الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصيـــة ITU-R S.1857

(2010/01)

منهجيات لتقدير مستويات كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور ولتقييم التداخل باتجاه السواتل المجاورة الناجم عن أخطاء التوجيه للمحطات الأرضية المركبة على المركبات في نطاق ترددي عرضه 14 GHz

السلسلة S

الخدمة الثابتة اللاسلكية

تمهيـــد

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 الملحق 1 بالقرار ITU-R 1. وترد الاستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

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

السلسلة	العنـــوان
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
S	**الخدمة الثابتة الساتلية**
RS	أنظمة الاستشعار عن بعد
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، 2010

© ITU 2010

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).

التوصيـــة ITU-R S.1857

منهجيات لتقدير مستويات كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور ولتقييم التداخل باتجاه السواتل المجاورة الناجم عن أخطاء التوجيه للمحطات الأرضية المركبة على المركبات في نطاق ترددي عرضه 14 GHz

(المسألة ITU-R 208/4)

(2010)

مجال التطبيق

تعرض هذه التوصية الخصائص العامة لخطأ توجيه هوائي المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات والمزودة بأنظمة تتبع بهوائي فاعل. وتقدم التوصية وسيلة لتقدير إحصاءات تغيّرات كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) جراء أخطاء التوجيه. وعلاوة على ذلك، فإنها توفر منهجية لتقييم أي تداخل محتمل باتجاه السواتل المجاورة في أنظمة الخدمة الساتلية الثابتة ذات المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض (FSS GSO).

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن سواتل الخدمة الساتلية الثابتة ذات المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض مناسبة تماماً لتقديم خدمات الإنترنت والبيانات من خلال مجموعة واسعة من تشكيلات الشبكة؛

ب) أن هناك حاجة متزايدة لدعم تنقلية المستخدم وخدمات النطاق العريض للمستخدمين النهائيين؛

ج) أن مطاريف المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات (VMES) يمكن أن توفر مجموعة واسعة من خدمات الاتصالات عبر سواتل الخدمة الساتلية الثابتة في نطاق ترددي عرضه 14 GHz؛

د) أن الضرورة تدعو لحماية شبكات الخدمة الساتلية الثابتة من أي تداخل محتمل من مطاريف المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات هذه؛

هـ) أن كفاءة استخدام مطاريف المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات لطيف الترددات الراديوية والمدار المستقر بالنسبة إلى الأرض يمكن أن يتحقق من خلال استخدام نموذج كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور والتداخل من هذه المطاريف؛

و) أن المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات (VMES) تتطلب نُهُجاً إحصائية لتحديد مستويات كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور والتداخل على السواتل المجاورة؛

ز) أن الشبكات الساتلية التي تستعمل المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات يمكن تصميمها لتلتزم بحدود التداخل التي يتطلبها مشغلو النظام الساتلي المجاور؛

ح) أنه من المفيد الحصول على منهجيات لتقييم مستويات التداخل وتأثيره على توفر الشبكات الساتلية المتأثرة بفعل التغيّرات في مستويات كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور لهوائيات المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات التي يكون قطرها أقصر من أن يقيَّم على نحو مجدٍ بواسطة الوسائل المتاحة حالياً،

وإذ تلاحظ

أ) أن التوصية ITU-R S.728 تورد المستويات القصوى المسموح بها لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (.e.i.r.p) خارج المحور للمطاريف ذات الفتحة الصغيرة جداً (VSAT)؛

ب) أن التوصية ITU-R S.1323 تورد المستويات القصوى المسموح بها للتداخل ما بين الشبكات الذي يتسبب به بث المحطة الأرضية والفضائية لجميع الشبكات الساتلية الأخرى العاملة في نفس النطاق الترددي،

توصـــي

1 بإمكانية استعمال المنهجية الواردة في الملحق 1 والنموذج المصاحب لها لتقدير مستويات كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (.e.i.r.p) خارج المحور الناجمة عن خطأ في توجيه هوائيات المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات؛

2 بإمكانية استعمال المنهجية الواردة في الملحق 2 لتقييم مستويات التداخل الناجم عن التغيرات في مستويات كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (.e.i.r.p) خارج المحور للمحطات الأرضية المركَّبة على مركبات؛

3 بإمكانية استعمال المنهجية الواردة في الملحق 2 لتقييم تأثير عدم توفر وصلة للنظام المعرَّض للتداخل في الحالات التي تكبر فيها الأخطاء المتغيرة مع الوقت في توجيه هوائيات المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات (VMES) من النمط الموصوف في الملاحظة 2؛

4 ينبغي أن تُعتبر الملاحظات من 1 إلى 5 جزءاً من هذه التوصية:

الملاحظة 1 – يمكن استخدام المنهجية الواردة في الملحق 2 لتقييم آثار التداخل المحتملة للمحطات الأرضية المركَّبة على مركبات.

الملاحظة 2 – وُضعت المنهجيات المقدمة في هذه التوصية للمحطات الأرضية المركَّبة على مركبات ذات الهوائيات العاكسة الاتجاهية بأقطار مكافئة تتراوح ما بين 0,3 و1,0 m، والمزودة بأنظمة تتبع ميكانيكية أو إلكترونية والداعمة لسرعات للمركبة تصل حتى 100 km/h. ولكن يمكن تطبيق هذه المنهجيات على غير ذلك من أقطار الهوائيات وسرعات المركبة.

الملاحظة 3 – تمثل المعلمات والأمثلة الواردة في الملحقات بعض الأنظمة العاملة في نطاق ترددي عرضه 14 GHz.

الملاحظة 4 – تسري المنهجية الموصوفة في هذه التوصية عند إطباق نظام التتبع، في المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات، على ساتله المستهدف.

الملاحظة 5 – لاستخدام هذه التوصية لا بد من معرفة قيم α وc التمثيلية في الفقرة 2 من الملحق 1.

الملحق 1

نموذج لتقدير مستويات كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (.e.i.r.p) خارج المحور الناجمة عن خطأ في توجيه هوائيات المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات (VMES)

1 مقدمة

استرعى الطلبُ مؤخراً على تطبيقات الاتصالات أثناء الحركة اهتماماً في نمط جديد من المطاريف الساتلية. فهذه المطاريف المركّبة على مركبات تتألف عموماً من هوائيات صغيرة عالية الأداء وأنظمة تتبع ذات آليات مؤازرة للتحكم والتوجيه، وتتضمن معدات التردد المتوسط (IF) والتردد الراديوي (RF) الخاصة بكل من هذه الأنظمة. ويُختار قطر الهوائي ومعلمات الإرسال الأخرى لتوفير الاتصالات في الاتجاهين في مختلف التضاريس والظروف التشغيلية. وستعمل المطاريف التي يُنظر فيها في هذا الملحق في الخدمة الساتلية الثابتة ضمن نطاق ترددي عرضه 14 GHz.

ويمكن للمطاريف المركبة على مركبات، على النحو المفصل في هذه المساهمة، أن تتسبب بتداخل إضافي على سواتل مجاورة جراء أخطاء توجيه الهوائي الناجمة عن الحركة. فمن منظور مشغّل الساتل، ينبغي إبقاء هذا التداخل في أدنى مستوى. ومن ناحية أخرى، فإن مقدمي الخدمة سيسعون إلى تصميم أنظمتهم بحيث توفر المطاريف ما يكفي من قدرة الإرسال لدعم تطبيقات المستخدمين النهائيين بمعدلات بيانات معقولة. ويتناول هذا الملحق هذه المطالب المتضاربة، أي الحاجة لإرسال ما يكفي من القدرة دعماً لمعدلات بيانات معقولة مع المحافظة على مستوى للتداخل مقبول لمشغلي السواتل.

في تطبيقات الاتصالات أثناء الحركة، ونظراً لحركة منصة هوائي، يمكن للأخطاء في نظام توجيه الهوائي والتتبع أن تؤدي إلى أخطاء في توجيه الهوائي. وعادةً ما تكون الأخطاء في توجيه الهوائي الناجمة عن الحركة طفيفة وعشوائية مفضية إلى تغييرات عشوائية في كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور. ولتقييم تأثير التداخل على السواتل الأخرى، لا بد من نمذجة كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية الواردة من هذه المطاريف ولا بد من تحديد قيمتها الكمية.

ويعرض هذا الملحق نموذجاً إحصائياً لتقدير مستويات كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) الناجمة عن أخطاء توجيه الهوائي، ويعرض نهجاً لوضع قناع إحصائي توضيحي لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية في الاتجاهات خارج المحور. ويراعي هذا القناع الإحصائي التوضيحي الخصائص التشغيلية النمطية للمطاريف المركّبة على المركبات، ويمكن استعماله للحد من بث هذه المطاريف خارج المحور. وفي مطراف أرضي ساتلي، تتناسب كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) في اتجاهاته خارج المحور مباشرةً مع كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية في اتجاه خط التسديد[1]. ويوفر هذا الملحق منهجية لتحديد المستويات المناسبة لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية على خط التسديد بحيث تلبي القناع الإحصائي التوضيحي أعلاه.

2 أخطاء توجيه الهوائي الناجمة عن الحركة

سيتغير مكان خط تسديد الهوائي في ظل ظروف حركة معينة لمنصة الهوائي. ويمكن أن يتمثل خطأ توجيه الهوائي بمتغير عشوائي، ϕ، هو المسافة الزاوية بين الاتجاهين الفعلي والمقصود لخط تسديد الهوائي. وفي العديد من الحالات المنفذة عملياً، يقاس خطأ توجيه الهوائي بدلالة مكونيه وهما: خطأ زاوية الارتفاع ϕ_ε وخطأ زاوية السمت ϕ_a. ويمكن تمثيل مكوني الخطأ هذين بمتغيرات عشوائية مستقلة عن بعضها البعض تُقدر توزيعاتها الإحصائية بقياسات تنفَّذ عبر مسيرات تحرك تحاكي الواقع. ويُرمز لدالة كثافة الاحتمالات (PDF) للزاوية ϕ_x بالرمز f_{ϕ_x} حيث $x = \varepsilon, a$. ولأغراض التوضيح من المفيد أن تمثّل دوال كثافة الاحتمالات هذه بتوزيعات إحصائية معروفة. وقد بينت قياسات المختبر لأخطاء توجيه الهوائي الناجمة عن الحركة أن خصائص هذه الأخطاء تمتد ذيولها طويلاً وأنها لن تضمحل سريعاً إذا ما كبرت قيم أخطاء توجيه الهوائي. ويُعتبر توزيع α المستقر المتناظر ($S\alpha S$) [Shao وNikias، 1993؛ Samorodnitsky وTaqqu، 1994] مثالاً على توزيع ذي خصائص طويلة الذيول، ويُستعمل ليمثل توضيحياً دوال كثافة احتمالات أخطاء توجيه الهوائي في زاويتي الارتفاع والسمت. وفي توزيع $S\alpha S$ العديد من المعلمات التي يمكن استخدامها لتوليد مختلف دوال كثافة الاحتمالات، والتوزيع الغوسي هو حالة خاصة. وتعطى الدالة المميزة لتوزيع $S\alpha S$ ذي معلمة الموقع صفر، كما يلي:

$$\psi(x) = e^{-|cx|^\alpha} \tag{1}$$

حيث $c > 0$ هي معلمة السلّم المرجعي أو التشتت، و$0 < \alpha \leq 2$ هو الأس المميز. ويحدَد ذيل التوزيع بالأس α، حيث تؤدي القيم الأصغر إلى ذيول أطول، وتتناسب c مع عرض دالة كثافة الاحتمالات (PDF)؛ علماً بأنه في حالة $\alpha = 2$، فإن الصيغة أعلاه تعطي الحالة الخاصة للتوزيع الغوسي بمتوسط صفري وتغيّر مقداره $2c^2$. ويظهر الشكل 1 دالة التوزيع التراكمي

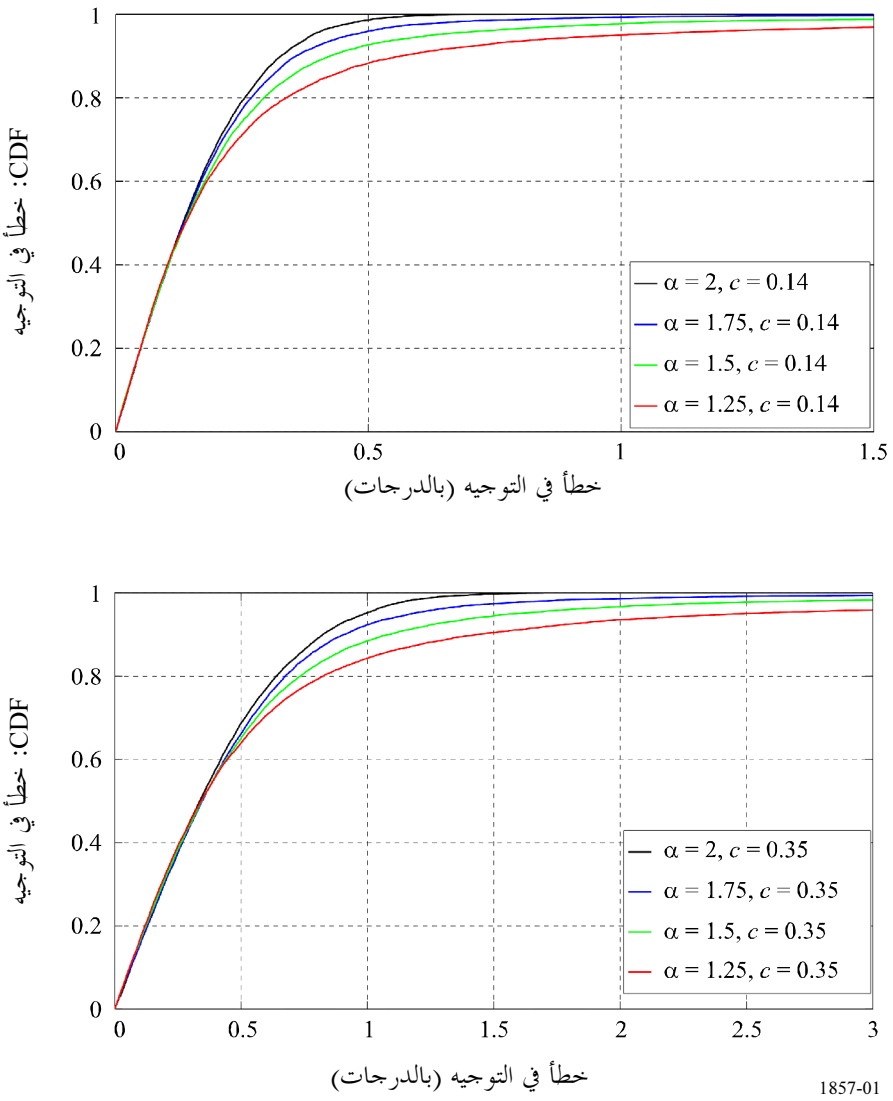
[1] يُعرَّف اتجاه خط التسديد على أنه الاتجاه الذي يكون فيه كسب الهوائي على أقصاه، وهو اتجاه محور الهوائي.

(CDF) لتوزيع $S\alpha S$ من أجل c = 0,14 و0,35º لقيم مختلفة من α. ويتضح أنه بتغيير قيم هاتين المعلمتين، يمكن تمثيل العديد من أنماط أخطاء توجيه الهوائي التي تصادف في الممارسة العملية.

ويمكن إيراد التبرير الحدسي لاختيار التوزيع $S\alpha S$ لنمذجة أخطاء توجيه الهوائي الناجمة عن الحركة على النحو التالي: تتوقف أخطاء توجيه الهوائي المرصودة على العديد من العوامل مثل خصائص الهوائي وظروف التضاريس وسرعة منصة هوائي وزوايا الارتفاع والسمت وعروة التتبع في الهوائي وموقع معدات التقدير وموضعها وقياسات شدة الإشارة. ويمكن افتراض استقلالية الأخطاء التي تساهم فيها جميع هذه المعلمات المختلفة. وفي هذه الحالة، يمكن تطبيق نظرية الحد المركزي المعممة [Samorodnitsky وTaqqu، 1994] لنمذجة الأثر التراكمي لمصادر الخطأ هذه بتوزيع $S\alpha S$؛ علماً بأن حجة مماثلة لنظرية الحد المركزي قد استُعملت في وصلات بصرية بعيدة المدى لنمذجة أخطاء التوجيه والتتبع بتوزيع غوسي [Gardner وChen، 1989؛ Correl، 1996]. ولكن، خلافاً للتطبيق البصري، فإن البيئة التشغيلية المعتبَرة في هذا الملحق تشمل تضاريس وعرة. وبالتالي، يتعين أن تؤخذ مكونات الخطأ ذات التوزيعات طويلة الذيل في الاعتبار.

الشـــكل 1

دالة التوزيع التراكمي (CDF) للقيمة المطلقة لخطأ توجيه الهوائي على اختلاف قيم α وc



3 التشخيص الإحصائي لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور

في الفقرة السابقة، اعتُبرت أخطاء توجيه الهوائي متغيّرات عشوائية؛ حيث ستُفضي أخطاء التوجيه العشوائية هذه إلى مستوى من كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية يتفاوت على نحو عشوائي. أما في هذه الفقرة، فيُعتبر مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور عشوائياً وتحدَد دالة التوزيع التراكمي (CDF) الخاصة به.

ومن أجل تحديد مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور، لأغراض التوضيح، ننظر في مخطط كسب هوائي الطبق المكافئي ذي الفتحة الدائرية [Bousquet وMaral، 2000]:

$$G(\varphi) = \left(\frac{2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}(\pi d/\lambda \times \sin\varphi)}{(\pi d/\lambda \times \sin\varphi)^{n+1}} \right)^2 \quad (2)$$

حيث:

φ: الزاوية خارج المحور

J_{n+1}: دالة بسل (Bessel) من النوع الأول والترتيب $(n+1)$

d: قطر الفتحة الدائرية

λ: طول الموجة.

وn أعلاه هي معلمة إضاءة الفتحة التي تقابل إضاءات الفتحة التالية:

$n = 0$، إضاءة منتظمة مثالية

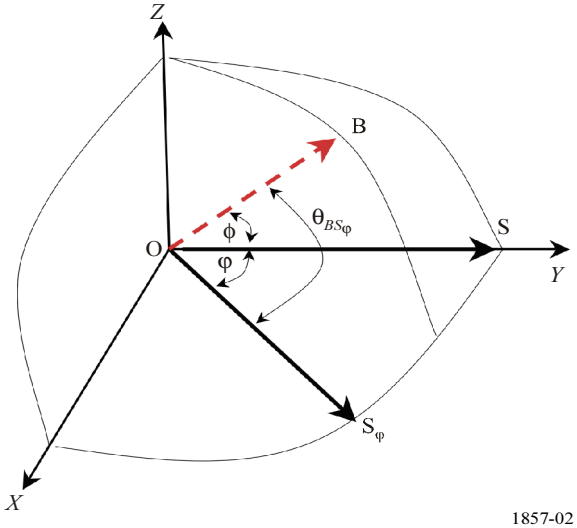
$n = 1$، إضاءة مكافئية

$n = 2$، إضاءة مكافئية مربعة.

ويقع الفص الرئيسي للعديد من أنظمة الفتحة في الواقع العملي ما بين مخططات إشعاع كسب مقيّسة تقابل $n = 1$ و$n = 2$. وجدير بالذكر أن الفصوص الجانبية للهوائيات العملية قد لا تتمثل بدقة بالمعادلة (2)؛ ولكن هذا ليس عيباً في التحليل، إذ يركز هذا العمل على المطاريف ذات الفتحات الصغيرة جداً التي يقيَّد أداؤها بالفص رئيسي بدلاً من الفصوص الجانبية.

الشـــكل 2

تموضع هندسي يمثل خطأ توجيه الهوائي، ϕ. والرموز المستعملة هي على النحو التالي: تقع المحطة الأرضية في نقطة تقاطع محاور الإحداثيات، O، وS هو الساتل المقصود، وOB هو اتجاه خط تسديد الهوائي، وφ هي الزاوية خارج المحور عند نقطة S_φ، و θ_{BS_φ} هي المسافة الزاويّة بين اتجاه خط التسديد واتجاه S_φ



1857-02

ولننظر في مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور بوجود خطأ في توجيه الهوائي، ϕ. ووفقاً للتعريف الوارد في الفقرة 2، ϕ هو الخطأ في اتجاه خط تسديد الهوائي. ويبين الشكل 2 التموضع الهندسي لخط تسديد الهوائي، OB، بوجود خطأ في توجيه الهوائي. ويقع المطراف الأرضي هنا في النقطة O، وتمثل النقطة S موقع الساتل المقصود، بحيث أن محور الهوائي في غياب أخطاء التوجيه هو OS. أما الزاوية خارج المحور فهي φ، ويظهر هذا الاتجاه في OS_φ. وبوجود أخطاء في توجيه الهوائي، يُرمز إلى المسافة الزاويّة بين خط تسديد الهوائي وOSφ بالرمز $\theta_{BS\varphi}$. ونلاحظ أنه في حالة عدم وجود أخطاء في توجيه الهوائي، $\theta_{BS\varphi} = \varphi$. والآن يمكن التعبير عن مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور في اتجاه OSφ على النحو التالي:

$$E_\phi(\varphi) = E_B \left(\frac{2^{n+1}(n+1)! J_{n+1}(\pi d/\lambda \times \sin\theta_{BS_\varphi})}{(\pi d/\lambda \times \sin\theta_{BS_\varphi})^{n+1}} \right)^2 \tag{3}$$

حيث E_B هي كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) في اتجاه خط التسديد. ولتحديد دالة التوزيع التراكمي (CDF) للصيغة $E_\phi(\varphi)$ لا بد من التعبير عنها بدلالة المتغيّرين العشوائيين الكامنين ϕ_ε وϕ_a. ونلاحظ أن $\theta_{BS\varphi}$ هي دالة ϕ_ε وϕ_a، وباستخدام التموضع الهندسي في الشكل 2، يمكن التعبير عن ذلك بدلالة زاويتي ارتفاع والسمت في الاتجاهين OB وOS_φ على النحو التالي:

$$\cos\theta_{BS_\varphi} = \cos\varepsilon^-_{BS_\varphi} - (\cos\varepsilon^+_{BS_\varphi} + \cos\varepsilon^-_{BS_\varphi}) \times \sin^2\frac{a^-_{BS_\varphi}}{2} \tag{4}$$

حيث $\varepsilon^-_{BS_\varphi} = (\varepsilon_B - \varepsilon_{S_\varphi})$ و $\varepsilon^+_{BS_\varphi} = (\varepsilon_B + \varepsilon_{S_\varphi})$ هما حاصل الطرح والجمع بين زاويتي الارتفاع في الاتجاهين OB وOSφ على التوالي. ولقيم معينة لمواقع المطراف الأرضي ونقطتي S وSφ، يمكن حساب الدالتين التاليتين لزاويتي الارتفاع والسمت: $\varepsilon^-_{SS_\varphi} = (\varepsilon_S - \varepsilon_{S_\varphi})$, $\varepsilon^+_{SS_\varphi} = (\varepsilon_S + \varepsilon_{S_\varphi})$ و $a^-_{SS_\varphi} = (a_S - a_{S_\varphi})$. وبعد ذلك، فإن اتجاه خط تسديد، في غياب أخطاء التوجيه، يقع على امتداد OS، فيصبح لدينا $\varepsilon_B = (\varepsilon_S - \phi_\varepsilon)$ و $a_B = (a_S - \phi_a)$. وبالجمع ما بين هذه الصيغ، ينتج ما يلي:

$$\begin{aligned} \varepsilon^-_{BS_\varphi} &= (\varepsilon^-_{SS_\varphi} - \phi_\varepsilon) \\ \varepsilon^+_{BS_\varphi} &= (\varepsilon^+_{SS_\varphi} - \phi_\varepsilon) \\ a^-_{BS_\varphi} &= (a^-_{SS_\varphi} - \phi_a) \end{aligned} \tag{5}$$

ويمكن تحديد الكميّن $\varepsilon^-_{SS_\varphi}$ و$\varepsilon^+_{SS_\varphi}$ و $a^-_{SS_\varphi}$ في تموضع هندسي معين للمطراف الأرضي. ثم بالاستعاضة عن المعادلة (5) في المعادلة (4)، يعبَّر عن $\theta_{BS\varphi}$ كدالة للأخطاء في زوايا الارتفاع والسمت ولزوايا الارتفاع والسمت المحددة مسبقاً إلى النقطتين S وSφ.

وباستخدام الإجراء أعلاه ، والمعادلة (3)، يكن التعبير عن مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) في الاتجاه φ خارج المحور، Eϕ (φ)، بدلالة متغيري الخطأ العشوائيين ϕ_ε وϕ_a. ويُرمز إلى دالة كثافة الاحتمالات (PDF) للصيغة Eϕ (φ) بالرمز f_{E_ϕ}. وبما أن دالتي كثافة الاحتمالات للمتغيّرين ϕ_ε وϕ_a تمثّلان بتوزيعات SαS، لأغراض التوضيح، يمكن تحديد f_{E_ϕ} من المعادلات (3) و(4) و(5). ويمكن تحديد دالة كثافة الاحتمالات باستخدام التقنيات التحليلية أو محاكاة مونت كارلو. أما دالة التوزيع التراكمي (CDF) لكثافة القدرة المشعة المتناحية فهي:

$\Pr\{E_\varphi(\phi) < y\} = F_{E_\phi}(y) = \int_0^y f_{E_\phi}(x)\,dx$. علماً بأن دالة التوزيع التراكمي هذه هي دالة لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية على خط التسديد E_B.

4 حساب احتمال تجاوز مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) المرجعي

عُرض في الفقرة السابقة إجراء لتحديد دالة التوزيع التراكمي (CDF) لمستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور. وباستخدام هذا الإجراء، يمكن تحديد احتمال تجاوز مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور لمستوى عتبة مرجعية معينة. ويُرمز لهذا المستوى المرجعي بالرمز $E_{Ref}(\varphi)$ الذي يمكن أن يكون عموماً دالة للاتجاه φ. ويعبَّر عن احتمال أن يعلو مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية عن ذلك المستوى المرجعي في الاتجاه خارج المحور φ، $\Pr\{E\phi(\varphi) > E_{Ref}(\varphi)\}$، على النحو التالي:

$$\Pr\{E_\phi(\varphi) > E_{Ref}(\varphi)\} = \int_{E_{Ref}(\varphi)}^{\infty} f_{E_\varphi}(x)\,dx = 1 - F_{E_\phi}(E_{Ref}(\varphi)) \quad (6)$$

وهذه دالة توزيع تراكمي متممة (CCDF) لمستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور المحسوب في $E_{Ref}(\varphi)$، وهي دالة للزاوية، φ، خارج المحور وكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية على خط التسديد، E_B؛ ولمواقع المطراف الأرضي والساتل الممثلة بجمع وطرح زوايا الارتفاع والسمت $\varepsilon^+_{SS_\varphi}$ و $\varepsilon^-_{SS_\varphi}$ و $a^-_{SS_\varphi}$. ويتضح من الحدس أن الاحتمال أعلاه يمكن خفضه بخفض E_B، ومن المفيد التعبير عن هذا الاحتمال بحيث تكون الكثافة E_B معلمة صريحة فيه. ولتحقيق ذلك، يمكن كتابة المعادلة (3) على النحو التالي: $E\phi(\varphi) = E_B G(\theta BS\varphi)$، حيث $G(\theta_{BS}\varphi)$ هو مخطط كسب الهوائي المقيّس، بحيث أن $G(0) = 1$. ويمكن كتابة الاحتمال في المعادلة (6) على النحو التالي:

$$\Pr\{G(\theta_{BS\varphi}) > E_{Ref}(\varphi)/E_B\} = 1 - F_{G(\theta_{BS\varphi})}(E_{Ref}(\varphi)/E_B) \quad (7)$$

حيث $F_G(\theta_{BS_\varphi})$ هي دالة التوزيع التراكمي لمخطط الإشعاع $G(\theta_{BS\varphi})$ وليست دالة للكثافة E_B. ويعطى احتمال أن يعلو مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية عن المستوى المرجعي $E_{Ref}(\varphi)$ على النحو الوارد أعلاه؛ ولكن ذلك لا يعالج مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية الزائدة ما فوق $E_{Ref}(\varphi)$. ويمكن معالجة هذا الجانب من خلال دراسة احتمال تجاوز مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور للقيمة $(\text{EIRP}_{excess} \times E_{Ref}(\varphi))$ حيث $\text{EIRP}_{excess} \geq 1$ هو عامل المقياس. وباستخدام ذلك في المعادلة (7)، يصبح الاحتمال المطلوب كما يلي:

$$\begin{aligned}\Pr\{E_\phi(\varphi) > (E_{Ref}(\varphi) \times \text{EIRP}_{excess})\} &= \Pr\{G(\theta_{BS\varphi}) > E_{Ref}(\varphi) \times \text{EIRP}_{excess}/E_B)\} \\ &= 1 - F_{G(\theta_{BS\varphi})}(E_{Ref}(\varphi) \times \text{EIRP}_{excess}/E_B)\end{aligned} \quad (8)$$

والاحتمال أعلاه هو دالة التوزيع التراكمي المتممة لمخطط الإشعاع $G(\theta_{BS\varphi})$ محسوباً في $(E_{Ref}(\varphi) \times \text{EIRP}_{excess}/E_B)$.

أما الإجراء المتبع لحساب الاحتمال في المعادلة (8) فهو على النحو التالي :

الخطوة 1: المتغيرات العشوائية الكامنة هنا هي مكونا خطأ توجيه الهوائي ϕ_ε وϕ_a، ويُفترض أن دالتيهما لكثافة الاحتمالات (PDF) معروفتان، لأغراض التوضيح، كما في الفقرة 2.

الخطوة 2: وفي المواقع المعروفة للمطراف الأرضي والساتل والاتجاه خارج المحور، تُحسب حصيلة جمع وطرح زوايا الارتفاع والسمت $\varepsilon^+_{SS\varphi}$ و $\varepsilon^-_{SS\varphi}$ و $a^-_{SS\varphi}$ على النحو الموضح في الفقرة 3. ثم تُستعمل هذه الزوايا في المعادلة ويستعاض بالنتيجة في المعادلة (4) للتعبير عن $\theta_{BS\varphi}$ بدلالة المتغيرين العشوائيين ϕ_ε وϕ_a. ثم تُستعمل دالة كثافة الاحتمالات (PDF) لدالة $\theta_{BS\varphi}$ المحددة على هذا النحو لحساب دالة التوزيع التراكمي المتممة (CCDF) للمتغير العشوائي $G(\theta_{BS\varphi})$.

الخطوة 3: وأخيراً، فإن الاحتمال المرغوب في المعادلة (8) يحدَد من دالة التوزيع التراكمي المتممة (CCDF) للمتغير العشوائي $G(\theta_{BS\varphi})$ وكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية المتجاوَزة ($e.i.r.p._{excess}$) كمعلمات.

5 قناع إحصائي توضيحي لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) للحد من البث خارج المحور

يمكن وضع حد أعلى على احتمال تجاوز مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية لسوية مرجعية للحد من البث خارج المحور بوجود أخطاء في توجيه الهوائي بفعل الحركة. ولكن من الواضح أن الاحتمال المحسوب في المعادلة (8) يعتمد على مواقع المطراف الأرضي والساتل والزاوية خارج المحور. وبما المطراف الأرضي يمكن أن يقع موجودة في أي مكان على سطح الأرض، فمن المرغوب فيه جداً الحد من البث خارج المحور باستعمال دالة مستقلة عن مواقع المطراف الأرضي والساتل. ومن الناحية المثالية، يستفاد من اشتقاق الحد العلى للاحتمال $\Pr\{E_\phi(\varphi) > (E_{Ref}(\varphi) \times \text{EIRP}_{excess})\}$ من دالة واحدة، $P_{max}(\text{EIRP}_{excess})$، تطبَّق في أي مكان على سطح الأرض وعلى جميع الزوايا خارج المحور. فتحد دالة الاحتمال هذه، $P_{max}(\text{EIRP}_{excess})$، من بث كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور، وتشكل قناعاً إحصائياً بشأن مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية.

وللحصول على قناع مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية الإحصائي، كما ذكر أعلاه، ننظر في الحالة الخاصة عندما تكون النقطتان S و$S\varphi$ على مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض ويقع المطراف الأرضي على خط الاستواء مباشرة تحت S. ففي هذه التشكيلة، $\varepsilon_S = 90^\circ$ و$\varepsilon_{S\varphi} = (90^\circ - \varphi)^\circ$ و270° أو $a_{s_\phi} = 90^\circ$ و$a_S = 90^\circ$، ويترتب على ذلك أن: $\varepsilon^+_{SS\varphi} = (180 - \varphi)^\circ$ أو $\varepsilon^-_{SS\varphi} = \varphi$ أو $a^-_{SS\varphi} = 0^\circ$ أو 180° . وباستعمال هذه الصيغ في المعادلة (5) والاستعاضة بالنتيجة في المعادلة (4)، تمكن كتابة $\theta_{BS\varphi}$ كما يلي:

$$\cos\theta_{BS_\varphi} = \cos(\varphi - \phi_\varepsilon) - (\cos(\varphi - \phi_\varepsilon) - \cos(\varphi - \phi_\varepsilon)) \times \sin^2\frac{\phi_a}{2} \tag{9}$$

ولن تكون دالة التوزيع التراكمي (CDF) للمتغير العشوائي $G(\theta_{BS\varphi})$ التي تُحصَّل باستعمال $\theta_{BS\varphi}$ أعلاه دالةً لزاويتي ارتفاع وسمت محددتين من المطراف الأرضي إلى الساتل؛ بل ستكون دالةً للزاوية خارج المحور، φ. ولاشتقاق الدالة التي تنطبق على جميع الزوايا خارج المحور ننظر في الاحتمال الأقصى في المعادلة (8) على كل الزوايا خارج المحور. ويعبَّر عن هذا الاحتمال الأقصى المطلوب على النحو التالي:

$$P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess}) = \max_\varphi \Pr\left\{G(\theta_{BS_\varphi}) > (E_{Ref}(\varphi) \times \text{EIRP}_{excess} / E_B)\right\} \tag{10}$$

ولا تعتمد دالة احتمال التجاوز أعلاه على مواقع محددة للمطراف الأرضي أو الساتل، ولا على خاصة خارج المحور؛ ومن ثم، فإن هذه الدالة مرشحة مناسبة لتكون قناعاً توضيحياً لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور، $P_{max}(\text{EIRP}_{excess})$.

ولتطبيق النهج المذكور أعلاه للحد من بث كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور لنظام هوائي عملي، ينبغي تحديد ما يلي من القيود التشغيلية: مستوى مرجعي لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور، $E_{Ref}(\varphi)$، والاحتمال الأقصى لأن يتجاوز مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية مستوى $(E_{Ref}(\varphi) \times \text{EIRP}_{excess})$ على كل الزوايا خارج المحور، $P_{max}(\text{EIRP}_{excess})$، وهو قناع توضيحي لمستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور. ولنظام هوائي معين ينبغي أن تُعرف القيم التالية: مخطط كسب الهوائي المقيّس وإحصاءات خطأ التوجيه ومواقع المطراف الأرضي والساتل المرغوب. والهدف هو ضبط كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية على خط التسديد، E_B، لنظام الهوائي بحيث تلبى القيود التشغيلية على مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور. ويتم ذلك عن طريق حساب دالة التوزيع التراكمي المتممة (CCDF) للمتغير العشوائي $G(\theta_{BS\varphi})$ كدالة للكثافة E_B كما في المعادلة، ثم تحديد

القيمة المناسبة للكثافة E_B بحيث تُحد القيمة القصوى لدالة التوزيع التراكمي المتممة هذه بالقيد $P_{max}(\text{EIRP}_{excess})$ لجميع قيم φ وe.i.r.p._{excess}. ويرد في الفقرة 7 أسلوب توضيحي خطوة بخطوة لاستخدام دالة الاحتمال في المعادلة (10) للحد من مستوى بث كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور لنظام هوائي عملي.

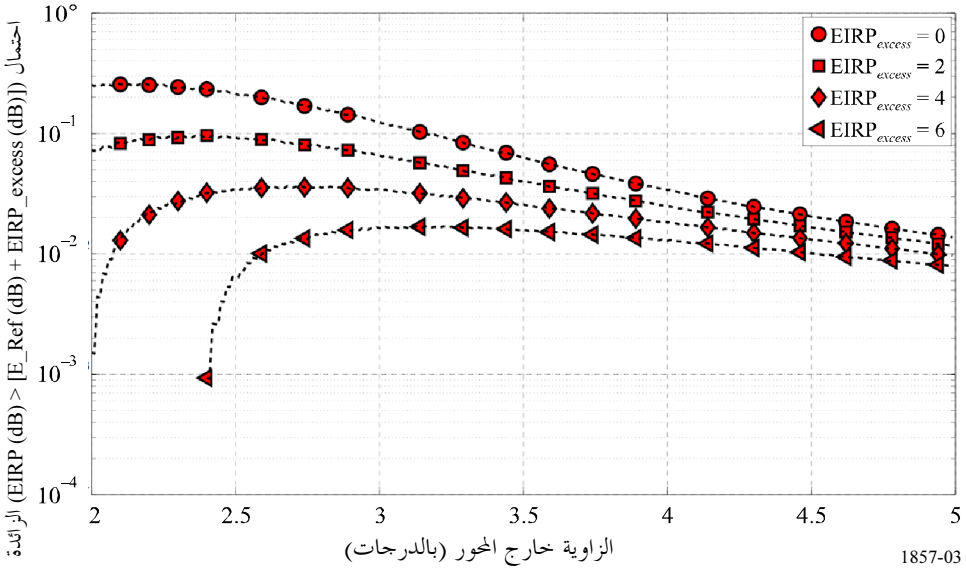
ولاشتقاق قناع إحصائي توضيحي معيّن لمستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية، ننظر في المستوى المرجعي التالي لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية:

$$E_{Ref}(\varphi)(\text{dBW/40 kHz}) = \begin{cases} 25 - 25\log(\varphi) & 2 \le \varphi < 7 \\ 4 & 7 \le \varphi < 9.2 \\ 28 - 25\log(\varphi) & 9.2 \le \varphi < 48 \\ -14 & 48 \le \varphi \le 180 \end{cases} \quad (11)$$

وهذا قناع كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور على النحو المحدد في التوصية ITU-R S.728 إلى جانب الملاحظة 1 في هذه التوصية. ويبين الشكل 3 الجانب الأيمن من المعادلة (10) (دون تعظيم)، $\Pr\{G(\theta_{BS\varphi}) > (E_{Ref}(\varphi) \times \text{EIRP}_{excess}/E_B)\}$، كدالة φ للقيم الثابتة للكثافتين e.i.r.p._{excess} وE_B. ويبين الشكل 4 هذه القيمة القصوى، $P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess})$، للمعلمتين α وc في دوال كثافة الاحتمالات (PDF) لمكونات خطأ توجيه الهوائي بفعل الحركة، ϕ_ε وϕ_a وكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية على خط التسديد، E_B. وهنا يفترض أن المتغيرين العشوائيين أعلاه موزعان توزيعاً متماثلاً ومستقلان بعضهما عن الآخر. ولمخطط الهوائي المعطى في المعادلة (2)، اختيرت القيم التمثيلية التالية لتطبيقات نطاق ترددي بعرض 14 GHz: d = 0,51 m وn = 1 والتردد = 14,2 GHz. ونلاحظ أنه في القيم الأكبر للمعلمة α، يقصر ذيل دالة كثافة الاحتمالات لخطأ توجيه الهوائي، وبالتالي، يكون اضمحلال الاحتمال $P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess})$ أسرع. وكذلك، في القيم الأصغر للمعلمة c، تضيق دالة كثافة الاحتمالات لأخطاء توجيه الهوائي، مما يؤدي إلى تضاؤل احتمال $P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess})$. ومن الواضح أن المنحنيات المبينة في الشكل 4 تعتمد على الكثافة E_B: فالقيم الأصغر لهذه الكثافة ستؤدي على ما يقابلها من قيم أصغر للاحتمال $P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess})$. ففي المنحنيات الظاهرة في هذا الشكل، تُضبط E_B عند قيمتها القصوى بحيث يقلّ احتمال $P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess})$ الناتج بقليل عن قيمته المقابلة للمعلمات التالية: α = 1,5 وc=0,35° وE_B = 21,53 (dBW/40 kHz). وفي الفقرة التالية، تناقَش تفاصيل تحديد قيم معينة للكثافة E_B المبينة في هذا الشكل.

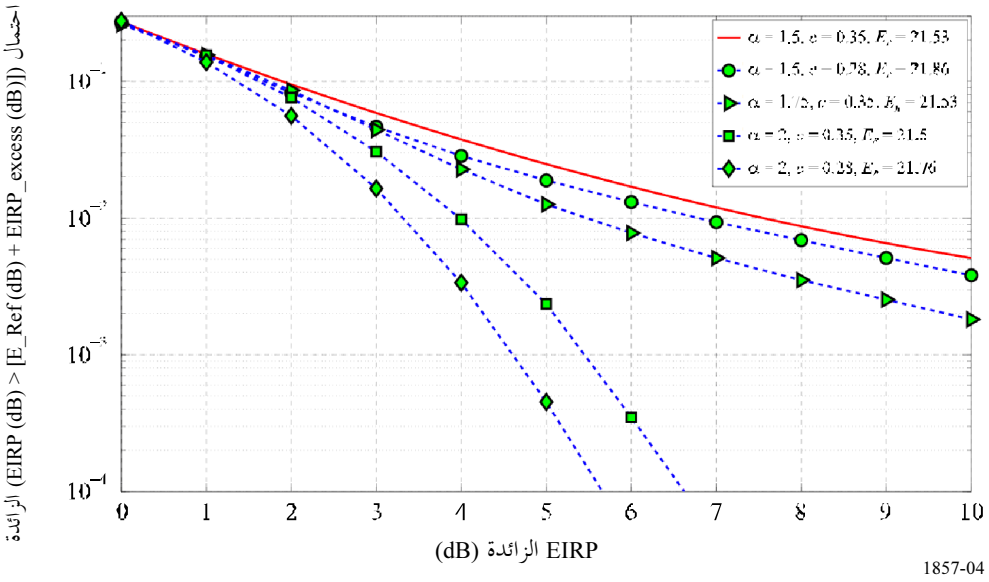
الشـــكل 3

الجانب الأيمن من المعادلة (10) (دون تعظيم) كدالة للزاوية خارج المحور، φ، على اختلاف قيم e.i.r.p.$_{excess}$ (dB) والمعلمات الأخرى هي: α = 1,5 و c = 0,35° و E_B = 21,53 (dBW/40 kHz) و n =1 والتردد = 14,2 GHz



الشـــكل 4

احتمال (P_{EB}(e.i.r.p.$_{excess}$) الوارد في المعادلة (10) لمعلمات مختلفة في دوال كثافة الاحتمالات (PDF) لمكونات خطأ توجيه الهوائي. وتبين القائمة التفسيرية α وc (بالدرجات) وE_B (dBW/40 kHz)



يُعتبر أي من المنحنيات المبينة في الشكل 4 مرشحاً مناسباً ليكون قناعاً إحصائياً توضيحياً لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور. وفي هذا الملحق، يُختار المنحنى الأعلى في هذا الشكل الذي يقابل المعلمات α = 1,5 وc = 0,35° وE_B = 21,53 (dBW/40 kHz) قناعاً إحصائياً توضيحياً لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.)، (P_{max} (EIRP$_{excess}$). ويُختار هذا المنحنى لأن بعض نتائج القياس تشير على أن قيم معلماته (α وc) تمثل المعتاد من ظروف تضاريس التشغيل وسرعات المركبات. وتناقَش عملية تحديد قيمة E_B في الفقرة 6. ويمكن تقريب القناع الإحصائي التوضيحي لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور بالصيغة التالية:

$$P_{max}(x) = \exp(0.016x^2 - 0.561x - 1.297) \quad 0 \le x \le 10 \tag{12}$$

حيث x = e.i.r.p.$_{excess}$ (dB). ولكي يلتزم نظام الهوائي بهذا القناع الوارد في المثال، ينبغي أن يقلّ احتمال نظام الهوائي المحسوب وفقاً للمعادلة (10)، (P_{EB}(e.i.r.p.$_{excess}$)، عن الاحتمال (P_{max} (EIRP$_{excess}$)، أي:

$$\max_{E_B} P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess}) \le P_{max}(10 \times \log_{10}(\text{EIRP}_{excess})) \quad 1 \le \text{EIRP}_{excess} \le 10 \tag{13}$$

حيث يعلو الحد الأقصى عن E_B. وكما يرى من المنحنيات في الشكل 4، يمكن لأنظمة الهوائي أن تفي بالقناع الوارد في المثال، (P_{max} (EIRP$_{excess}$ (dB))، بقيم متنوعة للمعلمتين α وc عند مستويات معقولة للكثافة E_B.

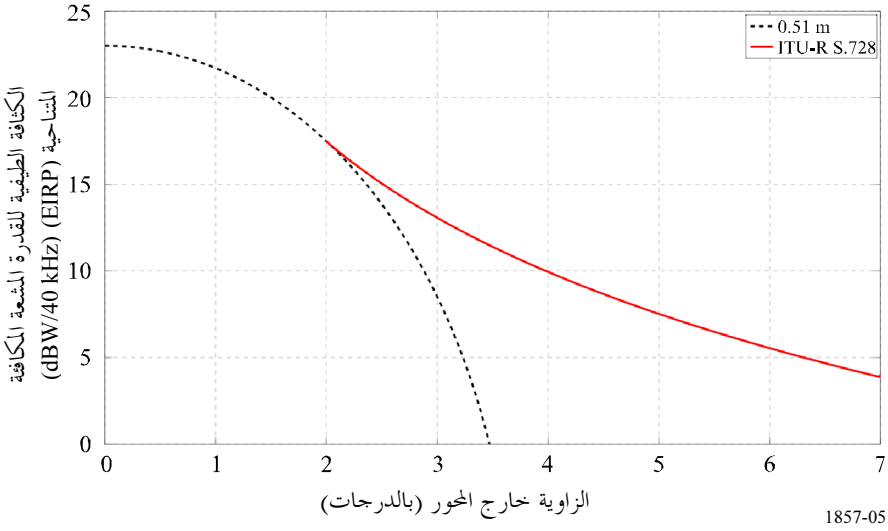
6 حساب كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد

كما يتضح من الاشتقاقات في الفقرة السابقة، تقوم كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية على خط التسديد، E_B، بدور رئيسي في تحديد أداء المطاريف المركّبة على مركبات. ونلاحظ أن دالة الاحتمال الواردة في المعادلة (10) تفرض قيداً على كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية على خط التسديد. كما أن زيادة هذه الكثافة تزيد التداخل على السواتل المجاورة، ويعرض الملحق 2 تحليلاً مفصلاً للتداخل من هذه المطاريف. ولا بد لمستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية على خط

التسديد أن يلبي طلبين متنافسين: الحاجة لإرسال ما يكفي من القدرة لدعم معدلات معقولة من البيانات، وضمان أن التداخل الناجم مقبول لمشغلي السواتل المجاورة. ويمكن تحديد قيمة E_B اللازمة لنقل البيانات بمعدلات معقولة في المحطات الأرضية المركّبة على مركبات بمقارنتها مع القيمة المقابلة للمطاريف الأرضية الساكنة. ويوضح الشكل 5 قناع كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية للمطاريف الأرضية الساكنة على النحو المحدد في التوصية ITU-R S.728 والمعبر عنه في المعادلة (11). ويظهر هذا الشكل أيضاً القيم القصوى لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور المقابلة لهوائي يبلغ قطر فتحته d = 0,51 m. ويحصَّل هذا المستوى لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور للهوائي عن طريق زيادة E_B تدريجياً حتى يصل مخطط الإشعاع الناتج لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور إلى ما دون قناع التوصية ITU-R S.728 بقليل. ومن الواضح أن قيمة E_B تلبي زيادات القناع لهوائي يبلغ قطر فتحته d =0,51 m، أي E_B = 23 dB(W/40 kHz).

الشـــكل 5

القيمة القصوى لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد مع مراعاة التوصية ITU-R S.728. والمعلمات هي: d =0,51 m وn =1 والتردد = 14,2 GHz

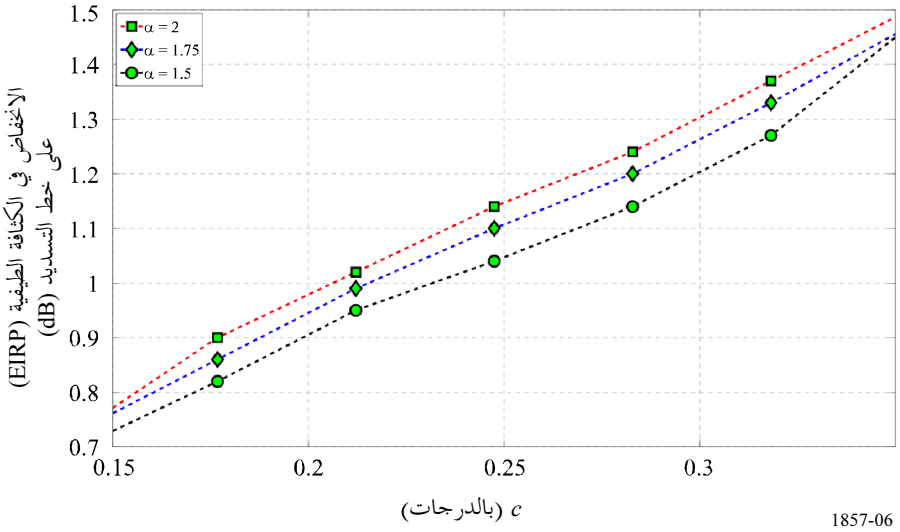


تمثل النتائج المبينة في الشكل 5 الحالة التي لا توجد فيها أخطاء في توجيه الهوائي. ففي ظل هذه الأخطاء، لابد من تخفيض كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد بسبب تقلبات مخطط كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور. وفي الفقرة السابقة، حُدد قناع إحصائي توضيحي لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية لنظام هوائي خاص في المعادلة (12). وتحدَد القيمة المرغوبة للكثافة، E_B، التي تفي بهذا القناع الإحصائي بزيادة قيمتها حتى يحقق الاحتمال P_{EB}(e.i.r.p.$_{excess}$) قيمته القصوى، لا أكثر، على النحو الوارد في الجانب الأيمن من المعادلة (13).

ويبين الشكل 6 التخفيض اللازم في كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد لتحقيق مثال القناع المعرّف في المعادلة (12) بحيث يمكن استيعاب أخطاء توجيه الهوائي. وبثبات قيم α، يقابل ارتفاع قيم c أخطاء أكبر في التوجيه وهذا سيؤدي إلى زيادة انخفاض كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد. وكما يرى من هذا الشكل، تقتضي الضرورة تخفيضاً طفيفاً في كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد على سبيل احتساب أخطاء توجيه الهوائي. ويبلغ هذا التخفيض 0,9 dB في حال α = 1,5 وc = º0,2، ويزداد التخفيض إلى حوالي 1,45 dB في حال α = 1,5 وc = º0,35.

الشـــكل 6

تقتضي الضرورة تخفيضاً في كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد للوفاء بالقناع الإحصائي التوضيحي ($EIRP_{excess}$) P_{max} في المعادلة (12)



7 أسلوب توضيحي لتحديد كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد للالتزام بالقناع الإحصائي في المثال عن كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية

يعطى أسلوب في هذه الفقرة لتحديد الالتزام بالقناع الإحصائي التوضيحي لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية خارج المحور المحدد في المعادلة (12) في الفقرة 5. وعلى وجه التحديد، يبيّن الأسلوب كيفية حساب القيمة القصوى لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية على خط التسديد لنظام الهوائي، بوجود مجموعة معينة من الأخطاء في زاويتي الارتفاع والسمت. أما الأسلوب التوضيحي فهو على النحو التالي:

1.7 مدخلات الحساب

أ) قيم عينة تمثيلية لأخطاء زاويتي الارتفاع والسمت، $\phi_\varepsilon(m)$ ، $\phi_a(m)$ و $m = 1, 2, ..., M$، حيث M هو حجم العينة. وينبغي لهذه القيم أن توافق قياسات في الوقت الفعلي أو بيانات مجموعة من عينات مسيرات تتشابه خصائصها مع تلك التي يُتوقع أن يعمل عليها المطراف. ويُفترض أن يكون حجم العينة كبيراً بما فيه الكفاية بحيث تكون الكميات الإحصائية المحسوبة باستخدام هذه العينات تقديرات جيدة إلى حد معقول للقيم الإحصائية المطلوبة.

ب) زاويتا الارتفاع والسمت للساتل المطلوب، S، ويُرمز إليهما بالرمزين a_S و ε_S، على التوالي. وتعطى زاويتا الارتفاع والسمت في الاتجاه S_φ بالرمزين a_S و ε_S على التوالي. ويبين الشكل 2 التموضع الهندسي النسبي للنقطتين S وS_φ. وهنا تقع S_φ في أي نقطة على المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض، أما الزاوية φ فهي متغيرة.

ج) مخطط الكسب المقيّس للهوائي، $G(\varphi)$، حيث φ هي الزاوية خارج المحور، ولأغراض التوضيح، يُفترض أن مخطط إشعاع الهوائي متناظر حول اتجاه خط تسديده.

د) قناع إحصائي لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور كما في المعادلة (12).

2.7 تقدير دالة التوزيع التراكمي (CDF) للمتغيّر $G(\theta_{BS_\varphi})$

هـ) باستخدام أ) وب) أعلاه، يُحسب مجموع زوايا الارتفاع نحو خط التسديد واتجاهات S_φ، $\varepsilon^+_{BS_\varphi}$؛ ويُحسب فرق زوايا الارتفاع والسمت في هذه الاتجاهات، $a^-_{BS_\varphi}$ و $\varepsilon^-_{BS_\varphi}$. وباستعمال المعادلة (5)، يُحسب ما تقدم على النحو التالي:

$$\begin{aligned}\varepsilon^-_{BS\varphi}(m) &= (\varepsilon_S - \varepsilon_{S_\varphi} - \phi_\varepsilon(m))\\ \varepsilon^+_{BS\varphi}(m) &= (\varepsilon_S + \varepsilon_{S_\varphi} - \phi_\varepsilon(m))\\ a^-_{BS\varphi}(m) &= (a_S - a_{S_\varphi} - \phi_a(m))\end{aligned}$$

حيث يظهر الاعتماد على مؤشر العينة m صراحةً. ونلاحظ أن $a^-_{BS_\varphi}(m)$ و $\varepsilon^+_{BS_\varphi}(m)$ و $\varepsilon^-_{BS_\varphi}(m)$ هي دوال للزاوية خارج المحور φ.

و) ونبدل القيم أعلاه في المعادلة (4) لحساب الزاوية بين خط التسديد واتجاه S_φ، $\theta_{BS_\varphi}(m)$. ومن المعادلة (4):

$$\theta_{BS\varphi}(m) = \cos^{-1}\left(\cos\varepsilon^-_{BS\varphi}(m) - \left(\cos\varepsilon^+_{BS\varphi}(m) + \cos\varepsilon^-_{BS\varphi}(m)\right)\times\sin^2\frac{a^-_{BS\varphi}(m)}{2}\right)$$

ز) وباستعمال مخطط كسب الهوائي في الفقرة ج) و $\theta_{BS_\varphi}(m)$ المحسوبة أعلاه، نحدد كسب الهوائي في الاتجاه $S\varphi$، $G(\theta_{BS_\varphi}(m))$؛ علماً بأن $G(\theta_{BS_\varphi}(m))$ يمكن أن يُعتبر متغيّراً عشوائياً ذا عينات عددها M، وهو دالة للزاوية خارج المحور φ.

ح) ونقدر دالة التوزيع التراكمي (CDF) للمتغيرين $G(\theta_{BS_\varphi})$ و $F_{G(\theta_{BS\varphi})}$ باستعمال عينات عددها M محسوبة في الفقرة ز). وبما أن $F_{G(\theta_{BS\varphi})}$ هو دالة للزاوية φ، نلاحظ أنه يتعين حساب دالة التوزيع التراكمي لكل من قيم المتغير φ.

3.7 حساب القيمة القصوى للكثافة E_B التي تلتزم بالقناع الإحصائي في المثال

ط) نختار القيم المناسبة للقدرة EIRP_{excess}، $1 \le \text{EIRP}_{excess} \le 10$ و$(E_{B,max} - \Delta E_B) \le E_B \le E_{B,max}$، وباستعمال دالة التوزيع التراكمي المقدرة في الفقرة ح) نحدد الاحتمال في المعادلة (8) لكل من قيم φ. وهنا $E_{B,max}$ هي الكثافة القصوى للقدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد في غياب أخطاء توجيه الهوائي، وتمثل ΔE_B الانخفاض في كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد بفعل أخطاء توجيه الهوائي؛ ولأغراض توضيحية نضبط ΔE_B عند $\Delta E_{B,max}/2$.

وجدير بالذكر أن المعادلة (8) ينبغي أن تحدَد لجميع قيم EIRP_{excess} وE_B التي تستأثر بالاهتمام؛ ولكن إذا عُلم أن الانخفاض في كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية طفيف، يمكن تبسيط هذا الحساب عن طريق الحد من مدى قيم E_B. ويبين الشكل 6 الانخفاض في قيمة E_B لمعلمات النظام المحددة التي جاء ذكرها في الفقرة 6. فعلى سبيل المثال، بما أن هذا الانخفاض صغير فإن قيمة $\Delta E_B = \Delta E_{B,max}/3$ مناسبة لمعلمات النظام ذات الصلة.

ي) في حال ثبات قيم EIRP_{excess} وE_B نحدد الاحتمال $P_{EB}(\text{e.i.r.p.}_{excess})$ باستعمال الصيغة الواردة في المعادلة (10)، وهي القيمة القصوى للاحتمال المحسوب في الفقرة ط) لدى اعتبار الزاوية φ متغيرة. وتعاد كتابة الصيغة $P_{EB}(\text{e.i.r.p.}_{excess})$ أدناه:

$$P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess}) = \max_{\varphi} \Pr\left\{G(\theta_{BS_\varphi}) > (E_{Ref}(\varphi) \times \text{EIRP}_{excess}/E_B)\right\}$$

ونلاحظ أن الاحتمال $P_{EB}(\text{e.i.r.p.}_{excess})$ هو دالة غير متناقصة للكثافة E_B، عندما يُعتبر دالة E_B لقيم EIRP_{excess} الثابتة.

ك) وأخيراً، تحدَد القيمة القصوى للكثافة E_B بحيث يقلّ الاحتمال $P_{EB}(\text{e.i.r.p.}_{excess})$ عن قناع المثال في المعادلة (12) لجميع القيم الواقعة في دائرة الاهتمام للقدرة EIRP_{excess}. وإذ تلبي القيمةُ المطلوبة للكثافة E_B المعادلة (13)، تعاد كتابتها على النحو التالي:

$$\max_{E_B} P_{E_B}(\text{EIRP}_{excess}) \le P(10 \times \log_{10}(\text{EIRP}_{excess})) \quad 1 \le \text{EIRP}_{excess} \le 10$$

وجدير بالذكر أن الأسلوب أعلاه ذُكر لأغراض التوضيح فقط وينبغي ألا يفسر على أنه الأسلوب الوحيد لحساب قيمة E_B.

المراجع

بقلم CHEN, C.-C و.GARDNER C.S، [مارس 1989] تأثير أخطاء التوجيه والتتبع العشوائية على تصميم وصلات الاتصالات البصرية المتماسكة وغير المتماسكة ما بين السواتل، *مداولات معهد المهندسين الكهربائيين والإلكترونيين (IEEE) بشأن الاتصالات*. المجلدان **37** و**3**، الصفحات: 252-260.

بقلم CORRELL, C.، [1996] نموذج رياضي يصف آثار أخطاء التوجيه والتتبع الناجمة عن "الضوضاء الميكانيكية" في وصلات الاتصالات البصرية المتماسكة ما بين السواتل، *المجلة الدولية للاتصالات الساتلية*. المجلد **14**، الصفحات: 37-51.

بقلم MARAL, G. و BOUSQUET M، [2000] *أنظمة الاتصالات الساتلية: الأنظمة والتقنيات والتكنولوجيا*، دار نشر John Wiley & Sons.

بقلم SAMORODNITSKY, G و.TAQQU M.S، [1994] *العمليات العشوائية غير الغوسية المستقرة: النماذج العشوائية المتغيرة على نحو لا نهائي*. دار نشر Chapman & Hall/CRC.

بقلم SHAO, M. و.NIKIAS C.L، [يوليو 1993] معالجة الإشارة بعزوم كسرية من المرتبة المنخفضة: العمليات المستقرة وتطبيقاتها. *مداولات معهد المهندسين الكهربائيين والإلكترونيين (IEEE)*. المجلدان **81** و**7**، الصفحات: 986-1010.

الملحق 2

منهجية لتقييم مستويات التداخل الناجم عن التغيرات في مستويات كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور للمحطات الأرضية بفعل أخطاء التوجيه الناجمة عن حركة المنصة المركَّبة على مركبات

1 مقدمة

يتغير بمرور الوقت مستوى كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور من المطاريف المركَّبة على منصات مركبات، وسيؤدي ذلك تالياً إلى إشارة تداخل تتغير بمرور الوقت في السواتل المجاورة المستقرة بالنسبة إلى الأرض. ويوفر هذا الملحق منهجية لتحليل التداخل المتغير بمرور الوقت الناجم عن المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات ولتحديد كميته. وقد تناولت التوصية ITU-R S.1323 بالبحث آثار التداخل من مصادر تتغير بمرور الوقت. وتضع التوصية أيضاً المهلة الزمنية القصوى المسموحة لمستويات التداخل على المدى القصير. ويتبع هذا الملحق المبادئ التوجيهية الموضوعة في التوصية ITU-R S.1323 ويضع منهجية لتحليل التداخل الناجم عن أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت للمطاريف المركّبة على مركبات. وسيستفاد من المنهجية المقدمة في تحديد المستوى المناسب لكثافة كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية على خط التسديد لهذه المطاريف بحيث تلتزم بالقدر المسموح من التداخل على الأنظمة الساتلية الأخرى وتلبي أهداف الأداء المختلفة لتلك الأنظمة.

2 معايير تقييم التداخل

يعتمد أداء نظام الخدمة الثابتة الساتلية بشكل حاسم على التداخل الذي يرده من الأنظمة الأخرى. وتلخص التوصية ITU-R S.1432 الاعتبارات المختلفة التي تناولتها التوصيات الأخرى بشأن التداخل. وتستند معايير التداخل المستخدمة في تلك التوصيات ذات الصلة قطاع الاتصالات الراديوية إلى مقدار التداخل الذي يمكن تحمله على مدى فترات طويلة من الزمن وكذلك خلال فترات زمنية قصيرة. ويعرف النوع الأول من المعايير بمعيار المدى الطويل لأن متوسط التداخل يُحسب على مدى فترة زمنية طويلة بما فيه الكفاية. أما النوع الآخر من المعايير فيحدد مقدار التداخل على فترات زمنية قصيرة يتغير فيها التداخل عادةً بمرور الوقت، ومن ثم فهو يمثَّل بتوزيع للاحتمالات.

وتتناول التوصية ITU-R S.1323 تأثيرات التداخل المتغيرة بمرور الوقت وتحدد مستويات الحد الأقصى المسموح به للتداخل من مصادر مختلفة. ولكن لا توجد في تلك التوصية محاصصة محددة لعدم توفر الوصلة لشبكات الخدمة الثابتة الساتلية في التداخل المتغير بمرور الوقت الناجم عن مطاريف المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات (VMES) في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض. أما مهلة الوقت الذي لا تتوفر فيه الوصلة جراء هذا التداخل فهي مجرد قيمة تعطى على سبيل المثال. إذ تتسم المنهجية بالمرونة بحيث تُستعمل أي محاصصة حسبما يُتفق عليه بين الإدارات أو حسبما تتناوله توصيات لقطاع الاتصالات الراديوية في المستقبل. والافتراض الأساسي هو أن تُصمَم وصلة الساتل بهامش وصلة كاف يحسب حساب اختلالات الانتشار من قبيل خبو الإشارة بفعل المطر وتغيرات ضوضاء جهاز الاستقبال وآثار التداخل طويلة المدى من الشبكات الساتلية الأخرى. ولاحتساب تأثير أوجه التدهور هذه، تحدَد أهداف أداء الوصلة الساتلية بدلالة قيم التعطل لمعدل الخطأ في البتات أو لنسبة قدرة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (C/N). فعلى سبيل المثال، في مجموعة معينة من نسب قدرة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (C/N) وما يقابلها من أزواج مهلة وقت التعطل $\{(C/N)_i, p_i\%\}, i = 1,2,\ldots I$، ينبغي أن تقلّ نسبة قدرة الموجة الحاملة إلى الضوضاء عن $(C/N)_i$ لنسبة مئوية $p_i\%$ من الوقت حصراً (في أي شهر).

ووفقاً للتوصية ITU-R S.1323، ينبغي ألا تتسبب آثار انتشار بأكثر من 90% من عدم توفر الوصلة. وبالتالي، يمكن إعادة صياغة ما ذُكر أعلاه على النحو التالي: ينبغي أن تقلّ نسبة (C/N) المحسوبة في غياب التداخل المتغير بمرور الوقت عن نسبة

$(C/N)_i$ في معظم $p_i \times 90\%$% من الوقت. أما نسبة 10% الباقية من مهلة وقت عدم توفر الوصلة، فتُخصص للتدهور الإضافي الناجم عن التداخل المتغير بمرور الوقت بفعل بث المحطة الأرضية والفضائية لجميع الشبكات الساتلية الأخرى العاملة في النطاق الترددي نفسه. وبالتالي، ينبغي أن تقلّ نسبة (C/N) الإجمالية المحسوبة بوجود التداخل المتغير بمرور الوقت عن نسبة $(C/N)_i$ في $p_i \times 90\%$% من الوقت حصراً، حسب الاقتضاء.

وتتناول هذه الوثيقة الزيادة في التداخل على الأنظمة الساتلية المجاورة بفعل أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت. وتؤخذ هذه الزيادة في التداخل بالنسبة إلى مطراف ذي خصائص مماثلة ولكنه يعمل في بيئة ساكنة وبغياب أخطاء توجيه الهوائي. ويُفترض في هذه الحالة الساكنة أن المطراف يلتزم بقناع بث القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور المؤسس في التوصية ITU-R S.728 ويفي بالمتطلبات العديدة المتعلقة بالتداخل والمنصوص عليها في التوصيات ذات الصلة. ويمكن تحديد الزيادة في التداخل على المدى الطويل عن طريق حساب متوسط التداخل الناجم عن أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت خلال فترة T_{avg} ومقارنة هذه النتيجة مع قيمتها المناظرة في الحالة الساكنة. وينبغي أن تمثل معلمة التداخل على المدى الطويل، T_{avg}، فترة طويلة بما فيه الكفاية بحيث تحوي التغيرات المميزة بمرور الوقت لإشارة التداخل. وفي هذه الحالة، يمكن لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد للمطراف أن تتحكم في مستوى التداخل. وسوف ترد تفاصيل هذه المنهجية في الفقرة 4.

ولتحقيق الأهداف القصيرة الأجل، يمكن استعمال المنهجية الواردة في التوصية ITU-R S.1323. ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن هذه التوصية قد وُضعت خصيصاً للحالة التي يكون فيها التداخل المتغير بمرور الوقت ناجماً عن أنظمة في غير المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض. ويؤكَد ذلك بالملاحظة 1 في هذه التوصية التي تفيد بأن ما نسبته 10% من حالات تعطل الوصلة بفعل مصادر التداخل، كما ذُكر أعلاه، لا يسري على التداخل بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية المستقرة بالنسبة إلى الأرض. ولذلك، وبما أن هذه الوثيقة تتناول التداخل الناجم عن أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية المستقرة بالنسبة إلى الأرض، فإن مهلة الوقت المخصصة لتعطل الوصلة في التداخل المتغير بمرور الوقت ستمثَّل بالمعلمة T_{allow}% بدلاً من نسبة 10% المذكورة في التوصية ITU-R S.1323. وتهدف هذه الوثيقة إلى تقييم آثار التداخل المتغير بمرور الوقت فيما يتعلق بالحالة الساكنة التي تأثيرات الانتشار والتداخل في غياب أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت.

إذن، تُعتبر الحالةُ الساكنة الحالةَ المرجعية لتقييم آثار التداخل المتغير بمرور الوقت. ونلاحظ أن الحالة المرجعية المقابلة في التوصية ITU-R S.1323 هي عندما يكون التدهور ناجماً عن آثار الانتشار فحسب. وعندئذ، يهدف الأداء لأن تكون حالات تعطل الوصلة في الحالة الساكنة موزعة بنسبة $(100 - T_{allow})$% من مهلة الوقت على أكثر تقدير. وباستخدام الصيغة السابقة، ينبغي أن تقلّ نسبة (C/N)، المحسوبة من آثار الانتشار والتداخل في الحالة الساكنة، عن نسبة $(C/N)_i$ لمعظم $p_i \times (100 - T_{allow})\%\%$ من الوقت. وبالتالي، تقلّ نسبة (C/N) الإجمالية، المحسوبة بوجود أخطاء في توجيه الهوائي تتغير بمرور الوقت وبوجود آثار الانتشار، عن نسبة $(C/N)_i$ خلال $p_i \times (100 - T_{allow})\%\%$ من الوقت، حسب الاقتضاء. وكما في حالة التداخل على المدى الطويل، يمكن لكثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد للمطراف أن تتحكم في تعطل الوصلة. وسوف ترد تفاصيل هذه الجانب في الفقرة 4.

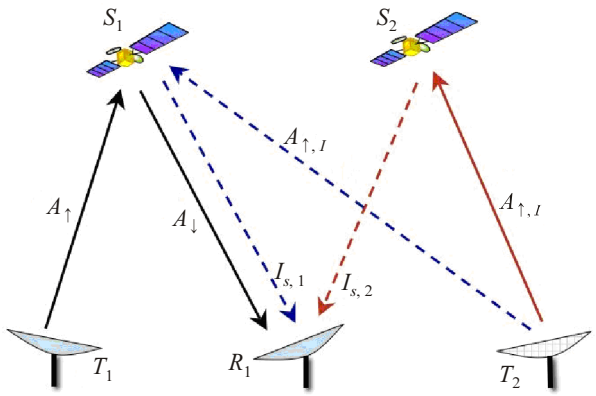
3 الإطار المرجعي لتحليل التداخل

تقدم هذه الفقرة إطاراً مرجعياً يُستعمل لتقييم التداخل، وتسرد المعلمات والرموز المستخدمة في المعادلات التالية.

ويوضح الشكل 7 الشبكات الساتلية المطلوبة والمتداخلة. ويُرمز إلى الساتل المطلوب بالرمز S_1 وإلى مطرافيه للإرسال والاستقبال بالرمزين T_1 وR_1 على التوالي. أما المطراف المتداخل فهو T_2 وساتله المقصود هو S_2. ويستقبل جهاز الاستقبال المتأثر R_1 الإشارة من كلا الساتلين S_1 وS_2 على النحو المبين في الشكل 7.

الشـــكل 7

الشبكات الساتلية المطلوبة والمتداخلة. تقع المطاريف T_1 وR_1 وS_1 في الشبكة المطلوبة؛ ويقع المطراف T_2 والساتل S_2 في الشبكة المتداخِلة



وفيما يلي قائمة المعلمات والرموز التي اعتمدت في هذه التوصية.

φ: الزاوية خارج المحور من T_2 إلى S_1 في غياب أخطاء توجيه الهوائي

θ: الزاوية خارج المحور من R_1 إلى S_2

$A_{\uparrow}$: الخبو بفعل المطر في الوصلة الصاعدة من T_1 إلى S_1

$A_{\downarrow}$: الخبو بفعل المطر في الوصلة الهابطة من S_1 إلى R_1

$A_{\uparrow,I}$: الخبو بفعل المطر في الوصلة الصاعدة من مصدر التداخل T_2 إلى S_1 أو S_2

B_s: كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) (W/Hz) في اتجاه خط التسديد في الحالة الساكنة، وهي القيمة في غياب أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت في T_2. وخط التسديد هنا هو الاتجاه الذي يكون فيه كسب الهوائي في أقصاه

B_t: كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) (W/Hz) في اتجاه خط التسديد في T_2 بوجود أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت؛ علماً بأن هذه المعلمة تقابل E_B في المعادلة (3)

ΔB: الانخفاض في كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) (W/Hz) على خط التسديد، $\Delta B = B_s / B_t$

$(C/N)_{cs}$: نسبة قدرة الموجة الحاملة إلى الضوضاء في R_1 في ظروف سماء صافية. حيث C هي قدرة الموجة الحاملة المطلوبة المستقبلة في R_1 من T_1

$(C/N)_s$: نسبة (C/N) في R_1 في الحالة الساكنة، والناجمة عن الخبو بفعل المطر والتداخل من T_2 في غياب أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت

$(C/N)_t$: نسبة (C/N) في R_1 الناجمة عن الخبو بفعل المطر والتداخل من T_2 بسبب أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت

$G_1(\theta)$: الكسب الاتجاهي المقيّس لهوائي R_1 في اتجاه θ خارج المحور $(G_1(0) = 1)$

$G_2(\varphi)$: الكسب الاتجاهي المقيّس لهوائي T2 في اتجاه φ خارج المحور$(G_2(0) = 1)$؛ علماً بأن هذه المعلمة تقابل $G(\varphi)$ في المعادلة (2) في الملحق 1

$G_{2,t}(\varphi)$: الكسب الاتجاهي المقيّس لهوائي T_2 في اتجاه φ بوجود أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت

G_{S1}: كسب الإشارة الصغير في S_1. (القدرة المشعة المكافئة المتناحية في S_1 نحو R_1) = (كثافة تدفق القدرة من T_2) × $\frac{\lambda^2}{4\pi}$ × طول موجة الوصلة الصاعدة λ، G_{S1}

G_{S2}: كسب الإشارة الصغير في S2. (القدرة المشعة المكافئة المتناحية في S_2 نحو R_1) = (كثافة تدفق القدرة من T_2) × $\frac{\lambda^2}{4\pi}$ × طول موجة الوصلة الصاعدة λ، G_{S2}

$(G/T)_1$: نسبة كسب الهوائي إلى حرارة الضوضاء في حالة الاستقبال في R_1

$(G/T)_{S1}$: نسبة كسب الهوائي إلى حرارة الضوضاء في حالة الاستقبال في S_1 عندما يكون اتجاه الاستقبال نحو T_2

$(G/T)_{S2}$: نسبة كسب الهوائي إلى حرارة الضوضاء في حالة الاستقبال في S_2 عندما يكون اتجاه الاستقبال نحو T_2

$I_{s,1}$: قدرة التداخل الصادرة من T_2 والمستقبَلة في R_1 عبر S_1، في غياب أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت

$I_{s,2}$: قدرة التداخل الصادرة من T_2 والمستقبَلة في R_1 عبر S_2، في غياب أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت

$I_{t,1}$: قدرة التداخل الصادرة من T_2 والمستقبَلة في R_1 عبر S_1، بوجود أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت

$I_{t,2}$: قدرة التداخل الصادرة من T_2 والمستقبَلة في R_1 عبر S_2، بوجود أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت

k: ثابت بولتزمان (Boltzmann)، $1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K

$\log(X)$: $\log_{10}(X)$

L_u: خسارة الوصلة الصاعدة (سماء صافية) من T_2 إلى S_1 أو S_2

L_d: خسارة الوصلة الهابطة (سماء صافية) من S_1 أو S_2 إلى R_1

$N_{\downarrow}$: قدرة الضوضاء عند الاستقبال في R_1، وتقابلها حرارة الضوضاء $T_{\downarrow}$

$N_{\uparrow}$: قدرة الضوضاء من S_1 المستقبَلة في R_1

$N_{\uparrow,2}$: قدرة الضوضاء من S_2 المستقبَلة في R_1

N_r: ضوضاء المطر (السماء) في جهاز الاستقبال R_1 الناجمة عن حرارة المطر T_r (الوصلة الهابطة)

$p_X(x)$: دالة كثافة احتمالات (pdf) المتغير X

$P_X(x) = \Pr\{X \le x\}$: دالة التوزيع التراكمي (cdf) للمتغير X

$\overline{X}$: متغير يعبَّر عنه بوحدة dB، $10 \log_{10} X$

$\langle X \rangle$: متوسط قيمة المتغير العشوائي X

Z_s: $Z_s = \frac{(C/N)_{cs}}{(C/N)_s}$، تدهور نسبة (C/N) من آثار الخبو بفعل المطر والتداخل الساكن من المطراف T_2

Z_t: $Z_t = \frac{(C/N)_{cs}}{(C/N)_t}$، تدهور نسبة (C/N) من آثار الخبو بفعل المطر والتداخل المتغير بمرور الوقت من المطراف T_2.

4 آثار التداخل على المدى القصير: تدهور نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (C/N)

تحسب هذه الفقرة تدهور نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (C/N) في R_1 من جراء الخبو بفعل المطر والتداخل من المطراف T_2. وسيُدخِل الخبو بفعل المطر الذي يُنظر فيه هنا تغييرات إحصائية على نسبة (C/N) المستقبَلة[2]. ويُنظر أولاً في الخبو بفعل المطر والتداخل من المطراف T_2 في غياب أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت، وذلك لحساب دالة التوزيع التراكمي (cdf) للمتغير Z_s وهو تدهور نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (C/N) في R_1. ويرد بحث ذلك في الفقرة 1.4. ثم يجري تناول أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت في T_2، وتحدَد دالة التوزيع التراكمي للتدهور الناتج في نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (C/N) في R_1 الذي يُرمز إليه بالرمز Z_t. ثم تُستعمل دوال التوزيع التراكمي هذه لحساب الزيادة النسبية في عدم التوفر بسبب أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت. ويرد بحث ذلك في الفقرة 2.4.

ويفترض التحليل الوارد في هذه الفقرة أن جهاز الاستقبال المتأثر يتعرض للتداخل من ساتل مجاور حصراً. فإن لم تُهمل إشارات التداخل الواردة من سواتل مجاورة أخرى، ينبغي احتسابها بطريقة مماثلة.

1.4 الحالة الساكنة: إرسال المطراف T_2 في غياب أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت

تعطى نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (C/N) في جهاز الاستقبال R_1 للشبكة الساتلية الظاهرة في الشكل 1 كما يلي:

$$(C/N)_{CS} = \frac{C}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + I_{S,1} + I_{S,2} + N_{\uparrow,2}} \tag{14}$$

وتعود عبارتا التداخل هنا، $I_{s,1}$ و$I_{s,2}$، إلى إرسال المطراف T_2 بكثافة قدرة مشعة مكافئة متناحية على خط التسديد B_s في الحالة الساكنة، أي في غياب أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت. وعندما يكون المطراف T_2 صغير الفتحة، يمكن الافتراض بأن إرساله B_s يلتزم بقناع القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) خارج المحور الوارد في التوصية ITU-R S.728 وفي التوصيات المعنية بالتداخل ذات الصلة. وجدير بالذكر في المعادلة (14) أن العبارة $N_{\uparrow} + I_{s,1}$ تأتي من S_1 وأن العبارة $I_{s,2} + N_{\uparrow,2}$ تأتي من S_2. وبوجود الخبو بفعل المطر في الوصلتين الصاعدة والهابطة للإشارة المطلوبة، تكون نسبة (C/N) على النحو التالي:

$$(C/N)_S = \frac{C/A_{\uparrow}\, A_{\downarrow}}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow}/A_{\downarrow} + N_r\,(1-1/A_{\downarrow}) + (I_{S,1} + I_{S,2})/(A_{\uparrow,I}\;\; A_{\downarrow})\, N_{\uparrow,2}/A_{\downarrow}} \tag{15}$$

ويُفترض هنا أن الساتلين S_1 وS_2 تفصلهما مسافة قريبة جداً بحيث تتماثل تقريباً مكونات الخبو بفعل المطر في الوصلة الصاعدة من T_2 لهذين الساتلين. ويُفترض أيضاً تماثل مكونات الخبو بفعل المطر من S_1 وS_2 إلى R_1. وقد لا تصح هذه الافتراضات إن لم تفصل بين الساتلين S_1 وS_2 مسافة قريبة. ففي مثل هذه الحالات، ينبغي أن يؤخذ ارتباط مكونات الخبو لكل منهما في الاعتبار؛ علماً بأن عبارة $N_r\,(1 - 1/A_{\downarrow})$, $(A_{\downarrow} \geq 1)$ في المخرج ترمز إلى الضوضاء الإضافية في جهاز الاستقبال جراء حرارة المطر، T_r.

ومن ذلك يمكن التعبير عن التراجع في نسبة (C/N) بوجود خبو بفعل المطر في الوصلتين الصاعدة والهابطة على النحو التالي:

$$Z_s = (A_{\uparrow}/A_{\uparrow,I}) \times (A_{\downarrow}\, A_{\uparrow,I}\, d_1 + A_{\uparrow,I}\, d_2 + d_3) \tag{16}$$

[2] تصمَم الوصلات الساتلية عادةً بهوامش خبو في الوصلة تحسباً لمثل هذا التدهور.

حيث تُعرَّف متغيرات الوصلة c_1 وc_2 وc_3 وc_4 وc_5 وd_1 وd_2 وd_3 على النحو التالي:

$$c_1 = \frac{I_{s,2}}{I_{s,1}};\ c_2 = \frac{I_{s,1}}{N_\uparrow};\ c_3 = \frac{N_\uparrow}{N_\downarrow};\ c_4 = \frac{N_r}{N_\downarrow};\ c_5 = \frac{N_{\uparrow,2}}{I_{s,2}}$$

$$d_1 = \frac{1 + c_4}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3} \tag{17}$$

$$d_2 = \frac{c_1 c_2 c_3 c_5 + c_3 - c_4}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3}$$

$$d_3 = \frac{c_1 c_2 c_3 + c_2 c_3}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3}.$$

ويمكن تحديد هذه المتغيرات لمجموعة معينة من متغيرات الوصلة. وعلى وجه التحديد منها:

$$c_1 = \frac{G_2(0)}{G_2(\varphi)} \frac{G_{S2}}{G_{S2}} \frac{G_1(\theta)}{G_1(0)}$$

$$c_2 = \frac{B_s\, G_2(\varphi)\, (G/T)_{S1}}{k\ L_u} \tag{18}$$

$$c_3 = \frac{(G/T)_1\ G_{S1}}{(G/T)_{S1} L_d}$$

$$c_4 = \frac{T_r}{T_\downarrow}$$

$$c_5 = \frac{k\ L_u}{B_s\, G_2(0)\ (G/T)_{S2}}$$

حيث يُفترض، تبسيطاً للصيغ، تماثل خسائر الانتشار في الوصلة الصاعدة من T_2 إلى الساتلين S_1 وS_2 في غياب الخبو بفعل المطر. ويُفترض افتراض مماثل لخسائر الانتشار في الوصلة الهابطة من الساتلين S_1 وS_2 إلى R_1.

وإذا أخذنا لوغاريتم Z_s في المعادلة (16):

$$\overline{Z}_s = \overline{A}_\uparrow - \overline{A}_{\uparrow,I} + 10 \log \left(10^{(\overline{A}_\downarrow + \overline{A}_{\uparrow,I})/10} d_1 + 10^{(\overline{A}_{\uparrow,I})/10} d_2 + d_3 \right) \tag{19}$$

ومن الأسهل تحديد دالة التوزيع التراكمي (cdf) للدالة $\overline{Z}_S$ في الحالة الخاصة التي يُتجاهل مكون الخبو بفعل المطر في الوصلة الصاعدة $\overline{A}_{\uparrow,I}$، أي $\overline{A}_{\uparrow,I} = 0$، علماً بأن هذه الحالة الخاصة لا تؤخذ في الاعتبار إلا توخياً للتبسيط التحليلي. وفي هذه الحالة، يمكن التعبير عن دالة التوزيع التراكمي للتراجع على النحو التالي:

$$P_s(\overline{z}) = \Pr(\overline{Z}_s \le \overline{z}) = \iint_{R_{\overline{z}}} p_{\overline{A}_\downarrow}(u)\, p_{\overline{A}_\uparrow}(v)\ \mathrm{d}v\, \mathrm{d}u$$

أما منطقة التكامل فهي بحيث تحقق الدالة $\overline{Z}_S$ المتراجحة $\overline{Z}_S \le \overline{z}$ من أجل $\overline{A}_\downarrow, \overline{A}_\uparrow \in R_{\overline{z}}$. ويُفترض أعلاه أن مكوني الخبو بفعل المطر $\overline{A}_\uparrow$ و$\overline{A}_\downarrow$ مستقلان بعضهما عن الآخر.

وبما أن $\overline{Z}_S$ هي دالة متزايدة برتابة لمتراجحتي الخبو $\overline{A}_{\downarrow}\ (\geq 0)$ و $\overline{A}_{\uparrow}\ (\geq 0)$ يمكن التعبير عن المنطقة على أنها المنطقة المحدودة بالمتراجحتين $0 \leq \overline{A}_{\uparrow} \leq \overline{z} - 10 \log (10^{\overline{A}_{\downarrow}/10}\ d_1 + d_2 + d_3)$ و $0 \leq \overline{A}_{\downarrow} \leq 10 \log ((10^{\overline{z}/10} - d_2 - d_3)/d_1)$.

ويُقيَّم التكامل أعلاه على النحو التالي:

$$\begin{aligned} p_s(\overline{z}) &= \iint_{R_{\overline{z}}} p_{\overline{A}_{\downarrow}}(u)\, p_{\overline{A}_{\uparrow}}(v)\, \mathrm{d}v\mathrm{d}u \\ &= \int_{u=0}^{u'} p_{\overline{A}_{\downarrow}}(u) \int_{v=0}^{u=\overline{z}-10\log(10^{u/10}\ d_1+d_2+d_3)} p_{\overline{A}_{\uparrow}}(v)\ \mathrm{d}v\,\mathrm{d}u \\ &= \int_{u=0}^{u'} p_{\overline{A}_{\downarrow}}(u)\, p_{\overline{A}_{\uparrow}}(\overline{z} - 10\ \log(10^{u/10} d_1 + d_2 + d_3))\ \mathrm{d}u \end{aligned} \tag{20}$$

حيث $u' = 10 \log ((10^{\overline{z}/10} - d_2 - d_3)/d_1)$.

2.4 إرسال المطراف T_2 بوجود أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت

في هذه الحالة، تُدخل أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت في مطراف الإرسال T_2. وللحد من التداخل الإضافي بوجود أخطاء في توجيه الهوائي، يجب تخفيض كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد من B_s إلى B_t. وتُستخرج نسبة (C/N) بوجود خبو بفعل المطر وأخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت من المعادلة (2) على النحو التالي:

$$(C/N)_t = \frac{C/A_{\uparrow}\, A_{\downarrow}}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow}/A_{\downarrow} + N_r\ (1 - 1/A_{\downarrow}) + (I_{t,1} + I_{t,2})/(A_{\uparrow,I}\ A_{\downarrow}) + N_{\uparrow,2}\ /A_{\downarrow}} \tag{21}$$

حيث يمكن التعبير عن عبارتي التداخل $I_{t,1}$ و$I_{t,2}$ ككسور مما يقابلهما من قيم في الحالة الساكنة:

$$\begin{aligned} \frac{I_{t,1}}{I_{s,1}} &= \frac{B_t\ G_{2,t}(\varphi)}{B_s\ G_2(\varphi)} \\ \frac{I_{t,2}}{I_{s,2}} &= \frac{B_t\ G_{2,t}(0)}{B_s\ G_2(0)} \end{aligned} \tag{22}$$

ويمكن الحصول على عاملي كسب الهوائي G_2 و$G_{2,t}$ من معرفة مخطط كسب الهوائي. فمثلاً، يمكن التعبير عن مخطط كسب الهوائي المقيّس على النحو التالي:

$$G(\varphi) = \left(\frac{2^{n+1}(n+1)!\, j_{n+1}(\pi d/\lambda \times \sin\varphi)}{(\pi d/\lambda \times \sin\varphi)^{n+1}} \right) \tag{23}$$

حيث φ هي الزاوية خارج المحور وJ_{n+1} هي دالة بسل (Bessel) من النوع الأول والترتيب $(n+1)$، وd هو قطر الفتحة الدائرية وλ هو طول الموجة. وn أعلاه هي معلمة إضاءة فتحة الهوائي، وتقابل إضاءات الفتحة التالية: $n = 0$، إضاءة منتظمة مثالية، و$n = 1$، إضاءة مكافئية، و$n = 2$، إضاءة مكافئية مربعة. ويقع الفص الرئيسي للعديد من أنظمة الفتحة في الواقع العملي ما بين مخططات إشعاع كسب مقيّسة تقابل $n = 0$ و$n = 2$. وجدير بالذكر أن الفصوص الجانبية للهوائيات العملية قد لا تتمثل بدقة بالمعادلة (23).

ويكون عامل كسب الهوائي في غياب أخطاء التوجيه، وفق الترميز المستعمل في المعادلة (22)، $G_2(\varphi) = G(\varphi)$. أما بوجود أخطاء في توجيه الهوائي، فيمكن تشخيص الأخطاء في اتجاه خط تسديد الهوائي بخطأي الارتفاع والسمت، ويُرمز إليهما بالرمزين ϕ_ε وϕ_a على التوالي. ثم يمكن التعبير عن الخطأ المطلوب الزاوي، وهو الزاوية بين اتجاه خط تسديد الهوائي والاتجاه من T_2 نحو S_1، بدالة $\Phi(\varphi, \phi_\varepsilon, \phi_a)$ التي يمكن تحديدها من تموضع هندسي معين على النحو الموضح في الفقرة 3 من الملحق 1. ويمكن الآن التعبير عن عامل كسب الهوائي في المعادلة (22) على النحو التالي:

$$I_{t,1} \le \frac{1}{\Delta B} \frac{1}{G_2(\varphi)} I_{s,1} \tag{24}$$

وبوجود أخطاء في توجيه الهوائي جراء سوء توجيه الحزمة الرئيسية للمطراف T_2 بعيداً عن الساتل S_2، يتضح أن $I_{t,2} < I_{s,2}$. أي أن التدهور الناجم عن أخطاء في توجيه الهوائي يقلّ دوماً عما يقابله من تدهور في الحالة الساكنة بالنسبة إلى التداخل المستقبَل في R_1 عبر S_2. أما بالنسبة للتداخل المستقبَل عبر S_1، يتضح من المعادلة (22) بلوغ القيمة القصوى لمكون التداخل في $G_{2,t}(\varphi)$، أي عندما يكون خط تسديد الهوائي على استقامة واحدة مع الاتجاه من T_2 إلى S_1. ويدل ذلك على أنه في نظام الساتلين المنظور فيه هنا، يمكن وضع حد أعلى لقدرة التداخل المتغيرة بمرور الوقت، بغض النظر عن فداحة خطأ التوجيه.

ومن المعادلتين (14) و(21)، يكون التراجع في نسبة (C/N) بوجود أخطاء في توجيه الهوائي كما يلي:

$$Z_t = (A_\uparrow / A_{\uparrow,I}) \times (A_\downarrow / A_{\uparrow,I}\, e_1 + A_{\uparrow,I}\, e_2 + G_{2,t}(\varphi)/\Delta B\, e_3 + G_{2,t}(0)/\Delta B\, e_4) \tag{25}$$

حيث تُعرّف متغيرات الوصلة على النحو التالي:

$$\begin{aligned}
e_1 &= \frac{1 + c_4}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3} \\
e_2 &= \frac{c_1 c_2 c_3 c_5 + c_3 - c_4}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3} \\
e_3 &= \frac{1}{G_2(\varphi)} \frac{c_2 c_3}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3} \\
e_4 &= \frac{1}{G_2(0)} \frac{c_1 c_2 c_3}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3}
\end{aligned} \tag{26}$$

ويعبَّر عن المعادلة (25) في شكل لوغاريتمي:

$$\overline{Z}_t = \overline{A}_\uparrow - \overline{A}_{\uparrow,I} + 10\log\left(10^{(\overline{A}_\downarrow + \overline{A}_{\uparrow,I})/10}\, e_1 + 10^{\overline{A}_{\uparrow,I}/10} e_2 + 10^{(\overline{G}_{2,t}(\varphi) - \overline{\Delta B})/10} e_3 + 10^{(\overline{G}_{2,t}(0) - \overline{\Delta B})/10} e_4\right) \tag{27}$$

وكما في الحالة الساكنة، وتوخياً للتبسيط التحليلي، ننظر في الحالة الخاصة عندما $\overline{A}_{\uparrow,I} = 0$. وفي هذه الحالة، يمكن التعبير عن دالة التوزيع التراكمي (cdf) للدالة $\overline{Z}_t$ على النحو التالي:

$$\begin{aligned}
P_t(\overline{z}) &= \Pr(\overline{Z}_t \le \overline{z}) \\
&= \int_{R_{\overline{z}}} p_{\overline{G}2,t(0)}(w)\, p_{\overline{G}2,t(\phi)}(v)\, p_{\overline{A}_\downarrow}(u)\, p_{\overline{A}_\uparrow}(t)\, \mathrm{d}t\, \mathrm{d}u\, \mathrm{d}v\, \mathrm{d}w
\end{aligned}$$

أما منطقة التكامل فهي بحيث تحقق ما يلي: $\overline{G}_{2,t}(0), \overline{G}_{2,t}(\varphi), \overline{A}_{\downarrow}, \overline{A}_{\uparrow} \in R_{\overline{z}}; \overline{Z}_t \le \overline{z}$. ويُفترض هنا أن المتغيرات العشوائية، كل فيما يخصها، مستقلة إحصائياً؛ علماً بأنه في ظل الظروف العامة، قد لا يكون المتغيران العشوائيان $\overline{G}_{2,t}(\varphi)$ و $\overline{G}_{2,t}(0)$ مستقلين من الناحية الإحصائية. وفي مثل هذه الحالات، ينبغي النظر في التوزيع المشترك لهذين المتغيرين العشوائيين في الصيغة أعلاه. وبما أن $\overline{Z}_t$ هي دالة متزايدة برتابة للمتغيرات $\overline{A}_{\uparrow}$ و $\overline{A}_{\downarrow}$، $\overline{G}_{2,t}(0), \overline{G}_{2,t}(\varphi)$، يمكن التعبير عن التكامل أعلاه على النحو التالي:

$$P_t(\overline{z}) = \int_{w=-\infty}^{w'} p_{\overline{G}_{2,t}^{(0)}}(w) \int_{v=-\infty}^{v'} p_{\overline{G}_{2,t}^{(\phi)}}(v) \int_{u=0}^{u'} p_{\overline{A}_{\downarrow}}(u) \; p_{\overline{A}_{\uparrow}}(\overline{z} - 10\log(10^{u/10} e_1 + e_2 + 10^{(v-\overline{\Delta}\overline{B})/10} e_3 + 10^{(w-\overline{\Delta}\overline{B})/10} e_4)) \, du \, dv \, dw \tag{28}$$

حيث تكون الحدود العليا للتكاملات كما يلي:

$$\begin{aligned} u' &= 10\log\left(\frac{10^{\overline{z}/10} - e_2 - 10^{(v-\overline{\Delta}\overline{B})/10} e_3 - 10^{(w-\overline{\Delta}\overline{B})/10} e_4}{e_1}\right) \\ v' &= 10\log\left(\frac{10^{\overline{z}/10} - e_1 - e_2 - 10^{(w-\overline{\Delta}\overline{B})/10} e_4}{e_3}\right) + \overline{\Delta}\overline{B} \\ w' &= 10\log\left(\frac{10^{\overline{z}/10} - e_1 - e_2 - 10^{-\overline{\Delta}\overline{B}/10} e_3}{e_4}\right) + \overline{\Delta}\overline{B} \end{aligned} \tag{29}$$

ويمكن التعبير عن الزيادة النسبية في عدم توفر الوصلة جراء أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت قياساً بمجمل عدم توفر الوصلة، $R(\overline{z})$ (%) على النحو التالي:

$$R(\overline{z})\% = 100\% \times \frac{(1 - P_t(\overline{z})) - (1 - P_s(\overline{z}))}{(1 - P_t(\overline{z}))} \tag{30}$$

ويمكن الاستنتاج من المناقشة المؤدية إلى المعادلة (24) أن الدالة $P_t(\overline{z})$ يمكن أن تكون أكبر من الدالة $P_s(\overline{z})$ في القيم الأكبر للانخفاض $\overline{\Delta}\overline{B}$. وينطوي ذلك في بعض الحالات على المتراجحة التالية: $R(\overline{z}) < 0$، أي بتخفيض كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد يمكن جعل التداخل المتغير بمرور الوقت أقل مما يقابله من تداخل في غياب أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت. ولحساب الزيادة $R(\overline{z})$ كما ترد في المعادلة (30)، نفترض أن مجمل عدم توفر الوصلة هو p_i% وأن ما قيمته $(100 - T_{allow})$% من عدم التوفر هذا يخصَص للتداخل الساكن. ويُحسب هامش الخبو المطلوب في ظل الظروف الساكنة لعدم توفر الوصلة هذا من المعادلة: $(1 - P_s(\overline{z}^*)) = p_i\% \times (100 - T_{allow})\%$، حيث إن إجمالي عدم توفر الوصلة في هامش الخبو هذا بوجود التداخل المتغير بمرور الوقت هو $(1 - P_t(\overline{z}^*))$. ويمكن حساب هذه الزيادة النسبية في عدم توفر الوصلة ضمن هامش الخبو هذا، $R(\overline{z}^*)$%، باستعمال الصيغة الواردة في المعادلة (30).

الجـــدول 1

معلمات الوصلة من T_2 إلى R_1

الوصلة الترددية الصاعدة (GHz)	14,2
خسارتا الوصلة الهابطة، الوصلة الصاعدة (dB)	207، 205,3 (أنقرة) 207,2، 205,3 (لندن)
ثابت بولتزمان (dBW/Hz/K)	228,6−
كسب الإشارة الصغير في S_1، G_{S1} (dB)	175,2
$(G/T)_{S1}$ (dB/K)	2 (أنقرة) 4 (لندن)
الوصلة الترددية الهابطة (GHz)	11,7
T_r (K)	285
الزاوية خارج المحور من T_2 إلى S_1	°2,22 (أنقرة) °2,18 (لندن)

الجـــدول 2

معلمات حساب التوهين بفعل المطر

موقع S_1 (يوتلسات W1 (Eutelsat))	°10 شرقاً
موقع S_2	°12 شرقاً
موقع T_1 (جزر الكناري)	خط العرض: °27,76 شمالاً خط الطول: −°15,63 شرقاً
ارتفاع T_1 فوق متوسط مستوى سطح البحر (m)	205
موقع R_1 (ماتيرا، إيطاليا)	خط العرض: °40,39 شمالاً خط الطول: °16,42 شرقاً
ارتفاع R_1 فوق متوسط مستوى سطح البحر (m)	527
موقع T_2 (أنقرة، تركيا)	خط العرض: °39,8 شمالاً خط الطول: °32,8 شرقاً
موقع T_2 (لندن، إنكلترا)	خط العرض: °51,5 شمالاً خط الطول: −°0,12 شرقاً
ارتفاع T_2 فوق متوسط مستوى سطح البحر (m)	200 (أنقرة) 200 (لندن)

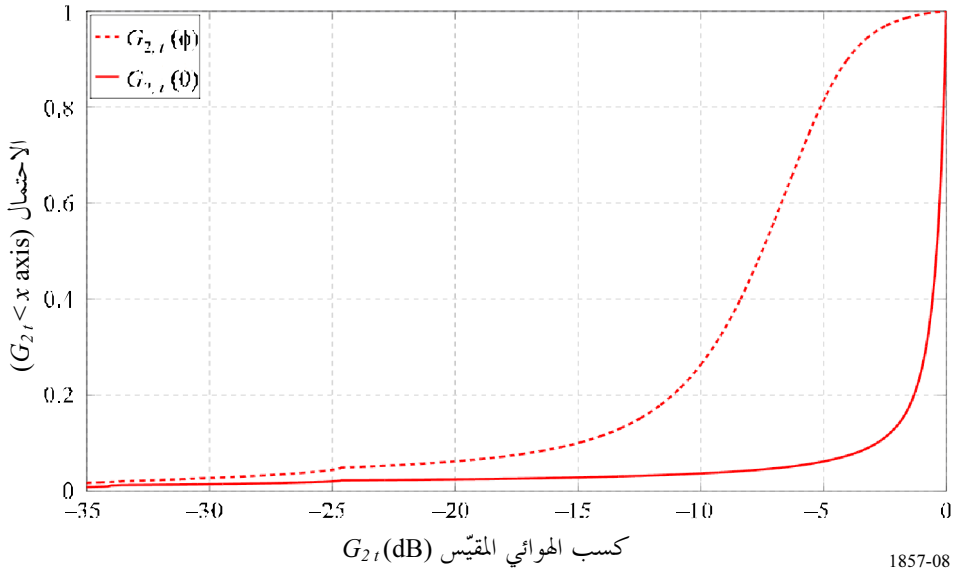
5 مثال عن حساب يستعمل المنهجية أعلاه

تقدم هذه الفقرة مثالاً عن حساب لتوضيح المنهجية الواردة في الفقرة 4. ويعطي الجدول 1 معلمات الوصلة المستعملة في هذا المثال. وتُحسب مكونات توهين المطر $A_{\uparrow}$ و $A_{\downarrow}$ و $A_{\uparrow,I}$ وفقاً للتوصية ITU-R P.618 باستخدام المعلمات الواردة في الجدول 2. وفي هذا المثال، يُفترض وجود هوائي كبير الفتحة في مطراف الاستقبال R_1. وبما أن كسب الهوائي يحقق المتراجحة $G_1(\theta) << G_1(0)$، يُهمَل التداخل الذي يستقبله المطراف R_1 من S_2 في هذا المثال.

ويبين الشكل 8 دوال التوزيع التراكمي (cdf) للمتغيرين العشوائيين $G_{2,t}(0)$ و$G_{2,t}(\varphi)$ بوجود أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت. وتقابل هذه الأخطاء أخطاء في الارتفاع والسمت متأتية من توزيع $S\alpha S$ على النحو الذي ورد بحثه في الفقرة 2 من الملحق 1، حيث معلمتا التوزيع هما: $\alpha = 1{,}5$ و$c = 0{,}35°$. ويعطى مخطط إشعاع الهوائي لكسب الهوائي في المعادلة (23) حيث $n = 1$ و$d = 0{,}51$ m. وفي هذا المثال، تبلغ الزاوية خارج المحور، φ، من T_2 إلى S_1، 2,22°، ويبلغ ما يقابلها من كسب مقيّس للهوائي $G_2(\varphi) = -6{,}7$ dB. ويبين هذا الرقم تقلبات $G_{2,t}(\varphi)$ بوجود أخطاء في توجيه الهوائي. ونلاحظ أنه بالمقارنة مع الحالة الساكنة، يزداد التداخل على S_1 عند تحقق المتراجحة $G_{2,t}(\varphi) > G_2(\varphi)$، ويتناقص عند تحقق المتراجحة $G_{2,t}(\varphi) < G_2(\varphi)$.

الشـــكل 8

التوزيع التراكمي (cdf) للمتغيرين العشوائيين $G_{2,t}(0)$ و$G_{2,t}(\varphi)$ بوجود أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت (المطراف T2 في أنقرة، تركيا)

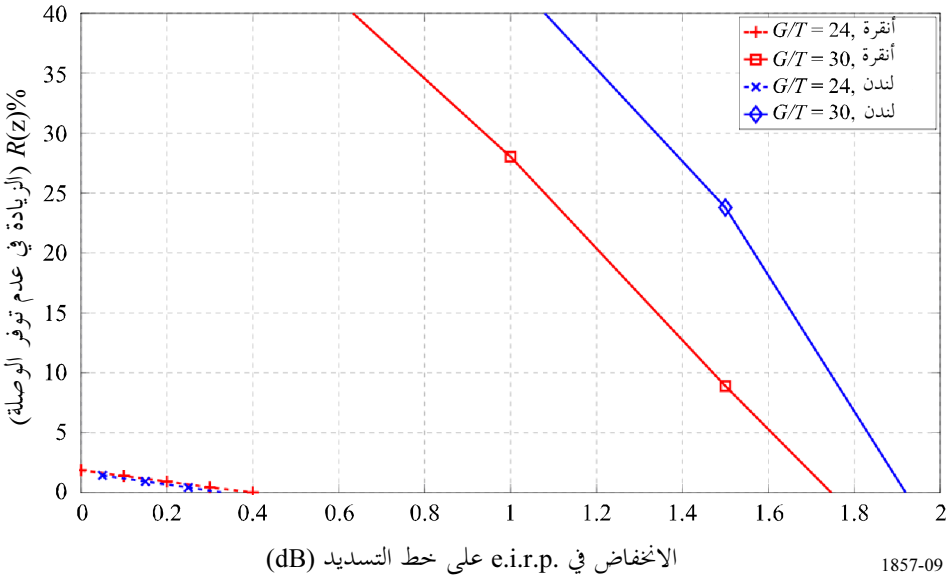


ويبين الشكل 9 الزيادة النسبية في عدم توفر الوصلة، $R(\bar{z})\%$ ، لقيم مختلفة من كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط تسديد الهوائي. وفي هذا المثال، تنفَّذ محاكاة مونت كارلو لمتغيري التدهور $\bar{Z}_s$ و $\bar{Z}_t$ على النحو الوارد في المعادلتين (19) و(27)، لتحديد الاحتمالين $\bar{Z}_s$ و $\bar{Z}_t$. وفي هذا المثال، ولأغراض التوضيح، يُنظر في شرط توفر الوصلة بنسبة 98%. وكما ذُكر في الفقرة 2، فإن هذا من شروط الدخل لحماية السواتل المجاورة؛ ففي هذا المثال إذن، $p_i = 2\%$. وعلى افتراض إسناد 90% ($T_{allow} = 10\%$) من عدم توفر الوصلة إلى الخبو بفعل المطر والتداخل في الحالة الساكنة، أي: $(1 - P_s(\bar{z})) = (1 - 0{,}98) \times 90\%$)، يُحدد هامش الخبو المقابل $\bar{z}_{margin}$ الذي يحقق العلاقة أعلاه بحيث $(1 - P_s(\bar{z}_{margin})) = (1 - 0{,}98) \times 90\%$). ثم يحدَد إجمالي عدم توفر الوصلة بوجود أخطاء في توجيه الهوائي لهامش الخبو هذا، $1 - P_t(\bar{z}_{margin})$. ويمكن الحصول على قيمة $R(\bar{z}_{margin})$ من المعادلة (30).

وكما يتبين من الشكل 19، بوجود أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت، يمكن الإقلال من عدم توفر الوصلة كثيراً بخفض كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط التسديد. ونلاحظ، كما ذكر أعلاه، أن الزيادة في عدم توفر الوصلة للقيم الأكبر للانخفاض $\overline{\Delta B}$ يمكن أن تكون بحيث تتحقق المتراجحة: $R(\bar{z}) < 0$. وكذلك، في القيم الأكبر لمطراف الاستقبال (G/T) يكون جهاز الاستقبال أكثر تحسساً بالتداخل المستقبَل من الساتل؛ مما يزيد من التداخل ويزيد بالتالي من عدم توفر الوصلة.

الشـــكل 9

الزيادة في عدم توفر الوصلة، $R(\bar{z})$ ، لمعلمات الوصلة في الجدولين 1 و2
وتشير القائمة التفسيرية إلى (G/T) (dB/K) في مطراف الاستقبال R_1



6 آثار التداخل على المدى الطويل

كما ذكر آنفاً، تُحسب قدرة التداخل على المدى الطويل عن طريق حساب متوسط قدرة التداخل على مدى فترة زمنية طويلة بما يكفي بحيث تُحتوى كل التغيرات التمثيلية لإشارة التداخل المتغيرة بمرور الوقت ضمن هذه الفترة الزمنية. وتنظر التوصيات ذات الصلة لقطاع الاتصالات الراديوية التي تفرض قيوداً على متوسط قدرة التداخل في نسبة قدرة التداخل قدرة التداخل المستقبَلة إلى مجمل قدرة ضوضاء نظام المستقبِل. وفي غياب أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت، وإذ يُعتبر التداخل من T_2 المستقبَل في R_1 عبر الساتلين S_1 و S_2، يمكن التعبير عن قدرة التداخل هذه على النحو التالي:

$$f_s = \frac{I_{s,1} + I_{s,2}}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + I_{s,1} + I_{s,2} + N_{\uparrow,2}} = \frac{c_2 c_3 + c_1 c_2 c_3}{1 + c_1 c_2 c_3 (1 + c_5) + c_2 c_3 + c_3} \quad (31)$$

ثم تُدخل أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت في الحالة الساكنة أعلاه، ويُحسب متوسط قدرة التداخل خلال الفترة T_{avg} للحصول على القيمتين الوسطيتين لعبارتي التداخل $I_{t,1}$ و$I_{t,2}$ على مر الوقت ويُرمز إليهما بالرمزين $\langle I_{t,1} \rangle$ و $\langle I_{t,2} \rangle$. ويمكن بعد ذلك التعبير عن متوسط قدرة التداخل ككسر من إجمالي قدرة الضوضاء على النحو التالي:

$$f_t = \frac{\langle I_{t,1} \rangle + \langle I_{t,2} \rangle}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow} + \langle I_{t,1} \rangle + \langle I_{t,2} \rangle + N_{\uparrow,2}} = \frac{c_2 c_3 \langle G_{2,t}(\varphi) \rangle / (\Delta B\, G_2(\varphi)) + c_1 c_2 c_3 \langle G_{2,t}(0) \rangle / (\Delta B\, G_2(0))}{1 + c_3 + c_2 c_3 \langle G_{2,t}(\varphi) \rangle / (\Delta B\, G_2(\varphi)) + c_1 c_2 c_3 \langle G_{2,t}(0) \rangle / (\Delta B\, G_2(0)) + c_1 c_2 c_3 c_5} \quad (32)$$

ومن ثم، يمكن التعبير عن متوسط التداخل على المدى الطويل بالنسبة إلى التداخل الإجمالي على النحو التالي:

$$R_L(\%) = 100\ \% \times \frac{f_t - f_s}{f_t} \tag{33}$$

7 إجراء توضيحي لتنفيذ هذه المنهجية

تعرض هذه الفقرة إجراءً خطوة بخطوة لتنفيذ العمليات الحسابية الواردة في الفقرة 4. وعلى وجه التحديد، فإن الإجراء القائم على محاكاة مونتي كارلو يحسب الزيادة في عدم توفر الوصلة جراء أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت؛ علماً بأن هذا نهج توضيحي، ويمكن استعمال نُهُج أخرى.

1.7 مدخلات الحساب

معلمات الوصلة: خطوط الطول والعرض للمطاريف T_1 وR_1 وT_2؛ وخطوط طول الساتلين S_1 وS_2، وθ و$G_1(\theta)$ و$(G/T)_1$ و$T_\downarrow$ وφ، ومخطط الكسب المقيّس لهوائي T_2 و$G_2(\varphi)$؛ وG_{S1} وG_{S2} و$(G/T)_{S1}$ و$(G/T)_{S2}$ وL_d وL_u وT_r.

معلمات المطر: معدل هطول المطر (0,01% mm/h)، والارتفاع فوق متوسط مستوى سطح البحر وارتفاع المطر (لكل من R_1 وT_1 وT_2). ويمكن حساب هذه المعلمات باستعمال التوصيتين ITU-R P.837 وITU-R P.839.

عدم توفر الوصلة: النسب المئوية اللازمة لعدم توفر الوصلة، p_i%. ومهلة الوقت المخصصة لتعطل الوصلة في التداخلات المتغيرة بمرور الوقت، T_{allow}%.

معلمة محاكاة مونت كارلو: طول المتجهات العشوائية، N.

خصائص الخطأ في توجيه الهوائي: متجها خطأ السمت والارتفاع بطول N، وزاويتا ϕ_ε وϕ_a، المتولدتان على النحو الذي ورد بحثه في الفقرة 2 من الملحق 1.

2.7 تدهور نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (*C/N*) في غياب أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت

الخطوة 1: نحدد B_s وهي كثافة القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على خط تسديد هوائي T_2 باستخدام $G_2(\varphi)$ وفقاً للتوصية ITU-R S.728. ويُفترض أن هذه الكثافة تفي بمختلف المتطلبات المتعلقة بالتداخل والتنسيق على النحو الذي توجزه التوصية ITU-R S.1432.

الخطوة 2: نحسب متغيرات الوصلة.

أ) نحسب المتغيرات c_1 وc_2 وc_3 وc_4 وc_5 باستعمال معلمات الوصلة على النحو الوارد في المعادلة (18).

ب) نحسب d_1 وd_2 على النحو الموضح في المعادلة (17).

الخطوة 3: نحدد الخبو بفعل المطر في الوصلتين الصاعدة والهابطة.

أ) نحدد دوال الكثافة التراكمية للخبو بفعل المطر في الوصلتين الصاعدة والهابطة باستخدام معلمات المطر $\overline{A}_\uparrow$ و$\overline{A}_\downarrow$ و$\overline{A}_{\uparrow,I}$، وفقاً للتوصية ITU-R P.618.

ب) ومن دوال الكثافة التراكمية هذه نحدد 3 متجهات للمتغيرات العشوائية بطول N لكل منها، وذلك لكل من $\overline{A}_\uparrow$ و$\overline{A}_\downarrow$ و$\overline{A}_{\uparrow,I}$.

الخطوة 4: نولد متجه المتغيرات العشوائية للدالة $\overline{Z}_s$ باستخدام المعادلة (19).

الخطوة 5: نحدد دالة الكثافة التراكمية للدالتين $\overline{Z}_s$ و$P_s(\overline{z})$ باستخدام هذا المتجه للمتغيرات العشوائية.

الخطوة 6: نحسب هامش الخبو، $\overline{z}_i$، المطلوب لعدم تيسر الوصلة، $(100 - T_{allow})\% \times p_i\%$. ويفي الهامش $\overline{z}_i$ المطلوب بالعلاقة التالية: $(1 - P_s(\overline{z})) = p_i / 100 \times (100 - T_{allow}) / 100$.

3.7 تدهور نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (*C/N*) بوجود أخطاء توجيه الهوائي المتغيرة بمرور الوقت

الخطوة 7: نحدد معلمات الوصلة e_1 وe_2 وe_3 وe_4 في المعادلة (13).

الخطوة 8: نولد متجهين عشوائيين طول كل منهما N، للمتغيرين العشوائيين $G_{2,t}(0)$ و$G_{2,t}(\varphi)$.

أ) كما ذُكر في الفقرة 2 من الملحق 1، نولد متجهين عشوائيين طول كل منهما N لمتغيري خطأ التوجيه ϕ_ε وϕ_a.

ب) باستخدام خطوط الطول والعرض النسبية وأخطاء التوجيه، نحسب متجهات الزاوية من خط تسديد هوائي T_2 إلى الساتلين S_1 وS_2، و$\Phi(\varphi, \phi_\varepsilon, \phi_a)$ و$\Phi(\varphi,\phi_\varepsilon,\phi_a)$ و$\Phi(0, \phi_\varepsilon, \phi_a)$ على النحو الموضح في الفقرة 3 من الملحق 1. وجدير بالذكر أنه وفقاً للترميز في الملحق 1، الدالة $\Phi(\varphi, \phi\varepsilon, \phi a)$ تقابلها الدالة θ_{BS_φ} المعبر عنها في المعادلة (4).

ج) نحدد المتجهين العشوائيين بطول N للمتغيرين العشوائيين $G_{2,t}(0)$ و$G_{2,t}(\varphi)$ كما يلي: $G_{2,t}(\varphi) = G_2(\Phi(\varphi, \phi_\varepsilon, \phi_a))$.

الخطوة 9: نضبط ΔB كمعلمة.

الخطوة 10: نولد $\overline{Z}_t$ في المعادلة (12) وهو متجه عشوائي بطول N.

الخطوة 11: نحدد دالة الكثافة التراكمية للدالتين $\overline{Z}_t$ و$P_t(\overline{z})$ باستخدام هذا المتجه للمتغيرات العشوائية.

الخطوة 12: نحدد توفر الوصلة بالنسبة لهامش الخبو $\overline{z}_i$ المحسوب في الخطوة 6 وهو $P_t(\overline{z}_i)$.

الخطوة 13: نحدد الزيادة النسبية في عدم توفر الوصلة، $R(\overline{z}_i)$، كما في المعادلة (30).

8 ملخص

عرض هذا الملحق منهجية لتقييم آثار التداخل على السواتل المجاورة جراء أخطاء في توجيه الهوائي تتغير بمرور الوقت في المحطات الأرضية المركَّبة على مركبات (VMES).

وتتناول هذه المنهجية على وجه التحديد زيادة التداخل فيما يتعلق بالمطراف الثابت الذي يمتلك نفس خصائص المطراف المركّب على مركبة، ولكن من دون أخطاء في توجيه الهوائي ناجمة عن الحركة. ويتشابه النهج المتبع مع ذاك الذي وضعته التوصية ITU-R S.1323 حيث تعزى نسبة 90% على الأكثر من المهلة الزمنية لتعطل الوصلة إلى مؤثرات الانتشار مثل الخبو بفعل المطر والتغيرات في ضوضاء المستقبِل. أما في هذه التوصية، فيُفترض أن ما نسبته $(100 - T_{allow})\%$ من المهلة الزمنية المقابلة تعزى إلى مؤثرات الانتشار والتداخل الناجم عن مطراف ساكن. وتُعرض أيضاً منهجية لتقييم الزيادة في التداخل على المدى الطويل فيما يتعلق بالحالة الساكنة. وفي تحليل التداخل على المدى الطويل، يؤخذ متوسط الإشارة على مدى فترة T_{avg}، يُفترض أن تكون مديدة بما يكفي بحيث تمثّل الخصائص الإحصائية للتداخل تمثيلاً معقولاً خلال هذه الفترة.

_____