التوصية ITU-R P.1238-4

معطيات الانتشار وطرائق التنبؤ لتخطيط أنظمة الاتصالات الراديوية العاملة داخل المباني وشبكات المنطقة المحلية الراديوية العاملة في مدى الترددات بين 900 MHz و100 GHz

(المسألة ITU-R 211/3)

(2005-2003-2001-1999-1997)

إن جمعية الاتصالات الراديوية التابعة للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن عدداً كبيراً من أنظمة الاتصالات الشخصية الجديدة قصيرة المدى (مدى التشغيل أقل من 1 km) يجري تطويرها حالياً بغرض العمل داخل المباني؛

ب) أن ثمة طلباً كبيراً على شبكات المنطقة المحلية الراديوية (RLANs) وبدالات الأعمال الخاصة اللاسلكية (WPBXs) مثلما يشهد بذلك تنوع المنتجات الموجودة وأنشطة البحوث المكثفة؛

ج) أن من المرغوب فيه وضع معايير خاصة بشبكات المنطقة المحلية الراديوية (RLAN) تكون متلائمة مع كل من الاتصالات اللاسلكية والسلكية؛

د) أن لأنظمة المدى القصير التي تستعمل قدرة منخفضة جداً فوائد عديدة في مجالي تقديم الخدمات المتنقلة وخدمات الاتصالات الشخصية؛

ه) أن من الأهمية بمكان معرفة خصائص الانتشار داخل المباني وظواهر التداخل المرتبطة بوجود عدة مستعملين في المنطقة نفسها وذلك لتحسين تصميم الأنظمة؛

و) أن ثمة حاجة إلى نماذج عامة (أي مستقلة عن الموقع) وإلى مشورة بغرض تخطيط الأنظمة الأولي، وتقييم التداخلات وإلى نماذج محددة (أو خاصة بالموقع) بهدف إعداد تقييمات مفصلة،

وإذ تلاحظ

أ) أن التوصية ITU-R P.1411 تضع مبادئ توجيهية بخصوص الانتشار قصير المدى، خارج المباني فيما يتعلق بمدى الترددات بين 300 MHz و100 GHz وأنه ينبغي الرجوع إليها في الحالات التي تنطبق فيها الشروط داخل المباني وخارجها على حد سواء،

توصي

1 باعتماد المعلومات والطرائق المحددة في الملحق 1 لتقييم خصائص الانتشار وأنظمة الاتصالات الراديوية العاملة داخل المباني في مدى الترددات بين 900 MHz و100 GHz.

الملحق 1

1 مقدمة

تختلف التنبؤات بالانتشار من بعض النواحي بحسب ما إذا كان الأمر يتعلق بالأنظمة الراديوية المعدة بغرض العمل داخل المباني، ويشار إليها هنا بالأنظمة الداخلية، أو بالأنظمة المعدة بغرض العمل خارج المباني، ويشار إليها هنا بالأنظمة الخارجية. وتتمثل أهداف الأنظمة الداخلية والأنظمة الخارجية في نهاية المطاف في ضمان تحسين تغطية المنطقة المستهدفة (أو موثوقية المسير في حالة الأنظمة من نقطة إلى نقطة) وتفادي حدوث التداخل داخل النظام ذاته أو مع الأنظمة الأخرى. إلا أن مدى التغطية،

في حالة الأنظمة الداخلية، يكون محدداً تحديداً جيداً بواسطة هندسة المبنى، وتؤثر حدود المبنى ذاته في ظواهر الانتشار. ولا يجري إعادة استعمال الترددات على طابق المبنى نفسه فحسب وإنما بين طوابق المبنى في غالب الأحيان، وهو ما يضيف بعداً ثالثاً إلى مسائل التداخل. وأخيراً، يمكن للتغيرات الطفيفة التي تحدث في البيئة المباشرة للمسير الراديوي، بالنسبة إلى مديات قصيرة جداً حيث تُستعمل على وجه الخصوص ترددات الموجات المليمترية، أن تؤثر بصورة بالغة في خصائص الانتشار.

ونظراً للطابع المعقد الذي تكتسيه هذه العوامل ينبغي عند البدء في تخطيط نظام راديوي داخلي معرفة الموقع المعني معرفة جيدة، أي من حيث الهندسة والمواد والأثاث والاستعمالات المتوقعة، إلخ. ولكن عند التخطيط الأولي للأنظمة، يجب تقدير عدد محطات القاعدة التي نحتاج إليها لتغطية المحطات المتنقلة الموزعة في المنطقة وتقييم التداخلات التي من المحتمل أن تتعرض لها الخدمات الأخرى أو التداخلات التي قد تحدث بين الأنظمة. ونحتاج في حالات التخطيط هذه إلى نماذج تعبر بصفة عامة عن خصائص الانتشار في البيئة. ويُفترض في الوقت نفسه ألا نكون في حاجة إلى كثير من المعلومات التي يدخلها المستعمل لإجراء الحسابات.

ويصف هذا الملحق بصفة رئيسية نماذج عامة (مستقلة عن الموقع) ويعطي دلالات نوعية عن الانحطاط الذي يرتبط بظواهر الانتشار التي تُلاحظ في حالة الأنظمة الداخلية. وسيتم عرض نماذج مكيفة مع الموقع كلما كان ذلك ممكناً. وفي كثير من الحالات تكون المعطيات المتيسرة التي يمكن الاستناد عليها لإعداد نماذج محدودة، سواء تعلق الأمر بنطاقات الترددات أو بظروف الاختبار ولسوف يزداد عدد المعلومات التي يشملها هذا الملحق عندما يتوفر المزيد من المعطيات. وبالمثل، ستزداد النماذج دقة باكتساب تجربة في مجال التطبيق، ولكن هذا الملحق يضم كل المعلومات المتيسرة حالياً.

2 انحطاطات الانتشار وقياسات النوعية المتعلقة بالأنظمة الراديوية الداخلية

تسبب الظواهر التالية بصفة رئيسية حالات انحطاط الانتشار في قناة راديوية داخلية:

- الانعكاس من الأشياء والانعراج حولها (بما في ذلك الجدران والأرضية) داخل الغرف؛
- خسارة الإرسال بواسطة الجدران والأرضيات والعوائق الأخرى؛
- ظواهر مسير ذي ترددات عالية، لا سيما في الأروقة؛
- حركة الأشخاص والأشياء في الغرفة، بما في ذلك حركة أحد طرفي الوصلة الراديوية أو كلاهما؛

وهي تؤدي إلى حالات انحطاط منها:

- خسارة المسير – ولا تقتصر على خسارة الفضاء الحر فحسب وإنما تشمل خسارة إضافية تنتج عن العوائق والإرسال عبر مواد البناء، والتخفيف المحتمل للخسارة في الفضاء الحر من جراء ظواهر المسير؛
- التغير الزمني والفضائي لخسارة المسير؛
- الانتشار بواسطة مسيرات متعددة تتأتى من المكونات المنعكسة والمنعرجة للموجة؛
- عدم مواءمة الاستقطاب بسبب التراصف العشوائي للمطاريف المتنقلة.

ويمكن وصف خدمات الاتصالات اللاسلكية الداخلية من خلال الخصائص التالية:

- معدل معطيات عالٍ/متوسط/منخفض؛
- منطقة التغطية الخاصة بكل محطة قاعدة (على سبيل المثال: غرفة، طابق، مبنى)
- متنقل/محمول/ثابت؛
- في وقت حقيقي/وقت غير حقيقي/وقت شبه حقيقي؛
- تشكيل الشبكة (من نقطة إلى نقطة، من نقطة إلى نقاط متعددة، من كل نقطة إلى كل نقطة).

ومن المفيد تعريف خصائص الانتشار الخاصة بقناة معينة تكون الأكثر ملاءمة لوصف نوعيتها بالنسبة إلى مختلف التطبيقات، مثل الاتصالات الهاتفية ونقل المعطيات بسرعات مختلفة ونقل الصور وخدمات الفيديو. ويحتوي الجدول 1 على قائمة بأهم الخصائص الرئيسية للخدمات النمطية.

الجدول 1

الخدمات النمطية وانحطاطات الانتشار

الخدمات	الخصائص	انحطاطات الانتشار ذات الأهمية
شبكة المنطقة المحلية اللاسلكية	معدل معطيات عالٍ، غرفة أو غرف عديدة، محمول، وقت غير حقيقي، من نقطة إلى نقاط متعددة أو من كل نقطة إلى كل نقطة	خسارة المسير – توزيع زمني وفضائي زمن الانتشار بمسيرات متعددة نسبة الإشارة المرغوب فيها إلى إشارة التداخل
بدالات الأعمال الخاصة اللاسلكية (WPBX)	معدل معطيات متوسط، غرف متعددة، طابق واحد أو عدة طوابق، وقت حقيقي، متنقل، من نقطة إلى نقاط متعددة	خسارة المسير – توزيع زمني وفضائي
استدعاء راديوي داخلي	معدل معطيات منخفض، طوابق متعددة، وقت غير حقيقي، متنقل، من نقطة إلى نقاط متعددة	خسارة المسير – توزيع زمني وفضائي
خدمات الفيديو اللاسلكية الراديوية الداخلية	معدل معطيات عالٍ، غرف متعددة، وقت حقيقي، متنقل أو محمول، من نقطة إلى نقطة	خسارة المسير – توزيع زمني وفضائي زمن الانتشار بمسيرات متعددة

3 نماذج خسارة المسير

يفترض استعمال هذا النموذج من خسارة الإرسال الداخلي أن المحطة القاعدة والمطراف المحمول يوجدان داخل المبنى نفسه. ويمكن استعمال نماذج عامة (مستقلة عن الموقع) أو نماذج مكيفة مع الموقع لتقدير نسبة خسارة المسير الراديوي الداخلي من المحطة القاعدة إلى متنقل/محمول.

1.3 نماذج عامة (مستقلة عن الموقع)

تعتبر النماذج التي يرد وصفها في الفقرة التالية نماذج عامة (مستقلة عن الموقع) لأنها لا تتطلب معلومات كثيرة تخص المسير أو الموقع. وتتكون خسارة المسير الراديوي في الداخل من خسارة للمسير وما يرتبط بها من قيم الخبو الناتج عن الحجب المصاحبة لها. وتراعي عدة نماذج من هذا القبيل توهين الإشارة المرتبطة بعبور عدة جدران و/أو طوابق. ويراعي النموذج الذي يرد وصفه في هذه الفقرة الخسارة المرتبطة بعبور عدة طوابق ويأخذ في الاعتبار بعض العناصر مثل إعادة استعمال الترددات بين الطوابق. وتحتوي معاملات خسارة القدرة بحسب المسافة المشار إليها أدناه على سماح ضمني يخص الإرسال عبر الجدران والعوائق وآليات خسارة أخرى غالباً ما نلاحظها على نفس طابق مبنى ما. وتقدم النماذج المكيفة مع الموقع عموماً إمكانية أن تؤخذ في الاعتبار صراحة الخسارة الفردية بالنسبة إلى كل حائط يعبره الإرسال بدلاً من قيمة إجمالية للخسارة بحسب المسافة.

ويأخذ النموذج الأساسي الشكل التالي:

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + L_f(n) - 28 \quad \text{dB} \tag{1}$$

حيث:

N: معامل خسارة القدرة بحسب المسافة

f: التردد (MHz)

d: مسافة الفصل (m) بين محطة القاعدة والمطراف المحمول (حيث $d > 1$ m)

L_f: معامل الخسارة الناتج عن اختراق ما بين الطوابق (dB)

n: عدد الطوابق بين محطة القاعدة والمطراف المحمول ($n \geq 1$).

ويحتوي الجدولان 2 و3 على قيم معلمات نمطية، تستند إلى نتائج قياسات متنوعة. وترد معلومات مكملة في آخر هذه الفقرة.

الجدول 2

معاملات خسارة القدرة، *N*، لحساب خسارة الإرسال في الداخل

التردد	المباني السكنية	المكاتب	المباني التجارية
MHz 900	–	33	20
GHz 1,3-1,2	–	32	22
GHz 2-1,8	28	30	22
GHz 4	–	28	22
GHz 5,2	–	31	–
[1]GHz 60	–	22	17
[1]GHz 70	–	22	–

[1] نفترض بالنسبة إلى القيمتين 60 GHz و70 GHz، أن انتشاراً داخل غرفة واحدة أو فضاء واحد ولا نأخذ في الحسبان أي تسامح فيما يتعلق بالإرسال عبر الجدران. والامتصاص بواسطة الغاز في حدود 60 GHz، بالنسبة إلى المسافات التي تفوق 100 m، عامل مهم يمكن أن يغير بشكل ملحوظ من مسافات إعادة استعمال الترددات (انظر التوصية ITU-R P.676).

الجدول 3

معاملات الخسارة الناتجة عن الاختراق بين الطوابق، L_f (dB)، عندما تكون *n* عدد الطوابق المخترقة، لحساب خسارة الإرسال في الداخل ($n \geq 1$)

التردد	المباني السكنية	المكاتب	المباني التجارية
MHz 900	–	9 (طابق واحد) 19 (طابقان اثنان) 24 (ثلاثة طوابق)	–
GHz 2-1,8	$4\,n$	$15 + 4\,(n - 1)$	$6 + 3\,(n - 1)$
GHz 5,2	–	16 (طابق واحد)	–

ويمكن أن نستعمل، بالنسبة إلى مختلف نطاقات الترددات وعندما لا يُشار إلى معامل خسارة القدرة للمباني السكنية، القيمة المعطاة للمكاتب.

وجدير بالملاحظة أن العزل الذي قد نلاحظه عند اختيار تشكيلة ذات عدة طوابق يمكن أن يكون محدوداً. إذ يمكن للإشارة أن تتخذ مسيرات خارجية أخرى للوصول إلى طرف الوصلة مع خسارة إجمالية أقل من خسارة الاختراق بين الطوابق.

وفي حالة استبعاد المسيرات الخارجية، تُبين بعض القياسات التي أجريت عند GHz 5,2 أن متوسط الخسارة الإضافية الناتجة عن أرضية نمطية مُعدة من الإسمنت المقوى مع سقف "زائف" معلق يساوي عادة القيمة dB 20، مع انحراف معياري قدره dB 1,5 وقد زادت أجهزة الإضاءة من متوسط الخسارة ليصل إلى dB 30 مع انحراف معياري قدره dB 3، وزادت كذلك قنوات التهوية الواقعة تحت الأرضية متوسط الخسارة ليبلغ dB 36، مع انحراف معياري قدره dB 5. وينبغي استعمال هذه القيم بدلاً من استعمال L_f في النماذج المكيفة مع الموقع، مثل نموذج مرسوم الأشعة.

وتتبع إحصائيات الخبو بالحجب في الداخل توزيع لوغاريتم عادي؛ ويحتوي الجدول 4 على قيم الانحراف المعياري (dB).

الجدول 4

إحصائيات الخبو بالحجب، الانحراف المعياري (dB)، لحساب خسارة الإرسال في الداخل

التردد (GHz)	المباني السكنية	المكاتب	المباني التجارية
2–1,8	8	10	10
5,2	–	12	–

ورغم أن القياسات المتيسرة قد أُجريت في ظل ظروف متنوعة، مما يجعل أية مقارنة مباشرة صعبة، ومع أن الإبلاغ اقتصر على معطيات بعض نطاقات التردد فقط، فيمكن لنا استخلاص بعض النتائج العامة، لا سيما فيما يتعلق بالنطاق 900-000 2 MHz.

- تكون الخسارة في الفضاء الحر، بالنسبة للمسيرات التي تقع جزئياً في خط البصر، كبيرة جداً ويناهز معامل خسارة القدرة بحسب المسافة حوالي 20.
- يقارب كذلك معامل خسارة القدرة بحسب المسافة بالنسبة للغرف المفتوحة الواسعة حوالي 20، وربما لأن معظم الفضاء في هذا النمط من الغرف يكون في خط البصر. ويمكن أن نذكر على سبيل المثال، الغرف الواقعة في مخازن كبيرة للبيع بالتجزئة وفي الملاعب والمصانع دون فواصل وفي المكاتب المفتوحة.
- تكون خسارة المسير في الأروقة أقل من الخسارة في الفضاء الحر، ويبلغ معامل خسارة القدرة بحسب المسافة حوالي 18. وتعتبر متاجر البقالية المستطيلة بمثابة أروقة.
- يزيد الانتشار بواسطة الحواجز والجدران بصفة كبيرة من الخسارة، وهو ما من شأنه أن يزيد من قيمة معامل خسارة القدرة بحسب المسافة لتصل إلى حوالي 40 في بيئة نمطية. ويمكن أن نذكر على سبيل المثال، المسيرات بين الغرف في المباني الإدارية التي تكون فيها المكاتب مغلقة.
- قد تحدث في المسيرات الطويلة المفتوحة نقطة قطع منطقة فرينل الأولى. وقد ينتقل عند هذه المسافة معامل خسارة القدرة بحسب المسافة من حوالي 20 إلى حوالي 40.
- لا يلاحظ دائماً اقتران ارتفاع التردد بضعف خسارة المعامل على المسير في حالة المكاتب (انظر الجدول 2) كما لا يمكن تفسيره بسهولة. فمن جهة أولى كلما ازداد التردد تزداد الخسارة الناجمة عن الحواجز (كالجدران والأثاث مثلاً) وتنخفض مساهمة الإشارات المنعرجة في القدرة المستقبلة، ومن جهة أخرى، كلما ازداد التردد يقل حجب منطقة فرينل وبالتالي تضعف الخسارة. وتخضع الخسارة الحقيقية للمسير إلى هذه الآليات المتعارضة.

2.3 النماذج المكيفة مع الموقع

النماذج المكيفة مع الموقع مفيدة أيضاً لتقييم خسارة المسير أو شدة المجال. وتوجد نماذج للتنبؤ بشدة المجال في الداخل وهي تستند إلى النظرية الموحدة للانعراج وإلى تقنيات مرسوم الأشعة. ومن الضروري توفر معلومات تفصيلية بشأن هيكل المبنى لحساب شدة المجال في الداخل. وتشتمل هذه النماذج على عناصر تجريبية وعلى نهج كهرمغنطيسي في إطار النظرية الموحدة للانعراج ويمكن التوسع في استخدام هذه الطريقة، التي تأخذ في الاعتبار الشعاع المباشر والأشعة الناتجة عن انعراج وحيد أو عن انعكاس وحيد، لتشمل الانعراج أو الانعكاس المتعدد وكذلك تركيبات من الأشعة المنعرجة والمنعكسة. ويسمح إدراج الأشعة المنعكسة والمنعرجة بالحصول على تنبؤ أكثر دقة بخسارة المسير.

4 نماذج تمديد وقت الانتشار

1.4 الانتشار عبر مسيرات متعددة

تختلف قناة الانتشار الراديوي المتنقلة/المحمولة بحسب الوقت والتردد والتنقل في الفضاء. ويمكن للقناة، حتى في حالة السكون وعندما يكون المرسل والمستقبل ثابتين، أن تكون دينامية بما أن عناصر أسباب الانتثار والانعكاس متحركة في غالب الأحيان. وترجع عبارة المسيرات المتعددة إلى أن الموجات الراديوية تستطيع، بواسطة الانعكاس والانعراج والانتثار، أن تسلك مسيرات متعددة للانتقال من مرسل ما إلى مستقبل ما. ويقترن وقت انتشار بكل واحد من هذه المسيرات ويكون هذا الوقت متناسباً مع طول المسير. (يمكن القيام بتقدير تقريبـــي لوقت الانتشار الأقصى الذي يمكن توقعه في بيئة معينة انطلاقاً من أبعاد الغرفة ومن كون الوقت (ns) الذي تستغرقه نبضة راديوية لقطع مسافة d (m) يساوي حوالي d 3,3.) وتكون هذه الإشارات المؤخرة واتساعها مرشاحاً خطياً ذا خصائص زمنية متغيرة.

2.4 الاستجابة النبضية

الهدف من نمذجة القنوات هو تقديم تمثيل رياضي دقيق عن انتشار الموجات الراديوية لاستخدامه في محاكاة الأنظمة والوصلات الراديوية بغرض نمذجة إنشاء الأنظمة. وبما أن القناة الراديوية خطية فهي توصف بشكل وافٍ بواسطة استجابتها النبضية. وعندما تعرف الاستجابة النبضية يمكن تحديد استجابة القناة الراديوية لأي معلمة دخل. وهذا هو أساس محاكاة أداء الوصلة.

ويُعبر عن الاستجابة النبضية عموماً بوصفها كثافة القدرة بدلالة التأخر بالنسبة إلى الإشارة الأولى التي يمكن الكشف عنها. وغالباً ما تُسمى هذه الوظيفة المظهر الجانبي لتأخر القدرة. ويحتوي الشكل 1 من التوصية ITU-R P.1407 على مثال على ذلك، ويكمن الفرق الوحيد في أن الوقت المشار إليه في الإحداثيات السينية للقنوات في الداخل يُعبر عنه بالنانوثانية وليس بالميكروثانية. وتحتوي هذه التوصية كذلك على تعريف لعدد من المعلمات التي تتميز بها المظاهر الجانبية للاستجابة النبضية.

وتختلف الاستجابة النبضية لقناة ما بحسب موقع المستقبل ويمكن أن تختلف كذلك بحسب الوقت. وهي تقاس عادة ويُبلغ عنها كمتوسط للمظاهر الجانبية المقيسة على طول موجة للتقليل من آثار الضوضاء أو على عدة أطوال موجة لتحديد متوسط فضائي. ومن المهم أن يُحدد بوضوح المقصود من المتوسط وكيف يُحسب هذا المتوسط. ويتمثل الإجراء الموصى به في هذا الشأن في إنشاء نموذج إحصائي على النحو التالي: تحديد موقع الوقت بالنسبة إلى كل تقدير للاستجابة النبضية (المظهر الجانبي لتأخر القدرة) قبل وبعد متوسط التأخر TD (انظر التوصية ITU-R P.1407) الذي لا تتجاوز كثافة القدرة بعده قيماً محددة (−10، −15، −20، −25، −30 dB) بالنسبة إلى ذروة كثافة القدرة. ويتكون النموذج من متوسط توزيع الأوقات، وإذا أردنا من المئين ذي الرتبة 90 من توزيعات هذه الأوقات.

3.4 جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر

غالباً ما تتميز المظاهر الجانبية لتأخر القدرة بمعلمة واحدة أو أكثر كما هو مذكور أعلاه. وينبغي حساب هذه المعلمات انطلاقاً من مظاهر جانبية متوسطة امتداد على منطقة لها أبعاد عدة أطوال من الموجات. (تُستنتج خصائص تمديد التأخر بالقيمة الفعالة في بعض الأحيان من مظاهر جانبية إفرادية، ثم يحسب متوسط مختلف القيم التي يحصل عليها، إلا أن النتيجة لا تكون عادة نفس النتيجة التي نحصل عليها انطلاقاً من مظهر جانبي متوسط.) ويجب الإبلاغ عن عتبة استبعاد الضوضاء أو معيار القبول، على سبيل المثال 30 dB دون ذروة المظهر الجانبي، إلى جانب تمديد التأخر الناتج الذي يتوقف على هذه العتبة.

وعلى الرغم من أن تمديد التأخر بالقيمة الفعالة يُستعمل على نطاق واسع، فإنه لا يكفي دائماً لتمييز المظهر الجانبي للتأخر على وجه الدقة. وفي حالة الانتشار عبر مسيرات متعددة حيث يتجاوز تمديد التأخر مدة الرمز فإن نسبة الخطأ في البتات في تشكيل الإبراق بزحزحة الطور لا تتوقف على تمديد التأخر بالقيمة الفعالة بل على نسبة القدرة المستقبَلة للموجة المفيدة إلى الموجة المسببة للتداخل. وهو ما يحدث في الأنظمة ذات معدلات الرموز المرتفعة لكن هذا الأمر ينطبق كذلك على معدلات الرموز الضعيفة حيث نلاحظ إشارة قوية مهيمنة ضمن المكونات متعددة المسيرات (خبو رايس).

ولكن إذا أمكن لنا أن نفترض مظهراً جانبياً يتناقص أسياً، فإنه يكفي أن نعبر عن تمديد التأخر بالقيمة الفعالة عوضاً عن المظهر الجانبي لتأخر القدرة. ويمكن في هذه الحالة التعبير عن تقريب استجابة النبضة على النحو التالي:

$$h(t) = \begin{cases} e^{-t/S} & \text{for } 0 \le t \le t_{max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

حيث:

S: تمديد التأخر بالقيمة الفعالة

t_{max}: التأخر الأقصى

$S << t_{max}$.

وتكمن الفائدة من وراء استعمال تمديد التأخر بالقيمة الفعالة كمعلمة خرج النموذج في أنه يمكن تمثيل النموذج ببساطة في شكل جدول. ويحتوي الجدول 5 على خصائص تمديد التأخر النمطية، المقدرة انطلاقاً من القيم المتوسطة للمظاهر الجانبية للتأخر بالنسبة لثلاثة أنظمة داخلية. وتستند هذه القيم إلى بعض القياسات التي أجريت عند 900 1 MHz و5,2 GHz بواسطة هوائيات شاملة الاتجاهات. (ليس هناك من أدلة تثبت تأثير التردد بشكل قوي على هذه الخصائص في حالة استعمال هوائيات شاملة الاتجاهات. ويمكن الرجوع إلى الفقرة 5 فيما يتعلق بأنماط الهوائيات الأخرى). وفي الجدول 5 يمثل العمود باء القيم الوسيطة التي تحدث بصورة متواترة، والعمود ألف القيم الأخفض نسبياً دون أن تكون متطرفة والتي تحدث بدورها بصفة متواترة بينما يمثل العمود جيم قيماً شديدة الارتفاع نادرة الحدوث. وتتطابق القيم الواردة في هذا الجدول مع الغرف الكبرى التي نجدها في غالب الأحيان في كل بيئة من البيئات التي تتخذ كمثال.

الجدول 5

معلمات تمديد التأخر بالقيمة الفعالة

التردد	البيئة	ألف (ns)	باء (ns)	جيم (ns)
MHz 1900	داخل المباني السكنية	20	70	150
MHz 1900	داخل المكاتب	35	100	460
MHz 1900	داخل المباني التجارية	55	150	500
GHz 5,2	داخل المكاتب	45	75	150

يتزايد تمديد التأخر، داخل مبنى معين، بازدياد المسافة بين الهوائيات، وبالتالي يتزايد بتزايد خسارة المسير. وعندما تزداد المسافة بين الهوائيات كثيراً ما يلاحظ أن المسير يحتوي على عوائق وأن الإشارة المستقبَلة تتكون كلياً من إشارات تنتشر بواسطة الانتشار.

تكون S، وهي تمديد التأخر بالقيمة الفعالة، متناسبة عملياً مع F_s، منطقة المساحة على الأرض. ويتم الحصول عليها كما يلي:

$$10 \log S = 2{,}3 \log(F_s) + 11{,}0 \quad (3)$$

حيث تقدر F_s، بالأمتار المربعة وS بنانوثانية

وتستند هذه المعادلة إلى بعض القياسات التي أجريت في نطاق 2 GHz بالنسبة إلى عدة أنماط من الغرف (مثل المكاتب والأروقة والممرات وقاعات الرياضة). وتبلغ قيمة Fs القصوى المستعملة في القياسات 1000 m^2. وتساوي القيمة الوسيطة والانحراف المعياري لخطأ التقدير القيمتين 1,6 ns و24,3 ns على التوالي.

ويتراوح الانحراف الميعاري لمقدار S الذي يقدر بوحدة dB، بين القيمتين 0,7 و 1,2 dB.

4.4 النماذج الإحصائية

تلخص النماذج الإحصائية نتائج عدد كبير من القياسات بحيث يمكن استعمال هذه النتائج لمحاكاة الإرسال. ويمكن المحاكاة على سبيل المثال باستعمال نمذجة قناة متميزة مستقرة من الرتبة الثانية ذات مسيرات متعددة غير مترابطة (WSSUS). ومن أحد الأساليب استبدال عدد من الإشارات المنتشرة بواسطة الانتثار التي قد توجد في قناة حقيقية بعدد قليل جداً (N) من المكونات متعددة المسيرات في النموذج. وعندئذ تتولى عملية غوسية معقدة تتغير بحسب الوقت $g_n(t)$ نمذجة تراكب المكونات متعددة المسيرات التي لم يتم حلها والتي تتميز بزوايا سقوط مختلفة وبتأخر يقترب من التأخر τ_n للمكونة متعددة المسيرات من الرتبة n للنموذج. وعندئذ تُعطى الاستجابة النبضية $h(t)$ بواسطة الصيغة التالية:

$$h(t) = \sum_{n=1}^{N} \sqrt{p_n}\; g_n(t)\;\; \delta(t - \tau_n) \tag{4}$$

حيث تمثل p_n القدرة المستقبلَة للمكونة متعددة المسيرات من الرتبة n للنموذج. ويتطلب مثل هذا النموذج الإحصائي معلمات مناسبة لكل مكونة.

5.4 النماذج الخاصة بالموقع

رغم أن النماذج الإحصائية مفيدة لوضع مبادئ توجيهية تتعلق بالتخطيط فإن النماذج الحتمية (أو الخاصة بالموقع) على غاية من الأهمية بالنسبة إلى مصممي الأنظمة. ويمكن تعريف العديد من التقنيات الحتمية لنمذجة الانتشار. وفيما يتعلق بالتطبيقات في الداخل، درست خصوصاً تقنية المجال الزمني للاختلافات المتناهية (FDTD) وتقنية البصريات الهندسية. وتعتبر تقنية البصريات الهندسية أكثر فعالية من حيث عملية الحساب من تقنية المجال الزمني للاختلافات المتناهية.

وتحتوي طريقة البصريات الهندسية على تقنيتين أساسيتين هما تقنية الصور وتقنية إطلاق الأشعة. وتستعمل الأولى صور المستقبِل بالنسبة إلى كل السطوح العاكسة في البيئة. وتُحسب إحداثيات كل الصور ثم تُرسم الأشعة في اتجاه هذه الصور.

وفي تقنية إطلاق الأشعة، يطلق عدد من الأشعة بصورة منتظمة في الفضاء حول هوائي المرسل. ويُحسب المرسوم الهندسي لكل شعاع من نقطة الإرسال حتى نقطة الاستقبال أو حتى يهبط اتساع الشعاع دون عتبة محددة. وتوفر تقنية إطلاق الأشعة، بالمقارنة مع تقنية الصور، مرونة أكبر لأن الأشعة المنعرجة والأشعة المتناثرة يمكن أن تعالج بالتوازي مع الانعكاسات المرآوية. وإضافة إلى ذلك، يمكن اختصار وقت الحساب مع الاحتفاظ باستبانة كافية باستعمال تقنية فصل الأشعة أو طريقة التغير. وتصلح تقنية إطلاق الأشعة للتنبؤ بالاستجابة النبضية للقناة في مساحات واسعة بينما تستعمل تقنية الصور للتنبؤ من نقطة إلى نقطة.

وتتضمن النماذج الحتمية بصورة عامة افتراضات تتعلق بتأثير مواد البناء على التردد المعني (انظر الفقرة 7 بشأن خصائص مواد البناء). وينبغي للنموذج الخاص بالموقع مراعاة هندسة البيئة والانعكاس والانعراج والإرسال عبر الجدران. ويمكن التعبير عن الاستجابة النبضية عند نقطة ما على النحو التالي:

$$h(t) = \sum_{n=1}^{N} \left[\left(\prod_{u=1}^{M_{rn}} \Gamma_{nu} \times \prod_{v=1}^{M_{pn}} P_{nv} \right) \frac{1}{r_n} \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,\omega\,\tau_n} \cdot \delta(t - \tau_n) \right] \tag{5}$$

حيث:

$h(t)$: الاستجابة النبضية

N: عدد الأشعة الواردة

M_{rn}: عدد انعكاسات الشعاع n

M_{pn}: عدد اختراقات الشعاع n

Γ_{nv}: معامل الانعكاس على الجدار من الرتبة u للشعاع n

P_{nv}: معامل الاختراق في الجدار من الرتبة v للشعاع n

r_n: طول مسير الشعاع n

τ_n: وقت انتشار الشعاع n

وتُحسب الأشعة المنعكسة على الجدران أو على سطوح أخرى وتلك التي اخترقت الجدران أو سطوح أخرى بواسطة معادلات فرينل. ولذلك يجب في البداية معرفة السماحية المعقدة لمواد البناء. وترد القيم المقيسة لسماحية البعض منها في الفقرة 7.

وإضافة إلى الأشعة المنعكسة والمخترقة (انظر المعادلة (5))، يجب أن تؤخذ في الاعتبار كذلك الأشعة المنعرجة والمتناثرة للحصول على نمذجة جيدة للإشارة المستقبَلة. وهي على وجه الخصوص داخل الأروقة ذات الزوايا وحال انتشارات أخرى شبيهة بها. ويمكن استعمال النظرية الموحدة للانعراج لحساب الأشعة المنعرجة.

5 تأثير الاستقطاب ومخطط إشعاع الهوائي

لا يوجد في الداخل مسير مباشر فقط وإنما يوجد كذلك مسير منعكس ومسير منعرج بين المرسل والمستقبل. وتتوقف خصائص انعكاس مادة البناء على الاستقطاب وزاوية الورود والسماحية المعقدة للمواد (انظر معادلات فرينل بشأن الانعكاس). وتُوزع زوايا ورود المكونات بحسب فتحة حزمة الهوائي وعناصر البنية وموقع المرسل والمستقبل. وبالتالي يمكن للاستقطاب ومخطط إشعاع الهوائي المكافئ أن يؤثرا تأثيراً كبيراً في خصائص الانتشار الداخلي.

1.5 حالة المسير في خط البصر

من المتفق عليه أن تمديد التأخر بالقيمة الفعالة في حالة قنوات خط البصر والهوائيات التوجيهية يقل عما هو عليه في حالة الهوائيات شاملة الاتجاه كما يقل في حالة الاستقطاب الدائري بالمقارنة مع حالة الاستقطاب الخطي. ومن ثم يسمح استعمال الهوائي الاتجاهي ذي الاستقطاب الدائري بالتخفيض بصفة جلية من تمديد التأخر.

ويعزى تأثير الاستقطاب بصفة أساسية إلى أنه عندما تكون زاوية الورود على سطح عاكس لإشارة ذات استقطاب دائري أصغر من زاوية بروستر، ينقلب اتجاه استقطاب الإشارة المنعكسة ذات الاستقطاب الدائري. وانقلاب اتجاه استقطاب هذه الإشارة عند كل انعكاس يعني أن المكونات متعددة المسيرات التي تصل بعد أي انعكاس تمثل استقطاباً متعامداً بالنسبة للمكونة في خط البصر، مما يؤدي إلى إلغاء جزء هام من التداخل الناتج عن الانتشار بمسيرات متعددة. وهذه الظاهرة مستقلة عن التردد، كما توحي بذلك الدراسات النظرية وتظهره تجارب الانتشار في الداخل التي أُجريت في مدى الترددات GHz 60-1,3، والتي تنطبق على كلٍّ من الأنظمة الداخلية والخارجية. وبما أن لكل مواد البناء الموجودة زاوية بروستر أكبر من 45°، فإن الانتشار عبر مسيرات متعددة بسبب الانعكاسات الوحيدة (أي المصدر الرئيسي للمكونات متعددة المسيرات) يُكبت بالفعل في معظم الغرف، مهما كانت بنية الغرفة والأشياء التي توجد فيها. والاستثناءات الممكنة هي البيئات التي تتضمن جزءاً كبيراً من الإشارات المنتشرة عبر مسيرات متعددة ولها زوايا ورود كبيرة (رواق طويل، مثلاً). ويقل كذلك تغير تمديد التأخر بالقيمة الفعالة على وصلة متنقلة عند استعمال هوائيات ذات استقطاب دائري.

وبما أن مكونات الانتشار عبر مسيرات متعددة تتوزع بحسب زاوية ورودها، فإن المكونات الواقعة خارج فتحة حزمة الهوائي تُوهن أو تُكبت (أثر الاتجاهية) بحيث يمكن أن يقل تمديد التأخر. وتبين بعض قياسات الانتشار في الداخل والمحاكاة بواسطة مرسوم الأشعة التي أجريت عند GHz 60 باستخدام هوائي إرسال شامل الاتجاهات وأربعة أنماط مختلفة من هوائيات الاستقبال (شاملة الاتجاهات، ذات حزمة واسعة، ذات بوق معياري، ذات حزمة ضيقة) موجهة في اتجاه هوائي الإرسال أن كبت المكونات المتأخرة أفضل عندما تكون فتحات الحزمة أضيق. ويعطي الجدول 6 مثالاً عن تأثير اتجاهية الهوائي على تمديد التأخر بالقيمة الفعالة في ظروف مستقرة، عندما لا تتجاوز هذه المعلمة عند المئين 90 وهو مستخلص من محاكاة بواسطة

مرسوم الأشعة عند 60 GHz لمكتب فارغ. ومن الجدير بالذكر أن التقليل من تمديد التأخر بالقيمة الفعالة ليس بالضرورة أمراً مرغوباً فيه دائماً لأنه يمكن أن يؤدي إلى زيادة الديناميات في حالة خبو الإشارات عريضة النطاق، وذلك طبعاً بسبب غياب تنوع التردد. ويلاحظ أيضاً أن بعض تقنيات الإرسال تستفيد من الانتشار عبر مسيرات متعددة.

الجدول 6

مثال على تأثير اتجاهية الهوائي على تمديد التأخر بالقيمة الفعالة في ظروف مستقرة

التردد (GHz)	هوائي الإرسال	فتحة حزمة هوائي الاستقبال (درجات)	تمديد التأخر بالقيمة الفعالة في ظروف مستقرة (المئين 90) (ns)	أبعاد الغرفة (m)	ملاحظات
60	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	17	13,5 × 7,8 مكتب فارغ	مرسوم الأشعة
		60	16		
		10	5		
		5	1		

2.5 حالة إعاقة المسير

عندما يحتوي المسير المباشر على عوائق يمكن لتأثير الاستقطاب واتجاهية الهوائي على تمديد التأخر بالقيمة الفعالة أن يكون أكثر تعقيداً من التأثير الذي نلاحظه في حالة مسير خط البصر. والنتائج التجريبية التي تتعلق بحالات الإعاقة قليلة من حيث العدد ولكن النتائج التجريبية التي حُصل عليها عند 2,4 GHz توحي بأن تأثير الاستقطاب واتجاهية الهوائي على تمديد التأخر بالقيمة الفعالة يختلف كثيراً عما هو عليه في مسير خط البصر. فقد أمكن على سبيل المثال، باستعمال هوائي إرسال شامل الاتجاهات ذي استقطاب أفقي وهوائي استقبال اتجاهي ذي استقطاب دائري، الحصول على أدنى تمديد للتأخر بالقيمة الفعالة وأدنى وقت للانتشار الأقصى على المسير الذي يحتوي على عوائق.

3.5 توجيه المطراف المتنقل

في حالة الأنظمة المحمولة، تكون ظواهر الانتشار بالأساس ظواهر انعكاس وانتثار للإشارة. وغالباً ما تُنثر الموجة المرسَلة ويصبح استقطابها الأصلي استقطاباً متعامداً. ويزيد، في هذه الظروف، اقتران الاستقطابات المتقاطعة من احتمال استقبال جيد بالاستعانة بأجهزة استقبال محمولة يكون هوائيها موجهاً بطريقة عشوائية. وقد أظهرت قياسات اقتران الاستقطابات المتقاطعة التي أجريت عند 816 MHz سوية عالية من الاقتران.

6 تأثير موقع المرسل والمستقبل

لا يوجد إلا عدد قليل من البحوث والدراسات النظرية التي تتعلق بتأثير موقع المرسل والمستقبل على خصائص الانتشار في الداخل. إلا أننا يمكن، بصفة عامة، أن نقترح أن توضع المحطة الأساسية أعلى ما يمكن قرب سقف الغرفة للتمكن، في حدود الإمكان، من توفير مسيرات خط البصر. أما في حالة الأنظمة المحمولة فإن موقع نظام المستعمل يخضع بالطبع لتحركات هذا المستعمل وليس لقيود تصميم النظام. وبالنسبة للأنظمة غير المحمولة، يجب أن يكون ارتفاع الهوائي كافياً لكي تكون المحطة الأساسية في خط البصر كلما أمكن ذلك. واختيار موقع المحطة كذلك مهم جداً لتشكيل النظام (تنوع فضائي، تشكيلة المنطقة، إلخ).

7 تأثير مواد البناء والأثاث

يؤثر الانعكاس عند مواد البناء والإرسال عبر هذه المواد على خصائص الانتشار في الداخل. وتتوقف خصائص انعكاس وإرسال هذه المواد على سماحيتها المعقدة. وقد يكون من المفيد، لدى استعمال نماذج تنبؤ بالانتشار مكيفة مع الموقع توفر معلومات بشأن السماحية المعقدة لمواد البناء وبشأن عناصر البنية التي تمثل معطيات دخل أساسية.

ويحتوي الجدول 7 على قيم السماحية المعقدة لمواد البناء النمطية، وهي مستخلصة من التجارب التي أجريت عند 1 GHz و57,5 GHz و78,5 GHz و95,9 GHz. وتكشف هذه القيم عن اختلافات كبيرة بين مادة وأخرى وتبين أن التغيرات التي تحدث بحسب التردد ضعيفة بين 60 و100 GHz ما عدا في حالة اللوحات الأرضية التي يبلغ فيها التغير 10%.

الجدول 7

السماحية المعقدة لمواد البناء في الداخل*

	1 GHz	57.5 GHz	70 GHz	78.5 GHz	95.9 GHz
خرسانة	7-j0.85	6.5-j0.43	–	–	6.2-j0.34
خرسانة خفيفة	2-j0.5	–	–	–	–
أرضية الحجرات (راتنج اصطناعي)	–	3.91-j0.33	–	3.64-j0.37	3.16-j0.39
لوحة جبسية	–	2.25-j0.03	2.43-j0.04	2.37-j0.1	2.25-j0.06
لوحة السقف (صوف صخري)	1.2-j0.01	1.59-j0.01	–	1.56-j0.02	1.56-j0.04
زجاج	6.76-j0.09	6.76-j0.16	6.76-j0.17	6.76-j0.18	6.76-j0.19
ألياف زجاجية	1.2-j0.1	–	–	–	–

* تستخرج القيم المتعلقة بالزجاج بواسطة الصيغ من (6a) إلى (6d). أما القيم الأخرى فهي نتائج القياس.

ويتم الحصول على صيغة تجريبية لحساب السماحية المعقدة η المتعلقة بالزجاج في مدى الترددات من 0,9 إلى 100 GHz كما يلي:

$$\eta = (n_{cr} - j n_{ci})^2 \tag{6a}$$

حيث:

$$n_{cr} = 2.60 \tag{6b}$$

$$n_{ci} = 10^{-1.773 + 0.153x - 0.027x^2 - 0.011x^3 + 0.014x^4} \tag{6c}$$

$$x = \log_{10} f, \quad 0.9 \text{ GHz} < f < 100 \text{ GHz} \tag{6d}$$

ويسمح معاملا الانعكاس والإرسال اللذان يرد تعريفهما فيما يلي بتقييم خصائص الانعكاس والإرسال:

$$R_N = \frac{E_N^r}{E_N^i}, \quad R_P = \frac{E_P^r}{E_P^i}, \quad T_N = \frac{E_N^t}{E_N^i}, \quad T_P = \frac{E_P^t}{E_P^i} \tag{6e}$$

حيث تمثل E الاتساع المعقد للمجال الكهربائي الوارد (الرمز العلوي i)، والمنعكس (الرمز العلوي r) أو المرسَل (الرمز العلوي t). ويشير الدليلان N وP على التوالي إلى المكونة العادية والمكونة الموازية لسطح الانعكاس، التي تعرّف على أنها السطح الذي يتضمن الشعاع الوارد والشعاع المنعكس (راجع الشكل 1 فيما يتعلق بالتشكيلة الهندسية). وتعرّف المجالات الكهربائية الواردة والمنعكسة على سطح الانعكاس، في حين يعرّف لمجال المرسَل على الجهة المقابلة لهذه المساحة. ويكوِّن كل من E_P وE_N واتجاه الانتشار دوماً ثلاثي سطوح متعامد مباشر. وتعتبر اتجاهات المجالات En الواردة، والمنعكسة، والمرسَلة متماثلة.

ونحصل من السماحية المعقدة η على معامل الانعكاس بتطبيق الصيغ التالية:

مكونة المجال الكهربائي ناظمة بالنسبة لسطح الانعكاس

$$R_N = \frac{\cos\theta - \sqrt{\eta - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\eta - \sin^2\theta}} \tag{7a}$$

مكونة المجال الكهربائي موازية بالنسبة لسطح الانعكاس

$$R_P = \frac{\cos\theta - \sqrt{\left(\eta - \sin^2\theta\right)/\eta^2}}{\cos\theta + \sqrt{\left(\eta - \sin^2\theta\right)/\eta^2}} \tag{7b}$$

حيث تمثل θ الزاوية بين الشعاع الوارد والشعاع الناظم بالنسبة لسطح الانعكاس (انظر الشكل 1).

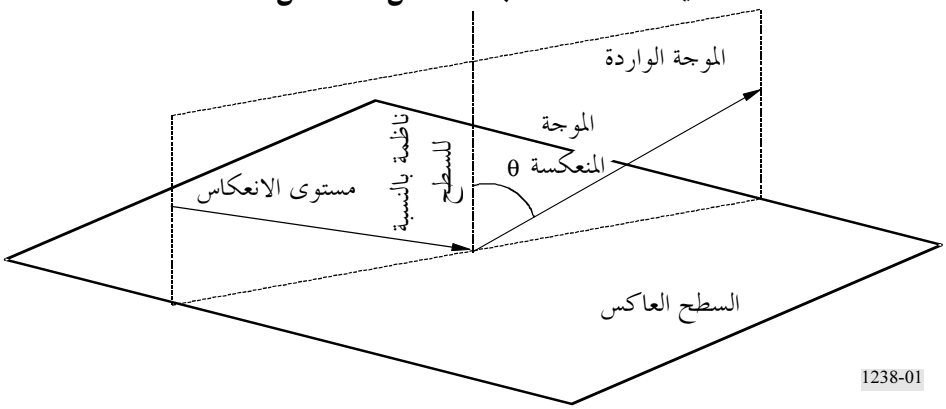
وفي حالة مجال كهربائي وارد ذي استقطاب دائري يمكن التعبير عن تغيرات الاتساع وطور الإشارة المستقبَلة، اللاحقة لانعكاس المجال الكهربائي، بواسطة المعامل R_C للانعكاس في استقطاب دائري:

(استقطاب دائري)

$$R_C = \frac{R_N + R_P}{2} \tag{7c}$$

الشكل 1

تشكيلة هندسة لحساب خصائص الانعكاس



تنطبق الصيغ الواردة أعلاه عندما تكون خسارة الاختراق لمواد البناء من الأهمية بحيث لا ترتد أية موجة ذات أهمية نحو السطح العاكس. وعندما لا تكون كذلك ينبغي أن يؤخذ في الاعتبار تأثير العديد من الانعكاسات الداخلية داخل مواد البناء.

وعندما يعبّر عن مواد البناء بعدد N من اللوحات العازلة الكهربائية، وتُعطى الثخانة والسماحية المعقدة للطبقة ذات الرتبة m ($m = 1,2, ..N$) على التوالي بواسطة d_m وη_m ، يمكن الحصول على معاملي الانعكاس والإرسال بواسطة:

$$R_N = \frac{B_0}{A_0}, \quad R_P = \frac{G_0}{F_0}, \quad T_N = \frac{1}{A_0}, \quad T_P = \frac{1}{F_0} \tag{8a)-(8d}$$

وفي هذه الحالة، تُحدد A_0، B_0، F_0 وG_0 من صيغ "المعاودة" كما يلي:

$$A_m = \frac{\exp(\delta_m)}{2}\left[A_{m+1}(1+Y_{m+1}) + B_{m+1}(1-Y_{m+1})\right] \quad (9a)$$

$$B_m = \frac{\exp(-\delta_m)}{2}\left[A_{m+1}(1-Y_{m+1}) + B_{m+1}(1+Y_{m+1})\right] \quad (9b)$$

$$F_m = \frac{\exp(\delta_m)}{2}\left[F_{m+1}(1+W_{m+1}) + G_{m+1}(1-W_{m+1})\right] \quad (9c)$$

$$G_m = \frac{\exp(-\delta_m)}{2}\left[F_{m+1}(1-W_{m+1}) + G_{m+1}(1+W_{m+1})\right] \quad (9d)$$

$$A_{N+1} = 1, \quad B_{N+1} = 0, \quad F_{N+1} = 1, \quad G_{N+1} = 0 \quad (10a)-(10d)$$

$$W_{m+1} = \frac{\cos\theta_{m+1}}{\cos\theta_m}\sqrt{\frac{\eta_m}{\eta_{m+1}}}, \quad Y_{m+1} = \frac{\cos\theta_{m+1}}{\cos\theta_m}\sqrt{\frac{\eta_{m+1}}{\eta_m}}, \quad \eta_0 = \eta_{N+1} = 1 \quad (11a)-(11c)$$

$$\delta_m = jk_m d_m \cos\theta_m, \quad k_m = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\eta_m}\,, \quad k_0 = k_{N+1} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (12a)-(12c)$$

حيث:

λ: طول الموجة في الفضاء الحر

θ_m: زاوية الانكسار في الطبقة من الرتبة m

θ_{N+1}: زاوية الانكسار في المساحة إلى يمين آخر حدٍ مستوٍ.

وفي الحالة الخاصة حيث لا توجد إلا طبقة واحدة، يمكن تبسيط الصيغ (8) على نحو ما يلي:

$$R = \frac{1-\exp(-j2\delta)}{1-R'^2\exp(-j2\delta)}R' \quad (13a)$$ (معامل الانعكاس)

$$T = \frac{(1-R'^2)\exp(-j\delta)}{1-R'^2\exp(-j2\delta)} \quad (13b)$$ (معامل الإرسال)

حيث:

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda}\sqrt{\eta - \sin^2\theta} \quad (14)$$

وd هي ثخانة مادة البناء. وتعطى R' في الصيغتين (13a) و(13b)، بواسطة R_N أو R_P، بحسب استقطاب المجال E الوارد.

ويمكن استعمال R_N وR_P (على التوالي T_N وT_P) كمعامل انعكاس Γ_{nu} (كمعامل اختراق P_{nv} على التوالي) الذي ورد تعريفه في الفقرة 5.4 إذا كانت كل مستويات الانعكاس على طول مسير الشعاع مثماثلة، وهي مثلاً حالة نموذج حتمي ذي بعدين. ولا يمكن استبدال Γ_{nu} بالمعامل R_C إلا بالنسبة للانعكاس الأول على المسير، إذ إن الانعكاس يحول عادة موجة ذات استقطاب دائري إلى موجة ذات استقطاب إهليلجي. ويحلل المجال الكهربائي الوارد من حيث المبدأ إلى مكونة ناظمة ومكونة موازية لمستوى الانعكاس، يطبق عليهما العاملان R_N وT_N أو R_P وT_P (حسب الحالة)، لتحديد المجال الكهربائي المنعكس والمجال الكهربائي المرسَل.

وفيما يتعلق بنطاقات الموجات المليمترية، يجب أن تُعتبر كسوة السطح، مثل الطلاء، كواحدة من الطبقات العازلة الكهربائية.

وتنخفض الانعكاسات المرآوية المرتبطة بمواد تغطية الأرضية الصقيلة (مثل ألواح الخشب أو الإسمنت) انخفاضاً واضحاً في نطاقات الموجات المليمترية عندما تكون الأرضية مغطاة بسجاد أو ببساط خشن. ويمكن أن نعاين انخفاضات مماثلة عندما تكون النوافذ ملفحة بستائر سميكة. ولذلك يمكن أن نذهب إلى أن الآثار الخاصة بكل مادة تزداد أهمية بازدياد التردد.

وإضافة إلى عناصر البنية، يمكن للأثاث والأجهزة الأخرى أن تغير تغييراً كبيراً من خصائص الانتشار في الداخل. ويمكن اعتبارها بمثابة عوائق وهي تنضوي بالتالي تحت نموذج خسارة المسير الذي ورد وصفه في الفقرة 3.

ويشتمل التذييل 1 على طريقة جديدة لحساب خصائص الانعكاس والإرسال بالنسبة إلى المواد متعددة الطبقات، وهي تقوم على أساس مصفوفة ABCD.

8 تأثير حركة الأشياء في الغرفة

يؤدي تنقل الأشخاص أو الأشياء داخل غرفة ما إلى تغيرات آنية في خصائص الانتشار الداخلي. غير أن هذه التغيرات بطيئة جداً إذا ما قورنت بمعدل تدفق المعطيات الذي سيستعمل في غالب الأحيان، وبالتالي يمكن أن تُعامَل إن صح التعبير كمتغير عشوائي مستقل عن الوقت. وفيما عدا تنقل الأشخاص بالقرب من الهوائيات أو على المسير المباشر، فإن تنقل الأشخاص في المكاتب أو في أماكن أخرى داخل المبنى أو بالقرب منه ليس له تأثير يذكر فيما يتعلق بخصائص الانتشار.

وقد بينت بعض القياسات التي أُجريت عندما يكون طرفا الوصلة المعنية ثابتين أن حالات الخبو تبدو في شكل رشقات (تكشف معطيات القياس عن نسبة هامة من التشكيلات غير الساكنة) وهي تعزى إما إلى تشوش الإشارات متعددة المسيرات في المناطق المجاورة للوصلة أو إلى ظاهرة الحجب الناتجة عن وجود أشخاص يقطعون مسير الوصلة.

كما تبين بعض القياسات التي أجريت عند 1,7 GHz أن قطع شخص ما لمسير إشارة خط البصر يؤدي إلى انخفاض يتراوح قدره بين 6 و8 dB من سوية قدرة الإشارة المستقبَلة؛ وعلاوة على ذلك تنخفض القيمة K لتوزيع ناكاغامي–رايس انخفاضاً كبيراً وعندما لا تكون المسيرات على خط البصر، فإن تحركات الأشخاص بالقرب من الهوائي ليس لها من آثار ذات أهمية على القناة.

وفي حالة نظام محمول يكون لقرب رأس وجسم المستعمل تأثير على سوية الإشارة المستقبَلة. وتبين القياسات التي أُجريت عند 900 MHz، بهوائي ثنائي الأقطاب، أن سوية الإشارة المستقبَلة تنخفض بمقدار 4 إلى 7 dB عندما يكون النظام عند سوية حزام المستعمل أو بمقدار 1 إلى 2 dB عندما يكون النظام بالقرب من رأس المستعمل مقارنة بقدرة الإشارة المستقبَلة عندما تبلغ المسافة التي تفصل بين الهوائي وجسم المستعمل العديد من طول الموجات.

وعندما يكون ارتفاع الهوائي أقل من حوالي 1 m، في حالة تطبيق نمطي يستعمل حواسيب مكتبية أو محمولة مثلاً، يمكن أن يحجب مسير خط البصر أشخاص يتنقلون بالقرب من مطراف المستعمل. ويتسم كل من عمق ومدة الخبو بالأهمية بالنسبة لمثل هذه التطبيقات من المعطيات. وقد بينت القياسات التي أجريت عند 37 GHz في رواق مبنى مكاتب أن الخبو الذي يتراوح بين 10 و15 dB كثيراً ما يلاحظ. وتتبع مدة الخبو الناتج عن حجب بسبب الأشخاص – الذين يتنقلون باستمرار معيقين مسير خط البصر بطريقة عشوائية – توزيع لوغاريتمي عادي، حيث يعتمد متوسط الانحراف والانحراف المعياري على عمق الخبو. وبالنسبة إلى هذه القياسات، عندما كان عمق الخبو 10 dB، بلغ متوسط المدة 0,11 s والانحراف المعياري 0,47 s. وعندما كان عمق الخبو 15 dB بلغ متوسط المدة 0,05 s والانحراف المعياري 0,15 s.

وقد أظهرت القياسات التي أجريت عند 70 GHz أن المدة المتوسطة للخبو الذي يسببه أثر الحجب الناتج عن جسم الإنسان تساوي 0,52 و0,25 و0,09 ثانية بالنسبة إلى عمق خبو قدره 10 dB و20 dB و30 dB على التوالي، وتقدر السرعة المتوسطة لتنقل الأشخاص بمعدل 0,74 m/s، وتعتبر الاتجاهات عشوائية ويفترض أن تكون ثخانة جسم الإنسان مساوية للقيمة 0,3 m.

وتبين بعض القياسات أن العدد المتوسط لظواهر الحجب الناتج عن جسم الإنسان الذي يحدث خلال ساعة من حركة الأشخاص في المكاتب يمكن الحصول عليه بواسطة الصيغة:

$$\overline{N} = 260 \times D_p \qquad (15)$$

حيث تمثل D_P ($0.5<D_P<0.08$) عدد الأشخاص في كل متر مربع داخل الغرفة. وتحسب المدة الكلية للخبو في كل ساعة بواسطة الصيغة:

$$T=\overline{T_s}\times\overline{N} \tag{16}$$

حيث $\overline{T_s}$ متوسط مدة الخبو.

ويتراوح عدد أحداث ظاهرة الحجب الناتج عن جسم الإنسان خلال ساعة في قاعة عرض بين 180 و280، بالنسبة إلى قيمة D_P بين 0,09 و0,13.

ويتأثر ترابط خسارة المسير والمسافة في مركز تجاري يقع تحت الأرض بظاهرة الحجب الناتج عن جسم الإنسان. وتقدر خسارة المسير بواسطة المعادلة التالية، باستعمال المعلمات الواردة في الجدول 8.

$$L(x)=-10\cdot\alpha\{1.4-\log_{10}(f)-\log_{10}(x)\}+\delta\cdot x+C \quad \text{dB} \tag{17}$$

حيث:

f: التردد مقيساً بوحدة الميغاهرتز

x: المسافة بالأمتار.

وتم التحقق من أن المعلمات الخاصة بالحالة NLoS في نطاق 5 GHz والمعلمات الخاصة بحالة LoS قابلة للتطبيق على مدى الترددات 2–20 GHz. وتتراوح المسافات x بين 10 و200 m.

وتكون بيئة المركز التجاري الذي يقع تحت الأرض عبارة عن مركز من نمط " سُلّمي" يتكون من أروقة مستقيمة ذات جدران من الزجاج أو من الإسمنت. ويكون عرض الرواق الرئيسي 6 m ويبلغ ارتفاعه 3 m وطوله 190 m. ويفترض أن طول جسم الإنسان النمطي يبلغ 170 cm وعرض كتفيه 45 cm. وتقارب كثافة المارّة 0,008 شخص/m^2 في فترات الهدوء (بداية الصباح، ساعات الهدوء) و0,1 شخص/m^2 في فترات الضغط (فترات الغداء أو ساعات الازدحام).

الجدول 8

معلمات دالة خسارة المسير الذي جرت نمذجته في المركز التجاري
يايسو (Yaesu) الذي يقع تحت الأرض

	LoS			**NLoS**		
	α	δ ($^{1-}$m)	C (dB)	α	δ ($^{1-}$m)	C (dB)
ساعات الهدوء	2,0	0	5	3,4	0	20–
ساعات الازدحام	2,0	0,065	5	3,4	0,065	20–

التذييل 1
للملحق 1

طريقة جديدة لحساب معاملي الانعكاس والإرسال بالنسبة إلى مواد البناء المكونة من عدد *N* من اللوحات العازلة الكهربائية، بالاستناد إلى مصفوفة ABCD

فيما يلي صيغ جديدة، تقوم على إنشاء مصفوفة ABCD، تحل محل المعادلات من (8) إلى (14) الواردة في الفقرة 7، وتسمح بحساب معاملي الانعكاس (R) والإرسال (T) في حالة مواد البناء المكونة من عدد N من اللوحات العازلة الكهربائية. ونفترض أن المنطقتين على جانبي مادة البناء فضاء حر. ويلاحظ أن النتائج التي يمكن الحصول عليها بواسطة هذه الطريقة تماثل تماماً النتائج التي يمكن الحصول عليها بواسطة المعادلات الواردة في الفقرة 7.

$$R_N = \frac{B/Z_N - CZ_N}{2A + B/Z_N + CZ_N} \tag{18a}$$

$$R_P = -\frac{B/Z_P - CZ_P}{2A + B/Z_P + CZ_P} \tag{18b}$$

$$T_N = \frac{2}{2A + B/Z_N + CZ_N} \tag{18c}$$

$$T_P = \frac{2}{2A + B/Z_P + CZ_P} \tag{18d}$$

والعناصر A وB وC هذه هي عناصر المصفوفة ABCD التالية:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_N & B_N \\ C_N & D_N \end{bmatrix} \tag{19a}$$

حيث:

$$A_m = \cos(\beta_m d_m), \quad B_m = jZ_m \sin(\beta_m d_m) \tag{19b)-(19c}$$

$$C_m = \frac{j\sin(\beta_m d_m)}{Z_m}, \quad D_m = A_m \tag{19d)-(19e}$$

$$\beta_m = k_m \cos(\theta_m) = k_m[1 - (\frac{\eta_0}{\eta_m}\sin\theta_0)^2]^{1/2} \tag{19f}$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad k_m = k_0\sqrt{\eta_m} \tag{19g)-(19h}$$

وتمثل λ، في المعادلات من (19b) إلى (19h) طول الموجة في الفضاء الحر، وk_0 عدد الموجات في الفضاء الحر، وη_m وk_m السماحية المعقدة وعدد الموجات للوحة ذات الرتبة m، وتمثل β_m ثابت الانتشار المتعامد مع مستوى اللوحة وd_m عرض اللوحة من الرتبة m.

وتحسب معاوقة الموجة لكل من Z_N وZ_P في المجال الكهربائي الناظم والموازي لمستوى الانعكاس بواسطة:

$$Z_N = \chi_m / \cos\theta_m \tag{20a}$$

و

$$Z_P = \chi_m \cos\theta_m \tag{20b}$$

حيث تمثل χ_m المعاوقة الأصيلة للوحة ذات الرتبة m.

$$\chi_m = \frac{120\pi}{\sqrt{\eta_m}} \tag{20c}$$

وحيث:

$$\eta_0 = \eta_{N+1} = 1,\ \theta_0 = \theta_{N+1} = \theta \text{ and } Z_0 = Z_{N+1}$$