفي ارتفاعات تقل عن 1 200 m تحت ارتفاع المطر، يتخذ المضاعف قيمة 1 للدلالة على توهين ناجم عن المطر فقط.

الوظيفة 2: متوسط المضاعِف عبر المسير

يعرَّف متوسط المضاعِف عبر المسير $g(h_{rain})$ كدالة ارتفاع المطر، h_{rain}، بالأمتار فوق مستوى سطح البحر، لمسير راديوي معين. وتُستخدم هذه الدالة لقيم مختلفة من ارتفاع المطر لاحتساب تباين ارتفاع المطر حول متوسط قيمة h_{rainm}.

وتقسم هذه الوظيفة ارتفاع 1 200 m من طبقة الذوبان إلى 12 شريحة ارتفاع كل منها 100 m بأرقام مؤشرات من 1 للشريحة العليا إلى 12 للشريحة الدنيا. وبالتالي ترقَّم الشرائح تنازلياً من ارتفاع المطر. ولأغراض الحساب، يُسمح بامتداد المؤشرات إلى قيم سالبة فوق ارتفاع المطر وإلى قيم أكبر من 12 تحت طبقة الذوبان.

وتُحسب مؤشرات أدنى وأعلى الشرائح التي يشغلها أي جزء من المسير:

$$s_{lo} = 1 + floor\left(\frac{h_{rain}-h_{lo}}{100}\right) \tag{44a}$$

$$s_{hi} = 1 + floor\left(\frac{h_{rain}-h_{hi}}{100}\right) \tag{44b}$$

حيث تقدم "أرضية" الدالة أكبر عدد صحيح لا يزيد عن متغيره، ويُحسب h_{lo} و h_{hi} في الفقرة 1.2.4.2 أعلاه.

ويجب الآن النظر في الحالات التالية:

في حال $s_{lo} < 1$، يقع المسير كلياً فوق طبقة الذوبان. وفي هذه الحالة، $g = 0$ ولا حاجة لحساب آخر في هذه الخطوة.

وفي حال $s_{hi} > 12$، يقع المسير كلياً تحت طبقة الذوبان. وفي هذه الحالة، $g = 1$ ولا حاجة لحساب آخر في هذه الخطوة.

وفي حال $s_{lo} = s_{hi}$، يقع المسير كلياً ضمن شريحة واحدة من طبقة الذوبان. وفي هذه الحالة:

$$g = \Gamma\,(\delta h) \tag{45}$$

حيث

$$\delta h = 0{,}5\,(h_{lo} + h_{hi}) - hrain \tag{45a}$$

ولا حاجة لحساب آخر.

وإذا بلغ الحساب هذه النقطة، يجب على المسير اجتياز أكثر من شريحة واحدة في طبقة الذوبان. ويمكن أن تقع أجزاء من المسير أيضاً تحت الطبقة وفوقها.

ويُحسب مؤشرا الشريحة الأولى والأخيرة اللتين يتعين أخذهما بعين الاعتبار في الحلقة التالية:

$$s_{first} = max(s_{hi}, 1) \tag{46a}$$

$$s_{last} = min(s_{lo}, 12) \tag{46b}$$

ويهيأ المضاعِف g بقيمة الصفر ليُستخدم كمراكِم.

وبالنسبة إلى كل مؤشر s لشريحة من أول شريحة s_{first} حتى آخر شريحة s_{last} ضمناً:

يبدأ الحساب لكل مؤشر شريحة

ويجب أن يتحقق أحد الشروط الثلاثة التالية تماماً. وفي حال تحقق الشرط، يُحسب متوسط ارتفاع المسير ضمن الشريحة بالنسبة إلى ارتفاع المطر، Δh، وجزء المسير ضمن الشريحة، q.

وفي حال $s_{hi} < s$ و $s < s_{lo}$، يجتاز المسيرُ الشريحة بالكامل:

$$\Delta h = 100(0{,}5 - s) \quad \text{(m)} \tag{47a}$$

$$q = \frac{100}{h_{hi} - h_{lo}} \tag{47b}$$

وفي حال $s = s_{lo}$، يقع الهوائي الأخفض ارتفاعاً ضمن الشريحة:

$$\Delta h = 0{,}5[h_{lo} - h_{rain} - 100(s-1)] \quad \text{(m)} \tag{48a}$$

$$q = \frac{h_{rain} - 100(s-1) - h_{lo}}{h_{hi} - h_{lo}} \tag{48b}$$

وفي حال $s = s_{hi}$، يقع الهوائي الأعلى ارتفاعاً ضمن الشريحة:

$$\Delta h = 0{,}5[h_{hi} - h_{rain} - 100s] \quad \text{(m)} \tag{49a}$$

$$q = \frac{h_{hi} - h_{rain} + 100s}{h_{hi} - h_{lo}} \tag{49b}$$

وبعد حساب Δh وq لإحدى الحالات الثلاث السابقة:

تُستخدم الوظيفة 1، المعرَّفة أعلاه، لحساب مضاعِف التوهين للشريحة:

$$g_{slice} = \Gamma(\Delta h) \tag{50}$$

ويراكَم المضاعِف المرجَّح بجزء من المسير ضمن الشريحة:

$$g = g + q\, g_{slice} \tag{51}$$

نهاية الحساب لكل مؤشر شريحة

في حال $s_{lo} > 12$، يقع جزء من المسير تحت طبقة الذوبان. وفي هذه الحالة حصراً، يُحسب الجزء من المسير الواقع تحت الطبقة

$$q = \frac{h_{rain} - 1\,200 - h_{lo}}{h_{hi} - h_{lo}} \tag{52}$$

وبما أن مضاعِف التوهين هو 1 في هذه الحالة، يراكَم الجزء من المسير فقط:

$$g = g + q \tag{53}$$

ويُحسب الآن متوسط مضاعِف التوهين عبر المسير، g، لارتفاع المطر الحالي.

الوظيفة 3: النسبة المئوية من الوقت كدالة التوهين الناجم عن المطر فقط

تقدم الدالة $T(A)$ النسبة المئوية من الوقت التي يُتجاوز فيها توهين معين ناجم عن المطر فقط، A (dB)، وفقاً للمعادلة (33). ويحصَّل تقريب جيد لهذه الدالة باستخدام المتجهين $\boldsymbol{T}$ و$\boldsymbol{A}$ المقيَّمين في الفقرة 2.2.4.2 ’2‘.

ورغم أن نموذج التوهين الناجم المطر في الفقرة 1.4.2 لا يصح للنسب المئوية من الوقت التي تقل عن 0,001%، فإن نموذج المطر/الثلوج الرطبة قد يتطلب نسبَ مئوية أقل من الوقت. ولهذا الغرض يوسَّع نموذج المطر ليشمل توهينات أكبر من A_{last} في منحدر ثابت بواقع1 dB/مقياس عَشري من النسبة المئوية من الوقت. وتبين الاختبارات أن هذا التوسيع لا يساهم إلا مساهمات صغيرة في النتيجة النهائية، ولا يتأثر بخيار المنحدر.

وتُستخدم إحدى الحالتين الآتيتين:

الحالة 1: $A > A_{last}$

في هذه الحالة، يعطى p بتوسعة الوقت المنخفض باستخدام:

$$p = 10^{A_{last} - A + \log(T_{last})} \tag{54}$$

حيث يعطى A_{last} وT_{last} بالمعادلتين (42a) و(42b) على التوالي.

الحالة 2: $A \le A_{last}$

في هذه الحالة، يُحسب p من المتجهين $\boldsymbol{A}$ و$\boldsymbol{T}$ على النحو التالي.

ويُضبط المؤشران الأدنى والأعلى للمتجهين $\boldsymbol{A}$ و$\boldsymbol{T}$ بقيم أولية تحد كامل المتجهين بين قوسين:

$$k_{inf} = 0 \tag{55a}$$

$$k_{sup} = N_{last} \tag{55b}$$

ويتوصل الحساب التكراري التالي إلى قيمتي k_{inf} وk_{sup} اللتين تحدان المتجه A.

خلال $k_{sup} - k_{inf} > 1$

تُبدأ حلقة خلال

$$k_{try} = floor\left(\frac{k_{inf}+k_{sup}}{2}\right) \quad (56)$$

في حال $\boldsymbol{A}_{k_{try}} < A$ $\quad k_{inf} = k_{try} \quad$ (56a)

وإلا $\quad k_{sup} = k_{try} \quad$ (56b)

نهاية حلقة خلال

حيث تقدم "أرضية" الدالة أكبر عدد صحيح يقل عن متغيرها أو يساويه.

وتقرَّب الآن النسبة المئوية المطلوبة من الوقت تقريباً جيداً باستكمال داخلي لوغاريتمي:

$$p = 10^u \quad (57)$$

حيث:

$$u = \log_{10}\left(\boldsymbol{T}_{[k_{sup}]}\right) + \log_{10}\left(\frac{\boldsymbol{T}_{[k_{inf}]}}{\boldsymbol{T}_{[k_{sup}]}}\right)\frac{\boldsymbol{A}_{[k_{sup}]}-A}{\boldsymbol{A}_{[k_{sup}]}-\boldsymbol{A}_{[k_{inf}]}} \quad (57a)$$

وتقدم الدالة $T(A)$ قيمة p كما تُحسب بالمعادلة (54) أو بالمعادلة (57).

5.2.4.2 وصف خطوة بخطوة لأسلوب المطر/الثلوج الرطبة

الخطوة 1: متجهات المضاعِفات والاحتمالات

يُستخدم الأسلوب التالي لحساب المتجه، $\boldsymbol{G}$ الذي يحتوي على متوسط مضاعِفات التوهين عبر المسير، والمتجه $\boldsymbol{P}$ الذي يحتوي على الاحتمالات المقابلة.

ويتطلب المتجهان $\boldsymbol{G}$ و$\boldsymbol{P}$ 49 عضواً على الأكثر في كل منهما. ويفترض الوصف التالي أن هذا العدد لمواقع التخزين متاح في كل متجه. ويُحسب العدد الفعلي المستخدم كعدد صحيح M.

أما بالنسبة للمتجهين $\boldsymbol{A}$ و$\boldsymbol{T}$، فيعيَّن فرادى أعضاء المتجهين $\boldsymbol{G}$ و$\boldsymbol{P}$ بمؤشرات في لاحقات سفلية محصورة بين قوسين معقوفين، ابتداء من الصفر.

وتُسند قيمة صفر أولية إلى جميع أعضاء المتجهين $\boldsymbol{G}$ و$\boldsymbol{P}$.

وتُسند قيمة 1 أولية إلى $\boldsymbol{G}_{[0]}$.

وتُسند قيمة صفر أولية إلى كل من المؤشرين n وm.

وتبدأ الآن حلقة حساب بالزيادة التدرجية لقيم n من $n = 0$ إلى $n = 48$.

بدء حلقة حساب لكل قيمة للمؤشر n

الخطوة الفرعية أ) حساب ارتفاع المطر:

$$h_{rain} = h_{rainm} - 2\,400 + 100n \quad \text{(متر فوق مستوى سطح البحر)} \tag{58}$$

الخطوة الفرعية ب) في حال $h_{lo} \geq h_{rain}$، تقع طبقة ذوبان بالكامل تحت المسير في ارتفاع المطر هذا. وفي هذه الحالة، لا حاجة إلى أي مدخلات في المتجهين $\boldsymbol{G}$ و$\boldsymbol{P}$. وفي حال $n < 48$، يزاد n تدرجاً ويكرَر من الخطوة الفرعية أ)، وإلاُ تُترك هذه الحلقة ويُستمر من المعادلة (63).

وفي حال $h_{lo} < h_{rain}$، يُستمر بالخطوة الفرعية ج).

الخطوة الفرعية ج) في حال $h_{hi} > (h_{rain} - 1\,200)$، يقع جزء من المسير على الأقل ضمن طبقة الذوبان. وفي هذه الحالة، يُتبع ما يلي:

تُستخدم الوظيفة 2 المعرَّفة في الفقرة 4.2.4.2 مع القيمة الحالية للارتفاع كمتغير لحساب متوسط مضاعِف التوهين عبر المسير، g، على ارتفاع المطر هذا وذلك لتخصيصه إلى المتجه $\boldsymbol{G}$ للقيمة الحالية للمؤشر m:

$$\boldsymbol{G}_{[m]} = g(h_{rain}) \tag{59}$$

ويخصَص احتمال ارتفاع المطر هذا إلى المتجه P:

$$\boldsymbol{P}_{[m]} = \boldsymbol{\Pi}_{[\boldsymbol{n}]} \tag{60}$$

حيث يؤخذ $\boldsymbol{\Pi}_{[n]}$ من الجدول 2.

وفي حال $n < 48$، يزاد المؤشر m.

وفي حال $n < 48$، يزاد المؤشر n ويكرَر من الخطوة الفرعية أ)، وإلاُ تُترك هذه الحلقة ويُستمر من المعادلة (63).

وفي حال $h_{hi} \leq (h_{rain} - 1\,200)$، يُستمر بالخطوة الفرعية د).

الخطوة الفرعية د) يتم التوصل إلى هذه الخطوة لقيم n التي تقع فيها طبقة الذوبان فوق المسير بالكامل. ويخصَص المضاعِف 1 إلى المتجه $\boldsymbol{G}$:

$$\boldsymbol{G}_{[m]} = 1 \tag{61}$$

ويراكَم احتمال ارتفاع الطبقة هذا في المتجه P:

$$\boldsymbol{P}_{[m]} = \boldsymbol{P}_{[m]} + \boldsymbol{\Pi}_{[n]} \tag{62}$$

حيث يؤخذ $\boldsymbol{\Pi}_{[n]}$ من الجدول 2.

ويلاحَظ عدم زيادة المؤشر m في هذه الخطوة الفرعية.

وفي حال $n < 48$، يزاد المؤشر n ويكرَر من الخطوة الفرعية أ)، وإلاُ تُترك هذه الحلقة ويُستمر من المعادلة (63).

نهاية حلقة الحساب لكل قيمة للمؤشر n

يُحسب عدد الأعضاء في كل من المتجهين $\boldsymbol{G}$ و$\boldsymbol{P}$:

$$M = m + 1 \tag{63}$$

الخطوة 2: التكرار الأولي

تعيَّن قيمة تجريبية أولية للتوهين:

$$A_{trial} = A_{rainp} \quad \text{(dB)} \tag{64}$$

حيث يُحسب A_{rainp} وفق الفقرة 2.2.4.2 '1'.

وتُحسب النسبة المئوية المقابلة من الوقت التي يُتجاوز فيها هذا التوهين التجريبي:

$$p_{trial} = \sum_{m=0}^{M-1} \boldsymbol{P}_{[m]} T\left(\frac{A_{trial}}{\boldsymbol{G}_{[m]}}\right) \quad (\%) \tag{65}$$

حيث T هي الوظيفة 3 المعرَّفة في الفقرة 4.2.4.2 أعلاه.

ويعَد لبحث ثنائي بحساب التوهين الأدنى والأقصى باستخدام إحدى الحالتين التاليتين:

الحالة 1: $p_{trial} > p$:

في هذه الحالة، يزاد التوهين التجريبي زيادات تدرجية قيمة كل منها A_p حتى $p_{trial} \leq p$، على النحو التالي:

وخلال $p_{trial} > p$:

تُبدأ حلقة خلال:

ويزاد التوهين التجريبي وتُحسب النسبة المئوية p_{trial} المقابلة:

$$A_{trial} = A_{trial} + A_{rainp} \quad \text{(dB)} \tag{66a}$$

$$p_{trial} = \sum_{m=0}^{M-1} \boldsymbol{P}_{[m]} \mathrm{T}\left(\frac{A_{trial}}{\boldsymbol{G}_{[m]}}\right) \quad (\%) \tag{66b}$$

نهاية حلقة خلال:

$$A_{min} = A_{trial} - A_{rainp} \quad \text{(dB)} \tag{67a}$$

$$A_{max} = A_{trial} \quad \text{(dB)} \tag{67b}$$

الحالة 2: $p_{trial} \leq p$:

في هذه الحالة، يُضبط A_{min} وA_{max} مباشرة باستخدام:

$$A_{min} = 0{,}01 \quad \text{(dB)} \tag{68a}$$

$$A_{max} = A_{trial} \quad \text{(dB)} \tag{68b}$$

ويعاد تعيين التوهين التجريبي في مركز مدى البحث بوحدة dB:

$$A_{trial} = 0{,}5(A_{min} + A_{max}) \qquad \text{(dB)} \tag{69}$$

الخطوة 3: البحث الثنائي

يعيَّن مدى البحث المستهدَف للتوهين:

$$A_{range} = min\left(0{,}1, 0{,}01A_{rainp}\right) \qquad \text{(dB)} \tag{70}$$

حيث يُحسب A_{rainp} وفق الفقرة 2.2.4.2 '1'.

وخلال $(A_{max} - A_{min}) > A_{range}$

تُبدأ حلقة خلال.

ويعاد حساب p_{trial} باستخدام المعادلة (65) مع القيمة الحالية للتوهين التجريبي A_{trial}.

ويعاد تعيين مدى البحث وفقاً لإحدى الحالات التالية:

في حال $p_{trial} > p$

$$A_{min} = A_{trial} \qquad \text{(dB)} \tag{71a}$$

وفي حال $p_{trial} \leq p$

$$A_{max} = A_{trial} \qquad \text{(dB)} \tag{71b}$$

ويعاد حساب A_{trial} باستخدام المعادلة (69) مع القيمتين الحاليتين للتوهين التجريبي الأدنى والأقصى A_{min} وA_{max}.

نهاية حلقة خلال

ويعطى الآن التوهين الذي يُتجاوز خلال p% من الوقت بفعل المطر والثلوج الرطبة معاً بالتوهين التجريبي A_{trial} (dB).

3.4.2 تدريج التردد في إحصائيات التوهين بسبب المطر على المدى الطويل

عندما توجد إحصائيات موثوقة للتوهين على مدى طويل عند تردد واحد، يمكن استعمال العلاقة التجريبية التالية للحصول على تقدير تقريبي لإحصائيات التوهين عند الترددات الأخرى الواقعة في المدى من 7 إلى 50 GHz لنفس طول القفزة وفي نفس المنطقة المناخية:

$$A_2 = A_1 \left(\Phi_2 / \Phi_1\right)^{1 - H(\Phi_1, \Phi_2, A_1)} \tag{72}$$

حيث:

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2} \tag{73}$$

$$H(\Phi_1, \Phi_2, A_1) = 1{,}12 \times 10^{-3} \left(\Phi_2 / \Phi_1\right)^{0{,}5} \left(\Phi_1 A_1\right)^{0{,}55} \tag{74}$$

حيث A_1 وA_2 هما قيمتان متساويتان في الاحتمال للزيادة في توهين المطر عند الترددين f_1 وf_2 (بوحدات GHz)، على التوالي.

4.4.2 تدريج الاستقطاب في إحصائيات التوهين بسبب المطر على المدى الطويل

عندما توجد إحصائيات للتوهين على مدى طويل عن استقطاب واحد (رأسي (V) أو أفقي (H)) على وصلة معينة، يمكن تقدير التوهين للاستقطاب الآخر على الوصلة نفسها بواسطة العلاقة البسيطة التالية:

$$A_V = \frac{300\, A_H}{335 + A_H} \qquad \text{dB} \tag{75}$$

أو

$$A_H = \frac{335\, A_V}{300 - A_V} \qquad \text{dB} \tag{76}$$

وهاتان العلاقتان صالحتان في مدى أطوال المسيرات والترددات الصالحة لطريقة التنبؤ الواردة في الفقرة 1.4.2.

5.4.2 إحصائيات مدد الخبو ومرات حدوثه

بالرغم من قلة المعلومات عن التوزيع العالمي لمدد الخبو حتى يومنا هذا تتوفر بعض البيانات ونموذج تجريبي لبعض الإحصائيات الخاصة مثل المدة المتوسطة للخبو وعدد مرات حدوثه. ومن الواضح أن معدل الخبو بالمطر أقل بكثير من معدل الخبو بسبب تعدد المسيرات. ومن ناحية أخرى، تختلف القيمة الوسط والقيمة المتوسطة لمدة الخبو ويشير ذلك إلى تخالف توزيع مدد الخبو. علاوةً على ذلك، هناك علامات كثيرة تدل على أن مدة الخبو في المطر أعلى بكثير منها في حال الانتشار بالمسيرات المتعددة.

ويتحدد الخبو هنا بأنه تجاوز قيمة التوهين A أثناء فترة ما من الوقت (مثال 10 s أو أكثر). وتعطى العلامة بين عدد مرات حدوث الخبو $N(A)$ والمدة المتوسطة $D_m(A)$ لهذا الخبو والمدة الكلية $T(A)$ التي يتم تجاوز التوهين A أثناءها في فترة زمنية أطول من قيمة محددة في المعادلة:

$$N(A) = T(A) / D_m(A) \tag{77}$$

وتتعلق المدة الكلية $T(A)$ للخبو بتعريف حادث الخبو. والخبو الذي يهم التطبيقات عموماً هو التوهين A الذي تساوي مدته أو تفوق 10 s. غير أن الخبو الأقصر (مثل فاصل اعتيان مدته 1 s يستعمل في التجارب) مفيد أيضاً لتحديد النسبة المئوية من وقت الانقطاع الكلي الناجم عن عدم التيسر (أي المدة الكلية للخبو التي تساوي أو تفوق 10 s).

ويمكن تمثيل عدد مرات الخبو الذي يتجاوز قيمة التوهين A أثناء 10 ثوان أو أكثر بالمعادلة التالية (انظر الملاحظة 1):

$$N_{10s}(A) = 1 + 1313 \cdot \left[p(A)\right]^{0,945} \tag{78}$$

حيث $p(A)$ هي النسبة المئوية من الوقت التي يتم فيها تجاوز التوهين A(dB) بسبب المطر في السنة المتوسطة. وإذا لم تتوفر هذه المعلومات من مصادر محلية للقياسات طويلة الأجل، يمكن الحصول عليها عن طريق حل المعادلة (34) عددياً في الفقرة 1.4.2.

الملاحظة 1 – تستند المعادلة (78) إلى نتائج القياسات خلال سنة إلى ثلاث سنوات على 27 وصلة، مع ترددات تتراوح بين 12,3 إلى 83 GHz وأطوال المسير بين 1,2 و43 km في البرازيل والنرويج واليابان وروسيا.

وتعرّف شدة الانقطاع (OI) بأنها عدد أحداث عدم التيسر كل سنة، وبالنسبة لوصلة راديوية رقمية، تطرأ أحداث عدم التيسر كلما تم تجاوز معدل معين للخطأ في البتات لفترات تفوق 10 ثوانٍ. وينبغي استعمال الأسلوب التالي للتنبؤ بشدة الانقطاع بسبب التوهين بالمطر على وصلات بقفزة واحدة:

الخطوة 1: الحصول على النسبة المئوية من الوقت $p(M)$ التي يتم فيها تجاوز هامش الوصلة M(dB) بسبب التوهين بالمطر. وإذا لم تتوفر هذه المعلومات من مصادر محلية للقياسات طويلة الأجل، يمكن الحصول عليها عن طريق حل المعادلة (34) في الفقرة 1.4.2 حيث $M=A_p$.

الخطوة 2: تعطي العلاقة التالية تقديراً لشدة الانقطاع بسبب المطر:

$$OI(M)=N_{10s}(M) \tag{79}$$

حيث M(dB) هو هامش الوصلة المرتبط بمعدل الخطأ في البتات أو معدل خطأ الفدرة المعني وتعطى القيمة N_{10s} بالمعادلة (78).

ويتيح مجمل القياسات (لمسير طوله 15 km بتردد 18 GHz في شبه الجزيرة الإسكندنافية) الإرجاع إلى عدم التيسر نسبة تتراوح بين 95% و100% من جميع الظواهر الناجمة عن المطر والتي يتجاوز مستواها 15 dB تقريباً. وبعد معرفة هذا الجزء يمكن حساب عدم التيسر عن طريق ضربه في النسبة المئوية من الوقت الذي يتم أثناءه تجاوز قيمة التوهين A المعينة حسب الطريقة الواردة في الفقرة 1.4.2.

6.4.2 الخبو الناجم عن المطر في الشبكات متعددة القفزات

هناك عدة تشكيلات متعددة القفزات هامة في الشبكات من نقطة إلى نقطة التي تؤدي فيها البنية غير المنتظمة للماء الجوي دوراً، ولا سيما التشكيلة التي تحوي سلسلة من القفزات في شبكة ترادفية أو عدة سلسلات من القفزات في شبكة تعتمد تنوع المسار.

1.6.4.2 طول القفزات في شبكة ترادفية

يتأثر أداء الإرسال الإجمالي لنظام ترادفي إلى حد كبير بخصائص انتشار الوصلات المختلفة. ويمكن، أحياناً، أن تحقق الوصلة المادية الإجمالية نفسها بواسطة تركيبات مختلفة لطول القفزات. وتؤدي حتماً زيادة طول القفزات إلى زيادة احتمالات الانقطاع على هذه القفزات. ويمكن، من ناحية أخرى، أن تتطلب هذه الخطوة تنقيص عدد القفزات، وقد لا يؤدي ذلك إلى انحطاط الأداء الإجمالي للنظام الترادفي.

2.6.4.2 خبو مترابط على المسيرات الترادفية

لو كان هطول الأمطار مستقلاً إحصائياً عن المكان، لتحدد الاحتمال الإجمالي للخبو في سلسلة خطية من الوصلات الترادفية، بتقريب جيد، بواسطة العلاقة التالية:

$$P_T = \sum_{i=1}^{n} P_i \tag{80}$$

حيث P_i هو الوصلة من الرتبة i على عدد كلي n من الوصلات.

وإذا كانت أحداث الهواطل، من ناحية أخرى، مترابطة على منطقة محدودة، يصبح أيضاً التوهين على وصلتين أو أكثر من نظام متعدد القفزات مترابطاً، ويمكن في هذه الحالة أن يكتب احتمال الخبو المركب على النحو التالي:

$$P_T = K \sum_{i=1}^{n} P_i \tag{81}$$

حيث K هو عامل تعديل يشمل التأثير الإجمالي لترابط هطول الأمطار.

لا توجد دراسات كثيرة حول هذا الموضوع. وقد اهتمت إحداها بدراسة الترابط الآني بين هطول الأمطار في مواقع مختلفة تقع على طول طريق شرق–غرب، موازية تقريباً للاتجاه السائد لحركة العواصف، بينما عمدت دراسة أخرى إلى مراقبة التوهين الحاصل على سلسلة من القفزات القصيرة الموجهة شمال–جنوب أو موازية تقريباً للاتجاه السائد للعواصف في فصل أقصى هطول للأمطار.

فبالنسبة إلى حالة الوصلات الموازية لاتجاه حركة العواصف، كانت تأثيرات الترابط لسلسلة من الوصلات يبلغ طول كل منها l أكثر من 40 km، تأثيرات ضعيفة. وكان عامل التعديل K في هذه الحالة أكبر من 0,9 لانقطاع يستحثه المطر مدته 0,03%، ويمكن من ثم تجاهله (انظر الشكل 5). غير أنه في حالة قفزات أقصر، تصبح التأثيرات أكثر دلالة، ويكون احتمال الانقطاع الإجمالي من أجل 10 وصلات بطول 20 و10 و5 km لكل منها، بنسب 80% و65% و40% من توقع عدم الارتباط، على التوالي (عوامل تعديل من 0,8 و0,65 و0,4). ويبدو أن تأثير ارتباط هطول الأمطار يكون أكبر في القفزات الأولى القليلة ثم يتضاءل كلما تزايد الطول الإجمالي للسلسلة.

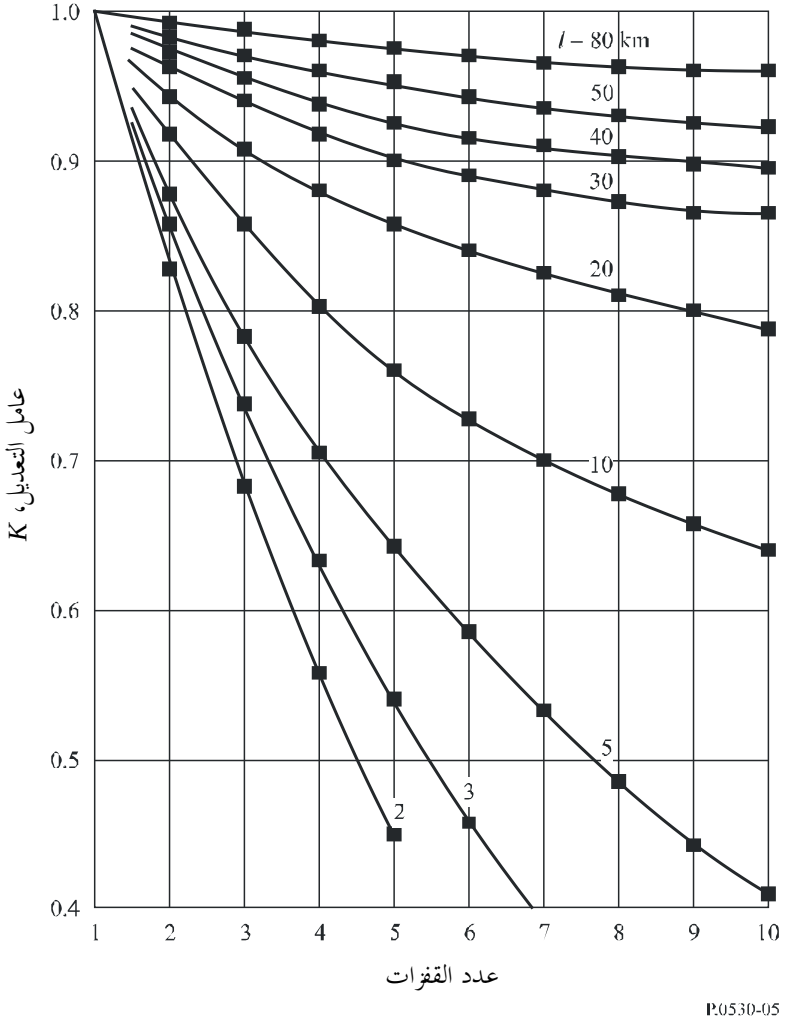
ويبين الشكل 6 عوامل التعديل في حالة الانتشار في اتجاه متعامد مع الاتجاه السائد لحركة العاصفة. وتنخفض عوامل التحويل، في هذه الحالة، بشكل أسرع في القفزات الأولى القليلة (التي تدل على ارتباط أقوى على مسافات قصيرة مما هو عليه في حالة الانتشار الموازي لحركة العواصف)، وتحافظ فيما بعد على قيم ثابتة نسبياً (وهذا ما يدل على ارتباط أضعف على مسافات طويلة).

3.6.4.2 شبكات تنوع المسار

نظراً إلى إمكانية حدوث تغيير كبير في البنية الأفقية للهواطل على مسافة تقل عن الكيلومتر فإن الشبكات باختلاف المسار قد تضم قفزتين ترادفيتين أو أكثر في مساري اختلاف أو أكثر. وبالرغم من عدم توفر معلومات بشأن تحسين التنوع في شبكات تنوع المسار الكاملة توجد بعض البيانات المتعلقة ببعض عناصر هذه الشبكة وخصوصاً فيما يتعلق بالمسيرين المتقاربين باتجاه عقدة الشبكة والمسيرات شبه المتوازية والمتباعدة أفقياً.

الشكل 5

عامل التعديل لتوهين مشترك بسبب المطر على سلسلة من الوصلات الترادفية ذات أطوال متساوية، *l*، لاحتمال تجاوز قدره 0,03% لكل وصلة



1.3.6.4.2 المسيرات التقاربية

تقدم التوصية ITU-R P.1410 معلومات عن عامل تعديل الاختلاف في المسيرات التقاربية في أدنى مدى للموجات المليمترية. وبالرغم من أن هذه التوصية قد أعدت لأغراض التطبيقات بين نقطة ثابتة ومنطقة ما، فإنها تعطي تعليمات عامة بشأن التحسين الذي أدخلته مثل هذه العناصر لشبكة باختلاف التسيير (أو متشابكة) من نقطة إلى نقطة أو لربما إلى نقطتين.

وتتعرض آنياً الوصلات التقاربية من نقطة إلى نقطة إلى أعمال خبو مختلفة بسبب التغير العشوائي للطقس والتوزيع المكاني لمعدل هطول المطر. وقد يحصل نتيجة لذلك انحطاط في نسبة التداخل إلى الإشارة *S/I* بين الوصلات بين المستعملين في قطاعات زاوية مختلفة عند حدوث خبو الإشارة في مسيرها بسبب المطر بينما لا يتأثر التداخل بذلك.

ويمكن تقدير توزيع الخبو التراكمي التفاضلي الناجم عن المطر (DRA) في وصلتين متقاربتين عاملتين بنفس التردد باتباع الخطوات التالية:

الخطوة 1: إدخال معامل تقريبي للتوزيع السنوي للتوهين بسبب المطر A_i (in dB) عبر كل مسير i = 1,2 باستعمال معامل توزيع يتراوح بين المديين الطويل والعادي:

$$P(A_i) = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{\ln A_i - \ln A_{mi}}{\sqrt{2}S_{ai}}\right) \tag{82}$$

حيث $\operatorname{erfc}(x) = 2/\sqrt{\pi}\int_x^{\infty} e^{-t^2}\,dt$ هي دالة الخطأ التكميلية. ولحساب القمتين A_{mi} وS_{ai}، يوصى باستعمال الإجراء المناسب على القياسات المحلية المتاحة أو توزيع التوهين الناجم عن المطر الوارد في الفقرة 1.4.2 من التوصية ITU-R P.530-12. ويرد هذا الإجراء بالتفصيل في الملحق 2 بالتوصية ITU-R P.1057-2.

الخطوة 2: تحديد ثابت عدم التجانس الناجم عن المطر D_r، أي المسافة بالكيلومتر حيث يصبح معامل الترابط مساوياً للقيمة $\sqrt{2}/2$. وتعتمد قاعدة بسيطة لحساب D_r على خط العرض المطلق $|lat|$ للموقع:

$$D_r = \begin{cases} 1 & |lat| \le 23^{\circ} \\ 1{,}5 & 23^{\circ} < |lat| \le 50^{\circ} \\ 1{,}75 & |lat| > 50^{\circ} \end{cases} \tag{83}$$

الخطوة 3: تحديد المسافة المعنية لمنطقة سقوط الأمطار باعتبارها $D_c = 20 \times D_r$.

الخطوة 4: تقييم المعلمة المكانية H_i، i=1,2، عبر كل مسير بديل للطول L_i:

$$H_i = 2L_iD_r \sinh^{-1}\left(L_i/D_r\right) + 2D_r^2\left(1 - \sqrt{\left(L_i/D_r\right)^2 + 1}\right), \quad i = 1,2 \tag{84}$$

الخطوة 5: تقييم المعلمة المكانية H_{12} بين المسارين:

$$H_{12} = \int_0^{L_1}\int_0^{L_2} \rho_0(d)\,d\ell_1\,d\ell_2 \tag{85}$$

حيث:

$$\rho_0(d) = \begin{cases} \dfrac{D_r}{\sqrt{D_r^2 + d^2}} & d \le D_c \\ \dfrac{D_r}{\sqrt{D_r^2 + D_c^2}} & d > D_c \end{cases} \tag{86}$$

وتعطي المعادلة التالية المسافة بين نقطتين في المسارين البديلين التي تشكل زاوية φ:

$$d^2 = \ell_1^2 + \ell_2^2 - 2\ell_1\ell_2\cos\phi, \qquad 0 < \ell_1 \le L_1 \quad 0 < \ell_2 \le L_2 \tag{87}$$

الخطوة 6: حساب معامل الترابط للتوهين الناتج عن المطر:

$$\rho_a = \frac{1}{S_{a1}S_{a2}} \ln\left[\frac{H_{12}}{\sqrt{H_1 H_2}}\left(e^{S_{a1}^2}-1\right)^{1/2}\left(e^{S_{a2}^2}-1\right)^{1/2}+1\right] \tag{88}$$

الخطوة 7: وتعطي العلاقة التالية التوزيع التراكمي لـ DRA A_1-A_2 الذي يتجاوز العتبة δA (بالديسيبل):

$$P_{DRA} = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{u_{01}}{\sqrt{2}}\right) - \frac{1}{2}\int_{u_{01}}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{u_1^2}{2}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{u_{02}-\rho_a u_1}{\sqrt{2}\sqrt{1-\rho_a^2}}\right)du_1 \tag{89}$$

حيث:

$$u_i = \frac{\ln A_i - \ln A_{mi}}{S_{ai}} \quad , \qquad i = 1, 2 \tag{90}$$

$$u_{01} = \frac{\ln \delta a - \ln A_{m1}}{S_{a1}} \tag{91}$$

$$u_{02} = \frac{\ln\left(A_{m1}\exp(u_1 S_{a1}) - \delta a\right) - \ln A_{m2}}{S_{a2}} \tag{92}$$

2.3.6.4.2 المسيرات المتوازية المتباعدة أفقياً

تقدم بيانات جمعت في المملكة المتحدة في المدى 20-40 GHz دليلاً عن التحسن في اعتمادية الوصلة الذي يمكن تحقيقه عند استعمال المسيرات المتوازية في شبكات الاختلاف بتبديل المسيرات على النحو المبين في الشكل 6أ. أما كسب التنوع (أي الفرق بين التوهين (dB) الذي يتم تجاوزه في أثناء نسبة مئوية معينة من الوقت على وصلة واحدة والتوهين الذي يتم تجاوزه في آن واحد على وصلتين متوازيتين) فيكون على النحو التالي:

— يميل إلى التناقص كلما زاد طول المسير عن 12 km أثناء نسبة مئوية معينة من الوقت ومن أجل فصل جانبي معين بين المسيرين؛

— يكون عادة أكبر في حالة فصل من 8 km مما هو عليه عندما يكون الفصل بقيمة 4 km، مع أن زيادة هذه المباعدة إلى 12 km لا توفر تحسناً إضافياً؛

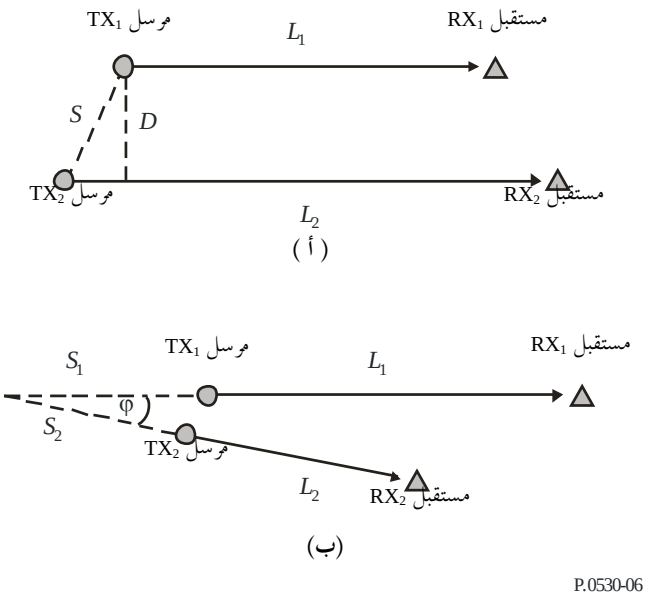
— لا يتعلق بالتردد تعلقاً ملموساً داخل المدى 20-40 GHz وبالنسبة إلى هندسة معينة؛

— يتراوح بين 2,8 dB تقريباً أثناء 0,1% من الوقت و4,0 dB في 0,001% من الوقت، مع مباعدة من 8 km وطول للمسير بالقيمة نفسها تقريباً. وتتراوح القيم بين 1,8 و2,0 dB من أجل مباعدة من 4 km.

وفيما يلي الخطوات اللازمة لاشتقاق تحسين التنوع I وكسب التنوع G فيما يعلق بمسارات متوازية تماماً:

الشكل 6

(أ) هندسة تنوع المسارات المتوازية
ب) هندسة تنوع المسارات التي تنحرف عن كونها متوازية تماماً



الخطوة 1: اتباع الخطوات 1 إلى 4 من الفقرة 1.3.6.4.2.

الخطوة 2: حساب H_{12} وفقاً للمعادلة (84). نظراً لتغير الهندسة من تقارب المسارات المتوازية، هناك تعديل في الخطوة 5 من الإجراء المبين في الفقرة 1.3.6.4.2. وبوجه خاص، يُعبر عن تعريف المسافة d بين نقطتي عناصر المسير البديلة المستعملة لحساب معامل الترابط $\rho_0(d)$ في المعادلة (86) في هذه الحالة كما يلي:

$$d^2 = S^2 + 2\sqrt{S^2 - D^2}\,|\ell_1 - \ell_2| + (\ell_1 - \ell_2)^2 \qquad 0 < \ell_1 \le L_1,\ 0 < \ell_2 \le L_2 \tag{93}$$

حيث يُفصل أفقياً بين المسارات المتوازية بمسافة D وS هي المسافة بين المرسلين (انظر الشكل 6أ).

الخطوة 3: تكرار الخطوة 6 من الفقرة 1.3.6.4.2 باستعمال قيمة H_{12} المستمدة في الخطوة 2.

الخطوة 4: ويعطى التوزيع التراكمي لتشكيلة التنوع المتوازي الذي يتجاوز عمق الخبو A_i بالمعادلة التالية:

$$P_d(A_i) = \frac{1}{2}\int_{u_2}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{u_1 - \rho_a u}{\sqrt{2}\sqrt{1-\rho_a}}\right) du \tag{94}$$

حيث تعطى القيمة u_i، i=1,2، في المعادلة (90).

الخطوة 5: يتم الحصول على تحسين التنوع I عند مستوى التوهين المرجعي A_i استناداً إلى العلاقة التالية:

$$I(A_i) = \frac{P(A_i)}{P_d(A_i)}, \qquad i=1,2 \tag{95}$$

الخطوة 6: يتم الحصول على كسب التنوع G عند النسبة المئوية المرجعية t استناداً إلى العلاقة التالية (انظر الملاحظة 1):

$$G(A_i) = A_i(t) - A_d(t), \qquad i=1,2 \tag{96}$$

الملاحظة 1 – لحساب $A_i(t)$ و$A_d(t)$ في المعادلة (96)، ينبغي الاحتفاظ بالمعادلتين (82) و(94).

ينبغي تطبيق تحليل عددي لعكس المعادلة (94).

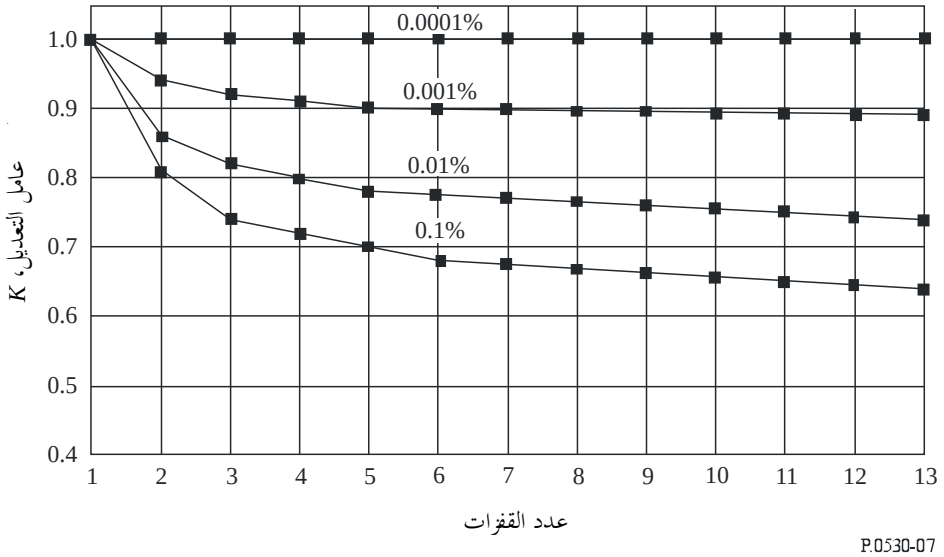
في حالة انحراف المسارين البديلين عن كونهما متوازيين تماماً مع بعضهما بعض، كما هو موضح في الشكل 6 ب)، يتقاطع تمديد الوصلتين عند نقطة معينة في المسافتين S_1 وS_2 انطلاقاً من جهازي الإرسال. وأيضاً، لحساب عامل جدارة التنوع (الكسب والتحسين) تُكرر الخطوات 1 إلى 6 من القسم الحالي. ومع ذلك، تعطى قيمة d في هذه الحالة بواسطة المعادلة (87) وتكون H_{12} على النحو التالي:

$$H_{12} = \int_{S_1}^{S_1+L_1} \int_{S_2}^{S_2+L_2} \rho_0\left(d = |\ell_1 - \ell_2|\right) d\ell_1 d\ell_2 \tag{97}$$

الشكل 7

عامل التعديل لتوهين مشترك بسبب المطر على سلسلة من الوصلات الترادفية طول كل منها 4,6 km تقريباً لعدة سويات لاحتمال التجاوز لكل وصلة من الوصلات

(مايو 1975 – مارس 1979)



4.6.4.2 مسيرات بمكررات منفعلة

1.4.6.4.2 مكررات مستوي العاكس

فيما يتعلق بالمسيرات ذات الفرعين أو أكثر (مجموع الفروع N) والتي يستعمل لكل منها مستوي عاكسات منفصلة والتي تكون فروعها متوازية بفارق درجات قليلة (انظر الملاحظة 1)، يحسب التوهين الناجم عن المطر على طول المسير باستبدال طول المسير كالتالي:

$$d = d_{leg1} + d_{leg2} + \ldots + d_{legN} \quad \text{km} \tag{98}$$

في طريقة الفقرة 1.4.2 بما فيها حساب عامل تناقص المسافة في المعادلة (32).

الملاحظة 1 – لا يمكن حالياً إعطاء تعليمات صارمة حول كيفية توازي التفرعات. وإذا لم يكن مسار التفرع موازياً ينتج عن المعادلة (98) عامل تناقص r في المعادلة (32) أصغر مما يجب وبالتالي يحصل سوء تقدير للتوهين الكلي الفعّال. وقد يستحسن لحل هذه المشكلة استعمال كل من المعادلة (98) وطول المسير الناتج عن طريق جمع نهايتي أول وآخر تفرع في حساب عامل التناقص كل على حدة ثم حساب المتوسط.

وثمة طريقة بديلة تكمن في اعتبار التفرعات مسيرات منفصلة وتطبيق الطريقة التي تنص عليها الفقرة 6.4.2.

2.4.6.4.2 مكررات بهوائيات متعاكسة

عندما يستعمل تفرعا مسار أو أكثر نفس الاستقطاب تحسب إحصائيات التوهين باستعمال الطريقة الواردة في 1.4.6.4.2 فيما يتعلق بمستوي العاكس.

وإذا استعملت تفرعات المسار استقطابات مختلفة تطبق طريقة الفقرة 1.4.2 مع المعادلة (98) لكل من الاستقطابين الأفقي والعمودي من أجل الحصول على النسبتين المؤقتتين من الوقت p_H وp_V اللتين تم أثناءهما تجاوز التوهين المطلوب (انظر الملاحظة 1) في الاستقطابين الأفقي والعمودي على التوالي. وتستعمل المعادلة (98) لحساب طول المسير الكلي d_H لهذه التفرعات التي تستعمل الاستقطاب الأفقي وكذلك لحساب طول المسير الكلي d_V للتفرعات التي تستعمل الاستقطاب العمودي. ثم تحسب النسبة المئوية من الوقت p التي تم أثناءها تجاوز التوهين المحدد على طول المسير (انظر الملاحظة 2):

$$p = \frac{p_H d_H + p_V d_V}{d_H + d_V} \quad \% \qquad (99)$$

الملاحظة 1 - بما أن الطريقة الواردة في الفقرة 1.4.2 تعطي التوهين الذي تم تجاوزه أثناء نسبة مئوية معينة من الوقت يمكن تحويلها رقمياً من أجل الحصول على النسبة المئوية من الوقت التي تم أثناءها تجاوز توهين معين.

الملاحظة 2 - في حال انحراف تفرعات المسير عن التوازي بعضها بالنسبة إلى البعض الآخر وبشكل كبير يستحسن استخدام طريقة شبيهة بتلك المقترحة في الملاحظة 1 من الفقرة 1.4.6.4.2 من أجل تحسين الانحراف. وفي هذه الحالة ينبغي حساب التوهين لكل استقطاب على حدة.

7.4.2 التنبؤ بالانقطاع الناجم عن الهواطل

عند تصميم وصلة رقمية، يحسب احتمال تجاوز التوهين بسبب المطر P_{rain} المساوي لهامش الحماية من الخبو المنتظم F (dB) (انظر الفقرة 5.3.2) لمعدل الخطأ في البتات (BER) المعني من الصيغة التالية:

$$P_{rain} = p/100 \qquad (100)$$

حيث p (%) هي النسبة المئوية من الوقت التي يتجاوز خلالها التوهين بسبب المطر F (dB) في السنة المتوسطة ويمكن التوصل إليها بحل المعادلة (34) الواردة في الفقرة 1.4.2.

3 تغيرات زاوية الوصول و/أو زاوية الانطلاق

يمكن أن تسبب تدرجات شاذة في دليل الانكسار في الجو الصافي على طول المسير، تغيرات كبيرة جداً في زوايا الوصول والانطلاق للموجات المرسلة والموجات المستقبلة. وتكون هذه الترددات شبه مستقلة عن التردد وتحدث أولاً في المستوي الرأسي للهوائيات ويكون مدى الزوايا أكبر في مناطق الشواطئ الرطبة مما هو عليه في المناطق الداخلية الجافة. ولم تشاهد تغيرات دلالية أثناء حالات الهواطل.

ويمكن أن يكون التأثير كبيراً على مسيرات طويلة تستعمل فيها هوائيات بحزم ضيقة وكسب عالٍ. فإذا كان عرض الحزمة ضيقاً، يمكن أن يبقى اتجاه الموجة المغادرة/الواصلة بعيداً بما يكفي عن المحور لكي يحدث خبو دلالي (انظر الفقرة 3.2). وإضافة إلى ذلك، إذا حدث تراصف الهوائيات أثناء فترات تكون فيها زوايا الوصول شاذة جداً فقد لا يكون التراصف مثالياً. ومن ثم عندما تتراصف الهوائيات على مسيرات حرجة (مثل مسيرات طويلة في منطقة ساحلية) يستحسن التأكد من التراصف عدة مرات في فترة من بضعة أيام.

4 انخفاض التمييز بالاستقطاب المتقاطع (XPD)

يمكن أن يتعرض التمييز بالاستقطاب المتقاطع (XPD) إلى انحطاط كافٍ لإنتاج تداخل في نفس القناة وبدرجة أقل تداخل في القناة المجاورة. ويجب أن يؤخذ في الاعتبار انخفاض التمييز XPD الذي يحدث في ظروف الجو الصافي وفي ظروف الهواطل كذلك.

1.4 التنبؤ بالانقطاع الناجم عن تأثيرات الجو الصافي

يحدد التأثير المشترك للانتشار عبر مسيرات متعددة ولمخططات الاستقطاب المتقاطع للهوائيات انخفاض التمييز XPD الذي يحدث أثناء نسب مئوية صغيرة من الوقت. لحساب تأثير هذه الانخفاضات في أداء الوصلة يتعين اتباع الإجراء التالي خطوة بخطوة:

الخطوة 1: حساب:

$$XPD_0 = \begin{cases} XPD_g + 5 & \text{for} \quad XPD_g \le 35 \\ 40 & \text{for} \quad XPD_g > 35 \end{cases} \tag{101}$$

حيث XPD_g هو الحد الأدنى للتمييز XPD الذي يضمنه المصنّع عند نقطة تسديد هوائيات الإرسال والاستقبال أي الحد الأدنى للتمييز XPD لنقطة التسديد لكل من هوائي الإرسال والاستقبال.

الخطوة 2: تقييم معلمة النشاط عبر مسيرات متعددة:

$$\eta = 1 - e^{-0,2(P_0)^{0,75}} \tag{102}$$

حيث $P_0 = p_w/100$ هو عامل حدوث مسيرات متعددة يقابل النسبة المئوية من الوقت p_w (%) لتجاوز $A = 0$ dB في الشهر الأسوأ المتوسط كما تم حسابه في المعادلة (7).

الخطوة 3: تحديد:

$$Q = -10 \log_{10} \left(\frac{k_{XP}\ \eta}{P_0} \right) \qquad Q = -10 \log_{10} \left(\frac{k_{XP} \eta}{P_0} \right) \tag{103}$$

حيث:

$$k_{XP} = \begin{cases} 0,7 & \text{هوائي إرسال واحد} \\ 1 - 0,3 \exp \left[-4 \times 10^{-6} \left(\frac{s_t}{\lambda} \right)^2 \right] & \text{هوائيي إرسال} \end{cases} \tag{104}$$

وفي حالة صدور إرسال باستقطاب تعامدي من هوائيين مختلفين يمثل s_t (m) الفاصل الرأسي ويمثل λ (m) طول الموجة الحاملة.

الخطوة 4: تشتق المعلمة C من الصيغة التالية:

$$C = XPD_0 + Q \tag{105}$$

الخطوة 5: يحسب احتمال الانقطاع P_{XP} العائد إلى الاستقطاب المتقاطع في الجو الصافي من الصيغة التالية:

$$P_{XP} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}} \tag{106}$$

حيث M_{XPD} (dB) هو هامش التمييز XPD المكافئ لمعدل الخطأ في البتات (BER) المرجعي الذي تعطيه الصيغة التالية:

$$M_{XPD} = \begin{cases} C - \dfrac{C_0}{I} & \text{بدون XPIC} \\ C - \dfrac{C_0}{I} + XPIF & \text{في وجود XPIC} \end{cases} \tag{107}$$

حيث C_0/I هي نسبة الموجة الحاملة إلى التداخل لمعدل خطأ في البتات (BER) مرجعي والتي يمكن تقييمها سواء بالمحاكاة أو بالقياس.

XPIF هو العامل المقيس في المختبر لتحسين الاستقطاب المتقاطع الذي يعطي الفارق في العزل بالاستقطاب المتقاطع (XPI) عند نسب الموجة الحاملة إلى الضوضاء عريضة بقدر كافٍ (35 dB عادةً) وعند معدل خطأ في البتات (BER) معين للأنظمة المجهزة أو غير المجهزة بملغي تداخل الاستقطاب المتقاطع (XPIC). والقيمة النمطية للملغي XPIF هي 20 dB تقريباً.

2.4 التنبؤ بانقطاع التمييز XPD العائد إلى تأثير الهواطل

1.2.4 إحصائيات التمييز XPD في حالات الهواطل

يحدد المطر الكثيف قيم انخفاض XPD المشاهدة أثناء نسب مئوية صغيرة من الوقت. وإذا لم تتيسر التنبؤات أو القياسات المفصلة على بعض المسيرات يمكن الحصول على تقدير تقريبي لتوزيع قيم XPD غير المشروط من خلال التوزيع التراكمي للتوهين بسبب المطر متحد الاستقطاب (CPA) (انظر الفقرة 4.2) بواسطة علاقة تساوي الاحتمالات التالية:

$$XPD = U - V(f)\log_{10} CPA \qquad \text{dB} \tag{108}$$

ويتعلق عموماً المعاملان U و$V(f)$ بعدد من المتغيرات والمعلمات التجريبية، بما في ذلك، التردد، f. ويمكن، بالنسبة إلى مسيرات في خط البصر مع زوايا ارتفاع صغيرة واستقطاب أفقي أو رأسي أن يحسب هذان المعاملان حساباً تقريبياً بواسطة الصيغ التالية:

$$U = U_0 + 30\log_{10} f \tag{109}$$

$$\begin{aligned} V(f) &= 12{,}8\, f^{0{,}19} && \text{for} \quad 8 \le f \le 20 \text{ GHz} \\ V(f) &= 22{,}6 && \text{for} \quad 20 < f \le 35 \text{ GHz} \end{aligned} \tag{110}$$

وقد حددت لقيم توهين أكبر من 15 dB قيمة متوسطة U_0 من 15 dB تقريباً مع حد أدنى من 9 dB لكل القياسات.

ويصل تغير قيم U و$V(f)$ إلى نحو يكون فيه الفرق بين قيم CPA للاستقطابين الرأسي والأفقي غير ذي دلالة عندما يصار إلى تقدير XPD. وينصح المستعمل باستخدام قيمة CPA للاستقطاب الدائري عندما يطبق المعادلة (108).

ويمكن تطبيق إحصائيات XPD على المدى الطويل التي تم التوصل إليها عند تردد معين على تردد آخر بواسطة العلاقة شبه التجريبية التالية:

$$XPD_2 = XPD_1 - 20\log_{10}(f_2/f_1) \qquad \text{for } 4 \le f_1, f_2 \le 30 \text{ GHz} \tag{111}$$

حيث XPD_1 وXPD_2 هما قيمتا التمييز XPD التي لا يتم تجاوزهما أثناء النسبة المئوية نفسها من الوقت عند الترددين f_1 وf_2.

وتتأثر العلاقة بين XPD وCPA بعدة عوامل، بما في ذلك الهوائي المتبقي XPD الذي لم يؤخذ في الاعتبار. وتعتبر المعادلة (110) أقل دقة في حالة فروقات كبيرة بين الترددات المتوالية. وتكون أكثر دقة عندما تقابل XPD_1 وXPD_2 الاستقطاب نفسه (الأفقي أو الرأسي).

2.2.4 إجراء خطوة بخطوة للتنبؤ بالانقطاع الناجم عن تأثيرات الهواطل

الخطوة 1: تحديد التوهين على المسير $A_{0,01}$ (dB) الذي تم تجاوزه أثناء 0,01% من الوقت من المعادلة (33).

الخطوة 2: تحديد التوهين على المسير المكافئ A_p (dB):

$$A_p = 10^{((U - C_0/I + XPIF)/V)} \tag{112}$$

حيث يحصل على U من المعادلة (109) وV من المعادلة (110)، C_0/I (dB) هي نسبة الموجة الحاملة إلى التداخل المحددة للمعدل BER المرجعي بدون الملغي XPIC، وXPIF (dB) هو عامل تحسين الاستقطاب المتقاطع للمعدل BER المرجعي.

في حالة عدم استعمال الجهاز XPIC يضبط XPIF = 0.

الخطوة 3: تحدد المعلمات التالية:

$$m = \begin{cases} 23.26 \log_{10}\left[A_p/(0.12\, A_{0.01})\right] & \text{if } m \le 40 \\ 40 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{113}$$

و

$$n = \left(-12{,}7 + \sqrt{161{,}23 - 4m}\right)\Big/2 \tag{114}$$

يجب أن تكون قيم n الصالحة في المدى من –3 إلى 0. ينبغي ملاحظة أنه في بعض الحالات وخاصة عند استعمال الجهاز XPIC يمكن الحصول على قيم n تقل عن –3. في هذه الحالة يتعين ملاحظة أن قيم p التي تقل عن –3 سوف تؤدي إلى معدل BER للانقطاع يقل عن 1×10^{-5}.

الخطوة 4: يحدد احتمال الانقطاع من الصيغة التالية:

$$P_{XPR} = 10^{(n-2)} \tag{115}$$

5 التشوه الناجم عن تأثيرات الانتشار

يكمن السبب الأولي للتشوه في وصلات على خط البصر في نطاقي الموجات UHF وSHF في اعتماد التردد على الاتساع وعلى تأخر الزمرة في ظروف تعدد المسيرات في الجو الصافي. وتؤدي الزيادة في هامش الحماية من الخبو في الأنظمة التماثلية إلى تحسين الأداء بما أن تأثير الضوضاء الحرارية قد انخفض. غير أن استعمال الهوامش العريضة للحماية من الخبو في الأنظمة الرقمية لن يكون مجدياً إذا كان الخبو الانتقائي للتردد هو الذي يسبب انخفاض جودة الأداء.

في معظم الأحوال يعتمد تشكيل قناة الانتشار على افتراض أن الإشارة تتبع عدة مسيرات أو أشعة من المرسل إلى المستقبل. وهي تتضمن المسير المباشر عبر الجو وقد تتضمن مسيراً أو عدة مسيرات إضافية آتية من الانعكاس الأرضي و/أو الانكسار الجوي. وإذا وصل إلى المستقبل إشارة مباشرة وتكرار متأخر جداً له اتساع يكاد يكون مساوياً يحدث تداخل بين الرموز قد يؤدي إلى خطأ في كشف المعلومات. وتستعمل وسائل التنبؤ بالأداء مثل هذا النموذج المتعدد الأشعة الذي يدمج مختلف المتغيرات مثل المهلة (الفارق الزمني بين أول شعاع يصل وبين الأشعة الأخرى) وتوزيع الاتساع الذي يصحبه نموذج خاص لعناصر التجهيز مثل المشكل ومسوي الطور ومخططات تصحيح الخطأ الأمامي (FEC)، وإلخ. وهناك عدة طرق يمكن جمعها في ثلاث فئات عامة على أساس استعمال توقيع النظام أو تشوه الاتساع الخطي (LAD) أو الهامش الصافي للحماية من الخبو. كثيراً ما يستعمل في المنهج الذي يعتمد على التوقيع نموذج محاكاة ثنائي الشعاع يستخدم في المختبر ويربط بينه وبين معلومات أخرى مثل معلومات عن حدوث تعدد المسيرات وعن خصائص الوصلة. أما في المنهج الذي يعتمد على التشوه LAD يقدر توزيع التشوه على مسير ما يلاحظ عند ترددين في النطاق الراديوي وتستعمل خصائص المشكل ومسوي الطور، إلخ. كذلك يستعمل المنهج الذي يعتمد على الهامش الصافي للحماية من الخبو توزيعات إحصائية لاتساع الشعاع مقدرة بالإضافة إلى معلومات عن التجهيزات بالقدر المستعمل في المنهج الذي يعتمد على التشوه LAD. والطريقة التي توصي بها الفقرة 1.5 هي الطريقة التي تعتمد على التوقيع للتنبؤ بالخطأ في الأداء.

يعتقد أن التشوه العائد إلى الهواطل يمكن إهماله وعلى أي حال فهي مشكلة أقل تأثيراً بكثير من التوهين بسبب الهواطل في حد ذاته. ومن المعروف أن التشوه يحدث في نطاقات امتصاص الموجات المليمترية والمليمترية الفرعية غير أن تأثيرها في أنظمة التشغيل غير واضح حتى الآن.

1.5 التنبؤ بالانقطاع في الأنظمة الرقمية غير المحمية

يعرف احتمال الانقطاع هنا على أنه احتمال كون المعدل BER أكبر من عتبة معينة.

الخطوة 1: حساب مهلة متوسط الوقت انطلاقاً من:

$$\tau_m = 0{,}7 \left(\frac{d}{50} \right)^{1{,}3} \qquad \text{ns} \tag{116}$$

حيث d هو طول المسير (km).

الخطوة 2: تحسب معلمة النشاط عبر مسيرات متعددة η مثل الخطوة 2 من الفقرة 1.4.

الخطوة 3: يحسب احتمال الانقطاع الانتقائي من الصيغة التالية:

$$P_s = 2{,}15\eta \left(W_M \times 10^{-B_M/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,M}|} + W_{NM} \times 10^{-B_{NM}/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,NM}|} \right) \tag{117}$$

حيث:

W_x: عرض التوقيع (GHz)

B_x: عمق التوقيع (dB)

$\tau_{r,x}$: التأخر المرجعي (ns) المستعمل للحصول على التوقيع مع x وهي القيمة التي تدل إما على خبو مع الطور الأدنى (M) أو خبو مع طور غير الأدنى (NM).

وإذا لم يتوفر إلا معلمة النظام المقيس K_n يمكن حساب احتمال الانقطاع الانتقائي في المعادلة (117) باستعمال العلاقة التالية:

$$P_s = 2{,}15\eta\,(K_{n,M} + K_{n,NM})\,\frac{\tau_m^2}{T^2} \qquad (118)$$

حيث:

T: فترة النظام (ns)

$K_{n,x}$: معلمة النظام المقيس مع x التي تدل على إما الطور الأدنى (M) أو الطور غير الأدنى (NM) للخبو.

وتقدم التوصية ITU-R F.1093 تعاريف معلمات التوقيع ومواصفة كيفية الحصول على التوقيع.

6 التقنيات الخاصة بتخفيف تأثيرات الانتشار عبر مسيرات متعددة

ينبغي عند تصميم الوصلات مراعاة تأثيرات الخبو غير الانتقائي للترددات البطيء نسبياً (أي "الخبو المنتظم") العائد إلى تمديد الحزمة، والخبو الانتقائي للترددات الأسرع العائد إلى الانتشار عبر مسيرات متعددة وهناك عدد من التقنيات المتوفرة لتخفيف جميع هذه التأثيرات في نفس الوقت. وغالباً ما تخفف نفس هذه التقنيات أيضاً انخفاض تمييز الاستقطاب المتقاطع. ويمكن تصنيفها في فئتين هما: التقنيات التي لا تتطلب تنوعاً في الاستقبال أو الإرسال والتقنيات التي تتطلب التنوع.

وبما أنه يستحسن تجنب التنوع قدر الإمكان لأسباب اقتصادية ينظر أولاً في الاستراتيجيات والتقنيات بلا تنوع الواردة في الفقرة 1.6. وهذه الاستراتيجيات والتقنيات لها علاقة أيضاً بأنظمة التنوع وينبغي استعمالها عند الإمكان حتى في الحالات التي لا تمثل ضرورة بالغة. أما تقنيات التنوع فترد دراستها في الفقرة 2.6.

1.6 التقنيات بلا تنوع

يمكن استعمال عدة تقنيات بهدف تخفيض تأثيرات الخبو الناجم عن المسيرات المتعددة بلا تنوع وذلك للوصلات سواء بين أبراج قائمة أم بين أبراج سيعمل على بنائها. ويستحسن مراعاة استيفاء هذه التقنيات لإحدى الاستراتيجيات التالية أو أكثر:

الاستراتيجية A: التخفيف من حدوث الخبو المنظم الشديد الناجم عن آليات جوية (مثل تمديد الحزم وفق اقتران الهوائي والمسيرات المتعددة الجوية، (انظر الفقرة 3.2)؛

الاستراتيجية B: التخفيف من حدوث انعكاسات على سطح الأرض؛

الاستراتيجية C: تخفيض التخالف الزمني بين الانعكاسات على سطح الأرض والموجات الجوية.

1.1.6 زيادة ميل المسير

يجب تحديد مواقع الوصلات على نحو يستفاد به من التضاريس الأرضية بحيث يزداد ميل المسير (ويسمى ذلك أحياناً تقنية "high-low") إذ إن ذلك يستجيب لأهداف الاستراتيجية A المذكورة أعلاه ولجزء من أهداف الاستراتيجية B أيضاً. وينبغي إرفاق هذه الطريقة بطريقة حجب التضاريس من أجل تخفيض سويات الانعكاسات على سطح الأرض (الاستراتيجية B؛ انظر الفقرة 2.1.6) إذ إن الطريقتين وثيقتا الصلة.

ويمكن تخفيض ارتفاع الهوائي عند إحدى نهايتي المسير في الحالة التي تكون فيها الأبراج موجودة وذلك لاستيفاء الاعتبارات التي سبق ذكرها شريطة التقيد بقواعد الإفساح الواردة في الفقرة 2.2.2.

2.1.6 تخفيض تأثيرات الانعكاسات على سطح الأرض

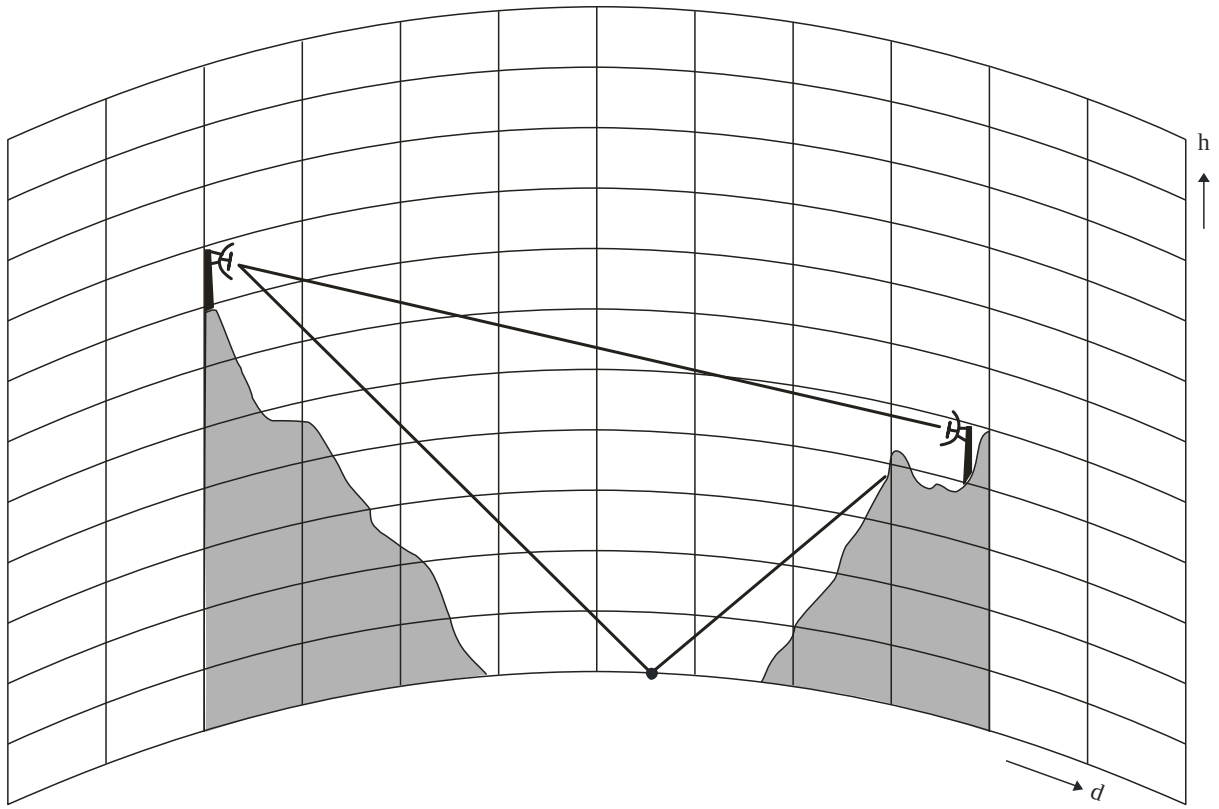
يجب تركيب الوصلات حيث يمكن التخفيف من حدوث انعكاسات على السطح شديدة مرآوية ومنتثرة (أو على الأقل جعل الانعكاسات المرآوية الشديدة انعكاسات منتثرة أصغر). وبالتالي التقليل من حدوث الخبو الناجم عن المسيرات المتعددة على سطح الأرض والتشوهات (الاستراتيجية B). وهناك تقنيات متعددة لهذا الغرض ترتبط غالباً بعضها بالبعض الآخر. ولذا لا ينبغي تطبيق أحدها دون مراعاة التقنيات الأخرى. وسترد دراسة هذه التقنيات في الفقرات التالية:

1.2.1.6 تأثير حجب نقطة الانعكاس

تكمن إحدى التقنيات في الاستفادة من التلال أو الجبال أو المباني الموجودة على طول المسير من أجل حجب الهوائيات عن المسطحات الأكثر مرآوية وانعكاسية (مثل المسطحات المائية والسهول وقمم التلال المستوية العارية من الأشجار وسطوح المباني؛ انظر الشكل 8). يستحسن في أفضل الظروف أن تكون التلال والجبال مكسوة بالنباتات من أجل زيادة خفض سوية المجال المنعرج على سطحها. ويمكن بالطبع حجب المسطحات الانعكاسية بسهولة أكبر عند تخفيض إفساح المسير (انظر الفقرة 3.1.6).

الشكل 8

مثال لحماية هوائي بحجبه عن انعكاس مرآوي



P.0530-08

يستحسن إجراء دراسات لمسير الحزم الشعاعية من أجل إيجاد عائق الحجب المناسب وذلك في مدى من القيم الفعّالة للعامل k تقع بين k_e (99,9%) (أو قيمة حد أدنى أخرى) وبين "اللانهاية" (انظر الفقرة 2.2.2). وينبغي الانتباه إلى أن يكون انعكاس السطح محجوباً بالكامل أو جزئياً للقيم المرتفعة أو المتوسطة الفعلية للعامل k. ومن الواضح أن بعض فوائد تأثير الحجب تهدد باستعمال عائق الحجب إذا وقعت موجة منعكسة واحدة أو أكثر تحت تأثير "انكسار هائل" عند العوائق المذكورة إذ إن احتمال الخبو الناجم عن المسيرات المتعددة على سطح الأرض والتشوه يكون في هذه الظروف أكبر. كما ينبغي الحرص على أن يكون انعراج الموجة المباشرة مقبولاً مع مراعاة معايير إفساح المسير في القيم الفعّالة قليلة الارتفاع للعامل k والتي تعادل حالات الانكسار دون المعياري.

2.2.1.6 انتقال نقطة الانعكاس إلى سطح أقل انعكاسية

ثمة طريقة أخرى تنطوي على تسوية ارتفاع الهوائي عند أحد طرفي المسير أو عند الطرفين بحيث تكون الانعكاسات الناتجة في الجبال أو في أرض مزروعة أقل شدة. ويمكن تسوية ميل المسير في حالة المسيرات فوق الماء على نحو يحدث فيه الانعكاس فوق البر وليس فوق الماء ويفضل أن تكون أرضاً مكسوة بالأشجار أو النباتات. وتقرب نقطة الانعكاس من الهوائي المخفَّض وتبعد عن الهوائي المرفوع.

وترد طريقة تحديد موقع مناطق الانعكاس الممكنة في الفقرة 3.2.1.6 (الخطوات من 1 إلى 3). وفيما يتعلق بالمسيرات القصيرة بقدر كافٍ يستحسن استعمال التقنية بكاملها من أجل تحديد إمكانية اختيار ارتفاع الهوائي أو ارتفاع الهوائيين بحيث يتم تجنب التداخل الضار الناجم عن الانعكاسات المرآوية لسطح الأرض.

وتعالج الفقرة 4.2.1.6 طرائق حساب أو قياس شدة الانعكاس المرآوي لسطح الأرض.

3.2.1.6 الاختيار الأمثل لارتفاعات الهوائي

يمكن أحياناً في حالة المسيرات القصيرة تسوية ارتفاع هوائي واحد أو ارتفاع الهوائيين (الاستقبال والإرسال) بحيث لا تسبب أي موجة منعكسة على السطح تداخلاً ضاراً ينتقل مع الموجة المباشرة ليسيء للقيم الفعّالة للعامل k بشكل كبير. كما يمكن تسوية ارتفاعات الهوائي من أجل إحداث انعكاسات على سطح الأرض قليلة الانعكاسية، كما يرد في الفقرة 2.2.1.6. وفيما يلي طريقة الخطوة خطوة التي تتيح تطبيق التقنيتين وتحديد مدى ضرورة التنوع:

الخطوة 1: يحسب الارتفاع التقريبي لهوائيي الإرسال والاستقبال باستعمال قاعدة الإفساح المتعلقة بالأنظمة بلا تنوع في الفقرة 1.2.2.2.

الخطوة 2: يحسب أعلى ارتفاع لهوائيي الإرسال والاستقبال فوق المناطق المحتمل فيها حدوث انعكاس مرآوي والواقعة على خط المسير أو بجواره. وقد يكون سبب الانعكاسات المرآوية الشديدة وجود مناطق مثل السطوح المائية أو السهول أو القمم المسطحة للتلال غير المشجرة أو سطوح المباني. وقد لا يكون سطح الانعكاس في هذه المناطق بالضرورة أفقياً وقد يمر نفس المسير بمناطق مختلفة عدة (انظر الملاحظة 1). وإذا أمكن تحديد بعض المناطق استناداً إلى الخريطة يجب فيما يتعلق بمناطق أخرى دراسة دقيقة للتضاريس على طول المسير أو بجواره مباشرة.

وتعطي العلاقة التالية (انظر الشكل 9) الارتفاعين h_1 وh_2 لهوائيين فوق منطقة انعكاس بزاوية ميل ν (انظر الملاحظة 1):

$$h_1 = h_{1G} + y_1 - y_0 + x_0 \times 10^3 \times \tan \nu \quad \text{m} \tag{119}$$

$$h_2 = h_{2G} + y_2 - y_0 - (d - x_0) \times 10^3 \times \tan \nu \quad \text{m} \tag{120}$$

حيث:

y_1، y_2: ارتفاع الأرض عن سطح البحر في الموقعين 1 و2، على التوالي (m)

h_{1G}، h_{2G}: ارتفاع الهوائيين عن سطح الأرض في الموقعين 1 و2، على التوالي (m)

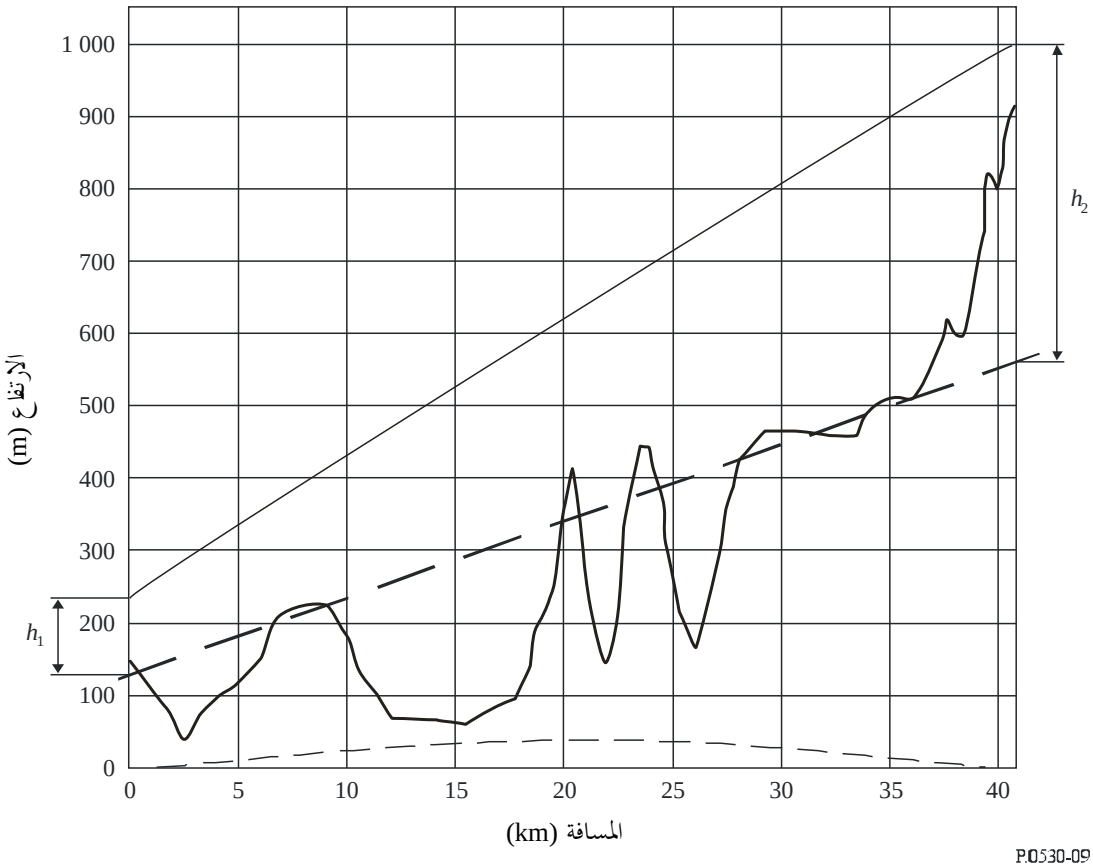
y_0: ارتفاع النقطة المركزية لمنطقة الانعكاس عن سطح البحر (m)

x_0: المسافة بين النقطة المركزية لمنطقة الانعكاس والموقع 1 (km).

وفي حال وجود منطقة الانعكاس فوق البحر يستحسن مراعاة التغيرات الناجمة عن المد والجزر.

الشكل 9

المسير في تضاريس أرضية عاكسة



الخطوة 3: تحسب المسافتان d_1 وd_2 بين كل سطح عاكس ممكن والموقعين 1 و2 (انظر الملاحظة 2) وذلك في مدى القيم الفعّالة للعامل k المحصورة بين k_e (99,9%) واللانهاية (انظر الفقرة 2.2.2؛ أما على الصعيد العملي فبالإمكان اختيار قيمة كبيرة مثل $k = 1{,}0 \times 10^9$):

$$d_1 = d(1 + b)/2 \qquad \text{km} \tag{121}$$

$$d_2 = d(1 - b)/2 \qquad \text{km} \tag{122}$$

حيث:

$$b = 2\sqrt{\frac{m+1}{3m}}\cos\left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3}\arccos\left(\frac{3c}{2}\sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}}\right)\right] \tag{123}$$

$$m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)} \times 10^3 \tag{124}$$

$$c = (h_1 - h_2) / (h_1 + h_2) \tag{125}$$

مع $ka = a_e$ وهو نصف القُطر المكافئ للأرض بالنسبة إلى عامل k معين (a = 6 375 km نصف القُطر المكافئ للأرض)؛ وفي المعادلة (120) يعبر عن d بالكيلومترات وعن h_1 وh_2 بالأمتار.

إذا أمكن تجنب مناطق الانعكاس المرآوي بتسوية ارتفاع أحد الهوائيين أو ارتفاع كليهما مع مراعاة قواعد الإفساح (الخطوة 1) يتم تقدير التعديل المدخَل ثم البدء من جديد بالخطوة 2.

الخطوة 4: أما بالنسبة إلى السطوح العاكسة المرآوية التي لا يمكن تجنبها، يحسب فرق طول المسير بين الموجتين (أو "الشعاعين") المباشرة وغير المباشرة (معبراً عنها بأطوال الموجة) في نفس مدى القيم الفعّالة لـ k:

$$\tau = \frac{2f}{0{,}3d}\left[h_1 - \frac{d_1^2}{12{,}74k}\right]\left[h_2 - \frac{d_2^2}{12{,}74k}\right]\times 10^{-3} \qquad (126)$$

وفي كل مرة يكون فيها عدد أطوال الموجة τ عدداً صحيحاً موجباً عندما تتغير k (1، 2، إلخ)، فإن الإشارة المستقبلة تمر في الحد الأدنى، الأمر الذي يتوجب تفاديه قدر الإمكان. وكلما ازداد عدد القيم الصحيحة للأطوال $\tau_{min} - \tau_{max}$ عندما تتغير k في مداها كلما ازداد احتمال الإساءة إلى نوعية الأداء مما يقتضي بعض التنوع.

عندما يكون $\tau_{min} - \tau_{max} > 1$ عند تغير k في المدى المطلوب، يمكن تجنب التنوع على نحو شبه مؤكد. لكن فيما يتعلق بمسيرات يتجاوز طولها 7,5 km تقريباً، فإن أفضل طريقة للتأكد من أن الحماية بالتنوع غير ضرورية هي تطبيق طريقة حساب حدوث الخبو على المسيرات المتعددة في الفقرة 3.2 وطريقة التنبؤ بالانقطاعات في الأنظمة الرقمية غير المحمية في الفقرة 1.5. ويجب في جميع الحالات تسوية ارتفاع أحد الهوائيين أو ارتفاع كليهما على نحو يكون فيه $\tau \approx 0{,}5$ بالنسبة إلى القيمة k المتوسطة.

عندما يكون $\tau_{min} - \tau_{max} \leq 1$ يصبح عمق الخبو الناجم عن المسيرات المتعددة على سطح الأرض واحتمال ضرورة التنوع مرتبطين بشدة انعكاس الإشارة (انظر الفقرتين 2.2.1.6 و3.2.1.6) ومعرفة ما إذا كان أحد الهوائيين أو كلاهما يحتوي على تمييز كافٍ بالنسبة إلى انعكاسات سطح الأرض (انظر الفقرة 5.2.1.6). وينبغي التذكر أنه في حال المسيرات الطويلة بشكل كافٍ فإن الطبقات الشاذة ذات عوامل تدرج الانكسار السالبة جداً قد تسبب خبواً للموجة المباشرة ناجماً عن تمديد الحزمة وأن الموجة أو الموجات المنعكسة على السطح قد تتعزز في نفس الوقت إذ إن طاقة الموجة المباشرة تنتشر باتجاه الأرض. وأفضل طريقة لتحديد ضرورة بعض الحماية بالتنوع هي تطبيق طريقة حساب حدوث الخبو على المسيرات المتعددة في الفقرة 3.2 وكذلك طريقة التنبؤ بالانقطاعات في الأنظمة الرقمية غير المحمية في الفقرة 1.5.

الملاحظة 1 – بما أن شكل المسيرات يستند إلى عينة من الارتفاعات التي تفصل بينها مسافة معينة، فإن الميل الفعلي لسطح الأرض يتغير قليلاً بين النقاط المقابلة على المسير. ويقترح السماح بتعديل صغير للقيمة المقدرة لزاوية ميل المظهر الرقمي ν (مثل القيم ± 10 m المقابل لتنوعات ارتفاعات الشكل في طرف القطعة). ويمكن حسب الاقتضاء إجراء فحص بالنظر للمسير القائم بين نقاط اعتيان الأرض.

وفي بعض الحالات التي يكون فيها شكل المسير قليل الانتظام أو يبدو تقطيعه غير ملائم، يستحسن رسم منحني التراجع على طول المسير وفق التعليمات الواردة في الفقرة 1.4.2.1.6 وافتراض أن الانعكاس يحدث على هذا المنحني من أجل دراسة الارتفاعات فوق نقطة الانعكاس والمسافات في هذه النقطة. وينبغي في هذه الحالة فحص الخطوات التي قدمت في هذه الفقرة وفي الفقرة 1.4.2.1.6 معاً.

الملاحظة 2 – يستحسن في بعض الحالات أن تكون أدنى قيمة فعّالة لـ k أقل من k_e (99,9%).

4.2.1.6 اختيار الاستقطاب المتعامد

يستحسن اختيار الاستقطاب المتعامد بدلاً من الاستقطاب الأفقي فيما يتعلق بالمسيرات فوق الماء بترددات أعلى من 3 GHz تقريباً. ويتوقع أن تحقق زوايا التماس التي تزيد عن 0,7° تقريباً انخفاضاً في انعكاس السطح من 2 إلى 17 dB نسبة إلى التخفيض الذي يحققه الاستقطاب الأفقي.

ويمكن الحصول على تقدير أدق لمعامل الانعكاس الفعّال لسطح الأرض الداخل في الانعكاس المرآوي عن طريق الحساب أو القياس كما هو مبين في الفقرات اللاحقة:

1.4.2.1.6 حساب معامل الانعكاس الفعّال على سطح الأرض

يمكن حساب معامل الانعكاس الفعّال على سطح الأرض باتباع طريقة الخطوة خطوة التالية (انظر الملاحظة 1).

الخطوة 1: تحسب السماحية المركبة لسطح الأرض، η، قرب مناطق الانعكاس على سطح الأرض:

$$\eta = \varepsilon_r - j18\sigma/f \tag{127}$$

حيث ε_r هو السماحية النسبية وσ الإيصالية (S/m). وتقدر القيم ε_r وσ استناداً إلى المعلومات الواردة في التوصية ITU-R P.527.

الخطوة 2: تحسب زاوية التماس، φ، لمدى القيم الفعّالة للعامل k الناتج من الخطوة 3 من الطريقة الواردة في الفقرة 3.2.1.6:

$$\varphi = \frac{h_1 + h_2}{d}\left[1 - m\left(1 + b^2\right)\right] \tag{128}$$

الخطوة 3: يحسب معامل انعكاس السطح، ρ، لنفس مدى قيم k:

$$\rho = \left|\frac{\sin\varphi - \sqrt{C}}{\sin\varphi + \sqrt{C}}\right| \tag{129}$$

حيث:

$$C = \eta - \cos^2\varphi \qquad \text{للاستقطاب الأفقي} \tag{130}$$

$$C = \frac{\eta - \cos^2\varphi}{\eta^2} \qquad \text{للاستقطاب المتعامد} \tag{131}$$

الخطوة 4: يحسب عامل التباعد، D، لسطح الأرض:

$$D = \sqrt{\frac{1 - m(1 + b^2)}{1 + m(1 - 3b^2)}} \tag{132}$$

الخطوة 5: يحسب الطول، L_1، للمجسم الإهليلجي لمنطقة فرينل الأولى على سطح الأرض طوال المسير:

$$L_1 = d\sqrt{1 + \frac{4 f h_1 h_2 \times 10^{-2}}{3d}}\left[1 + \frac{f(h_1 + h_2)^2 \times 10^{-2}}{3d}\right]^{-1} \qquad \text{km} \tag{133}$$

وكذلك العرض W_1 حسب الاتجاه العرضي:

$$W_1 = \sqrt{\frac{3 \times 10^{-4} d}{f}} \qquad \text{km} \tag{134}$$

حيث يعبر عن h_1 وh_2 بالأمتار وعن d بالكيلومترات. ويفترض أن المجسم الإهليلجي لمنطقة فرينل الأولى ممركز على نقطة الانعكاس الهندسية لسطح انعكاس واضح (انظر الملاحظة 2).

الخطوة 6: عندما يتضح أن جزءاً واحداً من المجسم الإهليلجي لمنطقة فرينل الأولى يحدث انعكاساً مرآوياً يتم تقدير الطول Δx (km) لهذا الجزء. ويقدر بعد ذلك عامل الانعكاس المرآوي (انظر الملاحظة 2):

$$R_s = \sqrt{\frac{f\,(h_1 + h_2)^4\,(\Delta x)^2 \times 10^{-2}}{3 h_1 h_2 d^3}} \qquad (135)$$

حيث يعبر عن h_1 وh_2 هنا أيضاً بالأمتار وعن d بالكيلومترات. ويفترض أن $R_S = 1$ بالتغيب.

الخطوة 7: إذا كان السطح الداخلي للمجسم الإهليلجي لمنطقة فرينل الأولى قليل الانتظام بعض الشيء يقدر عامل عدم انتظام السطح R_r كالتالي:

$$R_r = \sqrt{\frac{1 + (g^2/2)}{1 + 2{,}35(g^2/2) + 2\pi(g^2/2)^2}} \qquad (136)$$

حيث:

$$g = \frac{40\pi f \sigma_h \sin\varphi}{3} \qquad (137)$$

مع العلم بأن σ_h (m) هو الانحراف المعياري لارتفاع السطح نسبة إلى منحني التراجع في الجزء من المسير الواقع داخل المجسم الإهليلجي لمنطقة فرينل الأولى (انظر الملاحظة 3). ويفترض أن $R_r = 1$ بالتغيب.

الخطوة 8: يحسب معامل الانكسار الفعّال للمدى المطلوب للقيم الفعّالة للعامل k:

$$\rho_{eff} = \rho D R_S R_r \qquad (138)$$

ويمكن بعد ذلك تقدير سوية الموجة أو الموجات المنعكسة نسبة إلى الموجة المباشرة وذلك استناداً إلى التقنية الواردة في الفقرة 5.2.1.6.

الملاحظة 1 – يبدو أنه من الصعب الحصول على تقدير دقيق لمعامل الانعكاس الفعّال للسطح في العديد من المسيرات البرية (خاصة بالترددات المرتفعة) وذلك بسبب ارتيابات مختلفة مثل إيصالية السطح، عدم انتظام السطح، إلخ. وبسبب العامل الشخصي المصاحب للحساب حالياً. وليست طريقة الحساب في هذه الحالات إلا دليلاً تقريبياً يتيح التعرف على المسيرات التي تواجه بعض المشاكل أو الاختيار لمسير ما بدلاً من مسير آخر مع توجب عدم إهمال ما تيسره من فائدة. ويستحسن بالنسبة إلى الانكسار على سطح الأرض افتراض أرض رطبة في المناطق المعرضة عادة للرطوبة في الفترات التي يلاحظ فيها الخبو.

الملاحظة 2 – تعطي المعادلة (135) نتائج أدق عندما لا يكون كفاف منطقة الانعكاس المرآوي بعيداً عن نقطة الانعكاس المرآوي. وقد يفضل في بعض الحالات تقسيم منطقة فرينل الأولى إلى جزء غير منتظم أبداً وغير عاكس بوضوح (بسبب الزاوية المرتفعة التي تميز سطح الأرض أو بسبب تأثير الحجب بسبب التضاريس الأرضية) وجزء آخر على درجة أقل من عدم الانتظام وبالتالي عاكس جزئياً يحسب فيه عامل عدم انتظام السطح وفقاً للخطوة 7 المذكورة أعلاه.

تجدر الإشارة على سبيل الإعلام إلى أن المنطقة العاكسة من سطح الأرض تغطي منطقة فرينل الأولى تماماً على طول المسير وأن اتساع الموجة المنعكسة أعلى بمقدار 2,6 dB من اتساع الموجة المباشرة (دون مراعاة تأثيرات عامل التباعد D أو تمييز الهوائي موضوع الدراسة في الفقرة 5.2.1.6). وقد تبلغ هذه القيمة 6 dB إذا كانت المنطقة العاكسة تغطي تماماً منطقة فرينل الأولى ليس فقط في بعدها الطولي بل في بعدها العرضي أيضاً. وبالمقابل إذا لم تقع نقطة الانعكاس الهندسية في المنطقة العاكسة فإن اتساع الموجة المنعكسة لن يتجاوز –3,4 dB. وإن وقعت خارج منطقة فرينل الأولى تماماً فإن الاتساع النسبي للموجة المنعكسة يكون أقل من –11,5 dB.

الملاحظة 3 – قد يفضل في حال عدم انتظام سطح أرض المسير رسم منحني التراجع على طول المسير لمسافة تعادل تماماً طول منطقة فرينل الأولى: وهذا الرسم يستعمل كأساس لتحديد موقع نقطة الانعكاس ثم حساب الانحراف المعياري للارتفاعات σ_h (m) حول هذا المنحني. ونظراً إلى أن الموقع الأوليّ لمنطقة فرينل الأولى مجهول قد تكون العملية تكرارية. وإذا كانت منطقة فرينل الأولى فوق الماء يفترض أن السطح منتظم.

2.4.2.1.6 قياس معامل الانعكاس الفعّال على السطح

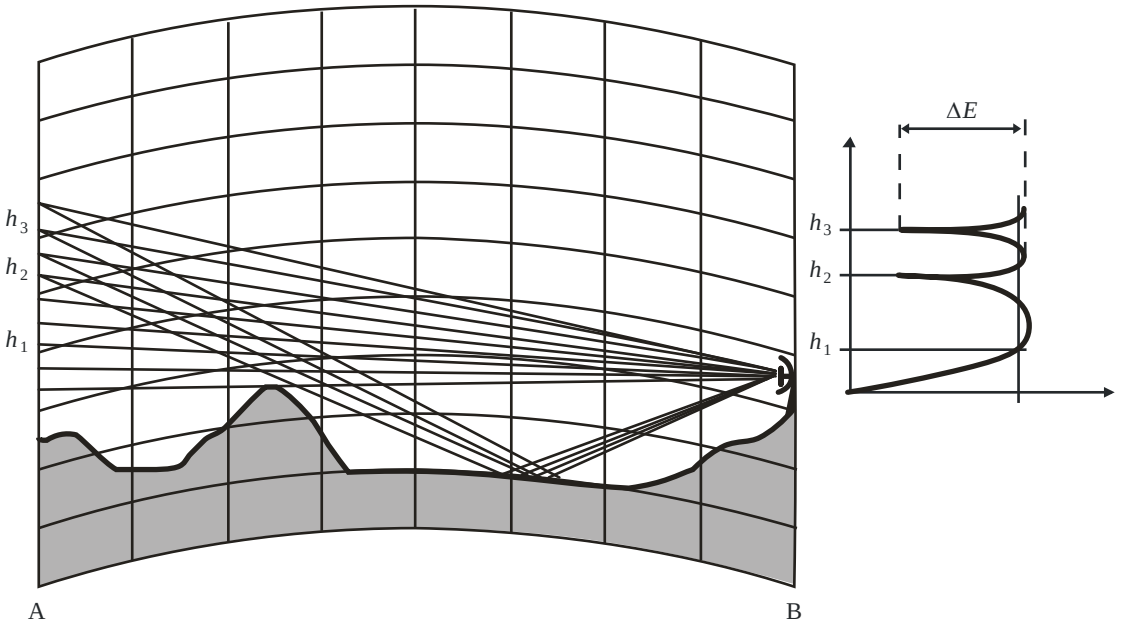
يمكن في شروط الانتشار العادية (انظر الفقرة 8 المتعلقة بأفضل لحظة أثناء النهار وكذلك الملاحظة 1) قياس معامل الانعكاس الفعّال على السطح العاكس بإعداد مخطط ارتفاع الهوائي – كسب الهوائي المتعلق بسوية الإشارة المستقبلة عند تسوية ارتفاع هوائي الإرسال أو هوائي الاستقبال في مدى ترددات يكفي عرضه لرصد قيم المخطط الدنيا والعليا على حد سواء. وإذا كان ΔE (dB) هو الفرق بين السويتين الدنيا والعليا (انظر الشكل 10) يعطى معامل الانعكاس الفعّال بالمعادلة التالية:

$$\rho_{eff} = \frac{10^{\Delta E/10} + 1 - 2 \times 10^{\Delta E/20}}{10^{\Delta E/10} - 1} \qquad (139)$$

الملاحظة 1 - قد يكون سطح الأرض أثناء الفترة النهارية التي يتوقع فيها الشروط العادية للانتشار أكثر جفافاً مما هو عليه أثناء الفترة النهارية التي تتوقع فيها ظواهر الانتشار بالمسيرات المتعددة. وبالتالي يستحسن إجراء تصحيح يستند على معادلات الفقرة 1.4.2.1.6 وإلى الفروق المعروفة لإيصالية الأرض في شروط الرطوبة أو الجفاف. ولا تقدم الفقرتان 1.4.2.1.6 و2.4.2.1.6 إلا تعليمات إجمالية بهذا الصدد.

الشكل 10

قياس ΔE (dB) على أساس مخطط ارتفاع الهوائي – كسب الهوائي



P.0530-10

5.2.1.6 استعمال تمييز الهوائي

إذا كانت المسيرات ذات ميل كافٍ أو إفساح طبيعي كبير، تصبح الزوايا بين الموجة المباشرة والموجة أو الموجات المنعكسة على سطح الأرض كبيرة بقدر كافٍ للاستفادة من المخطط النموذجي لإشعاع الهوائي أو الهوائيين من أجل تمييز الموجة أو الموجات المنعكسة. وحتى إذا لم تتوفر هذه الفرصة المرتبطة بتضاريس الأرض، قد يكون من المفيد إمالة الهوائي أو الهوائيين قليلاً نحو الأعلى من أجل زيادة قدرة التمييز المتيسرة. وفيما يلي الطريقة خطوة بخطوة المناسبة لهذا الغرض:

الخطوة 1: تحسب الزوايا بين الموجة المباشرة والموجات المنعكسة على سطح الأرض في الموقعين 1 و2 للمدى المطلوب من القيم الفعّالة k الناتجة عن الخطوة 3 من الفقرة 4.2.1.6، وذلك على النحو التالي:

$$\alpha_1 = \frac{180}{\pi}\left[\frac{h_1}{d_1} - \frac{h_1 - h_2}{d} - \frac{d_2}{12{,}74k}\right]\times 10^{-3} \quad \text{بالدرجات} \tag{140}$$

$$\alpha_2 = \frac{180}{\pi}\left[\frac{h_2}{d_2} - \frac{h_2 - h_1}{d} - \frac{d_1}{12{,}74k}\right]\times 10^{-3} \quad \text{بالدرجات} \tag{141}$$

الخطوة 2: تقدير التوهين الحاصل في الإشارة (أو الإشارات) المنعكسة على سطح الأرض نسبةً إلى الإشارة المباشرة والناتج عن تمييز الهوائي (انظر الملاحظة 1):

$$L_a = 12\left[\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_{a1}}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_{a2}}\right)^2\right] \quad \text{dB} \tag{142}$$

حيث α_{a1} وα_{a2} هما فتحتا نصف القدرة للحزمة في الهوائيين.

وإذا وقعت زاوية أو زوايا الموجة أو الموجات المنعكسة على سطح الأرض في فتحة نصف القدرة لحزمة أحد الهوائيين أو كليهما، يستحسن إمالة الهوائي أو الهوائيين المعنيين نحو الأعلى بمقدار نصف عرض الحزمة من أجل إدخال تمييز هوائي إضافي (انظر الملاحظة 2). وحتى إذا كانت زاوية ورود الموجة المنعكسة على سطح الأرض خارجة قليلاً عن نصف فتحة حزمة الهوائي فقد يكون من المستصوب القيام بإمالة الهوائي قليلاً نحو الأعلى (انظر الملاحظة 2). ويمكن عندئذ تقدير التوهين الإجمالي الناجم عن تمييز الهوائي (انظر الملاحظة 1):

$$L_a = 12\left[\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_{t1}}{\alpha_{a1}}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_2 + \alpha_{t2}}{\alpha_{a2}}\right)^2\right] \quad \text{dB} \tag{143}$$

حيث α_{t1} وα_{t2} هما زاويتا الهوائيين اللذين جرت إمالتهما نحو الأعلى.

الخطوة 3: قد يكون من المفيد بالنسبة إلى بعض المسيرات تقدير أو قياس معامل الانعكاس الفعّال على السطح من أجل الحصول على تقدير إجمالي لسوية الانعكاس أو الانعكاسات على السطح في الشروط العادية للانتشار. وتستعمل لهذا الغرض المعلومات الواردة في الفقرة 4.2.1.6. ويعبر عندئذ عن التوهين الكلي لسوية الموجة أو الموجات المنعكسة على سطح الأرض بالمعادلة التالية:

$$L_s = L_a - 20\log_{10}\rho_{eff} \quad \text{dB} \tag{144}$$

حيث L_a تنتج عن المعادلة (142) أو (143)، وفقاً للحالة. ونظراً إلى أنه يمكن تعزيز معامل الانعكاس الفعّال على السطح في حالات المسيرات المتعددة على سطح الأرض فمن غير الضروري تقديره بدقة كبيرة أو تقديره على الإطلاق بهدف حساب زوايا الميل نحو الأعلى لهوائيي الاستقبال والإرسال (انظر الخطوة 5).

الخطوة 4: إذا كان أحد الهوائيين أو كلاهما مائلاً نحو الأعلى، فإن التوهين في سوية الإشارة المباشرة في الشروط العادية للانتشار (k = 4/3) يعطى بالمعادلة التالية (انظر الملاحظة 1):

$$L_d(k=4/3)=12\left[\left(\frac{\alpha_{t1}}{\alpha_{a1}}\right)^2+\left(\frac{\alpha_{t2}}{\alpha_{a2}}\right)^2\right] \quad \text{dB} \tag{145}$$

ويمكن تقدير $L_d(k)$ في شروط الانعكاس الشديد أو الانعكاس دون المعياري على النحو التالي (انظر الملاحظة 1):

$$L_d(k)=12\left[\left(\frac{\alpha_{t1}-\alpha_d}{\alpha_{a1}}\right)^2+\left(\frac{\alpha_{t2}-\alpha_d}{\alpha_{a2}}\right)^2\right] \quad \text{dB} \tag{146}$$

مع العلم بأن زاوية الورود للإشارة المباشرة تعطى تقريبياً بالمعادلة التالية (انظر الملاحظة 2):

$$\alpha_d=-0{,}0045d\left(\frac{1}{k}-\frac{3}{4}\right) \quad \text{بالدرجات} \tag{147}$$

الخطوة 5: يمكن حساب عمق الخبو الأكبر الممكن في شروط الانتشار العادية (k = 4/3) بعد التداخل الضار بين الإشارة المباشرة أو الإشارات المنعكسة على سطح الأرض على النحو التالي:

$$A_{max}=-20\log_{10}\left(10^{-L_d/20}-10^{-L_s/20}\right) \tag{148}$$

حيث تعطى L_d في المعادلة (145) وL_s في المعادلة (144) (انظر الملاحظة 2). أما في حالات الانكسار فوق المعياري والانكسار دون المعياري حيث تتلقى الإشارة المباشرة خسارة إضافية قدرها $0{,}5L_{add}$ (ناجمة عن تمديد الحزمة في حالات الانكسار فوق المعياري) والإشارة المنعكسة على السطح كسباً قدره $-0{,}5L_{add}$، فإن أقصى عمق خبو ممكن يعطى بالمعادلة التالية:

$$A_{max}=-20\log_{10}\left(10^{-(L_d+0.5L_{add})/20}-10^{-(L_s-0.5L_{add})/20}\right) \quad \text{dB} \tag{149}$$

حيث L_d تنتج عن المعادلة (146) وL_s عن المعادلة (144) (انظر الملاحظة 2).

ويمكن استمثال زوايا ميل الهوائيين بهدف التخفيض قدر الإمكان من الخبو الناجم عن المسيرات المتعددة على سطح الأرض أو تشوه الاتساع الناجم عن المسيرات المتعددة على سطح الأرض أو هاتين الظاهرتين معاً. ويمكن تحقيق الاستمثال الرامي إلى تخفيض الخبو إلى أبعد حد ممكن، بإعطاء القيمة L_{add} في المعادلة (149) قيمة تصبح فيها L_d أقل من L_s بحوالي 0,3 dB عندما $k = \infty$ (ويتم على الصعيد العملي اختيار قيمة كبيرة جداً لـ k مثل $k = 1 \times 10^9$)، وبتخفيض A_{max} إلى أبعد حد ممكن بواسطة اختيار تجريبي لزوايا الميل. وبالمقابل يمكن إعطاء ρ_{eff} في المعادلة (144) قيمة قريبة أو أعلى من 1,0 بحيث ينتج نفس الفرق البالغ 0,3 dB (انظر الملاحظة 2) قبل البدء بعملية الاستمثال. وبهذا يتم تفادي الحالة التي تكون فيها قيمة ρ_{eff} مجهولة. وينجم عن هذه الطريقة تقليص هامش الحماية من الخبو بمقدار يتراوح بين 2,5-4 dB.

ويمكن تحقيق تخفيض تشوه الاتساع الناتج عن المسيرات المتعددة في السطح بطريقة مثلى عن طريق زيادة زوايا الميل إلى أن يصل تمييز الهوائي للموجة أو الموجات المنعكسة على سطح الأرض إلى حده الأقصى. ويحدث ذلك عندما يصل فرق التمييز بين الموجة المباشرة والموجة أو الموجات المنعكسة حده الأقصى. غير أنه من أجل استمثال زوايا الميل بدقة تبعاً للتشوه الحاصل من المسيرات المتعددة على سطح الأرض، يجب توفير المخططات النموذجية للهوائي إذ إن المعادلة (143) أقل دقة خارج نموذج فتحتي نصف القدرة لحزمة الهوائي وخاصة مع الاقتراب من حدود الفص الرئيسي (انظر الملاحظة 1). وبما أن استمثال تشوه الاتساع يتحقق مقابل تخفيض إضافي لهامش الحماية من الخبو المنتظم يوصى بزيادة زوايا الميل الناتجة عن استمثال الخبو بنفس النسبة إلى أن يمكن التوصل إلى حد أعلى من تخفيض هامش الحماية من الخبو البالغ 6 dB تقريباً. وبالرغم من أن زوايا الميل الناتجة تعادل استمثالاً أقل للخبو بحد ذاته فإن زيادة عمق الخبو لا تعادل إلا جزءاً من الديسيبل (انظر الملاحظة 3).

تجدر الإشارة إلى أن التمييز الأمثل للمسيرات المتعددة على سطح الأرض والناتج عن ميل الهوائي أو الهوائيين نحو الأعلى يعمل أيضاً على زيادة التمييز المتعلق بالمسيرات المتعددة في الجو (انظر الملاحظة 4).

الملاحظة 1 – يكون هذا التقريب للحزمة الغوسية أكثر دقة في فتحة حزمة الهوائي. أما خارج هذه الزاوية فيمكن استعمال المخططات النموذجية الفعلية للهوائي من أجل الحصول على تقدير أدق حسب الاقتضاء، وذلك بالغ الأهمية عند الاقتراب من حدود الفص الرئيسي.

الملاحظة 2 – إمالة الهوائيات نحو الأعلى أمر مرغوب به لتحسين نوعية الأداء في الخبو الناجم عن المسيرات المتعددة في الأرض مهما كانت سوية الموجة أو الموجات المنعكسة على سطح الأرض في شروط الانتشار العادية (مثل $k = 4/3$). وهدف تخفيض الخبو إلى أبعد قدر ممكن هو تخفيض سوية الموجة أو الموجات المنعكسة على سطح الأرض أكثر من سوية الموجة المباشرة مع تخفيض هذه السوية الأخيرة بمقدار يكفي فقط لخفض عمق الخبو الكلي. وهدف التخفيض الأمثل من تشوه الاتساع هو جعل الفرق النسبي بين اتساع الموجة المباشرة واتساع الموجة أو الموجات المنعكسة على سطح الأرض مقابل زيادة طفيفة للحد الأقصى لعمق الخبو. وبالإمكان تحقيق هذين الاستمثالين بتعديل زوايا ورود الموجة أو الموجات المنعكسة على سطح الأرض بحيث تقابل نقاطاً على المخطط النموذجي للهوائي تمثل كسوباً أقل ارتفاعاً. ويمكن عند الضرورة التعويض عن توهين هامش الحماية من الخبو المنتظم في الشروط العادية الذي يتبع توهين تمييز الهوائي باتجاه الموجة المباشرة الناجم عن إمالة الهوائي نحو الأعلى وذلك بزيادة حجم الهوائيات.

وتتوقف زوايا ميل الهوائي التي تتيح تخفيض تأثير انعكاسات سطح الأرض في شروط الانتشار العادية على هندسة شكل المسير وفتحة حزمة الهوائي والسوية النسبية للانعكاسات على سطح الأرض. وبالرغم من أن زاوية الميل الواجب استعمالها في شروط الانتشار العادية تزداد بزيادة فتحة الحزمة يلاحظ نقصان في النسبة الضرورية بين زاوية الميل وفتحة الحزمة كلما ازدادت هذه الفتحة.

وتكون زوايا ميل الهوائي التي تتيح تخفيض تأثير انعكاسات السطح في شروط المسيرات المتعددة على سطح الأرض أكبر من الزوايا المقابلة لها في شروط الانتشار العادية؛ ويتم عادة اختيار قيم الزوايا في شروط المسيرات المتعددة. وعندما تسبب طبقة طرفية كمجرى ما مثلاً توهيناً ناجماً عن تمديد الحزمة أو سوية الإشارة المباشرة، فإن احتمال تعزيز الإشارة أو الإشارات المنعكسة على سطح الأرض يزداد في نفس الوقت مما يؤدي إلى حالات خبو شديد ناجم عن المسيرات المتعددة. كما ويلاحظ أيضاً ازدياداً في تشوه الانتشار.

ويمكن إجراء محاكاة مطابقة للتعليمات الواردة في الخطوة 5 من أجل اختيار زوايا الميل التي تقلل عمق الخبو المعبر عنه في المعادلة (149) إلى أبعد حد ممكن. (إن احتمال تخفيض الفرق بين L_d وL_s إلى أقل من 0,3 dB، وهو ينتج عن تعديل إحدى هاتين القيمتين أو كليهما، ليس له تأثير سلبي ظاهر على النتيجة). وتتغير زوايا الميل المثلى تبعاً لتغير زوايا الموجات المنعكسة على سطح الأرض والمعبر عنها في المعادلتين (140) و(141). وتقابل أكبر زوايا ميل للهوائي أكبر زوايا انعكاس على الأرض. ويتراوح مقدار تخفيض الهامش النمطي لزوايا الميل المثلي كما ذكر سابقاً بي 2,5-4 dB وفي جميع الحالات في حال زيادة حجم الهوائيات من أجل التعويض عن نقصان هامش الحماية من الخبو المنتظم ينبغي البدء بعملية استمثال جديدة بغية تحديد زوايا ميل مثلى جديدة.

وينبغي كما ورد سابقاً أن تسبق عملية التخفيض الأمثل لتشوه الاتساع الخطوة التي تتيح تخفيض الخبو إلى أقل حد ممكن وزيادة زوايا الميل بنفس النسب. ويرتبط استعمال إحدى مجموعتي زوايا الميل أو استعمال خليطٍ من هاتين المجموعتين باعتبارات متعلقة بالنظام (انظر الملاحظة 3).

وينبغي الإشارة إلى أنه يتم التعويض عن جزء من تخفيض تمييز الهوائي باتجاه الشعاع الأقوى (ويتمثل عادة بالموجة المباشرة) الناتج عن ميل الهوائي والمقابل لشروط المسيرات المتعددة للسطح بسبب أن هذا الشعاع له عموماً زاوية ورود موجبة.

الملاحظة 3 – إن الحل الأفضل هو تجنب زيادة حجم الهوائي باستمثال زوايا ميله بحيث ينخفض الحد الأدنى لعمق الخبو إلى أقل قدر ممكن (مقابل نقصان هامش الحماية من الخبو يتراوح بين 2,5-4 dB). بالمقابل إذا نتج عن استمثال زوايا الميل بهدف تخفيض اتساع التشوه زيادة في جودة الأداء تكفي لتفادي اللجوء إلى التنوع يكون التفضيل لهذا الحل. ويتوقف الاختيار حسب الاقتضاء على نوعية التسوية المستعملة في النظام. وهناك حل ثالث ينطوي على اختيار زوايا ميل للهوائي يؤدي إلى نقص في هامش الحماية من الخبو المنتظم يتراوح بين القيمتين القصوتين 2,5-4 dB و6 dB تقريباً. ومن الهام ملاحظة أن التخفيض الأمثل للتشوه يؤدي إلى عدم استبعاد شروط الخبو المثلى إلا قليلاً (أي عمق خبو الحد الأدنى).

الملاحظة 4 – تشير كل تحاليل رسم الإشعاعات والقياسات التجريبية المعمقة لزوايا الورود واتساع أقوى ثلاث موجات للمسيرات المتعددة إلى أن موجة المسيرات المتعددة في الجو الذي يمثل زاوية الورود الأكبر هي عموماً الموجة الأقوى. وهكذا طالما تم اختيار زوايا ورود أكبر من أكبر زاوية ورود (أقل من 0,3° لأطوال المسير المحصورة بين 31 و51 km) ازداد تمييز الهوائي للمسيرات المتعددة في الجو. وهكذا ينبغي عموماً أن يقوم استمثال إمالة الهوائي نحو الأعلى على أساس تخفيض التأثيرات المتتالية للانتشار بالمسيرات المتعددة على سطح الأرض إلى أكبر حد ممكن.

3.1.6 تخفيض إفساح المسير

ثمة طريقة أخرى أقل وضوحاً أو تحديداً من الطرائق الأخرى تنطوي على تخفيض إفساح المسير بهدف إدخال كمية يمكن التنبؤ بها من التوهين من خلال الانعراج في شروط الانكسار دون المعياري على الأقل. ويعتقد أن هذه التقنية فعّالة خاصة لأنها:

– تخفف من احتمال و/أو شدة التوهين الناجم عن تمديد الحزمة الذي يؤثر على الموجة المباشرة بسبب طبقة طرفية (مثل المجرى) تقع مباشرة أو جزئياً تحت طول المسير الكلي (الاستراتيجية A)؛

– تخفف في نفس الوقت احتمال تعزيز هذه الطبقة لانعكاسات السطح (الاستراتيجية B).

وبالتالي احتمال أن تجتمع الموجة المباشرة بطريقة ضارة مع انعكاس سطح واحد أو أكثر مسببة بذلك خبواً شديداً انتقائياً في التردد.

ويكمن السبب الذي يشجع على الاعتقاد بفعالية الطريقة في أن التأخر الحاصل بين الموجة المباشرة والموجة أو الموجات المسببة للتداخل والمنعكسة على سطح الأرض يقل إذا لم تقع الطبقة الطرفية التي تسبب تحديد حزمة الموجة المباشرة إلا جزئياً تحت المسير (الاستراتيجية C). على نحو يكون فيه الخبو الانتقائي للتردد أقل شدة مما إذا وقعت هذه الطبقة بكاملها تحت المسير.

وتتطلب هذه التقنية حلا توافقياً بين تخفيض تأثيرات الخبو الناجم عن المسيرات المتعددة على السطح من جهة وازدياد الخبو الناجم عن التوهين بالانعراج في شروط الانكسار دون المعياري من جهة أخرى. وقد أعدت قاعدة إفساح المسير الواردة في الفقرة 1.2.2.2 بهدف تجنب التوهين بالانعراج في شروط الانكسار العادية (أي قيمة وسطية فعّالة للعامل k) مع إتاحة توهين بالانعراج قدره 6 dB تقريباً في الشروط المقابلة للقيمة k_e (99,9%). وفيما يخص الأنظمة ذات هوامش الحماية الكافية من الخبو المنتظم، يمكن مبدئياً قبول توهين أكبر بالانعراج في الشروط العادية كما في شروط الانكسار دون المعياري.

هذه التقنية بالغة الأهمية بالنسبة إلى المسيرات ذات الميل القليل أو المعدوم. غير أنه من المفيد أيضاً بالنسبة إلى المسيرات ذات الميل البسيط تخفيض إفساح المسير من أجل تخفيض إضافي لتأثيرات المسيرات المتعددة.

تطبق هذه التقنية بمزيد من الأمان على الهوائي الأقل ارتفاعاً في تشكيلة بالاختلاف المكاني ويوصى باستعمالها بشكل تلقائي في الطريقة الواردة في الفقرة 1.2.6.

2.6 تقنيات التنوع

تشمل هذه التقنيات التنوع في المكان والزاوية والتردد. وينبغي تجنب تنوع التردد والاعتماد على التنوع في المكان وفي الزوايا أو على الجمع بينهما، ليس فقط لأن فعالية استعمال طيف الترددات أكبر في هذه الطريقة ولكن لأن هاتين التقنيتين تعطيان عموماً نتائج أفضل. فالتنوع المكاني خاصة يساعد على مجابهة الخبو المنتظم (مثل الخبو الناجم عن خسارة تمديد الحزمة عن تعدد المسيرات في الجو مع تأخر نسبي قصير) وكذلك الخبو الانتقائي للتردد، بينما لا يتيح تنوع التردد إلا مجابهة خبو التردد الانتقائي (مثل الخبو الناجم عن مسيرات متعددة على سطح الأرض و/أو في الجو). ولذا ينبغي تجنب تنوع التردد كلما أمكن ذلك من أجل المحافظة على الطيف. أما عند استعمال الاختلاف المكاني، فيجب استخدام اختلاف الزوايا كذلك من خلال إمالة الهوائيات نحو زوايا مختلفة إلى الأعلى. ويمكن استعمال اختلاف الزوايا في الحالات التي لا يمكن فيها استعمال اختلاف مكاني مناسب أو من أجل تخفيض ارتفاع الأبراج.

وتتعلق درجة التحسن التي توفرها كل هذه التقنيات بمدى عدم ترابط الإشارات في قنوات تنوع النظام. ويكفي في الأنظمة التماثلية ضيقة النطاق أن يحدد التحسن في إحصائيات عمق الخبو عند تردد واحد. أما في الأنظمة الرقمية عريضة النطاق، فيتعلق أيضاً تحسن التنوع بإحصائيات التشوه داخل النطاق.

يعرف عامل تحسن التنوع I بالنسبة إلى عمق الخبو على النحو التالي:

$$I = p(A) / p_d(A) \qquad (150)$$

حيث $p_d(A)$ هو النسبة المئوية من الوقت التي يكون فيها عمق الخبو أكبر من A في قناة إشارة التنوع المختلطة، بينما $p(A)$ هو النسبة المئوية المقابلة للمسير غير المحمي. ويعرف عامل تحسن التنوع للأنظمة الرقمية بنسبة أوقات التجاوز من أجل معدل معين للخطأ في البتات (BER) مع تنوع أو بلا تنوع.

1.2.6 مباعدة الهوائيات في أنظمة الاختلاف المكاني

تتحدد المباعدة الملائمة بين الهوائيات في أنظمة الاختلاف المكاني تبعاً لثلاثة عوامل هي:

- ضرورة المحافظة على إفساح ضئيل قدر الإمكان بالنسبة إلى الهوائي الأقل ارتفاعاً (في إطار التعليمات الخاصة بالإفساح الواردة في الفقرة 2.2.2) بحيث ينخفض إلى أبعد حد حدوث الخبو الذي تسببه المسيرات المتعددة على سطح الأرض (انظر الفقرة 3.1.6)؛
- ضرورة الحصول على عامل تحسن محدد للتنوع المكاني بالنسبة إلى المسيرات فوق الماء (انظر الفقرة 2.2.6)؛
- ضرورة التخفيف إلى أبعد حد ممكن من احتمال إصابة الإشارة الواردة إلى هوائي التنوع بالخبو الناجم عن انتشار المسيرات المتعددة على سطح الأرض عندما يتعرض الهوائي الآخر للخبو.

وفيما يلي إجراء الخطوات لتحديد المباعدة بين الهوائيات:

الخطوات من 1 إلى 4: تطبق الخطوات من 1 إلى 4 الواردة في الفقرة 3.2.1.6 من أجل تحديد:

- وجود منطقة مسير تشكل انعكاساً مرآوياً كبيراً على السطح؛
- ضرورة اللجوء إلى التنوع المكاني بهدف تخفيض حالات الخبو الناجمة عن الانتشار بالمسيرات المتعددة على السطح.

(انظر الملاحظة 1 بالنسبة إلى حالة قفزات المعاكس المنفعل لقطعتين مع عاكس منفعل واحد أو أكثر في الجوار القريب). وإذا لم توجد مناطق انعكاس مرآوي شديد على السطح يتم الانتقال مباشرة إلى الخطوة 8.

الخطوة 5: فيما يتعلق بنفس مدى القيم الفعّالة للعامل k المستعملة في الخطوة 3، تحسب المسافات الفاصلة بين أقرب أو أبعد إشارتين مجاورتين للإشارة المستقبلة (التاليتين للتداخل بين الموجة المباشرة والموجة الناتجة عن الانتشار بالمسيرات المتعددة على السطح؛ انظر الشكل 10):

$$\theta_2 = \frac{150d}{f\left(h_1 - d_1^2/12{,}74k\right)} \quad \text{m} \qquad (151)$$

يمكن حساب المسافة θ_1 في الموقع 1 بالاستعاضة عن h_1 وd_1 في المعادلة (151) بـ h_2 وd_2 على التوالي.

إعادة استعمال هذه الخطوة بشأن جميع مناطق الانعكاس المرآوي المحتملة.

الخطوة 6: حساب المباعدة المثلى الممكنة بين هوائيات التنوع لمدى قيم العامل k المذكورة أعلاه:

$$S_1 = \theta_1 / 2,\ 3\theta_1 / 2,\ 5\theta_1 / 2 \text{ etc.} \quad S_2 = \theta_2 / 2,\ 3\theta_2 / 2,\ 5\theta_2 / 2 \text{ etc.} \quad \text{m} \qquad (152)$$

ومرة أخرى، تستعمل هذه الخطوة بشأن جميع مناطق الانعكاس المرآوي المحتملة.

الخطوة 7: المسيرات ذات الانعكاسات المرآوية الشديدة على السطح: يحسب الارتفاع التقريبي لهوائي التنوع باتباع الخطوتين 2 و3 من الفقرة 2.2.2.2 وتحسب أيضاً المباعدة التقريبية الناتجة، S_1' بين الهوائيات. وتتم مقارنة هذه المباعدة التقريبية مع مسافات المباعدة المثلى الناتجة عن الخطوة 6 فيما يخص المدى المطلوب لقيم k الفعّالة.

وفي حالة المسيرات حيث تتوقع سوية إشارة منعكسة على السطح قريبة من سوية الإشارة المباشرة في شروط الانكسار العادية (مما يعادل القيمة الوسطية k أو $k = 4/3$)، يستحسن اختيار القيمة الدنيا المثلى الناتجة من الخطوة 6 (أي $\theta_1/2 = S_1$) كقيمة وسطية للعامل k (انظر الملاحظة 2) بالنسبة إلى المباعدة الفعّالة. وبذلك تتحقق الحماية الصالحة عن طريق الاختلاف المكاني لأكبر مدى قيم ممكن للعامل k. (وقد يكون من الضروري بالنسبة إلى الترددات المنخفضة زيادة ارتفاع الهوائي الأعلى ولو لم ينتج عن ذلك إلا التوصل إلى أصغر مباعدة مثلى.)

وفي حالة المسيرات حيث يتوجب ألا تكون سوية الإشارة أو الإشارات المنعكسة على السطح قريبة من سوية الإشارة المباشرة في شروط الانكسار العادية (انظر الفقرتين 4.2.1.6 و5.2.1.6 لتحديد هذه الشروط)، يمكن استعمال طريقة أخرى تنطوي على اختيار إحدى المباعدات المثلى الكبرى التي تعطيها المعادلة (152) (مثال: $3\theta_1/2 = S_1$ أو $5\theta_1/2$) كقيمة وسطية للعامل k، بحيث يتم الاقتراب من القيمة S_1' دون بلوغها. وبذلك يخف حدوث الخبو الناجم عن المسيرات المتعددة على سطح الأرض مع المحافظة على حماية كبيرة بواسطة الاختلاف المكاني من احتمالات الخبو. وينبغي الموازنة بين الفائدة التي تجنى من تخفيض حدوث الخبو الناجم عن الانتشار في المسيرات المتعددة على سطح الأرض وبين ضرر استعمال مباعدة غير مثلى على مدى واسع من قيم العامل k (انظر الملاحظة 3).

وقد يكون من الضروري بالنسبة إلى بعض المسيرات الطويلة (عموماً فوق الماء) كما ورد في الفقرة 2.2.2.2، استعمال ثلاثة هوائيات بالتنوع المكاني. وينبغي أن تكون المباعدة بين الهوائي الأعلى والهوائي الأوسط في هذه الحالة أصغر قيمة مثلى ممكنة تنتج عن المعادلة (152). وينبغي أن يستند ارتفاع الهوائي الأدنى إلى قاعدة الإفساح الواردة في الفقرة 2.2.2.2 (انظر الملاحظة 4).

الخطوة 8: المسيرات الخالية من انعكاس مرآوي شديد على السطح: يحسب ارتفاع هوائي الاختلاف المكاني باتباع الخطوتين 2–3 الواردتين في الفقرة 2.2.2.2.

بعد الحصول على مباعدة هوائي الاختلاف المكاني تجرى حسابات تحسين التنوع والانقطاع باستعمال الطرائق الواردة في الفقرتين 1.2.6 و2.2.6. وإذا تجاوزت مباعدة التنوع الحد $S = 23$ m الوارد في المعادلة (152)، يجري الحساب باستعمال هذه القيمة الحد إذ إن التحسن الفعلي مع مباعدة أكبر قد يكون ذا أهمية أكبر في الواقع. ويحسب عند الحاجة، الارتفاع الجديد للهوائي الأعلى من أجل استيفاء معيار الانقطاع. وفي معظم الحالات، وإذا تحدد إفساح المسير للهوائي الأدنى على نحو يخفف من حدوث تمديد حزمة الموجة المباشرة والخبو بالمسيرات المتعددة الناتجة على السطح إلى أقل حد ممكن فإنه من غير الضروري زيادة ارتفاع الهوائي الأعلى.

الملاحظة 1 – في حالة قفزات العاكسات المنفعلة لقطعتين مع عاكس منفعل واحد أو أكثر بالقرب من الإشارة مباشرة، تقترح أولاً معالجة كل قطعة كوصلة مستقلة من أجل تحديد مباعدة هوائيات الاختلاف المكاني في كل طرف. وفي حال عدم وجود أي انعكاس مرآوي شديد على السطح تستعمل المباعدة المحسوبة للقطعة الأطول أيضاً في القطعة الأقصر.

الملاحظة 2 – تقابل هذه المسيرات في معظمها الحالة التي تنعكس فيها الموجة على الماء دون انقطاع في الشروط العادية وحيث تقع الزاوية المتشكلة بين الموجة المباشرة والموجة المنعكسة عند الهوائيين داخل فتحة الحزمة البالغة 3 dB. وقد تصلح أيضاً المسيرات فوق الأرض التي يحدث فيها الانعكاس على سطح أرض منتظمة (مثل سهل رطب أو مكسو بالثلج).

الملاحظة 3 – تؤخذ هنا بعين الاعتبار الحالة التي تكون فيها فائدة تخفيض حدوث الخبو الناجم عن المسيرات المتعددة على السطح هي العامل الأهم. وقد يكون مصدر هذا الخبو مجرى على سطح الأرض أو طبقة طرفية ذات تدرج انكسار سلبي كبير وتقع مباشرة كلياً أو جزئياً تحت المسير. ولا تصلح في هذه الشروط القيم الفعّالة للعامل k التي تقل عن القيمة الوسطى. وينبغي في جميع الأحوال الاستناد إلى قيمة متوسطة فعّالة للعامل k من أجل تقدير المباعدة المثلى بين الهوائيات.

الملاحظة 4 – إذا أمكن تحقيق أن تكون المباعدة بين الهوائي الأوسط والهوائي الأدنى مطابقة للمعادلة (152) بعد تسوية بسيطة باتباع قاعدة الإفساح الواردة في الفقرة 2.2.2.2، تحققت فائدة إضافية من حيث جودة الأداء.

2.2.6 المباعدة الزاوية في أنظمة تنوع الزاوية وتنوع المكان والزاوية معاً

يمكن جمع الاختلاف الزاوي والاختلاف المكاني من أجل الحصول على مزيد من جودة الأداء حسب الاقتضاء. وتتم إمالة هوائيات الاختلاف المكاني للتوصل إلى تعزيز الاختلاف الزاوي. وفيما يلي الطريقة التي تتيح تحديد زوايا الميل في حالة زوج هوائيات يعملان باختلاف مكاني أو في حالة زوج هوائيات يعملان باختلاف الزاوية موضوعين جنباً إلى جنب.

الخطوة 1: يميَّل إلى الأعلى الهوائي الرئيسي (الأعلى) في زوج هوائيات الاختلاف المكاني (أو أحد هوائيي زوج هوائيات الاختلاف المكاني الموضوعة جنباً إلى جنب) وكذلك هوائي الإرسال وفق زوايا محددة حسب الإجراءات الواردة في الفقرة 5.2.1.6 (انظر الملاحظة 1). وبذلك يتم التوصل إلى تخفيض هامش الحماية من الخبو المنتظم بمقدار يتراوح بين 2,5 و6 dB تبعاً لنمط الاستمثال (أقصى تخفيض للخبو أو لتشوه الاتساع). ويستعمل عند الحاجة هوائي أعرض للتعويض عن نقص هامش الحماية من الخبو المنتظم.

الخطوة 2: يميَّل إلى الأسفل هوائي التنوع (الأدنى) في زوج هوائيات الاختلاف المكاني (أو الهوائي الآخر في زوج هوائيات الاختلاف الزاوي الواقعة جنباً إلى جنب) بالنسبة إلى المستوي الأفقي المحلي للزاوية المقابلة لأدنى:

– زاوية باتجاه الانعكاس المرآوي الشديد على طول المسير (عندما $k = \infty$)؛

– زاوية مقابلة للتوهين البالغ 3 dB نسبةً إلى محور التسديد (انظر الملاحظة 2).

يمكن اختيار زاوية تسديد توافقية في حال وجود عدة انعكاسات مرآوية شديدة على طول المسير. أما في حال عدم وجود انعكاس مرآوي شديد يمكن اختيار زاوية تقابل اتجاه أقوى انعكاس منتشر مقدّر (ناتج عن التضاريس الأرضية و/أو النباتات). وإلا فيتم تسديد هذا الهوائي في الشروط العادية باتجاه خط البصر أو باتجاه الأفق في حالة وجود عوائق أمام هذا الخط.

الملاحظة 1 – ينبغي ملاحظة أن زاوية الميل المثلى بالنسبة إلى هوائيي الإرسال والاستقبال ستكون متساوية عند تساوي ارتفاع الهوائيين عن نقطة الانعكاس على السطح على طول المسير. وتقابل أكبر زاوية ميل الهوائي الذي يمثل أكبر زاوية باتجاه انعكاس السطح (انظر الفقرة 5.2.1.6).

الملاحظة 2 – الهدف الرئيسي المنشود هنا مزدوج ويكمن في:

– التوصل إلى خليط من سويات الإشارات المباشرة والمنعكسة على السطح مختلف جداً عن خليط الهوائي الأعلى إذ يتم على نحو تتعاظم فيه تأثيرات تنوع الزوايا إلى أكبر حد ممكن؛

– توفير الحماية عن طريق التنوع الإضافي في الشروط القاسية للخبو المنتظم الناجم عن تمديد حزمة الموجة المباشرة في مجرى واحد أو أكثر على طول المسير (مما يعني أن سوية الإشارة المنعكسة المعززة على السطح في مثل هذه الحالات ستبقى على الأغلب فوق عتبة الضوضاء).

وتهدف قيمة الحد البالغة 3 dB إلى تجنب انخفاض سوية الإشارة المباشرة الواصلة إلى هوائي التنوع انخفاضاً كبيراً خاصة عندما يحدث الانعكاس المرآوي الشديد مباشرة أمام هذا الهوائي.

ويلاحظ أن زاوية الميل الناتجة قد تكون موجبة نسبة إلى خط البصر في الشروط العادية خاصة إذا أصاب الإشارة المباشرة الواصلة إلى هوائي التنوع توهين كبير بالانعراج في مثل هذه الشروط (مثال: الهوائي "المدفون").

3.2.6 فصل الترددات في أنظمة تنوع التردد

تأتي معلومات هذا القسم لتغطية حالات قليلة قد يكون فيها تنوع التردد بسبب الحاجة ضرورياً أو ملائماً أو مرافقاً لتنوع المكان والزاوية.

ويتحدد فصل الترددات الملائم بين القنوات الرئيسية وقنوات الحماية في أنظمة تنوع التردد من خلال ثلاثة عوامل:

– خطة تردد النظام الصالحة (انظر توصيات السلسلة F لقطاع الاتصالات الراديوية)؛

– ضرورة الحصول على عامل تحسن تنوع التردد الخاص بالمسيرات فوق البر (انظر الفقرة 2.5.2.6)؛

– الرغبة في تقليص احتمال خبو إشارة التردد الواحد في نفس الوقت الذي تخبو فيه إشارة بتردد آخر على مسيرات شديدة الانعكاس.

وفيما يلي إجراء الخطوة خطوة من أجل تحديد فصل الترددات:

الخطوات 1-4: تطبق الخطوات من 1 إلى 4 من الفقرة 3.2.1.6 لتحديد:

– عدم وجود مناطق مسيرات تضم انعكاساً مرآوياً شديداً على السطح؛

– ضرورة تنوع التردد لمجابهة الخبو الناجم عن المسيرات المتعددة على السطح. وفي حال عدم وجود مناطق انعكاس مرآوي شديد على السطح، الانتقال إلى الخطوة 8.

الخطوة 5: بالنسبة إلى نفس مدى القيم k الفعّالة الواردة في الخطوة 3 تحسب القيمة المثلى لأدنى فصل ترددات في القناة الرئيسية وقنوات الحماية بالمعادلة:

$$\Delta f_{min} = \frac{7{,}5 \times 10^4 \; d}{\left(h_1 - \dfrac{d_1^2}{12{,}74k}\right)\left(h_2 - \dfrac{d_2^2}{12{,}74k}\right)} \qquad \text{MHz} \tag{153}$$

حيث يعبر عن h_1 وh_2 بالأمتار وعن d وd_1 وd_2 بالكيلومترات. ويتم تنفيذ هذه الخطوة عند احتمال وجود منطقة انعكاس مرآوي.

الخطوة 6: تحسب القيم المثلى المحتملة لفصل الترددات في القنوات الرئيسية وقنوات الحماية بالمعادلة:

$$\Delta f = \Delta f_{min}, 3\Delta f_{min}, \text{etc.} \qquad \text{MHz} \tag{154}$$

تنفَّذ هذه الخطوة أيضاً عند احتمال وجود منطقة انعكاس مرآوي.

الخطوة 7: المسيرات مع انعكاسات مرآوية شديدة على السطح: فيما يخص المسيرات التي يتوقع أن تكون فيها سوية الإشارة المنعكسة على سطح الأرض قريبة من الإشارة المباشرة في شروط الانكسار العادية (أي قيمة k متوسطة أو $k = 4/3$) يكون أدنى فصل مثالي للترددات الناتج في الخطوة 5 هو الفصل الأمثل (انظر الملاحظة 1). مما يعطي حماية تنوع التردد لأكبر مدى للقيم k. وبالطبع ينبغي أن يأتي فصل الترددات الفعلي كحل وسطي بين القيمة المثالية والقيمة الممكنة لخطة الترددات المتيسرة. وينبغي أن يكون كل تعديل للقيمة المثالية بهدف تماشيها مع خطة الترددات المتيسرة باتجاه القيمة الأدنى الناتجة من المعادلة (153) مع $k = \infty$. إلا أنه ينبغي التأكيد على أن فصل الترددات الفعلي يحتاج عدم التساوي مع القيمة المثلى من أجل الحصول على بعض الحماية عن طريق تنوع التردد. ويمكن استعمال الطريقة الواردة في الفقرة 2.5.2.6 للإرشاد حتى في المسيرات الانعكاسية.

وفيما يخص المسيرات التي لا يتوقع أن تكون فيها سوية الإشارة أو الإشارات المنعكسة على سطح الأرض قريبة من الإشارة المباشرة في شروط الانكسار العادية (انظر الفقرتين 4.2.1.6 و5.2.1.6 للبت فيما إذا كانت هذه هي الحالة) هناك طريقة تصميم أخرى قد تكون ممكنة في حالات نادرة. وذلك لاختيار إحدى أكبر قيم فصل الترددات المثلى الناتجة عن المعادلة (154) بالنسبة إلى القيم المتوسطة k إذا سمحت بذلك خطة الترددات ومعلمات المسير (مثل أن يكون ارتفاعا الهوائي بالضرورة h_1 و/أو h_2 فوق السطح العاكس) أو استعمال تنوع النطاق المتقاطع. وينطوي خطر استعمال فصل ترددات أعرض من القيمة الدنيا المثلى على عدم فعاليته على نفس عرض مدى قيم k الفعّالة (انظر الملاحظة 2).

وفيما يخص القفزات مع مكرر منفعل واحد أو أكثر يعطي قطعتين منفصلتين أو أكثر ينبغي أن تطبق المعادلة (153) بشكل مستقل على كل قطعة من القطعات التي تعاني من انعكاسات مرآوية شديدة وأن تُجمع كل النتائج للحصول على القيمة الكلية Δf_{min}. أما القطعات التي لا تحتوي على انعكاس مرآوي شديد فينبغي إهمالها في عملية الجمع.

الخطوة 8: المسيرات بدون انعكاسات مرآوية شديدة على سطح الأرض: تجرى حسابات تحسن التنوع باستعمال الطريقة الواردة في الفقرة 2.5.2.6 ويسوَّى فصل الترددات لكي يخفف من الانقطاعات ضمن شروط خطة الترددات.

الملاحظة 1 – غالباً ما تكون هذه المسيرات هي المسيرات التي تحدث فيها الموجة المنعكسة على سطح الماء وتكون غير محجوبة في الشروط العادية وتقع الزاوية بين الموجة المباشرة والموجة المنعكسة في كل من الهوائيين ضمن فتحة نصف القدرة للحزمة البالغة 3 dB. وقد تكون المسيرات فوق البر التي يحدث فيها الانعكاس على سطح أرض منتظمة جداً (مثل سهل رطب أو مكسو بالثلج). وفي الحالتين يحدث أصغر فصل مثالي للمسيرات القصيرة ذات ارتفاع هوائي عال فوق السطح العاكس.

الملاحظة 2 – بالنسبة إلى المسيرات التي تضم أكثر من إشارة منعكسة واحدة على السطح وخاصة تلك ذات السويات غير القابلة للمقارنة يمكن إيجاد حل وسط بين القيم المثالية العديدة لفصل الترددات المتنبأ بها وتلك الموجودة في خطة الترددات. ومن الجدير بالذكر أيضاً أن القيم التي تقل عن القيم المثلى لفصل الترددات تتيح بعض حماية التنوع.

4.2.6 تحسن التنوع المكاني في أنظمة النطاق الضيق

يمكن أن يقدر عامل تحسن الاختلاف المكاني في المستوي الرأسي لإشارات ضيقة النطاق على مسير فوق البر من معامل الترابط غير الانتقائي التربيعي، $k_{ns,s}^2$، بواسطة:

$$k_{ns,s}^2 = \exp\left(-0.0004 \times S^{0.87} f^{-0.12} d^{0.48} p_0^{-0.04} \eta^{-1}\right) \tag{155}$$

عامل تحسن الاختلاف هو:

$$I = \left(\frac{100\eta}{p_0}\right)\left[1 - k_{ns,s}^2\left(1 - \frac{p_0}{100\eta} 10^{-A/10}\right)\right] 10^{(A-V)/10} \tag{156}$$

حيث:

$$V = \left|(G_1 - L_1) - (G_2 - L_2)\right| \tag{157}$$

مع:

A: عمق الخبو (dB) للمسير غير المحمي

p_0: عامل حدوث الخبو (%) الناتج من المعادلة (11)

S: الفصل الرأسي (من مركز إلى مركز) بين هوائيات الاستقبال (m)

f: التردد (GHz)

d: طول المسير (km)

G_1، G_2: كسبا الهوائيين (dBi)

$L1$، $L2$: خسائر الوصلات بين الهوائيات ونقاط دخول الاستقبال (dB)

تستند المعادلة (155) إلى البيانات المتوافرة في بنك بيانات لجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية من أجل أمدية المتغيرات التالية: $43 \le d \le 240$ km، $2 \le f \le 11$ GHz و $3 \le S \le 23$ m. وثمة أسباب تدعو إلى الاعتقاد بأن هذه المعادلة قد تبقى صالحة لأطوال مسير صغيرة تصل إلى 25 km. ويمكن أن تحسب النسبة المئوية من التجاوز p_w من خلال المعادلة (7). وتكون المعادلة (155) صالحة في مدى الخبو العميق الذي تكون فيه المعادلة (7) صالحة.

5.2.6 تقنيات التنوع في الأنظمة الرقمية

هناك طرق متوفرة للتنبؤ باحتمالات الانقطاع وبتحسين التنوع لأنظمة تنوع المكان والتردد والزاوية وكذلك للأنظمة التي تجمع بين تقنيات تنوع المكان والتردد. والإجراءات خطوة بخطوة هي كالتالي.

1.5.2.6 التنبؤ بالانقطاع عند استخدام التنوع المكاني

استخدم حتى الآن بشكل كبير في أنظمة التنوع المكاني المضمام ذو القدرة القصوى. وينطبق الإجراء خطوة بخطوة المقدم أدناه على الأنظمة التي تستخدم مثل هذا المضمام. وهناك أنواع أخرى من المضاميم أكثر تعقيداً تستخدم كلا من التشوه الأدنى والقدرة القصوى حسب تقييم القناة الراديوية، وقد تعطي أداء أفضل إلى حد ما.

الخطوة 1: يحسب عامل النشاط عبر مسيرات متعددة، η، مثل الخطوة 2 من الفقرة 1.4.

الخطوة 2: يحسب مربع معامل الترابط غير الانتقائي، k_{ns}، من المعادلة (155).

الخطوة 3: يحسب مربع معامل الترابط الانتقالي، k_s، من المعادلة التالية:

$$k_s^2 = \begin{cases} 0.8238 & \text{for} \quad r_w \le 0.5 \\ 1 - 0.195\ (1-r_w)^{0.109 - 0.13\log_{10}(1-r_w)} & \text{for} \quad 0.5 < r_w \le 0.9628 \\ 1 - 0.3957\,(1-r_w)^{0.5136} & \text{for} \quad r_w > 0.9628 \end{cases} \tag{158}$$

حيث تعطي الصيغة التالية معامل الترابط r_w للاتساعات النسبية:

$$r_w = \begin{cases} 1 - 0.9746\,(1-k_{ns}^2)^{2.170} & \text{for} \quad k_{ns}^2 \le 0.26 \\ 1 - 0.6921\,(1-k_{ns}^2)^{1.034} & \text{for} \quad k_{ns}^2 > 0.26 \end{cases} \tag{159}$$

الخطوة 4: يحسب احتمال الانقطاع غير الانتقائي، P_{dns}، من الصيغة التالية:

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}}{I_{ns}} \tag{160}$$

حيث P_{ns} هو الانقطاع غير المحمي الذي تعطيه المعادلة (29).

الخطوة 5: يحسب احتمال الانقطاع الانتقائي P_{ds} من الصيغة التالية:

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta\,(1-k_s^2)} \tag{161}$$

حيث P_s هو الانقطاع غير المحمي الذي تعطيه المعادلة (117).

الخطوة 6: يحسب احتمال الانقطاع الإجمالي P_d كالتالي:

$$P_d = \left(P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75}\right)^{4/3} \tag{162}$$

2.5.2.6 التنبؤ بالانقطاع عند استخدام تنوع التردد

تنطبق الطريقة المقدمة على النظام 1 + 1. يتبع نفس الإجراء في حالة التنوع المكاني مع فارق أن الخطوة 2 تستخدم الصيغة التالية:

$$k_{ns,f}^2 = \exp\left[-\frac{0.07}{\eta}\left(\frac{\Delta f}{f}\right)\right] \tag{163}$$

حيث:

Δf: فصل الترددات (GHz) إذا كانت Δf > 0,5 GHz يستعمل Δf = 0,5

f: تردد الموجة الحاملة (GHz).

لا تطبق هذه المعادلة إلا على أمدية المعلمات التالية:

$$\text{GHz } 11 \geq f \geq 2$$

$$\text{km } 70 \geq d \geq 30.$$

3.5.2.6 التنبؤ بالانقطاع عند استخدام التنوع الزاوي

الخطوة 1: تقدر زاوية الوصول المتوسطة، μ_θ، من الصيغة التالية:

$$\mu_\theta = 2{,}89 \times 10^{-5}\, G_m\, d \quad \text{بالدرجات} \tag{164}$$

حيث G_m هي القيمة المتوسطة لتدرج الانكسار (وحدات-km/N). وفي حالة وجود انعكاس أرضي قوي بشكل واضح يمكن تقدير μ_θ من زاوية وصول الشعاع المنعكس في ظروف الانتشار العادية.

الخطوة 2: تحسب معلمة الخفض غير الانتقائي، r، من الصيغة التالية:

$$r = \begin{cases} 0{,}113 \sin\left[150\left(\delta/\Omega\right)+30\right] + 0{,}963 & \text{for} \quad q > 1 \\ q & \text{for} \quad q \leq 1 \end{cases} \tag{165}$$

حيث:

$$q = 2505 \times 0{,}0437^{(\delta/\Omega)} \times 0{,}593^{(\varepsilon/\delta)} \tag{166}$$

و

δ: مباعدة الزاوية بين المخططين

ε: زاوية ارتفاع الهوائي الأعلى (موجب في اتجاه الأرض)

Ω: فتحة نصف القدرة لحزمة مخططات الهوائي.

الخطوة 3: تحسب معلمة الترابط غير الانتقائي Q_0 من الصيغة التالية:

$$Q_0 = r\left(0{,}9399^{\mu_\theta} \times 10^{-24{,}58\,\mu_\theta^2}\right)\left[2{,}469^{1{,}879^{(\delta/\Omega)}} \times 3{,}615^{\left[(\delta/\Omega)^{1{,}978}(\varepsilon/\delta)\right]} \times 4{,}601^{\left[(\delta/\Omega)^{2{,}152}(\varepsilon/\delta)^2\right]}\right] \tag{167}$$

الخطوة 4: تحسب معلمة النشاط عبر مسيرات متعددة، η، مثل الخطوة 2 من الفقرة 1.4.

الخطوة 5: يحسب احتمال الانقطاع غير الانتقائي من الصيغة التالية:

$$P_{dns} = \eta\, Q_0 \times 10^{-F/6{,}6} \tag{168}$$

الخطوة 6: يحسب مربع معامل الترابط الانتقائي, k_s من الصيغة التالية:

$$k_s^2 = 1 - \left(0{,}0763 \times 0{,}694^{\mu_\theta} \times 10^{23{,}3\,\mu_\theta^2}\right) \delta \left(0{,}211 - 0{,}188\,\mu_\theta - 0{,}638\,\mu_\theta^2\right)^{\Omega} \quad (169)$$

الخطوة 7: ينتج احتمال الانقطاع الانتقائي P_{ds} من العلاقة التالية:

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta\left(1 - k_s^2\right)} \quad (170)$$

حيث P_s هو الانقطاع غير المحمي (انظر الخطوة 3 من الفقرة 1.5).

الخطوة 8: في النهاية يحسب احتمال الانقطاع الإجمالي، P_d، من الصيغة التالية:

$$P_d = \left(P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75}\right)^{4/3} \quad (171)$$

4.5.2.6 التنبؤ بالانقطاع عند استخدام التنوع المكاني وتنوع التردد (مستقبلان)

الخطوة 1: يحصل على معامل الترابط غير الانتقائي k_{ns} من الصيغة التالية:

$$k_{ns} = k_{ns,s}\; k_{ns,f} \quad (172)$$

حيث $k_{ns,s}$ و$k_{ns,f}$ هما معاملا الترابط غير الانتقائي المحسوبان للتنوع المكاني (انظر الفقرة 1.5.2.6) ولتنوع التردد (انظر الفقرة 2.5.2.6)، على التوالي.

الخطوات التالية هي نفسها المتبعة في حالة التنوع المكاني.

5.5.2.6 التنبؤ بالانقطاع عند استخدام التنوع المكاني وتنوع التردد (أربعة مستقبلات)

الخطوة 1: يحسب η مثل الخطوة 2 من الفقرة 1.4.

الخطوة 2: تحسب معلمة التنوع $I_{ns,q}$، كالتالي:

$$I_{ns,q} = \min\left\{ I_{ns,s}\,,\, I_{ns,f}\,,\, \frac{I_{ns,s} + I_{ns,f}}{\min\left\{I_{ns,s}\,,\, I_{ns,f}\right\} \times k_{ns,s}^2 \times k_{ns,f}^2} \right\} \quad (173)$$

حيث يتم الحصول على $k_{ns,s}$ و$k_{ns,f}$ كما في الفقرة 4.5.2.6.

الخطوة 3: يحسب احتمال الانقطاع غير الانتقائي P_{dns} من الصيغة التالية:

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}}{I_{ns,s} \times I_{ns,f} \times I_{ns,q}} \quad (174)$$

حيث يتم الحصول على P_{ns} من المعادلة (29).

الخطوة 4: يحسب مربع معامل الترابط غير الانتقائي المكافئ، k_{ns}، من الصيغة التالية:

$$k_{ns}^2 = 1 - \sqrt{\eta}\left(1 - k_{ns,s}^2\right)\left(1 - k_{ns,f}^2\right) \tag{175}$$

الخطوة 5: يحسب معامل الترابط الانتقائي المكافئ k_s باتباع نفس الإجراء المستخدم في حالة التنوع المكاني (الخطوة 3).

الخطوة 6: يحصل على احتمال الانقطاع الانتقائي، P_{ds}، من الصيغة التالية:

$$P_{ds} = \left[\frac{P_s^2}{\eta\left(1 - k_s^2\right)}\right]^2 \tag{176}$$

حيث P_s هو الانقطاع غير المحمي الذي تعطيه المعادلة (117).

الخطوة 7: يحصل على احتمال الانقطاع الإجمالي، P_d، من المعادلة (162).

7 التنبؤ بالانقطاع الإجمالي

يحسب احتمال الانقطاع الإجمالي العائد إلى تأثيرات الجو الصافي من الصيغة التالية:

$$P_t = \begin{cases} P_{ns} + P_s + P_{XP} & \text{إذا استعمل التنوع} \\ P_d + \dfrac{P_{XP}}{I} \end{cases} \tag{177}$$

تم التوصل إلى هذه الصيغة باتباع الطرائق الواردة في الفقرات 6.3.2 و1.4 و1.5 و5.2.6.

ويحسب احتمال الانقطاع الإجمالي العائد إلى المطر بانتقاء القيمة الأكبر بين P_{rain} وP_{XPR} التي تم التوصل إليها باتباع الطرائق الواردة في الفقرتين 7.4.2 و2.2.4.

لقد أعدت طرائق التنبؤ بالانقطاع للأنظمة الراديوية الرقمية استناداً إلى تعريف حدوث الانقطاع، عندما يفوق المعدل BER قيمة معينة (1×10^{-3} مثلاً) وذلك استجابة لمتطلبات التوصية ITU-T G.821. ويربط بين الانقطاع وخطأ الأداء والتيسر (انظر التوصيات ITU-R F.594 وITU-R F.634 وITU-R F.695 وITU-R F.696 وITU-R F.697 وITU-R F.1092 وITU-R F.1189 وITU-R F.557). ويربط بين الانقطاع العائد إلى تأثيرات الجو الصافي والأداء بشكل أساسي كما يربط في أغلب الأحوال بين الانقطاع العائد إلى الهواطل والتيسر. مع ذلك قد تساهم تأثيرات الجو الصافي في التيسر وقد تساهم الهواطل في الأداء.

8 جوانب الانتشار عند الوضع في الخدمة

عند إجراء اختبارات أثناء وضع نظام ما في الخدمة وفقاً لأحكام التوصية ITU-R F.1330 يستحسن تجنب فترات السنة وساعات النهار التي يزداد أثناءها احتمال حصول الانتشار بمسيرات متعددة.

وقد أظهرت بعض الدراسات التي جرت في مناطق معتدلة المناخ من أوروبا الشرقية أنه يقل احتمال حدوث تأثيرات الانتشار بالمسيرات المتعددة في الشتاء وخلال الشهرين السابقين لهذا الفصل. وفيما يخص الاختبارات التي ينبغي إجراؤها إلزامياً في الصيف، فإن الفترة النهارية التي يقل فيها احتمال حدوث هذه التأثيرات إلى أبعد حد حسب الاختبارات هي الفترة ما بين الساعة 1 000 – 1 400 وحسب التوقيت المحلي.

وأظهرت قياسات أجريت في مناطق ساحلية المناخ من أوروبا الغربية عند خط عرض 60° شمالاً أنه يقل احتمال حدوث تأثيرات الانتشار بالمسيرات المتعددة في الفترة ما بين الساعة 1 300 – 2 000 حسب التوقيت المحلي بغض النظر عن الفصل. كما أن فترة الشتاء كانت أقل الفترات تأثراً بالخبو الناجم عن الانتشار بالمسيرات المتعددة. تأتي بعدها فترة الخريف ومن ثم الربيع.

المرفق 1
بالملحق 1

طريقة تحديد العامل المناخي الجغرافي، *K*،
انطلاقاً من بيانات قياس الخبو على مسيرات فوق البر

الخطوة 1: يحصل على توزيع خبو الغلاف في أسوأ شهر تقويمي لكل سنة من التشغيل من خلال استعمال القيمة المتوسطة على المدى الطويل كقيمة مرجعيه. ثم يحدد معدل هذا التوزيع للحصول على التوزيع التراكمي للخبو لأسوأ شهر متوسط ورسمه على مخطط بياني شبه لوغاريتمي.

الخطوة 2: يسجل على الرسم البياني عمق الخبو، A_1، الذي يكون التوزيع التراكمي خطياً تقريباً وراءه ويحصل على النسبة المئوية المقابلة من الوقت p_1. ويشكل هذا الجزء الخطي ذيل عمق الخبو الكبير الذي يمكن أن يتغير ميله بمقدار 3 أو 4 dB لكل عشرية بالنسبة إلى متوسط قيمة "رايلي" "Rayleigh" من 10 dB/decade، ويتعلق اتساع هذا التغير بعدد سنوات قياس البيانات التي يتضمنها التوزيع المتوسط.

الخطوة 3: يحسب ميل المسير $|\varepsilon_p|$ ومتوسط خلوص المسيرات h_c انطلاقاً من المعادلتين (5) و(6).

الخطوة 4: تستبدل الإحداثيات (P_1 وA_1) "لأول نقطة من الذيل" في المعادلة (7) مع القيم d وf و$|\varepsilon_p|$ وh_c، ويحسب العامل المناخي الجغرافي K.

الخطوة 5: عندما تتوافر البيانات لعدة مسيرات من منطقة بمناخ وتضاريس أرضية مشابهة، أو لعدة ترددات، إلخ.، على مسير واحد، يمكن الحصول على عامل مناخي جغرافي متوسط من خلال تحديد متوسط قيم $\log K$. وتتناسب بيانات العامل الجغرافي المناخي في الملف LogK.csv بشكل وثيق مع بيانات الخبو في DBSG3 Table I-2 بالقرب من مسارات الجدول، حيث تم إنشاء هذا الملف بواسطة عملية الانحدار الغوسية الشاملة، kriging universal، وهي تقنية تجمع بين الانحدار والاستكمال الداخلي.