التوصيـــة ITU-R P.1411-4

معطيات الانتشار وطرائق التنبؤ لتخطيط أنظمة الاتصالات الراديوية قصيرة المدى المعدة للعمل خارج المباني والشبكات المحلية الراديوية في مدى الترددات المتراوحة بين 300 MHz و100 GHz

(المسألة ITU-R 211/3)

(2007-2005-2003-2001-1999)

مجال التطبيق

تنطوي هذه التوصية على توجيهات بشأن الانتشار قصير المدى في مجال الترددات 300 MHz إلى 100 GHz. وتتوفر المعلومات عن نماذج خسارة المسيرات في كل من بيئة خط البصر (LoS) وخلاف خط البصر (NLoS)، وخسارة اختراق المباني، ونماذج تعدد المسيرات لكل بيئة أخاديد الشوارع وفوق سطوح المباني، وعدد مكونات الإشارة، وخصائص الاستقطاب، وخصائص الخبو.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن عدداً كبيراً من التطبيقات الجديدة للاتصالات المتنقلة والاتصالات الشخصية قصيرة المدى (أقل من 1 km) يجري تطويرها حالياً؛

ب) أن هناك طلباً كبيراً على الشبكات المحلية الراديوية (RLAN) وأنظمة العروة المحلية اللاسلكية؛

ج) أن الأنظمة قصيرة المدى التي تستعمل قدرة منخفضة جداً لها مزايا عديدة لتقديم خدمات في البيئة المتنقلة وفي العروة المحلية اللاسلكية؛

د) أن من الضروري جداً لتصميم هذه الأنظمة معرفة خصائص الانتشار والتداخلات الناتجة عن وجود عدة مستعملين في المنطقة نفسها؛

هـ) أن من الضروري على السواء توفر نماذج عامة (أي مستقلة عن الموقع) ومشورة بشأن التخطيط الأولي للأنظمة وتقييم التداخلات وتوفر نماذج محددة (أي خاصة بمواقع معينة) لبعض التقييمات المفصلة،

وإذ تلاحظ

أ) أن التوصية ITU-R P.1238 تضع الخطوط التوجيهية المتعلقة بالانتشار داخل المباني على مدى الترددات المتراوحة بين 900 MHz و100 GHz وبالتالي يجب الرجوع إليها في الحالات التي تنطبق فيها ظروف الانتشار داخل المباني وخارجها على السواء؛

ب) أن التوصية ITU-R P.1546 تضع الخطوط التوجيهية المتعلقة بالانتشار للأنظمة العاملة على مسافات تبلغ وتتجاوز 1 km وعلى مدى الترددات المتراوحة بين 30 MHz و3 GHz،

توصـــي

1 باعتماد المعطيات والطرائق المحددة في الملحق 1 لتقييم خصائص الانتشار المتعلقة بأنظمة الاتصالات الراديوية قصيرة المدى المعدة للعمل خارج المباني بين 300 MHz و100 GHz، حيثما أمكن.

الملحق 1

1 مقدمـــة

يتأثر الانتشار عبر مسافات تقل عن 1 km أساساً بالمباني والأشجار أكثر منه بالتضاريس. ويكون تأثير المباني غالباً، حيث إن معظم الوصلات الراديوية قصيرة المدى توجد في المناطق الحضرية وشبه الحضرية. أما المطاريف المتنقلة فالأرجح أن يحملها المشاة أو أن تكون على متن مركبة.

تعرّف هذه التوصية فئات مسيرات الانتشار على مسافات قصيرة وتقدم طرائق لتقدير خسارة المسير وامتداد وقت الانتشار على هذه المسيرات.

2 بيئات التشغيل المادية وتعريف أنماط الخلايا

تصنف البيئات الموصوفة في هذه التوصية من حيث انتشار الموجات الراديوية فقط. وتتأثر الموجات الراديوية بالبيئة، أي بهياكل المباني وارتفاعها وباستعمال المطاريف المتنقلة (مشاة أو مركبات) وبموقع الهوائيات. وقد تم تحديد أربع بيئات مختلفة باعتبارها أكثر البيئات نمطية. إذ لم تؤخذ بعين الاعتبار مثلاً المناطق كثيرة التلال لأنها لا تمثل المناطق الحضرية. ويعرض الجدول 1 البيئات الأربع. ونظراً إلى تعدد أنواع البيئات في كل فئة فليس الغرض نمذجة كل حالة ممكنة، وإنما وضع نماذج الانتشار التي تمثل البيئات الأكثر شيوعاً.

الجدول 1

بيئات التشغيل المادية – حالات الانحطاط المرتبطة بظواهر الانتشار

البيئة	الوصف وحالات الانحطاط المرتبطة بظواهر الانتشار ذات الأهمية
المناطق الحضرية المرتفعة	– "الأخاديد الحضرية" أي الشوارع المنحصرة بين مبان من عدة طوابق – قلة احتمال الانتشار فوق سطوح المباني بسبب ارتفاعها – احتمال استطالة وقت الانتشار بسبب صفوف المباني العالية – العربات العديدة المتنقلة في المنطقة تكون بمثابة عوائق تعكس الموجات مضيفة بذلك إزاحة دوبلرية إلى الموجات المنعكسة
المناطق الحضرية/ شبه الحضرية منخفضة الارتفاع	– شوارع واسعة – احتمال الانعراج فوق سطوح المباني التي لا تتجاوز ثلاثة طوابق بصورة عامة – احتمال أن تؤدي العربات المتنقلة إلى ظواهر الانعكاس والحجب في بعض الأحيان – التأثيرات الأساسية هي امتداد وقت الانتشار وقلة الإزاحة الدوبلرية
المناطق السكنية	– منازل بطابق واحد أو اثنين – شوارع ذات اتجاهين عموماً مع وقوف سيارات على الجانبين – احتمال وجود أشجار كثيفة الأوراق إلى حد ما – حركة سير خفيفة عادة
المناطق الريفية	– منازل صغيرة تحيط بها حدائق كبيرة – تأثير التضاريس (طوبوغرافيا) – احتمال وجود أشجار كثيفة الأوراق إلى حد ما – حركة سير شديدة أحياناً

ويراعى سيناريوهان محتملان لكل بيئة من هذه البيئات الأربع. وبالتالي يُقسّم المستعملون إلى مشاة وعربات. وتختلف سرعة الهاتف المتنقل اختلافاً كبيراً بالنسبة إلى هذين التطبيقين مما يؤدي إلى إزاحات دوبلرية مختلفة. ويعرض الجدول 2 السرعات النموذجية لهذين السيناريوهين.

الجدول 2

بيئات التشغيل المادية – السرعة النموذجية للهاتف المتنقل

البيئة	سرعة تنقل المشاة (m/s)	سرعة تنقل العربات
المناطق الحضرية المرتفعة	1,5	سرعة نموذجية في وسط المدينة حوالي 50 km في الساعة (14 m/s)
المناطق الحضرية/شبه الحضرية منخفضة الارتفاع	1,5	حوالي 50 km في الساعة (14 m/s) طرق سريعة حتى 100 km في الساعة (28 m/s)
المناطق السكنية	1,5	حوالي 40 km في الساعة (11 m/s)
المناطق الريفية	1,5	100-80 km في الساعة (22-28 m/s)

يعتمد نمط آلية الانتشار المهيمن أساساً على ارتفاع هوائي المحطة القاعدة بالنسبة إلى المباني المحيطة. ويعرض الجدول 3 أنماط الخلايا النموذجية ذات الصلة بالانتشار خارج المباني عبر مسافة قصيرة.

الجدول 3

تعريف أنماط الخلايا

نمط الخلية	نصف قطر الخلية	الموقع النموذجي لهوائي المحطة القاعدة
خلية صغرية	0,05 إلى 1 km	في الخارج، فوق متوسط مستوى السطوح، وقد تكون بعض المباني المحيطة أعلى من ارتفاع هوائي المحطة القاعدة
خلية صغرية حضرية مزدحمة	0,05 إلى 0,5 km	في الخارج، دون متوسط مستوى سطوح المباني
خلية دقيقة	حتى 50 m	في الداخل أو في الخارج (دون مستوى سطوح المباني)

(جدير بالملاحظة أن نمط "الخلية الصغرية الحضرية المزدحمة" غير معرف صراحة في توصيات لجنة الدراسات 8 للاتصالات الراديوية.)

3 فئات المسيرات

1.3 تعريف حالات الانتشار

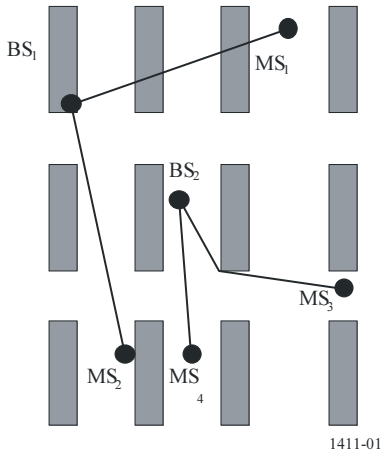
يوضح الشكل 1 هندسة أربع حالات للانتشار بين المحطات القاعدة (BS) والمحطات المتنقلة (MS). وتركب المحطة القاعدة BS_1 فوق مستوى السطح. وتكون الخلية المقابلة عبارة عن خلية "موسعة". ويتم الانتشار من هذه المحطة القاعدة من فوق السطح أساساً. وتركب المحطة القاعدة BS_2 دون مستوى السطح وتحدد بيئة الخلايا الصغرية أو الخلايا "الدقيقة الحضرية الكثيفة". ويتم الانتشار في أنماط الخلايا هذه داخل "أخاديد الشوارع". وبالنسبة إلى الوصلات بين الهواتف المتنقلة، يمكن افتراض وقوع طرفي الوصلة دون مستوى السطوح بحيث يمكن استعمال النماذج المتصلة بالمحطة القاعدة BS_2.

1.1.3 الانتشار فوق السطوح خلاف خط البصر (NLoS)

يوضح الشكل 2 الحالة النموذجية للانتشار خلاف خط البصر (وصلة بين المحطة BS_1 والمحطة MS_1 في الشكل 1) وتسمى فيما يلي الحالة NLoS1.

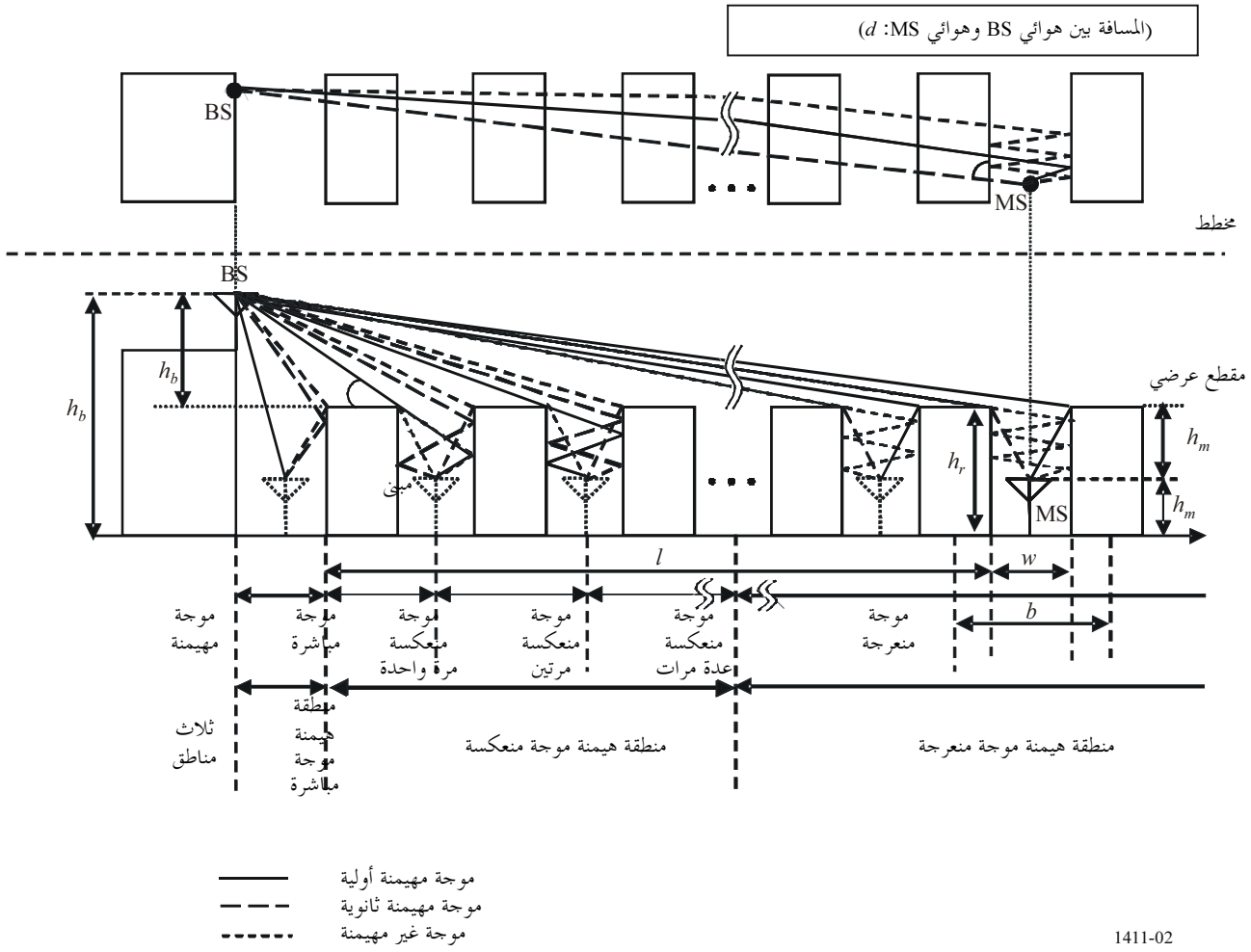
الشكل 1

حالات الانتشار النموذجية في المناطق الحضرية



الشكل 2

تعريف معلمات الحالة NLoS1



المعلمات المتصلة بهذه الحالة هي كالآتي:

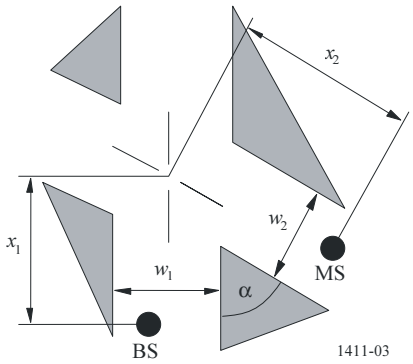
h_r: متوسط ارتفاع المباني (m)
w: عرض الشارع (m)
b: متوسط المسافة بين المباني (m)
φ: اتجاه الشارع بالنسبة إلى المسير المباشر (بالدرجات)
h_b: ارتفاع هوائي المحطة القاعدة (m)
h_m: ارتفاع هوائي المحطة المتنقلة (m)
l: طول المسير الذي تغطيه المباني (m)
d: المسافة بين المحطة القاعدة والمحطة المتنقلة.

تصادف الحالة NLoS1 غالباً في البيئات السكنية/الريفية فيما يتعلق بجميع أنماط الخلايا وتكون هذه الحالة مهيمنة في البيئات الحضرية/شبه الحضرية منخفضة المباني فيما يتعلق بالخلايا الموسعة. ويمكن حساب المعلمات h_r وb وl من المعطيات المتصلة بالمباني الموجودة على امتداد الخط الواصل بين الهوائيات، ولكن تحديد المعلمتين w وφ يتطلب إجراء تحليل ثنائي الأبعاد للمنطقة المحيطة بالهاتف المتنقل. وجدير بالملاحظة أن l غير متعامدة بالضرورة مع اتجاه المبنى.

2.1.3 الانتشار على امتداد الأخاديد الحضرية، NLoS

يصف الشكل 3 الوضع المقابل لحالة نموذجية حضرية كثيفة لاستعمال الخلايا الصغرية NLoS (وصلة بين المحطة BS_2 والمحطة MS_3 في الشكل 1). وتسمى هذه الحالة فيما يلي NLoS2.

الشكل 3
تعريف معلمات الحالة NLoS2



المعلمات المتصلة بهذه الحالة هي كالآتي:

w_1: عرض الشارع عند موقع المحطة القاعدة (m)
w_2: عرض الشارع عند موقع المحطة المتنقلة (m)
x_1: المسافة بين المحطة القاعدة وتقاطع الطرق (m)
x_2: المسافة بين المحطة المتنقلة وتقاطع الطرق (m)
α: زاوية تقاطع الطرق (rad).

الحالة NLoS2 هي نمط المسير السائد في البيئات الحضرية عالية المباني فيما يتعلق بجميع أنماط الخلايا وكثيراً ما تصادف هذه الحالة أيضاً في البيئات الحضرية المزدحمة وذلك فيما يتعلق بالخلايا الصغرية والخلايا الدقيقة. ويجب إجراء تحليل ثنائي الأبعاد للمنطقة المحيطة بالهاتف المتنقل لتحديد جميع المعلمات المقابلة للحالة NLoS2.

3.1.3 مسيرات خط البصر (LoS)

يشكل المسيران BS_1-MS_2 وBS_2-MS_4 الواردان في الشكل 1 مثالين عن حالات خط البصر. ويمكن تطبيق نفس النماذج على كل من المسيرين في خط البصر.

2.3 المعطيات اللازمة

بالنسبة إلى الحسابات الخاصة بموقع ما في بيئة حضرية، يمكن استعمال أنماط مختلفة من المعطيات. ويمكن الحصول من المعطيات عالية الاستبانة على أدق المعلومات بشأن:

- هياكل المباني؛
- وارتفاع المباني النسبي والمطلق؛
- والغطاء النباتي.

ويمكن أن تكون أنساق المعطيات من نمط المصفوفات أو المتجهات. وينبغي أن تكون دقة المعطيات المتجهية فيما يتعلق بموقع المحطات في حدود 1 إلى 2 m. وتكون الاستبانة الموصى بها للمعطيات من نمط المصفوفة 1 إلى 10 m. وينبغي أن تكون دقة الارتفاع لكلا نسقي المعطيات في حدود 1 إلى 2 m.

وفي غياب المعطيات عالية الاستبانة، يوصى باستعمال معطيات استخدام الأراضي الأقل استبانة (50 m) واعتماداً على تعريف فئات استخدام الأراضي (الحضرية الكثيفة، والحضرية، وشبه الحضرية، إلخ.) يمكن عزو المعلمات اللازمة إلى هذه الفئات المختلفة. كما يمكن استعمال هذه المعطيات بالاقتران مع معلومات متجهية عن الشوارع لحساب زوايا اتجاه الشوارع.

4 نماذج خسارة المسير

يمكن تطبيق خوارزميات مغلقة فيما يتعلق بالسيناريوهات النموذجية في المناطق الحضرية. ويمكن استعمال نماذج الانتشار هذه لإجراء الحسابات المتصلة بموقع محدد أو بأي موقع عموماً. وتعرف الفقرة 1.3 حالات الانتشار المقابلة. ويعتمد نمط النموذج أيضاً على مدى التردد. ويجب تطبيق نماذج مختلفة بالنسبة إلى الانتشار بالموجات الديسيمترية (UHF) أو الانتشار بالموجات المليمترية (EHF). وفي حالة الانتشار بالموجات الديسيمترية تؤخذ في الاعتبار حالات الانتشار LoS وNLoS. وفي حالة الانتشار بالموجات المليمترية، لا يُنظر إلا في حالة الانتشار LoS. وفضلاً عن ذلك يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار ظواهر التوهين الإضافي بسبب الأكسجين والماء الجوي.

1.4 حالات الانتشار عبر خط البصر في "الأخاديد" الحضرية

الانتشار بالموجات الديسيمترية

يمكن أن تتميز الخسارة الأساسية للإرسال في مدى التردد بالموجات الديسيمترية المعرفة في التوصية ITU-R P.341 بميلين ونقطة قطع واحدة. ويعطى حد منخفض تقريبي بالصيغة التالية:

$$L_{LoS,l} = L_{bp} + \begin{cases} 20 \log_{10}\left(\frac{d}{R_{bp}}\right) & \text{for} \quad d \le R_{bp} \\ 40 \log_{10}\left(\frac{d}{R_{bp}}\right) & \text{for} \quad d > R_{bp} \end{cases} \tag{1}$$

حيث R_{bp} هي المسافة التي تقع عندها نقطة القطع وتعطى بالصيغة التالية:

$$R_{bp} \approx \frac{4 h_b h_m}{\lambda} \tag{2}$$

حيث λ هو طول الموجة (m)

ويعطى حد أعلى تقريبي بالصيغة التالية:

$$L_{LoS,u} = L_{bp} + 20 + \begin{cases} 25 \log_{10}\left(\frac{d}{R_{bp}}\right) & \text{for} \quad d \le R_{bp} \\ 40 \log_{10}\left(\frac{d}{R_{bp}}\right) & \text{for} \quad d > R_{bp} \end{cases} \tag{3}$$

حيث L_{bp} هي قيمة الخسارة الأساسية للإرسال عند نقطة قطع الميل وتساوي:

$$L_{bp} = \left| 20 \log_{10}\left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_b h_m}\right)\right| \tag{4}$$

الانتشار بالموجات السنتيمترية (SHF) حتى 15 GHz

بالنسبة إلى أطوال المسير حتى حوالي 1 km في حالة الموجات السنتيمترية يكون لحركة السير تأثير على الارتفاع الفعال للطريق وبالتالي يساهم في تحديد مسافة نقطة قطع الميل. وتقدر هذه المسافة R_{bp} بالمعادلة التالية:

$$R_{bp} = 4 \frac{(h_b - h_s)\,(h_m - h_s)}{\lambda} \tag{5}$$

حيث h_s هو الارتفاع الفعال للطريق نتيجة الأشياء الموجودة كالسيارات على الطريق والأشخاص الموجودين على مقربة من الطريق. ولذا تعتمد h_s على حركة السير. وتستخلص قيم h_s المبينة في الجدولين 4 و5 من القياسات النهارية والليلية المقابلة لظروف حركة السير الكثيفة والخفيفة على التوالي. وتقابل حركة السير الكثيفة نسبة تغطية للطريق بالسيارات تتراوح بين 10% و20% ونسبة وجود المشاة على الأرصفة تتراوح بين 0,2% و1%. وتقابل حركة السير الخفيفة نسبة تغطية للطريق بالسيارات تتراوح بين 0,1% و0,5% ونسبة وجود المشاة على الأرصفة أقل من 0,001%، علماً بأن عرض الطريق يبلغ 27 متراً بما في ذلك 6 أمتار لكل من رصيفي الطريق.

الجدول 4

الارتفاع الفعال للطريق، h_s (حركة سير كثيفة)

h_s (m)		h_b (m)	التردد (GHz)
$h_m = 1,6$	$h_m = 2,7$		
(2)	1,3	4	3,35
(2)	1,6	8	
(2)	1,6	4	8,45
(2)	1,6	8	
(2)	1,4	4	15,75
(2)	(1)	8	

(1) نقطة قطع الميل أبعد من 1 km.

(2) لا توجد أي نقطة قطع.

الجدول 5

الارتفاع الفعال للطريق، h_s (حركة سير خفيفة)

h_s (m)		h_b (m)	التردد (GHz)
$h_m = 1,6$	$h_m = 2,7$		
0,23	0,59	4	3,35
(1)	(1)	8	
0,43	(2)	4	8,45
(1)	(2)	8	
0,74	(2)	4	15,75
(1)	(2)	8	

(1) لم يجر أي قياس.

(2) نقطة قطع الميل أبعد من 1 km.

عندما يكون $h_s < h_m$، يمكن حساب القيم التقريبية للحدود العليا والدنيا للخسارة الأساسية للإرسال في نطاق الترددات على الموجات السنتيمترية باستعمال المعادلتين (1) و(3) حيث تعطى القيمة L_{bp} بالصيغة التالية:

$$L_{bp} = \left| 20\log_{10}\left\{\frac{\lambda^2}{8\pi(h_b - h_s)(h_m - h_s)}\right\}\right| \quad (6)$$

ومن جهة أخرى، عندما تكون $h_s \geq h_m$، لا توجد أية نقطة قطع. وتتميز المنطقة القريبة من المحطة القاعدة ($R_s > d$) بخسارة انتشار أساسية مشابهة لخسارة مدى الموجات الديسيمترية، بينما تتميز المنطقة البعيدة عن المحطة القاعدة بخصائص انتشار تكون فيها قيمة معامل التوهين مكعبة. وهكذا تعطى القيمة التقريبية الدنيا من أجل $R_s \leq d$ بالصيغة التالية:

$$L_{LoS,l} = L_s + 30\log_{10}\left(\frac{d}{R_s}\right) \quad (7)$$

تعطى القيمة التقريبية العليا من أجل $R_s \leq d$ بالصيغة التالية:

$$L_{LoS,u} = L_s + 20 + 30\log_{10}\left(\frac{d}{R_s}\right) \quad (8)$$

تعرّف خسارة الانتشار الأساسية L_s كالتالي:

$$L_s = \left| 20\log_{10}\left(\frac{\lambda}{2\pi R_s}\right)\right| \quad (9)$$

وقد تم تحديد قيمة 20 m للقيمة R_s تجريبياً في المعادلات (7) و(8) و(9).

انتشار الموجات المليمترية

عند الترددات التي تفوق 10 GHz تكون المسافة التي تقع عندها نقطة قطع الميل R_{bp} في المعادلة (2) أبعد بكثير من نصف القطر الأقصى المتوقع للخلية (500 m). وهذا يعني عدم انطباق أي قانون أسي بالقوة أربعة في نطاق التردد هذا. وبالتالي يكاد يتبع معدل تناقص القدرة بدلالة المسافة قانون الانتشار في الفضاء الحر مع أس توهين على المسير قدره حوالي 2,2. ويجب أيضاً مراعاة التوهين الناتج عن الغازات الجوية والمطر.

ويمكن حساب التوهين الناتج عن الغازات الجوية والمطر بالاستناد على التوالي إلى التوصيتين ITU-R P.676 وITU-R P.530.

2.4 نماذج لحالات الانتشار خلاف خط البصر (NLoS)

في حالة الانتشار NLoS يمكن أن تصل الإشارات إلى المحطة القاعدة أو المحطة المتنقلة بآليات الانعراج أو بتعدد المسيرات التي قد تجمع بين آليات الانعراج والانعكاس. ويتناول هذا الفرع نماذج تتعلق بآليات الانعراج.

الانتشار في منطقة حضرية

تعرّف نماذج للحالتين الموصوفتين في الفقرة 1.3. والنماذج صالحة لما يلي:

h_b: 4 إلى 50 m

h_m: 1 إلى 3 m

f: 800 إلى 5 000 MHz

2 إلى 16 GHz حيث $h_r > h_b$ و$w_2 > 10$ m (أو رصيف)

d: 20 إلى 5 000 m.

(يلاحظ أنه على الرغم من أن النموذج صالح حتى 5 km، فإن هذه التوصية معدّة لمسافات لا تتجاوز 1 km.)

الانتشار في منطقة شبه حضرية

يعرّف النموذج للحالة $h_r < h_b$ الموصوفة في الفقرة 1.3. والنموذج صالح لما يلي:

h_r: أي ارتفاع بالأمتار

Δh_b: 1 إلى 100 m

Δh_m: 4 إلى 10 (أقل من h_r) m

h_b: $\Delta h_b + h_r$ m

h_m: $\Delta h_m - h_r$ m

f: 0,8 إلى 20 GHz

w: 10 إلى 25 m

d: 10 إلى 5 000 m

(يلاحظ أنه على الرغم من أن النموذج صالح حتى 5 km، فإن هذه التوصية معدّة لمسافات لا تتجاوز 1 km.)

انتشار الموجات المليمترية

لا تؤخذ تغطية الإشارة في الموجات المليمترية في الاعتبار إلا في حالات خط البصر (LoS) وذلك لارتفاع خسائر الانعراج حيث تجعل العوائق من مسير الانتشار خلاف خط البصر (NLoS). وفي هذه الأحوال NLoS تكون انعكاسات تعدد المسيرات والانتشار الطريقة الأرجح استخداماً لانتشار الإشارة.

1.2.4 انتشار فوق أسطح المباني في منطقة حضرية

يكون نموذج الانتشار بالانعراج الناتج عن الحجب المتعدد الوارد فيما يلي صالحاً إذا كانت سطوح المباني متساوية الارتفاع تقريباً. وبافتراض أن ارتفاع سطوح المباني لا يختلف إلا بقيمة أدنى من نصف قطر منطقة فرينل على مسير طوله l (انظر الشكل 2)، فإن ارتفاع السطوح الذي ينبغي استعماله في النموذج هو متوسط ارتفاع السطوح. وإذا كان الاختلاف أكبر

من نصف القطر هذا، يفضل استعمال أعلى المباني على امتداد المسير لحساب الانتشار بالانعراج على حد السكين (انظر التوصية ITU-R P.526) بدلاً من نموذج الحجب المتعدد.

وعندما تكون سطوح المباني متماثلة الارتفاع في النموذج المقترح لحساب خسارة الإرسال في حالة NLoS1 (انظر الشكل 2) تساوي الخسارة بين الهوائيات المتناحية مجموع خسارة الإرسال في الفضاء الحر L_{bf} والتوهين بالانعراج بين السطوح والشارع L_{rts} والانخفاض الناتج عن الانعراج بسبب تأثير الحجب المتعدد عبر مختلف صفوف المباني L_{msd}.

إن التعبيرين L_{bf} وL_{rts} غير مرتبطين بارتفاع هوائي المحطة القاعدة في هذا النموذج بينما يتغير L_{msd} حسب وجود هذا الهوائي عند ارتفاع السطوح أو فوقه أو تحته.

$$L_{NLoS1} = \begin{cases} L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} & \text{for} \quad L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{bf} & \text{for} \quad L_{rts} + L_{msd} \le 0 \end{cases} \tag{10}$$

وتعطى خسارة الإرسال في الفضاء الحر بالمعادلة التالية:

$$L_{bf} = 32.4 + 20 \log_{10} (d / 1000) + 20 \log_{10} (f) \tag{11}$$

حيث:

d: طول المسير (m)

f: التردد (MHz).

يصف التعبير L_{rts} اقتران الموجة المنتشرة على طول المسير بتأثير الحجب المتعدد في الشارع الذي تكون فيه المحطة المتنقلة. وهو يراعي عرض الشارع واتجاه محوره.

$$L_{rts} = -8.2 - 10 \log_{10} (w) + 10 \log_{10} (f) + 20 \log_{10} (\Delta h_m) + L_{ori} \tag{12}$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & \text{for} \quad 0° \le \varphi < 35° \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) & \text{for} \quad 35° \le \varphi < 55° \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 55) & \text{for} \quad 55° \le \varphi \le 90° \end{cases} \tag{13}$$

حيث:

$$\Delta h_m = h_r - h_m \tag{14}$$

أما L_{ori} فهو عامل تصحيح اتجاه محور الشارع الذي يراعي تأثير الانعراج بين السطوح والشارع في الشوارع غير المتعامدة باتجاه الانتشار (انظر الشكل (2).

ويعتمد التوهين بالانعراج بسبب الحجب المتعدد من المحطة القاعدة الناتج عن الانتشار عبر صفوف المباني على الارتفاع النسبي لهوائي المحطة القاعدة بالنسبة إلى ارتفاع المباني وعلى زاوية الورود. ومعيار الورود التماسي هو معيار "مسافة الاستقرار" d_s:

$$d_s = \frac{\lambda d^2}{\Delta h_b^2} \tag{15}$$

حيث (انظر الشكل (2):

$$\Delta h_b = h_b - h_r \tag{16}$$

ولحساب L_{msd} تقارن d_s بالمسافة l التي تغطيها المباني. ويستعمل حساب L_{msd} الإجراء التالي لإزالة أي انقطاع بين مختلف النماذج المستعملة عندما يكون طول المباني أكبر أو أقل من "مسافة الاستقرار".

وتحسب الخسارة الإجمالية لنموذج انعراج الحجب المتعدد بالمعادلة:

$$L_{msd} = \begin{cases} -\tanh\left(\frac{\log(d)-\log(d_{bp})}{\chi}\right)\cdot(L1_{msd}(d)-L_{mid})+L_{mid} & \text{for } l > d_s \text{ and } dh_{bp} > 0 \\ \tanh\left(\frac{\log(d)-\log(d_{bp})}{\chi}\right)\cdot(L2_{msd}(d)-L_{mid})+L_{mid} & \text{for } l \le d_s \text{ and } dh_{bp} > 0 \\ L2_{msd}(d) & \text{for } dh_{bp} = 0 \\ L1_{msd}(d)-\tanh\left(\frac{\log(d)-\log(d_{bp})}{\zeta}\right)\cdot(L_{upp}-L_{mid})-L_{upp}+L_{mid} & \text{for } l > d_s \text{ and } dh_{bp} < 0 \\ L2_{msd}(d)+\tanh\left(\frac{\log(d)-\log(d_{bp})}{\zeta}\right)\cdot(L_{mid}-L_{low})+L_{mid}-L_{low} & \text{for } l \le d_s \text{ and } dh_{bp} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

حيث:

$$dh_{bp} = L_{upp} - L_{low} \quad (18)$$

$$\zeta = (L_{upp} - L_{low})\cdot\upsilon \quad (19)$$

$$L_{mid} = \frac{(L_{upp} + L_{low})}{2} \quad (20)$$

$$L_{upp} = L1_{msd}(d_{bp}) \quad (21)$$

$$L_{low} = L2_{msd}(d_{bp}) \quad (22)$$

و

$$d_{bp} = |\Delta h_b|\sqrt{\frac{l}{\lambda}} \quad (23)$$

υ = [0.0417]

χ = [0.1]

حيث تحدد خسارة كل من النموذجين $L1_{msd}(d)$ و$L2_{msd}(d)$ كما يلي:

حساب $L1_{msd}$ من أجل $l > d_s$

(يلاحظ أن هذا الحساب أكثر دقة عندما تكون $l \gg d_s$.)

$$L1_{msd}(d) = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d/1000) + k_f \log_{10}(f) - 9\log_{10}(b) \quad (24)$$

حيث:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18\log_{10}(1+\Delta h_b) & \text{for } h_b > h_r \\ 0 & \text{for } h_b \le h_r \end{cases} \quad (25)$$

مصطلح خسارة يعتمد على ارتفاع المحطة القاعدة:

$$k_a = \begin{cases} 71.4 & \text{for } h_b > h_r \text{ and } f > 2000\,\text{MHz} \\ 73 - 0.8\Delta h_b & \text{for } h_b \le h_r,\ f > 2000\,\text{MHz} \text{ and } d \ge 500\,\text{m} \\ 73 - 1.6\Delta h_b\, d/1000 & \text{for } h_b \le h_r,\ f > 2000\,\text{MHz} \text{ and } d < 500\,\text{m} \\ 54 & \text{for } h_b > h_r \text{ and } f \le 2000\,\text{MHz} \\ 54 - 0.8\Delta h_b & \text{for } h_b \le h_r,\ f \le 2000\,\text{MHz} \text{ and } d \ge 500\,\text{m} \\ 54 - 1.6\Delta h_b\, d/1000 & \text{for } h_b \le h_r,\ f \le 2000\,\text{MHz} \text{ and } d < 500\,\text{m} \end{cases} \tag{26}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{for } h_b > h_r \\ 18 - 15\dfrac{\Delta h_b}{h_r} & \text{for } h_b \le h_r \end{cases} \tag{27}$$

$$k_f = \begin{cases} -8 & \text{for } f > 2000\,\text{MHz} \\ -4 + 0.7(f/925 - 1) & \text{للمدن متوسطة الحجم والمراكز شبه الحضرية التي تكون فيها} \\ & \text{كثافة الأشجار متوسطة و} f \ge 2000\,\text{MHz} \\ -4 + 1.5(f/925 - 1) & \text{للمراكز الحضارية و} f \ge 2000\,\text{MHz} \end{cases} \tag{28}$$

حساب $L2_{msd}$ عندما $l < d_s$

في هذه الحالة لا بد من تمييز آخر وفقاً للارتفاعات النسبية للمحطة القاعدة وأسطح المباني:

$$L2_{msd}(d) = -10\log_{10}\left(Q_M^2\right) \tag{29}$$

حيث:

$$Q_M = \begin{cases} 2.35\left(\dfrac{\Delta h_b}{d}\sqrt{\dfrac{b}{\lambda}}\right)^{0.9} & \text{for } h_b > h_r + \delta h_u \\ \dfrac{b}{d} & \text{for } h_b \le h_r + \delta h_u \text{ and } h_b \ge h_r + \delta h_l \\ \dfrac{b}{2\pi d}\sqrt{\dfrac{\lambda}{\rho}}\left(\dfrac{1}{\theta} - \dfrac{1}{2\pi + \theta}\right) & \text{for } h_b < h_r + \delta h_l \end{cases} \tag{30}$$

و

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta h_b}{b}\right) \tag{31}$$

$$\rho = \sqrt{\Delta h_b^2 + b^2} \tag{32}$$

و

$$\delta h_u = 10^{-\log\left(\sqrt{\frac{b}{\lambda}}\right) - \frac{\log(d)}{9} + \frac{10}{9}\log\left(\frac{b}{2.35}\right)} \tag{33}$$

$$\delta h_l = \frac{0.00023b^2 - 0.1827b - 9.4978}{(\log(f))^{2.938}} + 0.000781b + 0.06923 \tag{34}$$

2.2.4 انتشار فوق أسطح المباني في منطقة شبه حضرية

يبيِّن الشكل 2 نموذج انتشار لحالة خلاف خط البصر NLoS1 على أساس بصريات هندسية. وهو يبين أن تكون الموجات الواردة عند المحطة المتنقلة تتغيَّر تبعاً للمسافة بين المحطة القاعدة (BS) والمحطة المتنقلة (MS). ولا يمكن لموجة مباشرة أن تصل المحطة MS إلا عندما تكون المسافة MS-BS قصيرة جداً. والموجات المنعكسة عدة مرات (مرة أو مرتان أو ثلاث مرات)، والتي تتمتع بسوية قوية نسبياً، يمكنها أن تصل إلى المحطة MS عندما تكون المسافة الفاصلة MS-BS قصيرة نسبياً. وعندما تكون المسافة MS-BS طويلة لا يمكن للموجات المنعكسة عدة مرات أن تصل، ولا تصل إلى المحطة MS سوى الموجات المنعكسة عدة مرات، والتي لها سوية ضعيفة إلى جانب سوية الموجات المنعرجة من أسطح المباني. وعلى أساس آليات الانتشار هذه، يمكن تقسيم الخسارة الناجمة عن المسافة بين الهوائيات المتناحية إلى ثلاث مناطق من حيث هيمنة الموجات الواردة إلى المحطة المتنقلة (MS). وهي المناطق التي تهيمن عليها الموجة المباشرة والموجة المنعكسة والموجة المنعرجة. ويعبر عن الخسارة في كل من هذه المناطق كما يلي اعتماداً على البصريات الهندسية.

(35)
$$L_{NLoS1} = \begin{cases} 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) & \text{for} \quad d < d_0 \quad \text{(منطقة تهيمن عليها موجات مباشرة)} \\ L_{0n} & \text{for} \quad d_0 < d \le d_n \quad \text{(منطقة تهيمن عليها موجات منعكسة)} \\ 32.1 \cdot \log\left(\frac{d}{d_n}\right) + L_{d_n} & \text{for} \quad d > d_n \quad \text{(D منطقة تهيمن عليها موجات منعرجة)} \end{cases}$$

$$n = \begin{cases} 2 & (0.8 \text{ GHz} \le f < 5 \text{ GHz}) \\ 3 & (5 \text{ GHz} \le f < 20 \text{ GHz}) \end{cases}$$

حيث:

(36)
$$L_{0n} = \begin{cases} \text{when } d_k < d \le d_{k+1} \quad (k = 0, \cdots, n-1) & n = \begin{cases} 2 & (0.8\,\text{GHz} \le f < 5\,\text{GHz}) \\ 3 & (5\,\text{GHz} \le f < 20\,\text{GHz}) \end{cases} \\ L_{d_k} + \frac{L_{d_{k+1}} - L_{d_k}}{d_{k+1} - d_k} \cdot (d - d_k) \end{cases}$$

(37)
$$d_k = \frac{1}{\sin\varphi} \cdot \sqrt{B_k{}^2 + (h_b - h_m)^2}$$

(38)
$$L_{d_k} = 20 \cdot \log\left\{\frac{4\pi d_{kp}}{0.4^k \cdot \lambda}\right\}$$

(39)
$$d_{kp} = \frac{1}{\sin\varphi_k} \cdot \sqrt{A_k{}^2 + (h_b - h_m)^2}$$

(40)
$$A_k = \frac{w \cdot (h_b - h_m) \cdot (2k+1)}{2 \cdot (h_r - h_m)}$$

(41)
$$B_k = \frac{w \cdot (h_b - h_m) \cdot (2k+1)}{2 \cdot (h_r - h_m)} - k \cdot w$$

$$\varphi_k = \tan^{-1}\left(\frac{B_k}{A_k}\cdot\tan\varphi\right) \tag{42}$$

3.2.4 الانتشار داخل أخاديد الشوارع لمدى الترددات من 800 إلى 000 2 MHz

بالنسبة إلى الحالات NLoS2 حيث يكون الهوائيان دون مستوى السطوح، يجب مراعاة الموجات المنعرجة والمنعكسة عند زوايا تقاطع الشوارع (انظر الشكل 3).

$$L_{NLoS2} = {}'_2 - 10\log_{10}\left(10^{-L_r/10} + 10^{-L_d/10}\right) \quad \text{dB} \tag{43}$$

حيث:

L_r : تحدد خسارة مسير الانعكاس بالمعادلة

$$L_r = 20\log_{10}(x_1 + x_2) + x_1 x_2 \frac{f(\alpha)}{w_1 w_2} + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \quad \text{dB} \tag{44}$$

حيث:

$$f(\alpha) = \frac{3.86}{\alpha^{3.5}} \quad \text{dB} \tag{45}$$

حيث $0{,}6 < \alpha\ [\text{rad}] < \pi$

L_d : تحدد خسارة مسير الانعراج بالمعادلة

$$L_d = 10\log_{10}[x_1 x_2 (x_1 + x_2)] + 2D_a - 0.1\left(90 - \alpha\frac{180}{\pi}\right) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \quad \text{dB} \tag{46}$$

$$D_a = \left(\frac{40}{2\pi}\right)\left[\arctan\left(\frac{x_2}{w_2}\right) + \arctan\left(\frac{x_1}{w_1}\right) - \frac{\pi}{2}\right] \quad \text{dB} \tag{47}$$

4.2.4 الانتشار داخل أخاديد الشوارع لمدى الترددات من 2 إلى 16 GHz

يجري اشتقاق نموذج الانتشار من أجل حالات NLoS2 كما جاء وصفها في الفقرة 2.1.3. عندما تكون زاوية المنعطف $\alpha = \pi/2$ على أساس القياسات في مدى تردد من 2 إلى 16 GHz حيث $h_r > h_b$ وw_2 تصل حتى 10 أمتار (أو رصيف الطريق). ويمكن تقسيم خصائص الخسارة بسبب المسير إلى القسمين: منطقة خسارة المنعطف ومنطقة خسارة NLoS. وتمتد منطقة خسارة المنعطف لمسافة d_{corner} من النقطة دون حافة شارع LoS بمقدار متر واحد داخل شارع NLoS. ويعبّر عن خسارة المنعطف (L_{corner}) بوصفها التوهين الإضافي على امتداد المسافة d_{corner}. وتقع منطقة NLoS بعد منطقة خسارة المنعطف، حيث ينطبق معامل معلمة (β). ويبدو هذا في شكل منحنى نموذجي في الشكل 4. ولدى استعمال x_1 وx_2 وw_1، كما يبدو في الشكل 3، يحتسب فقدان المسير الإجمالي (L_{NLoS2}) بعد منطقة المنعطف ($x_2 > w_1/2+1$) كما يلي:

$$L_{NLoS2} = L_{LoS} + L_c + L_{att}, \tag{48}$$

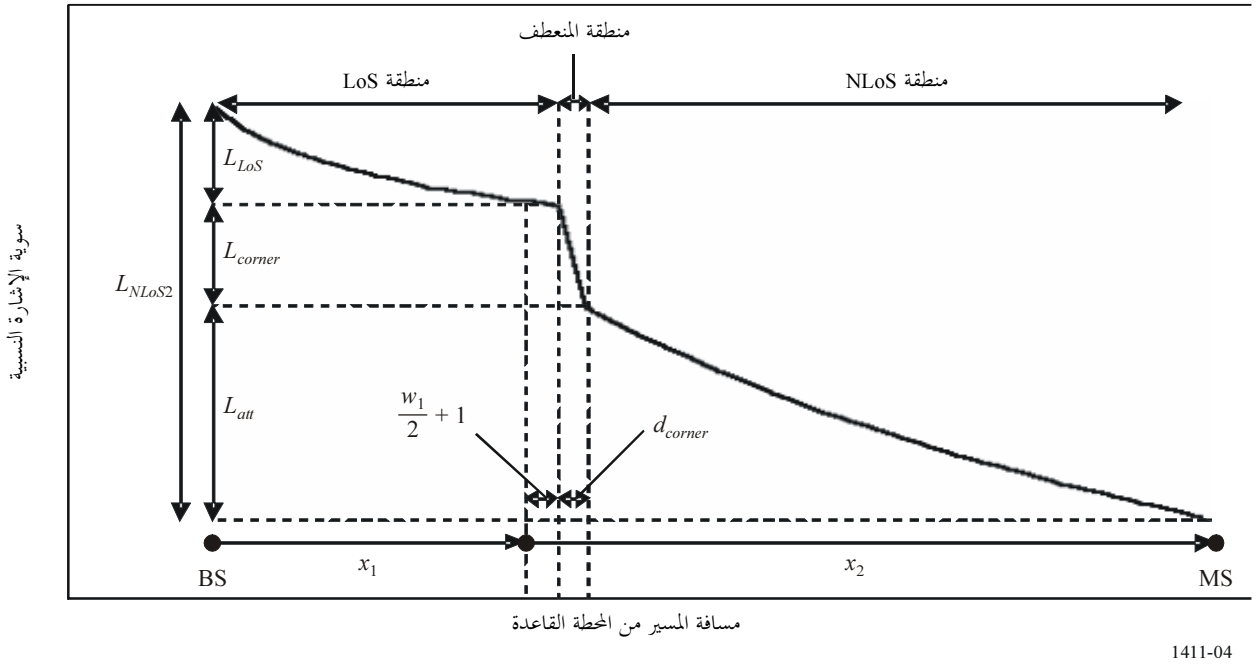
$$L_c = \begin{cases} \dfrac{L_{corner}}{1-\log_{10}(1+d_{corner})}\{1-\log_{10}(x_2 - w_1/2)\} & x_2 \le w_1/2+1+d_{corner} \\ L_{corner} & x_2 > w_1/2+1+d_{corner} \end{cases} \tag{49}$$

$$L_{att} = \begin{cases} 10\beta\log_{10}\left(\dfrac{x_1+x_2}{x_1+w_1/2+d_{corner}}\right) & x_2 > w_1/2+1+d_{corner} \\ 0 & x_2 \le w_1/2+1+d_{corner} \end{cases} \tag{50}$$

حيث L_{LoS} خسارة المسير في الشارع LoS عندما تكون x_1 (< 20 m) كما جرى حسابها في الفقرة 1.4. وفي المعادلة (4a) تعطى L_{corner} على أنها 20 dB في بيئة حضرية و30 dB في بيئة سكنية. وفي المعادلة (50) تعطى β على أنها 6 وd_{corner} على أنها 30 m في كلتا البيئتين.

الشكل 4

الاتجاه النموذجي للانتشار في أخاديد الشوارع عندما تكون المحطة القاعدة منخفضة ولمدى تردد من 2 إلى 16 GHz



وفي البيئة السكنية، لا تزداد خسارة المسير على نفس الوتيرة بازدياد المسافة، ولذا قد تكون معلَمة المعامل أدنى من قيمتها في البيئة الحضرية نظراً لوجود الأزقة والثغرات بين المنازل.

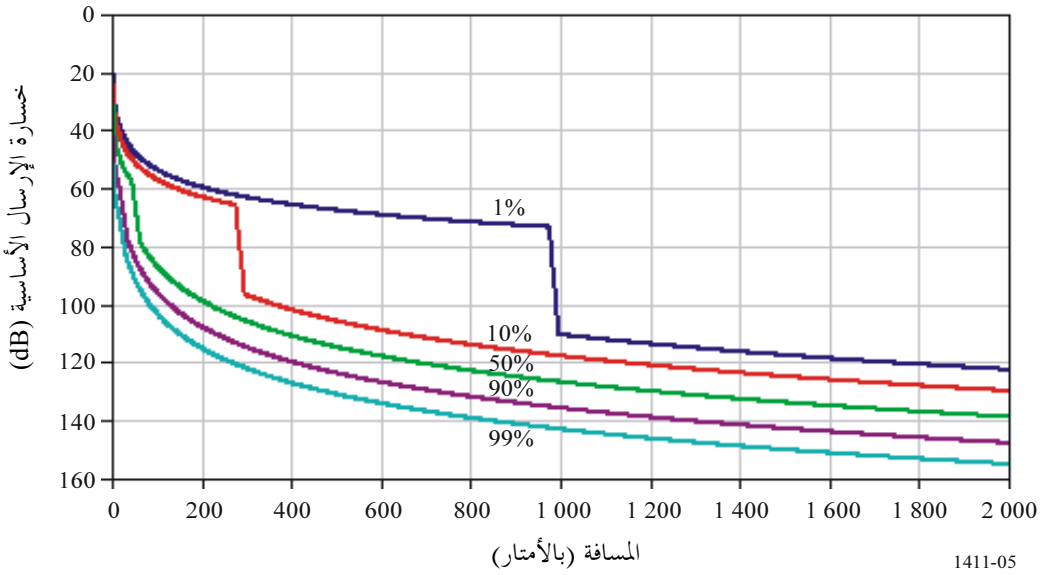
وعندما يكون هوائي المحطة القاعدة مرتفعاً في خلية كبرية صغيرة تكون آثار الانعراج فوق أسطح المباني أكبر. ومن ثم، فإن خصائص الانتشار لا تتوقف على خسارة الانعطاف.

3.4 الانتشار بين المطاريف الواقعة بين ارتفاع أسطح المباني في الترددات المترية (UHF)

يرمى النموذج الموصوف أدناه إلى حساب خسارة الإرسال الأساسية بين مطرافين على ارتفاع منخفض في بيئات حضرية. وهو يشمل مناطق خط البصر (LoS) وخلاف خط البصر (NLoS) على السواء، ويرسم التناقص السريع في سوية الإشارة الملحوظ عند المنعطف بين منطقتي LoS وNLoS. ويحتوي النموذج على إحصاءات عن تغاير الموقع في المنطقتين ويعطي نموذجاً إحصائياً لمسافة الانعطاف بين المنطقتين. ويبيِّن الشكل 5 مناطق كل من LoS وNLoS والانعطاف كما يبيِّن التغاير الإحصائي الذي يتنبأ به النموذج.

الشكل 5

منحنيات خسارة الإرسال الأساسية التي لا يتم تجاوزها بالنسبة إلى 1 و10 و50 و90 و99% من المواقع (التردد = 400 MHz، منطقة شبه حضرية)



يوصى بهذا النموذج من أجل الانتشار بين المطاريف منخفضة الارتفاع حيث يكون ارتفاع هوائي كلا المطرافين قريب من سوية الشارع وأخفض كثيراً من ارتفاع أسطح المباني، ولكنها غير محددة خلاف ذلك. وهو نموذج متبادل بالنسبة للمرسِل والمستقبِل كما أنه صالح للترددات في مدى 300-3 000 MHz. ويعتمد النموذج على قياسات أجريت في نطاق الموجات المترية (UHF) وارتفاع هوائيات يتراوح بين 1,9 و3,0 أمتار فوق الأرض ومسافات مرسِل–مستقبِل تصل حتى 3 000 متر.

والمعلَمات المطلوبة هي التردد f (MHz) والمسافة d بين المطرافين (بالأمتار).

الخطوة 1: تحسب القيمة المتوسطة لخسارة خط البصر:

$$L_{LoS}^{median}(d)=32.45+20\log_{10} f+20\log_{10}(d/1000) \quad (51)$$

الخطوة 2: يحسب تصويب موقع LoS من أجل النسبة المئوية المطلوبة للموقع p (%):

$$\Delta L_{LoS}(p)=1.5624\sigma\left(\sqrt{-2\ln(1-p/100)}-1.1774\right) \quad (52)$$

عند σ = 7 dB،

ويمكن بدلاً من ذلك استعمال قيم تصويب LoS من أجل p = 1 و10 و50 و90 و99% الواردة في الجدول 6.

الخطوة 3: يضاف تصويب موقع LoS إزالة قيمة متوسط خسارة LoS:

$$L_{LoS}(d,p)=L_{LoS}^{median}(d)+\Delta L_{LoS}(p) \quad (53)$$

الخطوة 4: تحسب القيمة المتوسطة لخسارة NLoS:

$$L_{NLoS}^{median}(d)=9.5+45\log_{10} f+40\log_{10}(d/1000)+L_{urban} \quad (54)$$

تتوقف قيمة L_{urban} على الفئة الحضرية وتكون 0 dB لمنطقة شبه حضرية و6,8 dB لمنطقة حضرية و2,3 dB لمنطقة حضرية كثيفة بالمباني العالية.

الخطوة 5: يضاف تصويب موقع NLoS لنسبة المواقع المطلوبة p (%):

$$\Delta L_{NLoS}(p) = \sigma N^{-1}(p/100) \text{ dB}، \text{ عند } \sigma = 7 \quad (55)$$

$N^{-1}(.)$ هي مقلوب دالة التوزيع التراكمي الاعتيادي. وثمة تقريب لهذه الدالة، يصلح لقيمة p بين 1 و99%، يعطى بموجب دالة تغاير الموقع $Q_i(x)$ في التوصية ITU-R P.1546. ويمكن بدلاً من ذلك استعمال قيم تصويب LoS من أجل p = 1 و10 و50 و90 و99% الواردة في الجدول 6.

الخطوة 6: يضاف تصويب موقع NLoS إزاء قيمة متوسط خسارة NLoS:

$$L_{NLoS}(d,p) = L_{NLoS}^{median}(d) + \Delta L_{NLoS}(p) \quad (56)$$

الخطوة 7: تحسب المسافة d_{LoS}، حيث يكون كسر LoS، F_{LoS}، مساوياً p، من أجل النسبة المئوية المطلوبة للموقع p (%):

$$d_{LoS}(p) = 212[\log_{10}(p/100)]^2 - 64\log_{10}(p/100) \quad \text{إذا كانت } p < 45$$
$$d_{LoS}(p) = 79.2 - 70(p/100) \quad \text{خلاف ذلك} \quad (57)$$

وقيمة d_{LoS} مقابل p = 1 و10 و50 و90 و99% واردة في الجدول 6. ولم يتم اختبار هذا النموذج عندما p < 0,1%. وقد حُصل على الإحصاءات من مدينتين في المملكة المتحدة وقد تختلف في بلدان أخرى. وبديلاً لذلك، إذا عرفت مسافة المنعطف في حالة معينة عندئذ توضع القيمة $d_{LoS}(p)$ إزاء هذه المسافة.

الخطوة 8: عندها تكون خسارة المسير عند المسافة d كما يلي:

أ) إذا كانت $d_{LoS} > d$، عندئذ $L_{LoS}(d, p) = L(d, p)$

ب) إذا كانت $w + d_{LoS} < d$، عندئذ $L_{NLoS}(d, p) = L(d, p)$

ج) خلاف ذلك يجري الاستكمال الداخلي خطياً بين قيمتين $L_{LoS}(d_{LoS}, p)$ و$L_{NLoS}(d_{LoS} + w, p)$ كما يلي:

$$L_{LoS} = L_{LoS}(d_{LoS}, p)$$
$$L_{NLoS} = L_{NLoS}(d_{LoS} + w, p)$$
$$L(d,p) = L_{LoS} + (L_{NLoS} - L_{LoS})(d - d_{LoS})/w$$

وقد أدخلت قيمة العرض w لتوفير منطقة انتقالية بين LoS وNLoS. وتبدو المنطقة الانتقالية هذه في البيانات وتكون قيمتها عموماً w = 20 m.

الجدول 6

تصويبات تغاير مواقع LoS وNLoS

p (%)	ΔL_{LoS} (dB)	ΔL_{NLoS} (dB)	d_{LoS} (m)
1	11,3–	16,3–	976
10	7,9–	9,0–	276
50	0,0	0,0	44
90	10,6	9,0	16
99	20,3	16,3	10

4.4 معلمات بالتغيب تستعمل لإجراء الحسابات المتعلقة بأي موقع عموماً

إذا كانت المعطيات المتعلقة بهيكل المباني والشوارع غير معروفة (الحالات المتصلة بأي موقع عموماً)، يوصى باستعمال القيم التالية بالتغيب:

h_r = 3 × (عدد الطوابق) + ارتفاع السطح (m)

ارتفاع السطح = 3 m للسطوح المائلة

= 0 m للسطوح المنبسطة

w = $b/2$

b = 20 إلى 50 m

φ = 90°.

5.4 تأثير الغطاء النباتي

لتأثيرات الانتشار من خلال الغطاء النباتي (الأشجار أساساً) أهمية في عملية التنبؤ بالانتشار عبر مسيرات قصيرة خارج المباني. ويمكن تحديد آليتين أساسيتين للانتشار:

- الانتشار عبر الأشجار (لا من حولها ولا من فوقها)؛
- الانتشار فوق الأشجار.

تسود الآلية الأولى عندما يكون الهوائيان دون قمة الأشجار وتكون المسافة عبر الأشجار قصيرة؛ بينما تغلب الآلية الثانية عندما يكون أحد الهوائيين أعلى من قمة الأشجار. ويتأثر التوهين بشدة بالانتشار عبر عدة مسيرات الناتج عن انعراج طاقة الإشارة فوق الأشجار وعبرها على حد سواء. وفيما يتعلق بالانتشار عبر الأشجار، فإن ظاهرة التوهين النوعي بسبب الغطاء النباتي ورد بحثها في التوصية ITU-R P.833. وعندما يتم الانتشار فوق الأشجار يكون الانعراج الأسلوب الرئيسي للانتشار فوق حواف الأشجار القريبة من الهوائي المنخفض. ويمكن نمذجة أسلوب الانتشار هذا ببساطة باستعمال نموذج مثالي للانعراج على حد السكين (انظر التوصية ITU-R P.526)، على الرغم من أن هذا النموذج قد ينتقص من قدرة المجال لأنه يهمل تأثير الانتشار المتعدد بسبب قمم الأشجار وهو آلية يمكن نمذجتها بنظرية النقل الإشعاعي.

5 خسارة اختراق المباني

خسارة اختراق المباني هي زيادة الخسارة بسبب جدران المباني (بما في ذلك النوافذ وعناصر أخرى). وتعرف هذه الخسارة على أنها الفرق بين سويات الإشارات خارج المباني وداخلها عند الارتفاع ذاته. ويجب كذلك مراعاة زاوية الورود. (عندما يكون طول المسير أقل من حوالي 10 أمتار، يجب مراعاة فرق التوهين في الفضاء الحر الناتج عن تغير طول المسير بين القياسين لدى تحديد خسارة اختراق المباني. أما بالنسبة إلى الهوائيات الواقعة على مقربة من الجدران فقد يكون من الضروري أيضاً دراسة تأثيرات المجال القريب.) وتحدث خسائر إضافية عندما تنفذ الإشارة إلى داخل المبنى (انظر التوصية ITU-R P.1238). وبصورة عامة، يكون أسلوب الانتشار المهيمن هو الأسلوب الذي تدخل فيه الإشارات إلى المبنى بشكل أفقي تقريباً عبر واجهة المبنى (وكذلك عبر النوافذ)، وفي حالة البناء المتجانس لا ترتبط خسارة الاختراق بعامل الارتفاع.

ويجب مراعاة خسارة الاختراق عند تقييم التغطية الراديوية من نظام خارج المبنى إلى مطراف في داخله. وهذه الخسارة مهمة أيضاً لدراسة مشاكل التداخل بين الأنظمة خارج المباني وداخلها.

والنتائج التجريبية في الجدول 7 مستخلصة عند تردد 5,2 GHz عبر جدار مبنى مكون من الآجر والخرسانة وله نوافذ زجاجية، ويبلغ سمك الجدار 60 cm وتبلغ نسبة النوافذ إلى الجدران حوالي 2 إلى 1.

الجدول 7

مثال لخسارة اختراق المباني

التردد	مبانٍ سكنية		مكاتب		مبانٍ تجارية	
	خسارة متوسطة	انحراف معياري	خسارة متوسطة	انحراف معياري	خسارة متوسطة	انحراف معياري
GHz 5,2			dB 12	dB 5		

يعطي الجدول 8 نتائج القياسات التي أجريت عند تردد GHz 5,2 عبر جدار خارجي مكون من لبنات من الحجر وعند زوايا ورود تتراوح بين 0° و75°. ويبلغ سمك الجدار mm 400 ويتألف من طبقتين سماكة كل منهما mm 100 تفصل بينهما حشية سائبة. وفيما يتعلق بزوايا ورود أكبر على وجه التحديد كانت الخسارة بسبب الجدار بالغة الحساسية إزاء موقع المستقبل كما يظهر جلياً من الانحراف المعياري الكبير.

الجدول 8

خسارة بسبب جدار مكون من لبنات من الحجر عند زوايا ورود مختلفة

زاوية الورود (بالدرجات)	0	15	30	45	60	75
خسارة بسبب الجدار (dB)	28	32	32	38	45	50
انحراف معياري (dB)	4	3	3	5	6	5

يمكن الحصول على معلومات إضافية بشأن خسارة اختراق المباني، معدة أساساً للأنظمة الساتلية، في التوصية ITU-R P.679 وقد تكون هذه المعلومات ملائمة لتقييم اختراق المباني في حالة أنظمة الأرض.

6 نماذج تعدد المسيرات

تقدم التوصية ITU-R P.1407 وصفاً للانتشار عبر مسيرات متعددة وتعريفاً لبعض المصطلحات.

1.6 نماذج تعدد المسيرات لبيئة الأخاديد الحضرية

حددت خصائص تمديد وقت الانتشار عبر مسيرات متعددة في حالة الانتشار LoS في بيئة حضرية مرتفعة المباني في وجود خلايا صغرية وخلايا دقيقة لمناطق حضرية كثيفة (انظر الجدول 3) استناداً إلى المعطيات المقيسة عند ترددات تتراوح بين GHz 2,5 وGHz 15,75 ومسافات تتراوح بين 50 و400 m. وتتبع قيمة جذر متوسط التربيع لامتداد وقت الانتشار S عند المسافة d بالأمتار توزيعاً عادياً وتعطى القيمة المتوسطة بالصيغة التالية:

$$a_s = C_a d^{\gamma_a} \quad \text{ns} \tag{58}$$

ويعطى الانحراف المعياري بالصيغة التالية:

$$\sigma_s = C_\sigma d^{\gamma_\sigma} \quad \text{ns} \tag{59}$$

حيث تعتمد C_a وγ_a وC_σ وγ_σ على ارتفاع الهوائي وبيئة الانتشار. ويعطي الجدول 9 بعض القيم النموذجية للمعاملات فيما يتعلق بمسافات تتراوح بين 50 و400 m، وترتكز هذه القيم على القياسات التي أجريت في مناطق حضرية ومناطق سكنية.

الجدول 9

القيم النموذجية لمعاملات خصائص المسافة المتعلقة بقيمة جذر متوسط التربيع لامتداد وقت الانتشار

ظروف القياس				a_s		σ_s	
المنطقة	f (GHz)	h_b (m)	h_m (m)	C_a	γ_a	C_σ	γ_σ
حضرية	2,5	6,0	3,0	55	0,27	12	0,32
	15,75-3,35	4,0	2,7	23	0,26	5,5	0,35
			1,6	10	0,51	6,1	0,39
	8,45-3,35		0,5				
سكنية	3,35	4,0	2,7	2,1	0,53	0,54	0,77
	15,75-3,35		1,6	5,9	0,32	2,0	0,48

يكون الشكل المتوسط للمظهر الجانبي لوقت الانتشار، استناداً إلى المعطيات المقيسة عند 2,5 GHz، كالتالي:

$$P(t) = P_0 + 50\left(e^{-t/\tau} - 1\right) \quad \text{dB} \tag{60}$$

حيث:

P_0: قدرة الذروة

τ: عامل التناقص

وتقدر t بنانو ثانية (ns).

يمكن تقييم τ استناداً إلى المعطيات المقيسة فيما يتعلق بقيمة جذر متوسط التربيع لامتداد وقت الانتشار S، كالتالي:

$$\tau = 4\,S + 266 \quad \text{ns} \tag{61}$$

لا تكون العلاقة الخطية بين τ وS صالحة إلا في حالة الانتشار LoS.

وقد تم أيضاً تحديد الخصائص الآنية للمظهر الجانبي لوقت الانتشار انطلاقاً من نفس مجموعة المعطيات المقيسة. وتتبع الطاقة الواصلة خلال الأربعين نانوثانية الأولى توزيع رايس مع عامل K يتراوح بين 6 و9 dB، بينما تتبع الطاقة الواصلة بعد ذلك إما توزيع رايلي أو توزيع رايس مع عامل K لا يتجاوز حوالي 3 dB. (انظر التوصية ITU-R P.1057 لتعريف توزيعات الاحتمال).

2.6 نماذج تعدد المسيرات لبيئات الانتشار فوق السطوح

تم تحديد خصائص امتداد وقت الانتشار عبر مسيرات متعددة في حالتي LoS وNLoS في بيئة حضرية تتميز بمبان مرتفعة فيما يتعلق بخلايا "موسعة" (معرفة في الجدول 3) بالاستناد إلى المعطيات المقيسة عند 1920-1980 MHz و2110-2170 MHz باستخدام هوائيات شاملة الاتجاهات. وتعطى القيمة المتوسطة لجذر متوسط التربيع لامتداد وقت الانتشار S في هذه البيئة بالصيغة التالية:

$$S_u = \exp(A \cdot L + B) \quad \text{ns} \tag{62}$$

حيث A = 0,038 وB = 2,3 وتدل L على خسارة المسير (dB).

واستناداً إلى نفس مجموعة القياسات، قورنت قيم جذر متوسط التربيع لامتداد وقت الانتشار عند نطاقات التردد المختلفة (المتباعدة بقيمة 190 MHz) في كل موقع. وقد لوحظت في أكثر من 10% من المواقع فروق تزيد على 300 ns في جذر متوسط التربيع لامتداد وقت الانتشار وعتبة تبلغ 25 dB وفروق أكبر من 2 µs فيما يتعلق بفترة التأخر وعتبة تبلغ 15 dB.

واستخلصت من هذه القياسات توزيعات خصائص امتداد وقت الانتشار عبر عدة مسيرات عند النطاق GHz 5,2 في بيئة شبه حضرية وارتفاع هوائي المحطة القاعدة قدره m 20 وارتفاع هوائي المحطة المتنقلة قدره m 2,8. ويعرض الجدول 10 قيم جذر متوسط التربيع لامتداد وقت الانتشار عند النطاق GHz 5,2 في الحالتين اللتين يبلغ فيهما الاحتمال التراكمي 50% و95%.

الجدول 10

القيم النموذجية لجذر متوسط التربيع لامتداد وقت الانتشار*

ظروف القياس					جذر متوسط التربيع لامتداد وقت الانتشار (نانوثانية)	
المنطقة	التردد (GHz)	ارتفاع الهوائي		المدى (m)	%50	%95
		h_{BS} (m)	h_r (m)			
شبه حضرية	5,2	20	2,8	1 000-100	189	577

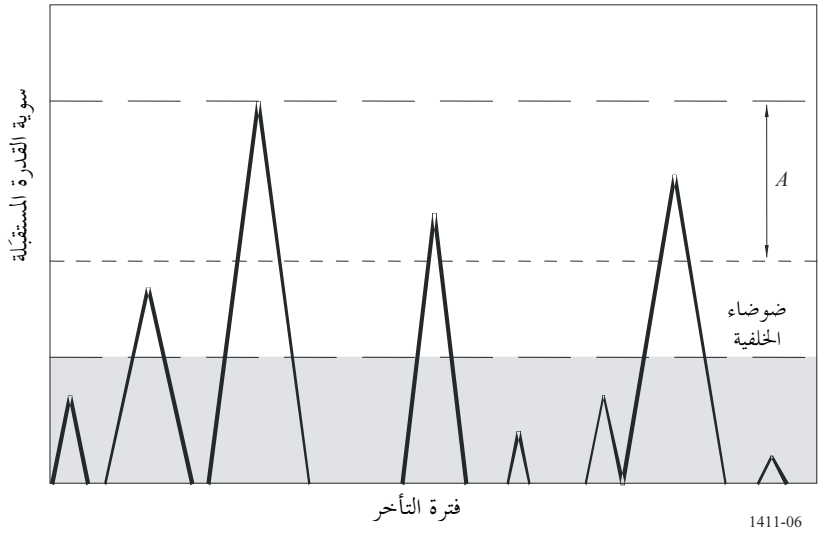
* استعملت القيمة العتبة البالغة dB 30 لحساب جذر متوسط التربيع لامتداد وقت الانتشار.

7 عدد مكونات الإشارة

يحتاج الأمر إلى تقييم عدد مكونات الإشارة (أي المكونة الرئيسية بالإضافة إلى المكونات متعددة المسيرات) الواردة إلى المستقبل وذلك عند تصميم أنظمة بمعدل معطيات مرتفع ترتكز على تقنيات الفصل والتركيب. وكما يتضح من الشكل 6، يمكن تمثيل عدد مكونات الإشارة انطلاقاً من المظهر الجانبي للتأخير باعتباره عدد الذرى التي يكون اتساعها ضمن A dB من أعلى ذروة وفوق سوية الضوضاء الخلفية.

الشكل 6

تعريف لتحديد عدد الذرى



يبيِّن الجدول 11 النتائج بشأن عدد مكونات الإشارة من قياسات أجريت في سيناريوهات مختلفة لارتفاعات هوائيات مختلفة في بيئات مختلفة ولترددات مختلفة.

الجدول 11

العدد الأقصى من مكونات الإشارة

العدد الأقصى من المكونات						المدى (m)	ارتفاع الهوائي (m)		التردد (GHz)	مدى الإمهال	نمط البيئة
10 dB		5 dB		3 dB			h_m	h_b			
95 %	80%	95%	80%	95%	80%						
4	2	2	1	2	1	1 600-100	1,7	46	2,1-1,9	ns 200	حضرية
4	2	2	1	2	1	1 500-200	1	12	2,5	ns 175	شبه حضرية
6	5	4	2	3	2	200-0	1,6	4	3,35	ns 20	حضرية
9	5	4	2	3	2	1 000-0					
13	3	3	2	2	2	590-150	2,7	55			
3	2	2	2	2	2	480-0	2,7	4	3,35	ns 20	سكنية
5	1	2	1	2	1	1 500-200	1	12	3,5	ns 175	شبه حضرية
5	3	3	1	2	1	5 000-0	2,7	40	3,67	ns 50	شبه حضرية
5	4	5	3	2	1	1 500-200	1	12	5,8	ns 100	شبه حضرية
6	4	3	2	3	1	200-0	1,6	4	8,45	ns 20	حضرية
8	4	4	2	2	1	1 000-0					
12	3	3	2	2	2	590-150	2,7	55			
5	4	3	2	3	1	200-0	1,6	4	15,75	ns 20	حضرية
10	6	4	2	3	2	1 000-0					

فيما يتعلق بالقياسات الموصوفة في الفقرة 2.6، ترد قيم نافذة فارق الإمهال بالنسبة لأقوى 4 مكونات إزاء أول مكوِّن واصل والاتساع النسبي لكل منها في الجدول 13.

الجدول 12

نمط البيئة	هوائي المحطة القاعدة	التردد (GHz)	ارتفاع الهوائي (m)		المدى m	العدد الأقصى لمكونات الإشارة					
			h_b	h_m		dB 3 = A		dB 5 = A		dB 10 = A	
						%80	%95	%80	%95	%80	%95
حضرية	منخفض	3,35	4	1,6	200-0	2	3	2	4	5	6
					1 000-0	2	3	2	4	5	9
حضرية	منخفض	8,45	4	1,6	200-0	1	3	2	3	4	6
					1 000-0	1	2	2	4	4	8
حضرية	منخفض	15,75	4	1,6	200-0	1	3	2	3	4	5
					1 000-0	2	3	2	4	6	10
حضرية	مرتفع	3,35	55	2,7	590-150	2	2	2	3	3	13
		8,45	55	2,7	590-150	2	2	2	3	3	12
سكنية	منخفض	3,35	4	2,7	480-0	2	2	2	2	2	3
شبه حضرية	مرتفع	3,67	40	2,7	5 000-0	1	2	1	3	3	5

الجدول 13

نافذة فارق الإمهال بالنسبة لأقوى 4 مكوِّنات إزاء أول مكوِّن واصل والاتساع النسبي لكل منها

نمط البيئة	استبانة التأخير الزمني	التردد (GHz)	ارتفاع الهوائي (m)		المدى (m)	التأخير الزمني الزائد (µs)							
			h_b	h_m		الأول		الثاني		الثالث		الرابع	
						%80	%95	%80	%95	%80	%95	%80	%95
حضرية	Ns 200	2,1-1,9	46	1,7	1 600-100	0,5	1,43	1,1	1,98	1,74	2,93	2,35	3,26
القدرة النسبية إزاء أقوى مكوِّن (dB)						0	0	7,3−	9−	8,5−	9,6−	9,1−	9,8−

8 خصائص الاستقطاب

يختلف تمييز الاستقطاب المتقاطع (XPD) كما جاء تعريفه في التوصية ITU-R P.310 بين منطقتي الانتشار LoS وNLoS في بيئة الخلايا الصغرية العاملة بالموجات السنتيمترية (SHF). وتبين القياسات قيمة متوسطة لتمييز الاستقطاب المتقاطع قدرها 13 dB للمسيرات LoS و8 dB للمسيرات NLoS وانحراف معياري قدره 3 dB للمسيرات LoS و2 dB للمسيرات NLoS في مدى الموجات السنتيمترية. وتتوافق هذه القيم المتوسطة مع قيم انتشار الموجات السنتيمترية في المناطق المكشوفة والمناطق الحضرية على التوالي الواردة في التوصية ITU-R P.1406.

9 خصائص اتجاه الوصول

حددت قيمة جذر متوسط التربيع الامتداد الزاوي المعرف في التوصية ITU-R P.1407 في اتجاه السمت في بيئة خلايا صغرية أو خلايا دقيقة في منطقة حضرية استناداً إلى القياسات التي أجريت عند تردد قدره 8,45 GHz. والمحطة القاعدة المستقبلة مجهزة بهوائي مكافئي بفتحة نصف القدرة للحزمة تبلغ 4°. وبلغ ارتفاع هوائي المحطة المتنقلة المرسلة 2,7 m وارتفاع هوائي المحطة القاعدة المستقبلة 4,4 m.

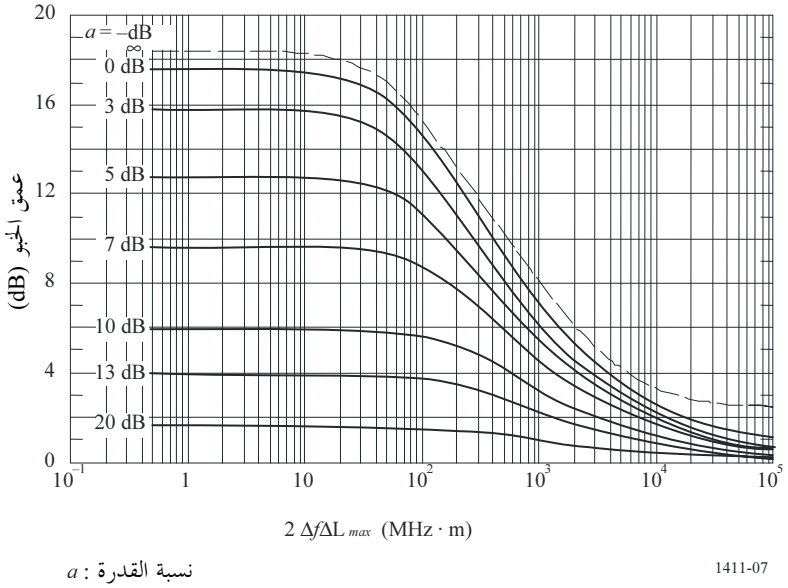
وتبلغ القيمة المتوسطة لجذر متوسط التربيع للامتداد الزاوي 30° (انحراف معياري قدره 11°) في حالة LoS و41° (انحراف معياري قدره 18°) في حالة NLoS.

10 خصائص الخبو

يُعبّر عن عمق الخبو، الذي يعرّف بالفرق بين القيمة 50% و القيمة 1% في الاحتمال التراكمي لسويات الإشارة المستقبَلة، بدلالة ناتج ($2\Delta f \Delta L_{max}$ MHz · m) عرض النطاق المستقبَل البالغ $2\Delta f$ MHz والفرق الأقصى في أطوال مسير الانتشار ΔL_{max} m كما هو موضح في الشكل 7. وتدل ΔL_{max} على الفرق الأقصى في أطوال مسير الانتشار بين المكونات التي تكون سويتها أعلى من العتبة التي تقل بمقدار 20 dB عن أعلى سوية للموجات غير المباشرة كما هو موضح في الشكل 8. وتدل a المعبر عنها بالدسيبل في هذا الشكل على نسبة قدرة الموجات المباشرة إلى مجموع الموجات غير المباشرة، وتمثل a = −∞ dB حالة انتشار خلاف خط البصر. وعندما تكون $2\Delta f \Delta L_{max}$ أدنى من 10 MHz · m، تتبع سويات الإشارة المستقبَلة في حالة الانتشار في خط البصر والانتشار خلاف خط البصر توزيع رايلي وتوزيع ناكاغامي–رايس المقابلين لمنطقة خبو نطاق ضيق. وعندما تكون أعلى من 10 MHz · m، تقابل منطقة خبو نطاق واسع، حيث يصبح عمق الخبو أقل ولا تتبع سويات الإشارة المستقبَلة لا توزيع رايلي ولا توزيع ناكاغامي–رايس.

الشكل 7

العلاقة بين عمق الخبو والقيمة $2\Delta f\Delta L_{max}$



نسبة القدرة : a

الشكل 8

نموذج حساب ΔL_{max}