

التوصية ITU-R P.1410-6

(2023/08)

السلسلة P: انتشار الموجات الراديوية

معطيات الانتشار وطرائق التنبؤ المطلوبة لتصميم أنظمة
النفاز الراديوية عريضة النطاق للأرض العاملة في نطاق
التردد من 3 GHz إلى 60 GHz

تمهيد

يضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد المدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها. ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

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

سلسلة توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

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

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

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

النشر الإلكتروني

جنيف، 2024

© ITU 2024

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

التوصية ITU-R P.1410-6

معطيات الانتشار وطرائق التنبؤ المطلوبة لتصميم أنظمة النفاذ الراديوية عريضة النطاق للأرض العاملة في نطاق التردد من 3 GHz إلى 60 GHz

(المسألة 203/3 ITU-R)

(1999-2001-2003-2005-2007-2012-2023)

مجال التطبيق

يعتبر النفاذ اللاسلكي عريض النطاق طريقة هامة لتوفير النطاق العريض للمنازل الفردية وكذلك للمشروعات التجارية الصغيرة. وتتناول هذه التوصية الأنظمة العاملة في نطاق تردد من 3 إلى 60 GHz وتقدم توجيهاً لآليات الانتشار الهامة ذات التغطية في خط البصر (LoS) وفي غير خط البصر (non-LoS). وتُقدم بالنسبة للأنظمة المتأثرة بالمطر طرائق لتقدير التحسينات المتنوعة نتيجة انتقاء أفضل محطة قاعدة من اثنتين وانخفاض التغطية نتيجة لهطول المطر. كما يُقدم توجيه بشأن التشوه واسع النطاق.

المختصرات/مسرد المصطلحات

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| محطة القاعدة (<i>Base station</i>) | BS |
| النفاذ اللاسلكي عريض النطاق (<i>Broadband wireless access</i>) | BWA |
| نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (<i>Carrier to interference ratio</i>) | C/I |
| نسبة قدرة الموجات الحاملة إلى قدرة التداخل (<i>Carrier power to interference power ratio</i>) | CIR |
| الخدمة الإذاعية الفيديوية الرقمية (<i>Satellite digital video broadcasting</i>) | DVB-S |
| تصحيح الخطأ في اتجاه الذهاب (<i>Forward error correction</i>) | FEC |
| شبكة راديوية عالية الأداء لمنطقة حضرية (<i>High performance radio Metropolitan Area Network</i>) | HiperMAN |
| نظام الاتصالات المحلية متعددة النقاط (<i>Local multipoint communications system</i>) | LMCS |
| نظام التوزيع المحلي متعدد النقاط (<i>Local multipoint distribution system</i>) | LMDS |
| خط البصر (<i>Line of sight</i>) | LoS |
| مضمام القدرة القصوى (<i>Maximum power combiner</i>) | MPC |
| فريق خبراء الصور المتحركة-2 (<i>Moving pictures experts group-2</i>) | MPEG-2 |
| غير خط البصر (<i>non-line of sight</i>) | non-LoS |
| كثافة تدفق القدرة (<i>power flux-density</i>) | pdf |
| من نقطة إلى عدة نقاط (<i>Point-to-multipoint</i>) | P-MP |
| إبراق متعامد بزحزحة الطور (<i>Quadrature phase shift keying</i>) | QPSK |
| رادار ذو فتحة تركيبية (<i>Synthetic aperture radar</i>) | SAR |
| محطة المشترك (<i>Subscriber station</i>) | SS |

توصيات وتقارير الاتحاد ذات الصلة

التوصية ITU-R P.1411

التوصية ITU-R P.833

التوصية ITU-R P.526

التوصية ITU-R P.452

التوصية ITU-R P.530

التوصية ITU-R P.1057

ملاحظة - ينبغي استخدام أحدث مراجعة/طبعة من التوصية/التقرير.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

(أ) أن التخطيط الملائم لأنظمة النفاذ الراديوي للأرض عريضة النطاق يتطلب توفر طرائق التنبؤ والمعطيات المناسبة في مجال الانتشار؛

(ب) أن التوصيات المعدة لتصميم الوصلات الفردية لا تشمل الجوانب المتعلقة بالمنطقة،

توصي

بضرورة تطبيق المعطيات المتعلقة بالانتشار وطرائق التنبؤ الواردة في الملحق 1 عند تصميم أنظمة النفاذ الراديوي للأرض العاملة في نطاق التردد من 3 GHz إلى 60 GHz.

الملحق 1

جدول المحتويات

الصفحة

| | | |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2 | الملحق 1 | |
| 3 | مقدمة | 1 |
| 3 | تغطية المنطقة | 2 |
| 3 | الحجب بالمباني | 1.2 |
| 15 | التوهين الناتج عن الغطاء النباتي | 2.2 |
| 15 | دراسة حالة لآليات الانتشار | 3.2 |
| 20 | اعتماد خسارة الإرسال الأساسية على ارتفاع هوائي محطة المشترك (SS) | 4.2 |
| 24 | أسلوب التنبؤ بخسارة الإرسال الأساسية مع احتساب كسب الارتفاع عند محطة المشترك (SS) | 5.2 |
| 25 | التوجهات العامة | 6.2 |
| 26 | تأثير الهواطل على التيسرية | 3 |
| 26 | تغطية المنطقة المتأونة | 1.3 |
| 28 | تحسين تنوع الطرق | 2.3 |
| 30 | تشوه قناة الانتشار | 4 |
| 31 | توهين انتقائي للتردد العائد إلى الغطاء النباتي | 1.4 |
| 31 | الانتشار عبر عدة مسيرات الناتج عن الانعكاسات | 2.4 |
| 34 | التداخل | 5 |

1 مقدمة

هناك اهتمام متزايد بتوفير الخدمات عريضة النطاق بواسطة شبكات النفاذ المحلية إلى المنازل الفردية والشركات التجارية الصغيرة كذلك. وقد أصبحت الحلول الراديوية بشكل متزايد أنظمة لتقديم الخدمات وهي متيسرة اليوم في السوق. ويجري حالياً دراسة عدة أنظمة وتشغيلها، لا سيما نظام التوزيع المحلي متعدد النقاط (LMDS) ونظام الاتصالات المحلية متعددة النقاط (LMCS) والنظام من نقطة إلى عدة نقاط (P-MP). ويمكن تسمية هذه الأنظمة بصورة إجمالية بأنظمة النفاذ اللاسلكي عريض النطاق (BWA). ويجري حالياً وضع معايير دولية مثل WMAX المستند إلى المعيار IEEE 802.16 و HiperMAN.

يجب الحصول على إرشادات جيدة في مجال التصميم فيما يتعلق بمسائل انتشار الموجات الراديوية. داخل قطاع تخطيط الشبكات والمشغلين والجهات المصنعة ومن جانب الهيئات المنظمة.

2 تغطية المنطقة

يتعين على المشغل عند تخطيط نظام خلوي أن يختار بعناية موقع وارتفاع المحطة القاعدة فوق سطح الأرض لكي يتسنى له توفير الخدمة للعدد المرغوب من المستعملين داخل منطقة معينة. ويمكن أن يتغير حجم الخلايا حسب الطبوغرافيا وعدد المستعملين المستفيدين من الخدمة الراديوية. ويقدم هذا الفرع نموذجاً إحصائياً للحجب بالمباني يقوم على تحديد بسيط لخصائص المباني في منطقة معينة وتوفير إرشادات تقوم على حسابات مفصلة. ويقدم أيضاً نموذجاً للتوهين الناتج عن الغطاء النباتي وبعض قواعد التصميم البسيطة.

1.2 الحجب بالمباني

تتمثل أفضل طريقة لتقييم احتمال الحجب بالمباني في تقنيات تتبع أثر الأشعة التي تستعمل معطيات حقيقية صادرة من قواعد معطيات مفصلة عن المباني والتضاريس الأرضية. وتصف الفقرة 1.1.2 باختصار متطلبات تقنيات تتبع أثر الأشعة. ومع ذلك، لا تتوفر قواعد معطيات ملائمة في العديد من المناطق ومن ثم يوصى باستعمال النموذج الإحصائي الموصوف في الفقرة 2.1.2.

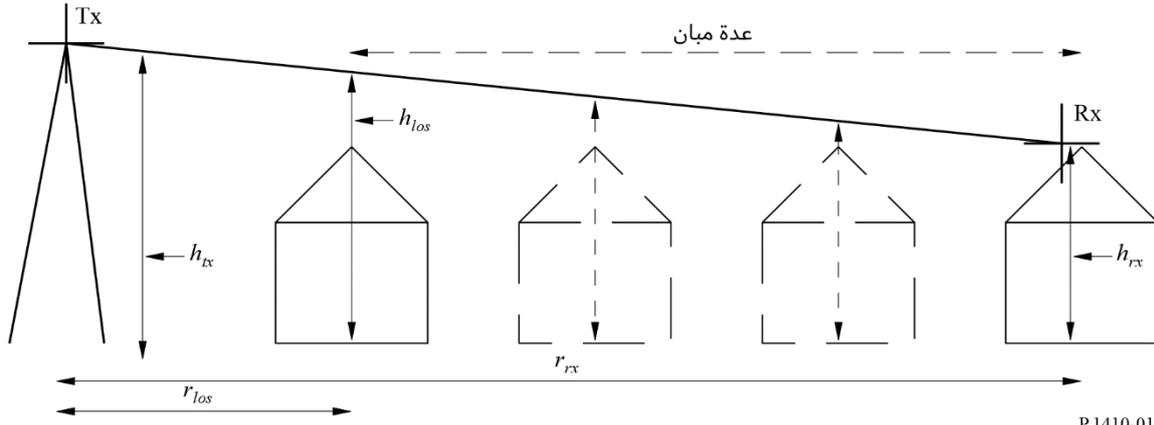
1.1.2 متطلبات تتبع أثر الأشعة

يمكن الحصول على تنبؤ دقيق بالتغطية باستعمال تقنيات تتبع أثر الأشعة في المناطق التي تتوفر بشأنها قواعد معطيات عن التغطية بالتضاريس الأرضية. ونظراً إلى ارتفاع الترددات وقصر أطوال المسير المعنية، يمكن استعمال تقريب بصري هندسي للانتشار عبر خط مستقيم.

ولتقريب من المرتبة الأولى لتقييم التغطية، يكون تحديد الرؤية عبر خط البصر (LoS) بمقدار 60% من تحرير منطقة فرينل الأولى كافياً لضمان خسارة إضافية لا تذكر (انظر الشكل 1). وتكون الخسارة بسبب الانعراج شديدة في حالات خارج خط البصر. وسوف تحدد قاعدة المعطيات الخاصة بالمباني من دقة التنبؤ بالأشعة ويجب أن تتضمن قاعدة المعطيات تمثيلاً دقيقاً للتضاريس الأرضية والمباني الواقعة على طول المسير. ويجب أن يؤخذ في الاعتبار أيضاً انحناء الأرض فيما يتعلق بالمسيرات التي تزيد عن 2 km. وينبغي لأغراض هذا الإجراء اعتبار المباني والغطاء النباتي كعناصر غير منفذة للأشعة.

الشكل 1

يجب أن يقع كل مبنى تحت شعاع خط البصر الواصل بين المرسل والمستقبل



بينت قياسات خصائص الإشارة المقارنة بنماذج تتبع أثر الأشعة توافقاً إحصائياً مرضياً ولكنها بينت أيضاً تغيرات كبيرة في الإشارة حسب الموقع والساعة فيما يتعلق بمسيرات خارج خط البصر. وبالتالي، ونظراً إلى الدقة المحدودة لقواعد المعطيات بشأن المباني الحقيقية، لا يمكن التنبؤ بنوعية الخدمة فيما يتعلق بمسيرات معينة، تتبع شبه خط البصر.

يمكن أن يسبب الغطاء النباتي ولا سيما الأشجار والشجيرات العالية، انخفاطاً هاماً في الخدمة، ويتعين في الحالات المثلى تضمين المعطيات المتصلة بالغطاء النباتي في قاعدة المعطيات.

وقد بينت القياسات، فيما يتعلق بتوفير الخدمة في منطقة حضرية/شبه حضرية نموذجية، أن عدد المستعملين المتضررين بتأثيرات الانعكاس الناتجة عن مسيرات متعددة أقل بكثير من عدد المستعملين المتضررين بتأثيرات المباني والغطاء النباتي، وذلك بسبب ضيق فتحة حزمة الهوائي، وبالتالي لا ضرورة لحساب الانعكاسات (انظر الفقرة 1.2.4).

ويمكن أن تكون قاعدة المعطيات المستعملة للتقييم بواسطة تقنية تتبع أثر الأشعة قاعدة معطيات مفصلة موجهة نحو الأشياء تشمل ارتفاع التضاريس الأرضية والخطوط الكفافية للمباني المختلفة ومعلومات متصلة بارتفاع السقوف وشكلها وعلى أساس تمثيل الغطاء النباتي في شكل أشجار إفرادية أو مجموعات أشجار. وكحل بديل، يمكن في تحديد مسير خط البصر استعمال قاعدة معطيات بخطوط مسح الارتفاعات النقطية مثل تلك الناتجة عن نظام القياس باستعمال رادار ذي فتحة تركيبية (SAR) محمول جواً (انظر الجدول 1).

الجدول 1

المتطلبات الدنيا لقاعدة المعطيات

| الشيء | النسق | استبانة أفقية (m) | استبانة عمودية (m) |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------|
| التضاريس الأرضية | شبكة ارتفاعات نقطية | 50 | 1 |
| المباني الغطاء النباتي | معالج صورة الشبكة الضوئية الموجهة نحو الشيء أو الاستبانة العالية | 1 | 1 |

2.1.2 التعامل مع الانعكاسات والانتشار

يمكن أن تكون الانعكاسات من المباني القريبة في البيئة الحضرية هي آلية الانتشار السائدة في ظروف غير خط البصر. وقد كانت الطرق الفعالة لحساب الانعكاسات في قواعد البيانات الضخمة مجالاً لكثير من الأبحاث والمطبوعات. وعند دراسة الانعكاسات والانعرجات المتعددة فإن المشكلة تصبح مثار تفاعل بالنسبة للجميع وإن كانت أقل السيناريوهات شأناً. ولهذا السبب يوصى بنموذج انعكاس ذي وثبة وحيدة مع كل مسير من وإلى العاكس على أن يخضع لحسارة الانعرجات الرأسية والأفقية الخاصة به.

نموذج انتشار سطح خشن

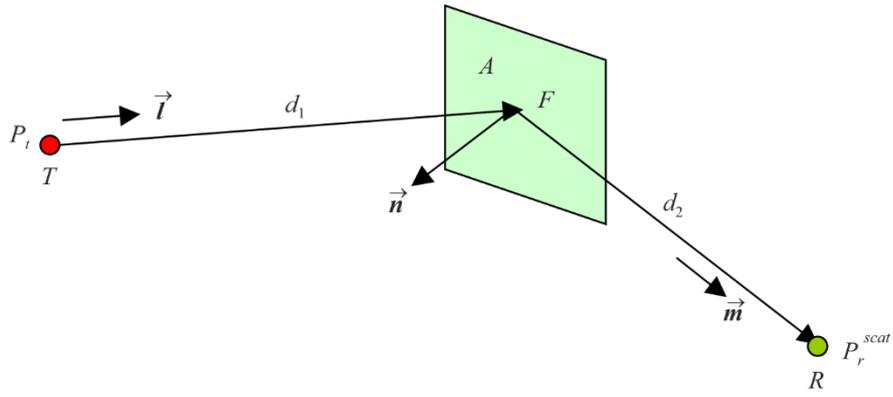
يقترح لتقليل السقف الحسابي لأدنى حد استخدام النموذج البسيط الوارد هنا. ويعتبر هذا النموذج نموذجاً عددياً للانتشار المتناثر من سطح خشن. بمعنى أنه ينظر فقط في القدرة المتناثرة ولا يتعرض لتأثيرات الطور والاستقطاب.

الهندسة

نفترض واجهة سطح خشن F بمساحة A . وعلى أن يرمز للمرسل والمستقبل بالحرفين T و R . و \vec{i} و \vec{m} هما متجهي الوحدة في الاتجاهين TF و FR و n هو العمودي على الواجهة، الشكل 2.

الشكل 2

هندسة الانعكاس



P.1410-02

P_t و P_r^{scat} هما القدرة المرسل والمرسلة والقدرة المستقبل المتناثرة عند المرسل T والمستقبل R على التوالي ويفترض استخدام هوائيات شاملة الاتجاه عند المرسل والمستقبل.

الانتشار من المرسل T إلى السطح F

على فرض أن الانتشار في ظروف الفضاء الحر، تكون كثافة تدفق القدرة S (pfd) (W/m^2) عند مسافة d_1 من المرسل T :

$$S = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1} \right)^2 P_t \quad (1)$$

حيث λ هو طول الموجة. ومن ثم تكون القدرة P_{fr} الواقعة على السطح F :

$$P_{fr} = SA |\vec{i} \cdot \vec{n}| \quad (2)$$

وتفترض هذه النتائج أن أي أبعاد للمساحة A أقل من d بحيث تكون كثافة تدفق القدرة ثابتة عبر الواجهة كلها. ولا يمثل هذا الأمر قيداً كبيراً؛ حيث إنه في الأساس يمكن اختيار الواجهة A صغيرة كلما أمكن لتحقيق ذلك. بيد أنه يفترض في هذا النموذج أن F هي في الحقيقة الواجهة الكاملة للمبنى (أو على الأقل الجزء اللامع من واجهة المبنى) ويفترض كذلك أنه قد تم استيفاء هذا القيد. والنقطة المرجعية للانتشار هي مركز الواجهة.

نموذج انتشار سطح خشن

هذا هو النموذج المستخدم من أجل نشر الانتشار في شكل رسوم بيانية حاسوبية حيث يفترض أن القدرة المتناثرة المتناثرة بواسطة السطح الخشن F تخضع لقانون لامبرت. بمعنى أن القدرة تشع ثانية في جميع الاتجاهات (في نصف المستوي) بشدة تختلف حسب الصيغة $\cos \theta$ حيث θ هي زاوية الإشعاع مقاسة من الاتجاه العمودي. ويلغي هذا التغيير تماماً القيمة $1/\cos \theta$ التي تعتمد على كثافة تدفق القدرة المرسل (نتيجة لحد الإسقاط $|\vec{m} \cdot \vec{n}|$) بحيث يتم بث إشعاعات شاملة الاتجاه بكسب متساوٍ في جميع الاتجاهات. ويقابل هذا ما يلاحظ عملياً بالنسبة للانتشار الضوئي. ويمكن الحصول على القدرة المتناثرة المرسل من السطح F من العلاقة:

$$(3) \quad P_{ft} = 2\rho_{nonspec}P_{fr}$$

ويمثل المعامل 2 حقيقة أن جميع القدرات تبث نحو نصف كرة. وتمثل $\rho_{nonspec}$ جزء القدرة المتناثرة التي تقع على السطح F ثم تشع ثانية في شكل انتشار غير مرآوي.

الانتشار من السطح إلى المستقبل

بفرض الانتشار في ظروف الفضاء الحر واستخدام هوائي شامل الاتجاه، فإن القدرة المتناثرة المستقبلية عند R :

$$(4) \quad P_r^{scat} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_2} \right)^2 P_{ft}$$

ميزانية الوصلة الكاملة

يجمع المعادلتين (1) و(2) نحصل على:

$$(5) \quad P_r^{scat} = 2\rho_{nonspec} \frac{4\pi A |l \cdot n|}{\lambda^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d_2} \right)^2 P_t$$

يمثل الحد $(\lambda/4\pi d)^2$ المعطيات الخاصة بانتشار الفضاء الحر ويمكن بوجه عام إحلال معطيات الانتشار الفعلي بدلاً من هذه المعطيات. كما يمكن إدراج نماذج كسب الهوائي عند المرسل والمستقبل. والافتراض الوحيد المطلوب هو أن ينطبق مستوى الإشعاع على السطح F .

خسارة الانتشار

قد يكون من المفيد حساب "خسارة" الانتشار المتناثر لسطح خشن. وهي تعتبر خسارة الإرسال الأساسية الإضافية الناجمة عن الانتشار فوق خسارة الإرسال الأساسية في حال إذا ما كانت الواجهة مرآة نموذجية حيث يحدث عندها الانعكاس المرآوي بمعامل انعكاس قدره 1. ولعمل ذلك يجب افتراض انتشار الفضاء الحر على المسيرين TF و FR . وتكون القدرة المستقبلية عند R من مرسل عند T مع افتراض انعكاس نموذجي، P_r^{LOS} كالتالي:

$$(6) \quad P_r^{LOS} = \left(\frac{\lambda}{4\pi(d_1 + d_2)} \right)^2 P_t$$

ويمكن بعد ذلك الحصول على خسارة الانتثار L_{scat} (تعرف بحيث تكون $L_{scat} > 1$ بالنسبة للخسارة):

$$(7) \quad \frac{1}{L_{scat}} = \frac{P_r^{scat}}{P_r^{LoS}} = \frac{|\bar{\mathbf{i}} \cdot \bar{\mathbf{n}}|}{2\pi} \rho_{nonspec} \frac{(d_1 + d_2)^2 A}{d_1^2 d_2^2}$$

ويجب وبشكل حاسم أن تكون جميع الحدود في هذه المعادلة أقل من 1 فيما عدا الحد الأخير والذي يمكن أن يزيد عن 1 إذا كانت A كبيرة جداً مقارنة بالبعدين d_1 و d_2 . ومع ذلك وكما أشير إليه آنفاً، فإن النموذج يعتبر سارياً فقط إذا كان أي من أبعاد A أقل بكثير من d_1 حيث إن تنفيذ المعادلة (7) يجب أن يحقق الشرط:

$$(8) \quad \frac{(d_1 + d_2)^2 A}{d_1^2 d_2^2} \leq 1$$

وتنتهك هذه القاعدة عندما يكون موقعا المرسل والمستقبل قريبين جداً من السطح F .

وتبين المعادلة (7) أن خسارة الانتثار غير المرآوي تزيد بسرعة بمجرد ابتعاد نقطة الاستقبال عن سطح الانتثار. وحيث إن $d_1 \rightarrow \infty$ ، لذا فإن الخسارة (dB) تقوّل إلى $10 \log(d_2^2 / A)$ لذلك فإنه بالنسبة لواجهة مبنى بمساحة 100 m^2 تكون الخسارة نتيجة لهذا الحد فقط 20 dB على مسافة 100 m و 40 dB على مسافة كيلومتر واحد من المبنى.

تعريف $\rho_{nonspec}$

بتعريف ρ_{trans} و ρ_{spec} على أنهما الجزء المتماسك من القدرة الواقع على السطح F وينعكس كانعكاس مرآوي (متماسك) ثم يرسل خلال الواجهة، على التوالي، فإنه يمكن الحصول على نموذج متوافق لعملية الانتثار الكاملة ويتوقع أن يحفظ الطاقة مع تحقيق العلاقة:

$$(9) \quad \rho_{spec} + \rho_{trans} + \rho_{nonspec} = 1$$

ومما يؤسف له هو أن النموذج شبه التجريبي الذي لدينا غير متوافق ويتم وضع افتراضات مختلفة لكل آلية:

- ρ_{spec} : وأكثر النماذج اعتماداً على المفهوم النظري هو ذلك الخاص بالانتثار المرآوي. فبالنسبة لواجهة ملساء، يتم تحديد القدرة المنعكسة بواسطة معاملات انعكاس فرينل (والتي تعتمد على زاوية الانعكاس المرآوي والخواص الكهربائية للواجهات). بيد أنه لا يوجد امتداد مبسط لانتثار السطح الخشن ويستخدم النموذج حلاً شبه تجريبي يعدل (يخفف) من معامل انعكاس فرينل للأسطح الملساء. ويقترح تعريف ρ_{spec} على أنها معامل انخفاض القدرة نتيجة لتأثير السطح الخشن فحسب؛ بمعنى عدم أخذ التغيير في القدرة المنعكسة نتيجة لتغير معامل فرينل في الاعتبار. ويعتمد الأخير على زاوية الانعكاس والاستقطاب ومن ثم فإن الأمر نفسه ينطبق على القدرة المتناثرة غير المرآوية؛ ولا يتوافق ذلك مع فرضية لامبرت.

- ρ_{trans} : يمكن مبدئياً حساب الجزء المرسل من القدرة باستخدام نظرية فرينل لسطح أملس مع سطح بيني وحيد. غير أن الوضع في الواقع العملي معقد جداً بالنسبة للنمذجة (سطح خشن، أسطح بينية متعددة وانعكاسات) وبالتالي يجب استخدام قيمة محددة معملياً، قيمة تجريبية للقدرة ρ_{trans} .

ومن حيث المبدأ، يجب أن تحقق كل قيمة للقدرة ρ الشرط $0 \leq \rho \leq 1$. ولا يوجد ما يدعو إلى الاعتقاد بأن المعادلة (9) ستتحقق وإذا استخدمت لحساب $\rho_{nonspec}$ من ρ_{spec} و ρ_{trans} فمن الممكن أن تصبح القدرة $\rho_{nonspec}$ سالبة وهذا غير صحيح فيزيائياً. ومن ثم يقترح استخلاص الجزء غير المرآوي مباشرة من الجزء المرآوي مع إهمال الجزء المرسل:

$$(10) \quad \rho_{nonspec} = 1 - \rho_{spec}$$

وعملياً تكون القيمة ρ_{trans} غالباً صغيرة جداً (فمثلاً بالنسبة لخسارة اختراق مبنى قيمتها 10 dB تكون $\rho_{trans} = 0.1$).

حساب ρ_{spec}

ρ_{spec} هو معامل انخفاض القدرة المطبق على معامل الانعكاس المرآوي لكي يراعي تأثير خشونة السطح على الانعكاس المرآوي. وهو يساوي:

$$\rho_{spec} = \rho_s^2 \quad (11)$$

عند حساب معامل الانعكاس المرآوي، فإننا نحصل على معامل الانعكاس الفعّال R بضرب معامل فرينل R_F في ρ_s .

$$R = \rho_s R_F \quad (12)$$

ويمكن حساب ρ_s من العلاقة:

$$\rho_s = \max\left[\exp\left(-\frac{1}{2}g^2\right), 0.15\right] \quad (13)$$

حيث:

$$g = \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \cos\varphi \quad (14)$$

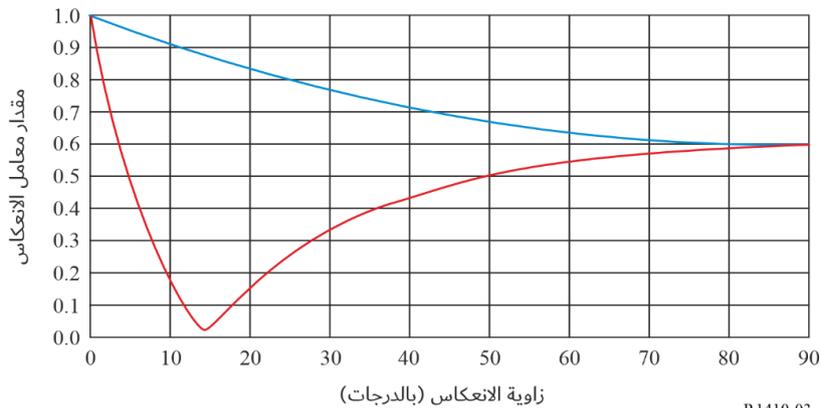
σ هي الانحراف المعياري لارتفاع خشونة السطح عن المتوسط الموضعي داخل النطاق الأول لفرينل و φ هي زاوية السقوط مقاسة من العمودي على السطح. وقيمة القطع 0,15 في المعادلة (13) لكي تحول دون الحصول على قيم صغيرة جداً للقدرة ρ_s . (ويشير الحد الأسّي إلى التقدير الأقل للانتثار بالنسبة للأسطح شديدة الخشونة).

ويعتبر حساب معامل الانعكاس المرآوي في المعادلة (13) شديد التعقيد. ويعتمد معامل فرينل على الزاوية والمقادير الكهربائية الثابتة والاستقطاب. ويعني الاعتماد على الاستقطاب أنه يجب حساب معاملي انعكاس فرينل في الاتجاهين المتوازي والعمودي بوجه عام ويجب أن يراعى في هندسة مسير الشعاع دوران الاستقطاب عند حساب قيمة الإشارة عند المستقبل.

ونظراً للطبيعة التجريبية للنموذج، فإنه إذا كانت النمذجة تُعنى فقط بقدرات الإشارة (ويمكن إهمال الطور) فإنه يمكن عمل تبسيط من خلال حساب جميع الانعكاسات المرآوية استناداً إلى معامل فرينل في الاتجاه الموازي فقط. وعادة يكون مقدار المعامل عندما يكون المنتجه الكهربائي في مستوي السقوط والأشعة المنعكسة (المنحني الأزرق أو العلوي، في شكل 3) أكبر عددياً من المعامل نفسه عندما يكون المنتجه الكهربائي عمودياً على المستوي (المنحني الأحمر أو السفلي). وفي قاعدة بيانات ثلاثية الأبعاد، يكون هناك عادة مزج جزأي الاستقطاب، ويتجه الجزء الموازي إلى حجب "الصفير" في الجزء العمودي

الشكل 3

مقدار معامل انعكاس فرينل R_F في الاتجاهين الموازي (الأزرق) والعمودي (الأحمر) كدالة في الزاوية (3,5 GHz، سطح متوسط جاف)



حساب ρ_{trans}

ρ_{trans} هو جزء القدرة الساقطة المرسل عبر الحائط. ويفترض في هذا التطبيق أن قيمة ρ_{trans} مقدار ثابت لا يعتمد على زاوية الإرسال بالنسبة إلى الواجهة وأن الواجهة لا تغير زاوية الشعاع عند مروره خلالها.

نقاط للملاحظة

- 1 خسارة انتشار السطح الخشن تستخلص من المعادلة (10) على أن يحدد جزء القدرة غير المرآوي عن طريق المعادلات (11) و(13) و(14).
- 2 L_{scat} لا تعتمد صراحة على طول الموجة λ ، غير أن الاعتماد الوحيد على التردد يكون عبر ρ_{nonpec} . وهذا هو المتوقع - حيث إن هذا النموذج هو نموذج عددي للقدرة، ونموذج مصدر لامبرت لا يعتمد على التردد.
- 3 أن النموذج الذي يمثل وبشكل صحيح الطور والاستقطاب سيكون معقداً جداً وبشكل كبير وغير متوافق مع نموذج الانتشار المتنافر. والأكثر أهمية أنه يحتاج إلى معرفة مفصلة بشكل خشونة السطح وهي غالباً غير متاحة بالمرة. (وقد يكون ذلك ممكناً بالنسبة لسطح "قليل" الخشونة، مع استخدام نهج اضطرابي، ولكن نموذج انتشار متماسك كهذا سيكون من الأفضل تناوله في إطار نموذج انعكاس مرآوي معدل).
- 4 ومن نتائج النقطة 3 أن نموذج الانتشار هذا مفيد في الحقيقة فقط بالنسبة لنمذجة التداخل لأن قيم قدرة التداخل يفترض أنها تضاف بشكل متنافر. ويمكن استخدام هذه النتيجة بالنسبة للإشارة المطلوبة لتقدير انتشار التأخير. وللجمع المطلوب للحصول على القدرة الإجمالية للإشارة، من الضروري دراسة الطور بشكل أكثر تفصيلاً (أو بشكل مكافئ، أطوال المسير التفاضلية).
- 5 لا يحقق نموذج الانتشار غير المرآوي خاصية التبادلية. في الحقيقة هو يحقق هذه الخاصية بشكل تقريبي، ولكن إدراج الحد $|\mathbf{i} \cdot \mathbf{n}|$ دون الحد المقابل $|\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}|$ يشوه التماثل. وباختيار نموذج مصدر انتشار آخر غير نموذج لامبرت فإنه يمكن إصلاح ذلك. بيد أن النموذج يعتبر نموذجاً شبه تجريبي على أية حال ولا يُتوقع تحقيق التبادلية مع الافتراضات البسيطة الموضوعية.

3.1.2 الإرسال خلال المباني

تبين القياسات المدرجة في التوصية ITU-R P.1411 و(مراجع القياسات المبلغة) أن اختراق الإشارة خلال المباني عبر الحد الأدنى لنطاق التردد يمكن أن يصبح آلية انتشار متميزة (خسارة إضافية بنحو 20-40 dB) عندما تكون خسارة الانعرجات حول أو فوق المباني كبيرة. وكما هو الحال مع معاملات توهين الانعكاس، فإن هذه الخسارة ستوقف على مواد البناء الداخلة في المبنى والتردد الراديوي علاوةً على الهيكل الداخلي للمبنى (الحوائط الداخلية). ويمكن نمذجة الخسارة كسلسلة من خسارة الحوائط (عندما تتوافر بيانات كافية) أو كخسارة لكل متر خلال المبنى. وعندما يكون هناك أكثر من مبنى يعوق المسير المباشر فقد يكون من الأفضل إهمال هذه الآلية ما دام سيتم مراعاة تجميعات من المسيرات المنعكسة والمنعرجة والمارة خلال المبنى.

4.1.2 النموذج الإحصائي

بالنسبة إلى موقع معين للمرسل (Tx) وللمستقبل (Rx)، يكون احتمال وجود مسير خط البصر بين هذين الموقعين حاصل جمع الاحتمالات المتمثلة في أن كل مبنى يقع في مسير الانتشار يكون دون ارتفاع الشعاع الذي يوصل المرسل والمستقبل عند النقطة التي يعبر فيها الشعاع المبنى. ويبين الشكل 1 الشكل الهندسي لهذه الحالة ويعرف البنود المستعملة في المعادلة (15). وفي هذا النموذج يفترض أن التضاريس الأرضية مسطحة أو تتميز بميل ثابت في المنطقة المعنية.

ويُعطى ارتفاع الشعاع عند نقطة العائق h_{LoS} بالصيغة التالية:

$$h_{LoS} = h_{tx} - \frac{r_{LoS}(h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}} \quad (15)$$

حيث:

h_{tx} : ارتفاع المرسل فوق سطح الأرض

h_{rx} : ارتفاع المستقبل عند المسافة r_{rx}

r_{LoS} : المسافة بين المرسل والعائق.

وإذا افترض أن المباني متباعدة بشكل منتظم في المتوسط، يمكن تقدير عدد المباني الموجودة بين نقطتين. ويكون احتمال وجود شعاع في مسير خط البصر كالتالي:

$$(16) \quad P(LoS) = \prod_{b=1}^{b_r} P(\text{building_height} < h_{LoS})$$

حيث b_r يدل على عدد المباني المعبورة.

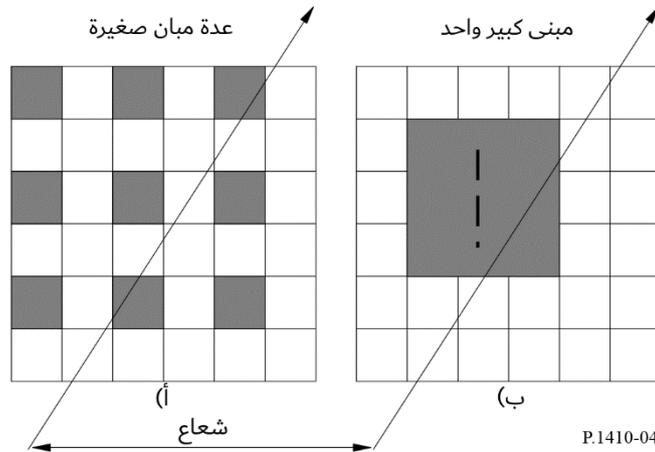
ويتطلب هذا النموذج البسيط ثلاث معلمات:

- α : نسبة المساحة التي تغطيها المباني إلى المساحة الكلية (بصرف النظر عن الارتفاع)؛
- β : متوسط عدد المباني في كل وحدة مساحية (المباني/ km^2)؛
- γ : قيمة متغيرة تحدد توزيع ارتفاعات المباني.

بالنسبة إلى توزيع رايلي المقترح، تعادل القيمة المتغيرة γ ارتفاع المبنى الأكثر احتمالاً (أسلوب). ويبين الشكل 4 سبب التمييز بين α و β . وللشكليين 4 أ) و 4 ب) نفس منطقة التغطية عند سطح الأرض وبالتالي نفس قيمة α ، ولكن من المتوقع وجود تفاعلات أكثر عند سوية المسير في الشكل 4 أ) منه في الشكل 4 ب). ولا يمكن للمعلمة α وحدها التمييز بين المخططين الموضحين في الشكل 4. وإذا كان ارتفاع المباني هو نفسه في الشكلين 4 أ) و 4 ب) يكون احتمال الحجب بعدة مبان صغيرة أقل منه بمبنى واحد كبير.

الشكل 4

سيناريوهان لنفس منطقة التغطية ولكن مع عدد مختلف من أشعة التفاعلات



بالنسبة إلى الانتقال من مواقع المناطق شبه الحضرية إلى مواقع المباني عالية الارتفاع، تتراوح المعلمة α بين 0,1 و 0,8 وتتراوح المعلمة β بين 100 و 750 على التوالي.

ويُعرّف توزيع احتمال رايلي $P(h)$ للارتفاع h المعلمة γ كالتالي:

$$(17) \quad P(h) = \frac{e^{-\frac{h^2}{2\gamma^2}} h}{\gamma^2}$$

5.1.2 الخوارزمية والحساب

إذا كانت α و β و γ معلومة عندئذ تحسب التغطية في خط البصر كالتالي:

يفترض مرور شعاع طوله 1 km فوق مبان عددها $\sqrt{\beta}$ إذا كانت هذه المباني منتظمة في شبكة تربيعية. وبما أن جزءاً فقط قدره α مغطى من الأرض، يكون العدد المتوقع للمباني المعبورة في كيلومتر واحد كما يلي:

$$(18) \quad b_1 = \sqrt{\alpha \beta}$$

وبالتالي يكون عدد المباني فيما يتعلق بمسير طوله r_{rx} (km) كالتالي:

$$(19) \quad b_r = \text{floor}(r_{rx} b_1)$$

حيث أدخلت دالة floor لضمان إدراج عدد صحيح من الحدود في المعادلة (16).

من أجل حساب احتمال وجود شعاع خط البصر (LOS) عند كل مسافة r_{rx} :

الخطوة 1: حساب عدد المباني b_r الموجودة بين النقطتين Tx و Rx باستعمال المعادلة (19).

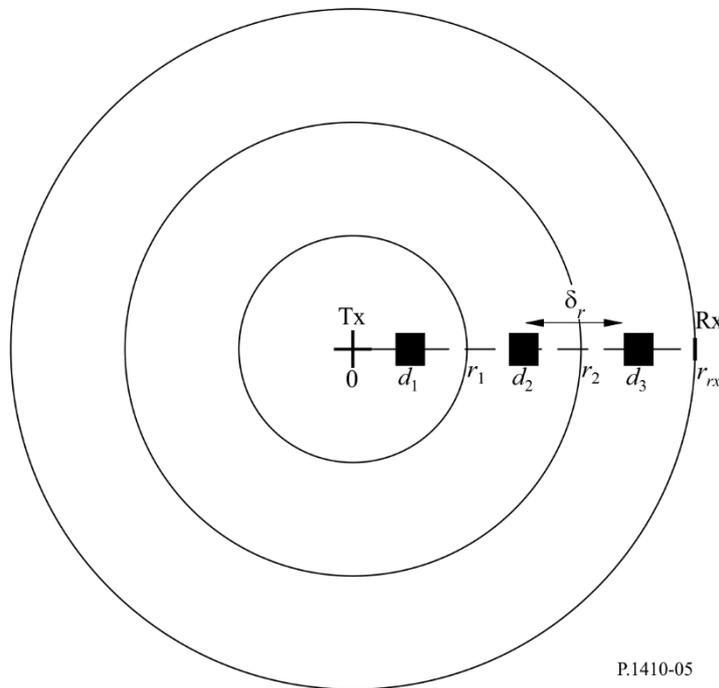
الخطوة 2: يفترض أن المباني متباعدة بشكل منتظم بين النقطتين Tx و Rx، وتعطى المسافات التي تقع عندها المباني بالمعادلة التالية:

$$(20) \quad d_i = (i + 1/2) \delta_r \quad i \in \{0, 1, \dots, (b_r - 1)\}$$

حيث $\delta_r = r_{rx}/b_r$ هي المسافة الفاصلة بين المباني.

الشكل 5

موقع المباني بالنسبة إلى المستقبل Rx عند مسافة r_{rx} من المرسل Tx



الخطوة 3: عند كل مسافة d_i ، يحدد ارتفاع h_i لمبنى معين يمكن أن يحجب شعاع خط البصر (LoS) باستعمال d_i كبديل في المعادلة (15).

$$h_i = h_{tx} - \frac{d_i(h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}} \quad (21)$$

الخطوة 4: يعطى احتمال P_i المتمثل في أن يكون مبنى معيناً أقل من الارتفاع h_i بالمعادلة التالية:

$$P_i = \int_0^{h_i} P(h) dh = 1 - e^{-h_i^2 / 2\gamma^2} \quad (22)$$

الخطوة 5: يعطى احتمال وجود شعاع خط البصر $P_{los,i}$ عند الموقع d_i بالمعادلة التالية:

$$P_{LoS,i} = \prod_{j=0}^i P_j \quad j \in \{0, \dots, i\} \quad (23)$$

الخطوة 6: يتم الحصول على التغطية التراكمية بترجيح كل من قيمة $P_{los,i}$ بواسطة معامل الترجيح W_i الذي يعتمد على المسافة بالنسبة إلى المرسل. ويراعي هذا المعامل عدد المباني الموجودة في حلقة يتزايد محيطها بتزايد المسافة.

$$W_i = 2i + 1 \quad (24)$$

الخطوة 7: تحسب التغطية المطلوبة لخلية نصف قطرها r_{rx} ، بجمع الاحتمالات المرجحة بحكم المباني وبتقييس النتيجة على أساس حاصل المساحة التراكمية للحلقات مضروباً في كثافة المباني:

$$CP_{r_{rx}} = \frac{\sum_{i=0}^{b_r-1} P_{los,i} W_i}{b_r^2} \quad (25)$$

وتنطوي هذه النمذجة على بعض القيود وهناك عدة طرق لتوسيع هذا النموذج:

- لم يؤخذ بعين الاعتبار أي تغيير في التضاريس الأرضية في هذا النموذج. ومن الواضح أن مع بعض التغيرات وإن كانت بمقدار بضعة أمتار يمكن أن يكون لها تأثير ملحوظ. ويمكن تمديد قدرات التنبؤ الخاصة بالنموذج بتوليف الخصائص الإحصائية للنموذج ومع قاعدة معطيات أرض غير منتظمة التضاريس، عن طريق إضافة تخالف متوسط لارتفاع الحجب فيما يخص كل نقطة خضعت للاختبار في هذا النموذج.
- تتغير كثافة المباني وارتفاعها إلى حد كبير من منطقة إلى أخرى وبالتالي، تكون التنبؤات بأحد الاتجاهات مختلفة عن التنبؤات بالاتجاه الآخر. ويتجلى من توزيع ارتفاعات المباني المقيسة أن المباني لا تتلاءم تماماً مع النموذج الإحصائي البسيط. ويمكن حل قسط كبير من هذه المشكلة بتجزئة قاعدة المعطيات إلى مناطق أصغر وبتخصيص مجموعة معلمات محددة لكل منطقة.
- وفي الواقع تتركب المستقبلات فوق سطوح المباني بحيث يتبع توزيع ارتفاع المستقبلات نفس التوزيع الذي يتبعه ارتفاع المباني. وفي النموذج يفترض أن المستقبلات توجد عند ارتفاع ثابت بالنسبة إلى الأرض. ويتمثل حل آخر في توليد ارتفاعات المستقبلات من توزيع المباني، وسيتوقف ذلك أيضاً على اختلاف المناطق.
- تعطي الطريقة المستخلصة بالخوارزمية تقديراً صحيحاً للتغطية بالمقارنة مع نتائج تقنية تتبع أثر الأشعة المطبقة على قاعدة المعطيات الحقيقية (انظر الفقرة 6.1.2). وتبين أن توزيع رايلي لارتفاع المباني دقيق فيما يتعلق ببعض عينات المعطيات

حيث تناولت الدراسة منطقة محدودة، كمدينة صغيرة مثلاً. وعلاوةً على ذلك، وللحصول على نتائج التغطية المبينة في الفقرة 6.1.2، يجب تطبيق الطريقة مع مراعاة موقع المباني ونموذج تحرير المسير كما جاء في إجراء الخطوات المتوالية.

6.1.2 أمثلة عن التنبؤات بالتغطية

طبقت صيغة رايلي على التوزيع التراكمي لارتفاعات سطوح المباني في منطقة شبه حضرية في المملكة المتحدة (مالفرن). وبالنسبة لمجموعة المعطيات هذه كانت القيم المتوسطة لمعاملات النموذج في المنطقة الحضرية الرئيسية كالتالي:

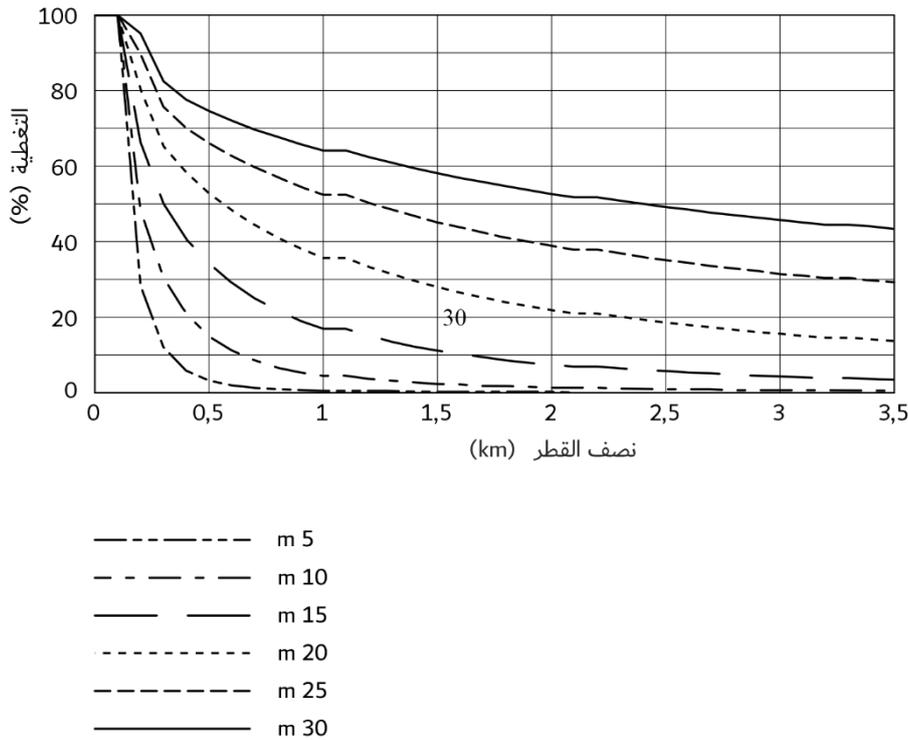
$$\alpha = 0,11 \quad ; \quad \beta = 750 \quad ; \quad \gamma = 7,63$$

يبين الشكلان 6 و7 النتائج المستخلصة من النموذج. ويبين الشكل 6 التغطية بدالة ارتفاع المرسل ويبين الشكل 7 التغطية بدالة ارتفاع المستقبل.

يعطي هذا النموذج تنبؤات لها نفس الشكل الأساسي ونفس سوية التغطية الكلية التي تعطيها النتائج المستخلصة باستعمال المحاكاة التفصيلية لتقنية تتبع أثر الشعاع. وفائدة هذا النموذج أنه يولد التنبؤات بالتغطية اعتماداً على ثلاث معاملات فقط يمكن تقديرها فيما يتعلق بأي موقع حضري شريطة توفر أبسط المعلومات بشأن المنطقة. ونظراً إلى أن المعطيات ثلاثية الأبعاد أصبحت متيسرة بشكل متزايد سوف يكون من الممكن إعداد جداول المعلمات الخاصة بالبلدان/المدن المختلفة التي يمكن استعمالها كمرجع عند تقييم التغطية في بعض المواقع غير المعروفة. ولا يقتصر استعمال هذا النموذج على تقييم التغطية في خلية واحدة، وإنما يمكن جمع النتائج المتأتية من عدة خلايا لتغطية شبكات كبيرة، بما في ذلك تأثيرات التنوع.

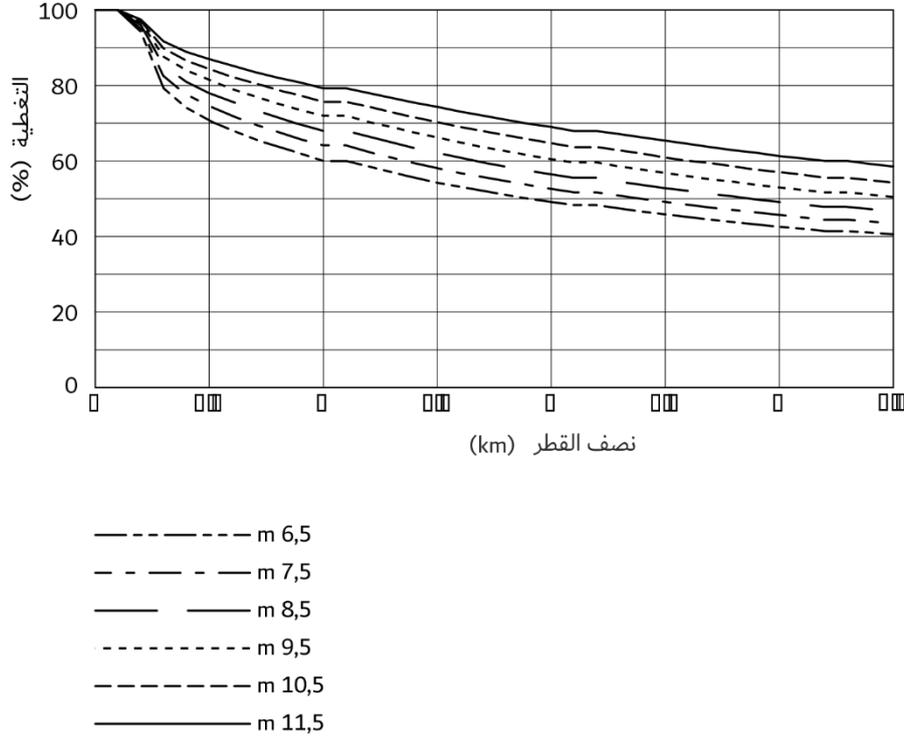
الشكل 6

نمذجة التغطية التراكمية لمستقبل يقع عند ارتفاع 7,5 m
ومرسل يقع عند ارتفاعات 5 و10 و15 و20 و25 و30 m



الشكل 7

نمذجة التغطية التراكمية لمُرسل يقع عند ارتفاع m 30
ومستقبل يقع عند ارتفاعات 6,5 و 7,5 و 8,5 و 9,5 و 10,5 و 11,5 m



P.1410-07

7.1.2 زيادة التغطية باستخدام محطتين قاعدتين أو أكثر

من شأن معمارية خلوية تتيح للمستقبلات الاختيار بين عدة محطات قاعدة أن تزيد التغطية بشكل كبير. ومن خلال حسابات تقنية تتبع أثر الشعاع مثلاً، وفيما يتعلق بارتفاع هوائي المرسل قدره m 30، تتزايد التغطية في خلية نصف قطرها 2 km بنسبة 44% فيما يتعلق بمحطة قاعدة واحدة وبنسبة 80% فيما يتعلق بمحطتين وبنسبة 90% فيما يتعلق بأربع محطات حتى وإن لم يتم انتقاء المحطات القاعدة خصيصاً لضمان رؤية فردية جيدة.

وبافتراض أن احتمالات وجود مسيرات خط البصر باتجاه مختلف المحطات القاعدة المعنية مستقلة من الناحية الإحصائية يمكن حساب احتمال وجود مسير واحد على الأقل. ويتعين أولاً حساب كل $P_{LoS,i}$ من المعادلة (23). عندئذ يصبح احتمال وجود مسير واحد مرئي على الأقل لعدد m من المحطات القاعدة المحتملة كالتالي:

$$P_{LoS,i} = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - P_{LoS,i,k})$$

(26)

ويمكن تقييم التغطية بواسطة محطتين قاعدتين أو أكثر بالاستعاضة عن $P_{LoS,i}$ في المعادلة (23) بقيمتها المعطاة في المعادلة (26) في الإجراء الوارد في الفقرة 5.1.2. وجدير بالإشارة، فيما يتعلق بكل قيمة من قيم k ، ضرورة اتباع الخطوات من 1 إلى 5 حيث r_{rx} هي المسافة إلى كل محطة قاعدة.

2.2 التوهين الناتج عن الغطاء النباتي

إن الحجب الناجم عن الأشجار قد يحد كثيراً من عدد المنازل التي يمكن تزويدها بالخدمة. وبالتالي من الضروري جداً توفر نموذج موثوق به يتعلق بتأثير ومدى التوهين الناتج عن الغطاء النباتي، نظراً إلى أن هامش النظام، في حالة المستقبلات القريبة من المرسل، قد يبلغ حداً تصبح عنده قدرة الإشارة بعد الانتشار عبر شجرة واحدة غير كافية لتوفير خدمة معينة.

وقد بينت دراسة استقصائية تعتمد تقنية تتبع أثر الشعاع في ست بلدان في المملكة المتحدة وتستخدم قواعد معطيات تشمل جميع المباني والأشجار أن ما يبلغ حتى 5% من المباني الواقعة ضمن مدى 1 000 m من محطة قاعدة مركزية يتأثر بالحجب بسبب الغطاء النباتي. وقد وضعت المحطة القاعدة على سطح أعلى مبنى في المنطقة، عند 30-40 m فوق سطح الأرض عموماً، واعتبر المبنى غير متأثر بالحجب إذا أمكن وصول مسير خط البصر إلى أي نقطة اختبار في ذلك المبنى. وكانت نقاط الاختبار الخاصة بالمبنى تقع في شبكة تربية منتظمة بعرض 1 m لأعلى نقطة من مسقط كل مبنى. ولم تتغير النسبة المئوية للحجب بالغطاء النباتي في مدى يفوق 1 200 m تقريباً شريطة إبقاء ارتفاع المحطة القاعدة على ما هو عليه. وفي المديات الطويلة تصبح المباني الأخرى والتضاريس الأرضية السبب المهيمن للحجب بسبب انحناء الأرض. وقد بلغ الحجب بالغطاء النباتي في منطقة شبه حضرية حوالي 25%.

أجريت القياسات عند 42 GHz لتحديد دلالة التوهين الناتج عن "الأشجار المحلية". وقد اتضح أن التوهين المتوسط كان كما هو متوقفاً في التوصية ITU-R P.833 لكن مع وجود تأثيرات كبيرة متعددة المسيرات مما يؤدي إلى حالات من انعدام الإشارة التام تتغير مع الزمن بسبب الريح التي تحرك الأوراق. واتضح أنه يمكن فك ترابط حالات الانعدام هذه بنجاح باستعمال هوائيين تفصل بينهما مسافة ≈ 60 cm أو أكثر. وقد بين التقارب ترابطاً أكبر والتباعد تحسناً بسيطاً في فك ترابط التوهين. ويعني ذلك أن تشكيلة ثنائية الهوائي باختلاف مكاني قد تسمح بتشغيل الخدمات في هذه الظروف. وقد بينت تجربة عند 42 GHz باستعمال هوائيين تفصل بينهما مسافة 62 cm تغيراً ملحوظاً في كل من الهوائيين واحتمال تحسن في التنوع. وبينت القياسات طويلة الأجل للانتشار عبر الأشجار المورقة أنه يمكن الحصول عموماً على كسب في التنوع قدره 10 dB.

ويكون التوهين بسبب الأشجار شديداً عند أطوال الموجات المليمترية. ويعتمد معدل التوهين على نوع الأشجار ومحتوى الرطوبة وهندسة المسير، ولكن يمكن استعمال المعدل 4-5 dB/m كدليل (على الرغم من أن التوهين يصل إلى حالة تشبع عند قيمة معينة تبلغ 20-40 dB عموماً). ويوصى باستعمال النموذج الوارد في التوصية ITU-R P.833 لتحديد دلالة التوهين الناتج عن الغطاء النباتي.

3.2 دراسة حالة لآليات الانتشار

يقدم في هذا القسم نتائج مقلدة من دراسة حالة تستخدم قاعدة بيانات لمنطقة حضرية حقيقية. وترد أدناه النتائج التي تبين آليات الانتشار السائدة للتغطية وكذلك توزيع إحصائي لنسبة قدرة الموجات الحاملة إلى قدرة التداخل (CIR) بالنسبة لأحد سيناريوهات التداخل.

1.3.2 وصف المنطقة

المنطقة المختارة عبارة عن منطقة مساحتها 2 km في 1 km من حاضرة مانشستر، المملكة المتحدة. تتألف المنطقة من ثلاثة مبانٍ أعلى بشكل واضح من المباني المحيطة. وقد تم تقييم إحصائيات التغطية باستخدام مرسل وضع على ارتفاع قدره 15 m من أعلى مبنى. وقد تم تقييم إحصائيات التداخل باستخدام مرسل للتداخل وضع أعلى أحد المبنيين الآخرين العالين. وقد تم تقدير خسائر الإرسال الأساسية في شبكة منتظمة فوق المنطقة بارتفاع قدره 2 m. وقد تم تقسيم النقاط إلى مجموعتين فرعيتين: نقاط أعلى السطح ونقاط في مستوى الشارع.

2.3.2 آليات الانتشار الممنذجة

يستخدم في حساب الانتشار:

- التوصية ITU-R P.526 مع انعراج ذي نقطة واحدة عبر مقياس صغير

- الانعراج حول المنطقة
- إرسال المبنى
- نفاذية السطح = 5
- الخسائر داخل المبنى = 2,1 dBm
- الانعكاسات والانتثار
- وثبة مفردة ومزدوجة. مسيرات غير خط البصر مع إدراج الانعراج/الإرسال
- نفاذية السطح = 5
- الانحراف المعياري للأسطح الخشنة = 0,001 m.

3.3.2 التغطية بآليات انتشار متغايرة

يرد في الجدول 2 المدى الذي أثر فيه زيادة عدد آليات الانتشار الممنذجة على تنبؤات التغطية عند تردد 2,4 GHz. وتعرض الاختلافات في خسارة الإرسال الأساسية طبقاً لتنبؤات التوصية ITU-R P.256 لنقطة واحدة.

الجدول 2

ملخص للاختلافات في خسائر الإرسال الأساسية بين التوصية ITU-R P.452 لنقطة واحدة مع آليات انتشار مختلفة

| اختراق المبنى + انعراج أفقي | | | | | 3-point/Rec. ITU-R P.452 | | | 1-point/Rec. ITU-R P.452 | | | جميع النقاط |
|-----------------------------|--------------|-----------|------------------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------------|----------------|-------------------------|
| % around | % through | % over | % 1 st Fresnel | Clear % LoS | % over | % 1 st Fresnel | Clear % LoS | % over | % 1 st Fresnel | Clear % LoS | |
| 13,70 | 6,86 | 24,85 | 9,03 | 45,57 | 45,40 | 9,03 | 45,57 | 45,40 | 9,03 | 45,57 | |
| | | | 2,18 dB 5,47 dB 4 753 points | Mean diff std dev | | -3,56 dB 8,42 dB 4 753 points | Mean diff std dev | | | | |
| | | | 10,60 dB 7,51 dB 976 points | Mean diff std dev | | -11,62 dB 11,74 dB 1 455 points | Mean diff std dev | | | | النقاط ذات الاختلاف فقط |

| انعكاسات مرآوية + انتثار + اختراق المبنى + انعراج أفقي | | | | | | | جميع النقاط |
|--------------------------------------------------------|------------------------------|-------------|--------------|-----------|--------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| % scattering | % specular reflections | % around | % through | % over | % 1 st Fresnel | Clear % LoS | |
| 0,00 | 15,93 | 8,46 | 3,85 | 17,99 | 8,21 | 45,57 | |
| | | | | | 5,05 dB 10,45 dB 4 753 points | Mean diff std dev | |
| | | | | | 17,93 dB 12,54 dB 1 338 points | Mean diff std dev | النقاط ذات الاختلاف فقط |

يمكن أن يكون لإدراج آليات الانتشار الإضافية تأثيراً مشيراً على تنبؤات خسارة الإرسال الأساسية، حيث يبلغ هذا التأثير غالباً 18 dB في المتوسط. وفي حين أنه قد لا يكون لهذا الأمر تأثير حاسم بالنسبة لتنبؤات التغطية، فإن له أثر كبير على أداء الأنظمة المتأثرة بالتداخل وبالتالي فإنه من المهم النمذجة بشكل صحيح.

4.3.2 التغطية بترددات متغايرة

تم حساب التغطية عند ترددات 2,4 و 5,8 و 28 GHz مع كل آليات الانتشار المنمذجة. ويبين الشكل 3 التغطية المحسوبة عند الترددات الثلاثة. وتكمن نقطة الاهتمام الرئيسية في ملاحظة أن الخسارة بالنسبة للمسيرات المنعرجة تكون أكبر بكثير عند التردد 28 GHz. بيد أن التردد 28 GHz يعاني من خسارة إرسال أساسية أقل كثيراً بالنسبة لكثير من المواضع ويرجع ذلك إلى آلية الانتثار، حيث إن الخشونة السطحية للمباني تسبب انتشاراً أكبر كثيراً عند الترددات الأعلى.

ويرد في الشكل 8 أ) النسبة المئوية لتحليل آليات الانتشار السائدة عند كل تردد. وتعتبر الانعكاسات الطيفية كبيرة بشكل خاص عند الترددات الأقل. ويصبح الانتثار كبيراً فقط عند التردد 28 GHz. ويقسم الشكلان 8 ب) و 8 ج) النتائج المبينة في الشكل 8 أ) إلى مواضع أعلى السطح ومواضع مستوى الشارع، على التوالي.

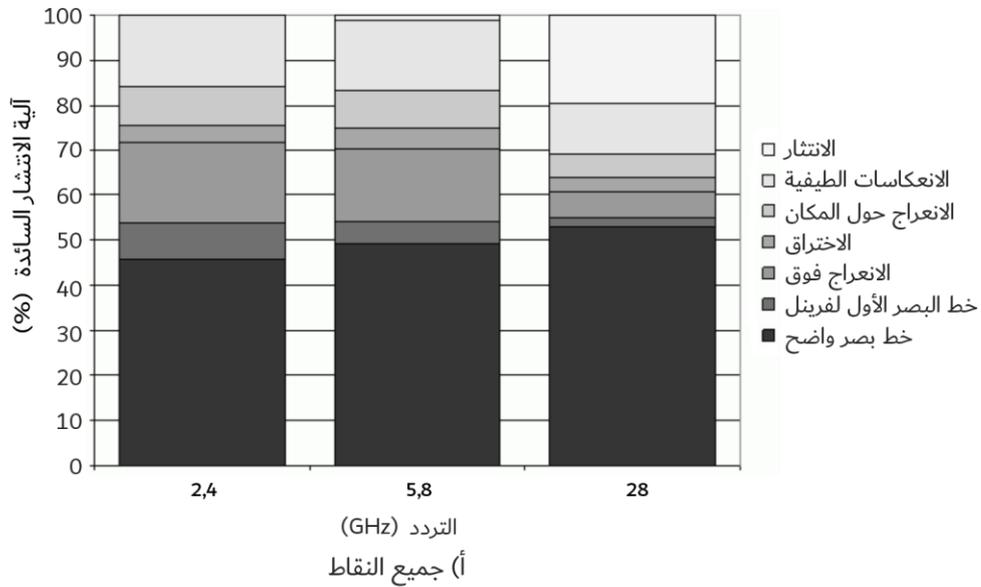
ومن المفيد مواصلة دراسة أهمية آليات الانتشار كدالة في خسارة الإرسال الأساسية الزائدة حيث إنه، على الرغم من أنه قد تسود آلية معينة، لأغراض التغطية على الأقل، فإنها قد لا تكون ذات شأن إذا كانت خسارة الإرسال الأساسية الزائدة كبيرة. ويبين الشكل 9 آلية الانتشار السائدة لكل نقطة أعلى السطح عند كل تردد. ويوضح ذلك تأثير الانتثار عند الترددات العالية بشكل أكثر وضوحاً.

والنقاط الرئيسية الجديرة بالملاحظة من الرسوم البيانية هي أن الانعكاسات الطيفية والانعراج حول المكان يمكن أن تقدم تغطية إضافية واضحة (أقل من 10 dB، خسارة إرسال أساسية زائدة) عند جميع الترددات. وتعتبر الآليات الأخرى (إرسال المبنى، الانعراج فوق، الانتثار) أقل شأنًا بكثير بالنسبة لحساب التغطية. ومع ذلك فعند دراسة التداخل فإنه حتى المسيرات ذات التوهين الكبير يمكن أن تصبح ذات شأن خاصة عندما تستخدم نماذج تشكيل ذات رتب أعلى.

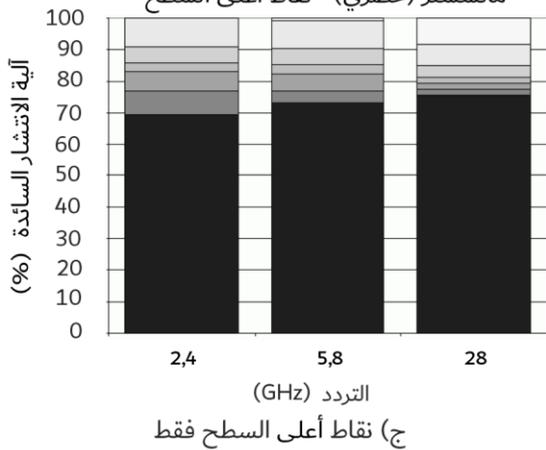
الشكل 8

آلية انتشار سائدة إزاء التغطية

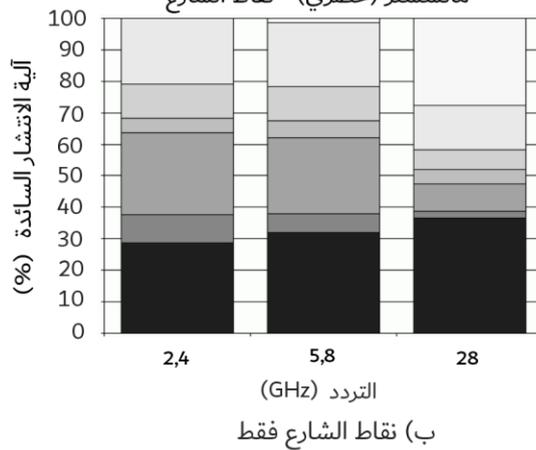
آلية الانتشار مع ترددات متغيرة بالنسبة لسيناريو
مانشستر (حضري) - جميع النقاط



آلية الانتشار مع ترددات متغيرة بالنسبة لسيناريو
مانشستر (حضري) - نقاط أعلى السطح

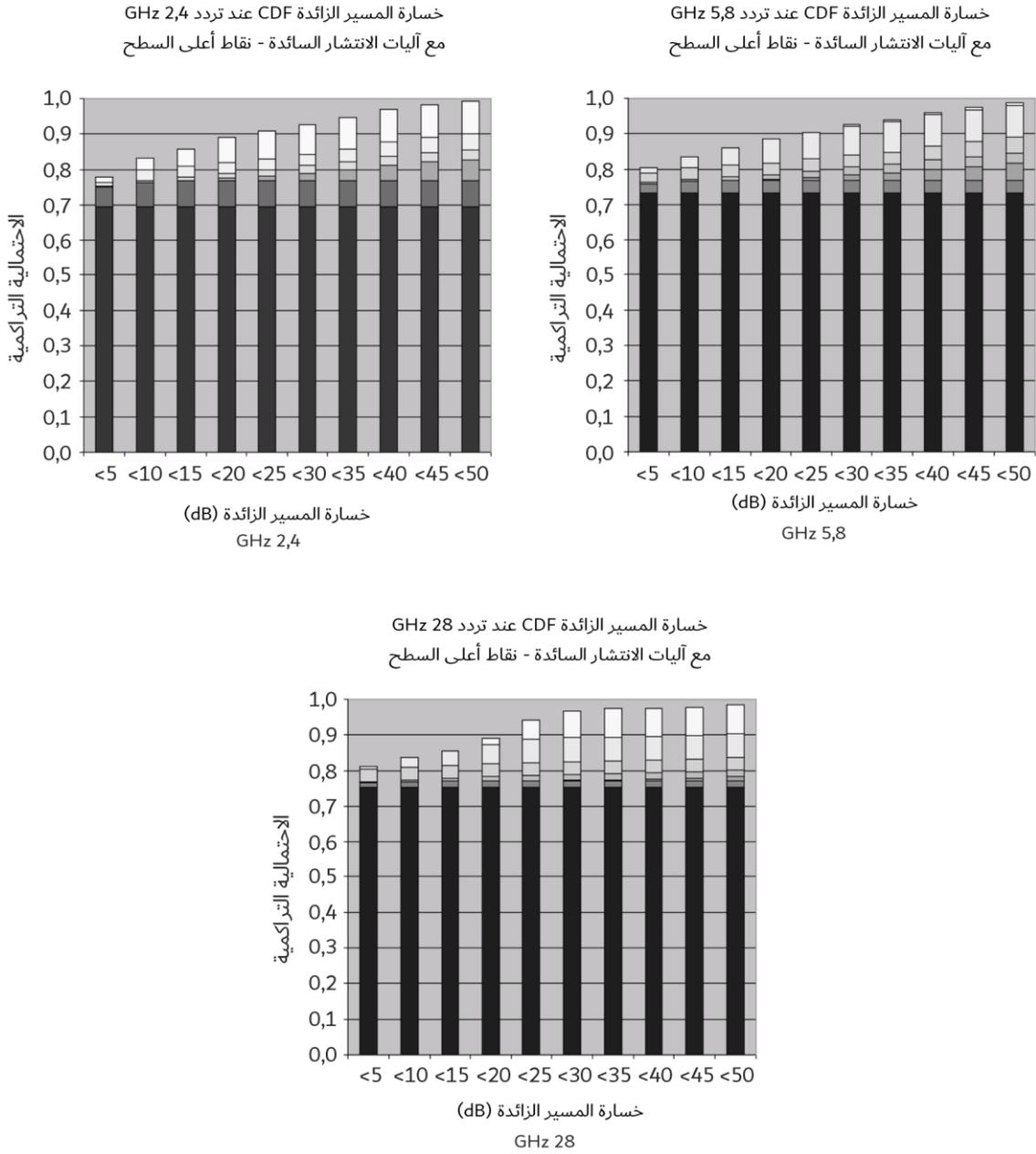


آلية الانتشار مع ترددات متغيرة بالنسبة لسيناريو
مانشستر (حضري) - نقاط الشارع



الشكل 9

خسارة الإرسال الأساسية الزائدة مقابل آليات الانتشار السائدة عند نقاط أعلى السطح



P.1410-09

5.3.2 ملخص نتائج دراسة الحالة

كشفت دراسة الحالة عن عدد من النتائج المثيرة فيما يتعلق بتأثير آليات الانتشار المختلفة عند إجراء الحسابات الخاصة بكل من التغطية والتداخل.

- يمكن أن يكون للانعكاس المرآوي والانعراج حول الأشياء تأثير كبير على التغطية عند الترددات المنخفضة.
- تبين أن الانتشار يكون كبيراً عند تردد 28 GHz فقط. وخسارة الإرسال الأساسية الزائدة (عادة أكبر من 25 dB) المنسوبة لهذه الآلية تجعلها أقل شأنًا عند توفير التغطية، ولو أنه يجب دراسة هذه الآلية عند تقييم التداخل.

- لإدراج الانعكاسات المرآوية في نمذجة التداخل أثر كبير على سويات التداخل المتوقعة خاصة عندما يستخدم هوائي اتجاهي. فبالنسبة لشبكة ثابتة مع استخدام هوائيات اتجاهية في سيناريو حضري يجب نمذجة الانعكاسات من أجل التنبؤ الدقيق بالتداخلات.

ومن المهم فهم القيود الخاصة بهذا السيناريو. أولاً، النتائج قابلة للتطبيق على منطقة حضرية ذات مواقع مرتفعة للمرسلات بزوايا ارتفاع كبيرة عبر نطاقات قصيرة تم اختبارها. ويمكن للمواقع المرتفعة للمرسلات أن تغير الاستنتاجات المستخلصة ويتوقع أن تقدم السيناريوهات الخاصة بالمناطق الريفية وشبه الحضرية نتائج مختلفة إلى حد كبير فيما يتعلق بتحليل آليات الانتشار السائدة. ويقلل غياب الأجسام العاكسة الضخمة من أثر الانعكاس المرآوي ولو أن الانتشار يظل أمراً هاماً. وبالنسبة لسيناريوهات المناطق الريفية وشبه الحضرية، فإنه من المهم جداً أيضاً إدراج البيانات النباتية ونمذجتها بشكل سليم.

4.2 اعتماد خسارة الإرسال الأساسية على ارتفاع هوائي محطة المشترك (SS)

يبين الشكل 10 آلية الانتشار فوق أسطح المباني على أساس نموذج انتشار هندسي. ويمكننا تقسيم اختلاف ارتفاع خسارة الإرسال الأساسية عبر المسافة الأفقية الفاصلة بين محطة القاعدة (BS) ومحطة المشترك (SS) إلى ثلاث مناطق تبعاً للموجة الواردة المهيمنة عبر السوية بأكملها. ويبين الشكل 11 هندسة حساب تغير ارتفاع خسارة الإرسال الأساسية في المناطق الثلاث التالية.

(أ) منطقة الموجة المباشرة المهيمنة حيث المسافة الأفقية الفاصلة بين محطة القاعدة (BS) ومحطة المشترك (SS) قصيرة جداً (الشكل 11 (أ))

وفي هذه المنطقة، يمكن للموجة المباشرة أن تصل على أي ارتفاع هوائي محطة المشترك (SS). وتغلب على خسارة الإرسال الأساسية وتغير ارتفاع خسارة الإرسال الأساسية عند محطة المشترك (SS) خسارة انتشار الموجة المباشرة (منطقة خط البصر في أي ارتفاع هوائي محطة المشترك).

(ب) منطقة الموجة المنعكسة المهيمنة حيث المسافة الأفقية الفاصلة بين محطة القاعدة (BS) ومحطة المشترك (SS) قصيرة نسبياً (الشكل 11 (ب))

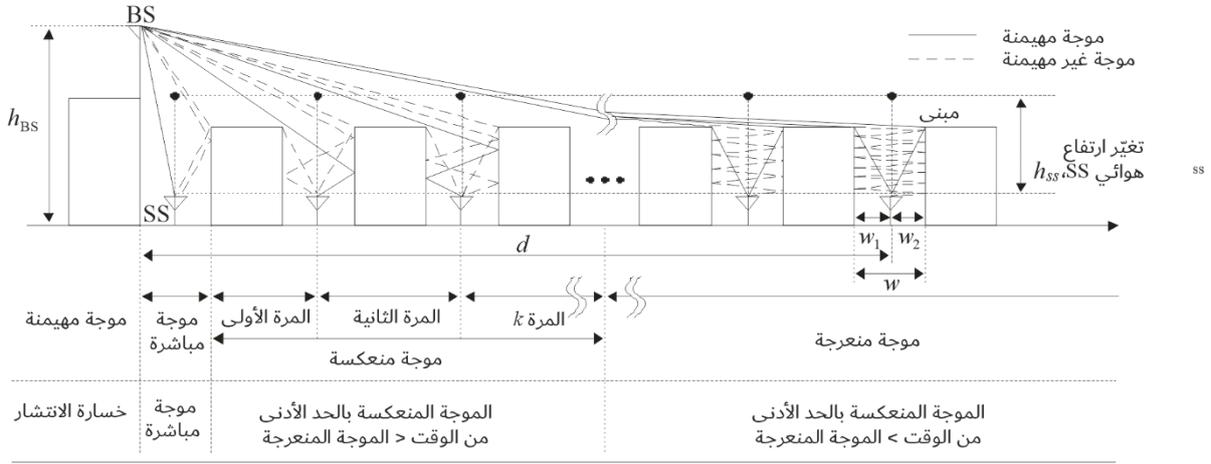
وفي هذه المنطقة، يمكن لموجة قوية منعكسة أو منعرجة مرة واحدة أو مرتين أن تصل على أي ارتفاع هوائي محطة المشترك (SS) في منطقة مغايرة لخط البصر (NLOS). وخسارة انتشار الموجة المنعكسة بالحد الأدنى من الوقت والوارد على أي ارتفاع هوائي محطة المشترك تقل عن خسارة انتشار الموجات المنعرجة في منطقة مغايرة لخط البصر. وتغلب الموجات المنعكسة على خسارة الإرسال الأساسية وتغير ارتفاعها عند محطة المشترك (SS) في هذه المنطقة. وفي المنطقة القريبة نسبياً، تقابل خسارة الإرسال الأساسية مكونات موجة مباشرة منعكسة مرة واحدة أو مرتين عند الارتفاع الأدنى الذي تصل فيه الموجات المباشرة المنعكسة مرة واحدة أو مرتين عند محطة المشترك.

(ج) منطقة الموجة المنعرجة المهيمنة حيث المسافة الأفقية الفاصلة بين محطة القاعدة (BS) ومحطة المشترك (SS) طويلة نسبياً (الشكل 11 (ج))

وفي هذه المنطقة، يمكن لموجة قوية منعكسة مرة واحدة أو مرتين أن تصل بالكاد إلى هوائي محطة المشترك (SS) في منطقة مغايرة لخط البصر، حيث يقل ارتفاع هذا الهوائي عن ارتفاع المباني المحيطة به فلا تصل إليه إلا الموجات الضعيفة المنعكسة والمنعرجة مرات عديدة. وتصبح خسارة انتشار الموجة المنعكسة بالحد الأدنى من الوقت والوارد إلى هوائي محطة المشترك أعلى من خسارة انتشار الموجة المنعرجة. وتغلب الموجات المنعرجة عن حافة سقف البناء على خسارة الإرسال الأساسية وتغير ارتفاعها عند محطة المشترك (SS) في هذه المنطقة. وتكاد خسارة الإرسال الأساسية وتغير ارتفاعها عند محطة المشترك تتطابق مع تلك التي تميز انتشار الموجة المنعرجة.

الشكل 10

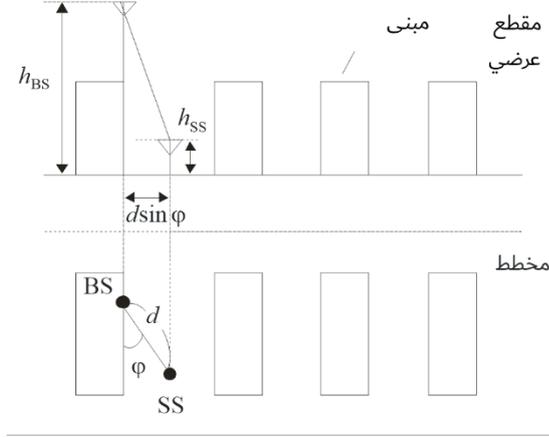
آلية الانتشار عبر أسطح المباني على أساس نموذج انتشار هندسي



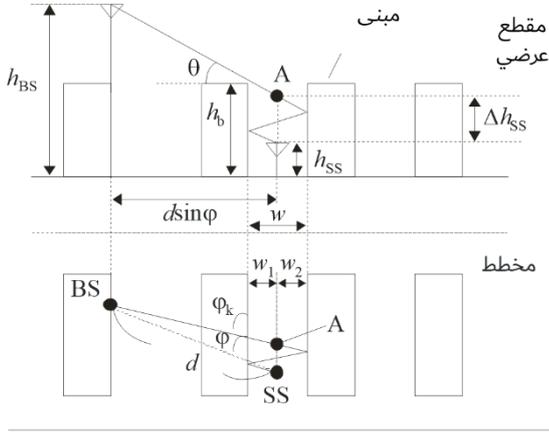
الشكل 11

نموذج الانتشار القائم على الموجات المهيمنة التي تؤثر في تغير خسارة الإرسال الأساسية حسب الارتفاع

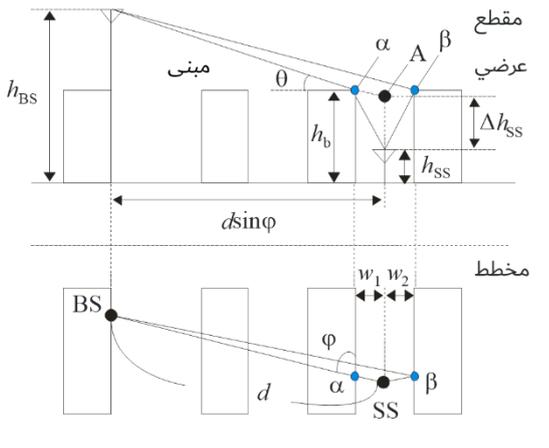
(أ) منطقة الموجة المباشرة المهيمنة حيث المسافة الأفقية الفاصلة بين محطة القاعدة (BS) ومحطة المشترك (SS) قصيرة جداً



(ب) منطقة الموجة المنعكسة المهيمنة حيث المسافة الأفقية الفاصلة بين محطة القاعدة (BS) ومحطة المشترك (SS) قصيرة نسبياً



(ج) منطقة الموجة المنعرجة المهيمنة حيث المسافة الأفقية الفاصلة بين محطة القاعدة (BS) ومحطة المشترك (SS) طويلة نسبياً



تعطى المعلمات ذات الصلة لكل حالة فيما يلي:

- f : التردد (GHz)
 φ : الزاوية بين صف مباني وخط الرؤية/خط البصر (بالدرجات)
 h_{BS} : ارتفاع هوائي محطة القاعدة (m)
 h_{SS} : ارتفاع هوائي محطة المشترك (m)
 Δh_{SS} : العمق إلى منطقة الظل (m)
 h_b : متوسط ارتفاع المبنى (m)
 w : المسافة بين المباني (m)
 d : المسافة الأفقية بين الهوائيين (m).

وهنا، يصح هذا النموذج بالنسبة لما يلي:

- f : 2 إلى 30 GHz
 φ : 10 درجات إلى 90 درجة
 h_{BS} : حتى 70 m (أعلى من h_b)
 h_{SS} : 2 إلى $(3 + h_b)$ m
 w : 10 إلى 25 m
 d : 10 إلى 5 000 m

ملاحظة - يغطي مدى ارتفاع هوائي محطة المشترك (SS) بشكل مستمر من منطقة خط البصر إلى المنطقة المغايرة لخط البصر.

وبناءً على آليات الانتشار هذه، يمكن تقسيم الخسارة الناجمة عن ارتفاع هوائي محطة المشترك (SS) على هوائيات متناحية يمكن تصنيفها ضمن ثلاث مناطق من حيث موجات الورد المهيمنة عند محطة المشترك. وهي منطقة الموجة المباشرة المهيمنة (منطقة خط البصر) ومنطقة الموجة المنعكسة المهيمنة (منطقة مغايرة لخط البصر) ومنطقة الموجة المنعرجة المهيمنة (منطقة مغايرة لخط البصر). ويكاد تغير الارتفاع يساوي صفرًا في منطقة خط البصر. ومن ناحية أخرى، فإن تغير ارتفاع خسارة الإرسال الأساسية في منطقة مغايرة لخط البصر يعتمد على الموجة المهيمنة الواردة. ولذلك، فإن الخسارة الزائدة في منطقة مغايرة لخط البصر عنها في منطقة خط البصر، $L(\Delta h_{SS})$ ، يمكن تحديدها بما يلي:

$$(27) \quad L(\Delta h_{SS}) \cong \min\{L_R(\Delta h_{SS}), L_D(\Delta h_{SS})\} \quad (\text{dB})$$

والصيغتان $L_D(\Delta h_{SS})$ و $L_R(\Delta h_{SS})$ هنا تمثلان الخسارة الزائدة الناجمة عن الموجات المنعكسة الواردة والموجات المنعرجة الواردة، على التوالي، في منطقة مغايرة لخط البصر. ويعبر عنهما على النحو التالي.

عندما:

$$\Delta h_{SS,k} \leq \Delta h_{SS} < \Delta h_{SS,k+1}$$

$$(28) \quad L_R(\Delta h_{SS}) = L_R(\Delta h_{SS,k}) + \frac{L_R(\Delta h_{SS,k+1}) - L_R(\Delta h_{SS,k})}{\Delta h_{SS,k+1} - \Delta h_{SS,k}} \cdot (\Delta h_{SS} - \Delta h_{SS,k}) \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots) (\text{dB})$$

$$(29) \quad \Delta h_{SS,k} = \frac{2kw \cdot (h_{BS} - h_b)}{2d \cdot \sin \varphi - w} \quad (\text{m})$$

$$(30) \quad L_R(\Delta h_{SS,k}) \approx 20 \log \left(\frac{d_{kp}}{d_{0p} \cdot R^k} \right) \quad (\text{dB})$$

($R \approx 0.4$ إذا كان النموذج سارياً على $d > 5000 \text{ m}$, $h_{bs} > 70 \text{ m}$)

$$(31) \quad d_{kp} = \frac{1}{\sin \varphi_k} \cdot \sqrt{(d \cdot \sin \varphi + kw)^2 + \left\{ h_{BS} + \Delta h_{SS,k} - h_b + \frac{w \cdot (h_{BS} - h_b)}{2d \cdot \sin \varphi - w} \right\}^2} \quad (\text{m})$$

$$(32) \quad \varphi_k = \tan^{-1} \left(\frac{d \sin \varphi}{d \sin \varphi + kw} \cdot \tan \varphi \right) \quad (\text{degrees})$$

$$(33) \quad L_D(\Delta h_{SS}) \approx \begin{cases} \{5.8947 \cdot \log(f) + 0.31519\} \times \Delta h_{SS}^{(-0.003559 \cdot f + 0.65122)} & (0 \text{ m} \leq \Delta h_{SS} < 1 \text{ m}) \\ \{3.7432 \cdot \log(f) + 19.245\} \cdot \log(\Delta h_{SS}) + 5.8947 \cdot \log(f) + 0.31519 & (1 \text{ m} \leq \Delta h_{SS} < 10 \text{ m}) \\ 24.5 \cdot \log(\Delta h_{SS}) + 9.6379 \cdot \log(f) - 4.93981 & (10 \text{ m} \leq \Delta h_{SS}) \end{cases} \quad (\text{dB})$$

$$(34) \quad \Delta h_{SS} = h_b - h_{SS} - \frac{w(h_{BS} - h_b)}{2d - w} \quad (\text{m})$$

* إذا ما أصبح الفارق Δh_{SS} سالباً، أي إذا صار هوائي محطة القاعدة (BS) ومحطة المشترك (SS) على خط البصر، تُسند قيمة -6 dB للصيغة $L(\Delta h_{SS})$ بصرف النظر عن ارتفاع هوائي محطة المشترك (SS) لأن هذه الصيغة مقيّسة بخسارة الإرسال الأساسية عند الحد الفاصل بين منطقتي خط البصر وغير خط البصر. و R هو معامل الانعكاس لسطح جدار مبنى في نطاق الموجات الصغيرة وهو محدد بقيمة -8 dB مهما كانت زاوية الورد، وهذه القيمة هي القيمة المتوسطة المحصّلة من نتائج القياسات.

5.2 أسلوب التنبؤ بخسارة الإرسال الأساسية مع احتساب كسب الارتفاع عند محطة المشترك (SS)

يتنبأ الأسلوب الذي يرد وصفه في الفقرة 4.2 بالتغير النسبي في الارتفاع في خسارة الإرسال الأساسية نسبةً إلى ارتفاع هوائي محطة المشترك (SS). ويمكننا أيضاً التنبؤ بخسارة الإرسال الأساسية نفسها باحتساب كسب الارتفاع عند محطة المشترك في ارتفاع لا على التعيين لهوائيا باستخدام أسلوب الحساب الذي يرد وصفه في الفقرة 4.2، إلى جانب أسلوب التنبؤ التقليدي بخسارة الإرسال الأساسية في بيئة عابرة لأسطح المباني مغايرة لخط البصر كما في التوصية ITU-R P.1411.

ويمكن حساب خسارة الإرسال الأساسية، $L(h_{SS})$ ، عند الارتفاع المستهدف لهوائي محطة المشترك (SS)، h_{SS} (عندما يفوق هذا الارتفاع المدى الأعلى المحدد لأسلوب التنبؤ بخسارة الإرسال الأساسية في بيئة عابرة لأسطح المباني مغايرة لخط البصر كما في التوصية ITU-R P.1411) على النحو المبين أدناه:

$$(1) \quad \text{حساب خسارة الإرسال الأساسية عند ارتفاع منخفض لهوائي محطة المشترك (SS)، } h_0.$$

تُحسب خسارة الإرسال الأساسية، $L(h_0, d)$ ، لارتفاع معين لهوائي محطة المشترك (SS)، h_0 ، ولمسافة فاصلة مستهدفة بين محطة القاعدة (BS) ومحطة المشترك (SS) قدرها d باستخدام أسلوب التنبؤ التقليدي بخسارة الإرسال الأساسية في بيئة عابرة لأسطح المباني مغايرة لخط البصر كما في التوصية ITU-R P.1411.

$$(2) \quad \text{حساب كسب الارتفاع عندما يبلغ ارتفاع هوائي محطة المشترك (SS) } h_{SS} \text{ استناداً إلى } h_0.$$

يمكن حساب الخسارة الزائدة في منطقة مغايرة لخط البصر عنها في منطقة خط البصر عندما يبلغ ارتفاع هوائي محطة المشترك (SS) h_{SS} و h_0 باستخدام أسلوب التنبؤ بكسب الارتفاع الذي يرد وصفه في الفقرة 4.2 كصيغتي $L(\Delta h_0, d_h)$ و $L(\Delta h_{SS}, d_h)$ على التوالي.

- من شأن معمارية خلوية تتيح للمستقبلات الاختيار بين عدة محطات قاعدة أن تزيد التغطية بشكل كبير. فبالنسبة إلى ارتفاعات هوائي المرسل التي تبلغ 30 m مثلاً تتزايد التغطية في خلية نصف قطرها 2 km بنسبة 44% فيما يتعلق بمحطة قاعدة واحدة وبنسبة 80% فيما يتعلق بمحطتين وبنسبة 90% فيما يتعلق بأربع محطات حتى وإن لم يتم انتقاء المحطات القاعدة خصيصاً لضمان رؤية إفرادية جيدة.

3 تأثير الهواطل على التيسرية

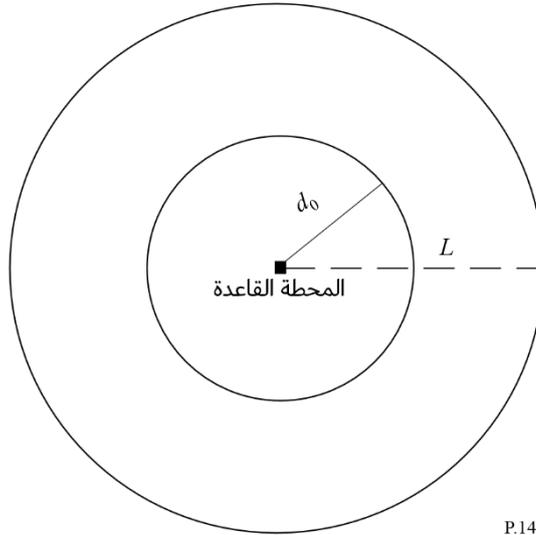
حالما يتقرر أن المستعمل لديه خط بصر غير محجوب باتجاه المحطة القاعدة مع هامش ملائم للنظام في الفضاء الحر يصبح من اللازم حساب النسبة المئوية للوقت الذي تكون فيه الخدمة متيسرة على أن يؤخذ في الاعتبار تأثير الهواطل. وفيما يتعلق بأي وصلة في منطقة الخدمة للمحطات القاعدة، يمكن تقدير التيسر أثناء الهواطل بواسطة الطرائق الموصوفة في التوصية ITU-R P.530.

1.3 تغطية المنطقة المتأونة

بما أن الأمطار غير منتظمة أفقياً (في بعدين) فإن النموذج أحادي الأبعاد الموصوف في التوصية ITU-R P.530 فيما يتعلق بالأمطار غير المنتظمة التي تؤثر في الوصلات من نقطة إلى نقطة لا يمكن تطبيقه على الوصلات الموجودة بين نقطة ثابتة ومنطقة معينة. ويمكن مراعاة عدم الانتظام ثنائي الأبعاد هذا بتطبيق توزيع متوسط معدل سقوط الأمطار على خلية المطر التي تجري دراستها. وبالنسبة إلى خلية بتغذية مركزية نصف قطرها L ، يمثل الرسم البياني الوارد في الشكل 13 المنطقة المكافئة التي يحددها نصف القطر d_0 الذي يتعرض للتغطية أثناء النسبة المئوية المختارة من الوقت.

الشكل 13

مخطط الخلية بتغذية مركزية يمثل نصف قطر منطقة التغطية المكافئة في ظروف المطر



P.1410-13

وضع إجراء للتنبؤ بمنطقة التغطية بالاستناد إلى القياسات الرادارية لسقوط الأمطار التي أجريت في المملكة المتحدة على مدى سنتين. بالنسبة إلى خلية بتغذية مركزية نصف قطرها L (km) وهامش خبو النظام F (dB) عند الحافة: الخطوة 1: الحصول على المعدل المتوسط لهطول المطر في منطقة ما $R_a(p)$ الذي يتم تجاوزه خلال $p\%$ من الوقت، حيث R هو معدل هطول المطر في نقطة معينة بالنسبة للمنطقة.

$$(39) \quad R_a = \left(0.317L^{0.06} + 1\right)R^{1-0.15L^{0.2}}$$

ويرد في الجدول 3 مثال لهذه المعلمة فيما يتعلق بمعطيات قائمة على الرادار تم الحصول عليها في المملكة المتحدة. وفيما يتعلق بمعدل هطول المطر في نقطة معينة، يلاحظ أن المعدل المتوسط لهطول المطر في منطقة معينة ينخفض بشكل ضئيل عند سوية تجاوز بمقدار 0,1% وحوالي الثلث عند سوية تجاوز بمقدار 0,01% وحوالي النصف عند سوية تجاوز بمقدار 0,001% بالنسبة إلى منطقة دائرية نصف قطرها 2,5 km.

الخطوة 2: تحديد مسافة القطع d_0 أثناء نسبة مئوية p % في سنة متوسطة عن طريق حل المعادلة (39) للحصول على d عددياً.

$$(40) \quad k R_a^\alpha(p) d \left(1.5 + \left(1.1(2d^{-0.04} - 2.25)\right) \log(R_a(p))\right) + 20 \log(d/L) = F$$

حيث تعد k و α معلمتين تحددان التوهين النوعي الناتج عن المطر الوارد في التوصية ITU-R P.838. ويمثل التعبير $(1.5 + 1.1(2d^{-0.04} - 2.25)) \log(R_a(p))$ عامل تخفيض المسير المنطبق على الحسابات الخاصة بالمنطقة.

الخطوة 3: بالنسبة إلى مسافة القطع $d_0 \propto (L, p, F)$ تكون تغطية المنطقة لهذه الخلية كالتالي:

$$(41) \quad C(L, p, F) = 100 \left(\frac{d_0}{L}\right)^2 \quad \%$$

ويبين الشكل 14 نتائج الإجراء الناتجة من المعادلات (39) و (40) و (41) لخليتين بتغذية مركزية بنصف قطر 2,5 km و 5 km وبنظامين مع استعمال استقطاب عمودي عند التردد 42 GHz على أساس هامش توهين بسبب المطر قدره 10 dB و 15 dB عند حافة الخلية. ويفترض في هذا الصدد أيضاً أن كسب هوائي المرسل متساوٍ بالنسبة إلى جميع المستعملين. وتراعى في الحسابات الخسارة في الفضاء الحر (المعادلة (40)).

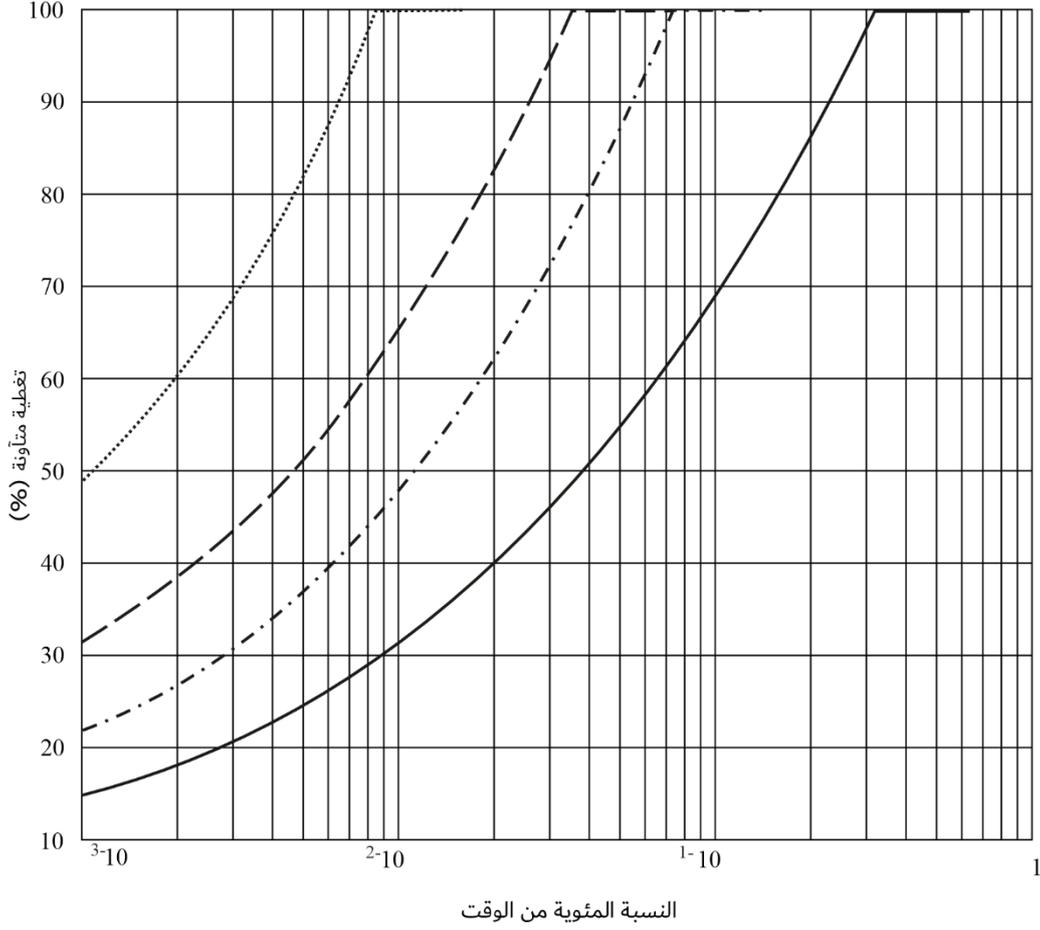
الجدول 3

متوسط معدل هطول المطر في نقطة معينة وفي منطقة معينة من خلال مجموعة معطيات رادارية مقيسة على مدى سنتين في المملكة المتحدة

| متوسط معدل هطول المطر في منطقة معينة R (mm/h) | | معدل هطول المطر في نقطة معينة، R (mm/h) | النسبة المئوية من الوقت |
|-------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------|-------------------------|
| نصف القطر = 5 km | نصف القطر = 2,5 km | | |
| 33,0 | 36,0 | 65,6 | 0,001 |
| 23,4 | 29,0 | 46,2 | 0,003 |
| 17,1 | 19,4 | 29,9 | 0,01 |
| 12,6 | 16,3 | 18,1 | 0,03 |
| 8,5 | 9,5 | 9,8 | 0,1 |
| 4,8 | 4,9 | 5,0 | 0,3 |
| 2,1 | 2,1 | 2,0 | 1 |

الشكل 14

تطبيق الإجراء عند الموقع 1,5° غرب، 51° شمال



- نصف قطر الخلية 2,5 km والهامش dB 10
- نصف قطر الخلية 2,5 km والهامش dB 15
- نصف قطر الخلية 5 km والهامش dB 10
- · - · - · نصف قطر الخلية 5 km والهامش dB 15

P.1410-14

2.3 تحسين تنوع الطرق

تتغير الهواطل عمودياً وأفقياً حسب الوقت والمكان تغيراً كبيراً. ويراعى هذا التغير في النمذجة الحالية فيما يتعلق بوحدة بين مطرافين، وذلك مثلاً باستعمال طول المسير الفعال، بافتراض أن مستعملاً يمكنه أن يُوصل بمحطتين قاعدتين أو أكثر في أي وقت. ويشرح هذا الفرع إلى أي مدى يمكن تحسين التيسر في حالة تركيب مثل هذا النظام.

وتفترض شبكة من نمط نجمي بعقدة مركزية تشمل مرسلين ومستقبلاً واحداً، ويفترض أن طولي المسير واحد حيث يتراوح الفصل الزاوي ϕ بين 0° و 360° .

نظراً إلى أن هطول المطر غير منتظم أفقياً فإن الإحصاءات المتعلقة بالتوهين بالنسبة إلى المسير الوحيد وإلى مسيري التنوع تكون مختلفة. ويبين الشكل 15 الإحصاءات النموذجية للتوهين عبر مسير غير محمي وعبر مسيري التنوع المندمجين. وتعرف المعادلتان التاليتان التحسين العائد إلى الفصل الزاوي الذي يمكن التعبير عنه بتحسين التنوع $I(A_i)$ أو كسب التنوع $G(A_i)$ ، بالإشارة إلى أحد مسيرين بديلين $i = 1, 2$ (تشكيلة التنوع غير المتوازن):

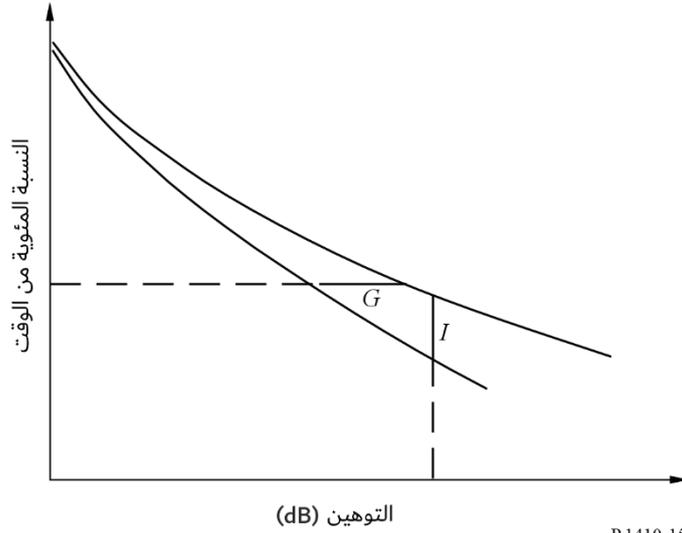
$$(42) \quad I(A_i) = \frac{P(A_i)}{P_d(A_i)}, \quad i = 1,2$$

$$(43) \quad G(A_i) = A(t) - A_d(t), \quad i = 1,2$$

حيث $P_d(A_i)$ هي النسبة المئوية من الوقت في مسير التنوع المدمج حيث يكون عمق الخبو أعلى من A_i وتشير $P(A_i)$ إلى النسبة المئوية من الوقت للمسير غير المحمي. وعلى غرار ذلك، تشير $A_d(t)$ إلى عمق الخبو في مسير التنوع المدمج الذي يمثل النسبة المئوية من الوقت t ويقابل $A(t)$ المسير غير المحمي.

الشكل 15

مثال عن إحصاءات التوهين بدالة التنوع الزاوي للمسير



فيما يلي الخطوات اللازمة لاشتقاق تحسين التنوع I وكسب التنوع G :

الخطوة 1: تقريب التوزيع السنوي لتوهين المطر A_i (dB) عبر كل مسير $i = 1,2$ باستخدام توزيع لوغاريتمي طبيعي:

$$(44) \quad P(A_i) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln A_i - \ln A_{mi}}{\sqrt{2} S_{ai}} \right)$$

حيث $\operatorname{erfc}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_x^\infty e^{-z^2} dz$ هي دالة الخطأ المتممة. ولحساب A_{mi} و S_{ai} ، يوصى بإجراء ملاءمة إما على القياسات المحلية المتوفرة أو على توزيع توهين المطر في الفقرة 1.4.2 من التوصية ITU-R P.530. وترد تفاصيل هذا الإجراء في الملحق 2 بالتوصية ITU-R P.1057.

الخطوة 2: تحديد ثابت عدم تجانس المطر D_r ، أي المسافة بالكيلومترات التي يساوي عندها معامل الترابط $\sqrt{2}/2$. وثمة قاعدة بسيطة لحساب D_r تعتمد على الارتفاع المطلق $|lat|$ للموقع:

$$(45) \quad D_r = 0.644 \ln(|lat|) - 1.02, \quad 5^\circ \leq |lat| \leq 90^\circ$$

الخطوة 3: تحديد المسافة المميزة لمنطقة هطول المطر على أنها $20 \times D_r = D_c$.

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

$$(46) \quad H_i = 2L_i D_r \sinh^{-1} \left(L_i / D_r \right) + 2D_r^2 \left(1 - \sqrt{(L_i / D_r)^2 + 1} \right), \quad i = 1, 2$$

الخطوة 5: استخدام أسلوب التكامل العددي لتقييم المعلمة المكانية H_{12} بين المسيرين:

$$(47) \quad H_{12} = \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \rho_0(d) dl_1 dl_2$$

حيث:

$$(48) \quad \rho_0(d) = \begin{cases} \frac{D_r}{\sqrt{D_r^2 + d^2}} & d \leq D_c \\ \frac{D_c}{\sqrt{D_r^2 + D_c^2}} & d > D_c \end{cases}$$

وتعطي مسافة نقطتي المسيرين البديلين اللذين يشكلان الزاوية φ بالصيغة التالية:

$$(49) \quad d^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos \varphi, \quad 0 < l_1 \leq L_1, \quad 0 < l_2 \leq L_2$$

الخطوة 6: حساب معامل الترابط لتوهين المطر:

$$(50) \quad \rho_a = \frac{1}{S_{a1} S_{a2}} \ln \left[\frac{H_{12}}{\sqrt{H_1 H_2}} \left(e^{S_{a1}^2} - 1 \right)^{1/2} \left(e^{S_{a2}^2} - 1 \right)^{1/2} + 1 \right]$$

الخطوة 7: يعطى الاحتمال المشترك لتجاوز مجموع تشكيلة التنوع (غير المتوازنة) عمق الخبو A_i بالصيغة التالية:

$$(51) \quad P_d(A_i) = \frac{1}{2} \int_{u_2}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{u_1 - \rho_a u}{\sqrt{2}\sqrt{1-\rho_a^2}}\right) du$$

حيث:

$$(52) \quad u_i = \frac{\ln A_i - \ln A_{mi}}{S_{ai}}, \quad i = 1, 2$$

الخطوة 8: يتم الحصول على تحسين التنوع I عند مستوى التوهين المرجعي A_i على أساس التعريف المعطى في المعادلة (42).

الخطوة 9: يتم الحصول على كسب التنوع G عند النسبة المئوية المرجعية t على أساس التعريف المعطى في المعادلة (43)، بعد عكس المعادلتين (44) و(51) (انظر الملاحظة 1).

الملاحظة 1 - يجب تطبيق تحليل عددي لعكس المعادلة (51).

4 تشوه قناة الانتشار

يتناول هذا الفرع التأثيرات المتأونة لديناميات الغطاء النباتي والانتشار عبر عدة مسيرات (المباني والتضاريس الأرضية) على قناة المسير. ونظراً لندرة المعطيات المتاحة حالياً، تعطى نتائج القياس المتيسرة على سبيل الإرشاد فقط. ويمكن الحصول على المعلومات المتعلقة بتغير الإشارة والانحراف المعياري فيما يتعلق بالانتشار من خلال تحرك الغطاء النباتي في التوصية ITU-R P.833.

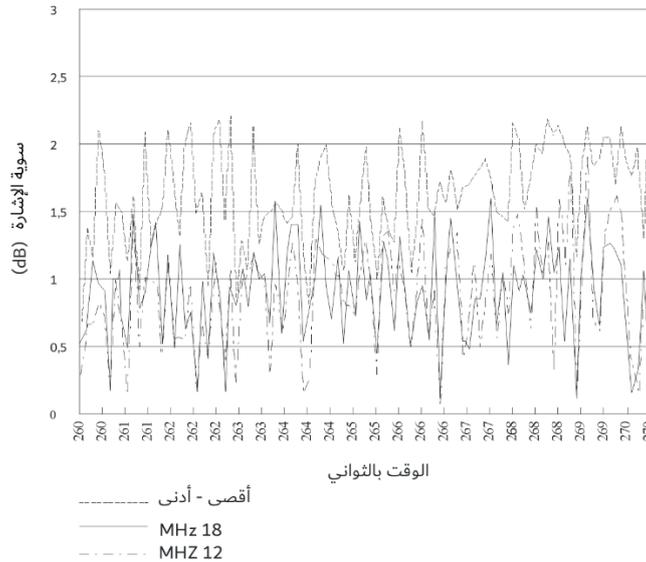
1.4 توهين انتقائي للتردد العائد إلى الغطاء النباتي

أجريت قياسات بواسطة مجموعة مراشيع للإرسال في عرض نطاق 34 MHz بهدف دراسة احتمال حدوث توهين انتقائي للتردد عبر القناة. وتضمنت مجموعة المراشيع ثمان قنوات يبلغ عرض نطاقها 1,6 MHz (-3 dB) ويفصل بينها 3 MHz وضعت في وسط القناة. وقد أجريت القياسات وراء شجرة من نوع البتولة عند مسافة 15 m مع فاصل اعتيان قدره 100 ms. ونظراً لعدم وجود رياح خلال فترة القياس، جرت محاكاة تأثير الريح بواسطة حبال تهمتر بها الشجرة. ويرد في الشكل 16 مقارنة بين سويات إشارة القنوات في ظروف رياح قوية. وتوحي السوية المنخفضة للتغير الملحوظ عبر القناة بعدم وجود توهين انتقائي كبير للتردد. وبالتالي فإن التغير الزمني لسوية الإشارة قد يكون ناتجاً عن تغير الحجب أو عن كثافة الأغصان والأوراق الواقعة بين المستقبل والمرسل، أو بسبب الانتشار عبر عدة مسيرات حيث يكون الاختلاف في وقت الانتشار ضئيلاً جداً.

وزيادة في اختبار النتائج الملحوظة أجريت تجربة باستعمال مضمام القدرة القصوى (MPC) وهوائيين فرديين يفصل بينهما 72 cm. وأجري إرسال اختبائي MPEG-2 TV عند 42 GHz باستعمال النسق DVB-S (تصحيح الخطأ في اتجاه الذهاب لنصف معدل التشكيل المتعامد بزحزحة الطور). ووضعت الإشارات الصادرة من كل هوائي وكذلك الإشارات المختلطة من خلال مضمام القدرة القصوى في ثلاثة صناديق لفك الشفرة ومراقب فيديو في الخدمة الإذاعية الفيديوية الرقمية (DVB-S). وقد نصبت الأجهزة لكي يستقبل كلا الهوائيين الإشارات من خلال أغصان الأشجار المتحركة. وقد عانى كلاً من نظامي DVB-S وحيد الهوائي من خسارة منتظمة في الرزمة. وكان معدل خسارة الرزمة شديداً بحيث يصعب تصحيحه بمفكك التشفير مما سبب خسارة فيديوية متكررة. وعلى عكس ذلك، عانت الإشارة المختلطة بواسطة مضمام القدرة القصوى من خسارة رزمة منخفضة وبالتالي استطاع مفكك التشفير MPEG-2 من التعويض عن ذلك وظل الإرسال الفيديوي مستقراً.

الشكل 16

مقارنة بين سويات إشارة القنوات في ظروف رياح قوية



P.1410-16

2.4 الانتشار عبر عدة مسيرات الناتج عن الانعكاسات

1.2.4 نتائج تقنية تتبع أثر الشعاع

بينت عمليات محاكاة تتبع أثر الشعاع أن مشكلة الانتشار عبر عدة مسيرات تبدو قليلة الشأن في الظروف التي سيشغل النظام في ظلها، وأن حزمة هوائي المستقبل الضيقة جداً تسبب توهيناً كبيراً جداً للإشارات المنتشرة عبر عدة مسيرات. والأشعة التماسية

الضحلة جداً المنبعثة من السطوح المجاورة ومن الأرض هي وحدها التي تتسرب إلى المستقبل بدرجة لا بأس بها من الاتساع. ونتيجة لذلك، فإن قيم تمديد وقت الانتشار الملحوظة بواسطة المحاكاة ضعيفة جداً.

لم تدرس الأشعة المنعرجة أثناء محاكاة تتبع أثر الشعاع ولكن بينت بعض الأعمال السابقة أن هناك مواقع قليلة جداً يمكنها استعمال الأشعة المنعرجة، وبالتالي من المرجح أن تكون هناك مواقع قليلة حيث تشكل الأشعة المنعرجة مصدرًا للتداخل.

وعلى سبيل المثال، أجريت حسابات بتتبع أثر شعاع تمديد وقت الانتشار لمواقع المستقبلات باستعمال قاعدة معطيات كبيرة (أوكسفورد، المملكة المتحدة). وقد أعطت هذه الحسابات قيماً منخفضة للغاية بسبب السويات المنخفضة جداً للانتشار عبر عدة مسيرات. وقد لوحظ أن القيمة المتوسطة الفعالة لتمديد وقت الانتشار بلغت حوالي 0,01 ns، وهو ما يعادل تقريباً عرض نطاق للتماسك قدره 15 GHz. ولن يشكل ذلك مشكلة بالنسبة إلى نظام نفاذ راديوي عريض النطاق. ومن المستبعد أن تكون القيمة الحقيقية الفعالة لتمديد وقت الانتشار منخفضة إلى هذا الحد في الواقع وذلك بسبب الأشعة المنعرجة المذكورة أعلاه، ولكن يمكن واقعياً اعتبار عرض نطاق للتماسك يصل إلى 5 GHz. ويبلغ الانحراف المعياري للقيمة الفعالة لتمديد وقت الانتشار حوالي 0,01 ns.

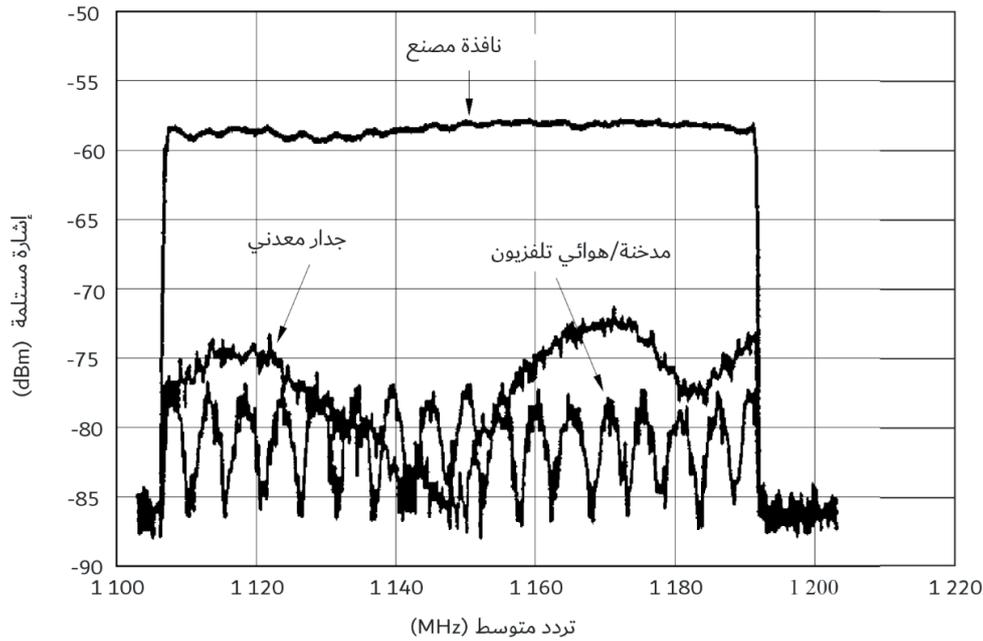
2.2.4 نتائج من القياسات

يمكن اعتبار الانعكاسات الناتجة عن المباني بمثابة إمكانية لملء منطقة الحجب وبمثابة انتشار ضار عبر عدة مسيرات على حد سواء. وقد بينت بعض عمليات الرصد باستعمال كمنس تردد قدره 80 MHz أنه يمكن زيادة عدد المواقع المستقبلية لإشارة ملائمة للتغطية بنسبة 9% وذلك بإضافة الإشارات المنعكسة. ومع ذلك ينبغي ملاحظة أن استعمال إشارات منعكسة لتوفير خدمة معينة يؤثر على عدة مشاكل. أولاً يجب أن تكون الإشارة مستقرة أي أن يكون لإشارة الورد إلى الشيء العاكس مسير عبر خط البصر. وإذا عبر أي جزء من المسير الغطاء النبائي أو مسيراً يحتمل أن يتعرض إلى الحجب بسبب الحركة ستظهر الإشارة الناتجة تغيراً زمنياً. وثانياً يجب أن يكون الشيء العاكس ذاته دائماً ومستقراً.

يكون لمساحة وخشونة سطح المبنى العاكس تأثير كبير للغاية على استجابة تردد القناة. ويبين الشكل 17 استجابة القناة المقيسة فيما يتعلق بثلاث إشارات منعكسة مختلفة: تأتي الإشارة الأولى من نافذة مصنع والإشارة الثانية من مدخنة منزل ذي شرفة (المنزل مجهز أيضاً بهوائي لتلفزيون ياغي) والإشارة الثالثة يعكسها جدار معدني مموج لمبنى كبير للبيع بالتجزئة. وجددير بالملاحظة فيما يتعلق بهذا المبنى أن الجدار المعدني المموج يعطي انعكاساً زاوياً ممدداً وليس انعكاساً زاوياً مرآوياً. وبلغت المسافة بين المواقع والمرسل km 1,34 و km 1,57 و m 616 على التوالي.

الشكل 17

استجابة التردد للانعكاسات المقيسة في ثلاثة مواقع مختلفة



P.1410-17

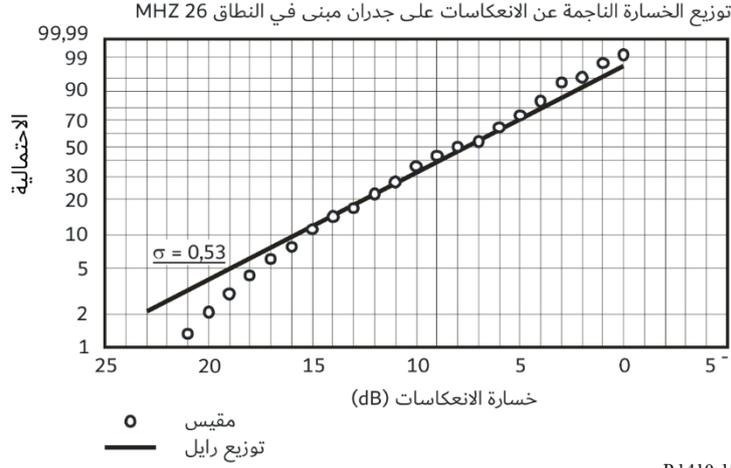
من الملاحظ أن نافذة المصنع توفر استجابة تردد منتظمة بصورة عامة لأنها تتصرف كمرآة مسطحة وتتضمن عنصراً مرآوياً واحداً. في حين يظهر الجدار المعدني المموج والمدخنة توجاً مميزاً يقابل الاختلاف في طولي المسير (على افتراض نموذج بمسيرين) بمقدار 6 m و 60 m على التوالي. وفيما يتعلق بانعكاس المدخنة، قد يعزى طول مسافة المسير إلى اجتماع الانعكاس المتأني من شيء آخر يقع عند 30 m تقريباً وراء المدخنة. وفي حالة الجدار المعدني المموج يمكن الحصول على اختلاف طول المسير بمقدار 6 m من مختلف أجزاء الجدار ذاته، نظراً إلى أن المبنى بكامله يمكن أن يساهم في انعكاس الإشارات وليس فقط المنطقة المرآوية الصغيرة.

وقد تم تنفيذ قياسات الطيف الترددي واسع النطاق في منطقة شبه حضرية في كل من نطاقي التردد 5 GHz و 25 GHz. وكان النطاق المشغول لطيف الإرسال 26 MHz وكان هناك جزء يبلغ مداه 10 MHz من الجزء المركزي للنطاق مسطح إلى حد كبير. وفي كل طيف ترددي، يمكن حساب الحد الأقصى لتشتت الانتعاش داخل النطاق من السوية القصوى والسوية الدنيا في المدى البالغ 10 MHz من الجزء المركزي للطيف. ويفرض نموذج تداخل بموجتين، فإن النسبة (D/U) للموجة D كموجة مباشرة والموجة U كموجة منعكسة تعتبر عاملاً مهماً في تقدير تشتت الانتعاش داخل النطاق. ويتأثر تشتت الانتعاش داخل النطاق عند محطة طرفية بالحجب الناتج عن عوائق مثل المنازل والأشجار المحيطة. ويفرض أن سوية الموجة U ثابتة، فإنه يمكن القول إن القيمة D/U لمسير الانتشار تساوي من 20 إلى 30 dB. ويشير هذا إلى أنه في حالة استخدام هوائي محطة طرفية له كسب هوائي قدره 15 dBi تقريباً مع حدوث حجب أكبر من 20 dB، فإن للاختلاف في الانتعاش داخل النطاق تشتت ضار. ويؤثر كسب الهوائي الاتجاهي على سوية كبت موجات التداخل. ويمكن افتراض قيمة قدرها 50 dB للنسبة D/U بالنسبة لهوائي له كسب قدره 32 dBi و 30 dB لهوائي كسبه 12 dBi. ويقابل الفرق بين كسبي الهوائيين الفرق بين قيمتي D/U السابقتين.

إن قياسات كنس التردد باستعمال إشارة مستقطبة عمودياً عند 26 GHz التي أجريت بزوايا انعكاس تتراوح بين 87,5° و 89° (أي بشكل متعامد تقريباً مع سطح الجدار)، بينت توهيناً متوسطاً قدره 7,5 dB. وكان المرسل والمستقبل يقعان في نفس المكان. وتراوحت المسافات حتى الجدران من 37 m إلى 402 m. وقد استعملت أربعة مبان تتكون مساحة الجدران فيها من الزجاج والقرميد والمعدن وبالتالي يتراوح عدم انتظام السطح بين 3 cm و 75 cm. وجددير بالملاحظة أن متجه المجال الكهربائي كان متوازياً مع الجدران. ويبين الشكل 18 توزيعاً تراكمياً للخسارة بسبب الانعكاسات. وقد وجد أن الانحراف المعياري للتناقض في القياسات نسبة إلى توزيع رايلي $\sigma = 0,53$ dB.

الشكل 18

التوزيع التراكمي للخسارة الناجمة عن الانعكاسات على جدران مبنى والمقيس عند تردد 26 GHz



P.1410-18

5 التداخل

تصمم الأنظمة الراديوية الخلوية على أساس التوفيق بين نمط إعادة استعمال التردد ونسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (C/I). وقد يحتاج الأمر إلى حد أدنى من نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء كي يتسنى لنظام معين أن يعمل بشكل مرضٍ، أي حسب نوعية الأداء المحددة.

وفي ضوء الحد الأدنى المطلوب من نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (C/I) يصبح من السهل وضع نموذج منتظم لإعادة استعمال التردد يفى بالغرض. ومع ذلك ينبغي أن تؤخذ خصائص التضاريس الأرضية في الاعتبار كما ينبغي اختيار موقع المحطة القاعدة بعناية للحصول على نوعية الأداء المطلوبة لنظام النفاذ الراديوي.

وفي معظم الحالات لن يتأثر بذلك سوى قلة من المستخدمين بسبب ضيق حزمة هوائي المطراف. ويتراوح عرض الحزم بين درجتين و3 درجات. وبالنسبة للمستخدمين الذين قد يتعرضون للتأثير يمكن استعمال النماذج الموصوفة في التوصية ITU-R P.452 والتوصية ITU-R P.530 لتقدير النسبة المئوية من الوقت الذي تنبعث فيه الإشارة الضارة خارج خط البصر والإشارة المعززة على خط البصر، على التوالي، من المحطة القاعدة المسببة للتداخل. ولكن لا تتوفر فوق 37 GHz، أي معطيات لتأكيد صحة القيم المتنبأ بها.

جرى تقييم مشكلة التداخل باستعمال المعطيات الناتجة عن دراسة 111 موقعاً خلال حملة قامت بها المملكة المتحدة لقياس تغطية منقطة معينة. وجرت دراسة مرسل آخر كمصدر محتمل للتداخل. ومن مجموع المعطيات بين موقع واحد فقط انبعاث إشارة من المرسل غير المطلوب تفوق سويتها عتبة الضوضاء في فتحة حزمة الهوائي المسدد نحو المرسل المطلوب، وحتى في هذه الحالة لوحظ أن نسبة الإشارة المطلوبة إلى الإشارة غير المطلوبة بلغت 15 dB. ويبدو أن ذلك يؤكد أن التداخل فيما بين الخلايا سيكون طفيفاً على الأرجح بسبب ضيق فتحات هوائيات المستقبل.