

التوصية ITU-R P.1238-12

(2023/08)

السلسلة P: انتشار الموجات الراديوية

بيانات الانتشار وطرائق التنبؤ لتخطيط أنظمة الاتصالات
الراديوية العاملة داخل المباني وشبكات المنطقة المحلية
الراديوية العاملة في مدى الترددات بين 300 MHz
و450 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 مدى 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.

سلاسل 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.1238-12

بيانات الانتشار وطرائق التنبؤ لتخطيط أنظمة الاتصالات الراديوية العاملة
داخل المباني وشبكات المنطقة المحلية الراديوية العاملة
في مدى الترددات بين 300 MHz و 450 GHz*

(المسألة ITU-R 211/3)

(1997-1999-2001-2003-2005-2007-2009-2012-2015-2017-2019-2021-2023)

مجال التطبيق

تقدم هذه التوصية توصيات بشأن الانتشار الداخلي في مدى الترددات بين 300 MHz و 450 GHz. وتُعطى المعلومات عن:

- نماذج خسارة الإرسال الأساسية؛
- نماذج تمديد وقت الانتشار؛
- تأثير الاستقطاب ومخطط إشعاع الهوائي؛
- تأثير موقع المرسل والمستقبل؛
- تأثير مواد البناء والأثاث؛
- تأثير حركة الأشياء في الغرفة؛
- نموذج إحصائي عند الاستعمال الساكن.

كلمات أساسية

الانتشار داخل المباني، خسارة الإرسال الأساسية، تمديد وقت الانتشار

المختصرات/مسرد المصطلحات

الاستقطاب الدائري (<i>Circular polarization</i>)	CP
الميدان الزمني للاختلافات المتناهية (<i>Finite difference time domain</i>)	FDTD
أفقي إلى أفقي (<i>Horizontal to horizontal</i>)	HH
عرض الحزمة عند منتصف قدرة (<i>Half power beamwidth</i>)	HPBW
خط البصر (<i>Line-of-sight</i>)	LoS
الاستقطاب الخطي (<i>Linear polarization</i>)	LP
مدخلات متعددة ومخرجات متعددة (<i>Multiple input multiple output</i>)	MIMO
المطراف المتنقل (<i>Mobile terminal</i>)	MT
غير متاح (<i>Not available</i>)	N/A

* يلزم تحقيق المزيد من نتائج القياس للتحقق من سلامة النماذج المذكورة أعلاه في مدى الترددات فوق 100 GHz في هذه التوصية، وفقاً للمقترح الوارد في المسألة ITU-R 211-7/3.

خارج خط البصر (<i>Non-line-of-sight</i>)	NLoS
دالة كثافة الاحتمال (<i>Probability density function</i>)	PDF
جذر متوسط التربيع (<i>Root mean square</i>)	r.m.s.
ترددات راديوية (<i>Radio frequency</i>)	RF
شبكات المنطقة المحلية الراديوية (<i>Radio local area networks</i>)	RLAN
المستقبل (<i>Receiver</i>)	Rx
تلفزيون (<i>Television</i>)	TV
المرسل (<i>Transmitter</i>)	Tx
النظرية الموحدة للانعراج (<i>Uniform theory of diffraction</i>)	UTD
رأسي إلى رأسي (<i>Vertical to vertical</i>)	VV
الشبكات المحلية اللاسلكية (<i>Wireless local area networks</i>)	WLAN
بدالات الأعمال الخاصة اللاسلكية (<i>Wireless private business exchanges</i>)	WPBX
نسبة تمييز الاستقطاب المتقاطع (<i>Cross polarization discrimination ratio</i>)	XPR

توصيات وتقارير الاتحاد ذات الصلة

التوصية ITU-R P.676

التوصية ITU-R P.1407

التوصية ITU-R P.1411

التوصية ITU-R P.2040

التقرير ITU-R P.2406

إن جمعية الاتصالات الراديوية 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 (RLAN) وبدالات الأعمال الخاصة اللاسلكية (WPBX) 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 فوائدها عديدة في مجالي تقديم الخدمات المتنقلة وخدمات الاتصالات الشخصية كشبكات الاستشعار بالترددات الراديوية والأجهزة اللاسلكية المشغلة في النطاقات التلفزيونية غير المستخدمة محلياً؛

هـ) 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 الأولى، 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 و 100 GHz وأنه ينبغي الرجوع إليها في الحالات التي تنطبق فيها الشروط داخل المباني وخارجها على حد سواء؛

ب) أن التوصية ITU-R P.2040 تقدم توجيهات بشأن آثار خواص مواد البناء وهياكل المباني على انتشار الموجات الراديوية؛

ج) أن التقرير ITU-R F.2406 يقدم معلومات أساسية إضافية عن كيفية الحصول على بيانات ونماذج القياس واشتقاقها في التوصية،

توصي

بضرورة استخدام المعلومات والطرائق المحددة في الملحق 1 لتقييم خصائص الانتشار وأنظمة الاتصالات الراديوية العاملة داخل المباني في مدى الترددات بين 300 MHz و 450 GHz.

الملحق 1

جدول المحتويات

الصفحة

3	.....	الملحق 1
4	.....	1 مقدمة
5	.....	2 تردي الانتشار وقياسات النوعية المتعلقة بالأنظمة الراديوية الداخلية
6	.....	3 نماذج خسارة الإرسال الأساسية
6	.....	1.3 نماذج عامة (مستقلة عن الموقع)
7	.....	2.3 النماذج المكيفة مع الموقع
11	.....	4 نماذج تمديد وقت الانتشار
11	.....	1.4 الانتشار عبر مسيرات متعددة
11	.....	2.4 الاستجابة النبضية
11	.....	3.4 جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر
16	.....	4.4 النماذج الإحصائية
16	.....	5.4 النماذج الخاصة بالموقع
17	.....	5 تأثير الاستقطاب
17	.....	1.5 حالة المسير في خط البصر

18	.....	2.5	حالة إعاقة المسير
19	.....	3.5	توجيه المطراف المتنقل
19	.....	6	تأثير المخطط الإشعاعي للهوائي
19	.....	1.6	خسارة القدرة المستقبلية الناجمة عن عرض حزمة الهوائي الاتجاهي
19	.....	2.6	خصائص تمديد التأخر والتمديد الزاوي
23	.....	7	تأثير موقع المرسل والمستقبل
23	.....	8	تأثير مواد البناء والأثاث
23	.....	9	تأثير حركة الأشياء في الغرفة
25	.....	10	نماذج الانتشار الزاوي
25	.....	1.10	نموذج المجموعة
26	.....	2.10	التوزيع الزاوي لموجات واردة من داخل مجموعة رقم i -th
26	.....	3.10	الانتشار الزاوي الاتجاهي المضاعف
26	.....	11	نموذج إحصائي عند الاستعمال الساكن
27	.....	1.11	تعريف
27	.....	2.11	نموذج النظام

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 محدوداً 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 بُعداً 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 تكتسبه هذه العوامل ينبغي عند البدء في تخطيط نظام راديوي داخلي معرفة الموقع المعني معرفة جيدة، أي من حيث الهندسة والمواد والأثاث والاستعمالات المتوقعة. 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 الترددي الذي يرتبط بظواهر الانتشار التي تُلاحظ في حالة الأنظمة الداخلية. وسيتم عرض نماذج كيفية مع الموقع كلما كان ذلك ممكناً. وفي كثير من الحالات تكون البيانات المتيسرة التي يمكن الاستناد إليها لإعداد نماذج محدودة، سواء تعلق الأمر بنطاقات الترددات أو بظروف الاختبار ولسوف يزداد عدد المعلومات التي يشملها هذا الملحق عندما يتوفر المزيد من البيانات. وبالمثل، ستزداد النماذج دقة باكتساب تجربة في مجال التطبيق، ولكن هذا الملحق يضم كل المعلومات المتيسرة حالياً.

2 تردّي الانتشار وقياسات النوعية المتعلقة بالأنظمة الراديوية الداخلية

تسبب الظواهر التالية، بصفة رئيسية، حالات تردّي 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 الممرات؛
- حركة الأشخاص والأشياء في الغرفة، بما في ذلك حركة أحد طرفي الوصلة الراديوية أو كلاهما، وهي تؤدي إلى حالات تردّي منها:

- خسارة الإرسال الأساسية - ولا تقتصر على خسارة الإرسال الأساسية في 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 الإرسال الأساسية؛
 - الانتشار بواسطة مسيرات متعددة تتأتى من المكونات المنعكسة والمنعرجة للموجة؛
 - عدم مواءمة الاستقطاب بسبب الترافف العشوائي للمطاريق المتنقلة.
- ويمكن وصف خدمات الاتصالات اللاسلكية الداخلية من خلال الخصائص التالية:
- معدل بيانات 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 البيانات بسرعات مختلفة ونقل الصور وخدمات الفيديو. ويحتوي الجدول 1 على قائمة بأهم الخصائص الرئيسية للخدمات النمطية.

الجدول 1

الخدمات النمطية وتردّي الانتشار

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

3 نماذج خسارة الإرسال الأساسية

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 الإرسال الراديوي الداخلي الأساسية من المحطة القاعدة إلى متنقل/محمول.

1.3 نماذج عامة (مستقلة عن الموقع)

ينطبق نموذج الموقع العام على الحالات التي تقع فيها محطات الإرسال والاستقبال في الطابق نفسه. وتُعطى خسارة الإرسال الأساسية المتوسطة بالمعادلة التالية:

$$(1) \quad L_b(d, f) = 10\alpha \log_{10}(d) + \beta + 10\gamma \log_{10}(f) \text{ dB}$$

مع متغير عشوائي غوسي $N(0, \sigma)$ متوسطه صفر بانحراف معياري σ (dB)،
حيث:

d : المسافة المباشرة ثلاثية الأبعاد بين محطتي الإرسال والاستقبال (m)

f : تردد التشغيل (GHz)

α : مُعامل مرتبط بزيادة خسارة الإرسال الأساسية مع المسافة

β : معامل مرتبط بقيمة تخالف خسارة الإرسال الأساسية

γ : معامل مرتبط بزيادة خسارة الإرسال الأساسية مع التردد

فيما يخص محاكاة مونتج كارلو خارج خط البصر (NLoS)، فإن خسارة الإرسال الأساسية الإضافية بالنسبة إلى خسارة الإرسال الأساسية في الفضاء الحر، L_{FS} ، لن تتجاوز $10 \log_{10}(10^{0.1A} + 1)$ (dB) حيث A هو متغير عشوائي بتوزع اسمي $N(\mu, \sigma)$ ، بمتوسط $\mu = L_b(d, f) - L_{FS}$ وانحراف معياري σ ، $L_{FS} = 20 \log_{10}(4 \times 10^9 \pi d f / c)$ ، حيث c هي سرعة الضوء بالأمتار في الثانية.

وترد في الجدول 2 قيم المعاملات الموصى بها لبيئات الانتشار داخل المباني.

الجدول 2

معاملات الخسارة الأساسية للإرسال

σ	γ	β	α	مدى المسافة (m)	مدى التردد (GHz)	LoS/NLoS	البيئة
3,76	2,03	34,62	1,46	27-2	83,5-0,3	LoS	مكتب
5,04	2,38	29,53	2,46	30-4	82,0-0,3	NLoS	
4,07	2,25	28,12	1,63	160-2	83,5-0,3	LoS	ممر
7,63	2,48	29,27	2,77	94-4	83,5-0,625	NLoS	
2,67	2,06	24,26	2,34	102-2	70,28-0,625	LoS	صناعية
9,00	1,34	22,42	3,66	110-5	70,28-0,625	NLoS	
3,28	2,37	28,82	1,61	21-2	82,0-0,625	LoS	قاعة مؤتمرات/محاضرات
3,67	2,67	28,13	2,07	25-4	82,0-7,075	NLoS	

2.3 النماذج المكيفة مع الموقع

النماذج المكيفة مع الموقع مفيدة أيضاً لتقييم خسارة الإرسال الأساسية أو شدة المجال. وتوجد نماذج للتنبؤ بشدة المجال في الداخل وهي تستند إلى النظرية الموحدة للانعراج (UTD) 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 كهرمغناطيسي 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 الإرسال الأساسية.

وعند استعمال هوائي اتجاهي، تتكون الخسارة الأساسية للإرسال الراديوي داخل المباني من متوسط خسارة الإرسال الأساسية وما يرتبط بها من قيم الخبو الناتج عن الحجب المصاحبة لها. وتراعي عدة نماذج لخسارة الإرسال الداخلي الأساسية توهين الإشارة المرتبطة بعبور عدة جدران و/أو طوابق. ويراعي النموذج 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 الطابق مبنى ما. وتقدم النظرية الموحدة للانعراج (UTD) وتقنيات تتبع الأشعة عموماً إمكانية أن تؤخذ في الاعتبار صراحة الخسارة الفردية بالنسبة إلى كل حائط يعبره الإرسال بدلاً من قيمة إجمالية للخسارة بحسب المسافة.

والقيمة الوسطى لخسارة الإرسال الأساسية لهوائيات الإرسال الاتجاهي ذات عرض الحزمة البالغ 40° إلى هوائي استقبال شامل الاتجاهات يقع في نفس الطابق داخل غرفة أو مساحة واحدة، ولا يفسح أي مجال للإرسال عبر الجدران، تتخذ شكل نموذج الموقع العام الوارد في المعادلة (1) مع المعلمات الواردة في الجدول 3.

الجدول 3

معاملات خسارة الإرسال الأساسية من الهوائيات لاتجاهية إلى الهوائيات شاملة الاتجاهات

σ	γ	β	α	مدى الترددات (GHz)	مدى المسافة (m)	LoS/NLoS	البيئة
2,92	2,38	29,3	1,43	(1)73-0,6	21-4	LoS	ممر
4,28	2,71	16,9	3,19		23-5,8	NLoS	
2,75	2,32	32	1,29		21,5-4,9	LoS	مكتب
3,04	2,61	14,1	3,46		29,2-14,2	NLoS	
2,29	2,43	24,6	1,84		25,7-5,8	LoS	صناعية
6,14	3,34	22,3	2,92		25,9-6,5	NLoS	

(1) نفترض بالنسبة إلى القيمتين 60 GHz و 70 GHz، أن انتشاراً داخل غرفة واحدة أو فضاء واحد ولا تأخذ 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).

ويمكن أيضاً لنموذج خسارة الإرسال الأساسية الخاص بالموقع استخدام النموذج التالي:

$$(2) \quad L_{total} = L(d_o) + N \log_{10} \frac{d}{d_o} + L_f(n)$$

حيث:

N : معامل خسارة القدرة بحسب المسافة

f : التردد (MHz)

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

d_o : المسافة المرجعية (m)

$L(d_o)$: خسارة الإرسال الأساسية عند d_o (dB)، في مسافة مرجعية d_o على بعد 1 m وبافتراض انتشار في الفضاء

الطلق $L(d_o) = 20 \log_{10} f - 28$ حيث وحدة التردد f هي MHz

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

n : عدد الطوابق بين محطة القاعدة والمطراف المحمول ($n \geq 0$)، $L_f = 0$ dB في حال $n = 0$.

ويحتوي الجدولان 4 و 5 على قيم معلمات نمطية، تستند إلى نتائج قياسات متنوعة. وترد معلومات مكتملة في آخر هذه الفقرة.

الجدول 4

معاملات خسارة القدرة، N ، لحساب خسارة الإرسال في الداخل

مراكز البيانات	الممرات	المصانع	المباني التجارية	المكاتب	التردد (GHz)
—	—	—	(1)27,6 (3),(2)17,9 (3),(2)24,8		28
—	—	—	(3),(2)18,6 (3),(2)25,9		38
—	(5),(2)19,0	—	—	(5)20,1	250
—	(5),(2)19,2	—	—	(5)20	275
(4)20,2	(4),(2)19,5	—	—	(4)20	300
—	(6),(2)19,6	—	—	(6)19,8	325
—	(7),(2)19,9	—	—	(7)20,8	340
—	(5),(2)20,1	—	—	(5)20,6	410

(1) محطة القطار (170 m × 45 m × 21 m(H)) ومحطة المطار (650 m × 82 m × 20 m(H)): حالة خارجة عن خط البصر (NLoS)، هوائي إرسال عرض حزمة نصف القدرة فيه تبلغ 60° ويُصب على ارتفاع 8 m، ويبلغ عرض حزمة هوائي الاستقبال 10° منصوباً على ارتفاع 1,5 m عن الأرضية. وقد حُصل على القيمة من كسب المسير الأقصى بين توجهات مختلفة لهوائي الإرسال والاستقبال.

(2) الرقم الأعلى مخصص لحالات خط البصر (LoS) والرقم الأدنى لحالات خارجة عن خط البصر (NLoS).

(3) تتماثل البيئات مع بيئات الحاشية (2) ويُصب هوائي المرسل (Tx) بعرض حزمة 60° على ارتفاع 8 m والمستقبل (Rx) بهوائي شامل الاتجاهات على ارتفاع 1,5 m.

(4) يبلغ عرض حزمة هوائي الإرسال والاستقبال 10°.

(5) يبلغ عرض حزمة هوائي الإرسال والاستقبال 8°.

(6) يبلغ عرض حزمة هوائي الإرسال والاستقبال 7°.

(7) يبلغ عرض حزمة هوائي الإرسال والاستقبال 9°.

الجدول 5

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

المباني التجارية	المكاتب	المباني السكنية	التردد (GHz)
-	9 (طابق واحد) 19 (طابقان) 24 (ثلاثة طوابق)	-	0,9
$6 + 3(n - 1)$	$15 + 4(n - 1)$	$4n$	2-1,8
-	14	⁽¹⁾ 10 (مبنى سكني) 5 (منزل)	2,4
-	18 (طابق واحد) 26 (طابقان)	-	3,5
-	16 (طابق واحد)	⁽¹⁾ 13 (مبنى سكني) ⁽²⁾ 7 (منزل)	5,2
-	22 (طابق واحد) 28 (طابقان)	-	5,8

(1) لكل جدار خرساني.

(2) جدران خشبية.

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 5,2 GHz أن متوسط الخسارة الإضافية الناتجة عن أرضية نمطية مُعدة من الإسمنت المقوى مع سقف "زائف" معلق يساوي عادة القيمة 20 dB، مع انحراف معياري قدره 1,5 dB وقد زادت أجهزة الإضاءة من متوسط الخسارة ليصل إلى 30 dB مع انحراف معياري قدره 3 dB، وزادت كذلك قنوات التهوية الواقعة تحت الأرضية متوسط الخسارة ليلعب 36 dB، مع انحراف معياري قدره 5 dB. 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 6 على قيم الانحراف المعياري (dB).

الجدول 6

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

الممرات	المصانع	المباني التجارية	المكاتب	التردد (GHz)
		(1)6,7 (3) (2) 1,4 (3) (2) 6,4	(2)3,4 (2)6,6	28
		(3) (2) 1,6 (3) (2) 5,5	(2)4,6 (2)6,8	38

- (1) محطة القطار (170 m × 45 m × 21 m(H)) ومحطة المطار (650 m × 82 m × 20 m(H)): حالة خارجة عن خط البصر (NLoS)، هوائي إرسال عرض حزمة نصف القدرة فيه تبلغ 60° ويُصب على ارتفاع 8 m، ويبلغ عرض حزمة هوائي الاستقبال 10° منصوباً على ارتفاع 1,5 m عن الأرضية. وقد حُصل على القيمة من كسب المسير الأقصى بين توجهات مختلفة لهوائي الإرسال والاستقبال.
- (2) الرقم الأعلى مخصص لحالات خط البصر والرقم الأدنى لحالات خارجة عن خط البصر (NLoS).
- (3) تماثل البيئات مع بيئات الحاشية (1) ويُصب هوائي المرسل (Tx) بعرض حزمة 60° على ارتفاع 8 m والمستقبل (Rx) بهوائي شامل الاتجاهات على ارتفاع 1,5 m.

- ورغم أن القياسات المتيسرة قد أُجريت في ظل ظروف متنوعة، مما يجعل أية مقارنة مباشرة صعبة، ومع أن الإبلاغ اقتصر على بيانات بعض نطاقات التردد فقط، فيمكن لنا استخلاص بعض النتائج العامة، لا سيما فيما يتعلق بالنطاق 900-2 000 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 الإرسال الأساسية في الممرات أقل من الخسارة في الفضاء الحر، ويبلغ معامل خسارة القدرة بحسب المسافة حوالي 18. وتعتبر متاجر البقالة المستطيلة بمثابة ممرات.
 - 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 بانخفاض معامل خسارة الإرسال الأساسية 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 المستقبلية، ومن جهة أخرى، كلما ازداد التردد يقل حجب منطقة فرينل وبالتالي تضعف الخسارة. وتخضع خسارة الإرسال الأساسية الحقيقية لهذه الآليات المتعارضة.

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 تقريبي 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 $d/3$). 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.

ويُعبّر 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 يُعبّر عنه بالنانوثانية وليس بالميكروثانية. وتحتوي هذه التوصية كذلك على تعريف لعدد من المعلامات التي تتميز بها المظاهر الجانبية للاستجابة النبضية.

وتختلف الاستجابة النبضية لقناة ما بحسب موقع المستقبل ويمكن أن تختلف كذلك بحسب الوقت. وهي تقاس عادة ويُبلّغ 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 T_D (انظر التوصية ITU-R P.1407) الذي لا تتجاوز كثافة القدرة بعده قيمةً 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 التريبع لتمديد التأخر

غالباً ما تتميز المظاهر الجانبية لتأخر القدرة بمعلمة واحدة أو أكثر كما هو مذكور أعلاه. وينبغي حساب هذه المعلامات انطلاقاً من مظاهر جانبية متوسطة امتداد على منطقة لها أبعاد عدة أطوال من الموجات. (تُستنتج خصائص جذر متوسط التريبع لتمديد التأخر في بعض الأحيان من مظاهر جانبية إفرادية، ثم يُحسب 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 جذر متوسط التريبع لتمديد التأخر 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 جذر متوسط التريبع لتمديد التأخر بل على نسبة القدرة المستقبلية 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 جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر عوضاً عن المظهر الجانبي لتأخر القدرة. ويمكن في هذه الحالة التعبير عن تقريب استجابة النبضة على النحو التالي:

$$(3) \quad h(t) = \begin{cases} e^{-t/S} & \text{for } 0 \leq t \leq t_{max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

حيث:

S : جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر

t_{max} : التأخر الأقصى

$$.S \ll t_{max}$$

وتكمن الفائدة من وراء استعمال جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر كعملية خرج النموذج في أنه يمكن تمثيل النموذج ببساطة في شكل جدول. ويحتوي الجدول 7 على خصائص تمديد التأخر النمطية، المقدرة انطلاقاً من القيم المتوسطة للمظاهر الجانبية للتأخر بالنسبة لثلاثة أنظمة داخلية. وفي الجدول 7 يمثل العمود باء القيم الوسيطة التي تحدث بصورة متواترة، ويقابل العمودان ألف وجيم قيمتي 10% و90% من التوزيع التراكمي. وتتطابق القيم الواردة في هذا الجدول مع الغرف الكبرى التي نجدها في غالب الأحيان في كل بيئة من البيئات التي تتخذ كمثال.

الجدول 7

معلومات جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر

التردد (GHz)	البيئة	الاستقطاب	استبانة التأخر الزمني (ns)	عرض حزمة Tx (بالدرجات)	عرض حزمة Rx (بالدرجات)	ألف (ns)	باء (ns)	جيم (ns)	ملاحظة بشأن ألف وباء وجيم
1,9	سكنية	VV	10	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	20	70	150	-
	مكتبية	VV	10	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	35	100	460	-
	تجارية	VV	10	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	55	150	500	-
2,25	استوديو تلفزيوني	VV	4,2	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	-	13 26	-	(3)
2,625	مكتبية	VV	1,8	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	8	11	12,5	(1)
		VV	1,8	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	10,74	13,74	20,15	(2)
	ممر	VV	1,8	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	8,49	18,53	25,16	-
	قمرة جوية	VV	1,8	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	7,98	11,89	14,47	-
	مصنع	VV	1,8	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	51,5	69,2	87,2	-

الجدول 7 (تابع)

ملاحظة بشأن ألف وباء وجيم	جيم (ns)	باء (ns)	ألف (ns)	عرض حزمة Rx (بالدرجات)	عرض حزمة Tx (بالدرجات)	استبانة التأخر الزمني (ns)	الاستقطاب	البيئة	التردد (GHz)
-	27	22	15	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	10	VV	سكنية	3,7
-	45	38	30	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	10	VV	مكتبية	
-	170	145	105	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	10	VV	تجارية	
-	30	23	17	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	10	VV	سكنية	5,2
-	110	60	38	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	10	VV	مكتبية	
-	205	190	135	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	10	VV	تجارية	
(3)	16,7 26,4	4,9 21,6	2,9 7,5	شامل الاتجاهات	18	1	VV	مصنع	14,15-12,65
(3)	8,7 22,9	2,8 14,3	1,2 7,6	شامل الاتجاهات	18	1	VV	مجموعة حواسيب	
(3)	23,7 16,3	12,9 11,4	4,7 7,2	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	ممر	16,4-14,9
حالة LoS	20,63	16,53	12,36	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	قاعة مؤتمرات	
(3)	33,5 26,5	20,5 21,6	5,3 12,6	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	مجموعة حواسيب	
(3)	19,4 28,1	11,6 23,3	4,4 18,0	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	مصنع	
(3)	25,5 23,2	17,5 17,8	9,7 12,3	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	مكتبية	
(3)	19,8 18,3	11,9 11,8	3,8 6,5	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	ممر	18,32-16,82
حالة LoS	23,56	18,73	12,16	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	قاعة مؤتمرات	
(3)	25,9 26,3	13,4 21,3	4,7 13,3	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	مجموعة حواسيب	
(3)	15,4 28,9	8,5 22,9	4,7 17,5	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	مصنع	
(3)	24,9 27,7	18,5 21,6	9,9 13,3	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	مكتبية	

الجدول 7 (تابع)

ملاحظة بشأن ألف وباء وجيم	جيم (ns)	باء (ns)	ألف (ns)	عرض حزمة Rx (بالدرجات)	عرض حزمة Tx (بالدرجات)	استبانة التأخر الزمني (ns)	الاستقطاب	البيئة	التردد (GHz)
(3)	12,1 29,8	7,7 17,2	4,9 5,1	شامل الاتجاهات	18	0,5	VV	مصنع	28,3-25,3
(3)	26,2 23,1	14,8 16,9	0,9 8,4	شامل الاتجاهات	18	0,5	VV	مجموعة حواسيب	
(3)	16,9 17,4	11,6 12,0	3,7 5,9	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	ممر	
حالة LoS	21,80	17,56	13,83	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	قاعة مؤتمرات	
(3)	29,3 23,6	17,0 16,7	6,5 13,1	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	مجموعة حواسيب	
(3)	15,6 28,5	9,5 22,5	5,3 15,9	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	مصنع	
(3)	20,9 21,2	15,3 16,0	9,4 8,6	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	1	VV	مكتبية	
(5, 3)	64 86	34 65	17 36	شامل الاتجاهات	60	2	VV	تجارية	28
(5)	14	2,5	1,2	35	35	0,45	ثنائي ⁽⁴⁾	مجموعة حواسيب	31,5-29,3
(7)	34	17,6	1,6	35	35	0,45			
(3)	23,1 19,8	13,2 13,2	5,8 4,0	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,67	VV	ممر	40,5-36
حالة LoS	18,97	15,21	10,84	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,67	VV	قاعة مؤتمرات	
(3)	31,0 22,3	17,0 16,7	6,5 10,7	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,67	VV	مجموعة حواسيب	
(3)	14,5 25,2	9,3 19,8	5,8 15,7	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,67	VV	مصنع	
(3)	17,1 16,7	9,7 12,6	5,6 9,8	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,67	VV	مكتبية	
(5, 3)	55 82	26 69	4 42	شامل الاتجاهات	40	2	VV	تجارية	38
(5)	2,89	0,96	0,69	18,4	56,3	0,5	HH/VV	مجموعة حواسيب	57-51
(12, 5)	29,7	10,7	2,14	18,4					
(5)	4,29	0,65	0,56	18,4	56,3	0,5	HH/VV	تجارية	
(12, 5)	26,7	15,8	1,6	18,4					
(5)	1,34	0,72	0,54	18,4	56,3	0,5	HH/VV	ممر	
(12, 5)	44,6	8,9	0,81	18,4					

الجدول 7 (تتمة)

ملاحظة بشأن ألف وباء وجيم	جيم (ns)	باء (ns)	ألف (ns)	عرض حزمة Rx (بالدرجات)	عرض حزمة Tx (بالدرجات)	استبانة التأخر الزمني (ns)	الاستقطاب	البيئة	التردد (GHz)
(8)	10,6	5,2	1,0	15,4	15,4	0,22	VV	مجموعة حواسيب	63,1-58,7
(9)	37,5	12	1,2	2,2	15,4	0,9	VV		
(10)	4	1,7	0,68	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,22	VV	مكتبية ⁽⁶⁾	
(11)	5,2	1,77	0,45	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,22	VV		
حالة LoS	4,7	2,6	1,7	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,5	VV	ممر	65,6-59,6
حالة LoS	17,45	13,17	8,76	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,5	VV	قاعة مؤتمرات	
حالة LoS	16,4	6,8	2,5	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,5	VV	مجموعة حواسيب	
(3)	12,5 21,7	7,4 11,6	5,5 5,5	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,5	VV	مصنع	
(3)	20,9 17,9	8,7 10,1	5,1 3,5	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,5	VV	مكتبية	
(5)	2,4	0,57	0,36	14,4	40	0,5	HH/VV	مجموعة حواسيب	
(12-5)	28,1	10,9	1,1	14,4					
(5)	6,39	0,5	0,33	14,4	40	0,5	HH/VV	مكتبية/ق اعة مدرسة	
(12-5)	25,9	12,6	1,59	14,4					
(5)	1,2	0,47	0,36	14,4	40	0,5	HH/VV	ممر	
(12-5)	35,2	6,11	0,49	14,4					
(5, 3)	8,2 26,4	1,8 10,2	0,6 3,9	شامل الاتجاهات	18	0,5	VV	مصنع	73-67
(5, 3)	17,1 24,1	10,1 13,8	6,5 6,6	شامل الاتجاهات	18	0,5	VV	مجموعة حواسيب	
حالة LoS	14,9	7,6	1,7	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,5	VV	ممر	
حالة LoS	20,06	13,71	7,59	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,5	VV	قاعة مؤتمرات	
حالة LoS	30,3	15,0	5,8	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,5	VV	مجموعة حواسيب	
(3)	17,3 22,8	11,1 14,7	4,4 6,2	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,5	VV	مصنع	
(3)	13,6 16,8	7,0 9,1	3,2 5,9	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	0,5	VV	مكتبية	

ملاحظات بشأن الجدول 7

- (1) هوائياً الإرسال (Tx) والاستقبال (Rx) على ارتفاع السقف البالغ 2,6 m
- (2) هوائياً الإرسال (Tx) والاستقبال (Rx) وعلى مستوى المكتب البالغ 1,5 m.
- (3) القيمتان العليا والدنيا لحالي LoS و NLoS على التوالي.
- (4) القيم المتوسطة لكل من VV و VH و HV و HH.
- (5) عتبة 20 dB⁽⁶⁾ و 25 dB⁽⁷⁾ و 30 dB.
- (8) عتبة 30 dB، بتوجيه المستقبل نحو المرسل.
- (9) عتبة 20 dB بدوران هوائي المستقبل 360 درجة.
- (10) المرسل (Tx) والمستقبل (Rx) من موضع على الجسم إلى موضع على الجسم و⁽¹¹⁾ من موضع على الجسم إلى موضع خارج الجسم.
- (12) أدير هوائي المستقبل بمخروط مقدار كل منها 5 درجات حول 360 درجة أثناء القياسات. وتمثل هذه القيمة تمديد تأخر اتجاهياً عندما لا يقع خط تسديد هوائي الاستقبال على استقامة واحدة مع اتجاه المرسل.

يتزايد تمديد التأخر، داخل مبنى معين، بازدياد المسافة بين الهوائيات، وبالتالي يتزايد بتزايد خسارة الإرسال الأساسية وعندما تزداد المسافة بين الهوائيات كثيراً ما يلاحظ أن المسير يحتوي على عوائق وأن الإشارة المستقبلية تتكون كلياً من إشارات تنتشر بواسطة الانتثار. تكون S ، وهي جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر، متناسبة عملياً مع F_s ، منطقة المساحة على الأرض. ويتم الحصول عليها من المعادلة (4).

$$(4) \quad 10 \log_{10} S = 2.3 \log_{10}(F_s) + 11.0$$

حيث تُقدر F_s ، بالأمتار المربعة و S بنانوثانية على التوالي.

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 F_s القصوى المستعملة في القياسات 1000 m². وتساوي القيمة الوسيطة والانحراف المعياري لخطأ التقدير القيمتين -1,6 ns و 24,3 ns.

ويتراوح الانحراف المعياري للمقدار S عندما يُقدر بوحدة dB، بين القيمتين 0,7 و 1,2 dB.

4.4 النماذج الإحصائية

يؤدي الانتشار متعدد المسيرات إلى انتقائية ترددية. ويتحدد مدى الانتقائية الترددية من عرض النطاق المتناسك ومتوسط عرض نطاق الخبو وتردد عبور المستوى على النحو المفصل في التوصية ITU-R P.1407. وتبلغ نسبة قيم متوسط عرض نطاق الخبو التي هبطت دون عتبة 6 dB في القياسات ضمن بيئات داخل المباني تمثل بيئة مختبر ومكتب في نطاق 2,38 GHz وفي إستوديوهات تلفزيونية في نطاق 2,25 GHz، و 27% و 21%، على التوالي. وتبلغ قيمتا تردد عبور المستوى المقابلتان: 0,12 لكل MHz و 0,24 لكل MHz.

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 الميدان 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 المستقبل بالنسبة إلى كل السطوح العاكسة في البيئة. وتُحسب إحداثيات كل الصور ثم تُرسم الأشعة في اتجاه هذه الصور.

وفي تقنية إطلاق الأشعة، يُطلق 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:

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

حيث:

$h(t)$: الاستجابة النبضية

N : عدد الأشعة الواردة

M_m : عدد انعكاسات الشعاع n

M_{pn} : عدد اختراقات الشعاع n

Γ_{nu} : 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 والمختزقة (انظر المعادلة 5)، يجب أن تؤخذ في الاعتبار كذلك الأشعة المنعرجة والمتناثرة للحصول على نمذجة جيدة للإشارة المستقبلية. وهي على وجه الخصوص داخل الممرات ذات الزوايا وحال انتشارات أخرى شبيهة بها. ويمكن استعمال النظرية الموحدة للانعراج لحساب الأشعة المنعرجة.

5 تأثير الاستقطاب

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 الورد والسماحية المعقدة للمواد (انظر معادلات فرينل بشأن الانعكاس). وتُوزع زوايا ورود المكونات بحسب عناصر البنية وموقع المرسل والمستقبل. وبالتالي يمكن للاستقطاب أن يؤثر تأثيراً كبيراً في خصائص الانتشار الداخلي.

1.5 حالة المسير في خط البصر

1.1.5 تمديد التأخير

من المتفق عليه أن جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر في حالة قنوات خط البصر (LOS) والهوائيات التوجيهية يقل عما هو عليه في حالة الهوائيات شاملة الاتجاه كما يقل في حالة الاستقطاب الدائري (CP) بالمقارنة مع حالة الاستقطاب الخطي (LP). ومن ثم يسمح استعمال الهوائي الاتجاهي ذي الاستقطاب الدائري بالتخفيض بصفة جلية من تمديد التأخر.

ويُعزى تأثير الاستقطاب بصفة أساسية إلى أنه عندما تكون زاوية الورد 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 توحى بذلك الدراسات النظرية وتظهره تجارب الانتشار في الداخل التي أُجريت في مدى الترددات 1,3-60 GHz، 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) يُكبّت 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 (ممر طويل، مثلاً). ويقال كذلك تعيّر جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر على وصلة متنقلة عند استعمال هوائيات ذات استقطاب دائري.

2.1.5 نسبة تمييز الاستقطاب المتقاطع (XPR)

تتولد مكونات الإشارة ذات الاستقطاب المتقاطع من جراء الانعكاس والانكسار. ومن المعروف على نطاق واسع أن خصائص ارتباط الخبو بين الهوائيات المستقطبة رأسياً تتسم بمعامل ترابط منخفض جداً. ويجري تطوير تقنيات لتنوع الاستقطاب وأنظمة ذات مدخلات متعددة ومخرجات متعددة (MIMO) بهوائيات مستقطبة رأسياً بحيث تستخدم خصائص الخبو هذه. ويعتبر استخدام تقنية تنوع الاستقطاب أحد الحلول التي من شأنها تحسين القدرة المستقبلية، ويعتمد تأثير هذه التقنية إلى حد كبير على خصائص النسبة XPR. وعلاوةً على ذلك، يمكن تحسين سعة القناة باستعمال مكونات ذات استقطاب متقاطع في الأنظمة MIMO بشكل مناسب ومن ثم يمكن تحسين جودة الاتصالات عن طريق الاستعمال الفعال للمعلومات المتعلقة بالموجات ذات الاستقطاب المتقاطع في نظام لا سلكي. ويبين الجدول 8 نتائج القياسات للمتوسط والقيمة المتوسطة للنسبة XPR في كل بيئة.

الجدول 8

أمثلة لقيم النسبة XPR

ملاحظات	XPR (dB)	تشكيل الهوائيات	البيئة	التردد (GHz)
قياس	لا يوجد	الحالة 1	مكتب	5,2
	6,39 (متوسط) 6,55 (قيمة متوسطة)	الحالة 2		
	4,74 (متوسط) 4,38 (قيمة متوسطة)	الحالة 3		
	8,36 (متوسط) 7,83 (قيمة متوسطة)	الحالة 1	قاعة مؤتمرات	
	6,68 (متوسط) 6,33 (قيمة متوسطة)	الحالة 2		
	لا يوجد	الحالة 3		

- الحالة 1: يتم نصب هوائيات الإرسال والاستقبال بحيث تكون أعلى من ارتفاع العوائق.
 الحالة 2: يُنصب هوائي الإرسال أعلى من ارتفاع العوائق ويُنصب هوائي الاستقبال على ارتفاع مماثل لارتفاع العوائق.
 الحالة 3: تُنصب هوائيات الإرسال والاستقبال على ارتفاعات مماثلة لارتفاع العوائق.

2.5 حالة إعاقة المسير

عندما يحتوي المسير المباشر على عوائق يمكن لتأثير الاستقطاب واتجاهية الهوائي على جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر 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 توحى بأن تأثير الاستقطاب واتجاهية الهوائي على جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر يختلف كثيراً عما هو عليه في مسير خط البصر. فقد أمكن على سبيل المثال، باستعمال هوائي إرسال شامل

الاتجاهات ذي استقطاب أفقي وهوائي استقبال اتجاهاً ذي استقطاب دائري، الحصول على أدنى جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر 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 وانتشار للإشارة. وغالباً ما تُنثر الموجة المرسلّة ويصبح استقطابها الأصلي استقطاباً متعامداً. ويزيد، في هذه الظروف، اقتران الاستقطابات المتقاطعة من احتمال استقبال جيد بالاستعانة بأجهزة استقبال محمولة يكون هوائها موجهاً بطريقة عشوائية. وقد أظهرت قياسات اقتران الاستقطابات المتقاطعة التي أجريت عند 816 MHz سوية عالية من الاقتران.

6 تأثير المخطط الإشعاعي للهوائي

يُتوقع أن تستخدم الأنظمة الراديوية العاملة بالموجات المليمترية هوائيات اتجاهية و/أو تقنيات مختلفة لتشكيل الحزم مع صفيفات هوائيات متعددة للتغلب على خسارة الإرسال الأساسية المرتفعة نسبياً وإنشاء وصلات اتصالات موثوقة. ومن اللازم دراسة تأثير عرض حزمة الهوائي على خصائص الانتشار الراديوي.

1.6 خسارة القدرة المستقبلية الناجمة عن عرض حزمة الهوائي الاتجاهاً

عند استقبال الإشارات بهوائي له عرض حزمة محدد، يصبح عدد مكونات الإشارات عبر مسيرات متعددة أقل مقارنةً بعددها في حال استخدام هوائي استقبال شامل الاتجاهات، وهو ما يؤدي إلى خسارة إضافية في القدرة يمكن حسابها بالمعادلة التالية:

$$(6) \quad L_{\text{beamforming}}(d, f, W_{\phi}) = L^{\text{omni}}(d, f) + \Delta L(W_{\phi}) \text{ (dB)}$$

حيث تشير L^{omni} إلى خسارة الإرسال الأساسية شاملة الاتجاهات، المبينة في المعادلة (1)، ويمكن حساب ΔL على النحو التالي:

$$(7) \quad \Delta L(W_{\phi}) = \eta \left(\frac{1}{W_{\phi}} - \frac{1}{360^{\circ}} \right), \quad 10^{\circ} \leq W_{\phi} \leq 360^{\circ}$$

حيث تشير W_{ϕ} إلى عرض الحزمة عند منتصف قدرة (HPBW) هوائي اتجاهاً (تشكيل الحزم). ويسرد الجدول 9 قيم η الناتجة عن قياسات مجموعة في بيئات تجارية داخلية في مديي التردد 28 GHz و 38 GHz.

الجدول 9

قيم η الثابتة للخسارة الإضافية في القدرة بسبب تشكيل عرض الحزمة W_{ϕ}

η	نقط الوصلة	التردد (GHz)	البيئة
28,46	خط البصر (LOS)	28	تجارية
70,54	الخروج عن خط البصر (NLOS)		
26,66	خط البصر (LOS)	38	
76,77	الخروج عن خط البصر (NLOS)		

2.6 خصائص تمديد التأخر والتمديد الزاوي

بما أن مكونات الانتشار عبر مسيرات متعددة تتوزع بحسب زاوية ورودها، فإن المكونات الواقعة خارج فتحة حزمة الهوائي تُستعاد مكانياً باستعمال هوائي اتجاهاً بحيث يمكن خفض تمديد التأخر والتمديد الزاوي. وتبين بعض قياسات الانتشار في الداخل والمحاكاة بواسطة مرسوم الأشعة التي أجريت عند 60 GHz 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

التأخرة أفضل عندما تكون فتحات الحزمة أضيق. ويعطي الجدول 10 مثلاً عن تأثير اتجاهية الهوائي على جذر متوسط التريبيع لتمديد التأخر في ظروف مستقرة، عندما لا تتجاوز هذه المعلمة عند المئين 90 وهو مستخلص من محاكاة بواسطة مرسوم الأشعة عند 60 GHz مكتب فارغ. ومن الجدير بالذكر أن التقليل من جذر متوسط التريبيع لتمديد التأخر 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 10

مثال على تأثير اتجاهية الهوائي على جذر متوسط التريبيع لتمديد التأخر في ظروف مستقرة

ملاحظات	أبعاد الغرفة (m)	جذر متوسط التريبيع لتمديد التأخر في ظروف مستقرة (المئين 90) (ns)	فتحة حزمة هوائي الاستقبال (درجات)	هوائي الإرسال	التردد (GHz)
مرسوم الأشعة	7,8 × 13,5	17	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	60
	حجرة مكتب فارغة	16	60		
		5	10		
		1	5		
مرسوم الأشعة NLoS	8,6 × 13,0 حجرة مكتب فارغة	22	شامل الاتجاهات	شامل الاتجاهات	60
		21	60		
		10	10		
		6	5		

وقد طُوِّرت طرائق للتنبؤ بالتأخر والانتشار الزاوي فيما يتعلق بعرض حزمة الهوائي استناداً إلى قياسات في بيئات مكتبية وممرات ومراكز بيانات وتجارية نمطية على ترددات 28 و 28,5 و 38 و 60 و 83,5 GHz. ولاشتقاق خصائص التوزيع متعدد المسيرات من حزم هوائي ضيقة إلى عريضة، جُمع بين استجابات نبضة القناة المستخلصة من استعمال صفيح هوائيات بوقية أو تدوير هوائي بوقية حزمته ضيقة في ميادين القدرة والتأخر والزاوية.

ويعتمد جذر متوسط التريبيع (r.m.s.) لتمديد التأخر، DS ، على عرض حزمة نصف القدرة للهوائي θ (بالدرجات):

$$(8) \quad DS(\theta) = \alpha \times \log_{10} \theta \quad \text{ns}$$

حيث α هو معامل جذر متوسط التريبيع لتمديد التأخر ويعرّف مدى θ على أنه $1^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$. ويعرض الجدول 11 القيم النمطية للمعاملات والانحراف المعياري σ بناءً على كل ظرف من ظروف قياس. وتمثل معاملات تمديد التأخر الحالات التي توجّه فيها خطوط تسديد الهوائيات بحيث تحقق أقصى قدرة استقبال في حالات خط البصر (LoS) والخروج عن خط البصر (NLoS) على التوالي.

الجدول 11

المعاملات النمطية لجذر متوسط التربيع (r.m.s.) لتمديد التأخر

معاملات جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر		ظروف القياس							
σ (ns)	α	فتحة حزمة هوائي الاستقبال Rx (درجات)	فتحة حزمة هوائي الإرسال Tx (درجات)	المدى (m)	h_2 (m)	h_1 (m)	السيناريو	البيئة	f (GHz)
16,11	⁽¹⁾ 8,25	⁽³⁾ 10	60	80-8	1,5	8	LoS	محطة قطار	28
27,22	⁽¹⁾ 37,54			NLoS					
15,98	⁽¹⁾ 7,53			200-8			LoS	محطة مطار	
96,57	⁽¹⁾ 63,9			NLoS					
0,22	1,33	⁽⁴⁾ 45	شاملة الاتجاهات	15-3,5	1,6	2,5	LoS	مكتبية	28,5
3,02	3,96			159-6			LoS	ممر	
0,31	1,02			37-13			NLoS		
4,33	⁽¹⁾ 4,18	⁽³⁾ 10	40	80-8	1,5	8	LoS	محطة قطار	38
28,48	⁽¹⁾ 24,85			NLoS					
14,13	⁽¹⁾ 4,46			200-8			LoS	محطة مطار	
80,72	⁽¹⁾ 54,54			NLoS					
12	⁽¹⁾ 1,16	⁽³⁾ 10	شاملة الاتجاهات	24-7	1,2	2,5	LoS	مكتب	
21,8	⁽¹⁾ 15,13			NLoS					
1,10	1,67	⁽⁵⁾ 22,5	⁽²⁾ 180	15-3,5	1,6	2,5	LoS	مكتبية	60,5
8,44	1,20			159-11			LoS	ممر	
0,60	1,38			37-13			NLoS		
0,95	1,86			14,5-4			2,2	2,2		LoS	مركز بيانات
0,91	2,79	⁽⁴⁾ 45	شاملة الاتجاهات	15-3,5	1,6	2,5	LoS	مكتبية	83,5
1,21	4,44			159-6			LoS	ممر	
1,19	3,01			37-13			NLoS		

(1) القيمة صالحة عندما يحقق مدى الزاوية θ متراجحة $120 \leq \theta \leq 10^\circ$.

(2) استعمل في القياسات صفيف من 8 هوائيات بوقية لكل منها فتحة حزمة سمتية زاويتها $22,5^\circ$.

(3) جرى تدوير هوائي بوقية بزاوية 10° حول 360 درجة عند المستقبل.

(4) استعمل في المستقبل صفيف من 16 هوائياً بوقياً، لكل منها فتحة حزمة سمتية زاويتها 45° .

(5) استعمل في المستقبل صفيف من 16 هوائياً بوقياً، لكل منها فتحة حزمة سمتية زاويتها $22,5^\circ$.

ويعتمد جذر متوسط التربيع لتمديد التأخر (r.m.s.)، AS، على عرض حزمة نصف القدرة للهوائي θ (بالدرجات):

$$(9) \quad AS(\theta) = \alpha \times \theta^\beta \quad \text{degree}$$

حيث α و β هما معاملا جذر متوسط التربيع للتمديد الزاوي ويعرّف مدى θ على أنه $1^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$. ويعرض الجدول 12 القيم النمطية للمعاملات والانحراف المعياري σ بناءً على كل ظرف من ظروف قياس. وتمثل معاملات التمدد الزاوي الحالات التي توجّه فيها خطوط تسديد الهوائيات بحيث تحقق أقصى قدرة استقبال في حالات خط البصر (LoS) والخروج عن خط البصر (NLoS) على التوالي.

الجدول 12

المعاملات النمطية لجذر متوسط التربيع (r.m.s.) للتمديد الزاوي

معاملات جذر متوسط التربيع للتمديد الزاوي			ظروف القياس								
σ (درجات)	β	A	فتحة حزمة هوائي الاستقبال Rx (درجات)	فتحة حزمة هوائي الإرسال Tx (درجات)	المدى (m)	h_2 (m)	h_1 (m)	السيناريو	البيئة	f (GHz)	
2,3	0,77	^(3,1) 0,5	⁽⁵⁾ 10	60	80-8	1,5	8	LoS	محطة قطار	28	
2,32	1,0	^(3,1) 0,25			NLoS						
2,18	0,49	^(3,1) 1,2			200-8			LoS	محطة مطار		
3,12	0,96	^(3,1) 0,3			NLoS						
0,91 0,28	1,53 0,22	⁽³⁾ 0,005 ⁽⁴⁾ 1,95	⁽⁶⁾ 45	شاملة الاتجاهات	15-3,5	1,6	2,5	LoS	مكتب		
2,15 0,47	0,47 0,07	⁽³⁾ 0,68 ⁽⁴⁾ 6,1			159-6			LoS	ممر		
1,27 0,17	0,89 0,34	⁽³⁾ 0,115 ⁽⁴⁾ 0,65			37-13			NLoS			
3,36	0,54	^(3,1) 1,14	⁽⁵⁾ 10	40	80-8	1,5	8	LoS	محطة قطار		38
3,24	1,1	^(3,1) 0,16			NLoS						
1,36	0,34	^(3,1) 2,0			200-8			LoS	محطة مطار		
2,99	0,93	^(3,1) 0,34			NLoS						
5,58	1,22	^(3,1) 0,07	⁽⁵⁾ 10	شاملة الاتجاهات	24-7	1,2	2,5	LoS	مكتب		
4,81	1,07	^(3,1) 0,17						NLoS			
0,72 0,08	1,44 0,26	⁽³⁾ 0,008 ⁽⁴⁾ 0,8	⁽⁷⁾ 22,5	⁽²⁾ 180	15-3,5	1,6	2,5	LoS	مكتب	60,5	
4,42 0,21	4,48 0,07	⁽³⁾ 12-4e ⁽⁴⁾ 2,42			159-11			LoS	ممر		
2,56 0,19	0,28 0,25	⁽³⁾ 6,425 ⁽⁴⁾ 0,92			37-13			NLoS			
1,47 0,14	0,99 0,14	⁽³⁾ 0,094 ⁽⁴⁾ 1,83			14,5-4			2,2	2,2		LoS	مركز بيانات
0,62 0,19	1,19 0,28	⁽³⁾ 0,038 ⁽⁴⁾ 1,05	⁽⁶⁾ 45	شاملة الاتجاهات	15-3,5	1,6	2,5	LoS	مكتب		83,5
1,71 0,29	0,89 0,16	⁽³⁾ 0,13 ⁽⁴⁾ 2,9			159-6			LoS	ممر		
1,01 0,23	1,05 0,31	⁽³⁾ 0,084 ⁽⁴⁾ 0,96			37-13			NLoS			

ملاحظات بشأن الجدول 12

- (1) القيمة صالحة عندما يحقق مدى الزاوية θ متراجحة $120^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$.
- (2) استعمل في القياسات صفيف من 8 هوائيات بوقية لكل منها فتحة حزمة سمتية زاويتها $22,5^\circ$.
- (3) الانتشار الزاوي في الاتجاه السمتي.
- (4) الانتشار الزاوي في اتجاه الارتفاع.
- (5) جرى تدوير هوائي بوقي بزاوية 10° حول 360 درجة عند المستقبل.
- (6) استعمل في المستقبل صفيف من 16 هوائياً بوقياً، لكل منها فتحة حزمة سمتية زاويتها 45° .
- (7) استعمل في المستقبل صفيف من 16 هوائياً بوقياً، لكل منها فتحة حزمة سمتية زاويتها $22,5^\circ$.

7 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).

8 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 سماحتها 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 بيانات دخل أساسية، وترد هذه المعلومات في التوصية ITU-R P.2040. 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 الإرسال الأساسية الذي ورد وصفه في الفقرة 3.

9 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 البيانات الذي سيستعمل في غالب الأحيان، وبالتالي يمكن أن تُعامل 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 بيانات 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 و 8 dB من سوية قدرة الإشارة المستقبلية؛ وعلاوةً 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 المستقبلية. وتبين القياسات التي أجريت عند 900 MHz، بهوائي ثنائي الأقطاب، أن سوية الإشارة المستقبلية 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 مقارنةً بقدرة الإشارة المستقبلية 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 البيانات. وقد بينت القياسات التي أجريت عند 37 GHz في ممر مبنى مكاتب أن الخبو الذي يتراوح بين 10 و 15 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 النمطي على عمق الخبو. وبالنسبة إلى هذه القياسات، عندما كان عمق الخبو 10 dB، بلغ متوسط المدة 0,11 s والانحراف النمطي 0,47 s. وعندما كان عمق الخبو 15 dB بلغ متوسط المدة 0,05 s والانحراف النمطي 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 و 0,25 و 0,09 ثانية بالنسبة إلى عمق خبو قدره 10 dB و 20 dB و 30 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:

$$(10) \quad \bar{N} = 260 \times D_p$$

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:

$$(11) \quad T = \bar{T}_s \times \bar{N}$$

حيث \bar{T}_s متوسط مدة الخبو.

ويتراوح عدد أحداث ظاهرة الحجب الناتج عن جسم الإنسان خلال ساعة في قاعة عرض بين 180 و 280، بالنسبة إلى قيمة D_p بين 0,09 و 0,13.

ويتأثر ترابط خسارة الإرسال الأساسية والمسافة في مركز تجاري يقع تحت الأرض بظاهرة الحجب الناتج عن جسم الإنسان. وتقدر خسارة الإرسال الأساسية بواسطة المعادلة التالية، باستعمال المعلمات الواردة في الجدول 13.

$$(12) \quad L(x) = -10 \cdot \alpha \{1.4 - \log_{10}(f) - \log_{10}(x)\} + \delta \cdot x + C \quad \text{dB}$$

حيث:

f : التردد (MHz)

x : المسافة (m).

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 و 200 m.

2.10 التوزيع الزاوي لموجات واردة من داخل مجموعة رقم i -th

يعبر عن دالة كثافة الاحتمال للتوزيع الزاوية لموجات واردة من مجموعة ما كالتالي:

$$P_i(\varphi - \Theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_i} \cdot \exp\left(-\sqrt{2} \frac{|\varphi - \Theta_i|}{\sigma_i}\right) \quad (13)$$

حيث φ هي زاوية ورود الموجات الواردة من داخل مجموعة ما بالدرجات وذلك بالنسبة إلى الزاوية المرجعية σ_i هي قيم الانحراف المعياري للانتشار الزاوي بالدرجات.

وترد في الجدول 14 معلمات الانتشار الزاوي في بيئة داخل المباني.

الجدول 14

معلمات الانتشار الزاوي في بيئة داخل المباني

NLoS		LoS		
المدى (بالدرجات)	المتوسط (بالدرجات)	المدى (بالدرجات)	المتوسط (بالدرجات)	
-	-	25,6-21,8	23,7	ردهة
54	54,0	28,8-3,93	14,8	مكتب
46,8-4,27	25,5	36-6,89	21,4	منزل
37-2	14,76	5	5	ممر

3.10 الانتشار الزاوي الاتجاهي المضاعف

في نموذج انتشار اتصالات عريضة النطاق تستخدم صفائف هوائيات متعددة عند المرسل والمستقبل، يسري التوزيع الزاوي عند محطتي الإرسال والاستقبال. ومن قياسات عرض نطاقها 240 MHz في النطاق 2,38 GHz، يرد في الجدول 15 مستوى عتبة 20 dB لجذر متوسط التربيع (r.m.s.) للانتشار الزاوي في بيئة ممر ومكتب داخل المباني.

الجدول 15

الانتشار الزاوي الاتجاهي المضاعف

جذر متوسط التربيع (r.m.s.) للانتشار الزاوي في المحطة 2 (بالدرجات)	ارتفاع المحطة 2 (m)	جذر متوسط التربيع (r.m.s.) للانتشار الزاوي في المحطة 1 (بالدرجات)	ارتفاع المحطة 1 (m)	
69,7	1,7	68,5	1,9	ممر ومكتب

11 نموذج إحصائي عند الاستعمال الساكن

عندما تستعمل المطاريف اللاسلكية مثل الهواتف الخلوية والشبكات المحلية اللاسلكية (WLAN) داخل المباني، فإنها تعتبر في الأساس ساكنة. وعند الاستعمال الساكن، فإن المطاريف اللاسلكية في حد ذاتها لا يتحرك، ولكن البيئة حوله تتغير من جراء تحرك الأشياء الحاجبة مثل الأشخاص. ومن أجل التقييم الدقيق لجودة الاتصالات في هذه البيئة، يقدم نموذج قناة من أجل ظروف السكون داخل المباني، وهو يقدم خصائص إحصائية لكل من دالة كثافة الاحتمال (PDF) ودالة الترابط الآلي لتغاير المستوى المستقبل في نفس الوقت.

وتجري مناقشة نموذجي القناة لكل من بيئتي خط البصر (LoS) وغير خط البصر (NLoS) داخل المباني.

1.11 تعاريف

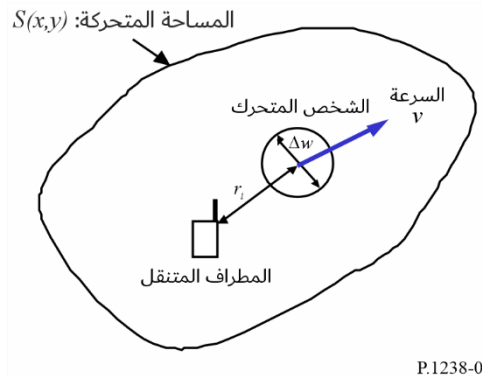
- N_{person} : عدد الأشخاص المتحركين
- Δw : القطر المكافئ للشخص المتحرك (m)
- v : سرعة حركة الشخص (m/s)
- P_m : القدرة الإجمالية للمسيرات المتعددة
- $S(x,y)$: مخطط المساحة المتحركة
- f_T : الإزاحة القصوى للتردد لمطراف متنقل ساكن
- r_p : القدرة المستقبلية عند المطراف المتنقل
- f : التردد (Hz)
- $p(r_p, k)$: دالة كثافة الاحتمال (PDF) للقدرة المستقبلية معرفة حسب توزيع ناكاغامي-رايس مع العامل K
- K : عامل محدد في توزيع ناكاغامي-رايس
- $R(\Delta t)$: دالة الترابط الآلي للمستقبل
- $R_M(\Delta t)$: معامل الترابط الآلي للمستقبل
- $P(f)$: طيف القدرة
- $P_N(f)$: طيف القدرة معايير بالقدرة $P(0)$.

2.11 نموذج النظام

يبين الشكل 2 نموذج النظام. وتمثل الأشياء المتحركة قيد البحث في الأشخاص فقط؛ ويجري تمثيل الشخص i بوصفه قرص قطره Δw (m) يبعد عن المطراف المتنقل (MT) بالمسافة r_i (m). ويمشي كل شخص متحرك في واحد من الاتجاهات العشوائية التي تنحصر بين 0 و 2π بسرعة ثابتة v (m/s) ويتحرك في مساحة عشوائية $S(x,y)$ حول MT. ويبلغ عدد الأشخاص المتحركين N_{person} ويمتص كل شخص متحرك جزءاً من طاقة المسيرات التي تقطع عرضه (قطره)، Δw . وتصل المسيرات المتعددة عند المطراف بشكل غير منتظم من جميع الاتجاهات الأفقية. ويبين الشكلان 3 و4 غرفتين نمطيتين ثم تناولهما هما غرفة مستطيلة وأخرى دائرية على التوالي.

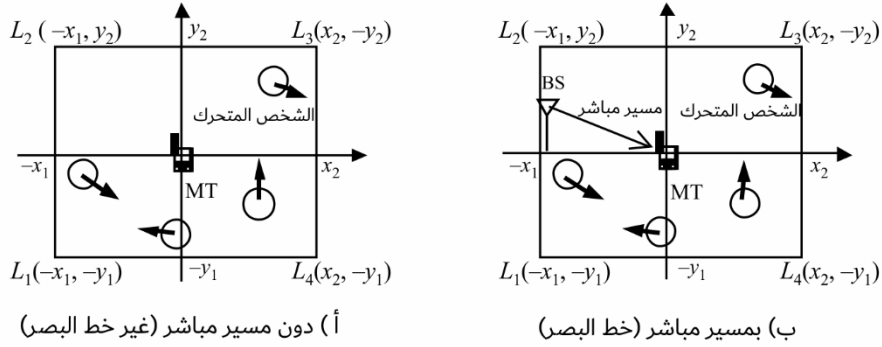
الشكل 2

نموذج النظام



الشكل 3

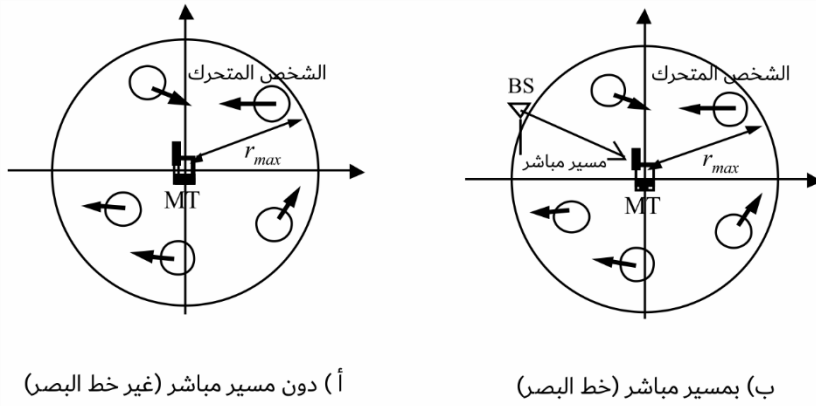
مخطط لجرة مستطيلة



P.1238-03

الشكل 4

مخطط غرفة دائرية



P.1238-04

1.2.11 دالة كثافة الاحتمال للقدره المستقبله

تُعطي دالة كثافة الاحتمال للقدره المستقبله، r_p ، عند المطراف المتنقل بتوزيع ناكاغامي-رايس على النحو التالي:

$$(14) \quad p(r_p, K) = (K + 1) \exp[-(K + 1)r_p - K] I_0(\sqrt{4(K + 1)Kr_p})$$

حيث $I_0(x)$ عبارة عن دالة بيسيل معدلة من النوع الأول والرتبة صفر و K يمثل العامل K التالي:

$$(15) \quad K \equiv K(x) = \frac{|e_{Direct}(x) + e_s(x)|^2}{\left(\frac{N_{person} P_m \Delta w S_{Shape}}{2\pi} \right)}$$

حيث:

$$(16) S_{Shape} = \begin{cases} \frac{1}{(x_2 + x_1)(y_2 + y_1)} \begin{pmatrix} -y_1 \log(-x_1 + \sqrt{x_1^2 + y_1^2}) - x_1 \log(-y_1 + \sqrt{x_1^2 + y_1^2}) \\ + y_1 \log(x_2 + \sqrt{x_2^2 + y_1^2}) - x_2 \log(-y_1 + \sqrt{x_2^2 + y_1^2}) \\ - y_2 \log(-x_1 + \sqrt{x_1^2 + y_2^2}) + x_1 \log(y_2 + \sqrt{x_1^2 + y_2^2}) \\ + y_2 \log(x_2 + \sqrt{x_2^2 + y_2^2}) + x_2 \log(y_2 + \sqrt{x_2^2 + y_2^2}) \end{pmatrix} & \text{(for rectangular shaped room)} \\ \frac{2}{r_{max}} & \text{(for circular shaped room)} \end{cases}$$

وتمثل $e_{Direct}(x)$ هنا الغلاف المركب للمسير المباشر، و $e_s(x)$ يمثل الغلاف المركب للمسيرات المتعددة دون وجود أشياء متحركة حول MT عند الوضع x بحيث تتوقف فقط على البيئة المحيطة الساكنة؛ ولا تعتمد قيمتهما على الزمن t . وتمثل P_m القدرة الإجمالية للمسيرات المتعددة. و S_{Shape} قيمة ثابتة تُحدد حسب شكل الغرفة وأبعادها.

2.2.11 دالة الترابط الآلي لمستوى الإشارة المستقبلية

يتحصل على دالة الترابط الآلي $R(\Delta t)$ للمستوى المركب للإشارة المستقبلية مع فرق زمني Δt على النحو التالي:

$$(17) R(\Delta t) = \begin{cases} P_m \left(\frac{|e_{Direct}(x) + e_s(x)|^2}{P_m} + \frac{N_{person} \Delta w S_{Shape}}{2\pi} \left(1 - \frac{2f_T |\Delta t|}{\pi} \right) \right) & (v|\Delta t| \leq \Delta w) \\ P_m \left[\frac{|e_{Direct}(x) + e_s(x)|^2}{P_m} + \frac{N_{person} \Delta w S_{Shape}}{2\pi} \left\{ 1 - \frac{2f_T |\Delta t|}{\pi} - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{1}{f_T |\Delta t|} \right) + \frac{2f_T |\Delta t|}{\pi} \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{f_T |\Delta t|} \right) \right) \right\} \right] & (v|\Delta t| \leq \Delta w) \end{cases}$$

حيث:

$$(18) f_T = v / \Delta w$$

f_T تتحدد حسب سرعة الشيء المتحرك v وعرض الشخص المتحرك Δw ويمكن اعتبارها الزحزحة القصوى للتردد بالنسبة إلى المطراف المتنقل الساكن.

3.2.11 طيف القدرة للإشارة المستقبلية

يتحصل على طيف القدرة $P(f)$ كدالة في التردد وبحيث تحدد التغير في الغلاف المركب بتحويل فورييه لدالة الترابط الآلي $R(\Delta t)$ في المعادلة (17) على النحو التالي:

$$(19) P(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\Delta t) e^{-j2\pi f \Delta t} d\Delta t$$

ويمكن تقريب طيف القدرة $P_N(f)$ المعايير بقدره $P(0)$ عند تردد يساوي صفر Hz كالتالي:

$$P_N(f) = P(f) / P(0)$$

$$(20) \quad \approx \frac{\left(K(x) \delta(f) + 0.02 f_T^{-0.87} \times \begin{cases} \left((1 - 0.78 f_T^{-0.21}) \delta(f) + 0.78 f_T^{0.21} \exp(-5.3|f|/f_T) \right) & \left(|f| \leq \frac{f_T}{\sqrt{2}} \right) \\ 0.0092 f_T^{1.8} |f|^{-2} & \left(|f| > \frac{f_T}{\sqrt{2}} \right) \end{cases} \right)}{K(x) = 0.02 f_T^{-0.87}}$$

حيث تمثل $\delta(f)$ دالة دلتا ديراك.

4.2.11 القيم

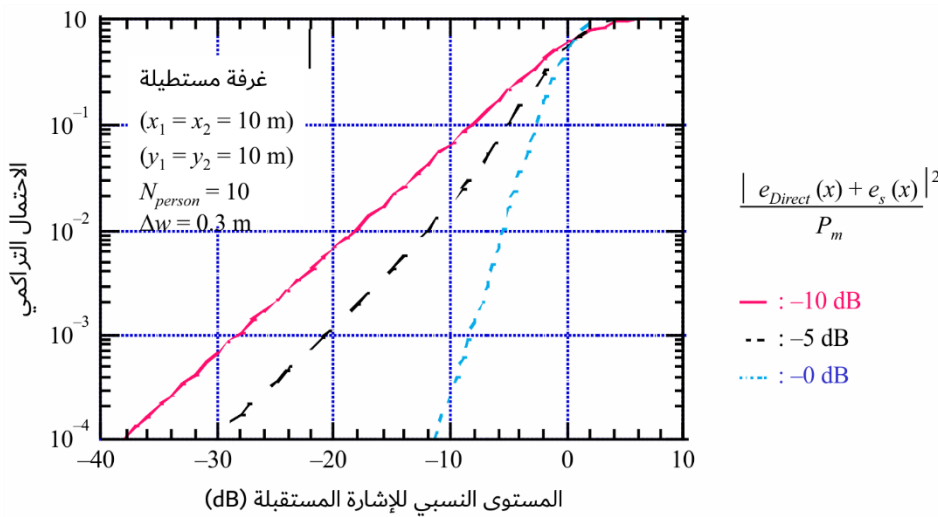
يُوصى بوضع قيمة للمتغير Δw تساوي 0,3 m كقيمة تمثيلية لشخص بالغ عادي.

5.2.11 أمثلة

مع قيم 0,3 m و 1 m/s و 10 للمتغيرات Δw و v و N_{person} ، على التوالي، وتحدد r_{max} بالقيمة 10 m للغرفة الدائرية، فإن دالة كثافة القدرة $p(r_p, K(x))$ ودالة الترابط الآلي $R_N(\Delta t)$ وطيف القدرة $P_N(f)$ باستعمال المعادلات (14) و (15) و (20) تكون على النحو المبين في الأشكال 5 و 6 و 7، على التوالي.

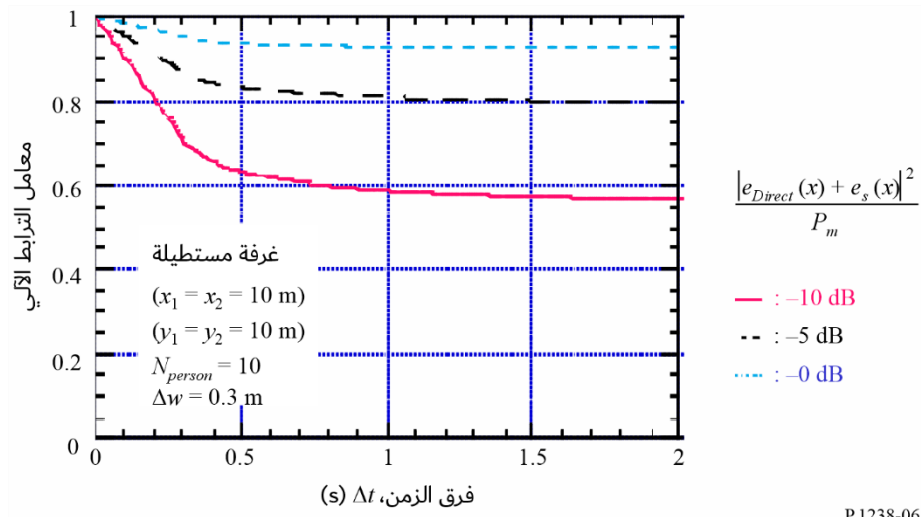
الشكل 5

الاحتمال التراكمي لمستوى الإشارة المستقبلية في غرفة مستطيلة



الشكل 6

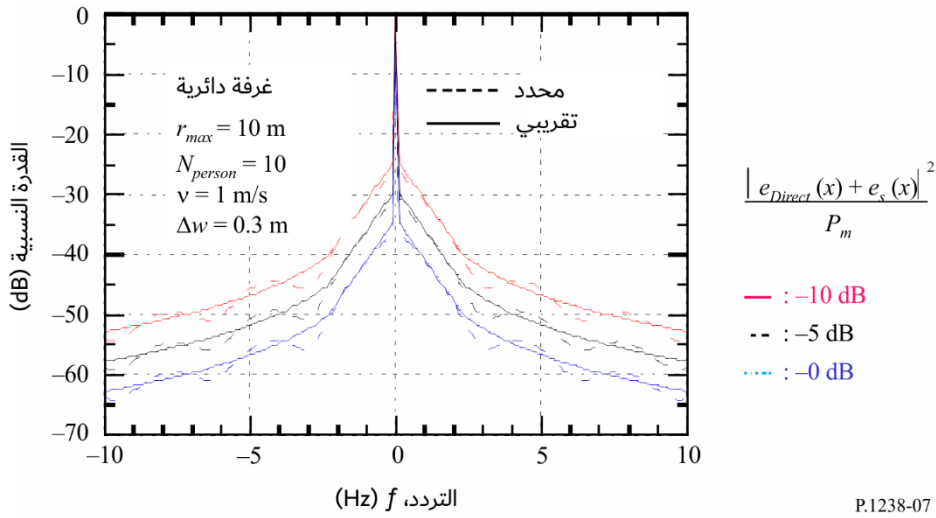
معامل الترابط الآلي لمستوى الإشارة المستقبلية في غرفة مستطيلة



P.1238-06

الشكل 7

طيف القدرة في غرفة دائرية



P.1238-07