منشورات ITU
التوصيات

الاتحاد الدولي للاتصالات
قطاع الاتصالات الراديوية

التوصية ITU-R P.618-14

(2023/08)

السلسلة P: انتشار الموجات الراديوية

بيانات الانتشار وطرائق التنبؤ المطلوبة لتصميم أنظمة الاتصالات أرض-فضاء

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 https://www.itu.int/publ/R-REC/en)

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

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

النشر الإلكتروني
جنيف، 2024

© ITU 2024
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.618-14*

بيانات الانتشار وطرائق التنبؤ المطلوبة لتصميم أنظمة الاتصالات أرض–فضاء

(المسألة ITU-R 206/3)

(2023-2017-2015-2013-2009-2007-2003-2001-1999-1997-1995-1994-1992-1990-1986)

مجال التطبيق

تتنبأ هذه التوصية بمختلف معلمات الانتشار اللازمة لتخطيط شبكات/أنظمة الاتصالات أرض–فضاء العاملة في اتجاه أرض–فضاء أو فضاء–أرض.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن من الضروري، لتخطيط مناسب للشبكات/للأنظمة أرض–فضاء، أن تتوفر بيانات عن الانتشار وتقنيات تنبؤ مناسبة؛

ب) أن ثمة طرائق وضعت تسمح بالتنبؤ بأهم معلمات الانتشار اللازمة لتخطيط شبكات/أنظمة أرض–فضاء،

توصي

باستعمال طرائق التنبؤ بمعلمات الانتشار في الملحق 1 من أجل تخطيط شبكات/أنظمة أرض–فضاء في كل مدى من الصلاحية المقابلة المشار إليها في الملحق 1.

ملاحظة – تتضمن التوصيات ITU-R P.679 وITU-R P.680 وITU-R P.681 وITU-R P.682 على التوالي، معلومات إضافية تتعلق بتخطيط الأنظمة الإذاعية الساتلية وكذلك الأنظمة الساتلية المتنقلة البحرية والبرية وللطيران.

الملحق 1

جدول المحتويات

الصفحة

الملحق 1 1
1 مقدمة 2
2 خسارة الانتشار 5
1.2 التوهين بسبب الغازات الجوية 6
2.2 التوهين بالهواطل والسحب 6

* أدخلت لجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية تعديلات صياغية على هذه التوصية في يونيو 2024 وفقاً للقرار ITU-R 1.

3.2 التأثيرات في الجو الصافي 16
4.2 التلألؤ والخبو بسبب تعدد المسيرات 17
5.2 تقدير التوهين الكلي الناجم عن عدة مصادر لتوهين جوي يحدث في آن معاً 22
6.2 التوهين بسبب العواصف الرملية والغبارية 23
3 درجة حرارة الضوضاء 23
4 تأثيرات الاستقطاب المتقاطع 23
1.4 حساب الإحصاءات طويلة الأجل للاستقطاب المتقاطع المستحث بالماء الجوي 24
2.4 الإحصاءات المشتركة للتمييز XPD والتوهين 25
3.4 التدريج طويل الأجل للتردد والاستقطاب في إحصاءات الاستقطاب المتقاطع المستحث بالماء الجوي 25
4.4 البيانات المتعلقة بإلغاء الاستقطاب المتقاطع 25
5 تأخر الانتشار 26
6 تحديدات عرض النطاق 26
7 زاوية الوصول 26
8 حساب الإحصاءات طويلة الأجل للمسيرات غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض (non-GSO) 27

1 مقدمة

يجب أن يؤخذ في الاعتبار عدة تأثيرات لدى تصميم الوصلات أرض–فضاء لأنظمة الاتصالات. ويجب أن تراعى تأثيرات الجو غير المتأين عند كل الترددات ولكنها تصبح حرجة فوق 1 GHz تقريباً وعند زوايا الارتفاع المنخفضة. وتشمل هذه التأثيرات ما يلي:

أ) الامتصاص بالغازات الجوية؛ والامتصاص والانتثار وإزالة الاستقطاب بالماء الجوي (قطرات الماء والجليد في الهواطل والسحب وغيرها)؛ وضوضاء الإرسال الناتجة عن وسائط الامتصاص؛ وتعتبر كل هذه التأثيرات ذات أهمية خاصة عند ترددات أعلى من 10 GHz تقريباً؛

ب) فقدان الإشارة بسبب انحراف حزمة هوائي المحطة الأرضية بحكم الانكسار العادي في الجو؛

ج) التناقص في كسب الهوائي الفعال بسبب فك ارتباط الطور عبر فتحة الهوائي الناجم عن عدم الانتظام في بنية دليل الانكسار؛

د) الخبو البطيء نسبياً بسبب انحناء الحزمة الذي تسببه تغييرات دليل الانكسار واسعة النطاق، والخبو الأسرع (التلألؤ) والتغيرات في زاوية الوصول الناجمة عن تغيرات ضيقة النطاق في دليل الانكسار؛

هـ) التحديدات المحتملة لعرض النطاق بسبب الانتثار المتعدد أو تأثيرات تعدد المسيرات، لا سيما في الأنظمة الرقمية عالية السعة؛

و) التوهين بسبب البيئة المحلية للمطراف على الأرض (مبان وأشجار وما إلى ذلك)؛

ز) التغيرات قصيرة الأجل في نسبة التوهينات عند ترددي الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة والتي يمكن أن تنال من دقة الإجراءات التكييفية المعاكسة للخبو؛

ح) تأثير تغير زاوية الارتفاع بالنسبة إلى الساتل في الأنظمة الساتلية غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض (non-GSO).

وقد تكون التأثيرات الأيونوسفيرية (انظر التوصية ITU-R P.531) هامة، وخصوصاً عند ترددات أدنى من 1 GHz. ومن قبيل التسهيل، حددت في الجدول 1 قيمة هذه التأثيرات للترددات 0,1 و0,25 و0,5 و1 و3 و10 GHz من أجل الحصول على قيمة كبيرة للمحتوى الكلي من الإلكترونات (TEC). وتشمل هذه التأثيرات ما يلي:

ط) دوران فاراداي: انتشار موجي مستقطب خطياً من خلال الأيونوسفير يخضع لدوران مستوي الاستقطاب تدريجياً؛

ي) التشتت الذي يؤدي إلى تأخر تفاضلي في الانتشار عبر عرض نطاق الإشارة المرسلة؛

ك) التأخر الزائد؛

ل) التلألؤ الأيونوسفيري: يؤدي عدم تجانس كثافة الإلكترونات في الأيونوسفير إلى تبئير انعكاسي أو إزالة تبئير انعكاسي للموجات الراديوية، ويؤدي إلى تقلبات في الاتساع تسمى حالات التلألؤ. ويكون التلألؤ الأيونوسفيري أقصى ما يكون بالقرب من خط الاستواء المغنطيسي الأرضي وأدنى ما يكون في مناطق خطوط العرض الوسطى. ويكون التلألؤ كبيراً في المناطق الشفقية أيضاً. ويتوزع التلألؤ الشديد على أساس توزيع رايلي من حيث الاتساع، في حين يكاد يتوزع التلألؤ الأضعف توزيعاً لوغاريتمياً عادياً. وتقل هذه التقلبات بزيادة التردد وتتوقف على هندسة المسير والموقع وفصول السنة والنشاط الشمسي والتوقيت المحلي. ويستند الجدول 2 إلى البيانات الواردة في التوصية ITU-R P.531 من أجل تصنيف بيانات عمق الخبو بالنسبة إلى الموجات المترية (VHF) والموجات الديسيمترية (UHF) في خطوط العرض الوسطى.

كما يصاحب تقلب الاتساع أيضاً تقلباً في الطور. وتتناسب الكثافة الطيفية لتقلب الطور مع المقدار $1/f^3$، حيث f تردد تقلب فورييه. وتماثل هذه الخاصية الطيفية الخاصية الناشئة عن وميض التردد في المذبذبات ويمكن أن تسبب انحطاطاً كبيراً في أداء عتاد المستقبِل.

الجدول 1

تقدير* التأثيرات الأيونوسفيرية لزوايا ارتفاع قدرها 30 درجة تقريباً باجتياز أحادي الاتجاه**

(مستمد من التوصية ITU-R P.531)

التأثير	اعتماد التردد	GHz 0,1	GHz 0,25	GHz 0,5	GHz 1	GHz 3	GHz 10
دوران فاراداي	$1/f^2$	30 دورة	4,8 دورة	1,2 دورة	°108	°12	°1,1
تأخر الانتشار	$1/f^2$	µs 25	µs 4	µs 1	µs 0,25	µs 0,028	µs 0,0025
الانكسار	$1/f^2$	°1 >	°0,16 >	'2,4 >	'0,6 >	"4,2 >	"0,36 >
التغير في اتجاه الوصول (جذر متوسط التربيع)	$1/f^2$	'20	'3,2	"48	"12	"1,32	"0,12
الامتصاص (الشفقي و/أو القطبي)	$1/f^2 \approx$	dB 5	dB 0,8	dB 0,2	dB 0,05	dB 6×10^{-3}	dB 5×10^{-4}
الامتصاص (عند خطوط العرض الوسطى)	$1/f^2$	dB 1 >	dB 0,16 >	dB 0,04 >	dB 0,01 >	dB 0,001 >	dB 1×10^{-4} >
التشتت	$1/f^3$	ps/Hz 0,4	ps/Hz 0,026	ps/Hz 0,0032	ps/Hz 0,0004	ps/Hz $1,5 \times 10^{-5}$	ps/Hz 4×10^{-7}
التلألؤ(1)	انظر التوصية ITU-R P.531	انظر التوصية ITU-R P.531	انظر التوصية ITU-R P.531	انظر التوصية ITU-R P.531	dB 20 < ذروة إلى ذروة	dB 10 ≈ ذروة إلى ذروة	dB 4 ≈ ذروة إلى ذروة

* يستند هذا التقدير إلى محتوى كل من الإلكترونات (TEC) بمقدار 10^{18} electrons/m^2، وهي قيمة عالية لهذا المحتوى تواجه عند خطوط العرض المنخفضة أثناء النهار وبوجود نشاط شمسي مرتفع.

** يمكن إهمال التأثيرات الأيونوسفيرية الأعلى من GHz 10.

(1) القيم الملاحظة بالقرب من خط الاستواء المغنطيسي الأرضي أثناء الساعات الأولى من الليل (بالتوقيت المحلي) في وقت الاعتدال الربيعي أو الخريفي وفي ظروف كلف شمسي مرتفع.

الجدول 2

توزيع أعماق الخبو بسبب التلألؤ الأيونوسفيري (dB) عند خطوط العرض الوسطى

النسبة المئوية من الزمن (%)	التردد (GHz)			
	0,1	**0,2**	**0,5**	**1**
1	5,9	1,5	0,2	0,1
0,5	9,3	2,3	0,4	0,1
0,2	16,6	4,2	0,7	0,2
0,1	25	6,2	1	0,3

لا يعالج هذا الملحق إلا تأثيرات التروبوسفير في الإشارة المطلوبة بالنسبة إلى تخطيط الأنظمة، بينما تُعالج جوانب التداخل في توصيات مستقلة:

– التداخل بين المحطات الأرضية ومحطات الأرض (التوصية ITU-R P.452)؛

– التداخل الصادر عن المحطات الفضائية والتداخل الذي تتعرض له (التوصية ITU-R P.619)؛

– التنسيق ثنائي الاتجاه للمحطات الأرضية (التوصية ITU-R P.1412).

وثمة استثناء ظاهر هو إزالة استقطاب المسير والذي يتعلق مباشرة بانحطاط الإشارة المباشرة متحدة الاستقطاب بسبب الانتشار، وإن كانت أهميته من حيث التداخل فقط (بين إرسالات الإشارة باستقطاب متعامد مثلاً).

وترتب المعلومات وفقاً لمعلمات الوصلة قيد النظر في التخطيط الفعلي للنظام بدلاً من ترتيبها وفقاً للظواهر المادية التي تسبب التأثيرات المختلفة. وتوفر، قدر الإمكان، طرائق تنبؤ بسيطة تشتمل تطبيقات عملية، مع بيان مدى صلاحيتها. وتعطي هذه الطرائق البسيطة نسبياً نتائج مرضية في معظم التطبيقات العملية رغم التغيرات الكبيرة في شروط الانتشار (من سنة إلى أخرى ومن موقع إلى آخر).

وقد خضعت طرائق التنبؤ المبينة في هذا الملحق، كلما أمكن ذلك، إلى الاختبار بالنسبة إلى بيانات القياس المستمدة من بنوك بيانات لجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية (انظر التوصية ITU-R P.311).

2 خسارة الانتشار

خسارة الانتشار في مسير أرض–فضاء، بالنسبة إلى الخسارة في الفضاء الحر، هي مجموع مساهمات مختلفة على النحو التالي:

– التوهين بسبب الغازات الجوية؛

– التوهين بسبب المطر والهواطل الأخرى والسحب؛

– التبئير وإزالة التبئير؛

– التناقص في كسب الهوائي بسبب عدم تماسك جبهة الموجة؛

– التلألؤ وتأثيرات تعدد المسيرات؛

– التوهين بسبب العواصف الرملية والغبارية.

ولكل من هذه المساهمات خصائصها المميزة وفقاً للتردد والموقع الجغرافي وزاوية الارتفاع. وكقاعدة عامة، لا تكون قيم التوهين عند زوايا الارتفاع أكبر من 10 درجات قيماً كبيرة، إلا إذا كان التوهين ناجماً عن الغازات الجوية والمطر والسحب وربما عن التلألؤ،

وذلك رهناً بشروط الانتشار. وفيما يخص الأنظمة غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض (non-GSO)، ينبغي إدراج التغير في زاوية الارتفاع في الحسابات، على النحو المبين في الفقرة 8.

(من الممكن أن تؤدي تراكمات الثلوج والجليد على سطوح عواكس الهوائيات ومصادر تغذيتها في بعض المناطق المناخية إلى فترات مطولة من التوهين الشديد الذي قد يهيمن حتى على التوزيع التراكمي السنوي للتوهين.)

1.2 التوهين بسبب الغازات الجوية

يتوقف التوهين بسبب الغازات الجوية، والذي يعزى بكامله إلى الامتصاص، بالدرجة الأولى على التردد وزاوية الارتفاع والارتفاع فوق مستوى سطح البحر وكثافة بخار الماء (الرطوبة المطلقة). ويمكن عادة تجاهل هذا التوهين عند الترددات الأدنى من 10 GHz، في حين تتزايد أهميته في الترددات الأعلى من 10 GHz، وخصوصاً عند زوايا الارتفاع المنخفضة. ويبين الملحق 1 للتوصية ITU-R P.676 طريقة كاملة لحساب التوهين الناجم عن الغازات الجوية، بينما يبين الملحق 2 للتوصية نفسها طريقة تقريبية بالنسبة للترددات التي تصل إلى 350 GHz.

وتتسم مساهمة الأوكسجين في الامتصاص الجوي باستقرار نسبي عند ترددات معينة، غير أن كثافة بخار الماء متغايرة جداً في حد ذاتها وبحكم الارتفاع. ويحدث عادة أقصى توهين بالغازات الجوية أثناء موسم هطول الأمطار الغزيرة (انظر التوصية ITU-R P.836).

2.2 التوهين بالهواطل والسحب

1.2.2 التنبؤ بإحصاءات التوهين في سنة متوسطة

تبين الفقرة 1.1.2.2 الطريقة العامة للتنبؤ بالتوهين بسبب الهواطل والسحب على طول مسير انتشار مائل. ويرد شرح طريقة التنبؤ باحتمال وجود توهين غير صفري بسبب المطر على طول مسير مائل في الفقرة 2.1.2.2.

وعندما تتوفر بيانات موثوقة طويلة الأجل عن التوهين المقيس عند زاوية ارتفاع وعند تردد (أو ترددات) مختلفين عن الزاوية والتردد المطلوب التنبؤ بهما، يستحسن في أغلب الأحوال تدريج هذه البيانات نسبة إلى زاوية الارتفاع والتردد المعنيين بدلاً من تطبيق الطريقة العامة. وترد في الفقرة 3.1.2.2 طريقة تدريج الترددات الموصى بها.

ويمكن تقدير تأثيرات اختلاف المواقع بواسطة الطريقة المحددة في الفقرة 4.2.2.

1.1.2.2 حساب إحصاءات التوهين بالمطر على المدى الطويل وفقاً لمعدل هطول المطر في نقطة معينة

يوفر الإجراء التالي تقديرات لإحصاءات طويلة الأجل للتوهين بالمطر في مسير مائل في موقع معين وعند ترددات تصل إلى 55 GHz. ويتطلب هذا الإجراء المعلمات التالية:

$R_{0,01}$: معدل هطول المطر في نقطة معينة من الموقع أثناء 0,01% من سنة متوسطة (mm/h)

h_s: ارتفاع المحطة الأرضية (km) فوق متوسط مستوى البحر

θ: زاوية الارتفاع (درجات)

φ: خط عرض المحطة الأرضية (درجات)

f: التردد (GHz)

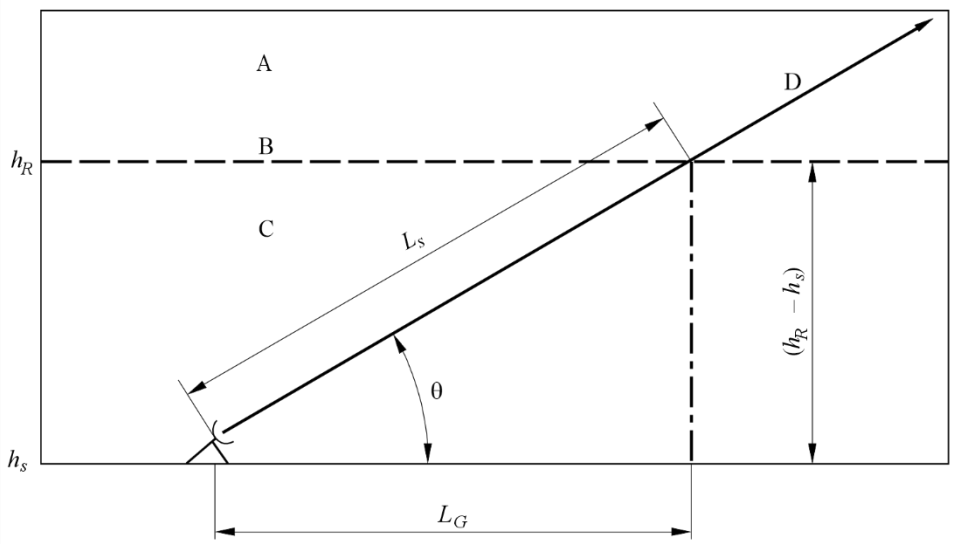
R_e: نصف قطر الأرض الفعلي (8 500 km).

وإذا لم تتوفر بيانات محلية عن ارتفاع المحطة الأرضية فوق متوسط مستوى البحر، يمكن الحصول على تقدير له من خرائط الارتفاع الطبوغرافي المبينة في التوصية ITU-R P.1511.

ويوضح الشكل 1 هندسة المسير.

الشكل 1

مخطط بياني لمسير أرض–فضاء يبين المعلمات اللازمة لعملية التنبؤ بالتوهين



A: الهواطل المتجمدة
B: ارتفاع المطر
C: الهواطل السائلة
D: المسير أرض-فضاء

P.0618-01

الخطوة 1: يحسب ارتفاع الأمطار، h_R، كما هو مبين في التوصية ITU-R P.839.

الخطوة 2: يحسب طول المسير المائل، L_s، تحت ارتفاع المطر للمقدار $\theta \leq 5$ بواسطة المعادلة التالية:

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin\theta} \quad \text{km} \tag{1}$$

وتستعمل المعادلة التالية للمقدار $\theta > 5°$:

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2\theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e}\right)^{1/2} + \sin\theta} \quad \text{km} \tag{2}$$

وإذا كان $h_R - h_s$ أقل من صفر أو يساويه فإن التوهين بالمطر المتنبأ به لأي نسبة مئوية من الزمن هو صفر، ولا داعي لتطبيق الخطوات المبينة أدناه.

الخطوة 3: يحسب الإسقاط الأفقي، L_G، لطول المسير المائل بواسطة المعادلة التالية:

$$L_G = L_s \cos\theta \quad \text{km} \tag{3}$$

الخطوة 4: يحسب معدل هطول المطر $R_{0,01}$ الذي يتم تجاوزه في أثناء 0,01% من سنة متوسطة (مع زمن تكامل قدره دقيقة واحدة). وإذا تعذر الحصول على هذه الإحصاءات طويلة الأجل من مصادر البيانات المحلية، يمكن تقديرها من خرائط معدل هطول الأمطار المبينة في التوصية ITU-R P.837. وإذا كان $R_{0.01}$ يساوي صفراً، يكون التوهين المتنبأ به بسبب المطر صفراً لأي نسبة مئوية من الزمن، ولا داعي لتطبيق الخطوات المبينة أدناه.

الخطوة 5: يحسب التوهين النوعي γ_R، بواسطة المعاملات المعتمدة على التردد المبينة في التوصية ITU-R P.838 ومعدل هطول المطر $R_{0,01}$ المحدد في الخطوة 4 بواسطة المعادلة التالية:

$$\gamma_R = k\,(R_{0.01})^{\alpha} \qquad \text{dB/km} \tag{4}$$

الخطوة 6: يحسب عامل التنقيص الأفقي $r_{0,01}$، للنسبة 0,01% من الزمن بواسطة المعادلة التالية:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78\sqrt{\dfrac{L_G\,\gamma_R}{f}} - 0.38\left(1 - \mathrm{e}^{-2L_G}\right)} \tag{5}$$

الخطوة 7: يحسب عامل الضبط العمودي $v_{0,01}$، للنسبة 0,01% من الزمن بواسطة المعادلة التالية:

$$\zeta = \tan^{-1}\left(\frac{h_R - h_s}{L_G\,r_{0.01}}\right) \qquad \text{degrees}$$

عندما تكون $\zeta > \theta$ تُستعمل المعادلة

$$L_R = \frac{L_G\,r_{0.01}}{\cos\theta} \qquad \text{km}$$

خلاف ذلك

$$L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\sin\theta} \qquad \text{km}$$

وإذا كانت $|\varphi| < 36°$ تُستعمل المعادلة $\chi = 36 - |\varphi|$ بالدرجات

خلاف ذلك $\chi = 0$ بالدرجات

$$\nu_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin\theta}\left(31\left(1 - \mathrm{e}^{-(\theta/(1+\chi))}\right)\dfrac{\sqrt{L_R\,\gamma_R}}{f^2} - 0.45\right)}$$

الخطوة 8: طول المسير الفعلي:

$$L_E = L_R\,\nu_{0.01} \qquad \text{km} \tag{6}$$

الخطوة 9: يحسب التوهين المتنبأ تجاوزه أثناء 0,01% من سنة متوسطة من المعادلة:

$$A_{0.01} = \gamma_R\,L_E \qquad \text{dB} \tag{7}$$

الخطوة 10: يحدد التوهين المقدر تجاوزه أثناء نسب مئوية أخرى من سنة متوسطة، في المدى 0,001% إلى 5%، انطلاقاً من التوهين الذي يتم تجاوزه أثناء 0,01% من سنة متوسطة:

إذا كان $p \geq 1\%$ أو $|\varphi| \geq 36°$: $\beta = 0$

وإذا كان $p < 1\%$ و $|\varphi| < 36°$ و $\theta \geq 25°$: $\beta = -0{,}005(|\varphi| - 36)$

وبخلاف ذلك: $\beta = -0{,}005(|\varphi| - 36) + 1{,}8 - 4{,}25\sin\theta$

$$A_p = A_{0.01}\left(\frac{p}{0.01}\right)^{-(0.655 + 0.033\ln(p) - 0.045\ln(A_{0.01}) - \beta(1-p)\sin\theta)} \qquad \text{dB} \tag{8}$$

توفر هذه الطريقة تقديراً للإحصاءات طويلة الأجل للتوهين بسبب المطر. وعند مقارنة الإحصاءات المقيسة مع التنبؤات، ينبغي مراعاة قدر من التفاوت الكبير نسبياً في إحصاءات معدل هطول الأمطار من سنة لأخرى (انظر التوصية ITU-R P.678).

2.1.2.2 احتمال وجود توهين بسبب المطر على مسير مائل

تحسب الخطوات التالية احتمال وجود توهين غير صفري بسبب المطر على مسير مائل محدد، $P\ (A > 0)$ (%). وتعتمد هذه الخطوات على معلمات الدخل التالية:

$P_{0_{annual}}(Lat, Lon)$: احتمال المطر السنوي في موقع المحطة الأرضية،

$(0\ \% \leq P_{0_{annual}} \leq 100\%)$

θ: زاوية الارتفاع (بالدرجات)

L_S: طول المسير المائل من المحطة الأرضية إلى ارتفاع المطر (km).

الخطوة 1: تقدير احتمال المطر، $P_{0\,annual}(Lat, Lon)$ (%)، عند المحطة الأرضية إما من المعادلة (3) في التوصية ITU-R P.837 أو من بيانات معدل هطول المطر المقيسة محلياً.

الخطوة 2: حساب المعلمة α:

$$\alpha = Q^{-1}\left(\frac{P_{0_{annual}}}{100}\right) \tag{9}$$

حيث:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}}dt \tag{10}$$

الخطوة 3: حساب دالة الارتباط المكاني، ρ:

$$\rho = 0.59e^{-\frac{|d|}{31}} + 0.41e^{-\frac{|d|}{800}} \tag{11}$$

حيث:

$$d = L_S \cos\theta \qquad \text{(km)} \tag{12}$$

ويحسب L_s في المعادلة (2).

الخطوة 4: حساب التوزيع العادي ثنائي المتغير التكميلي، c_B[1]:

$$c_B = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}}\int_{\alpha}^{\infty}\int_{\alpha}^{\infty} e^{-\frac{x^2-2\rho xy+y^2}{2(1-\rho^2)}}\,dxdy \tag{13}$$

الخطوة 5: عندئذ، يكون احتمال التوهين بسبب المطر على المسير المائل، $P\ (A > 0)$ (%):

$$P(A > 0) = 100\left[1 - \left(1 - \frac{P_{0_{annual}}}{100}\right)\left(\frac{c_B - \left(\frac{P_{0_{annual}}}{100}\right)^2}{\frac{P_{0_{\text{annual}}}}{100}\left(1 - \frac{P_{0_{annual}}}{100}\right)}\right)^{\frac{P_{0_{annual}}}{100}}\right] \quad (\%) \tag{14}$$

وفي حال $\theta = 90^o$ عندئذ $P(A > 0) = P_{0_{annual}}$.

[1] c_B هو نفس المكمل العادي ثنائي المتغير المستعمل في الفقرة 1.4.2.2. ويوجد تقريب لهذا المكمل في Z. Drezner وG.O بشأن "حساب المكمل العادي ثنائي الاتجاه"، جريدة الحساب الإحصائي والمحاكاة. الإصدار 35، 1989، الصفحات 101–107.

ويتضمن صندوق أدوات إحصاءات Matlab وظيفة Matlab المدمجة، '*mvcdf*' التي تحسب هذا المكمل وتتضمن مكتبة Python الوظيفة المدمجة 'mvndst' التي تحسب المكمل نفسه.

3.1.2.2 إحصاءات التدريج طويل الأجل للتردد والاستقطاب للتوهين بسبب المطر

المقياس الترددي هو التنبؤ بتأثير من تأثيرات الانتشار (مثل التوهين بالمطر) عند تردد معين بمعرفة هذا التأثير عند تردد مختلف. وعادةً ما يكون تردد الانتشار المتنبأ به أكبر من تردد تأثير الانتشار المعروف. ويمكن للنسبة بين التوهين بالمطر عند الترددين أن تتغير أثناء حدث من أحداث المطر وتزيد تغيرية النسبة عادةً بزيادة التوهين بالمطر.

وتقدم في الفقرات التالية طريقتان للتنبؤ:

1) القسم 1.3.1.2.2، يقدم طريقةً للتنبؤ بالتغاير الإحصائي للتوهين بالمطر عند التردد f_2 المشروط بتوهين المطر عند التردد f_1. وتحتاج هذه الطريقة إلى التوزيعات التراكمية للتوهين بالمطر عند الترددين.

2) القسم 2.3.1.2.2، يقدم طريقةً مبسطة للتنبؤ بالتوهين بالمطر متساوي الاحتمال عند التردد f_2 المشروط بتوهين المطر عند التردد f_1. ولا تحتاج هذه الطريقة إلى التوزيعات التراكمية للتوهين بالمطر عند أي من الترددين.

ويمكن تطبيق طريقتي التنبؤ هاتين على التحكم في قدرة الوصلة الصاعدة وعلى التشفير التكيفي والتشكيل، مثلاً:

أ) تتنبأ الطريقة الأولى بالتوهين اللحظي بالمطر للوصلة الصاعدة عند التردد f_2 استناداً إلى التوهين اللحظي بالمطر المقاس للوصلة الهابطة عند التردد f_1 بقيمة مخاطر p% لأن تتجاوز القيمة الفعلية للتوهين بالمطر للوصلة الصاعدة القيمة المتنبأ بها.

ب) تتنبأ الطريقة الثانية بالتوهين بالمطر للوصلة الصاعدة عند التردد f_2 استناداً إلى معرفة التوهين بالمطر للوصلة الهابطة عند التردد f_1 عند نفس الاحتمال الخاص بالتجاوز.

1.3.1.2.2 التوزيع المشروط لنسبة المقياس الترددي للتوهين بالمطر

تستند طريقة التنبؤ هذه إلى العلاقة التالية بين A_2 (dB)، التوهين اللحظي بالمطر عند التردد f_2 وA_1 (dB)، التوهين اللحظي بالمطر عند التردد f_1.

$$\ln(A_2) = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}\sqrt{1-\xi^2}\,\ln(A_1) + \left(\mu_2 - \frac{\sigma_2\mu_1}{\sigma_1}\sqrt{1-\xi^2}\right) + \sigma_2\xi \times n \qquad (15)$$

حيث n، التوزيع العادي بقيمة متوسطة تساوي صفر وتغاير بالوحدة. وفيما يلي إجراء خطوة بخطوة للتنبؤ بالدالة $P(A_2 > a_2 | A_1 = a_1)$، دالة التوزيع التراكمي التكميلي للتوهين بالمطر عند التردد f_2 مشروطاً بالتوهين بالمطر عند التردد f_1.

وتفترض هذه الطريقة دالتي التوزيع $P(A_1 > a_1 | A_1 > 0)$ و$P(A_2 > a_2 | A_2 > 0)$، التوزيع التراكمي التكميلي للتوهين بالمطر المشروط بحدوث توهين بالمطر بقيمة غير صفرية على المسير عند الترددين f_1 وf_2، وتتسمان بتوزيع عادي طويل بالمعلمات (μ_1, σ_1) و(μ_2, σ_2):

$$P(A_1 > a_1 | A_1 > 0) = Q\left(\frac{\ln a_1 - \mu_1}{\sigma_1}\right) \qquad (16)$$

$$P(A_2 > a_2 | A_2 > 0) = Q\left(\frac{\ln a_2 - \mu_2}{\sigma_2}\right) \qquad (17)$$

حيث:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}}\,dt \qquad (18)$$

وتشتق المعلمات μ_1 وσ_1 وμ_2 وσ_2 من إحصاءات التوهين بالمطر عند الترددين f_1 وf_2 على نفس مسير الانتشار. ويمكن حساب إحصاءات التوهين بالمطر هذه من بيانات التوهين بالمطر المقاس محلياً (أي التوهين الزائد بالإضافة إلى التوهين بالغازات والتوهين بالسحاب والخبو بالتلألؤ) أو من طريقة التنبؤ بالتوهين بالمطر الواردة في الفقرة 1.1.2.2 بالنسبة للموقع المطلوب وزاوية الارتفاع المطلوبة للمسير. وينبغي اشتقاق إحصاءات التوهين بالمطر عند الترددين f_1 وf_2 من نفس المصدر.

وقد تم اختبار هذا الإجراء عند ترددات بين 19 و50 GHz بيد أنه يوصى بهذا الإجراء عند ترددات تصل إلى 55 GHz.

ومن الضروري معرفة المعلمات التالية:

f_1: التردد الأدنى المعروف عنده التوهين بالمطر (GHz)

f_2: التردد الأعلى المتنبأ عنده بالتوهين بالمطر (GHz)

P_{rain}: احتمال المطر (%)

μ_1: متوسط التوزيع العادي الطويل للتوهين بالمطر عند التردد f_1

μ_2: متوسط التوزيع العادي الطويل للتوهين بالمطر عند التردد f_2

σ_1: الانحراف المعياري للتوزيع العادي الطويل للتوهين بالمطر عند التردد f_1

σ_2: الانحراف المعياري للتوزيع العادي الطويل للتوهين بالمطر عند التردد f_2

وبالنسبة لكل تردد من الترددين f_1 وf_2، يجري استكمال عادي طويل لمنحنى التوهين بالمطر إزاء احتمال الحدوث كالتالي:

الخطوة 1: يحسب الاحتمال P_{rain} (%)، النسبة المئوية الزمنية للمطر على المسير. ويمكن التنبؤ بالاحتمال P_{rain} بواسطة الاحتمال $P_0(Lat, Lon)$ من التوصية ITU-R P.837 لخطي الطول والعرض للموقع المعني.

الخطوة 2: بالنسبة للتردد f_i، حيث i = 1 و2، تكون مجموعات الأزواج $[P_i, A_{i,1}]$ و $[P_i, A_{i,2}]$ حيث P_i (%)، النسبة المئوية للزمن التي يتم فيها تجاوز التوهين $A_{i,1}$ (dB) حيث $P_{rain} \geq P_i$. وينبغي اختيار القيمة المحددة للاحتمال P_i بحيث تغطي مدى الاحتمال المطلوب، لذا يقترح المجموعة التالية للنسب المئوية من الزمن 0,01 و0,02 و0,03 و0,05 و0,1 و0,2 و0,3 و0,5 و1 و2 و3 و5% بشرط $P_{rain} \geq P_i$.

الخطوة 3: تتم قسمة جميع النسب المئوية للزمن، P_i، على احتمال المطر، P_{rain}، للحصول على الاحتمالات المشروطة للتوهين بالمطر $p_i = P_i / P_{rain}$.

الخطوة 4: يتم تحويل سلسلتي الأزواج $[p_i, A_{i,1}]$ و$[p_i, A_{i,2}]$ إلى $\left[Q^{-1}(p_i), \ln A_{i,1}\right]$ و$\left[Q^{-1}(p_i), \ln A_{i,2}\right]$.

الخطوة 5: يتم تقدير المعلمات μ_1 وσ_1 وμ_2 وσ_2 بإجراء الاستكمال بطريقة المربعات الصغرى للسلسلتين $\ln A_{i,1} = \sigma_1 Q^{-1}(p_i) + \mu_1$ و $\ln A_{i,2} = \sigma_2 Q^{-1}(p_i) + \mu_2$. راجع الملحق 2 بالتوصية ITU-R P.1057 للاطلاع على وصف الإجراء خطوة بخطوة لتقريب توزيع تراكمي تكميلي باستخدام توزيع تراكمي تكميلي عادي لوغاريتمي.

الخطوة 6: يحسب معامل الاعتماد على التردد، ξ :

$$\xi = 0.19\left[\frac{f_2}{f_1} - 1\right]^{0.57} \tag{19}$$

الخطوة 7: يحسب المتوسط المشروط، $\mu_{2/1}$ ، والانحراف المعياري المشروط $\sigma_{2/1}$ كالتالي:

$$\mu_{2/1} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}\sqrt{1-\xi^2}\,\ln(a_1) + \left(\mu_2 - \frac{\sigma_2 \mu_1}{\sigma_1}\sqrt{1-\xi^2}\right) \tag{20}$$

$$\sigma_{2/1} = \sigma_2 \xi \tag{21}$$

وبالتالي يكون $P\left(A_2 > a_2 \middle| A_1 = a_1\right)$ ، التوزيع التراكمي التكميلي للتوهين بالمطر A_2 عند التردد f_2 مشروطاً بالتوهين بالمطر $a = A_1$ عند التردد f_1:

$$P\left(A_2 > a_2 \middle| A_1 = a_1\right) = Q\left(\frac{\ln(a_2) - \mu_{2/1}}{\sigma_{2/1}}\right) \tag{22}$$

حيث a_1 (dB)، التوهين بالمطر عند التردد f_1 و $0 \le P \le 1$. وتمثل $P\left(A_2 > a_2 | A_1 = a_1\right)$ احتمال أن يتجاوز التوهين بالمطر A_2 (dB) عند التردد f_2 القيمة a_2 (dB) (أي المخاطر)، حيث a_1 (dB) التوهين بالمطر عند التردد f_1.

ويمكن حساب القيمة a_2 (dB) بالنسبة لقيمة مفترضة للاحتمال P كالتالي:

$$a_2 = \exp(\sigma_{2/1} Q^{-1}(P) + \mu_{2/1}) \tag{23}$$

وبالرغم من أن هذا الإجراء خاص بتقديم التوهين بالمطر، فإنه يمكن استعماله أيضاً للتنبؤ بالتوزيع التراكمي التكميلي للتوهين الكلي (التوهين بالغازات والتوهين بالمطر والتوهين بالسحاب والخبو بالتلألؤ). بيد أنه لم يتم التحقق من دقة هذا الإجراء.

2.3.1.2.2 المقياس الترددي طويل الأمد لإحصاءات التوهين بالمطر

وعندما تتوفر عند تردد معين بيانات موثوقة لقياس التوهين يمكن تطبيق المعادلة التجريبية الواردة أدناه التي تعطي نسبة للتوهين مباشرة بدلالة التردد والتوهين على تدريج التردد في المسير نفسه في مدى التردد من 7 إلى 55 GHz:

$$A_2 = A_1 (\varphi_2 / \varphi_1)^{1 - H(\varphi_1, \varphi_2, A_1)} \tag{24}$$

حيث:

$$\varphi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2} \tag{25}$$

$$H(\varphi_1, \varphi_2, A_1) = 1.12 \times 10^{-3} (\varphi_2 / \varphi_1)^{0.5} (\varphi_1 A_1)^{0.55} \tag{26}$$

تمثل A_1 وA_2 قيمتي تساوي احتمالات التوهين بالمطر الزائد عند الترددين f_1 وf_2 (GHz)، على التوالي.

ويفضل المقياس الترددي للتوهين من بيانات توهين مقاسة على المدى الطويل بدلاً من بيانات مقاسة على المدى الطويل للمطر.

2.2.2 التغيرات الموسمية – الشهر الأسوأ

غالباً ما يتطلب تخطيط الأنظمة قيمة التوهين التي يتم تجاوزها أثناء نسبة مئوية من الزمن، p_w، من الشهر الأسوأ. ويستعمل الإجراء التالي لتقدير التوهين الذي يتم تجاوزه أثناء نسبة مئوية محددة من الشهر الأسوأ.

الخطوة 1: تحسب النسبة المئوية السنوية من الزمن، p، المقابلة للنسبة المئوية من الزمن p_w المرغوب فيها للشهر الأسوأ، بواسطة المعادلة المحددة في التوصية ITU-R P.841 وبتطبيق أي ضبط مطلوب على القيمة p على النحو المحدد في التوصية.

الخطوة 2: يحسب التوهين، A (dB)، للمسير المعني والذي يتم تجاوزه أثناء النسبة المئوية السنوية من الزمن، p، باتباع الطريقة المبينة في الفقرة 1.1.2.2 أو من إحصاءات التوهين المقيسة أو من تدريج التردد. وتمثل قيمة A هذه التوهين المقدر أثناء p_w في المائة من الزمن أثناء الشهر الأسوأ.

وترد في التوصية ITU-R P.678 المنحنيات التي تبين تغير قيم الشهر الأسوأ بالنسبة إلى قيمها المتوسطة.

3.2.2 تغير الإحصاءات بحكم المكان والزمان

قد تُظهر توزيعات التوهين بسبب الهواطل، المقيسة في نفس المسير عند نفس التردد والاستقطاب، تغيرات ملموسة من سنة إلى أخرى. ويلاحظ، في المدى 0,001% إلى 0,1% من السنة، أن قيم التوهين عند سوية ثابتة من الاحتمال تتغير بنسبة تزيد على 20% r.m.s. وعندما تستعمل نماذج التنبؤ بالتوهين أو نماذج التدريج المبينة في الفقرة 1.2.2 لتدريج المشاهدات عند موقع معين، في تقدير مسير آخر عند الموقع نفسه، ترتفع نسبة التغير إلى أكثر من 25% r.m.s.

4.2.2 اختلاف المواقع

قلّما تتجاوز الأبعاد الأفقية لخلايا المطر الشديد التي تسبب توهيناً كبيراً على الوصلة أرض–فضاء بضعة كيلومترات. ويمكن لأنظمة التنوع القادرة على إعادة تسيير الحركة نحو محطات أرضية أخرى، أو الأنظمة التي لها نفاذ إلى الساتل مع موارد إضافية على متنه متيسرة لتوزيع مؤقت، أن تحسن من اعتمادية النظام إلى حد كبير. وتُصنَّف أنظمة اختلاف المواقع على أنها متوازنة إذا تساوت عتبتا التوهين على الوصلتين وغير متوازنة إذا لم تتساوَ عتبتا التوهين على الوصلتين. ويمكن أيضاً أن تؤثر حالات انحطاط المسير، غير تلك الناجمة عن المطر، على أداء اختلاف المواقع عند ترددات أعلى من 20 GHz.

وهناك نموذجان لتنبؤات اختلاف المواقع:

– طريقة التنبؤ الموصوفة في الفقرة 1.4.2.2 القابلة للتطبيق على أنظمة غير متوازنة وعلى أنظمة متوازنة والتي يُحسب بموجبها الاحتمال المشترك لتجاوز عتبات التوهين؛

– وطريقة التنبؤ الموصوفة في الفقرة 2.4.2.2 القابلة للتطبيق على أنظمة متوازنة بمسافات قصيرة والتي يُحسب بموجبها كسب التنوع.

وطريقة التنبؤ الموصوفة في الفقرة 1.4.2.2 هي المفضلة والأكثر دقة. ويمكن استعمال طريقة التنبؤ الموصوفة المحددة في الفقرة 2.4.2.2 لمسافات فصل لا تتجاوز 20 km؛ بيد أنها أقل دقة.

1.4.2.2 التنبؤ باحتمال الانقطاع بسبب التوهين بالمطر مع اختلاف المواقع

تفترض طريقة التنبؤ بالتنوع توزيعاً لوغاريتمياً عادياً لشدة المطر والتوهين بالمطر.

وتتنبأ هذه الطريقة باحتمال $P_r(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$ وهو الاحتمال المشترك (%) بأن يكون التوهين في المسير إلى الموقع الأول أكبر من a_1 والتوهين في المسير إلى الموقع الثاني أكبر من a_2. والمقدار $P_r(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$ هو جداء الاحتمالين المشتركين التاليين:

1) P_r، الاحتمال المشترك لهطول المطر في كلا الموقعين؛

2) P_a، الاحتمال المشترك المشروط لتجاوز التوهينين a_1 وa_2 على التوالي في حالة هطول المطر في كلا الموقعين؛ أي:

$$P_r(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2) = 100 \times P_r \times P_a\% \tag{27}$$

وهذه الاحتمالات هي:

$$P_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_r^2}} \int_{R_1}^{\infty}\int_{R_2}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{r_1^2 - 2\rho_r r_1 r_2 + r_2^2}{2\left(1-\rho_r^2\right)}\right)\right] dr_2 dr_1 \tag{28}$$

حيث:

$$\rho_r = 0.7\exp(-d/60) + 0.3\exp[-(d/700)^2] \tag{29}$$

و

$$P_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_a^2}} \int_{\frac{\ln a_1 - m_{\ln A_1}}{\sigma_{\ln A_1}}}^{\infty} \int_{\frac{\ln a_2 - m_{\ln A_2}}{\sigma_{\ln A_2}}}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{b_1^2 - 2\rho_a b_1 b_2 + b_2^2}{2\left(1-\rho_a^2\right)}\right)\right] db_2 db_1 \tag{30}$$

حيث:

$$\rho_a = 0.94\exp(-d/30) + 0.06\exp\left[-(d/500)^2\right] \tag{31}$$

وP_a وP_r توزيعان عاديان ثنائيا المتغير ومتكاملان[2].

والمعلمة d الفاصل بين الموقعين (km). والعتبتان R_1 و R_2 حل المعادلة:

$$P_k^{rain} = 100 \times Q(R_k) = 100 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{R_k}^{\infty} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) \mathrm{d}r \qquad (32)$$

أي:

$$R_k = Q^{-1}\left(\frac{P_k^{rain}}{100}\right) \qquad (33)$$

حيث:

R_k : عتبة الموقع ذي الترتيب k، على التوالي

P_k^{rain} : احتمال المطر (%)

Q: التوزيع العادي التراكمي المكمل

Q^{-1}: عكس التوزيع العادي التراكمي المكمل

P_k^{rain} : يمكن الحصول عليه لموقع معيّن باتباع الخطوة 3 في الملحق 1 من التوصية ITU-R P.837 باستعمال إما البيانات المحلية أو خرائط معدلات هطول المطر لقطاع الاتصالات الراديوية.

وتُحدد قيم المعلمات $m_{\ln A_1}$ و $m_{\ln A_2}$ و $\sigma_{\ln A_1}$ و $\sigma_{\ln A_2}$ بضبط كل توهين بالمطر لكل موقع A_i مقابل احتمال الحدوث P_i، على أساس توزيع لوغاريتمي عادي:

$$P_i = P_k^{rain} Q\left(\frac{\ln A_i - m_{\ln A_i}}{\sigma_{\ln A_i}}\right) \qquad (34)$$

ويمكن الحصول على هذه المعلمات لكل موقع من المواقع أو يمكن استعمال موقع واحد. ويمكن التنبؤ بالتوهين بالمطر مقابل احتمال الحدوث السنوي باستعمال الطريقة الموصوفة في الفقرة 1.1.2.2.

وبالنسبة لكل مسار، يجري الضبط اللوغاريتمي العادي للتوهين بالمطر مقابل احتمال الحدوث كما يلي:

الخطوة 1: تحديد الاحتمال P_k^{rain} (النسبة المئوية من الزمن)، وهو احتمال هطول المطر على المسار k.

الخطوة 2: إنشاء مجموعة أزواج $[P_i, A_i]$ حيث P_i (% من الزمن) هو احتمال تجاوز التوهين A_i (dB)، مع مراعاة أن $P_i \le P_k^{rain}$. والقيم المحددة للاحتمال P_i ينبغي أن تراعي مدى الاحتمال المعني؛ بيد أنه يقترح مجموعة للنسب المئوية للزمن كالتالي: 0,01% و0,02% و0,03% و0,05% و0,1% و0,2% و0,3% و0,5% و1% و2% و3% و5% و10%، مع الشرط $P_i \le P_k^{rain}$.

الخطوة 3: تحويل مجموعة الأزواج $[P_i, A_i]$ إلى $\left[Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_k^{rain}}\right), \ln A_i\right]$ (35)

[2] **ملاحظة** – هو نفس المكمل العادي ثنائي المتغير المستعمل في الفقرة 2.1.2.2. ويوجد تقريب لهذا المكمل في Z. Drezner وG.O بشأن "حساب المكمل العادي ثنائي الاتجاه"، جريدة الحساب الإحصائي والمحاكاة. الإصدار 35، 1989، الصفحات 101–107. ويتضمن صندوق أدوات إحصاءات Matlab وظيفة Matlab المدمجة، '*mvcdf*' التي تحسب هذا المكمل وتتضمن مكتبة Python الوظيفة المدمجة 'mvndst' التي تحسب المكمل نفسه.

حيث:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \qquad (36)$$

الخطوة 4: تحديد المتغيّرين $m_{\ln A_i}$ و $\sigma_{\ln A_i}$ بالتقريب بطريقة المربعات الصغرى في المعادلة: $\ln A_i = \sigma_{\ln A_i} \; Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_k^{rain}}\right) + m_{\ln A_i}$ لجميع قيم i. ويمكن تحديد التقريب بطريقة المربعات الصغرى باستعمال إجراء خطوة بخطوة لتقريب توزيع تراكمي مكمل بواسطة التوزيع التراكمي المكمل اللوغاريتمي العادي الموصوف في التوصية ITU-R P.1057.

2.4.2.2 كسب التنوع

مع أن طريقة التنبؤ الموصوفة في الفقرة 1.4.2.2 طريقة مفضلة، يمكن استعمال طريقة مبسطة بديلة لحساب التنبؤ بكسب التنوع، G (dB)، بين أزواج المواقع بواسطة المعادلة التجريبية الواردة أدناه. ويمكن استعمال هذه الطريقة البديلة لمسافات فصل بين المواقع لا تتجاوز 20 كيلومتراً. والمعلمات اللازمة لحساب كسب التنوع هي:

d: الفصل (km) بين الموقعين

A: التوهين بالمطر في المسير (dB) من أجل موقع واحد

f: التردد (GHz)

θ: زاوية ارتفاع المسير (درجات)

ψ: الزاوية (درجات) التي يشكلها سمت مسير الانتشار مع الخط الأساسي بين الموقعين ويتم اختيارها بحيث تكون $\psi° \geq 90$.

الخطوة 1: يحسب الكسب الذي يحققه الانفصال المكاني بواسطة المعادلة:

$$G_d = a\,(1 - e^{-bd}) \qquad (37)$$

حيث:

$$a = 0.78\,A - 1.94\,(1 - e^{-0.11\,A})$$

$$b = 0.59\,(1 - e^{-0.1\,A})$$

الخطوة 2: يحسب الكسب المعتمد على التردد بواسطة المعادلة:

$$G_f = e^{-0.025\,f} \qquad (38)$$

الخطوة 3: يحسب الكسب المعتمد على زاوية الارتفاع بواسطة المعادلة:

$$G_\theta = 1 + 0.006\,\theta \qquad (39)$$

الخطوة 4: يحسب تعبير الخط الأساسي بواسطة المعادلة:

$$G_\psi = 1 + 0.002\,\psi \qquad (40)$$

الخطوة 5: يحسب كسب التنوع الصافي بوصفه الجداء:

$$G = G_d \cdot G_f \cdot G_\theta \cdot G_\psi \quad \text{dB} \qquad (41)$$

5.2.2 خصائص حدوث الهواطل

1.5.2.2 مدة الخبو الفردي

تتوزع مدد الخبو بالمطر الذي يتجاوز سوية توهين محددة توزيعاً لوغاريتمياً عادياً تقريباً. وتكون المدد المتوسطة في حدود عدة دقائق. ولا يظهر أن هذه التوزيعات تتعلق إلى حد كبير بعمق الخبو في أكثرية القياسات الخاصة بخبو أقل من 20 dB، ويعني ذلك أن النسبة المئوية الأكبر من الزمن الكلي للخبو المشاهد عند سويات خبو منخفضة أو عند ترددات أعلى تتألف من عدد أكبر من خبوات فردية لها نفس توزيع المدد تقريباً. ويبدو أن انحرافات لا بأس بها عن التوزيع اللوغاريتمي العادي تحدث لمدد من الخبو تقل عن نصف دقيقة تقريباً. وتميل مدة الخبو عند سوية خبو محددة إلى الزيادة بتناقص زاوية الارتفاع.

ويتطلب تخطيط توصيلات الشبكات الرقمية متكاملة الخدمات (ISDN) بالساتل توفير بيانات عن مساهمة أحداث التوهين الأقصر من 10 s في زمن الخبو الكلي. وهذه المعلومات ذات أهمية بالنسبة إلى سوية التوهين المقابلة لعتبة الانقطاع حيث تساهم أحداث تدوم أكثر من 10 s في زمن النظام غير المتيسر بينما تؤثر أحداث أقصر في أداء النظام أثناء الزمن المتيسر (انظر التوصية ITU-R S.579). وتشير البيانات المتوفرة إلى أن زمن التجاوز في أثناء الزمن المتيسر يساوي، في أغلب الحالات، 2% إلى 10% من زمن التجاوز الصافي. إلا أنه عند زوايا ارتفاع منخفضة حيث تصبح التراوحات قصيرة الأجل للإشارة بسبب التلألؤ التروبوسفيري ذات دلالة إحصائية، ثمة حالات معينة يكون فيها تجاوز الزمن أثناء الزمن المتيسر أكبر بكثير مما هو عليه الحال في مسيرات أرض–فضاء عند ارتفاع أعلى.

2.5.2.2 معدلات تغيير التوهين (معدل الخبو)

من المتفق عليه عموماً أن توزيعات معدلات الخبو الموجبة والسالبة لوغاريتمية عادية ومتشابهة كثيراً. ولم يتأكد أن معدل الخبو يتوقف على عمق الخبو.

3.5.2.2 الترابط بين قيم التوهين الآنية عند ترددات مختلفة

إن البيانات المتعلقة بالنسبة الآنية لقيم التوهين بسبب المطر عند ترددات مختلفة مفيدة لطائفة من تقنيات الخبو التكييفية. وتبين أن نسبة تدريج التردد موزعة توزيعاً لوغاريتمياً عادياً وأنها تتأثر بنمط الأمطار وبدرجة حرارتها. وتظهر البيانات أن التغيرات قصيرة الأجل لنسبة التوهين قد تكون ذات دلالة ويتوقع أن تتزايد بتناقص زاوية ارتفاع المسير.

3.2 التأثيرات في الجو الصافي

فيما عدا الامتصاص الجوي، من غير المحتمل أن تحدث تأثيرات الجو الصافي في غياب الهواطل خبواً مهماً في أنظمة الاتصالات الفضائية العاملة عند ترددات أدنى من 10 GHz تقريباً وعند زوايا ارتفاع أكبر من 10°. غير أنه من الممكن، عند زوايا ارتفاع منخفضة (≤ 10°) وعند ترددات أعلى من 10 GHz تقريباً، أن تسبب أحياناً التلألؤات التروبوسفيرية انحطاطاً كبيراً في الأداء. ويمكن، عند زوايا ارتفاع منخفضة جداً (≤ 4° في المسيرات داخل الأراضي، و≤ 5° في المسيرات فوق الماء أو المسيرات الساحلية)، أن يكون الخبو بسبب تأثيرات الانتشار عبر مسيرات متعددة خبواً شديداً جداً. وقد يكون التلألؤ الأيونوسفيري مهماً في بعض المواقع وعند ترددات أدنى من 6 GHz تقريباً (انظر التوصية ITU-R P.531).

1.3.2 تناقص كسب الهوائي بسبب عدم تماسك جبهة الموجة

ينتج عدم تماسك جبهة موجة واردة على هوائي استقبال عن ظواهر عدم انتظام ضيقة النطاق في بنية دليل الانكسار للجو. وهي تتسبب، إلى جانب التراوحات السريعة للإشارة المذكورة في الفقرة 4.2، في خسارة من اقتران الهوائي بالوسط الحامل يمكن وصفها على أنها تناقص في كسب الهوائي.

ويتزايد هذا التأثير مع ارتفاع التردد وتناقص زاوية الارتفاع وهو دالة لقطر الهوائي. ورغم أن هذا التأثير لا يؤخذ في الاعتبار صراحة في نماذج الانكسار المبينة أدناه فإنه مهمل بالمقارنة بالتأثيرات الأخرى.

2.3.2 الخسارة بسبب تمديد الحزمة

ترد طريقة التنبؤ بالخسارة بسبب تمديد الحزمة في الاتجاهين أرض–جو وجو–أرض في التوصية ITU-R P.834.

4.2 التلألؤ والخبو بسبب تعدد المسيرات

يتوقف اتساع التلألؤات التروبوسفيرية على مقدار وبنية تغيرات دليل الانكسار عبر مسير الانتشار، فيزداد مع زيادة التردد وطول المسير، ويتناقص بتناقص عرض حزمة الهوائي بسبب القيم المتوسطة للفتحة. وتظهر البيانات المقاسة وجود ترابط جيد بين القيم r.m.s. المتوسطة شهرياً للتراوحات وصيغة الرطوبة في الانكسار الراديوي، N_{wet}، التي تتوقف على محتوى بخار الماء في الجو.

وتتألف طريقة التنبؤ بالخبو الناجم عن اتساع التلألؤ من ثلاثة أجزاء:

1) التنبؤ بالخبو الناجم عن اتساع التلألؤ في زوايا الارتفاع التي تزيد عن أو تساوي 5° في الفضاء الحر (الفقرة 1.4.2).

2) التنبؤ بالخبو الناجم عن اتساع التلألؤ لقيم الخبو الأكبر من أو تساوي 25 dB (الفقرة 2.4.2).

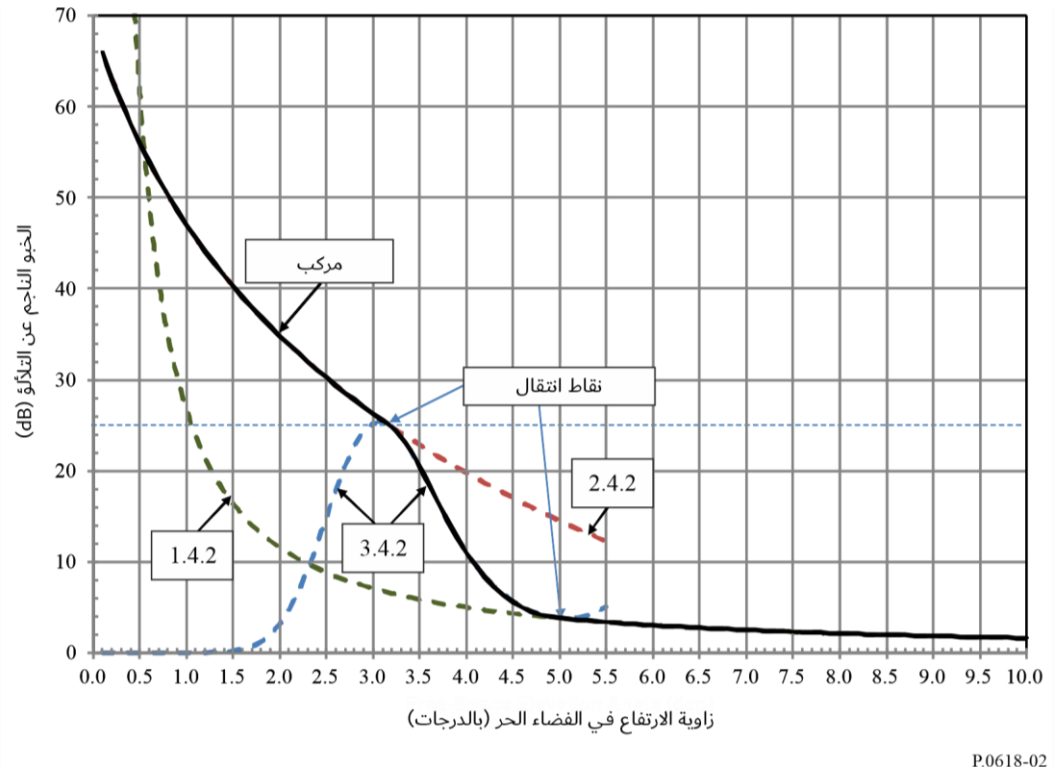
3) التنبؤ بالخبو الناجم عن اتساع التلألؤ في المنطقة الانتقالية بين التوزيعين أعلاه (الفقرة 3.4.2).

وكما ورد في التوصية ITU-R P.834، فإن أي موجة راديوية بين محطة على سطح الأرض ومحطة فضائية تنثني نحو الأرض بتأثير الانكسار الجوي. ونتيجة لذلك، فإن زاوية الارتفاع الظاهرة، التي تراعي الانكسار الجوي، تكون أكبر من زاوية الارتفاع في الفضاء الحر، التي لا تراعي إلا خط البصر بين المحطتين. فإذا كانت زاوية ارتفاع الفضاء الحر المعنية أكبر من أو تساوي 5°، فإن الفارق بين زوايا ارتفاع الفضاء الحر لا يكون كبيراً، ولن توضع في الاعتبار إلا طريقة التنبؤ الواردة في الفقرة 1.4.2.

ويعرض الشكل 2 مثالاً توضيحياً للأجزاء الثلاثة لطريقة التنبؤ. ويلاحظ أن طريقة التنبؤ في المنطقة الانتقالية المشروحة في الفقرة 3.4.2 تماسَي التوزيع الموصوف في الفقرة 1.4.2 عند زاوية ارتفاع في الفضاء الحر تساوي 5° وتماسي التوزيع الموصوف في الفقرة 2.4.2 عند عمق خبو تلألؤ مقداره 25 dB.

الشكل 2

مثال توضيحي للأجزاء الثلاثة لطريقة التنبؤ بالخبو الناجم عن التلألؤ



ويلاحظ عند نسب مئوية صغيرة جداً من الزمن، وكما هو الحال مع قيم كبيرة لعمق الخبو (أكبر من 10 dB تقريباً)، أن الخبو الناجم عن التلألؤ عند زوايا ارتفاع منخفضة جداً قد يكون كبيراً. كما يلاحظ أن للخبو خصائص مماثلة للخبو بسبب تعدد المسيرات في الوصلات على الأرض. ومثلما هو الحال بالنسبة إلى توزيع عمق الخبو على وصلات الأرض، فإن توزيع عمق الخبو الخاص بالوصلات الساتلية عند زوايا ارتفاع منخفضة جداً مرتبط أيضاً على ما يبدو بإحصاءات تدرج الانكسارية. ويُظهر توزيع الخبو الإجمالي انتقالاً تدريجياً من توزيع للتلألؤ بنسب مئوية كبيرة للتجاوز إلى توزيع للخبو بسبب تعدد المسيرات (بميل قدره 10 dB/decade) بنسب مئوية صغيرة. وتستعمل طريقتا التنبؤ المبينتان في الفقرتين 2.4.2 و3.4.2 والمتعلقتان بجزء الخبو العميق وجزء الخبو الضحل من التوزيع الإجمالي على التوالي، إحصاءات تدرج الانكسارية P_L لوصف التغيرات المناخية داخل التوزيع.

ويكون توزيع الخبو الصافي بسبب تأثيرات الانكسار التروبوسفيري، $A(p)$، توليفة مكونة من تأثيرات تمديد الحزمة والتلألؤ وتأثيرات الخبو بسبب تعدد المسيرات الموصوفة أعلاه. ويمكن الجمع بين توزيعات التلألؤ التروبوسفيري والتلألؤ الأيونوسفيري بواسطة جمع النسب المئوية المقابلة من الزمن التي يتم أثناءها تجاوز مستويات خبو محددة.

1.4.2 حساب إحصاءات مقادير التلألؤ الشهرية وطويلة الأجل عند زوايا ارتفاع أكبر من 5 درجات

ترد أدناه طريقة عامة للتنبؤ بتوزيع الاحتمال التراكمي للتلألؤ التروبوسفيري عند زوايا ارتفاع أكبر من أو تساوي 5 درجات. وترتكز طريقة التنبؤ إلى قيم متوسطة لدرجة الحرارة والرطوبة النسبية، لشهر واحد أو لمدد أطول، وهي تبين الظروف المناخية للمحطة الأرضية في دائرة الاهتمام. ونظراً لأن القيم المتوسطة لدرجة حرارة سطح الأرض والرطوبة النسبية تتغير بتغير فصول السنة فإن توزيع عمق الخبو بسبب التلألؤ يتغير حسب الموسم. ويمكن التنبؤ بالتغير الموسمي باستعمال القيم الموسمية المتوسطة لدرجة حرارة سطح الأرض والرطوبة النسبية، التي يمكن الحصول عليها من معلومات الأرصاد الجوية للموقع المعني.

وفيما يلي المعلمات اللازمة لهذه الطريقة:

t: متوسط درجة الحرارة المحيطة على سطح الأرض (°C) في الموقع لفترة شهر أو أكثر

H: متوسط الرطوبة النسبية على سطح الأرض (%) في الموقع لفترة شهر أو أكثر

(**الملاحظة** 1 – إذا لم تتوفر بيانات تجريبية بشأن t وH، يمكن استعمال خرائط N_{wet} المبينة في التوصية ITU-R P.453.)

f: التردد (GHz) حيث $55 \text{ GHz} \geq f \geq 4 \text{ GHz}$

θ: زاوية ارتفاع الفضاء الحر، حيث $\theta \leq 5°$

D: القطر المادي (m) لهوائي المحطة الأرضية

η: كفاءة الهوائي؛ وإذا كانت غير معروفة يكون $\eta = 0{,}5$ تقديراً متحفظاً.

إذا كانت القيمة المتوسطة لعنصر الرطوبة في انكسارية السطح التي يتم تجاوزها للسنة المتوسطة، N_{wet}، مأخوذة من الخرائط الرقمية الواردة في التوصية ITU-R P.453، انتقل مباشرة إلى الخطوة 3.

الخطوة 1: يحسب ضغط تشبع بخار الماء، e_s، (hPa)، للقيمة t على النحو المحدد في التوصية ITU-R P.453.

الخطوة 2: تحسب قيمة الرطوبة في الانكسارية الراديوية، N_{wet}، المقابلة لقيمة e_s وt وH على النحو المحدد في التوصية ITU-R P.453.

الخطوة 3: يحسب الانحراف المعياري لاتساع الإشارة المرجعية، σ_{ref}:

$$\sigma_{ref} = 3.6 \times 10^{-3} + 10^{-4} \times N_{wet} \quad \text{dB} \tag{42}$$

الخطوة 4: يحسب طول المسير الفعّال L:

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin^2\theta + 2.35 \times 10^{-4}} + \sin\theta} \quad \text{m} \tag{43}$$

حيث h_L ارتفاع طبقة الاضطراب = 1 000 m.

الخطوة 5: يقدر القطر الفعال للهوائي، D_{eff}، انطلاقاً من القطر الهندسي D، وكفاءة الهوائي η:

$$D_{eff} = \sqrt{\eta}\, D \qquad \text{m} \tag{44}$$

الخطوة 6: يحسب عامل متوسط فتحة الهوائي بواسطة المعادلة:

$$g(x) = \sqrt{3.86\,(x^2+1)^{11/12} \cdot \sin\left[\frac{11}{6}\tan^{-1}\frac{1}{x}\right] - 7.08\,x^{5/6}} \tag{45}$$

حيث:

$$x = 1.22\, D_{eff}^2\,(f / L) \tag{46}$$

وإذا كان متغير الجذر التربيعي سالباً (أي عندما يكون $x \leq 7{,}0$)، فإن عمق خبو التلألؤ المتنبأ به لأي نسبة مئوية من الزمن يساوي الصفر، ولا داعي لاتباع الخطوات التالية.

الخطوة 7: يحسب الانحراف النمطي للإشارة في الفترة ومسير الانتشار المطبقين:

$$\sigma = \sigma_{ref}\; f^{\,7/12}\; \frac{g(x)}{(\sin\theta)^{1.2}} \tag{47}$$

الخطوة 8: يحسب عامل النسبة المئوية من الزمن $a(p)$ للنسبة المئوية من الزمن p، في المدى $50\% \geq P > 0{,}01$ بالمعادلة:

$$a(p) = -0.061\,(\log_{10} p)^3 + 0.072\,(\log_{10} p)^2 - 1.71\,\log_{10} p + 3.0 \tag{48}$$

الخطوة 9: يحسب عمق الخبو $A(p)$ المتجاوز للنسبة p% من الزمن على النحو التالي:

$$A(p) = a(p) \cdot \sigma \qquad \text{dB} \tag{49}$$

2.4.2 حساب جزء الخبو العميق من توزيع الخبو بسبب التلألؤ أو تعدد المسيرات لزوايا ارتفاع أدنى من 5°

يُقدر بموجب هذه الطريقة عمق الخبو للخبو الذي يزيد عن أو يساوي 25 dB نتيجة لمجموع الخبو الناتج عن تمديد الحزمة والتلألؤ وتعدد المسيرات في السنة المتوسطة والشهر الأسوأ في هذه السنة. وفيما يلي تفاصيل الإجراء خطوة خطوة:

الخطوة 1: تحسب زاوية ارتفاع التسديد الظاهرية θ (mrad) المقابلة لزاوية ارتفاع الفضاء الحر المطلوبة θ_0 (mrad) مع مراعاة تأثيرات الانكسار للمسير المعني باستخدام الطريقة الموصوفة في الفقرة 4 من التوصية ITU-R P.834.

الخطوة 2: يحسب العامل المناخي الجغرافي، K_w، للمسير المعني للشهر الأسوأ في السنة المتوسطة:

$$K_w = p_L^{1.5} \times 10^{\frac{C_0 + C_{Lat}}{10}} \tag{50}$$

حيث p_L (%) هو النسبة المئوية من الزمن التي تكون درجة ميل الانكسارية أثناءها في أدنى 100 m من الجو أقل من –100 N وحدة/km في الشهر الذي تكون فيه أقصى قيمة p_L من بين الأشهر الأربعة الممثلة للفصول، فبراير ومايو وأغسطس ونوفمبر، والتي لها خرائط في الأشكال من 8 إلى 11 في التوصية ITU-R P.453.

وينبغي، من قبيل الاستثناء، أن يقتصر استعمال الخرائط الخاصة بشهري مايو وأغسطس على خطوط العرض الأكبر من 60° شمالاً أو 60° جنوباً.

ويلخص الجدول 3 قيم المعامل C_0 في المعادلة (47) المقابلة لنوع المسير. وتعطي الصيغ التالية المعامل C_{Lat} مقابل خط العرض ψ (بالدرجات شمالاً أو جنوباً):

$$C_{Lat} = 0 \quad \text{for} \quad |\psi| \le 53° \tag{51}$$

$$C_{Lat} = -53 + \psi \quad \text{for} \quad 53° < |\psi| \le 60° \tag{52}$$

$$C_{Lat} = 7 \quad \text{for} \quad 60° < |\psi| \tag{53}$$

الجدول 3

قيم المعامل C_0 في المعادلة (50) لأنماط مختلفة من مسيرات الانتشار

نمط المسير	C_0
مسيرات انتشار فوق البر بكاملها حيث يكون هوائي المحطة الأرضية المقابلة لها على ارتفاع أدنى من 700 m فوق متوسط مستوى البحر	76
مسيرات انتشار يكون هوائي المحطة الأرضية المقابلة لها على ارتفاع أعلى من 700 m فوق متوسط مستوى البحر	70
مسيرات انتشار تكون بكاملها، أو في جزء منها، فوق الماء أو فوق مناطق ساحلية قريبة من مساحات كبيرة من المياه (انظر الحاشية[1] لتعريف مسير الانتشار والمناطق الساحلية وتعريف r)	$76 + 6r$

[1] المتغير r في عبارة المعامل C_0 هو جزء مسير الانتشار الذي يعبر مساحة من المياه أو مناطق ساحلية مجاورة. تصنَّف مسيرات الانتشار التي تمر فوق بحيرة صغيرة أو نهر بأنها فوق البر بكاملها. ومع أنه من الممكن إدراج هذه المساحات من المياه في حساب r، فإن ذلك يؤدي إلى زيادات مهملة في قيمة المعامل C_0 بالنسبة إلى القيم فوق البر للمسيرات غير الساحلية.

الخطوة 3: يحسب عمق الخبو، $A(p)$، الذي يتم تجاوزه أثناء نسبة p% من الزمن عند التردد، f (GHz)، وزاوية الارتفاع الظاهرة المطلوبة، θ (mrad):

أ) للسنة المتوسطة:

$$A(p) = 10\log_{10} K_w - v + 9\log_{10} f - 59.5\log_{10}(1+\theta) - 10\log_{10} p \quad \text{dB} \tag{54}$$

حيث:

$$v = -1.8 - 5.6\log_{10}(1.1 \pm |\cos 2\psi|^{0.7}) \quad \text{dB} \tag{55}$$

وتستعمل الإشارة الموجبة في المعادلة (55) لخط العرض: $|\psi| \le 45°$ والعلامة السالبة لخط العرض $|\psi| > 45°$؛

أو

ب) للشهر الأسوأ في السنة المتوسطة:

$$A(p) = 10\log_{10} K_w + 9\log_{10} f - 55\log_{10}(1+\theta) - 10\log_{10} p \quad \text{dB} \tag{56}$$

والمعادلات (54) و(55) و(56) صالحة لقيمة $A(p)$ أكبر من أو تساوي 25 dB. وقد وضعت هذه المعادلات انطلاقاً من بيانات في مدى الترددات 6 إلى 38 GHz وعند زوايا ارتفاع في المدى من 1° إلى 4°. ويتوقع أن تكون صالحة على الأقل في مدى الترددات من 1 إلى 45 GHz وعند زوايا ارتفاع في المدى 0,5° إلى 5°.

3.4.2 حساب جزء الخبو الضحل من توزيع الخبو بسبب التلألؤ أو تعدد المسيرات عند زوايا ارتفاع أقل من 5°

وضع نموذج الخبو الضحل في هذا القسم من أجل خبو التلألؤ في منطقة الانتقال لخبو أقل من 25 dB وزوايا ارتفاع فضاء حر أقل من 5°.

الخطوة 1: ضع A_1 =25 dB ثم احسب زاوية الارتفاع الظاهرة، θ_1، في النسبة المئوية المطلوبة من الوقت، p(%)، والتردد، f (GHz):

النسبة المئوية المطلوبة من الوقت، p(%)، والتردد، f (GHz):

$$\theta_1 = \begin{cases} \left(\dfrac{K_w f^{0.9}}{p 10^{\frac{A_1}{10}}} \right)^{\frac{1}{5.5}} - 1 & \text{worst month} \\ \left(\dfrac{K_w 10^{-\frac{\nu}{10}} f^{0.9}}{p 10^{\frac{A_1}{10}}} \right)^{\frac{1}{5.95}} - 1 & \text{average year} \end{cases} \quad \text{mrad} \tag{57}$$

حيث يعرف المعامل، K_w، في المعادلة (50) وν في المعادلة (56).

الخطوة 2: احسب A_1'.

$$A_1' = \begin{cases} -\dfrac{55}{1+\theta_1} \log_{10} e & \text{worstmonth} \\ -\dfrac{59.5}{1+\theta_1} \log_{10} e & \text{average year} \end{cases} \quad \text{dB/mrad} \tag{58}$$

الخطوة 3: احسب A_2 من المعادلة (49)

$$A_2 = A_s(p) \quad \text{dB} \tag{59}$$

عند زاوية ارتفاع من الفضاء الحر، θ، تساوي 5°.

الخطوة 4: احسب A_2' كالتالي:

$$A_2' = A_2 \times \left[\frac{g'(x)}{g(x)} \frac{dx}{d\theta} - \frac{1.2}{\tan(\theta)} \right] \times \frac{1}{1000} \quad \text{dB/mrad} \tag{60}$$

حيث:

$$\frac{g'(x)}{g(x)} = \frac{1770\left(x^2+1\right) + 2123 x^{\frac{1}{6}} \left(x^2+1\right)^{\frac{11}{12}} \left[\cos\zeta - x \sin\zeta\right]}{12 x^{\frac{1}{6}} \left(x^2+1\right) \left[354 x^{\frac{5}{6}} - 193 \left(x^2+1\right)^{\frac{11}{12}} \sin\zeta \right]} \tag{61}$$

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{1.22 D_{eff}^2 f}{2 h_L} \left[\frac{\sin\theta}{\sqrt{\sin^2\theta + 2.35 \times 10^{-4}}} + 1 \right] \cos\theta \tag{62}$$

و

$$\zeta = \frac{11}{6} \tan^{-1} \frac{1}{x} \tag{63}$$

عند زاوية ارتفاع في الفضاء الحر، θ، تساوي 5°، حيث تحدد قيم x وD_{eff} وh_L في الفقرة 1.4.2.

الخطوة 5: احسب زاوية الارتفاع الظاهرة، θ_2، المقابلة لزاوية ارتفاع في الفضاء الحر قيمتها 5° باستخدام المعادلة (12) بالتوصية ITU-R P.834، ثم حول θ_2 إلى التقويم mrad.

الخطوة 6: احسب خبو التلألؤ، $A(p)$، المتجاوز لنسبة p (%) من الوقت عند زاوية الارتفاع الظاهرة المطلوبة، θ (mrad)، بالاستكمال الداخلي بين النقطتين (θ_1, A_1, A_1') و (θ_2, A_2, A_2') باتباع النموذج الأسي التكعيبي:

$$A(p) = A_1 \exp\left[\alpha(p)(\theta-\theta_1)+\beta(p)(\theta-\theta_1)^2+\gamma(p)(\theta-\theta_1)^2(\theta-\theta_2)\right] \quad (64)$$

حيث:

$$\alpha(p) = \frac{A_1'}{A_1}$$

$$\beta(p) = \frac{\ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right) - \alpha\delta}{\delta^2}$$

$$\gamma(p) = \frac{A_2' - A_2(\alpha + 2\beta\delta)}{A_2\delta^2}$$

$$\delta = \theta_2 - \theta_1$$

ويطبق عمق الخبو، $A(p)$، بالنسبة لزوايا الارتفاع الظاهرة في منطقة الانتقال، أي عند $\theta_1 \le \theta \le \theta_2$ و $0 \le p \le 50\%$.

5.2 تقدير التوهين الكلي الناجم عن عدة مصادر لتوهين جوي يحدث في آن معاً

يجب مراعاة أثر المصادر المتعددة للتوهين الجوي الذي يحدث في آن معاً بالنسبة للأنظمة العاملة بترددات أعلى من 18 GHz تقريباً، وخصوصاً تلك العاملة بزوايا ارتفاع و/أو هوامش منخفضة.

ويمثل التوهين الكلي (dB) الأثر المركب للمطر والغازات الجوية والسحب والتلألؤ ويتطلب معلمة واحدة أو أكثر من معلمات الدخل التالية:

$A_R(p)$: توهين بسبب المطر لاحتمال ثابت (dB)، كما هو مقدر بواسطة A_p في المعادلة (8)

$A_C(p)$: توهين بسبب السحب لاحتمال ثابت (dB)، بحسب تقدير التوصية ITU-R P.840

$A_G(p)$: توهين غازي بسبب بخار الماء والأوكسجين لاحتمال ثابت (dB)، بحسب تقدير التوصية ITU-R P.676

$A_S(p)$: توهين بسبب التلألؤ التروبوسفيري لاحتمال ثابت (dB)، بحسب التقدير بواسطة المعادلة (49)

حيث p احتمال تجاوز التوهين (أي CCDF) في مدى تتراوح نسبته من 50% إلى 0,001%.

ويمكن حساب التوهين الغازي كدالة للنسبة المئوية من الزمن، باستعمال الفقرة 2.2 من الملحق 2 للتوصية ITU-R P.676 إذا توفرت بيانات الأرصاد الجوية المحلية أثناء النسبة المئوية المطلوبة من الزمن. وإذا لم تتوفر هذه البيانات أثناء النسبة المئوية المطلوبة من الزمن ينبغي حساب متوسط التوهين الغازي واستعماله في المعادلتين (65) و(66).

ويعطى التوهين الكلي، $AT(p)$ (dB)، لاحتمال ثابت، بالمعادلتين التاليتين:

$$A_T(p) = \begin{cases} A_G(p) + \sqrt{\left(A_R(p) + A_C(p)\right)^2 + A_S^2(p)}\ , & 0.001\% \le p \le 5\% \quad (65) \\ A_G(p) + \sqrt{A_C^2(p) + A_S^2(p)}, & 5\% < p \le 50\% \quad (66) \end{cases}$$

حيث:

$$A_C(p) = A_C(5\%)\ \text{(dB)} \qquad \text{for } p < 5.0\% \quad (67)$$

$$A_G(p) = A_G(5\%)\ \text{(dB)} \qquad \text{for } p < 5.0\% \quad (68)$$

ولدى اختبار كامل طريقة التنبؤ بالتوهين الكلي قياساً بإحصاءات التوهين الكلي المقيسة باستخدام معدل الأمطار المتزامنة المقيس أو خرائط معدل الأمطار في جميع أنحاء العالم المبينة في التوصية ITUR P.837، وفي مدى الاحتمال الذي تتراوح نسبته بين 0,001% و5%، تبين أن نسبة خطأ r.m.s. الكلي 33% تقريباً. ونظراً لهيمنة تأثيرات مختلفة في إطار احتمالات مختلفة ونظراً لعدم توفر بيانات الاختبار بشكل متسق عند مختلف سويات الاحتمال فإن بعض التغيير في خطأ .r.m.s يحدث عبر توزيع الاحتمالات.

6.2 التوهين بسبب العواصف الرملية والغبارية

لا يُعرف الكثير عن تأثير العواصف الرملية والغبارية في الإشارات الراديوية في المسيرات المائلة. وتشير البيانات المتيسرة إلى أن التركيزات العالية من الجسيمات و/أو المحتوى العالي من الرطوبة عند ترددات أدنى من 30 GHz، ضرورية لإحداث تأثيرات كبيرة في الانتشار.

3 درجة حرارة الضوضاء

كلما ازداد التوهين ازدادت ضوضاء الإرسال. وقد يكون لهذا التزايد في درجة حرارة الضوضاء في المحطات الأرضية ذات المطاريف الأمامية منخفضة الضوضاء تأثير في نسبة الإشارة إلى الضوضاء يفوق تأثير التوهين بالذات.

ويمكن تقدير درجة حرارة الضوضاء السماوية عند هوائي أي محطة أرضية بواسطة المعادلة:

$$T_{sky} = T_{mr}\,(1 - 10^{-A/10}) + 2.7 \times 10^{-A/10} \quad \text{K} \qquad (69)$$

حيث:

T_{sky}: درجة حرارة الضوضاء السماوية (K) عند هوائي المحطة الأرضية

A: إجمالي التوهين الجوي بعد استبعاد الخبو الناجم عن التلألؤ (dB)

T_{mr}: درجة حرارة الإشعاع المتوسطة الجوية (K).

وبمعرفة درجة حرارة السطح، T_s (K)، فإن درجة حرارة الإشعاع المتوسطة، T_{mr}، يمكن تقديرها في ظل ظروف الطقس الصافي والغائم كالتالي:

$$T_{mr} = 37.34 + 0.81 \times T_S \quad \text{K} \qquad (70)$$

وفي حالة عدم وجود بيانات محلية، يمكن استعمال قيمة تساوي 275 K لدرجة حرارة الإشعاع المتوسطة الجوية لكل من الطقس الصافي والممطر.

وتعالج التوصية ITU-R P.372 بالتفصيل بيئة الضوضاء الخاصة بالمحطات على سطح الأرض وفي الفضاء.

أما بالنسبة إلى أنظمة الاتصالات الساتلية التي تستعمل مدار السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض، فإن الشمس وبقدر أقل القمر، مصدر ضوضاء كبيرة للمحطات الأرضية عند كل الترددات بينما يحتمل أن تكون ضوضاء خلفية المجرَّة كبيرة عند ترددات أقل من 2 GHz تقريباً (انظر التوصية ITU-R P.372). ويمكن، إضافةً إلى ذلك، أن تساهم مجرّات الدجاجة A وX (Cygnus A and X) وذات الكرسي A (Cassiopeia A) والثور (Taurus) وسديم السرطان (Crab nebula) في درجة حرارة ضوضاء الخلفية السماوية.

ويمكن استعمال معادلات التوصية ITU-R P.372 لتحديد درجة حرارة ضوضاء نظام المحطات الأرضية من درجات حرارة اللمعان المشار إليها أعلاه.

4 تأثيرات الاستقطاب المتقاطع

غالباً ما يستخدم إجراء إعادة استعمال التردد بواسطة الاستقطابات التعامدية لزيادة سعة أنظمة الاتصالات الفضائية. إلا أن هذه التقنية مقيدة بإزالة الاستقطاب في مسيرات الانتشار الجوية. وهناك آليات شتى ضرورية لإزالة الاستقطاب في التروبوسفير، وخصوصاً تأثيرات الماء الجوي.

وتناقش التوصية ITU-R P.531 دوران فاراداي لمستوي الاستقطاب الذي يسببه الأيونوسفير. وقد يحدث عند تردد 10 GHz دوران يصل إلى 1° ويتزايد عند ترددات أدنى. وتدور مستويات الاستقطاب، كما ترى من المحطة الأرضية، في الاتجاه نفسه على الوصلات الصاعدة والوصلات الهابطة. ومن ثم لا يمكن التعويض عن دوران فاراداي من خلال دوران نظام تغذية الهوائي عندما يستعمل الهوائي نفسه للإرسال والاستقبال.

1.4 حساب الإحصاءات طويلة الأجل للاستقطاب المتقاطع المستحث بالماء الجوي

لحساب الإحصاءات طويلة الأجل لإزالة الاستقطاب استناداً إلى إحصاءات التوهين بالمطر يجب أن تتوفر المعلمات التالية:

A_p: التوهين بسبب المطر (dB) الذي يتم تجاوزه أثناء النسبة المئوية المطلوبة من الزمن، p، في المسير المعني، والذي يسمى عادة التوهين متحد الاستقطاب (CPA)

τ: زاوية الميل التدريجي لمتجه المجال الكهربائي المستقطب خطياً بالنسبة إلى المستوي الأفقي (للاستقطاب الدائري يستعمل $\tau = 45°$)

f: التردد (GHz)

θ: زاوية ارتفاع المسير (درجات).

والطريقة الموضحة أدناه لحساب إحصاءات قيم تمييز الاستقطاب المتقاطع (XPD) استناداً إلى إحصاءات التوهين بالمطر في المسير نفسه صالحة لكل من $6 \le f \le 55$ GHz و$\theta \le 60°$. ويرد في الفقرة 3.4 إجراء التدريج بحسب الترددات نزولاً حتى 4 GHz (انظر أيضاً الخطوة 8 أدناه).

الخطوة 1: حد الاعتماد على:

$$C_f = \begin{cases} 60 \log f - 28.3 & 6 \le f < 9 \text{ GHz} \\ 26 \log f + 4.1 & 9 \le f < 36 \text{ GHz} \\ 35.9 \log f - 11.3 & 36 \le f \le 55 \text{ GHz} \end{cases} \quad (71)$$

الخطوة 2: حد الاعتماد على التوهين بالمطر:

$$C_A = V(f) \log A_p \quad (72)$$

حيث:

$$V(f) = \begin{cases} 30.8 f^{-0.21} & 6 \le f < 9 \text{ GHz} \\ 12.8 f^{0.19} & 9 \le f < 20 \text{ GHz} \\ 22.6 & 20 \le f < 40 \text{ GHz} \\ 13.0 f^{0.15} & 40 \le f \le 55 \text{ GHz} \end{cases}$$

الخطوة 3: يحسب عامل تحسين الاستقطاب:

$$C_\tau = -10 \log [1 - 0.484 (1 + \cos 4\tau)] \quad (73)$$

ويكون عامل التحسين $C_\tau = 0$ عندما تكون $\tau = 45°$، ويصل إلى قيمة قصوى قدرها 15 dB عندما تكون $\tau = 0$ أو 90°.

الخطوة 4: يحسب حد الاعتماد على زاوية الارتفاع:

$$C_\theta = -40 \log (\cos \theta) \qquad \text{for } \theta \le 60° \quad (74)$$

الخطوة 5: يحسب حد الاعتماد على زاوية الميلان:

$$C_\sigma = 0.0053\ \sigma^2 \tag{75}$$

σ الانحراف النمطي الفعال لتوزيع زاوية ميلان قطرات المطر معبراً عنه بالدرجات؛ ويأخذ الانحراف σ قيم 0° و5° و10° و15° مقابل 1% و0,1% و0,01% و0,001% من الزمن، على التوالي.

الخطوة 6: يحسب التمييز XPD بسبب المطر الذي لا يتم تجاوزه أثناء نسبة p% من الزمن:

$$XPD_{rain} = C_f - C_A + C_\tau + C_\theta + C_\sigma \quad \text{dB} \tag{76}$$

الخطوة 7: تحسب علاقة البلورات الثلجية:

$$C_{ice} = XPD_{rain} \times (0.3 + 0.1 \log p)/2 \quad \text{dB} \tag{77}$$

الخطوة 8: يحسب التمييز XPD الذي لا يتم تجاوزه أثناء نسبة p% من الزمن، بما في ذلك تأثيرات الجليد:

$$XPD_p = XPD_{rain} - C_{ice} \quad \text{dB} \tag{78}$$

في طريقة التنبؤ هذه وفي نطاق الترددات 4 إلى 6 GHz حيث يكون التوهين في المسير منخفضاً، لا تكون إحصاءات A_p مفيدة جداً من أجل التنبؤ بإحصاءات XPD. ويمكن، بالنسبة للترددات الأدنى من 6 GHz، استعمال صيغة التدريج بحسب التردد الواردة في الفقرة 3.4 لتدريج إحصاءات الاستقطاب المتقاطع، المحسوبة للتردد 6 GHz، من أجل الترددات الأقل المحصورة بين 4 و6 GHz.

2.4 الإحصاءات المشتركة للتمييز XPD والتوهين

يمكن نمذجة توزيع الاحتمال المشروط للتمييز XPD لقيمة معينة للتوهين A_p بافتراض أن نسبة التوتر متقاطع الاستقطاب إلى التوتر متحد الاستقطاب، $r = 10^{-XPD/20}$، موزعة عادياً. وتكون معلمتا التوزيع: القيمة المتوسطة r_m القريبة جداً من $10^{-XPD_{rain}/20}$، على أساس XPD_{rain}، في المعادلة (76)، والانحراف النمطي σ_r الذي يتخذ قيمة شبه ثابتة قدرها 0,038 عندما يكون التوهين $3\ \text{dB} \le A_p \le 8\ \text{dB}$.

3.4 التدريج طويل الأجل للتردد والاستقطاب في إحصاءات الاستقطاب المتقاطع المستحث بالماء الجوي

يمكن تدريج إحصاءات التمييز XPD طويلة الأجل المسجلة عند تردد معين وزاوية معينة لميلان مستوي الاستقطاب لتكون صالحة في تردد آخر وزاوية ميلان أخرى باستعمال المعادلة شبه التجريبية التالية:

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log \left[\frac{f_2 \sqrt{1 - 0.484\,(1 + \cos 4\,\tau_2)}}{f_1 \sqrt{1 - 0.484\,(1 + \cos 4\,\tau_1)}} \right] \quad \text{for } 4 \le f_1, f_2 \le 30\ \text{GHz} \tag{79}$$

حيث XPD_1 وXPD_2 قيمتان لا يتم تجاوزهما أثناء النسبة المئوية نفسها من الزمن عند الترددين f_1 وf_2 وزاويتي ميلان مستوي الاستقطاب τ_1 وτ_2، على التوالي.

وتستند المعادلة (79) إلى الصياغة النظرية نفسها المستخدمة في طريقة التنبؤ المبينة في الفقرة 1.4، ويمكن أن تستعمل في تدريج بيانات XPD التي تشمل تأثيرات إزالة الاستقطاب بسبب المطر والجليد على حد سواء، إذ لوحظ أن لكلتا الظاهرتين نفس العلاقة تقريباً بالتردد عند ترددات أدنى من 30 GHz تقريباً.

4.4 البيانات المتعلقة بإلغاء الاستقطاب المتقاطع

أثبتت بعض التجارب أن ثمة ترابطاً وثيقاً بين إزالة الاستقطاب بسبب المطر عند 6 و4 GHz في مسيرات أرض–فضاء، سواء على المدى الطويل أم على أساس حدث منفرد، ويبدو من الممكن تعويض إزالة الاستقطاب في الوصلة الصاعدة باستعمال قياسات

إزالة الاستقطاب المقابل في الوصلة الهابطة. ولم تظهر إلا تأثيرات الطور التفاضلي، حتى عند هطول الأمطار الكثيفة، ويبدو أن تعويضاً بمعلمة واحدة (أي في الطور التفاضلي) يكفي عند الترددين 6 و4 GHz.

وأظهرت أيضاً قياسات مأخوذة عند 6 و4 GHz أن 99% من تغيرات التمييز XPD أبطأ من ±4 dB/s أو، على السواء، أقل من ±1,5 درجة/ثانية بالنسبة إلى متوسط زحزحة الطور التفاضلي في المسير. ومن ثم يكفي أن يكون ثابت الزمن لنظام تعويض إزالة الاستقطاب عند هذين الترددين مجرد ثانية واحدة تقريباً.

5 تأخر الانتشار

تبين التوصية ITU-R P.834 طرائق مبنية على بيانات علم الأرصاد الجوية الراديوي لتقدير متوسط تأخر الانتشار أو خطأ المسافة، والتغيرات المقابلة، في المسيرات أرض–فضاء عبر التروبوسفير. ويجب أن يعرف تغير التأخر من أجل قياس مسافة الساتل وتحقيق تزامن الإشارات لأنظمة الاتصالات الساتلية الرقمية. ويكون التأخر الأيونوسفيري، عند ترددات أعلى من 10 GHz (انظر التوصية ITU-R P.531)، أصغر عموماً من التأخر في التروبوسفير، ولكن قد يتعين مراعاته في حالات خاصة.

ويتطلب تحديد المسافات بدقة تصل إلى السنتيمتر الواحد أن تدرس بعناية المساهمات المختلفة لخطأ المسافات الزائد. فيصل الخطأ بسبب مكوَّنة بخار الماء إلى 10 cm في مسير سمتي وفي جو مرجعي يكون فيه تركيز بخار الماء على السطح بقيمة 7,5 g/m^3 وارتفاع المقياس بقيمة 2 km (انظر التوصية ITU-R P.676). وتشكل هذه المساهمة أهم مصدر لعدم اليقين، على الرغم من أن الجو الجاف يضيف مسافة 2,3 m إلى الخطأ الزائد في المسير السمتي.

أما بالنسبة إلى التطبيقات الحالية للاتصالات الساتلية فإن مساهمة الهواطل في تأخر إضافي للانتشار صغيرة بحيث يمكن إهمالها.

6 تحديدات عرض النطاق

يؤدي التشتت الشاذ بجوار خطوط امتصاص الغازات الجوية إلى تغييرات طفيفة في دليل الانكسار. غير أن هذه التغييرات في دليل الانكسار تبقى صغيرة في النطاقات الموزعة على الاتصالات أرض–فضاء ولا تقيد عرض نطاق الأنظمة.

ويمكن أن يحد تعدد الانتثار في المطر من عرض نطاق أنظمة الإرسال غير المتماسكة بسبب تغير التأخر للإشارات المتأثرة بانتثار متعدد؛ غير أن التوهين نفسه يشكل في هذه الظروف مشكلة أخطر بكثير. وقد أثبتت دراسة مشكلة تحديدات عرض النطاق التي تفرضها علاقة التوهين وزحزحة الطور بسبب المطر بالتردد في أنظمة الإرسال المتماسكة أن هذه التحديدات لعرض النطاق تزيد عن 3,5 GHz في جميع الحالات التي يمكن أن تحدث. وهي أكبر من أي عرض نطاق موزع للاتصالات أرض–فضاء أقل من 40 GHz، ومن ثم يكون التوهين بالمطر ذا تأثير أكبر بكثير من علاقتها بالتردد.

7 زاوية الوصول

تناقش التوصية ITU-R P.834 الأخطاء في زاوية الارتفاع بسبب الانكسار. ويصل الانكسار الزاوي الكلي (الزيادة في الارتفاع الظاهري) إلى 0,65° و0,35° و0,25° تقريباً في زوايا الارتفاع البالغة 1° و3° و5°، على التوالي، وفي جو بحري مداري. أما في المناخ القطبي القاري، فتكون القيم المقابلة 0,44° و0,25° و0,17°. وفي المناخات الأخرى تكون القيم بين هذين المجالين. ويكون ترتيب مقدار التغير في الارتفاع الظاهري من يوم إلى آخر في حدود 0,1° (r.m.s.) عند ارتفاع 1°، لكن التغير يتناقص بسرعة بتزايد زاوية الارتفاع.

وتناقش التوصية ITU-R P.834 تراوحات زاوية الوصول قصيرة الأجل. ويمكن أن تكون التغيرات قصيرة الأجل الناجمة عن تغييرات في علاقة الانكسارية بدلالة الارتفاع، من رتبة 0,02° (r.m.s.) عند ارتفاع 1° وتتناقص أيضاً بسرعة مع تزايد زاوية الارتفاع. ومن الصعب عملياً التمييز بين تأثير التغيرات قصيرة الأجل في توزيع الانكسارية بدلالة الارتفاع وتأثير عدم الانتظام العشوائي الذي يضاف إلى هذا التوزيع. ويبين التحليل الإحصائي لتراوحات زاوية الوصول قصيرة الأجل عند 19,5 GHz وعند زاوية ارتفاع

قدرها 48°، أن الانحرافات النمطية لتراوحات زاوية الوصول، في اتجاهي الارتفاع والسمت على حد سواء، تبلغ نحو 0,002° أثناء النسبة المئوية التراكمية من الزمن بقيمة 1%. ويشير التغير الموسمي لتراوحات زاوية الوصول إلى زيادة التراوحات في الصيف وتناقصها في الشتاء. أما التغيرات النهارية، فتوحي بأن التراوحات تزداد في أثناء النهار وتتناقص في الصباح الباكر وفي المساء على حد سواء.

8 حساب الإحصاءات طويلة الأجل للمسيرات غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض (non-GSO)

طرائق التنبؤ الموصوفة أعلاه مستخرجة من أجل تطبيقات تبقي فيها زاوية الارتفاع ثابتة. أما في أنظمة غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض (non-GSO)، حيث تتغير زاوية الارتفاع، فيمكن حساب مدى تيسر الوصلة لساتل وحيد باتباع الطريقة التالية:

أ) تحسب زاويتا الارتفاع الدنيا والقصوى اللتين من المتوقع أن يعمل النظام بينهما؛

ب) يقسم المدى التشغيلي للزوايا إلى زيادات صغيرة (بمقدار 5 درجات مثلاً)؛

ج) تحسب النسبة المئوية من الزمن التي يكون فيها الساتل مرئياً كدالة لزاوية الارتفاع في كل زيادة؛

د) تحدد النسبة المئوية من الزمن، بالنسبة إلى سوية معينة لانحطاط الانتشار، حيث يتم تجاوز السوية مقابل كل زيادة في زاوية الارتفاع؛

هـ) تضرب نتائج ج) ود) مقابل كل زيادة في زاوية الارتفاع ثم تقسم على 100، للحصول على النسبة المئوية من الزمن التي يتم أثناءها تجاوز سوية الانحطاط عند زاوية الارتفاع هذه؛

و) تجمع قيم النسبة المئوية من الزمن المحسوبة في هـ) للحصول على النسبة المئوية الكلية من الزمن في النظام التي يتم أثناءها تجاوز سوية الانحطاط.

وفي حالة كوكبات السواتل متعددة الرؤية التي تستخدم تنوع مسير الساتل (أي التحول إلى أقل المسيرات انحطاطاً)، يمكن إجراء حساب تقريبي بافتراض استخدام أعلى زاوية ارتفاع في أي مركبة فضائية.