

التوصية ITU-R P.619-6

(2025/09)

السلسلة P: انتشار الموجات الراديوية

بيانات الانتشار المطلوبة لتقدير التداخل بين محطات
في الفضاء ومحطات على سطح الأرض



تمهيد

يضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد مدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها.

ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياسية 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 تقدير الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوكيد القياسي واللجنة الكهربائية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في القرار 1. وترت الاستثمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلال توقيف قطاع الاتصالات الراديوية

(<https://www.itu.int/publ/R-REC/ar>)

العنوان

السلسلة

البث الساتلي

BO

التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية

BR

الخدمة الإذاعية (الصوتية)

BS

الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)

BT

الخدمة الثابتة

F

الخدمة المتنقلة وخدمة التحديد الراديوى للموقع وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة

M

انتشار الموجات الراديوية

P

علم الفلك الراديوى

RA

أنظمة الاستشعار عن بعد

RS

الخدمة الثابتة الساتلية

S

التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية

SA

تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة

SF

إدارة الطيف

SM

التجميع الساتلي للأخبار

SNG

إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت

TF

المفردات والمواقع ذات الصلة

V

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

التوصية 6-ITU-R P.619

بيانات الانتشار المطلوبة لتقدير التداخل بين محطات في الفضاء ومحطات على سطح الأرض

(المسألة 205/3)

(2025-2021-2019-2017/12-2017/06-1992-1986)

مجال التطبيق

تقدم هذه التوصية أساليب للتنبؤ بخسائر الانتشار في الإشارات المسبيبة للتداخل بين محطات في الفضاء ومحطات على (أو قرب) سطح الأرض ضمن مدى تردد إجمالي يتراوح بين 100 MHz و 100 GHz، باستثناءات قليلة تقتصر على ترددات أدنى سيتم تحديدها حيالاً يرد وصفها. وتعتبر أساليب التنبؤ بعض آليات الخسارة موثقة عبر نطاقات تردد أضيق، علمًا بأن بعض آليات الخسارة ليست مهمة في نطاقات تردد معينة. وتقدم هذه الوثيقة أساليب للتنبؤ بخسائر الانتشار التي لا يتم تجاوزها خلال نسبة تتراوح بين 0,001 و 50 في المائة من الوقت. ويتوفر إرشاد بشأن خسائر الانتشار الوحيدة المصدر والمتعلقة المصادر في التحليلات التي تحدد الإشارات المسبيبة للتداخل، حيث إن الارتباط بين التغير الزمني والتغير المكاني قد تكون مؤثرة.

مصطلحات أساسية

تدخل، إزالة الاستقطاب، تمديد الحزمة، التلاؤ، انزعاج، انتشار موجه

توصيات قطاع الاتصالات الراديوية ذات الصلة

التوصية 6-ITU-R P.452 - إجراء التنبؤ لتقدير التداخل بين المحطات على سطح الأرض عند ترددات تفوق 100 MHz تقريبًا

التوصية 6-ITU-R P.453 - دليل الانكسار الراديو: صيغه وبياناته الانكسارية

التوصية 6-ITU-R P.526 - الانتشار بالانزعاج

التوصية 6-ITU-R P.531 - بيانات الانتشار الأيونوسفيري وطائق التنبؤ المطلوبة من أجل تصميم الشبكات والأنظمة الساتلية

التوصية 6-ITU-R P.618 - بيانات الانتشار وطائق التنبؤ المطلوبة من أجل تصميم أنظمة الاتصالات أرض-فضاء

التوصية 6-ITU-R P.676 - التوهين الناجم عن الغازات الجوية والتأثيرات ذات الصلة

التوصية 6-ITU-R P.834 - آثار الانكسار التروبوسفيري على انتشار الموجات الراديوية

التوصية 6-ITU-R P.836 - بخار الماء: الكثافة عند سطح الأرض والمتوى الإجمالي لعمود هوائي

التوصية 6-ITU-R P.838 - نموذج التوهين الخاص الناتج عن المطر المعد للاستعمال في طائق التنبؤ

التوصية 6-ITU-R P.1815 - التوهين التفاضلي بالملظر

التوصية 6-ITU-R P.2040 - آثار مواد البناء وهياكل المباني على انتشار الموجات الراديوية فوق 100 MHz تقريبًا

التوصية 6-ITU-R P.2108 - التنبؤ بالخسارة الناجمة عن الجلبة

التوصية 6-ITU-R P.2109 - التنبؤ بالخسارة الناجمة عن الدخول إلى المبني

ملاحظة - ينبغي في كل حالة استخدام أحدث طبعة من التوصية السارية.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

- أ) أنه، لتقدير التداخل بين المحطات القائمة في الفضاء وتلك المقاومة على سطح الأرض، من الضروري توفير بيانات انتشار وأساليب تنبؤ تأخذ في الاعتبار العوامل الجوية، وفي بعض الحالات التضاريس واختراق المباني وتعدد المسارات والجلبة؛
- ب) أن الإرشاد مطلوب لاختيار الأساليب المناسبة نظراً لكثره التطبيقات الممكنة لهذا التقييم؛
- ج) أن بعض تحليلات التداخل المحتمل أو الفعلي قد تحتاج إلى تحديد الإشارة الكلية المتراكمة المسئولة للتداخل والصادرة عن العديد من المرسلات،

وإذ تلاحظ

- أ) أن النوصية ITU-R P.452 تتضمن طريقة تنبؤ لتقدير التداخل بين المحطات على سطح الأرض عند ترددات من 0,1 GHz إلى 50 GHz تقريباً؛
- ب) أن النوصية ITU-R P.453 تقدم معادلات تتعلق بكثافة بخار الماء والرطوبة النسبية؛
- ج) أن النوصية ITU-R P.526 توفر طائق لحساب الانتعاج عبر العوائق؛
- د) أن النوصية ITU-R P.531 توفر بيانات الانتشار وطرائق التنبؤ بأثار الانتشار الأيونوسفيري على مسارات أرض-فضاء؛
- ه) أن النوصية ITU-R P.618 توفر إرشادات لخطيط وصلات الاتصالات أرض-فضاء؛
- و) أن النوصية ITU-R P.676 توفر طائق لحساب التوهين الناجم عن الغازات الجوية؛
- ز) أن النوصية ITU-R P.834 تقدم معلومات وطرائق لحساب آثار الانكسار التربووسفيري؛
- ح) أن النوصية ITU-R P.836 تقدم معلومات وطرائق لحساب محتوى بخار الماء في الجو بما في ذلك تغيره الزمني؛
- ط) أن النوصية ITU-R P.838 توفر طائق لحساب التوهين النوعي الناجم عن المطر بين 1 GHz و 1 000 GHz؛
- ي) أن النوصية ITU-R P.1815 توفر طائق للتنبؤ بالإحصاءات المشتركة للخبو الناجم عن المطر بالنسبة للمسارين الواقعين بين مخطتين أرضيتين؛
- ك) أن النوصية ITU-R P.2108 توفر طائق لتقدير الخسارة الناجمة عن الجلبة عند الترددات بين 30 MHz و 100 GHz؛
- ل) أن النوصية ITU-R P.2109 تقدم نموذجاً إحصائياً للخسارة الناجمة عن دخول المباني للترددات بين 80 MHz و 100 GHz تقريباً،
- م) أن النوصية ITU-R P.2040 تقدم معلومات بشأن تفاعل الموجات الراديوية مع المباني،

توصي

باستعمال الإرشادات الواردة في الملحق 1 لتقدير التداخل بين المحطات القائمة في الفضاء وتلك المقاومة على سطح الأرض.

الملاحق 1

مقدمة

1

تقدم هذه النوصية إرشادات وطائق حساب لنقسيم التداخل بين محطة في الفضاء ومحطة على سطح الأرض. والمقصود بعبارة "على سطح الأرض" أن تشمل الهوائيات الموجودة داخل الغلاف الجوي والتي لا تكون على ارتفاع كبير فوق سطح الأرض، بما في ذلك تلك المنصوبة على الأبراج الراديوية أو المباني أو المركبات الأرضية أو المحمولة باليد. وقد تكون هذه المحطات المقاومة على الأرض جزءاً من نظام راديوي ساتلي أو للأرض. وللإيجاز، يشار إليها أحياناً باسم "المخطة الأرضية".

وتشير عبارة مسار "أرض-فضاء" إلى مسار للطاقة الراديوية بين هوائيات إما بالاتجاه أرض-فضاء أو بالاتجاه فضاء-أرض. وما لم يذكر خلاف ذلك، تعتبر جميع آليات الانتشار متبادلة بالنسبة للاتجاه.

1.1 التغير الزمني والتغير المكاني

يتغير العديد من خسائر الانتشار مع الوقت، ومع موقع المحطات الأرضية، وبالأخص تلك التي تقع على سطح الأرض. ويتسم العديد من تحليلات التداخل بطابع "إحصائي" وتحتاج إلىأخذ التغيرات الزمنية والمكانية المحتملة في الاعتبار. وإذا دعت الحاجة إلى دالة توزيع تراكمي كامل لخسارة الإرسال الأساسية، ينبغي استخدام النوصيةITU-R P.618 للخسائر التي يتم تجاوزها نسب مئوية زمنية تقل عن 50 في المائة. ويمكن معالجة حالات التوهين والتحسين في قدرة الإشارة، التي تسببها فرادى آليات الانتشار على مسار فردي للإشارة، باعتبارها متغيرات مستقلة في الكثير من الحالات. وبالمثل، ففي التحليلات التي تمثل فيها نسبة الإشارة الحاملة إلى الضوضاء والتداخل عامل جدرا، يمكن معالجة قدرة الإشارة المسبيبة للتداخل وقدرة الإشارة المرغوبة وأثار إزالة الاستقطاب باعتبارها متغيرات مستقلة ما عدا الحالة التي يكون فيها مسارا الإشارة المرغوبة والإشارة المسبيبة للتداخل قريباً أحدهما من الآخر أو متداخلين وبالتالي يوجد بينهما درجة عالية من الارتباط.

وفي سيناريوهات معينة، قد يكون هناك درجة من الارتباط بين خسائر الانتشار على مسارات الإشارات المسبيبة للتداخل والتي يمكن أخذها في الحسبان باختيار الطائق المناسب.

2.1 زاوية الارتفاع الظاهرة وزاوية الارتفاع في الفضاء الحر

تكون زاوية ارتفاع الشعاع الممتد من محطة أرضية إلى محطة في الفضاء أعلى مما قد تكون عليه في غياب أي جو بسبب انكسارية الغلاف الجوي. وينبغي أن يؤخذ هذا المفعول في الاعتبار، ولا سيما عند زوايا الارتفاع المنخفضة.

يطلق على زاوية الارتفاع التي توجد في غياب أي فضاء جوي اسم زاوية الارتفاع في "الفضاء الحر"، ويرمز إليها بالحرف θ_0 . ويشار إلى الزاوية الفعلية للمسار الراديوي عند المخطة الأرضية، وتشمل تأثير الانكسارية الجوية، باسم زاوية الارتفاع "الظاهرة"، ويرمز إليها بالحرف θ .

وترد في المرفق B طائق التحويل بين زوايا الارتفاع في الفضاء الحر وزوايا الارتفاع الظاهرة.

3.1 آليات الانتشار ذات الصلة

تحدد الآليات الرئيسية لخسائر الانتشار الأساسية على مسارات الإشارات المسبيبة للتداخل أثناء الأحوال الجوية الصافية وقد تشمل في بعض الحالات التلاوُّث التربوبوسفيري والأيونوسفيري، وتعدد المسارات، والآليات المصاحبة لوجود عوائق على مسارات الإشارات (خسارة الجلبة، وخسارة الانتعاج على تصارييس أرضية، وخسارة اختراق المباني). ويقدم القسم 2 وصفاً لهذه الآليات ويقدم طائق الحساب. ويرد في الأقسام الفرعية 1.2 إلى 8.2 وصف مفصل لهذه الآليات.

وقد يتعين في بعض عمليات تقييم التداخل أن تؤخذ آثار المهاطل في الاعتبار. وتقدم الفقرتان الفرعيتان 9.2 و 10.2 معلومات وطائق لحساب التداخل الناجم عن الانتشار بالمطر والتوهين التفاضلي الناجم عن المطر، على التوالي.

وبعطي القسم 1.3 المعادلة المتعلقة بخسارة الإرسال الأساسية في حالة مسار محدد وحيد. وبعطي القسم 2.3 المعادلة المتعلقة بخسارة الإرسال الأساسية في حالة مصادر متعددة داخل مستقبل واحد.

وينظر أدناه في هذه الآليات، وهي تطبق من أجل تحديد خسائر الانتشار التي لا يتم تجاوزها لنسبي مغوية من الوقت تبلغ 50 في المائة أو أقل والتي تتسم بأهمية خاصة في عمليات تحليل التداخل.

ويبحث القسم 4 في الارتباط بين آليات الانتشار.

2 آليات الانتشار وطائق الحساب

تلخص الأقسام الفرعية التالية الآليات التي تحدد مجتمعة التوهين بين هوائي المرسل (المسبب للتداخل) وهوائي المستقبل (المعرض للتداخل)، مع الرموز المصاحبة لها المستعملة في المعادلات. ويعبر عن هذه الخسارة الإجمالية بخسارة الإرسال الأساسية، وهي الخسارة التي تحدث بين هوائيين مثاليين متناحرين.

1.2 خسارة الإرسال الأساسية في الفضاء الحر (L_{bfs} dB)

وهي خسارة الإرسال الأساسية بافتراض وجود المسار الراديوي الكامل داخل فراغ خالٍ من العائق. وهي تعتمد فقط على طول المسار d (km)، والتعدد f (GHz)، وفقاً للمعادلة:

$$(1) \quad L_{bfs} = 92,45 + 20 \log(f \cdot d) \quad (\text{dB})$$

ويقدم المرفق A طريقة لحساب طول المسار أرض-فضاء، وزاوية الارتفاع في الفضاء الحر عند المحطة الأرضية. وتستند هذه الطريقة إلى هندسة كروية للأرض وتجاهل تأثير الانكسار الجوي. وتعتبر الأخطاء المصاحبة لها طفيفة بالنسبة لحساب خسارة الإرسال في الفضاء الحر انتلافاً من طول المسار. ويجب أن تدرج دائماً قيمة L_{bfs} في حساب الخسارة عبر مسار أرض-فضاء. وهي تصلح لأي تردد وعبر أي مسار أرض-فضاء.

ويقدم المرفق B طرائق التحويل بين زاوية الارتفاع في الفضاء الحر وزاوية الارتفاع الظاهرة عند المحطة الأرضية. ولا تأخذ الطريقة الواردة في المرفق A في الاعتبار أي عائق بسبب الأرض أو الأجسام الواقعة فوقها كالمباني. وترتدي المرفق E طريقة لاختبار العائق على مسار أرض-فضاء. ويرد في الفقرة 6.2 بحث خسارة الانتعاج الناجمة عن العائق.

2.2 التوهين الناجم إزالة الاستقطاب (A_{xp} dB)

هناك آليتان للانتشار يمكن أن تحدثا تغييرات في زاوية استقطاب إشارة راديوية:

‘1’ دوران فارادي؛

‘2’ الانتشار في الماء الجوي.

وعكن أيضاً أن يعزى عدم تواءم الاستقطاب إلى عدم مواءمة دوران الهوائي بسبب آثار الانتشار. ولا يؤخذ هذا الأمر في الاعتبار في هذه النوصية لأنه يتضمن النظر في اعتبارات تتعلق بالأنظمة وليس بالانتشار.

وعكن أن تنشأ آثار إزالة الاستقطاب إما بسبب دوران فارادي أو نتيجة الانتشار بالهواطل. ولا يكون التأثير الناجم عن دوران فارادي كبيراً إلا عند الترددات التي تقل عن 10 GHz ويمكن إهماله عند الترددات التي تساوي 10 GHz أو أعلى منها. وقد يكون للخسارة الناجمة إزالة الاستقطاب أهمية في الحد من التداخل. وبالنسبة لمعظم حالات التداخل المتعددة المصادر أرض-فضاء التي يمكن أن

تعتبر فيها التوجيهات النسبية للاستقطاب النسبيّة عشوائية، تفترض المعادلة $A_{xp} = 3 \text{ dB}$ أن متجه الاستقطاب في المرسل والمستقبل يقعان في نفس المستوى مع توزيع منتظم للزوايا النسبية. ومن الناحية العملية تكون متجهات الاستقطاب موجّهة عشوائياً في حيز ثلاثي الأبعاد بحيث تجمع مؤدية إلى خسارة تراكمية أعلى. ولذلك يستبعد أن تسفر المعادلة $A_{xp} = 3 \text{ dB}$ عن تقدير زائد عن الحد للخسارة.

ويعتمد تمييز الاستقطاب الناجم عن مصدر للتداخل مقام في الفضاء تستقبله محطة أرضية (والعكس بالعكس) على صفاء استقطاب الموجة المرسلة، وكذلك على عزل الاستقطاب المتلقى لهوائي الاستقبال. ويمكن حساب الخسارة الناجمة عن إزالة الاستقطاب مباشرة بدلالة معلمات تصف أنواع الاستقطاب الخاصة بالهوائي المُسْبَب للتداخل وهوائي الاستقبال وصفاء الاستقطاب مثل النسبة المحورية في حالة الاستقطاب الخطمي. بالإضافة إلى ذلك، يعمل اتجاه الاستقطاب وزاوية الميل في الموجة الواردة وهوائي الاستقبال على زيادة تحفيض الخسارة الصافية الناجمة عن إزالة الاستقطاب حين تؤخذ معلمات النظام المُسْبَب للتداخل والنظام المعروض للتداخل في الاعتبار.

1.2.2 التمييز بالاستقطاب المتقطع والتوهين المتقطع الاستقطاب

يمكن أن يحدث عدم توافق الاستقطاب لعدة أسباب، ويتم تحديد قيمته أحياناً بدلالة التمييز بتقطاع الاستقطاب (XDP) الذي يعرف بأنه النسبة بين شدة الإشارة متعددة الاستقطاب وشدة الإشارة متقطعة الاستقطاب، ويعتبر عنها عادة بوحدات دسيبل. وتعتبر هذه النسبة عامل جدارة ينقد فيه تقاسم التردد بواسطة استقطاب خطّي متعامد.

ويؤدي أي انحطاط في التمييز بتقطاع الاستقطاب إلى تحويل جزء من القدرة إلى الاستقطاب المتعامد، ما قد يشكل مصدراً للتداخل. ويقابل ذلك توهين تعرض له الإشارة الأصلية.

ويعطى التوهين متقطع الاستقطاب والتوهين متعدد الاستقطاب بالمعادلتين التاليتين:

$$(2) \quad A_x = 10 \log(1 + 10^{-0,1R_{xpd}}) \quad (\text{dB})$$

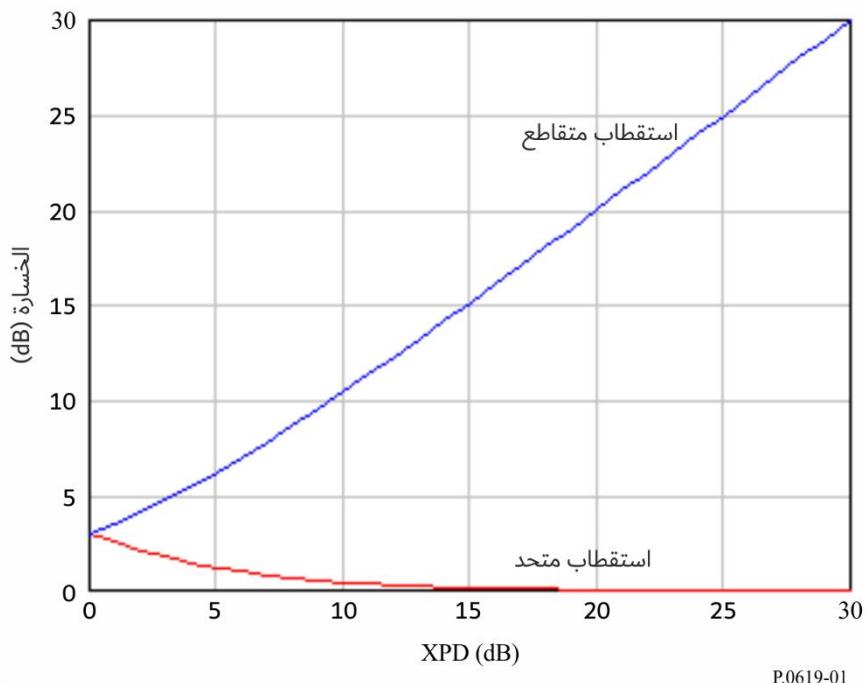
$$(2\text{b}) \quad A_c = 10 \log(1 + 10^{0,1R_{xpd}}) \quad (\text{dB})$$

حيث R_{xpd} هو التمييز بتقطاع الاستقطاب بوحدات dB.

ويبين الشكل 1 الرسم البياني التوهين متعدد الاستقطاب والتوهين متقطع الاستقطاب مقابل التمييز بتقطاع الاستقطاب.

الشكل 1

التوهين متعدد الاستقطاب والتوهين متقطع الاستقطاب مقابل التمييز بقطاع الاستقطاب



تستخدم عادة الأنظمة الراديوية المحمولة في الفضاء إشارات ذات استقطاب محدد تبعاً للوظائف المنوطة بها. فعلى سبيل المثال، تستخدم أنظمة التتبع وأنظمة مراقبة الحركة الجوية وأنظمة الاتصالات إشارات مستقطبة عمودياً من أجل تقليل التداخل الناجم عن الانعكاس على سطح الأرض.

وتستخدم أنظمة الاستشعار عن بعد المقاومة على سطح الأرض، الاستقطاب الأفقي لضمان أقصى حد من الاقتران بين الإشارات المرسلة وسطح الأرض. كما تستخدم هذه الأنظمة مختلف أنواع الاستقطاب للحصول على معلومات تفصيلية مساعدة. وتستخدم أنظمة النظام العالمي للملاحة الساتلية (GNSS) إشارات مستقطبة دائرياً لتفادي الآثار الناجمة عن دوران فارادي وتحفيض القيد على اتجاه الاستقطاب في هوائيات الاستقبال. وبناء على ذلك، من المهم تقدير قيم الإشارات الراديوية التي تميز باستقطاب محدد ومسار انتشار محدد. إذ إن أي تخفيض في هذه القيم يمكن اعتباره خسارة.

2.2.2 دوران فارادي

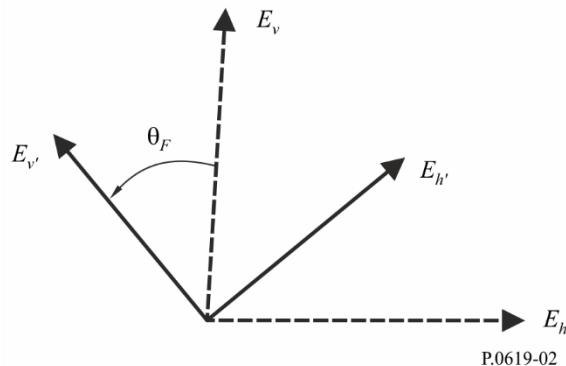
يدور المجال المستقطب خطياً عبر الأيونوسفير مشكلاً مع اتجاهه الأصلي زاوية تدعى دوران فارادي θ_F . ومعنى ذلك أنه يمكن تقسيم المجال إلى مكونتين:

- ‘1’ مكونة موجهة بحسب اتجاه الاستقطاب الأولي وتناسب قيمتها مع $\cos \theta_F$.
- ‘2’ مكونة أخرى متعامدة مع الاتجاه الأولي وتناسب قيمتها مع $\sin \theta_F$.

ويبيّن الشكل 2 متجهَي (\vec{E}_v, \vec{E}_h) مجال الإرسال المتعامدين والمستقطبين خطياً اللذين يخضعان لدوران فارادي لتوليد متجهَي استقبال متعامدين (\vec{E}'_v, \vec{E}'_h) .

الشكل 2

دوران فارادي في المستوى العمودي على اتجاه الانتشار



P.0619-02

ويعطى التوهين المتقطع الاستقطاب A_{xF} والتهين المتعدد الاستقطاب A_{cF} ، على التوالي، بالمعادلتين التاليتين:

$$(3) \quad A_{xF} = -20\log[\cos(\theta_F)] \quad (\text{dB})$$

$$(3\text{b}) \quad A_{cF} = -20\log[\sin(\theta_F)] \quad (\text{dB})$$

حيث تعطى زاوية دوران θ_F فارادي بالمعادلة.

$$(4) \quad \theta_F = 2,36 \times 10^{-14} \frac{B_{av} N_T}{f^2} \quad (\text{rad})$$

حيث:

(GHz) التردد f

N_T : كثافة الإلكترونات الإجمالية (electrons m^{-2})

B_{av} : المجال المغنتيسي للأرض (Tesla)

ويلاحظ أن $A_{xF} \rightarrow \infty$ as $\theta_F \rightarrow (2n + 1)\pi/2$ for $n = 0, 1, 2, \dots$

وأن $A_{cF} \rightarrow \infty$ as $\theta_F \rightarrow 2n\pi$ for $n = 0, 1, 2, \dots$

وترد في الشكل 1 من التوصية ITU-R P.531-13 القيم النموذجية لزاوية θ_F .

ويمكن استعمال معادلة المصفوفة (5) لاستعادة قيم متوجه الإرسال المستقطبين خطياً (E_v, E_h) من القيم المقابلة لمتجه الاستقبال ($E_{v'}, E_{h'}$) بعد التعرض للدوران فارادي.

$$(5) \quad \begin{bmatrix} E_v \\ E_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_F & \sin \theta_F \\ -\sin \theta_F & \cos \theta_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{v'} \\ E_{h'} \end{bmatrix}$$

3.2.2 إزالة الاستقطاب بملاء الجوي

تعتبر إزالة الاستقطاب بملاء الجوي طريقة ثانية لتغيير استقطاب الإشارات الراديوية، ومن ثم الوصول إلى خسارة إزالة الاستقطاب. وتوصف إزالة الاستقطاب بملاء الجوي عادة بواسطة نسبة التمييز بإزالة الاستقطاب (XPD) التي تساوي النسبة بين القدرة مع الاستقطاب المتوقع والقدرة مع الاستقطاب المتعامد بوحدات dB كما ورد في التوصية ITU-R P.310.

وستعمل نسبة التمييز بإزالة الاستقطاب كقياس لدرجة التداخل بين قنوات متعددة الاستقطاب وتصل إلى قيمة ∞ dB عندما تصل قدرة الاستقطاب المتعادل إلى الصفر. من ناحية أخرى، تصل قيم النسبة XPD إلى $-\infty$ dB عندما تكون قيم الاستقطاب المتوقع صفرية.

وإذا اعتربنا أن اتجاه الاستقطاب المتوقع q هو الاتجاه المرغوب للاستقطاب، يمكن كتابة معامل خسارة الانتشار A_{xq} الناجمة عن إزالة الاستقطاب بماء الجوي على النحو التالي:

$$(6) \quad A_{xq} = -20 \log \left\{ \cos \left(\tan^{-1} \left\{ 10^{\frac{-XPD_q}{20}} \right\} \right) \right\}, \quad q = v, h, c$$

حيث تمثل v و c في المعادلة أعلاه الاستقطاب الرأسي والاستقطاب الأفقي والاستقطاب الدائري على التوالي. واستناداً إلى المعادلة (6)، عندما يتراصف استقطاب الإشارة المنتشرة مع اتجاه الاستقطاب المتوقع، يكون $\infty \rightarrow XPD_q \rightarrow 0$. من ناحية أخرى، حين يكون استقطاب الإشارة المنتشرة متعادلاً مع اتجاه الاستقطاب المتوقع، يكون $-\infty \rightarrow XPD_q \rightarrow \infty$.

ويمكن الحصول على النسبة XPD_q في المعادلة (6) من الفقرة 1.4 من التوصية 12 ITU-R P.618 عن طريق وضع القيمة المناسبة لزاوية الاستقطاب τ في المعادلة (70) بالتوصية 12 ITU-R P.618. فعلى سبيل المثال، تكون $\pi/2 = \tau$ في حالة الاستقطاب الرأسي و $0 = \tau$ في حالة الاستقطاب الأفقي. ولا يشمل الإجراء الذي وضعه قطاع الاتصالات الراديوية للتبؤ بإزالة الاستقطاب والوارد في التوصية 12 ITU-R P.618 عبارة تأخذ في الاعتبار النسبة XPD الإضافية الناجمة عن إزالة الاستقطاب بجسيمات الجليد. ويحدد الإجراء الذي وضعه الاتحاد النسبي XPD الناجمة عن المطر انطلاقاً من التوهين المتعدد الاستقطاب (المقياس أو المحسوب بواسطة الإجراء الذي وضعه قطاع الاتصالات الراديوية للتبؤ بالتوهين الناجم عن المطر والوارد في التوصية 12 ITU-R P.618). ومن ثم يتم تحديد الخطاطق إضافي للنسبة XPD ناجم عن جسيمات الجليد في المسار بواسطة تقديرات تجريبية تستند إلى إحصاءات إزالة الاستقطاب بالجليد المرتبطة بإزالة الاستقطاب بالمطر الملزمة لها.

3.2 التوهين الناجم عن الغازات الجوية A_g (dB)

يُعد التوهين الناجم عن الغازات الجوية A_g (dB) دالة معقدة في التردد، تبعاً لتغير معدلات التوهين الناجم عن الأكسجين وبخار الماء مع التردد كما ورد في التوصية 676 ITU-R P.676.

ويزداد التوهين مع انخفاض زاوية ارتفاع المسار العائد إلى مسار الانتشار الأطول، وينخفض مع ارتفاع المخطة الأرضية العائد لمسار الانتشار الأقصر في الجو وانخفاض كثافته.

ويعتبر بخار الماء السبب الرئيسي للتوهين عند الكثير من الترددات. فعند هذه الترددات، وبالإضافة إلى العوامل الهندسية السابقة ذكرها، يتسم التوهين بتغير مكاني وزماني بسبب كثافة بخار الماء التي تتغير بحسب الموقع والأحوال الجوية.

وتتوفر التوصية 836 ITU-R P.836 خرائط رقمية عالمية لكتافة بخار الماء عند سطح الأرض التي يتم تجاوزها خلال نسب مئوية من الوقت من سنة متوسطة أو من شهر متوسط في موقع معين.

وتقدم التوصية 453 ITU-R P.453 معدلات تتعلق بكثافة بخار الماء والرطوبة النسبية. وتكون أعلى كثافة ممكنة لبخار الماء في أي وقت وفي أي مكان محدودة بالقيمة المقابلة لنسبة 100 في المائة من الرطوبة النسبية. وبعض القيم المرتفعة لكتافة بخار الماء المبينة في خرائط البيانات الواردة في التوصية 836 ITU-R P.836 ممكنة الحدوث فقط على درجات حرارة أعلى بكثير من القيم المتوسطة السنوية المحلية.

ويقدم المرقق C طريقة لحساب التوهين الناجم عن الغازات الجوية. وتأخذ عملية الحساب علو المخطة الأرضية وكذلك علو المخطة الفضائية في الاعتبار، ويتم توسيعها لتشمل زوايا ارتفاع منخفضة للشعاع إما بقيم موجبة أو سالبة. ومع أن زوايا الارتفاع الظاهرة السليمة للشعاع لا تؤخذ عادة في الحسبان بالنسبة لوصلة أرض-فضاء إلا أن هذا المسار قد يكون مهمًا عند تقييم التداخل.

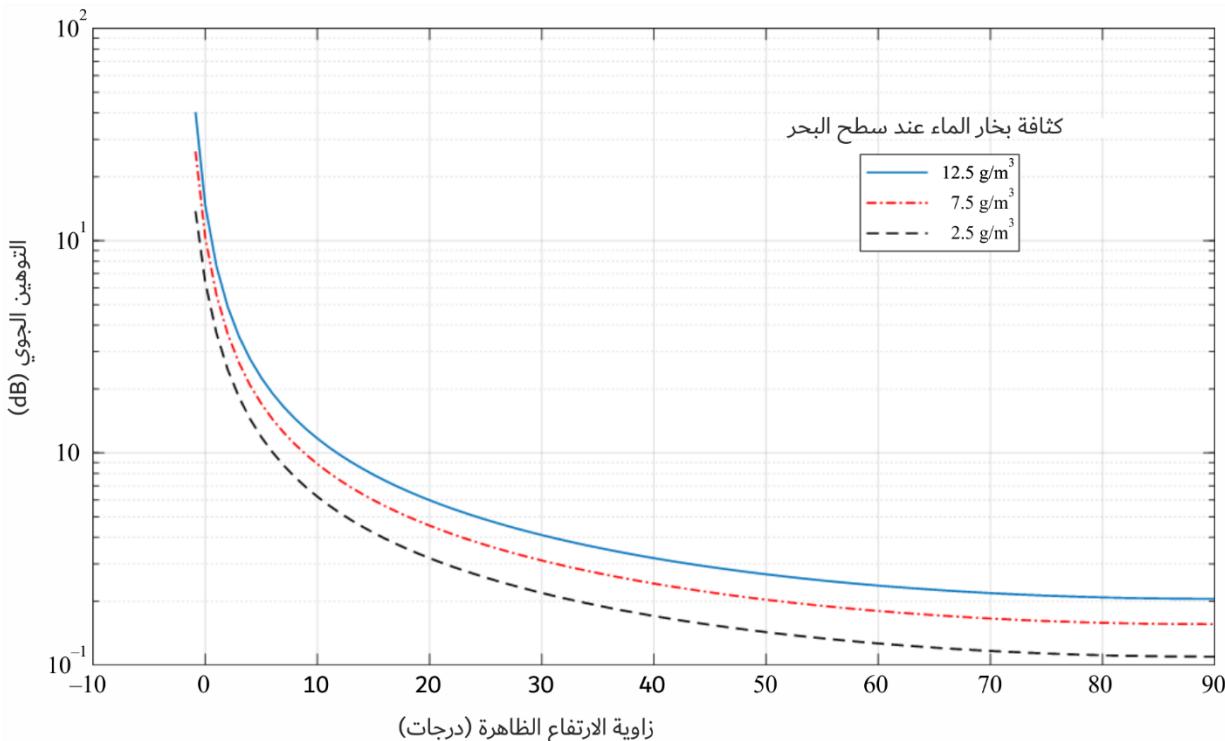
وتصلح الطريقة الواردة في المرفق C على مدى الترددات من 1 GHz إلى 1 000 GHz. ويمكن تجاهل التوهين الغازي عند ترددات أدنى من 1 GHz.

ويقدم الشكل 3 التوهين الغازي بين محطة أرضية على علو 1 km فوق سطح البحر ومحطة فضائية باستخدام الطريقة الموصى بها في المرفق C. ويظهر فيه التوهين الغازي الكلي بوحدات dB مرسوماً مقابل زاوية الارتفاع على التردد 30 GHz، وبالنسبة لثلاث قيم لكتافة بخار الماء عند مستوى سطح البحر هي: $12,5 \text{ g/m}^3$ و $7,5 \text{ g/m}^3$ و $2,5 \text{ g/m}^3$ حيث تمثل الكثافة قيمة $7,5 \text{ g/m}^3$ المتوسط العالمي المرجعية. وقد تم الحصول على الكثافات المقابلة لبخار الماء ρ عند المستوى الأرضي الذي يعلو 1 km فوق سطح البحر والتي يتطلبها هذا الحساب باستخدام عامل تدريج وفقاً للمعادلة $(\rho_0 / \rho)^{h/2}$ حيث $\rho_0 = 0 \text{ g/m}^3$ هي الكثافة عند مستوى سطح البحر و h هي بالكيلومتر. ويبين الشكل 3 الارتفاع السريع للتوهين الغازي مع انخفاض زاوية الارتفاع لتعمل إلى الصفر. ويفترض في بعض الأحيان أن يكون التوهين على المسارات أرض-فضاء مهملاً عند ترددات أقل من 10 GHz تقريباً. وقد لا يصح ذلك للمسارات ذات زوايا الارتفاع المنخفضة. وفي الحالة التي تكون فيها زوايا الارتفاع أقل من 10 درجات تقريباً، يوصى بإجراء الحساب لأي تردد فوق 1 GHz.

ويبين الشكل 4 مثلاً آخر على نتائج الطريقة الواردة في المرفق C لوصلة راديوية فضاء-أرض. وتُستعمل في الشكل 4 نفس المعلومات المستخدمة في الشكل 3 مع عكس اتجاه الانتشار. ويقع هوائي الإرسال على ارتفاع 100 km، ويقع هوائي الاستقبال على ارتفاع 1 km فوق مستوى سطح البحر. وفي هذه الحالة، تتحذ زاوية الارتفاع قيماً سالبة. بالإضافة إلى ذلك، لا تتقاطع الأشعة المنبعثة من المحطة الفضائية مع الأرض في زوايا الارتفاع التي يتراوح مداها بين 0 درجة و-9,946 درجة.

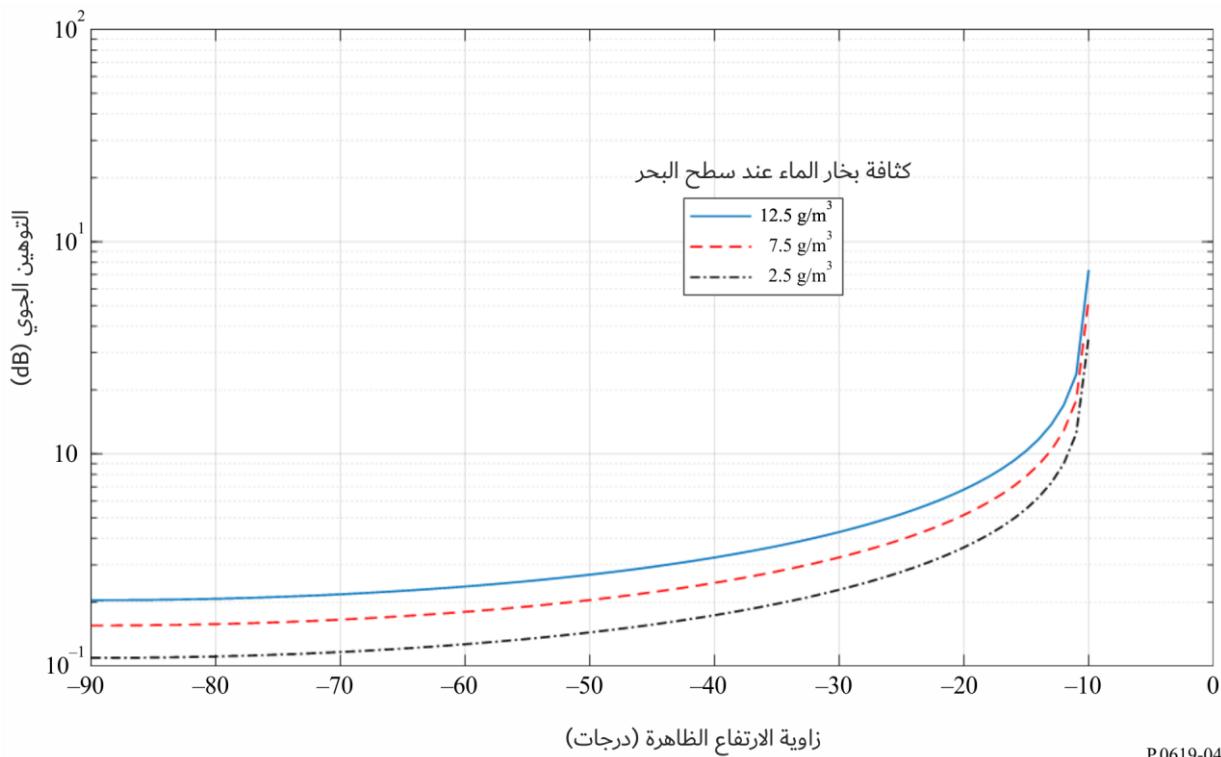
الشكل 3

التوهين الجوي مقابل زاوية الارتفاع على طول مسار الانتشار أرض-فضاء (علو المحطة الأرضية = 1 km، علو المحطة الفضائية = 100 km، التردد = 30 GHz)



الشكل 4

التوهين الجوي مقابل زاوية الارتفاع على طول مسار الانتشار أرض-فضاء (علو المخطة الأرضية = 100 km، علو المخطة الفضائية = 1 km، التردد = 30 GHz)



4.2 الخسارة الناجمة عن تحديد الحزمة A_{bs} (dB)

تؤدي آثار الانكسار في الجو إلى أن تصبح زاوية الارتفاع الظاهرة عند محطة أرضية أكبر من زاوية ارتفاع الخط المستقيم الذي يصل إلى المحطة الفضائية، ولا سيما على زوايا ارتفاع منخفضة. وتكون الآثار طفيفة فوق 5 درجات تقريباً، ولكنها قد تصبح كبيرة بالنسبة لزوايا ارتفاع أكثر انخفاضاً. وترد في المرفق B طرائق للتحويل بين زاويتي الارتفاع هاتين.

ويرد في الفقرة الفرعية 1.4.2 وصف للآثار الجوية التي تسبب انحناء الأشعة.

وترد في الفقرة الفرعية 2.4.2 طريقة لحساب التوهين أو التحسين الناجم عن إزالة التركيز أو التركيز بسبب الانكسارية الجوية.

1.4.2 انحناء الأشعة

يرد في الفقرتين الفرعتين 1.1.4.2 و 2.1.4.2 وصف للآليتين اللتين تسببان الانكسار الجوي، التروبوسفيري والأيونوسفيري.

1.1.4.2 الانكسار التروبوسفيري

تنشأ التغيرات المستقلة للتردد عن تغيرات الضغط الجوي الجاف، P_d ، وضغط بخار الماء، e ، ودرجة الحرارة، T ، وتعطى بالصيغة:

$$(7) \quad n = 1 + 10^{-6} \times N = 1 + 10^{-6} \times \left[\frac{77.6}{T} \left(P_d + e + 4810 \frac{e}{T} \right) \right]$$

علمًا أن $P_d + e$ هو الضغط الجوي الإجمالي بوحدات hPa.

حيث تمثل N الانكسارية، ويعبّر عن P_d و e بوحدات hPa، وعن T بوحدات كلفن. بالإضافة إلى ذلك، يمكن تطبيق المعادلة (7) عند ترددات تصل إلى 100 GHz.

وتعزى التغيرات المعتمدة على التردد إلى خطوط الامتصاص الطيفية للغازات الجوية، وخصوصاً الأكسجين وبخار الماء. ويمكن الحصول على إسهامات هذه الخطوط الطيفية في دليل الانكسار الجوي من النوصية 11-ITU-R P.676 ويعمل إهمالها عند الترددات التي تقل عن 10 GHz.

ولسهولة التحليل الهندسي، يمكن تمثيل الأشعة المنكسرة في التربوبوسفير بخطوط مستقيمة والتعويض عن ذلك فيما بعد بافتراض نصف قطر وهي للأرض، يشار إليه كذلك باسم نصف قطر الأرض الفعال، R_e . ويشار إلى النسبة بين نصف القطر الفعال R_e ونصف القطر الفعلي للأرض a بمعامل نصف قطر الأرض الفعال (k) (انظر النوصية 9-ITU-R P.834) ويعطى بالمعادلة:

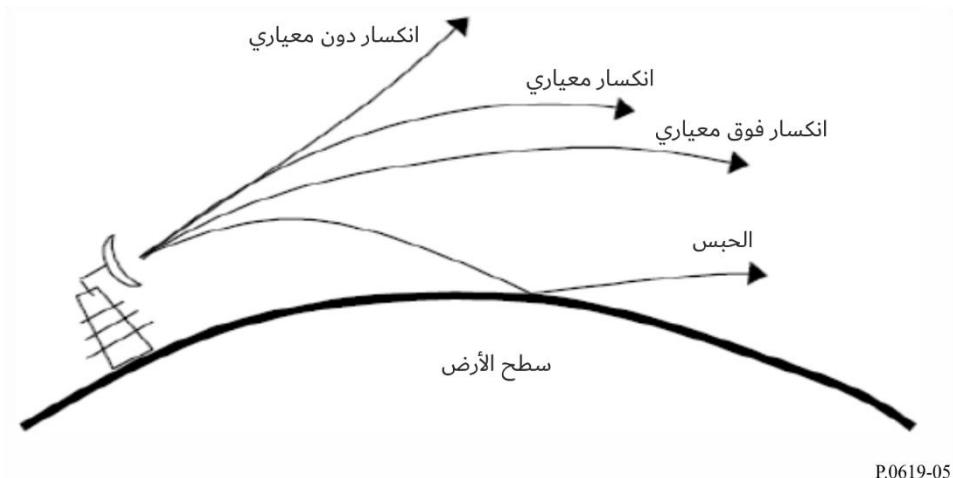
$$(8) \quad k = \frac{R_e}{a} = \frac{1}{1 + a \frac{dn}{dh}} = \frac{1}{1 + \frac{dN/dh}{157}}$$

حيث يمثل $\frac{dn}{dh}$ تدرج دليل الانكسار مع الارتفاع h .

وبحسب قيمة المعامل k ، يمكن وصف الانكسار التربوبوسفيري بأنه انكسار عادي أو انكسار دون معياري أو انكسار فوق معياري أو انكسار موجّه على النحو المبين في الشكل 5 وكما يرد شرحه أدناه.

الشكل 5

الانكسار التربوبوسفيري



P.0619-05

إذا كان:

$$(9(a)) \quad k = \frac{4}{3}$$

يحدث انكسار عادي، وتنتقل الأشعة الراديوية وفق مسار مستقيم على سطح الأرض وتصل إلى الفضاء دون إعاقة.
إذا كان:

$$(9(b)) \quad \frac{4}{3} > k > 0$$

يحدث انكسار دون معياري، ما يعني أن الموجات الراديوية تنتشر متعددة عن سطح الأرض.

وإذا كان:

$$(9ج) \quad \infty > k > \frac{4}{3}$$

يحدث انكسار فوق معياري، وتنتشر الأشعة الراديوية باتجاه سطح الأرض ما يؤدي وبالتالي إلى توسيع الأفق الراديوي.
أخيراً، إذا كان:

$$(9د) \quad -\infty < k < 0$$

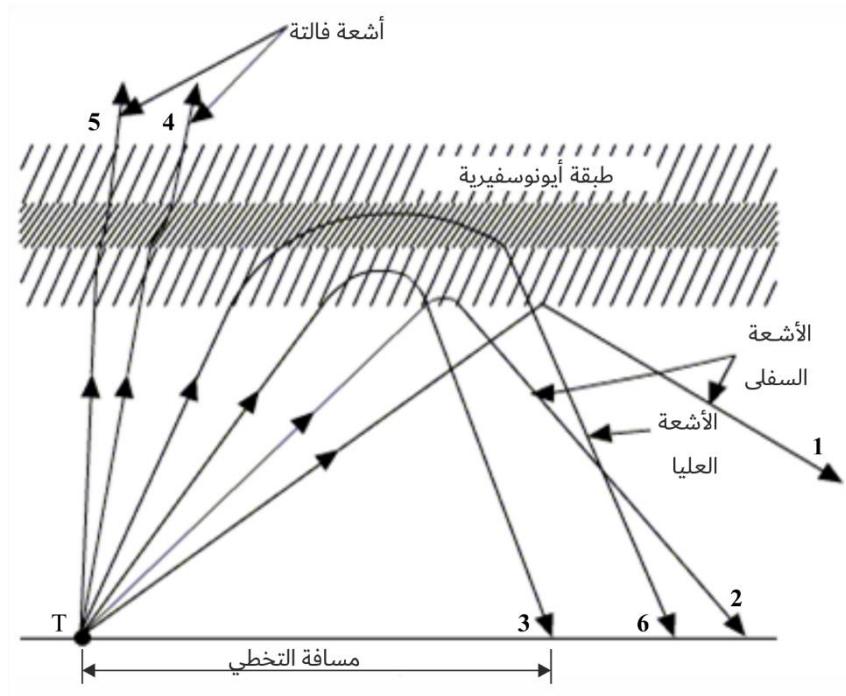
يحدث انكسار موجّه وتحني الأشعة الراديوية نحو الأسفل مع نصف قطر انحناء أكبر من نصف قطر الأرض. ويعرف ذلك أيضاً باسم "الحبس".

2.1.4.2 الانكسار الأيونوسفيري

يقدم الشكل 6 أمثلة على إشارات تنقلها أشعة على ترددات مختلفة بواسطة مرسل مقام على سطح الأرض. وتمكّن الأشعة التي تنتشر في الأيونوسفيري بزاوية سقوط رأسية، وعلى ترددات أعلى من التردد الحرج الأقصى (f_{0F2}) للطبقة الأيونوسفيرية F2، من اختراق الأيونوسفيري. وإذا اخترق اتجاه انتشار هذه الأشعة مبتعداً عن اتجاه السقوط الرأسى، تتعرض هذه الأشعة للانكسار قبل مرورها عبر الأيونوسفيري كما يبيّنه الشعاعان 4 و 5 في الشكل 6. ويمكن أن تتعرض بعض هذه الأشعة لانكسار يكفي لجعلها ترتد نحو الأرض كما يبيّنه الشعاع 6 في الشكل 6.

أما الأشعة التي تنتشر باتجاه مائل في التروبوسفير على ترددات أقل من التردد f_{0F2} فإنها تنكس و قد ترتد نحو الأرض بعد قطع مسافة تحظى بعتمد على كلٍّ من زاوية الارتفاع الأولية (المائة) للأشعة والتردد كما يبيّنه الشعاعان 2 و 3 في الشكل 6. وعلاوةً على ذلك، فإن الأشعة التي تنتشر على ترددات أقل من تردد البلازما في الجزء السفلي من أدنى طبقة أيونوسفيرية، أي الطبقة E، فإنها ترتد نحو الأرض عند أسفل الطبقة E كما يبيّنه الشعاع 1 في الشكل 6.

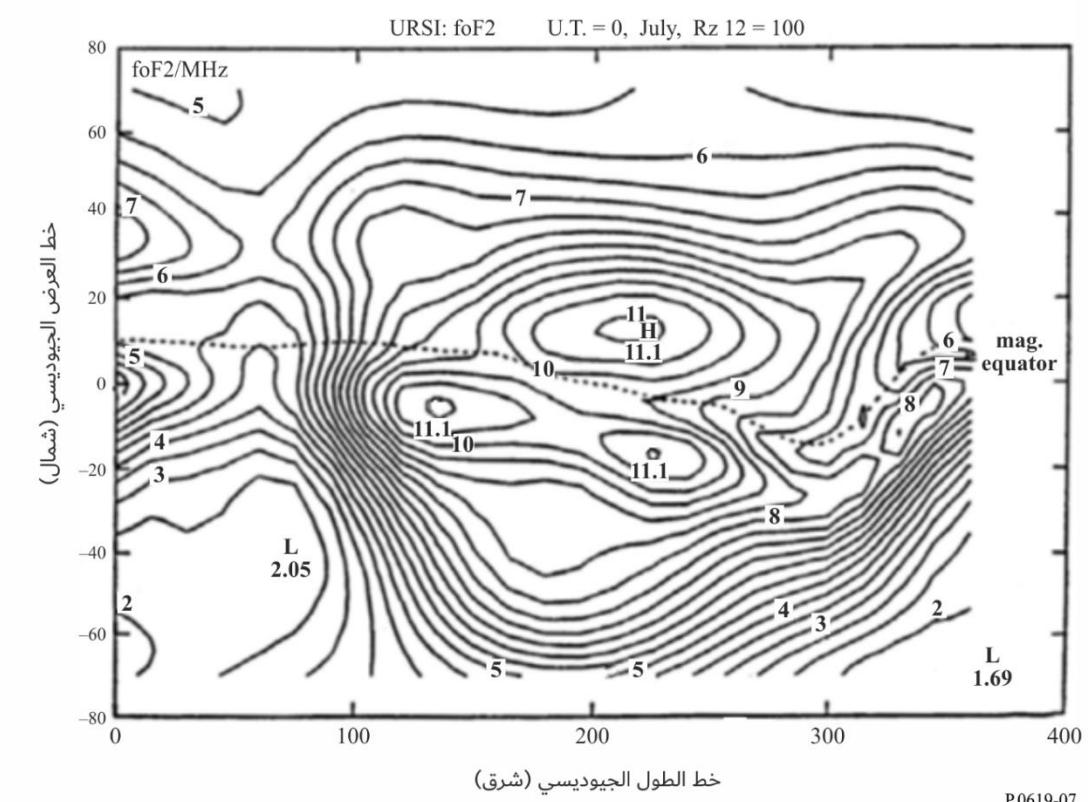
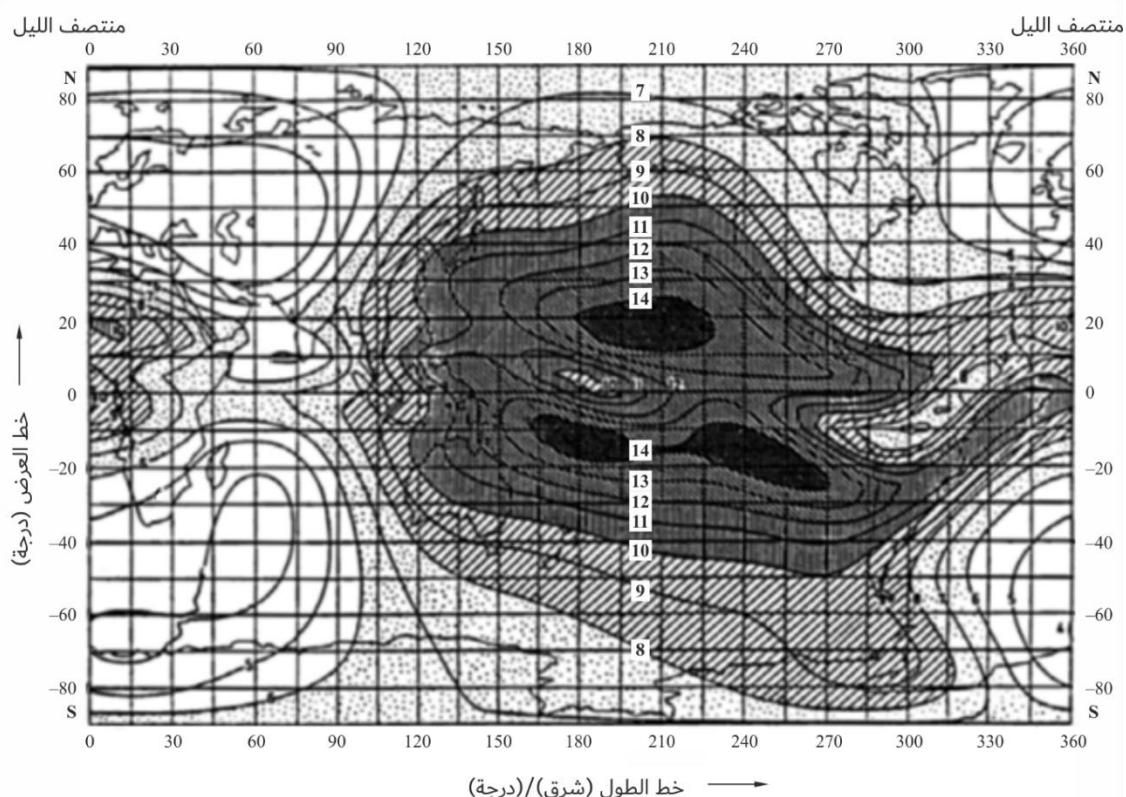
الشكل 6
الانكسار الأيونوسفيري



P.0619-06

ويعرض الشكل 7 مثلاً على التوزيع العالمي للتردد f_{0F2} لوقت يقابل التوقيت العالمي 0، ولشهر يوليو، ولعدد بقع شمسية يبلغ 100.

الشكل 7
الانكسار الأيونوسفيري



2.4.2 خسارة تهديد الحزمة في الانتشار عبر الغلاف الجوي

خسارة تمديد الحزمة، A_{BS} ، هي خسارة غير أومية ناجمة عن تمديد حزمة الهوائي في المستوى الرأسي (زاوية الارتفاع) بسبب تغير دليل الانكسار الراديوبي مع الارتفاع على طول مسیر الانتشار. وتقدير التوصية ITU-R P.834 في الفقرة 5، "خسارة تمديد الحزمة للانتشار عبر الغلاف الجوي"، طريقة لحساب خسارة تمديد الحزمة للمسيرات أرض-فضاء بين موقع على سطح الأرض والفضاء أو بالقرب منهـما.

التأله 5.2

تتسبب آليات مختلفة على المسارات أرض-فضاء بحدوث تقلبات في مستوى الإشارة تتغير بسرعة مع الوقت وعبر مسافات قصيرة. وتحدث هاتان الآليات فعلياً عبر نطاقي تردد لا يبتعد أحدهما الآخر، كما هو موضح في الأقسام الفرعية التالية، وبالتالي ينبغي عادة أن يؤخذ أحدهما في حالة معينة. وقد تم التعبير هنا عن التلاؤ بوصفه نوعاً من التوهين. ويجب معالجة كل آلية من آلياته باعتبارها متغيرة مع الوقت، وذات متوسط صفرى لكل توزيع. هكذا يتغير التوهين الناجم عن التلاؤ (dB) بين قيم موجبة وسلبية. وبين ينجم عدد كبير من الإشارات غير المرغوبة في المستقبل المتضرر، تتعارض حالات التلاؤ إحداثها الأخرى بشكل فعال ويمكن تجاهل الآلية.

التألو الأيونوسفيري (dB) A_{si} 1.5.2

تحتوي التوصية ITU-R P.531 على بيانات الانتشار وطائق حساب للتلقي بآثار التلاager الأيونوسفيري. وينخفض التأثير على مستوى الإشارة مع انخفاض التردد. ونادرًا ما يكون كبيراً فوق 10 GHz ويمكن تجاوزه فوق هذا التردد.

التالئُو التروبوسفيري (dB) A_{st} 2.5.2

يصلح نموذج التأثير التروبوسفيري الوارد في التوصية ITU-R P.618 عند ترددات تصل إلى 20 GHz. ويمكن اعتبار تأثير التأثير التروبوسفيري شبه منعدم عند الترددات تحت 4 GHz. وعلى الرغم من أن هذا النموذج يستند إلى قياسات عند ترددات تصل إلى 20 GHz، فإنه، مع مراعاة القواعد الفيزيائية الأساسية، يعتبر قابلاً للتطبيق في مجال تطبيق هذه التوصية عند ترددات تصل إلى 100 GHz. والنموذج قابل للتطبيق أيضاً في الزوايا من 5 درجات إلى 90 درجة.

يمكن للتغيرات في دليل الانكسار الناجمة عن الاضطراب الجوي أن تسبب حالات خبو وتحسن مكاني وزماني في شدة الإشارة. وتكون العملية الفيزيائية من التماقير بين تركيز موجة راديوية وإزالة تركيزها. ويوجد ارتباط بين شدة حالات التلاؤ هذه والعبارة المتعلقة بالبطوية في دليل الانكسار الجوي، التي ترتبط بحد ذاتها بكثافة بخار الماء.

وبالتالي فإن الشدة العامة للتلاؤ التربو-سفيري تتغير وفق المقاييس المكانية والزمانية النموذجية لكتافة بخار الماء، التي تبلغ عادة عشرات الكيلومترات وال ساعات على الأقل. وتحدث حالات التلاؤ الفعلية على مقاييس أصغر بكثير، عادة أقل من طول الموجة وخلال ثوانٍ معدودة.

ولا يكون التوزيع الإحصائي لتغایر شدة الإشارة متباًناً عند التعبير عنه بوحدات dB، حيث يكون الخبر الذي يتم تجاوزه خلال نسبة مئوية معينة من الوقت أكبر من التحسّن الذي يتم تجاوزه خلال النسبة المئوية ذاتها من الوقت. ويبلغ عدم التناظر هذا في تغایر شدة الإشارة حده الأقصى في ذيـلـيـ التوزيع.

وـما أن الآلية تتكون فقط من عملية تركيز وإزالة تركيز للطاقة، وليس من امتصاصها، فإن التأثير الصافي للتلاوؤ التربوـوسفيري ينحو إلى الصفر عند تحديد قيمته المتوسطة عبر المكان وـأو خلال الوقت. ويكون وبالتالي كبيراً عند أخذ التداخل الوحيد المصدر في الاعتبار وفي حالة التأثيرات القصيرة الأمد، ولكنه يميل إلى الزوال في حالة التداخل الطويل الأمد والمتنوع المصادر حين يكون لكـا، إشارة من الإشارات الجمـعـة شـدة مـتوـسـطـة مـاـثـلـةـ.

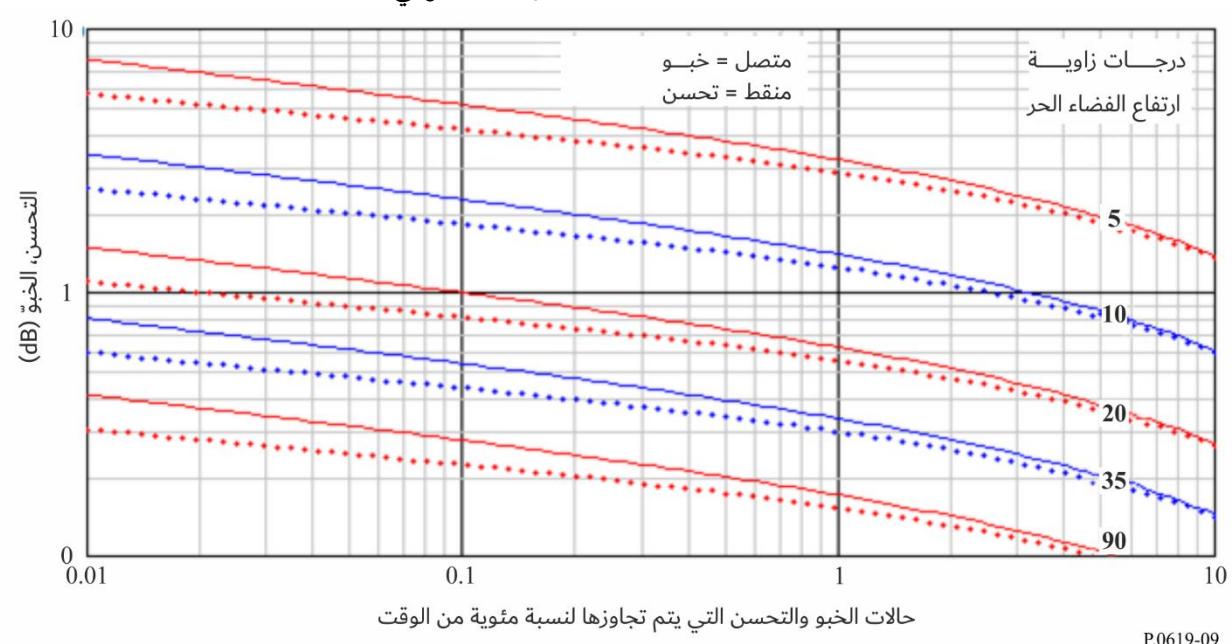
كما أن مستوى أهمية تحديد المتوسط المكاني يميل أيضاً إلى الانخفاض حين يكون قطر فتحة الهوائي الفعلية مماثلاً لمسافة الترابط المكاني أو أكبر منها. ويقدم المرفق D طريقة حساب للتتبؤ بتوزيع الشدة والتوزيع المكاني لكل من حالات الخبو والتحسين. ويعبر عن التحسن الذي يتم تجاوزه لنسبة مئوية من الوقت، p ، بالكمية $E_{st}(p)$ dB. وتكون $(E_{st}(p))$ سالبة إذا كان $p > 50$ ، ما يمثل حالة من الخبو. والطريقة التي يستند إليها هذا الحساب هي نفسها الواردة في الفقرة 1.4.2 من الملحق 1 بالنوصية ITU-R P.618 في حالة وصلة أرض-فضاء، ولكن جرى توسيع نطاقها لتشمل حالات الخبو والتحسين على السواء.

ويعرض الشكل 9 أمثلة جرى احتسابها بواسطة الطريقة الواردة في المرفق D.

الشكل 8

رسم بياني لحالات التحسن والخبو في التأثير التروبوسفيري مقابل زاوية الارتفاع في الفضاء الحر

إذا كان $N_{wet} = 42,5$ GHz عند 30 dB₀، وكسب الهوائي =



6.2 الخسارة بالانتعاج/الانتشار الموجّه الناجمة عن التضاريس و/أو عائق محدد (dB) L_{dtb}

تقوم الطريقة التالية بحساب الخسارة بالانتعاج الناجمة عن التضاريس الأرضية أو عن عائق عند المخططة الأرضية يجسده مبني محمد أو جسم آخر على السطح، معأخذ الخناء الأشعة في الاعتبار. وبما أن الخسارة بالانتعاج تتغير مع تدرج الانكسارية الجوية، فإن الخسارة L_{dtb} تتسم بتغير زمني. وتنص الطريقة على إنشاء مسار للأشعة عبر الغلاف الجوي يراعي الظروف المموزجية للانكسار. وبما أن المسافات بين المخططة الأرضية والعوائق كالمباني قصيرة على الأرجح بالنسبة إلى المسار عبر الغلاف الجوي، فإن للتغيرات في تدرج الانكسارية تأثير ضئيل. ويرجع أن تتأثر الخسارة بالانتعاج الناجمة عن إعاقة التضاريس بشكل أكبر بالظروف الجوية. وتشمل الطريقة تخفيضاً في الخسارة بالانتعاج يأخذ الانتشار الموجّه في الاعتبار. ولا يحدث الانتشار الموجّه إلا في الطبقات السفلية من الغلاف الجوي. وفي حالة مسار أرض-فضاء منخفض الزاوية، يمكن لأي مجرى أن يشكل جزءاً صغيراً فقط من الطول الإجمالي للمسار. ولذلك يمكن إهمال حالات التحسن الناجمة عن الانتشار الموجّه عبر مسار أرض-فضاء منخفض الزاوية حال من التضاريس. كذلك، لا تحدث حالات التحسن الناجمة عن الانتشار الموجّه عندما يكون محظوظاً بالجلبة (مثل المباني في بيئة حضرية).

وتصلح عملية الحساب لترددات تصل إلى 100 GHz. وينبغي أن تضبط L_{dtb} على الصفر إذا كانت المخططة الأرضية خالية من التضاريس أو العوائق الأخرى، إما لأن البيئة غير متاثرة بالجلبة أو لأن ارتفاع المسار كبير بما يكفي لتجنب العوائق.

ويمكن أن تعيق التضاريس أو المباني المسارات أرض-فضاء إذا كانت زوايا الارتفاع الظاهرة منخفضة. وتقدم النوصية ITU-R P.834 طريقة للتتبؤ برؤية مخططة فضائية تأخذ في الاعتبار الانكسار الجوي بالنسبة لأرض كروية منتظم غير متاثرة بالجلبة. وفي حال الرغبة

فيأخذ التضاريس الفعلية وربما عوائق أخرى في الاعتبار، مثلما يحدث في محاكاة مونت كارلو، فإن طريقة رسم الشعاع الواردة في المرفق E تعطي مظهراً جانياً لارتفاع الشعاع بالنسبة إلى مستوى سطح البحر، لا يعتمد على التردد حتى 100 GHz.

تبعد أهمية الخسارة بالانتعاج بالظهور عندما يدخل أحد العوائق منطقة فريند الأولى لشعاع راديوسي. وترد في التوصية ITU-R P.526 نماذج الانتعاج التي تلائم مجموعة من الحالات. ويستند الكثير من هذه النماذج إلى المعلمة الابعدية، v ، التي تمثل الشكل الهندسي للعائق. ولنصف قطر منطقة فريند الأولى، R_1 ، أهمية أيضاً لأن خلوه 0,6 منه من العائق حول الشعاع في حالة عائق مهيمن وحيد يعتبر معياراً يستخدم على نطاق واسع للخسارة بالانتعاج التي يمكن إهمالها.

ويتم تبسيط عبارتي v و R_1 حين تكون المسافة إلى مطراف أقصر منها إلى المطراف الآخر، الأمر الذي يصح بالنسبة لعائق أرضي على مسار أرض-فضاء. وفي ظل هذه الظروف يمكن الحصول على تقرير جيد للمعلمتين، بوحدات متقدمة، بالصيغتين:

$$(11) \quad v \approx h \sqrt{\frac{2}{\lambda d_1}}$$

$$(11) \quad R_1 \approx \sqrt{\lambda d_1}$$

حيث h ارتفاع العائق بالنسبة إلى الشعاع، و λ طول الموجة، و d_1 المسافة بين المخططة الأرضية والعائق أو الزاوية الرئيسية لمثلث بولينغتون (انظر الشكل 9)، أو بوحدات عملية بالصيغتين:

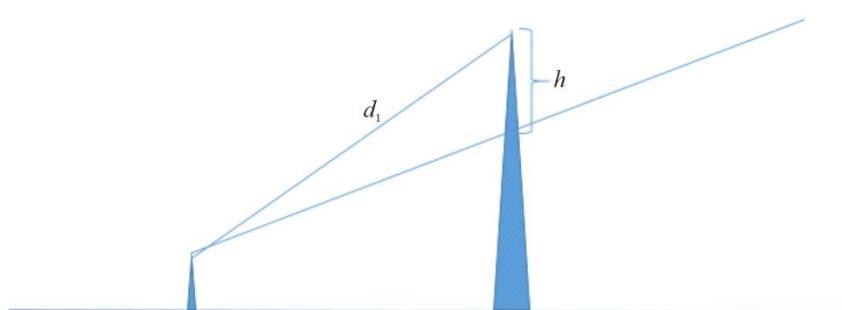
$$(12) \quad v \approx 0,08168h \sqrt{\frac{f}{d_1}}$$

$$(12) \quad R_1 \approx 17,314 \sqrt{\frac{d_1}{f}} \quad (\text{m})$$

حيث يعبر عن ارتفاع العائق h بالأمتار، والتردد f بوحدات GHz، والمسافة d بوحدات km.

الشكل 9

هندسة ارتفاع العائق (h) والمسافة بين المخططة الأرضية والعائق (d_1)



P.0619-09

ويعرض الشكل 10 أمثلة على الشكل الهندسي المصاحب حيث يكون R_1 و h عند الطرف الأرضي لمسار أرض-فضاء. ويمثل الخط المنحني الأحمر شعاعاً أطلق من ارتفاع 50 متراً فوق مستوى سطح البحر بزاوية ارتفاع قدرها 0,1-0,1 درجة وقد جرى تمثيل ارتفاعه بيانياً بالنسبة إلى مستوى سطح البحر. ويمثل مستوى سطح البحر بيانياً بشكل مسطح، في حين أن انحناء الخط الأحمر يأخذ في الاعتبار انثناء الأرض والانكسار الجوي على السواء.

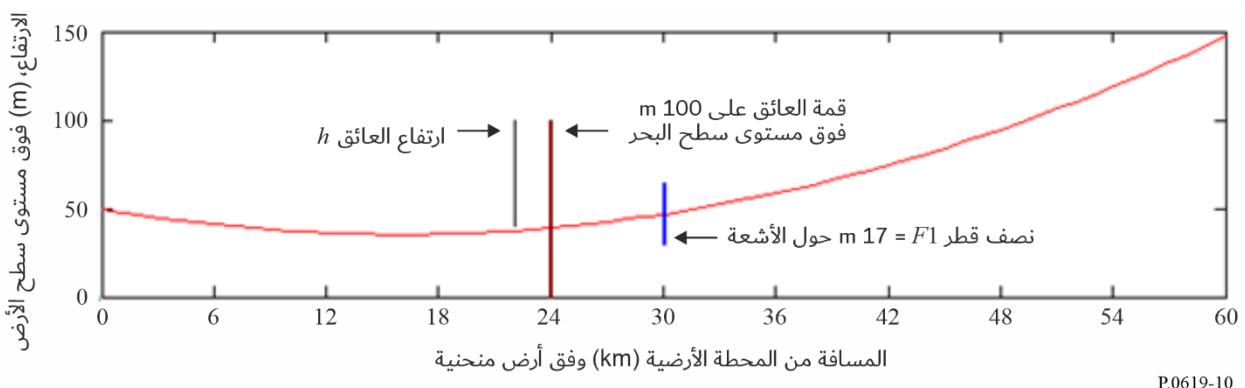
وعلى مسافة 24 km من المحطة الأرضية جرى تمثيل عائق افتراضي باللون البني تقع قمته على ارتفاع 100 متر فوق سطح البحر. ويبلغ ارتفاع الشعاع عند هذه النقطة 39,7 متراً، وبالتالي يبلغ ارتفاع العائق h فوقه 60,3 متراً. وتبلغ معلمة الانتعاج γ المقابلة 4,9 تقريباً.

وعلى مسافة 30 km من المحطة الأرضية يبلغ نصف قطر فريبنل الأولى F_1 عند 30 GHz حوالي 17 متراً، وقد رسم بيانياً باللون الأزرق فوق الشعاع وتحته. ولكي تكون الخسارة بالانتعاج قابلة للإهمال، ينبغي أن يكون 0,6 من نصف قطر العائق حالياً من العوائق داخل دائرة محطة بالشعاع.

وتوضح المقارنة بين ارتفاع العائق h في هذا المثال مع F_1 ، مع الإشارة إلى أن F_1 قد تكون أصغر بقليل على مسافة 24 km، أن الشعاع سيتعرض لإنعاج شديدة في هذا المثال.

الشكل 10

الشكل الهندسي لمعلمات الانتعاج المتعلقة بشعاع أرض-فضاء



في حالة عائق التضاريس، حيث يمكن الافتراض بأن عرض العائق كبير بالاتجاه الأفقي قياساً بمنطقة فريبنل، يعتبر نموذج الانتعاج على حافة كحد السكين الوارد في التوصية ITU-R P.526 نموذجاً مناسباً للخسارة بالانتعاج.

وقد يكون الشكل الهندسي لعائق المباني أكثر تعقيداً. ففي حالة بنية معزولة، قد يوجد إلى يسار أو يمين العائق مسار يتسم بخسارة أدنى من خسارة مسار يمر فوق العائق. وإذا كان ذلك ممكناً، يوصى باعتماد نموذج الانتعاج ذي العرض المحدود الوارد في التوصية ITU-R P.526. ويمكن أن تتخذ صيغته أشكالاً متعددة، بما في ذلك الشكل المخصص لمسار غير مرغوب.

يتدرج نموذج الانتعاج على حافة كحد السكين ونموذج الانتعاج ذي العرض المحدود بدقة مع التردد، ويطبقان حتى 100 GHz. ففي الجزء العلوي من مدى الترددات هذا لا يتعذر طول الموجة بضعة مليمترات. ونتيجة لذلك، يصبح الانتقال بين خسارة الانتشار الحالي من العائق والخسارة الكبيرة بالانتعاج صغيراً جداً بحيث تعتمد دقة النتيجة أساساً على نوعية البيانات الطبوغرافية.

وفي الحالات التي تحسب فيها الخسارة L_{dtb} لعائق التضاريس، تحسب القيمة التي لا يتم تجاوزها لنسبة مئوية p من الوقت بواسطة المعادلة التالية مع الأخذ في الاعتبار الانتشار الموجه في الغلاف الجوي على زوايا ارتفاع منخفضة:

$$(13) \quad (\text{dB})L_{dtb}(p) = \begin{cases} \max[L_d + \min[A(p) + A_{ds}, 0], 0] & p < \beta \\ L_d & \text{otherwise} \end{cases}$$

حيث:

$$(13) \quad (\text{dB})A(p) = \begin{cases} (1.2 + 3.7 \times 10^{-3} d_n) \log_{10} \left(\frac{p}{\beta} \right) + 12 \left[\left(\frac{p}{\beta} \right)^{\Gamma} - 1 \right] & p < \beta \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$(13\text{ب}) \quad \Gamma = \frac{1.076}{[2.0058 - \log(\beta)]^{1.012}} \exp\{-[9.51 - 4.8 \log_{10} \beta + 0.198(\log_{10} \beta)^2] \cdot 10^{-6} \cdot d_n^{1.13}\}$$

$$(13\text{ج}) \quad (\%) \beta = \begin{cases} (10^{-0.015|\varphi|+1.67}) & \text{for } |\varphi| \leq 70 \\ 4.17 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$(13\text{د}) \quad (\text{dB}) A_{ds} = \begin{cases} 20 \log_{10} [1 + 0.361 \theta'' (f \cdot d_{hoz})^{1/2}] + 0.264 \theta'' f^{1/3} & \theta'' > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$(13\text{هـ}) \quad (\text{mrad}) \theta'' = \theta_{hoz} - 0.1 d_{hoz}$$

L_d : خسارة الانتعاج الناجمة عن عائق ملحي وتحسب بواسطة النماذج التالية المستمدة من التوصية ITU-R P.526 بعأ للسيناريو، وفي حالة دخول عائق إلى منطقة فريبل الأولى لشعاع راديوي، وبخلاف ذلك، يكون $L_d = 0$

بالنسبة لعائق وحيد كحد السكين (v) (الفقرة 1.4 من التوصية ITU-R P.526)؛

بالنسبة لعائق ذي عرض محدود (v) (الفقرة 1.4 من التوصية ITU-R P.526)؛

بالنسبة لعائق ناجم عن تضاريس عامة على مسار مائل (الفقرة 6.4 من التوصية ITU-R P.526)؛

φ : خط العرض (درجات)

f : التردد (GHz)

θ_{hoz} : زاوية ارتفاع أفق المخطة الأرضية فوق الاتجاه الأفقي (mrad)، انظر التوصية ITU-R P.452-18، المعادلة (137)؛

d_{hoz} : مسافة الأفق للمخطة الأرضية (km)، انظر التوصية ITU-R P.452-18، المعادلة (141)؛

d_n : المسافة الاسمية على طول السطح المحدد من خلال الصيغة: $d_n = \frac{600}{1+f_{GHz}}$

مع ملاحظة أن $A(p)$ سالبة إذا كانت $\beta < p$.

7.2 خسارة الجلبة (dB) L_c

تتسبب المناطق الحبيطة بمحيطة أرضية واقعة دون مستوى سطوح المباني في بيئة حضرية بتغيير خسارة الإرسال الأساسية الكلية أرض-فضاء للمخطة الأرضية بوجه عام. وقد تزداد الخسارة بسبب الانتعاج الناجم عن العائق، أو تقل بسبب وجود مسارات انعكاس. وتشكل المباني المصدر المهيمن للعواقب والسطح العاكسة، ولكن يمكن أن يكون لأنواع أخرى من المياكل الاصطناعية دور في ذلك. كما يمكن أن يسبب الغطاء البني خسارة إضافية على الرغم من أن الطبيعة المتغيرة للغطاء البني تعني أنه لا يعتبر عادة أساساً موثقاً للتبعي بالخسارة على أحد مسارات التداخل.

وفي الحال التي توجد فيها بيانات عن المناطق الحبيطة بمحيطة أرضية محددة، من الأنسب حساب الخسارة بالانتعاج L_{dtb} بالنسبة لعواقب التضاريس والعواقب الحضرية، على النحو الوارد في الفقرة 6.2 أعلاه. وإذا وجد أيضاً مسار انعكاس، يمكن أن يؤخذ في الاعتبار باستخدام المعلومات الواردة في التوصية ITU-R P.2040.

وفي الحال التي ينشر فيها عدد كبير من المحطات الأرضية في منطقة معينة، سواء حقيقة أو تمثيلية، لا يمكن عادة من الناحية العملية إجراء حسابات تفصيلية لكل مخطة من هذه المحطات. فالخسارة الفعلية الناجمة عن الجلبة بالنسبة لمحطات أرضية واقعة ضمن جلبة حضرية تختلف كثيراً بين الواقع الفردي، وكذلك مع اتجاه المسار أرض-فضاء. ولهذا السبب قد يكون من الأنسب استخدام نهج إحصائي تستعمل فيه النماذج التمثيلية (مثلاً استخدام مزيج من ارتفاعات ومسافات الجلبة) بحسب البيئة المادية التي يجري وضع

نموذج لها. ويستخدم عادة نجح إحصائي في محاكاة مونت كارلو. ولهذه الغاية، تقدم التوصية 0 ITU-R P.2108 موجداً مناسباً للخسارة بالجلبة.

8.2 خسارة اختراق المباني (L_{be} dB)

في حالة محطة أرضية مقامة داخل المبني، يجب أن تؤخذ في الاعتبار الخسارة الإضافية بين المخطة والمسار الخارجي المجاور. وكما هو الحال بالنسبة للخسارة بالجلبة L_{be} ، تتغير L_{be} كثيراً بحسب الموقع وتفاصيل البناء في المبني، ولا بد من إجراء تقييم إحصائي. ولهذه الغاية تقدم التوصية 0 ITU-R P.2109 ملائماً لخسارة اختراق المبني أو الخروج منها.

9.2 خسارة الإرسال الناجمة عن الانتشار بالهواء (L_{tps} dB)

يمكن للانتشار بالمطر أو المياه الجوية الأخرى أن يحدث افتاراً بين مرسل ومستقبل لا يحدث في ظروف الجو الصافي. ويجب أن تقيّم الخسارة المرتبطة بهذا الانتشار عبر أحد المسارات بوصفها نوعاً من خسارة الإرسال، نظراً إلى أن مخطط إشعاع الهوائي في كلا المخطتين يشكل جزءاً أساسياً من العملية الحسابية.

وقد يحدث التداخل حين يعاد توجيه الطاقة الصادرة عن أحد الأنظمة أو انتشارها بالهواء وتدخل في حزمة هوائي نظام آخر. ولهذه الحالة بأهمية محتملة عند الترددات الأعلى من 5 GHz بشكل أساسى وحين تشكل حزمتا النظامين حجماً مشتركاً يتقطع مع جزء من العلاف الجوى يمكن أن يحتوي على مياه جوية. وفي ظل هذه الظروف، يوجد حجم مضاء مشترك توجد فيه المياه الجوية لفترات زمنية طويلة وقد ينبع عنها مستويات معززة من الإشارات غير المرغوبة. ومع أن هذا التداخل قد يكون كبيراً، إلا أنه تداخل عابر وليس شديداً في العادة بما يكفي لتقييد النظام، ويمكن تجنبه عادة عن طريق اختيار حكيم للأشكال الهندسية للمسارات من أجل منع احتمال حدوث أحجام مشتركة.

وتقدم التوصية 2 ITU-R P.452 طريقة لحساب الانتشار بالهواء بين محطات على سطح الأرض عند ترددات أعلى من 0,1 GHz تقريباً. ويمكن استخدام هذه الطريقة من أجل حجم مشترك تشكله حزمتا هوائين أحدهما على الأرض والآخر في الفضاء.

ويرجح أن يكون الانتشار بالهواء عبارة عن آلية تداخل هامة بين وصلتين أرض-فضاء، تعملان كلاماً في الخدمات الساتلية. ويكون الاحتمال أقل حين يكون المطraf الأرضي جزءاً من نظام راديوى للأرض. وبما أن طريقة الانتشار بالهواء الواردة في التوصية 2 ITU-R P.452 مكتففة عددياً، فإن المرفق F يقدم وصفاً لاختبار بسيط نسبياً يمكن إجراؤه لتحديد الحالات التي لا يوجد فيها خطر تداخل كبير بالانتشار بالهواء قبلأخذ الآلية في الاعتبار.

10.2 التوهين التفاضلي الناجم عن المطر

يعتبر عادة التوهين الناجم عن الهواء، وتشمل المطر والثلوج الرطبة والسحب، آلية الانحطاط الأكثر دلالة بالنسبة لمسار أرض-فضاء مرغوب عند ترددات أعلى من نحو 5 GHz. وبحسب طريقة تحليل التداخل، قد يكون من المفيد معرفة الارتباط بين الخبأ بسبب المطر على كلا المسارين، المرغوب وغير المرغوب.

وتقدم التوصية 15 ITU-R P.1815 طريقة للتتبؤ بالإحصاءات المشتركة للخبأ بسبب المطر بالنسبة للمسارين الواقعين بين محطتين أرضيتين والمحطة الفضائية نفسها. وهي تعطي احتمال تجاوز التوهين على المسارين عتبات إفرادية محددة في حالة هطول المطر في كلا المواقعين. ويستند الحساب إلى نموذج الخبأ بسبب المطر أرض-فضاء الوارد في التوصية 18 ITU-R P.618، الذي يصلح عند ترددات تصل إلى 55 GHz.

ينخفض ارتباط معدل سقوط الأمطار في المواقعين إلى قيم متدنية عبر مسافات نموذجية بالنسبة لخلايا المطر. فالمطر الشديد يهطل غالباً في خلايا يبلغ امتدادها الأفقي بضعة كيلومترات، رغم إمكانية هطول مطر أمامي غير عبر مسافات أطول محاذية لجبهة المطر.

3 تقييم التداخل

تقدم الفقرات الفرعية التالية طريقة التحليل التي يتعين استعمالها لتقييم مستويات الإشارات غير المرغوبة بحسب نمط سيناريو التداخل.

1.3 خسارة الإرسال الأساسية للتداخل وحيد المصدر

تتألف خسارة الإرسال الأساسية في الجو الصافي التي لا يتم تجاوزها لنسبة مئوية p من الوقت بالنسبة لمربيل وحيد غير مرغوب ومستقل متضرر عبر مسار أرض-فضاء من الخسائر الوارد وصفها في الفقرات من 1.2 إلى 6.2 على النحو التالي:

$$(14) \quad L_b = L_{bfs} + A_{xp} + A_g(p_1) + A_{bs} + A_s(p_2) + L_{dtb}(p_1) \quad (\text{dB})$$

حيث:

L_{bfs} : خسارة الإرسال الأساسية في الفضاء الحرّ

A_{xp} : التوهين الناجم عن إزالة الاستقطاب

$A_g(p_1)$: التوهين الناجم عن الغازات الجوية الذي لا يتم تجاوزه لنسبة مئوية p_1 من الوقت

A_{bs} : التوهين الناجم عن تمديد الحزمة

$A_s(p_2)$: التوهين الناجم عن التأثير الأيونوسفيري أو الترويروسفيري الذي لا يتم تجاوزه لنسبة مئوية p_2 من الوقت
تبعاً لما إذا كان التردد أقل من 10 GHz أو أعلى من هذه القيمة

$L_{dtb}(p_1)$: خسارة الانعراج المعزز بالانتشار الموجه الذي لا يتم تجاوزه لنسبة مئوية p_1 من الوقت.

وحيث تمثل جميع العبارات الواردة أعلاه في المعادلة (14) خسائر (dB)، مع الإشارة إلى أن القيمة الوسطية للتوهين A_s تساوي الصفر وأن هذا التوهين قد يأخذ قيماً موجبة أو سالبة.

وقد حُذفت الخسائر المرتبطة بالجبلة L_c و L_{be} من المعادلة (14) لأنهما نتيجةتان إحصائيتان لا تنسابان مسار تداخل وحيد.
وينبغي بوجه خاص إجراء حساب الخسائر التي تزداد بسبب العائق أو تنقص بسبب الانعكاس باستخدام الطرق الواردة في الفقرة 6.2 تحديداً. ويتوقع عند الممارسة العملية ألا يشمل تقييم التداخل وحيد المصدر سوى محطات أرضية وفضائية في الخدمة الساتلية. ففي معظم هذه الحالات لن تتأثر الحطة الأرضية بالانعراج أو الانعكاس.

ويتضح من استخدام رمzin مستقلين للنسبتين المئويتين p_1 و p_2 من الوقت في المعادلة (14) أن قيم هاتين النسبتين قد تختلف بحسب طريقة التحليل الإجمالية، كما ورد في الفقرة 3.

ففي الحالة الخاصة التي تكون فيها $p = 20\text{-}50\%$ ، يمكن إهمال تأثير التأثير على خسارة الإرسال الأساسية في الجو الصافي.
وهذه الحالة الخاصة تقابل الحالة التي تتم معالجتها عادة على أنها مسار التداخل وحيد المصدر طويل الأمد. وتستند هذه الحالة إلى دراسات أجراها قطاع الاتصالات الراديوية وبيّنت أنه في الحالة التي تتراوح فيها النسبة p بين 20 و 50 في المائة من الوقت، ينبع من حساب خسارة الإرسال الأساسية في الجو الصافي التي لا يتم تجاوزها لنسبة مئوية p من الوقت أن:

$$A_g(p_1) + A_s(p_2) \approx A_g(p) \text{ for } 0,001 \leq p_1 \leq 99,999\%, 0,001 \leq p_2 \leq 99,999\% \text{ and } p = 20\text{-}50\%$$

وقد بيّنت الدراسات التي أجريت لروايا ارتفاع تتراوح بين 1° و 5° ، ولترددات في المدى 71-24 GHz، وعبر مدى متغير من المناخات، أن الخسارة في دقة في هذه الطريقة البسيطة فيما يتعلق بالحالة الطويلة الأمد غير ذات شأن.

2.3 خسارة الإرسال الأساسية لتدخل متعدد المصادر في الجو الصافي

تتألف خسارة الإرسال الأساسية في الجو الصافي التي لا يتم تجاوزها لنسبة مئوية p من الوقت الصادرة لكل مرسل غير مرغوب في حساب التداخل أرض-فضاء المتعدد المصادر من الخسائر الوارد وصفتها في الفقرات من 1.2 إلى 8.2 على النحو التالي:

$$(15) \quad L_b = L_{bfs} + A_{xp} + A_g(p) + A_{bs} + L_c(p_{Lc}) + L_{be}(p_{Lbe}) + L_{dtb}(p) \quad (\text{dB})$$

حيث:

L_{bfs} : خسارة الإرسال الأساسية في الفضاء الحر

A_{xp} : التوهين الناجم عن الاستقطاب

$A_g(p)$: التوهين الناجم عن الغازات الجوية التي لا يتم تجاوزها لنسبة مئوية p من الوقت

A_{bs} : التوهين الناجم عن تمديد الحزمة

$L_c(p_{Lc})$: خسارة الجلبة التي لا يتم تجاوزها لنسبة مئوية p_{Lc} من الوقت

$L_{be}(p_{Lbe})$: خسارة اختراق المباني التي لا يتم تجاوزها لنسبة مئوية p_{Lbe} من الوقت للمحطات داخل المباني، وتتساوي 0 dB لمحطة أرضية خارج المباني

$L_{dtb}(p)$: خسارة الانتعار المعزز بالانتشار الموجّه التي لا يتم تجاوزها لنسبة مئوية p من الوقت.

وفي هذه الحالة لا يوحّد التغيير الزمني في الاعتبار إلا للخسارة الناجمة عن الغازات الجوية وخشارة الانتعار المعزز بالانتشار الموجّه. ويعبر عن خسائر الجلبة، L_c ، على النحو المبين في التوصية 0-ITU-R P.2108، وإذا لم يتحقق ذلك، فإن التوصية 0-ITU-R P.2109، بإعتبارها خسائير اختراق المباني أو الخروج منها، L_{be} ، على النحو المبين في التوصية 0-ITU-R P.2109، بإعتبارها خسائير لا يتم تجاوزها لنسبة مئوية معينة من الموقع. وفي حالات محاكاة مصادر متعددة، ينبغي استعمال قيم عشوائية جديدة موزعة بانتظام للنسبة المئوية للموقع لكل خسارة مستخرجة من نماذج خسائر الجلبة وخسائر اختراق المباني.

وينبغي حساب القدرة المتجمّعة التي يتلقاها المستقبل المتضرر عن طريق جمع القدرات بوحدات خطية (وليس بوحدات dB) لكل مسار. ويعطي ذلك قيمة تقريبية جيدة لمتوسط التوزيع المكاني الناجم عن الجمع المتجمّعي للإشارات المتعددة.

4 الارتباط بين خسائر الانتشار

يمكن تقديم الملاحظة التالية فيما يتعلق بالارتباط بين آليات الانتشار على مسار أرض-فضاء.

ولا تعتمد الخسائر المرتبطة بالجلبة الأرضية، في تغيرها المكاني والزمني على السواء، بشكل كبير على الآليات التي تنشأ في الغلاف الجوي أو عبر الطول الكامل للمسار، إلا إذا كانت زاوية الارتفاع الظاهرة للشاعر تعتمد على التدرج الرأسي للانكسارية، الذي قد يؤثر على الخسارة بسبب التضاريس أو غيرها من العوائق في حالة مسار ذي زاوية ارتفاع منخفضة.

وتزيد كل من الخسارة في الفضاء الحر والتهين الغازي والتلاّؤ التربووسفيري مع انخفاض زاوية ارتفاع المسار.

وتعتمد درجة تأثير التوهين الغازي بكثافة بخار الماء على التردد بطريقة معقدة، ويمكن إهمالها ضمن نسبة $\pm 10\%$ من نطاق امتصاص الأكسجين في المدى 60 GHz. أما عند الترددات الأخرى التي تزيد على نحو 5 GHz، وفي حالة مسار وحيد أرض-فضاء يكون التلاّؤ التربووسفيري فيه كبيراً، ثمة ميل لتزايد حالات التحسّن في التلاّؤ مع تزايد كثافة بخار الماء يتعين إبطاله بزيادة التوهين الغازي، عملاً بأن الاتساع النسبي لهذين التأثيرين يتغير مع التردد.

ويُظهر التوهين الغازي وشدة التلاّؤ التربووسفيري ارتباطاً جزئياً موجباً. فالتهين الغازي يزداد مع زيادة كثافة بخار الماء في الجو، p (g/m³). ويعزى التلاّؤ التربووسفيري أساساً إلى الاضطراب في الغلاف الجوي الذي يحدث على ارتفاع تكون السحب،

ويوجد ارتباط بين شدة التأثير والعبارة الرطبة للانكسارية الراديوية N_{wet} ، التي تزداد مع زيادة كثافة بخار الماء، رغم وجود اعتماد مختلف على درجة الحرارة.

ويرد في المرفق C وصف لحساب التوهين الغازي على مسار مائل معأخذ كثافة بخار الماء على سطح الأرض، p_0 (g/m^3)، كأحد المدخلات.

وتعتمد شدة التأثير التروبوسفيري على N_{wet} كما تبين المعادلة (49) في المرفق D. ويعطي القسم 1 من النوصية ITU-R P.453-14 الكمية N_{wet} كدالة في الضغط الجزيئي لبخار الماء، e (hPa). ويعطي القسم 2.1 من النوصية ITU-R P.835-6 العلاقة بين e و p_0 . ويحتاج التحليل المفصل للتفاعل بين التوهين الغازي والتأثير التروبوسفيري إلى أسلوب مثل الحاكاة، يأخذ بيانات الطقس في الاعتبار. فعند تقييم تداخل وحيد المصدر في الحق الصافي بواسطة المعادلة (14)، يتم الحصول على قيمة تقريرية جيدة للتغير الزمني بضبط قيمة $p = p_1$ ، وضبط قيمة $50 = p_2$ التي ينتج عنها $A_s = 0$ (dB). ويستند هذا التقرير إلى تغير خسارة التأثير التي تتسم بمتوسط مقداره صفر.

ويحدث التغير في التأثير التروبوسفيري خلال فترات زمنية لا تتعدي الثانية مقارنة بالفترات التي تمت لساعات أو أكثر والتي يتغير خلالها التوهين الغازي. وإذا كان هذا التغير السريع كبيراً بالنسبة للمستقبل المعرض للتداخل، فينبغي ضبط p_2 على النسبة المئوية اللازمة لفترة قصيرة الأمد ($\leq 1\%$) لا يتم خلالها تجاوز القيمة $(A_s(p_2))$.

5 طرق تحليل التداخل المتعدد المصادر

هناك نوعان من النهج التي يمكن اعتمادها لمعالجة التداخل المتعدد المصادر:

- النهج التجريبية، أو
- النهج النظرية.

تستند النهج التجريبية إلى بيانات مقيسة قد يصعب أو يتعدى الحصول عليها في حالة محطة فضائية منشورة. وبناءً على ذلك، تتم في هذه النوصية مراعاة النهج النظرية لمعالجة آليات الانتشار الخاصة فقط بالتداخل المتعدد المصادر.

وهناك نوعان من النهج المعتمدة لمعالجة آليات الانتشار الخاصة فقط بالتداخل المتعدد المصادر:

- محاكاة مونت كارلو؛
- الأساليب التحليلية.

وفي كلا النوعين من الأساليب تؤخذ قدرة التداخل المتعدد المصادر I_A على أنها مجموع قدرات التداخل I_i الناشئة من مختلف المصادر المسبيبة للتداخل.

$$(16) \quad I_A = \sum_i I_i$$

حيث يُحسب الجمع عبر جميع المصادر المسبيبة للتداخل المرئية من المستقبل المتضرر. ويعتمد تحديد مساحة الجمع على سيناريو التعامل ويعتبر خارج نطاق هذه النوصية. ويمكن كتابة قدرة التداخل الناشئة من كل مصدر مسبب للتداخل على النحو التالي:

$$(17) \quad I_i = X_i g(d_i)$$

حيث X_i متغير عشوائي موجب يمكن وضع نموذج له كحاصل ضرب كميات محددة في متغيرات عشوائية متنوعة تعبر عن عدة معلمات تشمل قدرة الإرسال وكسب الهوائي وتهجين القناة بما في ذلك جميع العوامل الواردة في المعادلة (14) بقيم خطية مع إضافة التوهين الناجم عن هطول الأمطار إن وجد. ويمكن الرابط بين بعض هذه المتغيرات العشوائية. وتمثل الدالة $(d_i) g$ خسارة الانتشار المتعلقة بالمسافة التي تعتمد على توزيع المرسلات الإفرادية/المستقبلات المتضررة.

1.5 محاكاة مونت كارلو

يستند أسلوب محاكاة مونت كارلو إلى حساب عددي المعادلة (17) لكل مصدر مسبب للتداخل/مستقبل متضرر وجمع المخلصات للحصول على قدرة التداخل المتعدد المصادر كما ورد في المعادلة (16). وللحصول على قدرة التداخل المتعدد المصادر، لا بد من تحديد خصائص خسارة الانتشار من كل مصدر مسبب للتداخل على المستقبل المتضرر. وتعتمد خسارة الانتشار هذه على ظروف النشر والتضاريس والظروف الجوية.

وقد يكون من الصعب تطبيق المعادلة (16)، على بساطتها، لحساب قدرة التداخل المتعدد المصادر، لأن عدد المصادر التداخل قد يكون كبيراً، وأن القدرات التي تبناها مصادر التداخل نحو المستقبل المتضرر قد تكون في بعض الحالات غير معروفة، وأن خسائر الانتشار التي تعطيها المعادلة (17) تعتمد على ظروف النشر والتضاريس التي تخلل المسارات والظروف الجوية.

2.5 الأساليب التحليلية

يمكن استخدام أسلوب تحليلي إحصائي كتقريب لطريقة مونت كارلو، وعلى سبيل المثال الأسلوب التحليلي القائم على المراكمات. ويوفر الأسلوب التحليلي القائم على المراكمات معادلات مغلقة لمتوسط وتغاير القدرة المسيبة للتداخل الناشئة من توزيع منهٰ للمرسلات/المستقبلات شريطة أن يكون هذا التوزيع معروفاً. وتجدر الإشارة إلى أن توزيع المرسلات/المستقبلات يعتمد على سيناريوهات النشر المحددة لمصادر التداخل/المستقبلات المتأثرة، التي ينبغيأخذها في الاعتبار، ولكن ليس من السهل دائماً تحديد خصائصها.

المرفق A للملحق 1

الشكل الهندسي لمسار مستقيم أرض-فضاء

تحري طريقة الخطى المتدرجة التالية حساب المسافة وزاوية الارتفاع والاتجاه الزاوي السمتى لمحطة فضائية كما ترى من محطة أرضية. وهي تستند إلى الشكل الهندسى الكروي للأرض، وتجاهله تأثير الانكسار الجوى. وليس الأخطاء المرافقة لها مهمة في حساب خسارة الإرسال الأساسية في الفضاء الحرّ من طول المسار.

ولأغراض أخرى يكون الفرق بين زاوية الارتفاع في الفضاء الحر وزاوية الارتفاع الظاهرة كبيراً. ويقدم المرفق B طائقاً للتحويل بين هاتين الزاويتين.

وتتمثل مدخلات عملية الحساب بما يلي:

H_s : ارتفاع المحطة الفضائية (km) فوق مستوى سطح البحر

H_t : ارتفاع المحطة الأرضية (km) فوق مستوى سطح البحر

φ_s : خط عرض مسقط السائل (خط العرض صفر للسائل المستقر بالنسبة إلى الأرض)

φ_t : خط عرض المحطة الأرضية

8: الفرق في خط الطول بين مسقط السائل والمحطة الأرضية، ويكون محدوداً بأقل من نصف دائرة، ويأخذ قيمة موجبة إذا كانت المحطة الفضائية واقعة شرق المحطة الأرضية.

الخطوة 1: حساب المسافتين بين مركز الأرض وكل من المخطة الفضائية والمخطة الأرضية، على التوالي:

$$(18) \quad R_s = R_e + H_s \quad (\text{km})$$

$$(18\text{ب}) \quad R_t = R_e + H_t \quad (\text{km})$$

حيث:

$$(18\text{ج}) \quad R_e = \text{average Earth radius} = 6371 \quad (\text{km})$$

الخطوة 2: حساب الإحداثيات الديكارتية للمخطة الفضائية حيث تقع نقطة أصل المحاور في مركز الأرض، ويكون المحور Z متوجهاً نحو الشمال (بحيث يكون القطب الشمالي على المحور الموجب Z)، ويقع المحور X في دائرة الطول للمخطة الأرضية:

$$(19) \quad X_1 = R_s \cos(\varphi_s) \cos(\delta) \quad (\text{km})$$

$$(19\text{ب}) \quad Y_1 = R_s \cos(\varphi_s) \sin(\delta) \quad (\text{km})$$

$$(19\text{ج}) \quad Z_1 = R_s \sin(\varphi_s) \quad (\text{km})$$

الخطوة 3: تدوير المحاور الديكارتية حول المحور Y بحيث يمر المحور Z عبر المخطة الأرضية، ومن ثم نقل نقطة الأصل بدون دوران بحيث تتطابق نقطة الأصل مع المخطة الأرضية:

$$(20) \quad X_2 = X_1 \sin(\varphi_t) - Z_1 \cos(\varphi_t) \quad (\text{km})$$

$$(20\text{ب}) \quad Y_2 = Y_1 \quad (\text{km})$$

$$(20\text{ج}) \quad Z_2 = Z_1 \sin(\varphi_t) + X_1 \cos(\varphi_t) - R_t \quad (\text{km})$$

الخطوة 4: حساب مسافة الخط المستقيم بين المخطة الأرضية والمخطة الفضائية:

$$(21) \quad D_{ts} = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2} \quad (\text{km})$$

الخطوة 5: حساب طول الخط الممثل بالرمز D_{ts} والمسقط على المستوى XY:

$$(22) \quad G_{ts} = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} \quad (\text{km})$$

الخطوة 6: حساب زاوية ارتفاع الخط المستقيم الممتد من المخطة الأرضية إلى المخطة الفضائية:

$$(23) \quad \theta_0 = \text{atan2}(G_{ts}, Z_2) \quad (\text{angle above horizontal})$$

حيث تعطى الدالة $\text{atan2}(x, y)$ قيمة الزاوية التي لها $\arctan(x/y)$ لأي ربع من الدائرة كلها.

الخطوة 7: البدء بحساب الاتجاه الزاوي السمتى للخطة المستقيم الممتد من المخطة الأرضية إلى المخطة الفضائية بالنسبة إلى الجنوب الحقيقى:

$$(24) \quad \psi = \text{atan2}(X_2, Y_2)$$

الخطوة 8: إعادة أسناد قيمة ψ لتكون متوجهة للشرق بدءاً من الشمال الحقيقى من خلال طرحها من نصف الدائرة. وبحسب تنفيذ الدالة atan2 , قد يحتاج الاتجاه الزاوي إلى المعالجة ضمن المدى (360-0) درجة. ولا يتحدد الاتجاه الزاوي إذا كانت زاوية الارتفاع تمثل مساراً عمودياً.

تعطى المعادلة (23) زاوية ارتفاع الشعاع عند المخطة الأرضية θ_0 التي يمكن أن توجد في غياب الانكسار التربوسيفيري، ويشار إليها أحياناً باسم زاوية الارتفاع في الفضاء الحرّ. ويمكن تقدير قيمة زاوية ارتفاع الظاهرة θ انطلاقاً من θ_0 باستخدام المعادلة (25) الواردة في المرفق B.

المرفق B للملحق 1

التحويل بين زوايا ارتفاع الظاهرة وزوايا ارتفاع الفضاء الحرّ

تقدم العبارات التالية طريقة للتحويل بين تفسيرين لزاوية ارتفاع مخطة فضائية كما ترى من مخطة أرضية.

‘1’ زاوية الارتفاع في الفضاء الحر θ_0 : وهي زاوية الارتفاع المحسوبة دونأخذ الانكسار الجوي في الاعتبار.

‘2’ زاوية الارتفاع الظاهرة أو الفعلية: وهي زاوية الارتفاع المحسوبة معأخذ الانكسار الجوي في الاعتبار. وهي زاوية الارتفاع المثلثي لهوائي ذي كسب مرتفع عند المخطة الأرضية معدّ لتوفير وصلة إلى المخطة الفضائية.

وبسبب الانكسار الجوي، تكون θ أكبر من θ_0 في الظروف الجوية العادية. ويكون الفرق كبيراً على زوايا ارتفاع المنخفضة.

وإذا كانت θ_0 معروفة، تعطى θ بالمعادلة:

$$(25) \quad \theta = \theta_0 + \tau_{fs} \quad (\text{degrees})$$

حيث يعبر عن θ_0 بالدرجات، و τ_{fs} تغير زاوية الارتفاع الناجم عن الانكسار عبر الغلاف الجوي. وفي حالة مخطة أرضية على ارتفاع 3 km ، وإذا كانت $10^\circ \leq \theta_0 \leq -1^\circ$ درجة، يمكن تقدير τ_{fs} بواسطة الصيغة التالية:

$$(26) \quad \tau_{fs} = \frac{1}{T_{fs1} + H_t T_{fs2} + H_t^2 T_{fs3}} \quad (\text{degrees})$$

حيث:

$$(26) \quad T_{fs1} = 1,728 + 0,5411\theta_0 + 0,03723\theta_0^2$$

$$(26\text{ب}) \quad T_{fs2} = 0,1815 + 0,06272\theta_0 + 0,01380\theta_0^2$$

(ج) (26)

$$T_{fs3} = 0,01727 + 0,008288\theta_0$$

وإذا كانت θ معروفة، تعطى θ_0 بالمعادلة:

$$(27) \quad \theta_0 = \theta - \tau \quad (\text{degrees})$$

حيث يمكن على نحو مماثل تقدير τ بواسطة الصيغة التالية:

$$(28) \quad \tau = \frac{1}{T_1 + H_t T_2 + H_t^2 T_3} \quad (\text{degrees})$$

حيث:

$$(28) \quad T_1 = 1,314 + 0,6437\theta + 0,02869\theta^2$$

$$(28) \quad T_2 = 0,2305 + 0,09428\theta + 0,01096\theta^2$$

$$(28) \quad T_3 = 0,008583$$

المرفق C للملحق 1

التوهين الناجم عن الغازات الجوية

مقدمة 1.C

يقدم هذا المرفق خوارزمية التنبؤ بالتوهين الناجم عن الغازات الجوية لمسارات أرض-فضاء وأرض. وتنطبق الخوارزمية على ترددات تصل إلى 1 000 GHz وهي تتحسب قيمتي علو المخطة الأرضية والمحطة الفضائية وزاوية الارتفاع في المخطة الأرضية أو المخطة الفضائية. وترد الخوارزمية في الفقرة 2.C، وبحدوّل معلمات مدخلاتها في الفقرة 3.C. ويرد إجراء تنفيذ خوارزمية التنبؤ بالتوهين الجوي على طول مسار فضاء-أرض في الفقرة 4.C وعلى طول مسار أرض-فضاء، في الفقرة 5.C.

خوارزمية التنبؤ بالتوهين 2.C

تستند الخوارزمية إلى المعادلة (11) من التوصية 6-ITU-R P.676 التي تعطي التكامل التالي للتوهين بين محطة أرضية على علو H_e (km) ومحطة فضائية على علو H_s (km).

$$(29) \quad A_g = \int_{H_e}^{H_s} \frac{\gamma(h)}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}} dh$$

حيث:

γ : هو التوهين الجوي النوعي (dB/km) المحسوب باستخدام طريقة الأسطر المتدرجة في المعادلة (1) من الملحق 1 بالتوصية ITU-R P.676.

φ : زاوية الارتفاع المحلية على علو h

وعكّن حساب زاوية الارتفاع φ على علو h من تطبيق قانون سنيل (Snell) في الإحداثيات القطبية على النحو التالي:

$$(30) \quad \cos \varphi = \frac{(R_e + H_e)n(H_e)}{(R_e + h)n(h)} \cos \varphi_e$$

حيث R_e هو متوسط نصف قطر الأرض (km 6 371)، و H_e هو علو مرسل المخطة الأرضية، و φ_e ، هي زاوية ارتفاع الحزمة الرئيسية للمخطة الأرضية، و $n(h)$ هو مؤشر الانكسار الراديوي على علو h ، محسوباً من المعادلتين (1) و (2) من التوصية ITU-R P.453-14.

والتوهين الجوي النوعي، γ ، هو دالة لضغط الهواء الجاف وحرارة الهواء والضغط الجزيئي لبخار الماء. وفي غياب البيانات الوصفية المحلية للحرارة وضغط الهواء الجاف والضغط الجزيئي لبخار الماء مقابل العلو (من بيانات المسبار الراديوي على سبيل المثال)، يمكن استخدام أي من الأغلفة الجوية المعيارية المرجعية الستة (أي متوسط الغلاف الجوي العالمي السنوي المرجعي، أو الغلاف الجوي المرجعي في خطوط العرض المنخفضة، أو الغلاف الجوي الصيفي المرجعي في منتصف خطوط العرض، أو الغلاف الجوي الشتوي المرجعي في منتصف خطوط العرض، أو الغلاف الجوي الصيفي المرجعي في خطوط العرض المرتفعة، أو الغلاف الجوي الشتوي المرجعي في خطوط العرض المرتفعة) الواردة في التوصية 6-835 ITU-R P.

وعكّن تقريب التوهين، A_g ، المحدد بالمعادلة (29) من خلال الجمع التالي، حيث ينقسم الغلاف الجوي إلى طبقات كروية عددها N :

$$(31) \quad A_g = \sum_{n=1}^N \ell_n \gamma_n$$

حيث

$$(32) \quad \ell_n = \sqrt{(r_{n+1})^2 - \{(n_e/n_n)r_e \cos \varphi_e\}^2} - \sqrt{(r_n)^2 - \{(n_e/n_n)r_e \cos \varphi_e\}^2}$$

و γ_n هو التوهين النوعي على علو h . بالإضافة إلى ذلك، r_n و r_{n+1} هما نصف القطر من مركز الأرض إلى الحدود الدنيا والعلوية للطبقة n ($n = 1, \dots, N$).

علمًا بأن $r_{n+1} = r_n + \delta_n$ و δ_n هي سماكة الطبقة العشوائية n . ترد سماكة الطبقة مقابل العلو في المعادلة (14) في التوصية ITU-R P.676، الفقرة 2.2.

وترد معلومات مدخلات الخوارزمية في الفقرة 3.C.

3.C مدخلات الخوارزمية

فيما يلي معلومات مدخلات الخوارزمية:

H_e : علو المخطة الأرضية (km فوق مستوى سطح البحر)

r_e : العلو الشعاعي للمخطة الأرضية من مركز الأرض (km)

H_s : علو المخطة الفضائية (km فوق مستوى سطح البحر)

r_s : العلو الشعاعي للمخطة الفضائية من مركز الأرض (km)

r_n : العلو الشعاعي عند الطبقة n

φ_s : زاوية ارتفاع الحزمة الرئيسية لهائي المخطة الفضائية (درجات)

- $\Delta\varphi_s$: عرض حزمة نصف القدرة هوائي المخطة الفضائية (درجات)
- φ_e : زاوية ارتفاع الحزمة الرئيسية للمخطة الأرضية (درجات)
- $\Delta\varphi_e$: عرض حزمة نصف القدرة للمخطة الأرضية (درجات)
- $\rho(h)$: البيانات الوصفية لعلو كثافة بخار الماء (g/m^3) في الغلاف الجوي
- $T(h)$: البيانات الوصفية لعلو الحرارة في الغلاف الجوي (K)
- $P(h)$: البيانات الوصفية لعلو الضغط الجاف في الغلاف الجوي (hPa)
- $e(h)$: البيانات الوصفية لعلو الضغط الجزيئي لبخار الماء في الغلاف الجوي (hPa);
- $$e(h) = \rho(h) T(h) / 216,7$$
- $n(h)$: البيانات الوصفية لعلو مؤشر الانكسار في الغلاف الجوي
- n_s : مؤشر الانكسار في الغلاف الجوي على علو المخطة الفضائية
- n_e : مؤشر الانكسار في الغلاف الجوي على علو المخطة الأرضية
- n_n : مؤشر الانكسار في الغلاف الجوي عند الطبقية رقم n
- f: التردد (GHz).

4.C التوهين على طول مسار الانتشار فضاء-أرض (الشعاع المابط)

في مسار الانتشار أرض-فضاء، يكون هوائي المخطة الفضائية هو هوائي الإرسال. وبناءً على ذلك، فإن خوارزمية التبؤ بالتوهين الجوي على طول هذا المسار هي:

$$(33) \quad A_g = \sum_{n=1}^N \ell_{ns} \gamma_n$$

حيث

$$(34) \quad \ell_{ns} = \sqrt{(r_{n+1})^2 - \{(n_s/n_n)r_s \cos \varphi_s\}^2} - \sqrt{(r_n)^2 - \{(n_s/n_n)r_s \cos \varphi_s\}^2}$$

γ_n هو التوهين النوعي على علو h . وترتبط أدناه خطوات تنفيذ الخوارزمية أعلاه في حال وقوع زاوية ارتفاع المرسل العشوائي خارج النظير. وفي حال كون مسار نظير، $\varphi_s = 90 - 90$ درجة، يمكن تحطيم الخطوات من 1 حتى 3.

المخطوة 1: استخدام قانون Snell في الإحداثيات القطبية لحساب زاوية الارتفاع الواردة، φ_{ce} ، بالدرجات، في هوائي المخطة الأرضية على النحو التالي:

$$(35) \quad \varphi_{ce} = \cos^{-1} \left\{ \frac{(R_e + H_s)n(H_s)}{(R_e + H_e)n(H_e)} \cos \varphi_s \right\}$$

المخطوة 2: تحديد ما إذا كانت زاوية الارتفاع المحسوبة φ_{ce} تقع ضمن عرض حزمة هوائي المخطة الأرضية. فإذا وقعت ضمنها، يُنتقل إلى الخطوة 3، وإلا التوقف.

وتقع زاوية الارتفاع الواردة φ_{ce} ضمن عرض حزمة نصف القدرة هوائي المخطة الأرضية إذا تحققت المتراجحة التالية:

$$(36) \quad |\varphi_{ce} - \varphi_e| \leq \Delta\varphi_e / 2$$

المخطوة 3: تحديد ما إذا كان خط البصر بين الهوائيين خاليًا من الانتشار عبر المجاري. وفي حال استخدام غلاف جوي معياري، لا يحدث الانتشار عبر المجاري. بل يحدث الانتشار عبر المجاري عند حدود طبقية عشوائية رقمها n إذا تحققت المتراجحة التالية:

$$(37) \quad \frac{(R_e + H_s)n(H_s)}{(R_e + h_n)n(h_n)} \cos \varphi_s \geq 1$$

وتحقيق المتراجحة أعلاه إذا

$$(38) \quad \cos \varphi_s \geq \frac{(R_e + h_n)n(h_n)}{(R_e + H_s)n(H_s)}$$

وفي حال خلو خط البصر من الانتشار عبر المجاري، ينتقل إلى الخطوة 4، وإلا التوقف.

الخطوة 4: حساب طول المسار المائل ℓ_{ns} داخل كل طبقة من المعادلة (34).

الخطوة 5: حساب التوهين النوعي للغلاف الجوي γ_n داخل كل طبقة بدلالة معلمات الغلاف الجوي داخل الطبقة من المعادلة (1) في الملحق 1 بالنوصية ITU-R P.676.

الخطوة 6: حساب التوهين الغازي الكلي على طول المسار المائل فضاء-أرض A_g من المعادلة (33).

5.C التوهين على طول مسارات الانتشار أرض-فضاء (شعاع صاعد)

في مسار الانتشار أرض-فضاء، يكون هوائي المخطة الأرضية هو هوائي الإرسال. وبناءً على ذلك، فإن خوارزمية التنبؤ بالتهين الجوي على طول هذا المسار هي:

$$(39) \quad A_g = \sum_{n=1}^N \ell_{ne} \gamma_n$$

$$(40) \quad \ell_{ne} = \sqrt{(r_{n+1})^2 - \{(n_e/n_n)r_e \cos \varphi_e\}^2} - \sqrt{(r_n)^2 - \{(n_e/n_n)r_e \cos \varphi_e\}^2}$$

وهناك حالتان لتطبيق هذه الخوارزمية:

الحالة 1 حيث تكون زاوية الارتفاع φ_e عند هوائي المخطة الأرضية غير سالبة،

والحالة 2 حيث تكون زاوية الارتفاع φ_e عند هوائي المخطة الأرضية سالبة.

الحالة 1: زوايا ارتفاع غير سالبة ($\varphi_e \geq 0$)

ترد أدناه خطوات تنفيذ الخوارزمية أعلاه في حال وقوع زاوية ارتفاع المرسل العشوائي خارج النظير. وفي حال كون مسار نظير، $\varphi_e = 90^\circ$ درجة، يمكن تحضير الخطوات من 1 حتى 3.

الخطوة 1: استخدام قانون Snell في الإحداثيات القطبية لحساب زاوية الارتفاع φ_{cs} ، بالدرجات، في هوائي المخطة الفضائية على التحويل التالي:

$$(41) \quad \varphi_{cs} = \cos^{-1} \left(\frac{(R_e + H_e)n(H_e)}{(R_e + H_s)n(H_s)} \cos \varphi_e \right)$$

الخطوة 2: تحديد ما إذا كانت زاوية الارتفاع المحسوبة φ_{ce} تقع ضمن عرض حزمة هوائي المخطة الفضائية. فإذا وقعت ضمنها، ينتقل إلى الخطوة 3، وإلا التوقف.

وتقع زاوية الارتفاع φ_{cs} ضمن عرض حزمة نصف القدرة هوائي المخطة الفضائية إذا تحققت المتراجحة التالية:

$$(42) \quad |\varphi_{cs} - \varphi_s| \leq \Delta \varphi_s / 2$$

الخطوة 3: تحديد ما إذا كان خط البصر بين الهوائيين خاليًا من الانتشار عبر المجاري؛ علمًا بأن الانتشار عبر المجاري لا يحدث في حال استخدام غلاف جوي معياري، ولا يلزم تحديده. بل يحدث الانتشار عبر المجاري عند حدود طبقة ما إذا تحققت المتراجحة التالية:

$$(43) \quad \cos \varphi_s \geq \frac{(R_e + h_n)n(h_n)}{(R_e + H_s)n(H_s)}$$

وفي حال خلو خط البصر من الانتشار عبر المجاري، ينتقل إلى الخطوة 4، وإلا التوقف.

الخطوة 4: حساب طول المسار المائل ℓ_{ne} داخل كل طبقة من المعادلة (40).

الخطوة 5: حساب التوهين النوعي للغلاف الجوي γ_n داخل كل طبقة بدلالة معلمات الغلاف الجوي داخل الطبقة من المعادلة (1) في الملحق 1 بالنوصية ITU-R P.676.

الخطوة 6: حساب التوهين الغازي الكلي على طول المسار المائل أرض-فضاء A_g من المعادلة (39).

الحالة 2: زوايا ارتفاع سالبة ($\varphi_e < 0$)

في حال $\varphi_e < 0$, يمكن حساب التوهين في المعادلة (29) على أنه مجموع مسارين، أحدهما من علو المخطة الأرضية إلى مطراف افتراضي على ارتفاع العلو الأدنى، H_{min} , والآخر من المطراف الافتراضي إلى علو المخطة الفضائية:

$$(44) \quad A_g = A_{\text{Earth} \rightarrow H_{min}} + A_{H_{min} \rightarrow \text{space}}$$

حيث H_{min} هو العلو الذي توازي فيه الحزمة الراديوية سطح الأرض. ويمكن تعريف H_{min} بالمعادلة التجاوزية التالية:

$$(45) \quad (R_e + H_{min}) n(H_{min}) - (R_e + H_e) n(H_e) \cos \varphi_e = 0$$

الخطوة 1: إن لم يُعطَ المشتق الأول مؤشر الانكسار في الغلاف الجوي فيما يتعلق بالعلو، يمكن حل المعادلة (45) بالنسبة إلى H_{min} باستخدام المعادلة (15) من النوصية ITU-R P.676.

وإذاً أعطيت قيمة المشتق الأول مؤشر الانكسار في الغلاف الجوي، يكون الحل التكراري للمعادلة (45) كما يلي:

$$(46) \quad H_{min}^i = H_{min}^{i-1} - \frac{\{R_e + H_{min}^{i-1}\} n(H_{min}^{i-1}) - \{R_e + H_e\} n(H_e) \cos \varphi_e}{n(H_{min}^{i-1}) + \{R_e + H_{min}^{i-1}\} n'(H_{min}^{i-1})}$$

حيث H_{min}^i هي القيمة المحسوبة للعلو H_{min} بناءً على التكرار رقم i ($i = 1, 2, 3, \dots$) لالمعادلة (46)، مع كون $H_e = H_{min}^0$. علاوة على ذلك، $n(H_{min}^{i-1})$ و $n'(H_{min}^{i-1})$ هي قيم مؤشر الانكسار في الغلاف الجوي ومشتقاته من الدرجة الأولى المحسوبة على العلو، H_{min} ، المحصل من التكرار رقم $(i-1)$ الذي يساوي H_{min}^{i-1} .

وبنهاية إنتهاء الإجراء التكراري في المعادلة (46) عند تحقق المتراجحة التالية:

$$(47) \quad |H_{min}^i - H_{min}^{i-1}| \leq |H_{min}^i + H_{min}^{i-1}| \times 10^{-p_H}$$

حيث 10^{-p_H} هي الدقة المطلوبة للعلو H_{min} ويتراوح الأس p_H عادة بين 5 و 10.

الخطوة 2: عند تحديد قيمة العلو H_{min} , تكون معاملة مطراف افتراضي بزاوية ارتفاع صفرية كما لو كان على هذا العلو. ثم يمكن الحصول على التوهين كمجموع قيم التوهين على مساري الانتشار:

- مسار انتشار واحد يمتد من المرسل الأرضي إلى المطراف الافتراضي لاحتساب الحد الأول من المعادلة (44)،
- مسار انتشار واحد يمتد من المطراف الافتراضي إلى المستقبل الفضائي لحساب الحد الثاني من المعادلة (44)،

حيث يمكن حساب التوهين على طول كل مسار باستخدام الطريقة المذكورة في الحالة 1.

المرفق D للملحق 1

التلاؤ التروبوسفيري

1.D مقدمة

ينجم التلاؤ التروبوسفيري عن الاضطراب الجوي ويعود إلى حد الأقصى في الطبقة الجوية المصاحبة لتكوين السحب، ويكون له أكبر تأثير في الغلاف الجوي السفلي.

وتنطبق عملية الحساب الواردة في هذا المرفق على مسار وحيد بين مرسل واحد ومستقبل واحد. آلية التلاؤ لا تنتص الطاقة من الموجة الراديوية بل تعيد توزيعها وفق عملية تركيز وإعادة تركيز، مسببة توزيعاً حالات الخبّ والتحسن المكاني والزمني.

ونخفض شدة التلاؤ بتحديد المتوسط المكاني لهوائي ذي فتحة فعلية كبيرة مقارنة بالتغيير المكاني. وعلى نحو مماثل، ففي الحالة التي تصل فيها عدة إشارات إلى المستقبل المتضرر بشدّات متماثلة، تميل حالات الخبّ والتحسن إلى إلغاء بعضها البعض ويمكن عندئذ تجاهل الآلية.

وتعطي عملية الحساب مستوى تحسّن التلاؤ (dB) الذي يتم تجاوزه لمنطقة معينة من الوقت يحسب خلالها متوسط N_{wet} . ويستند النموذج إلى قياسات في الحالة $(100-0,01)\% \leq p \leq 0,01\%$ ، ولكنه يعطي نتائج مجدية في الحالة $(100-0,001)\% \leq p \leq 0,001\%$. ويكون التحسّن سالباً من أجل $50\% > p$ ، ما يدل على خبّ للتلاؤ.

2.D شدة التلاؤ

تستخدم الطريقة الواردة في الفقرة 1.4.2 من النوصية 12-618-R ITU-R لحساب شدة التلاؤ σ . وإذا اقتضى الأمر، يمكن تقدير الفتاحة الفعلية لهوائي الحطة الأرضية من كسب الهوائي في اتجاه المسار باستخدام المعادلة:

$$(48) \quad D_{eff} = 0,3 \cdot 10^{0,05G_a} / (\pi \cdot f) \quad (m)$$

3.D التغير قصير الأمد للتلاؤ التروبوسفيري

بالنسبة إلى شدة تلاؤ معينة σ_{st} ، يمكن التعبير عن التغير قصير الأمد لمستوى الإشارة التي يتلقاها هوائي بواسطة حالات الخبّ والتحسن التي يتم تجاوزها لمنطقة معينة من الوقت. وهناك معادلات تجريبية منفصلة تعطي المعاملات الخاصة بحالات التحسّن والخبّ عندما يعبر عنها بوحدات dB، وذلك على النحو التالي:

يعطى معامل التحسّن الذي يتم تجاوزه لمنطقة معينة p من الوقت لا تتعدي 50% بالمعادلة التالية:

$$(49) \quad a_{ste}(p) = 2,672 - 1,258\log(p) - 0,0835[\log(p)]^2 - 0,0597[\log(p)]^3$$

يعطى معامل الخبّ الذي يتم تجاوزه لمنطقة معينة ($p - q = 100 - q$) من الوقت تزيد على 50% بالمعادلة التالية:

$$(49b) \quad a_{stf}(q) = 3,0 - 1,71\log(q) + 0,072[\log(q)]^2 - 0,061[\log(q)]^3$$

وبالتالي يعطي التوهين الناجم عن التأثير التربوسيفيري الذي لا يتم تجاوزه لنسبة مئوية p من الوقت بالمعادلة التالية:

$$(50) \quad A_{st}(p) = \begin{cases} -\sigma_{st} a_{ste}(p) & \text{if } p \leq 50 \\ \sigma_{st} a_{stf}(100 - p) & \text{وإلا} \end{cases} \quad (\text{dB})$$

ويكون التوهين $(A_{st}(p))$ أقل من الصفر في الحالة $50 > p$, ما يشير إلى تحسن في مستوى الإشارة.

المرفق E للملحق 1

خلوص الخدمة مع مراعاة الانكسار الجوي

يقدم هذا المرفق طريقة تتبع شعاع يطلق من محطة أرضية لاختبار ما إذا كان هناك عوائق في مساره. ويمكن استخدامها لوضع مظهر جانبي لشعاع مرتفع بالنسبة لمستوى سطح البحر يمكن مقارنته فيما بعد بالمؤشر الجانبي للتضاريس. وفيما يلي مدخلات هذه الطريقة:

H_t : ارتفاع المحطة الأرضية (km) فوق مستوى سطح البحر

θ : زاوية الارتفاع الظاهرة عند المحطة الأرضية، $5 \leq \theta \leq 90$ deg.

يقدم المرفق A طريقة لحساب زاوية ارتفاع المسار في الفضاء الحرّ θ_0 . ويمكن استخدام المعادلة (25) في المرفق B للحصول على زاوية الارتفاع الظاهرة θ . ويمكن أن تكون θ_0 أو θ سالبة. وبحسب التضاريس الأرضية، فإن ذلك لا يعني بالضرورة أن المسار يحتوي على عوائق. ويطلب استخدام هذه الطريقة النفاد إلى بيانات طبوغرافية مفصلة قد يتغير شراؤها.

ويسمح المرفق A أيضاً بحساب المسار أرض-فضاء الذي قد يكون ضرورياً للحصول على مظهر جانبي للتضاريس الواقع تحت المسار. وتحري عملية حساب الخلوص الرأسي على النحو التالي:

ومن الناحية التصورية، يطلق الشعاع بزاوية الارتفاع θ ويتم تتبعه مع الأخذ في الاعتبار التدرج الرأسي لدليل الانكسار كدالة في الارتفاع. وتكرر المعادلات (55) إلى (58)، حيث ينتج عن كل تكرار قيم جديدة لمسافة الأفقية على أرض منحنية، D_c (km) ولاارتفاع الشعاع فوق مستوى سطح البحر، H_r (km)، إلى أن يصل الشعاع إلى ارتفاع كافٍ ليصبح حالياً من العوائق المحتملة. وتصلح الطريقة لارتفاعات تصل إلى 10 km فوق مستوى سطح البحر.

تسند قيمة أولية:

$$(51) \quad \text{ارتفاع الشعاع (km) فوق مستوى سطح البحر} \quad H_r = H_t$$

$$(52) \quad \text{المسافة الأفقية على أرض منحنية (km)} \quad D_c = 0$$

$$(53) \quad \text{زاوية ارتفاع الشعاع فوق الأفق المحلي (راديان)} \quad \epsilon = \theta$$

تحدد الزيادة في المسافة الأفقية على أرض منحنية:

$$(54) \quad \delta_d = 1 \quad (\text{km})$$

تكرر المعادلات من (55) إلى (58) ضمناً لحساب القيم المتتالية للمسافة D_c والارتفاع H_r .

بداية الحلقة

تحسب الزيادة في زاوية ارتفاع الشعاع:

$$(55) \quad \delta_\varepsilon = \delta_d \left[\frac{1}{1R_e} - 4,28715 \cdot 10^{-5} \exp\left(-\frac{H_r}{7,348}\right) \right] \quad (\text{radians})$$

حيث R_e تساوي 6 371 km، متوسط نصف قطر الأرض.

يعاد إسناد قيمة ارتفاع الشعاع:

$$(56) \quad H_r = H_r + \delta_d \varepsilon \quad (\text{km})$$

يعاد إسناد قيمة زاوية ارتفاع الشعاع:

$$(57) \quad \varepsilon = \varepsilon + \delta_\varepsilon \quad (\text{radians})$$

يعاد إسناد قيمة المسافة الأفقية على أرض منحنية:

$$(58) \quad D_c = D_c + \delta_d \quad (\text{km})$$

نهاية الحلقة

ينبغي أن تستمر عملية الحلقة الواردة أعلاه إلى أن يتتجاوز ارتفاع الشعاع أي عائق أرضي محتمل ويصل إلى 10 km فوق مستوى سطح البحر. وقد يكون من السهل تخزين القيم المتتالية للمسافة D_c والارتفاع H_r في صفيف من عمودين ومقارنتهما فيما بعد مع أحد المظاهر الجانبية للتضاريس الأرضية وربما مع عوائق أخرى (مع الإشارة إلى أن هذه الأخيرة تجمع عادة بارتفاعات بالأمتار) في الاتجاه السمتى الوارد في الخطوة 8 الواردة في المرفق A.

وبالنسبة لزوايا الارتفاع التي تزيد على 5 درجات، يمكن تجاهل الانكسار الجوي، ويمكن حساب ارتفاع الشعاع على مسافة d (km) من المخطة الأرضية بالمعادلة:

$$(59) \quad H_r = H_t + d \tan(\theta) + \frac{d^2}{2R_e} \quad (\text{km})$$

**المرفق F
للملحق 1**

اختبار معرفة ما إذا كان حساب الانتشار بالهواء ضرورياً

يقدم هذا المرفق وصفاً لاختبار بسيط يقدر القدرة الواردة بسبب الانتشار بالهaze في حجم مشترك بين حزمتي هوائي أسطوانيتين إذا كان معدل الأمطار R_{rain} mm/hr (وقت التكامل دقيقة واحدة). ويتم تجاهل انفراج الحزمة مع زيادة المسافة عن الهوائي الخاص بها.

وتعمل طريقة الحساب نحو المغالاة في تقدير القدرة الواردة المنتشرة من خلال تجاهل التوهين بسبب المطر على امتداد مسار انتشار المطر، وافتراض عدم امتصاص قطرات المطر لأي قدرة.

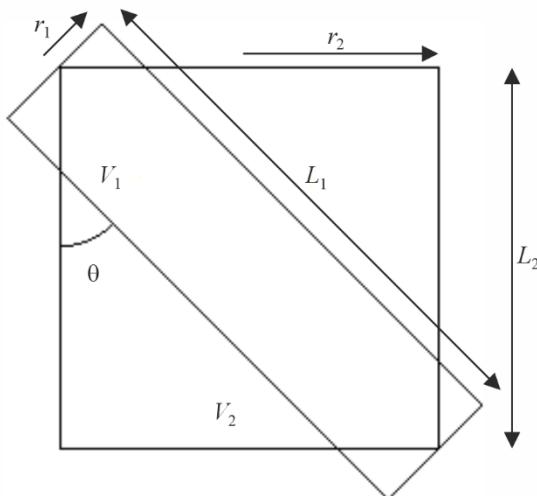
ويبيّن الشكل F.1 الشكل الهندسي لأسطوانيتين متلالن حزمتي هوائيين، يرمز إليهما بالرموز 1 و 2، ويتمثل نصفاً قطريهما بالرموز r_1 و r_2 (m)، وطولاهما بالرموز L_1 و L_2 (m)، وحجمها بالرموز V_1 و V_2 (m^3). ويتطابق محوراً الأسطوانيتين في مركز المخطط. وتتمثل زاوية الانتشار θ بالزاوية الواقعية بين اتجاه انتشار القدرة الواردة في إحدى الأسطوانيتين واتجاه القدرة المنتشرة التي تنتقل نحو المستقيم المتضمن. ويعتبر الاختبار موثوقاً إذا كانت $90^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$.

وبينيّع عدم إيلاء أي أهمية لاتجاه الأسطوانيتين في الشكل 11 بالنسبة للخط الرأسي. فقد تمثل أي منهما حزمة المخططة الأرضية. ومع ذلك، تقضي إحدى العمليات التقريبية المستخدمة في الحساب بافتراض أن التوهين بسبب المطر منتظم داخل الحجم المشترك للأسطوانيتين. والمطر لا يكون منتظمًا من الناحية المكانية ما قد يؤدي ذلك إلى مغالاة في تقدير الخسارة. وبينيّع عدم استخدام هذا الاختبار إذا تجاوز الامتداد الأفقي للحجم المشترك القيمة $-0,08 R_{rain}^{0,08} 600$ متر.

وبينيّع أن يحسب نصفاً القطر r_1 و r_2 انطلاقاً من حافتي حزمتي هوائيين عند -3 dB عند النقطة التي يتتطابق فيها محوراً التسديد. ويعطي الاختبار تقديرًا للقدرة غير المرغوبة للانتشار بالهaze التي يتلقاها المستقيم المتضمن والتي يتم تجاوزها لتبنيّع مئوية معينة p من الوقت.

الشكل 11

الحجم المشترك لحزمتي أسطوانيتين



P.0619-11

وينفذ الاختبار بالخطوات التالية.

الخطوة 1: حساب طول الأسطوانتين:

$$(60) \quad L_1 = \frac{2r_2}{\sin(\theta)} \quad (\text{m})$$

$$(60\text{b}) \quad L_2 = \max(L_1 \cos(\theta), 2r_1 \sin(\theta)) \quad (\text{m})$$

حيث تعطى الدالة \max القيمة الأكبر بين المتغيرين المستقلين المخاضين بها.

الخطوة 2: حساب كثافة تدفق القدرة S بوحدات dB(W) الواردة إلى الطرف الدائري للأسطوانة التي تمثل الحزمة غير المرغوبة. وعken إجراء ذلك بطرق عده. فإذا كانت القدرة المشعة المكافحة المتناحية (e.i.r.p) للمرسل متاحة، يمكن حساب S بواسطة المعادلة:

$$(61) \quad S = P_{eirp} - 20\log(d_{tx}) - \gamma_g d_{tx} - 71,0 \quad (\text{dB(W/m}^2\text{)})$$

حيث:

P_{eirp} : القدرة المشعة المكافحة المتناحية (e.i.r.p) للمرسل غير المرغوب (dB(W))

d_{tx} : المسافة بين المرسل غير المرغوب والحجم المشترك بوحدات km

γ_g : التوهين النوعي الناجم عن الغازات الجوية بوحدات dB/km، على النحو الوارد في التوصية ITU-R P.676.

وعken حساب P_{eirp} على النحو التالي:

$$(61) \quad P_{eirp} = P_{tx} + G \quad \text{dB(W)}$$

حيث:

P_{tx} : القدرة المشعة الإجمالية للمرسل غير المرغوب (dB(W))

G : كسب الهوائي بوحدات dBi باتجاه الحجم المشترك.

الخطوة 3: حساب القدرة التي تدخل في الطرف المضاء للأسطوانة التي تمثل الحزمة غير المرغوبة، تبعاً لما إذا كانت الأسطوانة 1 أو 2. إذا كانت الأسطوانة 1:

$$(62) \quad P_{in} = S + 10\log(\pi r_1^2) \quad \text{dB(W)}$$

وإلا:

$$(62\text{b}) \quad P_{in} = S + 10\log(\pi r_2^2) \quad \text{dB(W)}$$

الخطوة 4: حساب القدرة التي تخرج من الطرف الآخر للأسطوانة التي تمثل الحزمة غير المرغوبة، تبعاً لما إذا كانت الأسطوانة 1 أو 2. إذا كانت الأسطوانة 1:

$$(63) \quad P_{out} = P_{in} - 0,001\gamma_r L_1 \quad \text{dB(W)}$$

وإلا:

$$(63) \quad P_{out} = P_{in} - 0,001\gamma_r L_2 \quad \text{dB(W)}$$

حيث:

γ_r تمثل التوهين النوعي بسبب المطر الذي يتم تجاوزه لنسبة مئوية p من الوقت وتعطى بالمعادلة:

$$(63) \quad \gamma_r = k R_{rain}^\alpha \quad \text{dB/km}$$

: المعدل المحلي لتساقط الأمطار المحلي بوحدات mm/h ولوقت تكامل من دقة واحدة الذي يتم تجاوزه لنسبة مئوية p من الوقت

و α : معامل ارتداد تعطيهما النوصية ITU-R P.838 . k

الخطوة 5: حساب القدرة الإجمالية المنتشرة من الأسطوانة التي تمثل الحزمة غير المرغوب:

$$(64) \quad P_{scat} = 10 \log(10^{0,1P_{in}} - 10^{0,1P_{out}}) \quad \text{dB(W)}$$

الخطوة 6: بافتراض في هذه المرحلة أن تناشر المطر متباين، حساب القدرة المشعة المكافحة المتناثرة (e.i.r.p.) المتناثرة داخل الحجم المشترك، تبعاً لما إذا كانت الحزمة غير المطلوبة ممثلة بالأسطوانة 1 أو 2.

إذا كانت الأسطوانة 1:

$$(65) \quad P_{eirps} = P_{scat} \quad \text{dB(W)}$$

وإلا:

$$(65) \quad P_{eirps} = P_{scat} - 10 \log\left(\frac{r_2^2 L_2}{r_1^2 L_1}\right) \quad \text{dB(W)}$$

الخطوة 7: حساب معامل يأخذ في الاعتبار الانثار غير المتناثري فوق 10 GHz :

$$(66) \quad \text{dB}F_{nis} = 10^{-3} R_{rain}^{0.4} \cos(\theta) \begin{cases} 2(f - 10)^{1.6} - 2.5(f - 10)^{1.7} & \text{if } f > 10 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

حيث:

. (GHz) : التردد f

الخطوة 8: تقدير القدرة المتناثرة غير المرغوبة الواردة إلى الهوائي المعرض للتداخل باستخدام:

$$(67) \quad P_{txs} = P_{eirps} + F_{nis} - 20 \log(d_{rx}f) - \gamma_g d_{rx} - 92,4 \quad \text{dB(W)}$$

حيث:

d_{rx} : المسافة (km) بين الهوائي المعرض للتدخل والحجم المشترك الممثل بالأسطوانتين

P_{txs} : تقدير القدرة المتباعدة غير المرغوبة. وينبغي إجراء الحساب الكامل للانتشار بالملطى إذا كان $P_{int} - P_{txs} < 20$ dB، حيث تمثل P_{int} عتبة التدخل في المستقبل.
