

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R P.2040
(2013/09)

**آثار مواد البناء وهياكل المباني على انتشار
الموجات الراديوية فوق 100 MHz تقريباً**

السلسلة P
انتشار الموجات الراديوية

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 الملحق 1 بالقرار 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 <http://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 بعد	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، 2015

© ITU 2015

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.2040

آثار مواد البناء وهياكل المباني على انتشار الموجات الراديوية فوق 100 MHz تقريباً

(المسألة ITU-R 211/3)

(2013)

مجال التطبيق

تقدم هذه التوصية توجيهات بشأن آثار خواص مواد البناء وهياكل المباني على انتشار الموجات الراديوية. وتناقش التوصية أيضاً المبادئ الأساسية وقياسات الخسارة الناجمة عن مواد البناء وهياكل المباني.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

- أ) أن الخواص الكهربائية للمواد وهياكلها تؤثر بشدة على انتشار الموجات الراديوية؛
- ب) أن الضرورة تقتضي فهم خسائر الموجات الراديوية التي تسببها مواد وهياكل البناء؛
- ج) أن الحاجة تدعو لإعطاء توجيهات للمهندسين لتفادي التداخل من الأنظمة العاملة في الخلاء على تلك العاملة داخل المباني ومن تلك العاملة داخل المباني على تلك العاملة في الخلاء؛
- د) أن الحاجة تدعو لتزويد المستخدمين بمصدر موحد لحساب آثار مواد وهياكل البناء،

وإذ تلاحظ

- أ) أن التوصية ITU-R P.679 تقدم التوجيه بشأن تخطيط الأنظمة الإذاعية الساتلية؛
- ب) أن التوصية ITU-R P.1238 تقدم التوجيه بشأن الانتشار داخل المباني وشبكات المنطقة المحلية الراديوية العاملة في مدى الترددات بين 900 MHz و 100 GHz؛
- ج) أن التوصية ITU-R P.1406 تقدم معلومات عن جوانب متنوعة من الانتشار المتعلقة بالخدمة المتنقلة البرية للأرض والخدمة الإذاعية في نطاقات الموجات المتريّة (VHF) والديسيمترية (UHF)؛
- د) أن التوصية ITU-R P.1411 تقدم أساليب الانتشار في مسيرات قصيرة في الخلاء ضمن مدى الترددات المتراوحة بين 300 MHz و 100 GHz تقريباً،

توصي

باستخدام المعلومات والأساليب الواردة في الملحق 1 كدليل للتقييم بشأن آثار خواص مواد البناء والهياكل على خسارة انتشار الموجات الراديوية.

الملحق 1

1 مقدمة

الغرض من هذه التوصية هو تقديم التوجيه بشأن آثار الخواص الكهربائية لمواد البناء والهياكل على انتشار الموجات الراديوية. وستُنجز هذه المهمة في ثلاثة أجزاء. وسيوفر الجزء الأول، المقدمة، مناقشة عالية المستوى لسيناريوهات الانتشار من الخلاء إلى داخل المباني ومن داخل المباني إلى الخلاء، وتعريف بعض المصطلحات ذات الصلة. وسيوفر الجزء الثاني تفاصيل النتائج النظرية الكمية لتفاعلات الموجة المستوية الكهرمغناطيسية مع أنصاف المستويات والألواح، والكائنات المنثرة، والفتحات وغيرها من الهياكل المؤهلة من أجل إلقاء الضوء على أوجه الاعتماد على قيم خواص المواد والتردد وزاوية الورود والاستقطاب. وبالإضافة إلى ذلك، سيُنظر في نتائج نظرية الأدلة الموجية والتجاويف الرنانة التي تشكل الحدود في أنظمة إحداثيات قابلة للفصل. وسيوفر الجزء الثاني أيضاً نتائج من نظرية الخواص الكهربائية/المغناطيسية للمواد، من أجل تعزيز فهم أوجه الاعتماد على التردد (وغيرها) من أوجه الاعتماد على الخواص الكهربائية/المغناطيسية للمواد. وأخيراً، سيوفر الجزء الثالث أساليب لقياس خواص المواد والإبلاغ عنها، إلى جانب مجموعات الخواص المقيسة لمواد البناء. وستوفر الوثيقة للمستخدم مصدراً موحداً لحساب آثار مواد وهياكل البناء على أداء النظام.

1.1 وصف السيناريوهات

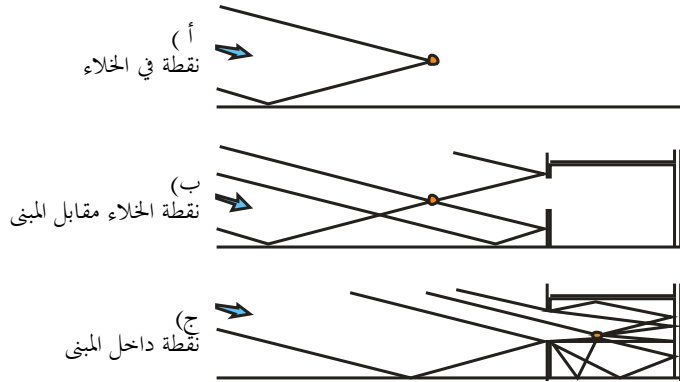
1.1.1 الانتشار من الخارج إلى الداخل: القضايا المتعلقة بالمجال المرجعي لخسارة الدخول

تتمثل صعوبة تحديد المجال المرجعي لخسارة الدخول في أن وجود مبنى سيعدل قيم شدة الإشارة خارجه. ويوضح الشكل 1، في شكل مبسط إلى حد ما، القضايا ذات الصلة. فتبين الأقسام الثلاثة من الشكل ما يلي:

- (أ) تستقبل نقطة في الخلاء معزولة نسبياً شعاعاً مباشراً وآخر منعكساً عن الأرض. وفي الواقع يرجح لكلا الشعاعين، في بيئة حضرية، أن يصلا من مصدر بعيد عن طريق الانعراج فوق مبنى في الجهة اليسرى من الشكل. وفي الانتشار بزوايا صغيرة عن المحور الأفقي، سيتشكل ببساطة فص رأسي بشكل رئيسي، أي تتشكل قيم عظمى وصغرى عند تحرك النقطة عمودياً.
- (ب) دون تحريك النقطة، يقع المبنى وراءها تماماً. فتستقبل الآن شعاعين إضافيين منعكسين عن المبنى، وينعكس أحدهما أيضاً عن الأرض. فيكتسب الآن مخطط تشكّل الفص هيكلاً جيداً في كلا الاتجاهين الرأسي والأفقي.
- (ج) تحركت النقطة الآن داخل المبنى. ولأغراض التوضيح يفترض أن يكون التردد عالياً بما فيه الكفاية بحيث لا يُعتد إلا بالأشعة التي تدخل عبر النافذة. أما في الترددات الأدنى، حيث يُعتد بالأشعة التي تخترق الجدار، فمن شأن مخطط الأشعة أن يتغير.

الشكل 1

مخططات الأشعة المبسطة لنقاط في الخلاء وداخل المبنى



P.2040-01

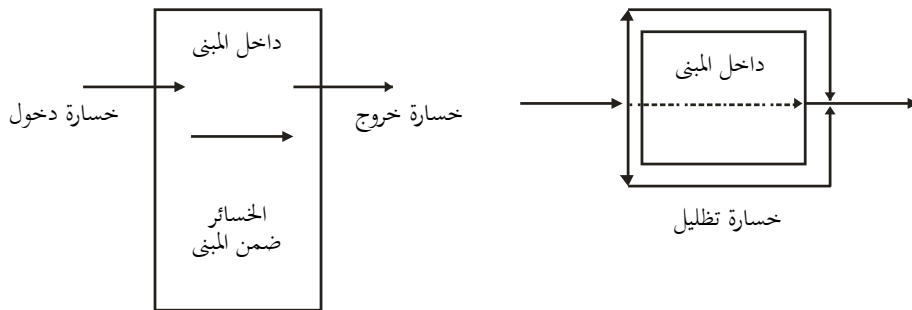
رغم أن الانتشار عبر مسيرات متعددة يسبب تشكل الفصوص، فإن مجموع قدرات أشعة متعددة يقارب المتوسط المكاني لقدرة مجال. لذلك فإن وجود مبنى خلف جهاز استقبال يُتوقع له بشكل عام أن يعزز شدة الإشارة المستقبلية. وداخل المبنى، وخصوصاً على مقربة على الجدار الخارجي المضاء، يرجح استقبال عدد أكبر من الأشعة رغم أن العديد منها سيتوهَّن بالإرسال أو الانعكاس أو الانعراج. وبالتالي يمكن أن تكون الإشارة أقوى في الداخل منها في الخارج.

2.1.1 خسارة الانتشار عبر مبنى

يبين الشكل 2 أنواعاً مختلفة من خسائر الانتشار عبر مبنى تصادف في سيناريو الانتشار من الخلاء إلى داخل مبنى ومن داخل مبنى إلى الخلاء. وترد التعاريف في الفقرات التالية.

الشكل 2

أنواع مختلفة من خسائر الانتشار عبر مبنى



P.2040-02

2.1 تعريف خسارة دخول المبنى

إن خسارة دخول المبنى هي الفرق بين المتوسط المكاني لمستوى الإشارة خارج الواجهة المضاءة لمبنى ومستوى الإشارة داخل المبنى على نفس الارتفاع فوق سطح الأرض، مع المتوسط المكاني لخبو تعدد المسيرات لكلا الإشارتين.

3.1 تعريف خسارة تظليل المبنى

إن خسارة تظليل المبنى هي الفرق بين متوسط إمكانية تغير موقع مستوى الإشارة خارج الواجهة المضادة لمبنى ومستوى الإشارة خارج الواجهة المقابلة للمبنى على نفس الارتفاع فوق سطح الأرض، مع المتوسط المكاني لخبو تعدد المسيرات لكلتا الإشارتين. ويمكن اعتبارها خسارة الإرسال عبر المبنى.

4.1 تعريف اختراق (جدار مثلاً)

تدخل معظم الإشارات خارج المبنى مبنى مغلقاً باختراق الجدران. ويمكن لاختراق جدار أن يشير أيضاً إلى اختراق حيطان التقسيم داخل المباني. وداخل المباني، خسارة اختراق جدار هي الفرق بين متوسط إمكانية تغير موقع مستوى الإشارة على أحد جانبي الجدار، ومستوى الإشارة على الجانب الآخر من الجدار على نفس الارتفاع فوق سطح الأرض، مع المتوسط المكاني لخبو تعدد المسيرات لكلتا الإشارتين. ويمكن اعتبارها خسارة الإرسال عبر الجدار.

5.1 تعريف اختراق الفتحة

إن اختراق الفتحة هو اختراق إشارات من أحد جانبي الجدار إلى الجانب الآخر من خلال فتحات على الجدران مثل النوافذ.

6.1 تعريف خسارة الخروج من المبنى

إن خسارة الخروج من المبنى هي التعريف العكسي لخسارة الدخول إلى المبنى، وهي الفرق بين متوسط إمكانية تغير موقع مستوى الإشارة داخل الواجهة المضادة لمبنى ومستوى الإشارة خارج المبنى على نفس الارتفاع فوق سطح الأرض، مع المتوسط المكاني لخبو تعدد المسيرات لكلتا الإشارتين.

2 المبادئ الأساسية والنظرية

إن الموجات الراديوية التي تتفاعل مع مبنى تنتج خسائر تعتمد على الخواص الكهربائية لمواد البناء ومواد الهيكل. وفي هذه الفقرة، تناقش المؤثرات النظرية للخواص الكهربائية للمواد وللهيكل على انتشار الموجات الراديوية.

1.2 نظرية الخواص الكهربائية للمواد

1.1.2 مقدمة

تصف هذه الفقرة إعداد صيغ بسيطة تعتمد على التردد لسماحية وإيصالية مواد البناء الشائعة. وتقوم الصيغ على الاحتواء في منحني لعدد من نتائج القياس المنشورة، في المدى الترددي 1-100 GHz بشكل رئيسي. والهدف هو العثور على تحديد بسيط للمعلومات المعدة للاستخدام في نمذجة أثر الأشعة من داخل المباني إلى الخلاء.

ويُعرض توصيف الخواص الكهربائية للمواد في عدد من السبل المختلفة في الأدبيات العلمية. ويرد وصفها في الفقرة 2.1.2 كي يتسنى اختصار البيانات المقيسة في نسق مشترك.

2.1.2 الأسلوب

1.2.1.2 تعاريف الثوابت الكهربائية

يتعامل هذا الأسلوب مع المواد غير المتأينة غير المغنطيسية فقط، وبالتالي تُصَفَّر كثافة الشحنات الحرة، p_f ، وتُسند إلى نفاذية المادة، μ ، نفاذية الفضاء الطلق، μ_0 .

والكميتان الأساسيتان في دائرة الاهتمام هما السماحية الكهربائية، ϵ ، والإيصالية، σ . وتتعدد سبل التحديد الكمي لهذه المعلمات في الأدبيات العلمية، لذا يتعين إيضاح هذه التمثيلات المختلفة والعلاقات فيما بينها.

2.2.1.2 الاشتقاق

نقطة البداية هي معادلة الموجة المشتقة من معادلات ماكسويل. وفي إطار الافتراضات المذكورة أعلاه، تكون معادلة الموجة للمجال الكهربائي \vec{E} كما يلي:

$$(1) \quad \nabla^2 \vec{E} - \epsilon \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial \vec{J}_f}{\partial t}$$

حيث:

\vec{E} : (متجه) شدة المجال الكهربائي (V/m)

\vec{J}_f : كثافة تيار الشحنات الحرة (A/m²)

ϵ : سماحية العازل (F/m)

μ_0 : نفاذية الفضاء الطلق (N/A²) $= 4\pi \times 10^{-7}$ تعريفاً.

وفي موصل، ترتبط \vec{J}_f مع \vec{E} من خلال قانون أوم كما يلي:

$$(2) \quad \vec{J}_f = \sigma \vec{E}$$

حيث:

σ : الإيصالية (S/m).

ويعطي الجمع بين المعادلتين (1) و (2) ما يلي:

$$(3) \quad \nabla^2 \vec{E} - \epsilon \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

ويُكتب \vec{E} بالترميز الأسّي كما يلي:

$$(4) \quad \vec{E} = \vec{E}_0 e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$$

حيث:

\vec{E}_0 : قيمة \vec{E} في حالة $\vec{r} = 0$ (V/m)

\vec{k} : مطال (m⁻¹) (متجه) الرقم الموجي $= 2\pi/\lambda$ حيث λ هو الطول الموجي بالأمتار

ω : التردد الزاوي (s⁻¹) $= 2\pi f$ هو التردد بوحدة s⁻¹

ويعطي التبديل في المعادلة (3) ما يلي:

$$(5) \quad k^2 - \epsilon \mu_0 \omega^2 + j \omega \mu_0 \sigma = 0$$

حيث k هو مطال \vec{k} .

وتبين المعادلة (5) أن شدة المجال الكهربائي تنتشر كموجة جيئية موهنة.

3.2.1.2 العازل غير الموصل

في عازل غير موصل ($\sigma = 0$) لا يتوهن المجال، وتكون السرعة الموجّهة للانتشار، v ($= \omega/k$)، كما يلي:

$$(6) \quad v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu_0}}$$

وُكتب ϵ تقليدياً بدلالة السماحية النسبية، ϵ_r ، وسماحية الفضاء الطلق، ϵ_0 ، على النحو التالي:

$$(7) \quad \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

ومنها تكون السرعة الموجهة للانتشار على النحو التالي:

$$(8) \quad v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

و c هي السرعة الموجهة للضوء في الفضاء الطلق ($= 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$). وبعبارة أخرى، $\sqrt{\epsilon_r}$ هو معامل انكسار الوسط العازل.

4.2.1.2 العازل الموصل

في حال $\sigma \neq 0$ ، تتوهن الموجة عند انتشارها. ويمكننا التوسع بالمعادلة (8) لتشمل هذه الحالة بتعريف السماحية النسبية المركبة ϵ_r^c بواسطة المعادلة (8)، عبر $v = \omega/k$ المعطاة بصيغة أعم في المعادلة (5):

$$(9) \quad \epsilon_r^c = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega}$$

ويُظهر ذلك أن السماحية النسبية، ϵ_r (المعرفة لعازل نقي) تصبح الجزء الحقيقي من السماحية النسبية المركبة الأعم ϵ_r^c المعرفة لعازل موصل. وتتمثل إحدى المشاكل في غياب رموز مقبولة من الجميع لهذه الحدود، وتحتوي الأدبيات العلمية على عدد من التعاريف المختلفة. فيستخدم الرمز ϵ_r نفسه أحياناً للسماحية النسبية المركبة، ولجزئها الحقيقي في أحيان أخرى.

ولتجنب هذا الغموض، سيُكتب ϵ_r^c على الشكل التالي:

$$(10) \quad \epsilon_r^c = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$$

وسيُستخدم الرمز ϵ_r^c للسماحية النسبية المركبة و ϵ_r' لجزئها الحقيقي، تجنباً لاستخدام الرمز ϵ_r . وباستخدام المعادلة (9)، يكون الجزء التخيلي للسماحية ϵ_r^c مجرد:

$$(11) \quad \epsilon_r'' = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega}$$

لاحظ أن علامة الجزء التخيلي عشوائية، وهي تعبر عن اصطلاحاً للعلامة في المعادلة (4). وبالوحدات العملية، تعطي المعادلة (9) التحويل من ϵ_r'' إلى σ :

$$(12) \quad \sigma = 0.05563 \epsilon_r'' f_{\text{GHz}}$$

وهناك صياغة أخرى للجزء التخيلي للسماحية ϵ_r^c بدلالة ظل الخسارة المعرف كما يلي:

$$(13) \quad \tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$$

وهكذا:

$$(14) \quad \tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r'}$$

ومن المعادلة (10)، يعطي ذلك مباشرة:

$$(15) \quad \varepsilon_r^c = \varepsilon_r'(1 - j \tan \delta)$$

وبالوحدات العملية:

$$(16) \quad \sigma = 0.05563 \varepsilon_r' \tan \delta f_{\text{GHz}}$$

ويصادف حد آخر أحياناً هو Q الخاص بالوسط. ويعرّف كما يلي:

$$(17) \quad Q = \frac{\omega}{\sigma}$$

وهو نسبة كثافة تيار الإزاحة $\partial D / \partial t$ إلى كثافة تيار الإيصال J_f . ولغير الموصلات، $Q \rightarrow \infty$. ومن المعادلة (14):

$$(18) \quad Q = 1 / \tan \delta$$

ويصادف حد آخر أيضاً هو المؤشر الانكساري المركّب n^c المعرّف على أنه $\sqrt{\varepsilon_r^c}$. ويكتب n^c بدلالة جزئيه الحقيقي والتخيلي كما يلي:

$$(19) \quad n^c = n' - jn'' = \sqrt{\varepsilon_r^c}$$

وتعطى ε_r' و ε_r'' و σ من المعادلتين (10) و (12) كما يلي:

$$\varepsilon_r' = (n')^2 - (n'')^2$$

$$(20) \quad \varepsilon_r'' = 2n'n''$$

$$\sigma = 0.1113 n'n'' f_{\text{GHz}}$$

5.2.1.2 معدل التوهين

سيوهّن العازل الموصل الموجات الكهرمغناطيسية عند انتشارها. ولحساب ذلك كمياً، تبدّل المعادلة (5) في المعادلة (4) وتبسّط باستخدام المعادلة (14):

$$(21) \quad \vec{E} = \vec{E}_0 \exp \left\{ j \left(\omega t - \sqrt{\varepsilon_r'(1 - j \tan \delta)} \vec{k}_0 \cdot \vec{r} \right) \right\}$$

حيث:

\vec{k}_0 : (متجه) الرقم الموجي (m^{-1}) في الفضاء الطلق.

ويؤدي الجزء التخيلي تحت علامة الجذر التربيعي إلى انخفاض أسي للمجال الكهربائي بازدياد المسافة:

$$(22) \quad \vec{E} \propto \vec{E}_0 \exp(-|\vec{r}|/\Delta)$$

وبقليل من الحسابات الجبرية، يتضح أن مسافة التوهين، Δ ، التي يهبط فيها اتساع المجال بنسبة $1/e$ هي:

$$(23) \quad \Delta = \frac{1}{k_0 \sqrt{\varepsilon_r'}} \sqrt{\frac{2 \cos \delta}{(1 - \cos \delta)}}$$

ويمكن تقييم ذلك عن طريق حساب $\tan \delta$ من ε_r' و σ وقلب الناتج للحصول على $\cos \delta$. ولكن يمكن التقييم عبر طريق أقصر بين حدي $\sigma \rightarrow 0$ (حد العازل) و $\sigma \rightarrow \infty$ (حد الموصل الجيد). وباختيار التقريب المناسب للحد الواقع تحت علامة الجذر التربيعي في المعادلة (21) يصبح هذان الحدان كما يلي:

$$(24) \quad \Delta_{\text{dielectric}} = \frac{1}{k_0 \sqrt{\varepsilon_r'}} \frac{2}{\tan \delta}$$

و:

$$(25) \quad \Delta_{conductor} = \frac{1}{k_0 \sqrt{\epsilon_r'}} \sqrt{\frac{2}{\tan \delta}}$$

وتبلغ نسبة الخطأ في المعادلتين (24) و (25) نحو 3% من أجل $\delta < 0,5$ (عازل) و $\tan \delta > 15$ (موصل). وعادة ما يشار إلى $\Delta_{conductor}$ باسم "عمق القشرة".

وللأغراض العملية، يعد معدل التوهين كما أكثر فائدة من مسافة التوهين، ويُفهم بمجرد المعادلة التالية:

$$(26) \quad A = \frac{20 \log_{10} \sigma}{\Delta} = 8,686 / \Delta$$

حيث:

A: معدل التوهين بوحدة dB/m (وتقاس Δ بالأمتار).

ويعطي تبديل المعادلتين (24) و (25) في المعادلة (26)، والتحويل إلى وحدات عملية ما يلي:

$$(27) \quad \begin{aligned} A_{\text{диэлектрик}} &= 1636 \frac{\sigma}{\epsilon_r'} \\ A_{\text{проводник}} &= 545,8 \sqrt{\sigma f_{\text{ГГц}}} \end{aligned}$$

3.1.2 اعتماد خواص المواد على التردد

في الأدبيات العلمية، يعطى دوماً الجزء الحقيقي لثابت العزل، ϵ_r' ، ولكن دون تحديد التردد في كثير من الأحيان. وفي الممارسة العملية بالنسبة للعديد من المواد، تبقى قيمة ϵ_r' ثابتة من التيار المستمر صعوداً إلى حوالي 5-10 GHz وبعد ذلك تبدأ في الانخفاض بارتفاع التردد.

وتتناسب قيمة σ عادة تناسباً قوياً مع التردد في النطاق الذي يستأثر بالاهتمام، فتزيد بارتفاع التردد. وقد يكون ذلك أحد الأسباب التي تجعل الجزء التخيلي من ثابت العزل، أو ظل الخسارة، محدداً غالباً في الأدبيات العلمية: وتبين المعادلتان (12) و (16) أن هذه الحدود تزيل الاعتماد الخطي على التردد بالمقارنة مع اعتماد σ على التردد.

ولكل مادة نموذج انحدار بسيط لاعتماد σ على التردد، ويمكن الحصول عليه باحتواء قيم σ المقيسة في عدد من الترددات.

4.1.2 نماذج اعتماد خواص المواد على التردد

لاشتقاق اعتماد خواص المواد على التردد، يمكن توصيف قيم الثوابت الكهربائية للمواد بدلالة تردد القياس والجزء الحقيقي (ϵ_r') والجزء التخيلي (ϵ_r'') من السماحية النسبية، و ظل الخسارة ($\tan \delta$) والإيصالية (σ)؛ علماً بأن ظل الخسارة يمكن أن يُشتق من الإيصالية والجزء التخيلي من السماحية النسبية.

وتوجد عادةً أدلة يعتد بها إحصائياً على ازدياد الإيصالية بازدياد التردد. وفي تلك الحالة تُمدج الاتجاه باستخدام صيغة بسيطة:

$$(28) \quad \sigma = \alpha f^\beta$$

حيث f هو التردد بوحدة GHz. وهذا خط مستقيم على الرسم البياني $\log(\sigma) - \log(f)$. ويمثل خط الاتجاه أفضل احتواء لجميع البيانات المتاحة.

ويمكن افتراض اعتماد مماثل على التردد للسماحية النسبية:

$$(29) \quad \epsilon_r' = a f_{\text{GHz}}^b$$

ولكن في جميع الحالات تقريباً، ما من أدلة على وجود اتجاه للسماحية النسبية مع التردد. وفي هذه الحالات يمكن استخدام قيمة ثابتة في جميع الترددات. والقيمة الثابتة هي متوسط كل القيم المرسومة. وترد بعض الأمثلة في الجدول 4 ضمن الفقرة 3.

2.2 مؤثرات الهيكل المادي على انتشار الموجات الراديوية

1.2.2 انعكاس الموجة المستوية والإرسال في سطح بيني واحد

1.1.2.2 الورود المائل إلى أوساط عازلة

يُنظر في حالة الورود المائل لموجة مستوية جيئية إلى سطح بيني مستوي يفصل وسطين عازلين منتظمين. وهناك ثلاث نظريات هامة لهذه الحالة تُستخلص من الاعتبارات الهندسية.

(1) تقع أرقام موجة المتجه من موجات منعكسة ومرسلة (منكسرة) في مستوي الورود، أي المستوي المحدد بالرقم الموجي k_1

للموجة الواردة وبالمخطط المتعامد مع السطح البيني. ويؤخذ ذلك باعتباره المستوي $x-z$ في الشكل 3.

(2) تتساوى زاويتي الورود والانعكاس (كلتاها θ_1 في الشكل 3).

(3) تتصل زاوية الانكسار، θ_2 ، بزاوية الورود وفق قانون سنيل (Snell).

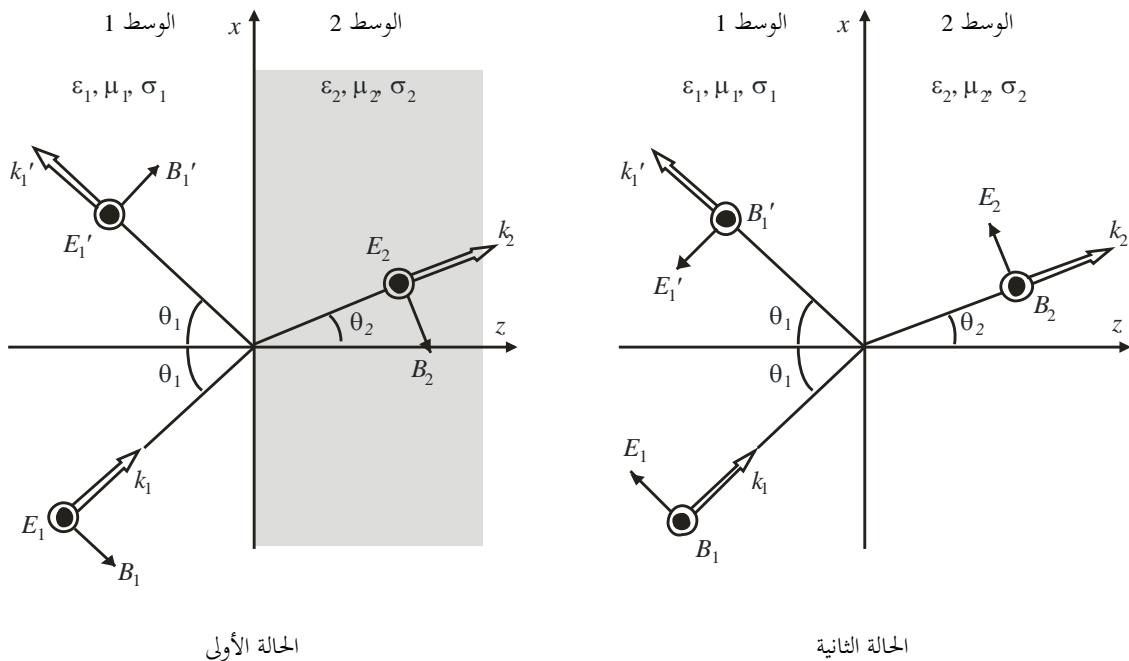
$$(30) \quad \frac{1}{c_1} \sin \theta_1 = \frac{1}{c_2} \sin \theta_2$$

حيث $c_1 = c/(\epsilon_1 \mu_1)^{1/2}$ و $c_2 = c/(\epsilon_2 \mu_2)^{1/2}$ هما سرعتا الموجة في الوسطين على التوالي، وتمثل ϵ_1 و ϵ_2 السماحية النسبية المركبة للوسطين، وتمثل μ_1 و μ_2 النفاذية النسبية للوسطين.

وتضمن هذه النظريات تطابق العوامل الأسية للفضاء-الزمن، $\exp\{j(\omega t - k \cdot r)\}$ ، للموجات الثلاث ($k \rightarrow k_1, k_1', k_2$) على التوالي في جميع النقاط في السطح البيني.

الشكل 3

انعكاس وانكسار الموجات المستوية في سطح بيني مستوي



يُنظر في معاملي الانعكاس والانكسار بشكل منفصل للحالتين أدناه:

الحالة الأولى - المجال الكهربائي، E_1 ، يتعامد مع مستوى الورود.

الحالة الثانية - المجال الكهربائي، E_1 ، يوازي مستوى الورود.

الحالة الأولى - (تعامد المتجه E مع مستوى الورود).

يُشتق معاملا الانعكاس والانكسار R_N و T_N بصيغة المعادلتين (31a) و (31b) استناداً إلى الشرط الحدي الكهرمغناطيسي.

$$(31a) \quad R_N = \frac{-\mu_1 \tan \theta_1 + \mu_2 \tan \theta_2}{\mu_1 \tan \theta_1 + \mu_2 \tan \theta_2} \xrightarrow{\mu_1 = \mu_2} -\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}$$

$$(31b) \quad T_N = \frac{2\mu_2 \tan \theta_2}{\mu_1 \tan \theta_1 + \mu_2 \tan \theta_2} \xrightarrow{\mu_1 = \mu_2} \frac{2\cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}$$

وتسري الأشكال المبسطة المبينة لمواد مكافئة مغناطيسياً على الحالة الخاصة الشائعة للمواد غير المغناطيسية. بالإضافة إلى ذلك، فإن الزاويتين θ_1 و θ_2 ليستا مستقلتين لأنهما مرتبطتان وفق قانون سنيل على النحو المبين في المعادلة (30). ويمكن تمثيل هذين المعاملين على النحو التالي:

$$(32a) \quad R_N = \frac{\mu_1 \eta_{12}^2 \cos \theta_1 - \mu_2 \sqrt{\eta_{12}^2 - \sin^2 \theta_1}}{\mu_1 \eta_{12}^2 \cos \theta_1 + \mu_2 \sqrt{\eta_{12}^2 - \sin^2 \theta_1}} \xrightarrow{\mu_1 = \mu_2} \frac{\eta_{12}^2 \cos \theta_1 - \sqrt{\eta_{12}^2 - \sin^2 \theta_1}}{\eta_{12}^2 \cos \theta_1 + \sqrt{\eta_{12}^2 - \sin^2 \theta_1}}$$

$$(32b) \quad T_N = \frac{2\mu_2 \eta_{12} \cos \theta_1}{\mu_1 \eta_{12}^2 \cos \theta_1 + \mu_2 \sqrt{\eta_{12}^2 - \sin^2 \theta_1}} \xrightarrow{\mu_1 = \mu_2} \frac{2\eta_{12} \cos \theta_1}{\eta_{12}^2 \cos \theta_1 + \sqrt{\eta_{12}^2 - \sin^2 \theta_1}}$$

الحالة الثانية - (توازي المتجه E مع مستوى الورود).

يُشتق معاملا الانعكاس والانكسار في الحالة الثانية R_P و T_P بالمثل استناداً إلى الشرط الحدي الكهرمغناطيسي كما يلي:

$$(33a) \quad R_P = \frac{-\varepsilon_1 \tan \theta_1 + \varepsilon_2 \tan \theta_2}{\varepsilon_1 \tan \theta_1 + \varepsilon_2 \tan \theta_2} \xrightarrow{\mu_1 = \mu_2} \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)}$$

$$(33b) \quad T_P = \frac{2\varepsilon_1 \sin \theta_1 / \cos \theta_2}{\varepsilon_1 \tan \theta_1 + \varepsilon_2 \tan \theta_2} \xrightarrow{\mu_1 = \mu_2} \frac{2\cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2)}$$

$$(34a) \quad R_P = \frac{\mu_2 \cos \theta_1 - \mu_1 \sqrt{\eta_{12}^2 - \sin^2 \theta_1}}{\mu_2 \cos \theta_1 + \mu_1 \sqrt{\eta_{12}^2 - \sin^2 \theta_1}} \xrightarrow{\mu_1 = \mu_2} \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{\eta_{12}^2 - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{\eta_{12}^2 - \sin^2 \theta_1}}$$

$$(34b) \quad T_P = \frac{2\mu_2 \cos \theta_1}{\mu_2 \cos \theta_1 + \mu_1 \sqrt{\eta_{12}^2 - \sin^2 \theta_1}} \xrightarrow{\mu_1 = \mu_2} \frac{2\cos \theta_1}{\cos \theta_1 + \sqrt{\eta_{12}^2 - \sin^2 \theta_1}}$$

حيث تمثل η_{12} السماحية النسبية المركبة للوسط 2 على أساس الوسط 1.

$$(35) \quad \eta_{12} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}} \sqrt{\frac{\varepsilon_2 - j\sigma_2/\omega}{\varepsilon_1 - j\sigma_1/\omega}}$$

وتمثل σ_1 و σ_2 إيصالية الوسطين ويمثل ω التردد الزاوي.

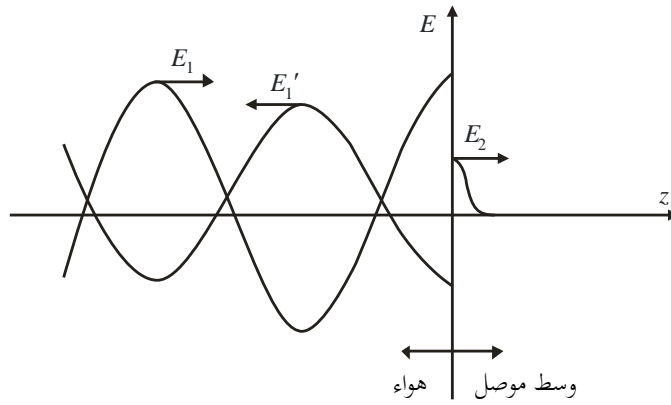
وتعطي الصيغ معاملي الانعكاس والانكسار للموجات الكهرمغناطيسية في مستوي.

2.1.2.2 الورد العمودي على موصل

لننظر في حالة خاصة تصطدم فيها موجة في الخواء (\approx الهواء) بموصل جيد ($g \gg \omega \epsilon_0 \kappa_e$) بزاوية ورود عمودية. حيث g هي الإيصالية، و ω هو التردد الزاوي، و ϵ_0 هي السماحية في الخواء و κ_e هي السماحية النسبية. وكما يستوحى من الشكل 4، فإن موجة واردة اتساعها E_1 ومماضية في الاتجاه $+z$ تنشئ موجة منعكسة اتساعها \bar{E}_1' وموجة مرسلّة (مخمّدة) اتساعها الأولي \bar{E}_2 . وعندما تبلغ المنطقة الموصلة ما يكفي من السماكة، يمكننا إهمال الموجة المنعكسة التي تقترب نحو السطح البيني من جهة اليمين.

الشكل 4

انعكاس موجة مستوية عن سطح موصل (بزاوية ورود عمودية)



P.2040-04

ويعبّر عن المجالات الكهربائية للموجات المستوية الثلاث أحادية اللون المستقطبة خطياً على النحو التالي:

$$(36) \quad E_1 e^{j(\omega t - \kappa_0 z)} \quad \text{الواردة:}$$

$$(37) \quad \bar{E}_1' e^{j(\omega t + \kappa_0 z)} \quad \text{المنعكسة:}$$

$$(38) \quad \bar{E}_2 e^{-\frac{z}{\delta_e}} j \left(\omega t - \frac{z}{\delta} \right) \quad \text{المرسلّة:}$$

حيث $\omega/c = \kappa_0$ هو الرقم الموجي، و δ هي معلمة عمق قشرة الموصل ويعبّر عنها على النحو التالي:

$$(39) \quad \delta = \left(\frac{2}{\omega \mu_0 \kappa_m g} \right)^{\frac{1}{2}}$$

حيث μ_0 هي النفاذية في الخواء، و κ_m هي النفاذية النسبية للوسط. ومجالات الموجة المستوية عرضانية، ومن ثم لا توجد إلا مكونات مماسية في المستوي الحدي ($z=0$). ويدل القوسان فوق رمزي \bar{E}_1' و \bar{E}_2 أن الاتساعين كميتان مركبتان، أي أن الموجتين المنعكسة والمرسلّة لا يمكن أن تكونا في طور واحد مع الموجة الواردة ذات الاتساع والطور الموصّفين.

ويعبّر عن المجالات المغنطيسية للموجات الثلاث على النحو التالي؛

$$(40) \quad B_1 e^{j(\omega t - \kappa_0 z)} = \frac{E_1}{c} e^{j(\omega t - \kappa_0 z)} \quad \text{الواردة:}$$

$$(41) \quad \bar{B}_1' e^{j(\omega t + \kappa_0 z)} = \frac{\bar{E}_1'}{c} e^{j(\omega t + \kappa_0 z)} \quad \text{المنعكسة:}$$

$$(42) \quad \bar{B}_2 e^{-\frac{z}{\delta}} e^{j\left(\omega t - \frac{z}{\delta}\right)} \approx (1-j) \frac{\bar{E}_2}{\omega \delta} e^{-\frac{z}{\delta}} e^{j\left(\omega t - \frac{z}{\delta}\right)} \quad \text{المرسلة:}$$

ومرة أخرى، تكمن المتجهات المغنطيسية في نفس المستوي، متعامدة مع المتجهات الكهربائية، وهي مماس للحد. وتُشتق المعادلتان التاليتان لمكونات مماسية من الشروط الحدية في $z = 0$.

$$(43) \quad E_1 + \bar{E}'_1 = \bar{E}_2$$

$$(44) \quad E_1 - \bar{E}'_1 = (1-j) \frac{c}{\omega \delta \kappa_m} \bar{E}_2$$

ويُستخرج منهما معامل الانعكاس والإرسال (المركبان) لاتساعي المجال الكهربائي كما يلي:

$$(45) \quad \bar{R}_E \equiv \frac{\bar{E}'_1}{E_1} = \frac{-(1-j) \left(\frac{c}{\omega \delta \kappa_m} \right) + 1}{(1-j) \left(\frac{c}{\omega \delta \kappa_m} \right) + 1} \approx - \left[1 - (1+j) \frac{\omega \delta \kappa_m}{c} \right]$$

$$(46) \quad \bar{T}_E \equiv \frac{\bar{E}_2}{E_1} = \frac{2}{(1-j) \left(\frac{c}{\omega \delta \kappa_m} \right) + 1} \approx (1+j) \frac{\omega \delta \kappa_m}{c}$$

ويكون معامل انعكاس القدرة ببساطة على النحو التالي:

$$(47) \quad R_p = |\bar{R}_E|^2 = \frac{1 + \left(1 - \frac{\omega \delta \kappa_m}{c} \right)^2}{1 + \left(1 + \frac{\omega \delta \kappa_m}{c} \right)^2} \approx 1 - \frac{2\omega \delta \kappa_m}{c}$$

ويتطلب الحفاظ على الطاقة أن يعبر عن معامل إرسال القدرة، أي الجزء من القدرة المتبدد في الموصل، على النحو التالي:

$$(48) \quad T_p = 1 - R_p = \frac{\frac{4\omega \delta \kappa_m}{c}}{1 + \left(1 + \frac{\omega \delta \kappa_m}{c} \right)^2} \approx \frac{2\omega \delta \kappa_m}{c}$$

وفي الموصل الجيد ($\delta \rightarrow 0$, $g \rightarrow \infty$)، تنعكس الموجة تماماً تقريباً.

2.2.2 انعكاس الموجة المستوية والإرسال عبر ألواح ذات طبقة واحدة وألواح متعددة الطبقات

1.2.2.2 لوح واحد

1.1.2.2.2 الأسلوب

إذا افترضنا أن مادة البناء هي لوح أملس السطح ذو طبقة واحدة متجانسة عازلة، فبالهندسة المبينة في الشكل 5، يمكننا التعبير عن معامل الإرسال، T ، لمادة البناء على النحو التالي:

$$(49) \quad T = \frac{(1 - R^2) \exp(-j(\delta - k_0 d))}{1 - R^2 \exp(-j2\delta)} \quad \text{(معامل الإرسال)}$$

حيث:

$$\delta = 2\pi d / \lambda \cdot \sqrt{\eta - \sin^2 \theta}$$

$$k_0 = 2\pi / \lambda$$

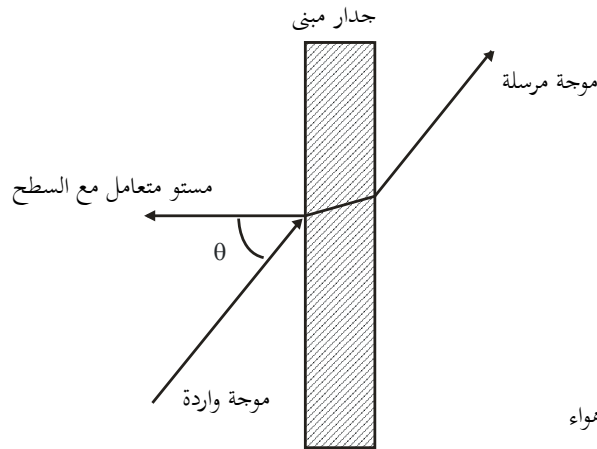
 d : سمك مادة البناء λ : طول الموجة في الفضاء الطلق η : السماحية المركبة θ : الزاوية بين الشعاع الوارد ومستوي السطح المتعامد مع السطح العاكس ($0 \leq \theta \leq 90^\circ$) (الشكل 5).وفي المعادلة (49)، يعطى R' بواسطة R_N أو R_P ،(50) R_N (متجه E يتعامد مع مستوي الانعكاس)(51) R_P (متجه E يتوازي مع مستوي الانعكاس)حيث R_P و R_N هما معاملان انعكاس فرينل (Fresnel) لسطح التماس بين الهواء ووسط عازل عندما يتعامد أو يتوازي المجال الكهربائي مع مستوي الورود، على التوالي.

2.1.2.2.2 نتائج الحساب

تُحسب خسارة الإرسال عبر جدار مبنى عازل من الخرسانة بالسماحيات المركبة التي ترد في الفقرة 7 من التوصية ITU-R P.1238. وتُعرض النتائج في الشكل 6. وفي هذا الشكل، يُظهر المحور الرأسي والمحور الأفقي خسارة الإرسال بوحدة dB وسمك الجدار المتعامد مع الطول الموجي في الفضاء الطلق (d/λ)، على التوالي. وتُرسَم نتائج $\theta = 0^\circ$ و 30° و 60° .

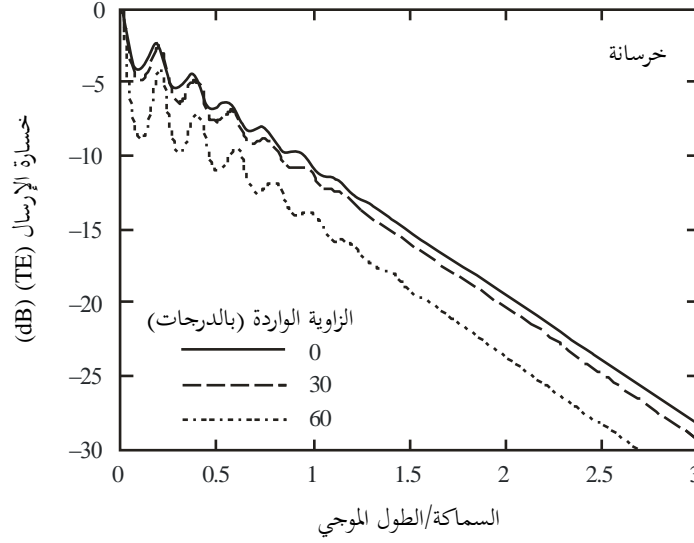
الشكل 5

هندسة الإرسال



الشكل 6

خسارة الإرسال المحسوبة لجدار خرساني ذي طبقة واحدة في حالة ورود خسارة الإرسال عبر مادة خرسانية بسمحية مركبة $\eta = 7,0 - j0,85$ عند التردد 1 GHz



P.2040-06

2.2.2.2 الألواح متعددة الطبقات

إذا افترضنا أن مادة البناء هي لوح أملس السطح متعدد الطبقات متجانس عازل، يمكن تقييم خصائص الانعكاس والإرسال بمعاملات الانعكاس والإرسال على أساس التوصية ITU-R P.1238، وهي معروفة بما يلي:

$$(52a) \quad R_N = \frac{E_N^r}{E_N^i}$$

$$(52b) \quad R_P = \frac{E_P^r}{E_P^i}$$

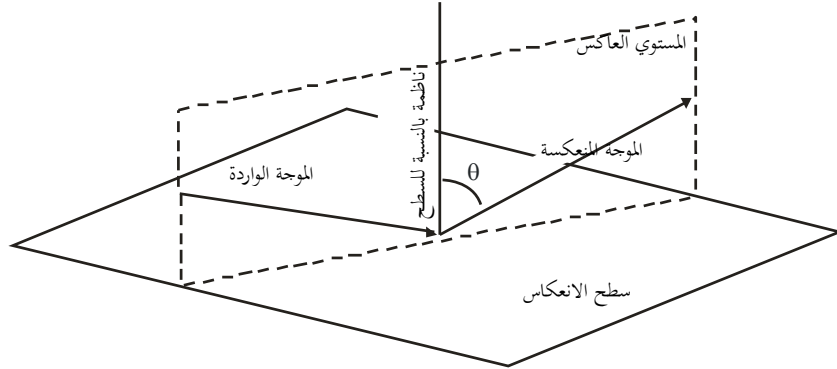
$$(52c) \quad T_N = \frac{E_N^t}{E_N^i}$$

$$(52d) \quad T_P = \frac{E_P^t}{E_P^i}$$

حيث تمثل E الانتساع المركب للمجال الكهربائي الوارد (الرمز العلوي i)، والمنعكس (الرمز العلوي r) أو المرسل (الرمز العلوي t). ويشير الدليلان N و P على التوالي إلى المكونة العادية والمكونة الموازية لسطح الانعكاس، التي تعرف على أنها السطح الذي يتضمن الشعاع الوارد والشعاع المنعكس (راجع الشكل 7 فيما يتعلق بالتشكيلة الهندسية). وتعرف المجالات الكهربائية الواردة والمنعكسة على سطح الانعكاس، في حين يعرف المجال المرسل على الجهة المقابلة لهذا السطح. ويكون كل من E_N و E_P واتجاه الانتشار دوماً ثلاثي سطوح متعامد مباشر. وتعتبر اتجاهات المجالات E_N الواردة، والمنعكسة، والمرسلة متماثلة.

الشكل 7

القواعد الهندسية لحساب خصائص الانعكاس



P.2040-07

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

$$(53a) \quad R_N = \frac{\cos \theta - \sqrt{\eta - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\eta - \sin^2 \theta}} \quad (\text{مكونة المجال الكهربائي متعامدة مع سطح الانعكاس})$$

$$(53b) \quad R_P = \frac{\cos \theta - \sqrt{\eta - \sin^2 \theta / \eta^2}}{\cos \theta + \sqrt{\eta - \sin^2 \theta / \eta^2}} \quad (\text{مكونة المجال الكهربائي موازية لسطح الانعكاس})$$

حيث تمثل θ الزاوية بين الشعاع الوارد والشعاع المتعاود مع سطح الانعكاس (انظر الشكل 7).

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

$$(53c) \quad R_C = \frac{R_N + R_P}{2} \quad (\text{استقطاب دائري})$$

تنطبق الصيغ الواردة أعلاه عندما تكون خسارة الاختراق لمواد البناء من الأهمية بحيث لا تترد 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 يعبر عن مواد البناء بعدد N من اللوحات العازلة الكهربائية، وتُعطى الشحنة والسماحية المركبة للطبقة ذات الرتبة- m ($m = 1, 2, \dots, N$) على التوالي بواسطة d_m و η_m ، يمكن الحصول على معاملي الانعكاس والإرسال بواسطة:

$$(54a) \quad R_N = \frac{B_0}{A_0}$$

$$(54b) \quad R_P = \frac{G_0}{F_0}$$

$$(54c) \quad T_N = \frac{1}{A_0}$$

$$(54d) \quad T_P = \frac{1}{F_0}$$

وفي هذه الحالة، تُحدد A_0 ، B_0 ، F_0 و G_0 من صيغ "المعاودة" كما يلي:

$$(55a) \quad A_m = \frac{\exp(\delta_m)}{2} [A_{m+1}(1+Y_{m+1}) + B_{m+1}(1-Y_{m+1})]$$

$$(55b) \quad B_m = \frac{\exp(-\delta_m)}{2} [A_{m+1}(1-Y_{m+1}) + B_{m+1}(1+Y_{m+1})]$$

$$(55c) \quad F_m = \frac{\exp(\delta_m)}{2} [F_{m+1}(1+W_{m+1}) + G_{m+1}(1-W_{m+1})]$$

$$(55d) \quad G_m = \frac{\exp(-\delta_m)}{2} [F_{m+1}(1-W_{m+1}) + G_{m+1}(1+W_{m+1})]$$

$$(56a) \quad A_{N+1} = 1$$

$$(56b) \quad B_{N+1} = 0$$

$$(56c) \quad F_{N+1} = 1$$

$$(56d) \quad G_{N+1} = 0$$

$$(57a) \quad W_{m+1} = \frac{\cos \theta_{m+1}}{\cos \theta_m} \sqrt{\frac{\eta_m}{\eta_{m+1}}}$$

$$(57b) \quad Y_{m+1} = \frac{\cos \theta_{m+1}}{\cos \theta_m} \sqrt{\frac{\eta_{m+1}}{\eta_m}}$$

$$(57c) \quad \eta_0 = \eta_{N+1} = 1$$

$$(58a) \quad \delta_m = jk_m d_m \cos \theta_m$$

$$(58b) \quad k_m = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\eta_m}$$

$$(58c) \quad k_0 = k_{N+1} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

حيث:

λ : طول الموجة في الفضاء الطلق؛

θ_m : زاوية الانكسار في الطبقة من الرتبة m ؛

θ_{N+1} : زاوية الانكسار في المساحة إلى يمين آخر حدّ مستوي.

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

3.2.2.2 الانعكاس الداخلي الكلي

تتصل زاوية الانكسار، θ_2 ، بزاوية الورود، θ_1 ، وفق قانون سنيل (Snell) كما جاء في المعادلة (30):

$$(59) \quad \frac{1}{c_1} \sin \theta_1 = \frac{1}{c_2} \sin \theta_2$$

حيث c_1 و c_2 هما سرعتا الموجة في الوسطين على النحو المبين في الشكل 3.

ويؤدي تبديل مؤشر الانكسارين $n_1 = c/c_1$ و $n_2 = c/c_2$ في المعادلة (59) إلى التالي:

$$(60) \quad \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 = \sin \theta_2$$

وفي حال $n_1 > n_2$ ، فإن $\sin \theta_1 < \sin \theta_2$. وهذا يعني أن $\sin \theta_2$ سيبلغ قيمته القصوى 1 قبل $\sin \theta_1$. وتنحصر القيمة القصوى للزاوية θ_1 بما يلي:

$$(61) \quad \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

حيث تسمى الزاوية θ_c زاوية الورود الحرجة.

وعندما تزيد زاوية الورود عن زاوية الورود الحرجة، تنعكس الموجة الواردة كلياً؛ ويشير إلى هذه الحالة باسم "الانعكاس الداخلي الكلي".

4.2.2.2 تباعد الموجات وتركزها

يُنظر في المجال الكهربائي الكلي للموجة الواردة إلى الوسط 1، المبين في الشكل 3، ولتلك المنعكسة عنه. وفي الحالة الأولى، يُنظر في حالة خاصة يكون فيها الوسط 1 فضاءً طلقاً والوسط 2 موصلاً مثالياً، حيث تتعامد مكونة المجال الكهربائي مع مستوي الورود على النحو المبين في الشكل 3.

ويمكن التعبير عن المجال الكهربائي للموجة الواردة والموجة المنعكسة على النحو التالي:

$$(62) \quad E_y^i = E_1 e^{-jk_o(x \sin \theta_1 + z \cos \theta_1)} \quad \text{للواردة:}$$

$$(63) \quad E_y^r = \bar{E}_1 e^{-jk_o(x \sin \theta_1 - z \cos \theta_1)} \quad \text{للمنعكسة:}$$

حيث k_0 هو الرقم الموجي للخواء.

ومعامل انعكاس موصل مثالي يساوي -1، وبالتالي:

$$(64) \quad \bar{E}_1 = -E_1$$

ويمكن عندئذ التعبير عن المجال الكهربائي للموجة الواردة والموجة المنعكسة في الفضاء الطلق على النحو التالي:

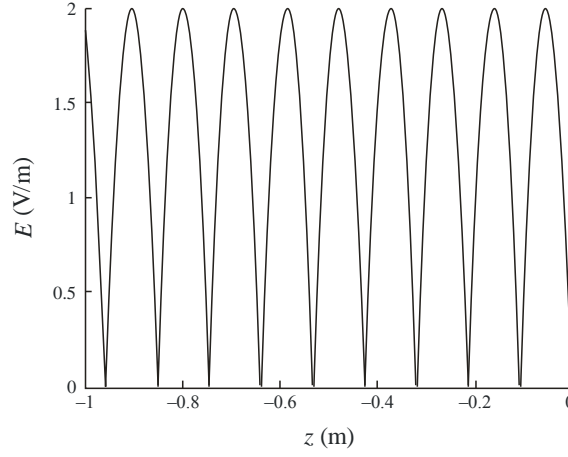
$$(65) \quad E = E_y^i + E_y^r = E_1 e^{-jk_o(x \sin \theta_1 + z \cos \theta_1)} - E_1 e^{-jk_o(x \sin \theta_1 - z \cos \theta_1)}$$

$$(66) \quad E = -2jE_1 \sin(k_o z \cos \theta_1) e^{-jk_o x \sin \theta_1}$$

وفي الوسط 1، عند إبقاء قيمة x ثابتة، يؤدي تغير المجال الكهربائي على المحور z تباعد الموجة وتركزها بشكل مستقل عن الزمن. وتسمى هذه الموجة موجة مستقرة، وهي حصيلة التداخل بين الموجة الواردة والموجة المنعكسة. ولتوضيح هذا المؤثر، يُرسم في الشكل 8 مetail المجال الكهربائي الكلي بقيم $E_1 = 1$ و $k_0 = 30$ و $x = 0$ وزاوية ورود $= 10^\circ$.

الشكل 8

مطال المجال الكهربائي الكلي في الحالة الأولى للوسط 1



P.2040-08

3.2.2 مؤثرات الهياكل غير المنتظمة

1.3.2.2 الانتثار من البنى الدورية (الهياكل العادية)

عند ورود موجة كهرومغناطيسية مستوية إلى هيكل دوري، على النحو المبين في الشكل 9، ومروها من خلال فتحات، تبلغ قدرة الموجات العابرة للفتحات الدورية حدها الأقصى بموجب الشرط (67) وحدها الأدنى بموجب الشرط (68).

$$(67) \quad d(\sin \theta + \sin \varphi) = n\lambda$$

و

$$(68) \quad d(\sin \theta + \sin \varphi) = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

حيث:

d : المسافة بين فتحتين

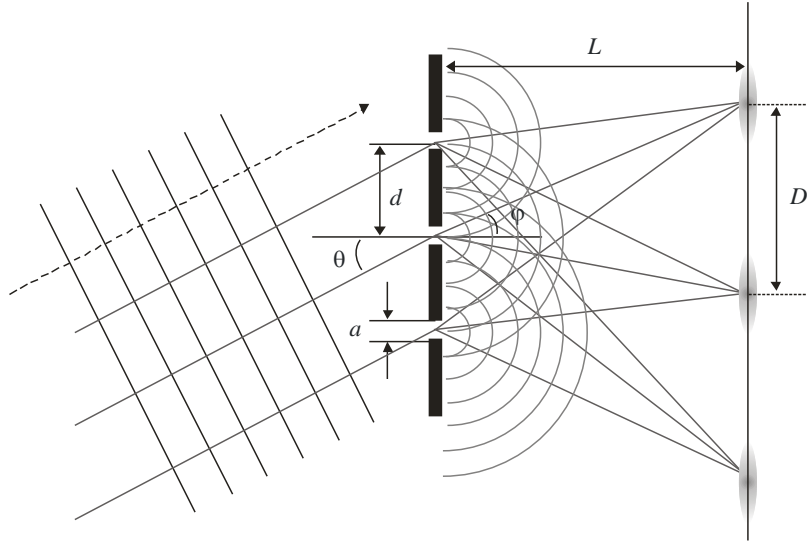
θ : زاوية الورد

φ : زاوية المغادرة

λ : الطول الموجي

n : عدد صحيح.

الشكل 9
الانتشار من البنى الدورية



P.2040-09

ويمكن تقدير النقاط القصوى في الدورة باستخدام المعادلة (69) بشرط $L \gg d$.

$$(69) \quad D = \frac{\lambda L}{d}$$

وإذا تحقق شرط $\theta = 0$ ، ويمكن اشتقاق شدة الموجة I كما يلي:

$$(70) \quad I = \frac{I_0}{m^2} \frac{\sin^2\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \phi\right) \sin^2\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \phi\right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \phi\right)^2 \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \phi\right)^2}$$

حيث:

$$\theta = 0 : I_0$$

$$: m \text{ عدد الفتحات}$$

$$: a \text{ عرض الفتحة.}$$

2.3.2.2 اختراق الموجة المستوية الكهرومغناطيسية من خلال الفتحات والهياكل

1.2.3.2.2 محاكاة النظرية الهندسية المنتظمة للانعراج (UTD) وقياس النتائج

1.1.2.3.2.2 مقدمة

يمكن أن تعامل نافذة في جدار مبنى عادة على أنها فتحة، لأن خسارة الاختراق من خلال نافذة زجاجية تقل عمومًا عنها من خلال الجدران السطحية المحيطة المصنوعة من مواد أخرى مثل الحجر والطوب والخرسانة.

وهناك العديد من الأساليب التجريبية أو النظرية لتقييم تأثير الفتحة على خسارة دخول المبنى. وتقيّم الأمثلة أدناه باستخدام نهج البصريات الهندسية (GO).

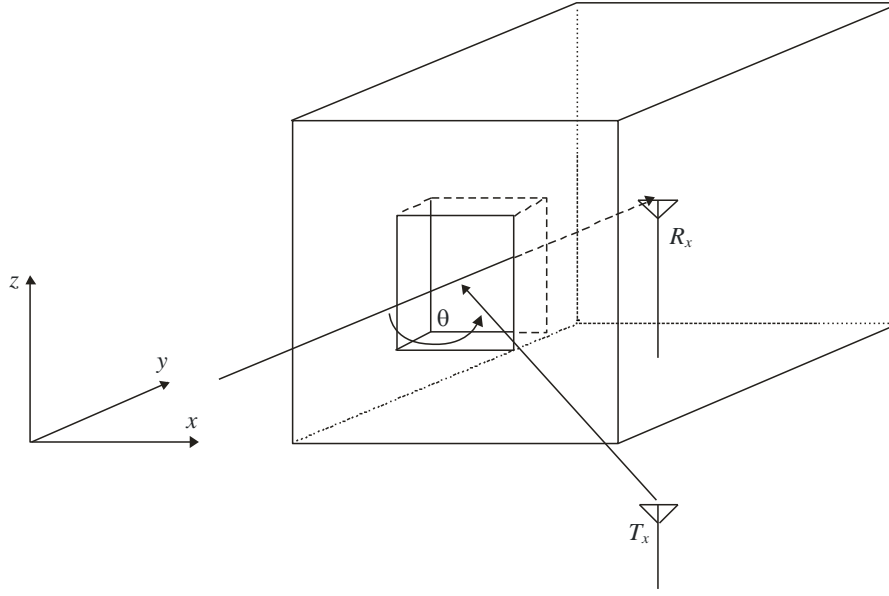
يُعرّف صندوق ثلاثي الأبعاد (3D) بفتحة مفتوحة، وتعطى نتائج الحسابات لمقاسات مختلفة للفتحة. وتقارن هذه الحسابات مع القياس.

2.1.2.3.2.2 الأسلوب

يُرد نموذج مفترض في الشكل 10. والزاوية θ هي الزاوية بين الشعاع الوارد والمستوي المتعامد مع الفتحة ($0 \leq \theta \leq 90^\circ$). ويبين الشكل 11 نموذجاً هندسياً لتقييم تأثير الفتحة على خسارة دخول المبنى. ويفترض نموذج ثلاثي الأبعاد. والجزء العلوي والسفلي من الشكل 11 هما المخطط الأرضي والرسم البياني للارتفاع، على التوالي.

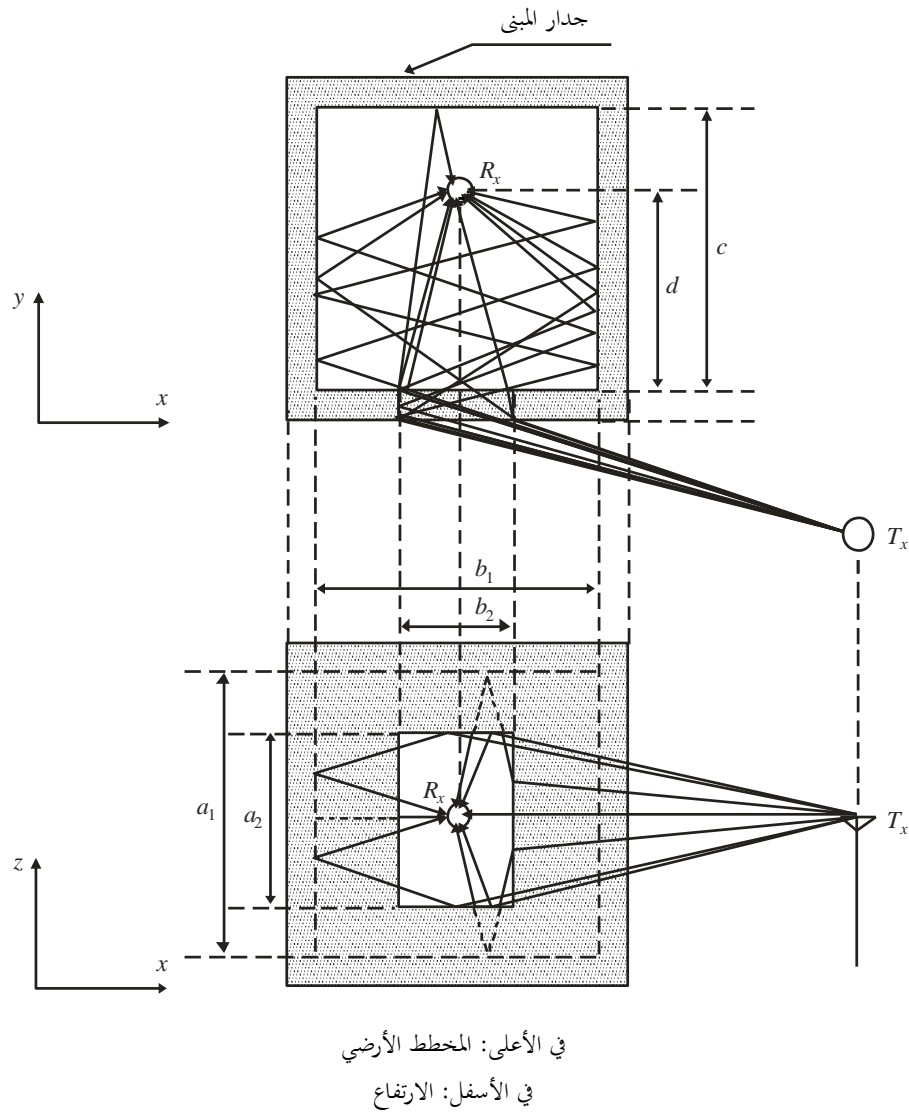
الشكل 10

نموذج مفترض



الشكل 11

نموذج هندسي لتقييم تأثير الفتحة على خسارة دخول المبنى



P.2040-11

ترد أدناه المعلومات المعطاة في الشكل 11.

d : مسافة المستقبل R_x عن فتحة المبنى

T : سمك جدار المبنى (ويفترض تماثل جميع الجدران)

a_1 : المقاس العمودي للغرفة

a_2 : المقاس العمودي للفتحة

b_1 : المقاس الأفقي للغرفة

b_2 : المقاس الأفقي للفتحة

c: عمق الغرفة من الفتحة.

وافترض مكان الفتحة في وسط جدار المبنى.

تُعتبر الموجات التالية في التحليل:

- (1) الموجة المباشرة (منطقة خط البصر (LoS)).
- (2) الموجات المنعكسة، لمرة واحدة إلى أربع مرات، عن أي سطح.
- (3) الموجات المنعرجة عن أسافين الفتحة.
- (4) الموجات المنعرجة المنعكسة عن إسفين الفتحة وجدار الغرفة.
- (5) الموجات المنعكسة المنعرجة عن جدار الغرفة وإسفين الفتحة.

3.1.2.3.2.2 نتائج الحساب

يُنظر في حالتين، A و B. والفرق بين الحالتين هو مقياس الفتحة. وتظهر أبعاد الفتحة والغرفة في الجدول 1. التردد هو 5 GHz. ويُنظر في الاستقطاب الرأسي. ويفترض أن مادة جدران البناء وسماحياتها المركبة من الخرسانة و $7,0-j0,85$ ، على التوالي. ومعامل الانعكاس والانعراج المستخدمان في البصريات الهندسية ثلاثية الأبعاد هما مُعامل انعكاس فرينل ومُعامل النظرية الهندسية المنتظمة للانعراج (UTD)، على التوالي. وتبلغ فتحة الزاوية θ ، 40° . ويتحرك هوائي الاستقبال (Rx) في خط مستقيم يمر من خلال مركز الفتحة وبالتوازي مع المحور y في الشكل 11. وارتفاع هوائي الإرسال هو نفس ارتفاع هوائي الاستقبال.

وترد النتيجة في الشكل 12. وفي هذه الأشكال، يمثل المحور الرأسي والمحور الأفقي الخسارة الزائدة عن الخسارة في الفضاء الطلق عند $m = 0$ وكون المسافة عن الفتحة d ، على التوالي. وتُرسَم نتائج الحالتين A و B.

الجدول 1

الأبعاد المستخدمة في الحساب

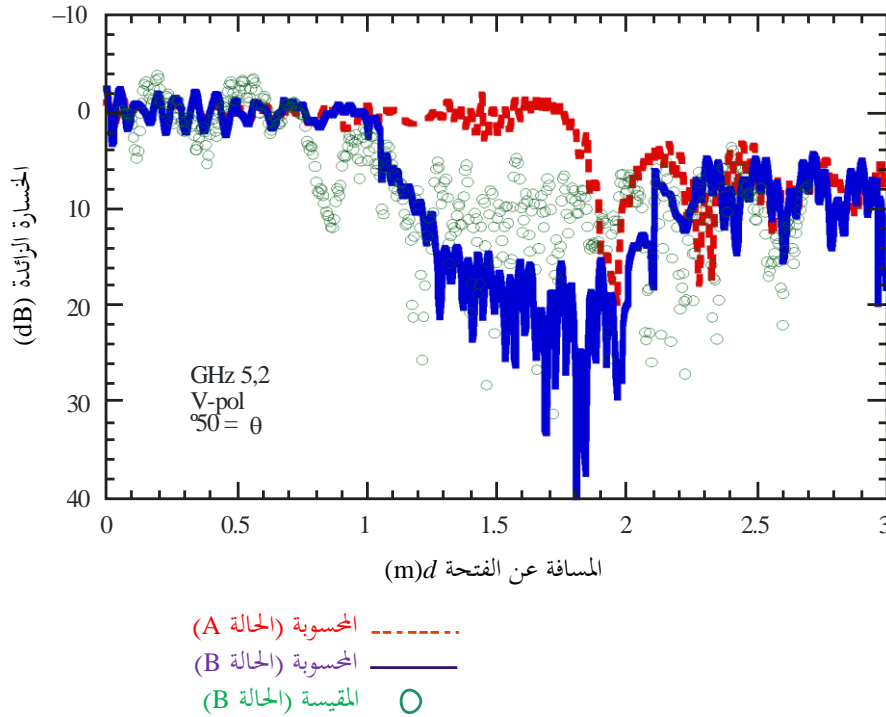
الحالة B	الحالة A	
3-0 (طول الخطوة 5 cm)	3-0 (طول الخطوة 5 cm)	d (مسافة التحرك بعيداً عن الفتحة) (m)
5	5	T (cm)
2,32	2,32	a_1 (m)
1,3	2,32	a_2 (m)
2,64	2,64	b_1 (m)
s1,3	2,64	b_2 (m)
3,6	3,6	c (m)
50	50	θ ($^\circ$)
1,69	6,12	مساحة الفتحة (m^2)

4.1.2.3.2.2 القياس

أجريت قياسات لخسارة دخول المبنى في شقة عامة. وتمثل هندسة القياسات تلك التي اعتمدت في الشكلين 10 و 11. وتمثل أبعاد الغرفة والفتحة تلك الواردة في الجدول 1. ولكن نوع الفتحة المفترض للقياسات يُستخدم حصراً في الحالة B. وتبلغ فتحة الزاوية θ ، 50° . والتردد هو 5,2 GHz. وهوائي الإرسال (Tx) والاستقبال (Rx) هما هوائي اتجاهي عرض حزمته في المستوي الأفقي 60° وهوائي شامل الاتجاهات، على التوالي. والاستقطاب رأسي. وترد في الشكل 12 نتائج القياس مع النتائج المحسوبة لكلتا الحالتين A و B. وعلى الرغم من أن النتائج المحسوبة للحالة B تبدو مبالغاً في تقدير الخسائر الزائدة في المدى المتوسط للمسافة "d" بالمقارنة مع النتائج المقاسة، فإن هذه النتائج تتفق اتفاقاً جيداً مع النتائج المقاسة من حيث الاتجاه. وتتضاءل خسارة الدخول بتزايد "d" في المنطقة خارج خط البصر (NLoS). وبالطبع، تعتمد هذه الظواهر بشدة على العديد من العوامل مثل أبعاد الغرفة أو موقع هوائي الاستقبال. ومع ذلك، يمكننا التعرف على آليات تأثير الفتحة على خسارة دخول المبنى.

الشكل 12

خسارة دخول المبنى عند التردد 5,2 GHz والاستقطاب رأسي والزاوية $\theta = 50^\circ$



P.2040-12

2.2.3.2.2 النظرية الهندسية المنتظمة للانعراج (UTD) في عائق إسفيني

1.2.2.3.2.2 الأسلوب

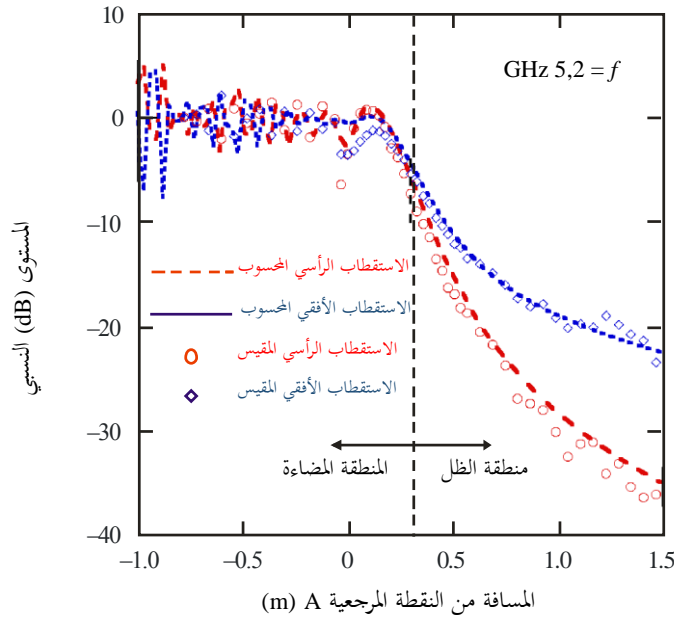
يمكن استعمال النظرية الهندسية المنتظمة للانعراج للتنبؤ بخسارة الانعراج الناتجة عن إسفين ذي إيصالية محددة. ونجد من بين التطبيقات التي تتناسب مع هذه الطريقة دراسة الانعراج حول زاوية مبنى معين، أو على قمة السقف، أو عندما تختص التضاريس الأرضية بربوة ذات شكل إسفيني. وتتطلب هذه الطريقة معرفة الإيصالية والسماحية للإسفين المعيق، وتفترض عدم وجود أي إرسال عبر هذا العائق.

2.2.2.3.2.2 مقارنة النتائج المقيسة والمحسوبة

الشكل 13

الشكل 14

النتائج المقاسة والمحسوبة لخسارة الانعراج عن إسفين موصل



P.2040-14

تتفق هذه النتائج اتفاقاً جيداً مع النتائج المحسوبة باستخدام النظرية الهندسية المنتظمة للانعراج عندما تؤخذ كلتا حالتي الاستقطاب الرأسى والأفقى بعين الاعتبار.

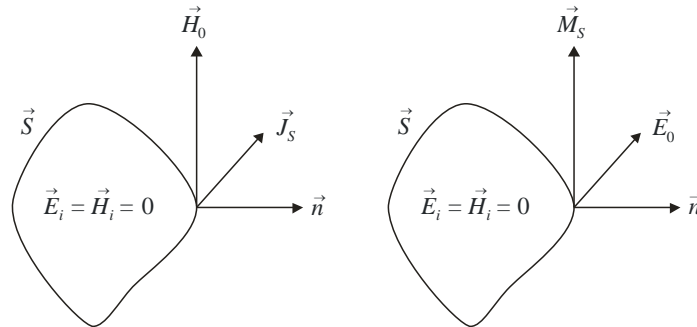
3.2.3.2.2 مبدأ التكافؤ الكهرمغناطيسي

يستخدم مبدأ التكافؤ الكهرمغناطيسي لتقدير المجال الكهرمغناطيسي، ويوضح هذا المفهوم في الشكل 15.

ويشع المجالان الكهربائي والمغناطيسي على التوالي بواسطة تيار كهربائي وتيار مغناطيسي ضمن الحد الافتراضي S . وهنا يتمثل المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي ضمن الحد الافتراضي S بالرمزين \vec{E}_i و \vec{H}_i على التوالي، ويتمثل المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي خارج الحد الافتراضي \vec{S} بالرمزين \vec{E}_0 و \vec{H}_0 على التوالي.

الشكل 15

التيار الكهرمغناطيسي المكافئ



P.2040-15

أ (المجال المغناطيسي والتيار
الكهربائي المكافئ

ب (المجال الكهربائي والتيار
المغناطيسي المكافئ

يُستنتج من الشرط الحدي، أن المجال الكهربائي والمجال المغنطيسي يجب أن يكونا باستمرار عند الحد الافتراضي \vec{S} . وتعطى المعادلتان التاليتان.

$$(71) \quad \begin{aligned} \vec{n} \times (\vec{H}_0 - \vec{H}_i) &= 0 \\ -\vec{n} \times (\vec{E}_0 - \vec{E}_i) &= 0 \end{aligned}$$

وهنا، يُستنتج من جداء متجهي التيارين الكهربائي والمغنطيسي عند الحد \vec{S} ، ومن المتجه المتعاقد مع الحد \vec{S} ، أن التيار الكهربائي المكافئ \vec{J}_s والتيار المغنطيسي المكافئ \vec{M}_s يمكن التعبير عنهما كما يلي:

$$(72) \quad \begin{aligned} \vec{J}_s &= \vec{n} \times \vec{H}_0 \\ \vec{M}_s &= -\vec{n} \times \vec{E}_0 \end{aligned}$$

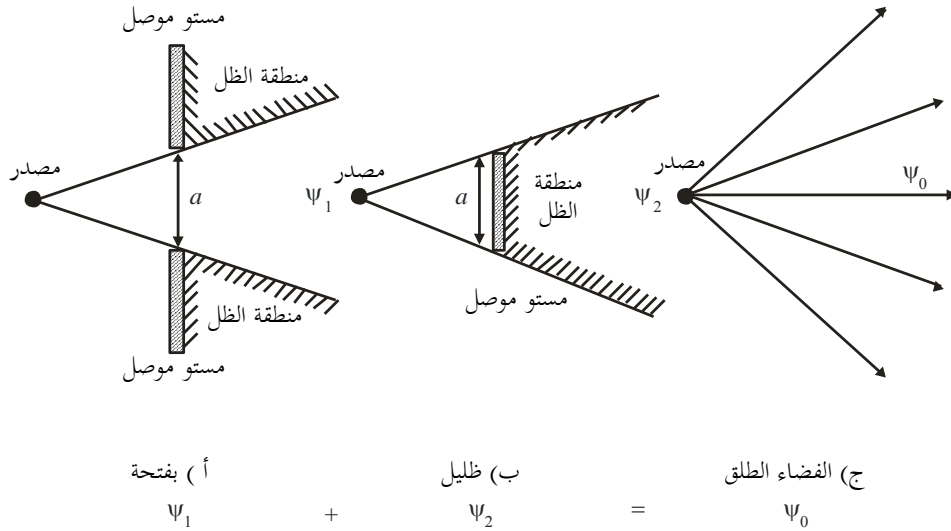
لذا يمكن تقدير المجال الكهرمغنطيسي خارج الحد، من المعلومات عن المجال الكهرمغنطيسي عند الحد، وبدون معلومات عن المصدر الكهرمغنطيسي الأصلي.

4.2.3.2.2 مبدأ بابينية (Babinet)

يتناول مبدأ بابينية أنماط الانعراج لشاشتين متكاملتين على النحو المبين في الشكل 16، أي واحدة بفتحات وأخرى ظليلة، وبالعكس. ويفيد هذا المبدأ بأن مجموع متجهي الاتساعين (وليس الشدتين) المنعرجين، ψ_1 و ψ_2 ، في أي نقطة يساوي اتساع الموجة الأصلية بغياب الشاشة، ψ_0 . وبالتالي، إذا عُرف مخطط الانعراج لفتحة معينة، يمكن الحصول بسهولة على مخطط العائق المقابل.

الشكل 16

مبدأ بابينية



P.2040-16

3.3.2.2 الأدلة الموجية والتجاويف الرنانة

1.3.3.2.2 النظرية بشأن خصائص تردد ثابت التوهين في الدليل الموجي

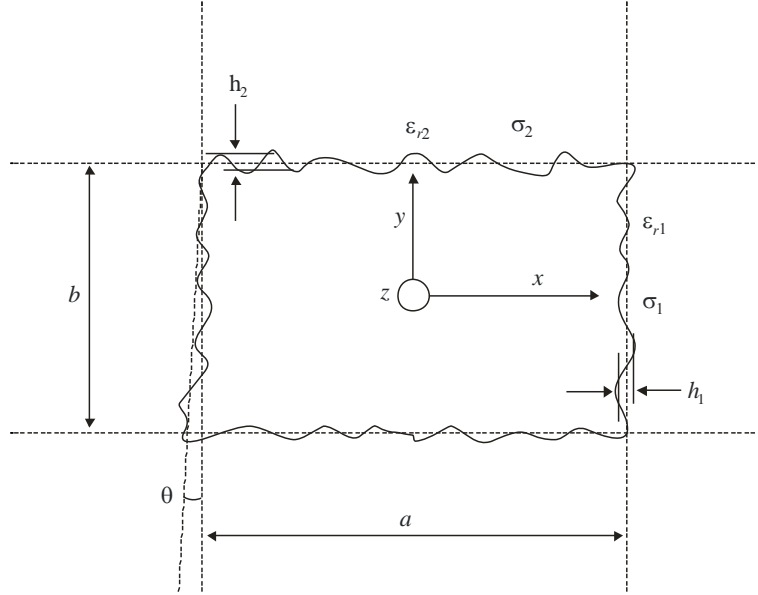
يمكن أن يتألف الدليل الموجي من فضاء أجوف تحيط به مواد عازلة موهنة. وفي حالة وجود هيكل مبنى، يمكن اعتبار ممر أو مركز تسوق تحت الأرض أو نفق دليلاً موجياً. وتوهن قدرة موجة راديوية تنتشر في الدليل الموجي وفقاً للمسافة. ومن المعروف أن الدليل

الموجي له خصائص ترددية كتردد القطع تختلف حسب الشكل. وفي هذه الفقرة، تُعرض صيغة لاشتقاق ثابت التوهين للخصائص الترددية في دليل موجي.

ويظهر المقطع العرضي لهيكل دليل موجي مربع في الشكل 17. وفي هذه الحالة، تختلف الثوابت الذاتية للمادة العازلة الموهنة في الجدران الجانبية عنها في السقف والأرضية.

الشكل 17

مقطع عرضي لدليل موجي وثوابت المواد



P.2040-17

في الشكل 17، a هو عرض الدليل الموجي و b هو ارتفاعه (m)، h_1 و h_2 هما خشونة جذر متوسط تربيع التوزيع الغاوسي لمستوى السطح، و θ هو ميل جذر متوسط التربيع (rad). وتُحسب قيم السماحية المركبة للمواد، ϵ_{ri}^* ، على النحو التالي.

$$(73) \quad \epsilon_{ri}^* = \epsilon_{ri} - j \left(\epsilon_{ri}'' + \frac{\sigma_i}{\omega \epsilon_0} \right), \quad i = 1, 2$$

حيث ϵ_{ri} هو ثابت العزل النسبي و σ_i هو الإيصالية. والكم ϵ_{ri}'' هو ظل خسارة المواد، و ω هو التردد الزاوي، و ϵ_0 هي السماحية في الفضاء الطلق.

ويصاغ ثابت التوهين الأساسي على النحو التالي.

$$(74) \quad L_{basic_h} = K_h \lambda^2 \left[\text{Re} \left(\frac{\epsilon_{r1}^*}{a^3 \sqrt{\epsilon_{r1}^* - 1}} + \frac{1}{b^3 \sqrt{\epsilon_{r2}^* - 1}} \right) - \frac{\lambda}{2\pi} \text{Im} \left(\frac{|\epsilon_{r1}^*|^2}{a^4 (\epsilon_{r1}^* - 1)} + \frac{1}{b^4 (\epsilon_{r2}^* - 1)} \right) \right] \quad (\text{dB/m})$$

$$L_{basic_v} = K_v \lambda^2 \left[\text{Re} \left(\frac{1}{a^3 \sqrt{\epsilon_{r1}^* - 1}} + \frac{\epsilon_{r2}^*}{b^3 \sqrt{\epsilon_{r2}^* - 1}} \right) - \frac{\lambda}{2\pi} \text{Im} \left(\frac{1}{a^4 (\epsilon_{r1}^* - 1)} + \frac{|\epsilon_{r2}^*|^2}{b^4 (\epsilon_{r2}^* - 1)} \right) \right]$$

هما قيمتان ثابتتان تعتمدان على شكل المقطع، وتردان في الجدول 2.

الجدول 2

القيمتان الثابتان لمختلف أشكال المقطع العرضي

الشكل	دائرة	إهليلج	مربع	بخلفية مقوسة
K_h	5,09	4,45	4,34	5,13
K_v	5,09	4,40	4,34	5,09

وتصح الصيغ المذكورة أعلاه بناءً على المعادلة (75) التي تمثل الشرط المقيد.

$$(75) \quad (m) \quad \lambda < \frac{\pi a \sqrt{\epsilon_{r1} - 1}}{\epsilon_{r1}}$$

$$\lambda < \pi b \sqrt{\epsilon_{r2} - 1}$$

الخصائص الفريدة في حالة الشكل المربع

يصاغ في المعادلة (76) ثابت التوهين بسبب الخشونة، التي تعتبر بمثابة الاختلافات المحلية في مستوى السطح نسبةً إلى متوسط مستوى سطح الجدار.

$$(76) \quad (dB/m) \quad L_{roughnessh} = K_h \pi^2 \lambda \left[\left(\frac{h_1}{a^2} \right)^2 + \left(\frac{h_2}{b^2} \right)^2 \right]$$

$$L_{roughnessv} = K_v \pi^2 \lambda \left[\left(\frac{h_1}{a^2} \right)^2 + \left(\frac{h_2}{b^2} \right)^2 \right]$$

ويصاغ في المعادلة (77) ثابت التوهين بسبب ميل الجدار.

$$(77) \quad (dB/m) \quad L_{tilt,h} = K_h \frac{\pi^2 \theta^2}{\lambda}$$

$$L_{tilt,v} = K_v \frac{\pi^2 \theta^2}{\lambda}$$

وبالتالي فإن ثابت التوهين الكلي في حالة الشكل المربع هو مجموع الخسائر المذكورة أعلاه على النحو التالي.

$$(78) \quad (dB/m) \quad L_h = L_{basic,h} + L_{roughness,h} + L_{tilt,h}$$

$$L_v = L_{basic,v} + L_{roughness,v} + L_{tilt,v}$$

2.3.3.2.2 صلاحية تطبيق نظرية الدليل الموجي

تظهر نظرية الدليل الموجي اتفاقاً جيداً مع خصائص الانتشار المقيسة في الممر في المدى الترددي من 200 MHz إلى 12 GHz في حال عدم وجود حركة مشاة في الممر.

تأثير حركة المشاة على الدليل الموجي

يبين الشكل 18 مقارنة بين قيم ثابت التوهين النظرية والمقيسة خلال النهار (عند وجود حركة مشاة)، وأثناء الليل (عند خلو الممر). وتُحسب القيم النظرية على أساس المعلومات الواردة في الجدول 3.

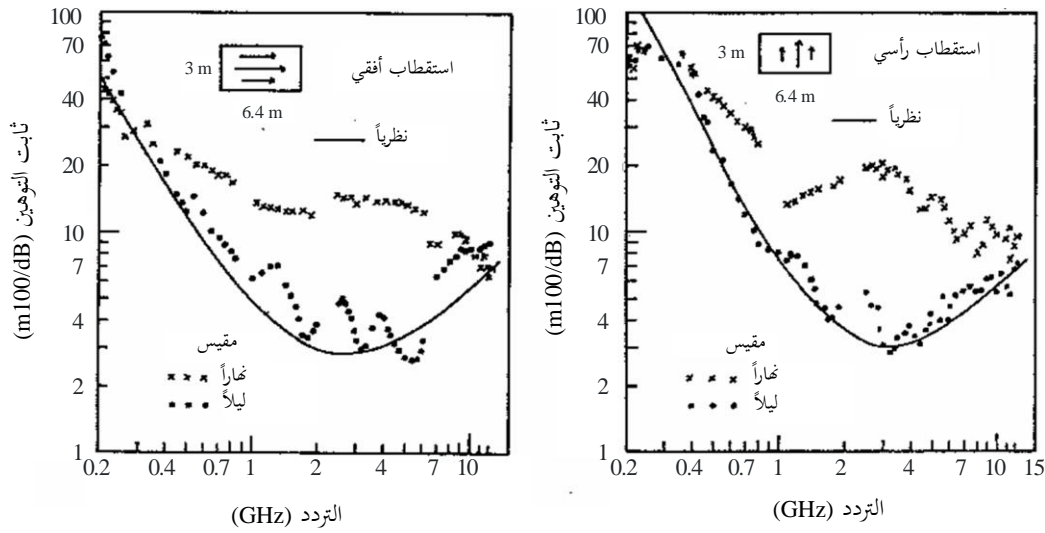
الجدول 3

المعلومات المستخدمة في الحساب تحت الأرض

ثابت المادة				الخشونة		الميل (بالدرجات)	الارتفاع (m)	العرض (m)	
σ_2	σ_1	ϵ_{r2}	ϵ_{r1}	h_2	h_1				
0,1	0,5	10	15	0,2	0,4	0,35	3,0	6,4	تحت الأرض

الشكل 18

مقارنة ثابت التوهين بين النهار والليل



P.2040-18

يبين الشكل 18 أن نظرية الدليل الموجي يصح تطبيقها ليلاً على خصائص انتشار واقعية في الممر في المدى الترددي من 200 MHz إلى 12 GHz. ولكن لا يصح تطبيقها نهاراً على خصائص انتشار واقعية لأن القدرة المستقبلية تتوهن بحركة المشاة. وبالتالي يصح تطبيق نظرية الدليل الموجي على الحالات التي يغيب فيها تأثير من تظليل العوائق.

3.2 نظرية ونتائج مواد السطح الانتقائي ترددياً

1.3.2 السطح الانتقائي ترددياً

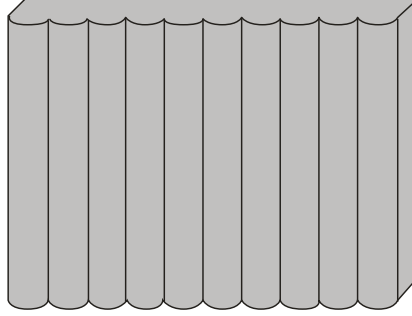
تتفاوت قدرة الموجات المنتشرة وفق خشونة السطح. وفي هذه الفقرة، يرد وصف نظرية لحساب مجالات منتشرة عن سطح ذي صفيق من التحدبات المستديرة. فأولاً، لوضع معلومات خشونة السطح، يعرف السطح الخشن باستخدام صفيق تحدبات مستديرة مشكّل بتحديد مواقع أسطوانات دائرية دورياً. وثانياً يعرف معامل انعكاس المجالات المنتشرة باستخدام المجاميع الشبكية التي تميز الترتيب الدوري لمسببات الانتشار والمصفوفة T لصفيق الأسطوانات الدائرية. وثالثاً، تظهر النتيجة العددية التي تبين الخاصية المعتمدة على التردد للانعكاس عن سطح التحدب المستدير. وأخيراً، تظهر نتيجة القياس لبيان تغير قدرة الموجات المنتشرة مع تردد الموجة الواردة في حال وجود صفيق تحدبات مستديرة على سطح مبنى.

2.3.2 نظرية انتشار الموجات حول سطح صفيح تحدبات مستديرة

إذا جُعل صفيح تحدبات مستديرة دورياً على سطح مبنى على النحو المبين في الشكل 19، يمكن التحكم في موجات انعكاس/انتشار أكبر من تلك الناتجة عن سطح مستو. ويمكن أن تُستخدم نظرية حساب موجات منتشرة من الصفائف الدورية لأسطوانات دائرية من أجل تحديد موجات الانتشار حول صفيح تحدبات السطح.

الشكل 19

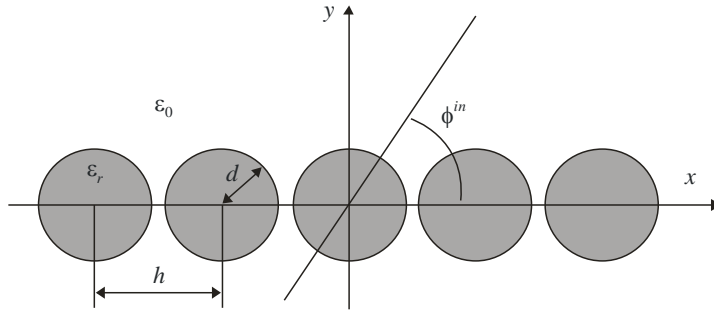
سطح صفيح التحدبات المستديرة



P.2040-19

الشكل 20

هندسة صفيح دوري لأسطوانات دائرية



P.2040-20

عندما تقع أسطوانات دائرية متطابقة بشكل دوري على المحور x على النحو المبين في الشكل 20، يعطى معامل انعكاس القدرة R_v لأسلوب الانتشار من المرتبة v عند تحقق الشرط $k_v > 0$ ، على النحو التالي:

$$(79) \quad R_v = \frac{k_v}{k_0 \sin \varphi^{in}} |\mathbf{p}_v^T \cdot \mathbf{a}_0^{sc}|^2$$

حيث $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ ، و λ_0 هو الطول الموجي للموجات الواردة في زاوية φ^{in} . وفي المعادلة (79)، يتم الحصول على \mathbf{p}_v^T و \mathbf{a}_0^{sc} على النحو التالي:

$$(80) \quad \mathbf{p}_v = \begin{cases} \frac{2(j)^m (k_{xv} + j k_v)^m}{h k_v k_0^m} & (m \geq 0) \\ \frac{2(-j)^{|m|} (k_{xv} - j k_v)^{|m|}}{h k_v k_0^{|m|}} & (m < 0) \end{cases}$$

$$(81) \quad \mathbf{a}_0^{sc} = (\mathbf{I} - \mathbf{T} \cdot \mathbf{L})^{-1} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{a}^{in}$$

حيث \bar{I} هي مصفوفة الوحدة، و $k_{xv} = -k_0 \cos \varphi^{in} + 2v\pi/h$ ، و $k_v = \sqrt{k_0^2 - k_{xv}^2}$ ، و h ، وهو الفاصل الدوري بين كل محذب مستدير وآخر. و \bar{L} هي مصفوفة مربعة تعرّف بدلالة المجاميع الشبكية التالية:

$$(82) \quad L_{mn} = \sum_{l=0}^{\infty} H_{m-n}^{(1)}(k_0 l h) e^{jk_0 l h \varphi^{in}} + (-1)^{m-n} \sum_{l=0}^{\infty} H_{m-n}^{(1)}(k_0 l h) e^{-jk_0 l h \varphi^{in}}$$

حيث $H_m^{(2)}$ هي دالة هانكل (Hankel) من النوع الأول والترتيب التاسع. و T هي مصفوفة للمجالات المنتشرة وتعطى بالمصفوفة القطرية التالية للمجال الكهربائي الوارد E_z^{in} والمجال المغنطيسي الوارد H_z^{in} ، على التوالي.

$$(83) \quad T_{mn}^E = -\frac{\sqrt{\epsilon_r} J'_m(kd) J_m(k_0 d) - J_m(kd) J'_m(k_0 d)}{\sqrt{\epsilon_r} J'_m(kd) H_m^{(1)}(k_0 d) - J_m(kd) H_m^{(1)'}(k_0 d)} \delta_{mn}$$

$$(84) \quad T_{mn}^H = -\frac{J'_m(kd) J_m(k_0 d) - \sqrt{\epsilon_r} J_m(kd) J'_m(k_0 d)}{J'_m(kd) H_m^{(1)}(k_0 d) - \sqrt{\epsilon_r} J_m(kd) H_m^{(1)'}(k_0 d)} \delta_{mn}$$

حيث ϵ_r هو السماحية النسبية للأسطوانة العازلة، و J_m هي دالة بسل (Bessel) والترتيب m ، وتشير علامة الفتحة إلى المشتق بالنسبة إلى المتغير، ويشير δ_{mn} إلى دلتا كرونكر (Kronecker). ويشير a^{in} إلى متجه العمود الذي تمثل عناصره الاتساعات المجهولة للمجال الوارد.

$$(85) \quad a^{in} = [(j)^n e^{-jn \varphi^{in}}]$$

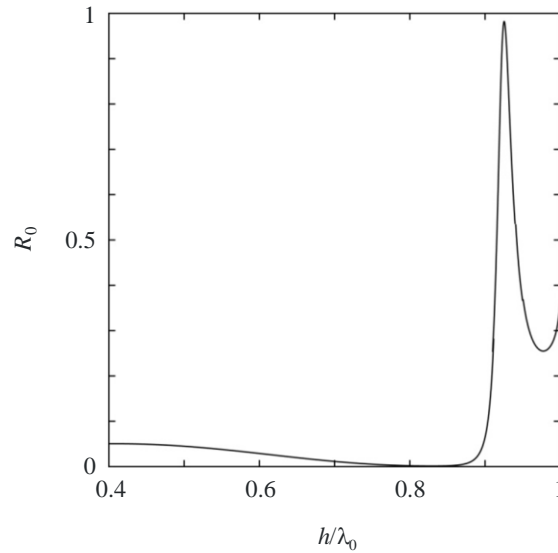
3.3.2 نتائج الحساب

تظهر نتيجة الحساب لمعامل قدرة الانعكاس في الشكل 21. وتُحسب النتيجة باستخدام المعادلة (79) إذا كان المجال الكهربائي E_z^{in} مرسلًا بزاوية $\varphi^{in} = 90^\circ$ إلى التحدبات المستديرة العازلة التي يبلغ قطرها وسماحيتهما $d=0,3h$ و $\epsilon_r=2,0$ ، على التوالي. وفي النتيجة، هناك النطاق الترددي الذي تعكسه الموجة الواردة عن السطح بالكامل تقريباً حتى لو كانت مادته عازلة لا خسارة فيها.

الشكل 21

معامل انعكاس القدرة R_0 بدلالة الطول الموجي المقيس h/λ_0

في مجال كهربائي وارد متعامد مع السطح E_z^{in}

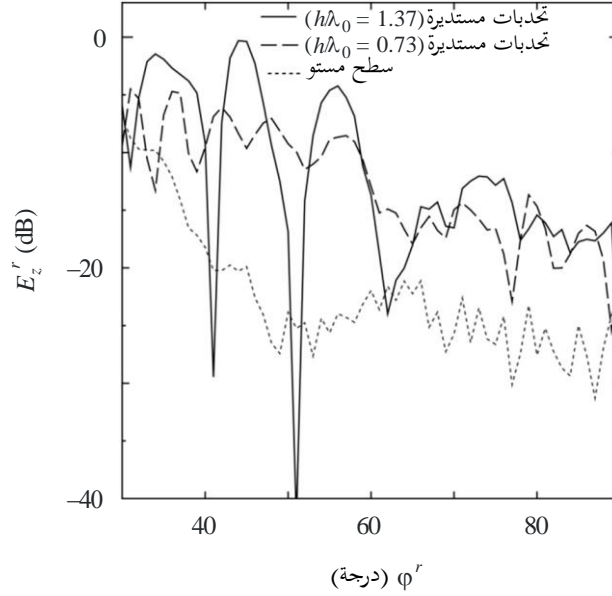


4.3.2 القياس

أجريت قياسات للموجات المنتشرة من مبنى له صفيح تحذبات مستديرة. ويبين الشكل 22 مقارنة الموجات المنتشرة من المبنى بين سطح مستو و سطح ذي صفائف تحذبات مستديرة. وجرى قياس الموجات المنتشرة من المبنى في مختلف الزوايا المنعكسة φ^r بين 30° و 90° عندما يرسل المجال الكهربائي في زاوية φ^{in} . وتعرف زاوية الورود وزاوية الانعكاس على النحو المبين في الشكل 23.

الشكل 22

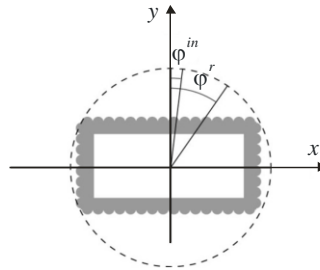
هندسة صفيح دوري من أسطوانات دائرية



P.2040-22

الشكل 23

شكل مسطح للمخطط التركيبي للقياسات



P.2040-23

تبين نتائج القياس أن قدرة المجال المنتشر من سطح له صفيح تحذبات مستديرة تزداد عنها من سطح مستو، ويمكن التحكم فيها بالدور البيني وبقطر كل تحذب مستدير؛ علماً بأن السماحية النسبية والإيصالية لمواد البناء قُدرتا بقيمتي $\epsilon_r = 6,0$ و $\sigma = 0,1 \text{ S/m}$ ، على التوالي.

3 مجموعات الخواص الكهربائية للمواد

قد يصعب العثور على بيانات لها صفة تمثيلية للخواص الكهربائية للمواد، لأن الخصائص يعبر عنها باستخدام توليفة مختلفة من المعلومات، ويمكن أن تعطى السماحية النسبية في ترددات ليست قريبة من تلك التي تسترعي الاهتمام. ولذلك فقد جرى إعداد جدول لخواص المواد له صفة تمثيلية باستخدام نهج الاحتواء في منحني الذي جاء وصفه في الفقرة 4.1.2.

وقد جُمعت البيانات من ثماني مجموعات من الخواص الكهربائية للمواد (أي ما مجموعه أكثر من 90 خاصية منفصلة) الواردة في الأدبيات المفتوحة، وحُولت إلى نسق معياري وفُزلت ضمن فئات المواد. واشتُقت لكل فئة صيغتان بسيطتان عن اعتماد السماحية النسبية، ϵ_r' ، والإيصالية، σ ، على التردد، وهما كما يلي:

$$(86) \quad \epsilon_r' = a f_{\text{GHz}}^b$$

و:

$$(87) \quad \sigma = c f_{\text{GHz}}^d \text{ S/m}$$

حيث f_{GHz} هو التردد بوحدة GHz و σ هي بوحدة S/m (ولا أبعاد للسماحية النسبية ϵ_r'). وترد قيم a و b و c و d في الجدول 4. وحيثما تغيب قيمة b أو d ، يشير ذلك إلى ثبات قيمة ϵ_r' أو σ (مع قيمة a أو c) على نحو مستقل عن تردد. وهذا يعادل تصفير قيمة b أو d .

وإذا لزم الأمر، يمكن الحصول على الجزء التخيلي للسماحية النسبية، ϵ_r'' ، بدلالة الإيصالية والتردد:

$$(88) \quad \epsilon_r'' = 17.98 \sigma / f$$

الجدول 4

خواص المواد

مدى الترددات	الإيصالية		السماحية النسبية		صنف المادة الخام
GHz	d	c	b	a	
100-1	0,8095	0,0326	0	5,31	خرسانة
10-1	0	0,038	0	3,75	طوب قرميد
100-1	0,7076	0,0116	0	2,94	لوحات بلاستيكية
100-0,001	1,0718	0,0047	0	1,99	خشب
100-0,1	1,1925	0,0043	0	6,27	زجاج
100-1	1,1634	0,0005	0	1,50	سقف
100-1	0,7800	0,0217	0	2,58	كرتون
100-50	1,3515	0,0044	0	3,66	أرضية
100-1	0	⁷ 10	0	1	معدن
10-1 فقط	2,52	0,00015	0	3	أرضية جافة جداً
10-1 فقط	1,63	0,035	0,1–	15	أرضية متوسطة الجفاف
10-1 فقط	1,30	0,15	0,4–	30	أرضية رطبة

حدود الترددات الواردة في الجدول 4 ليست حدوداً نهائية ولكنها ذات دلالة بالنسبة لحدود الترددات الخاصة بالبيانات المستعملة لاشتقاق النماذج. وتمثل الاستثناءات في ثلاثة أنواع من الأرضيات حيث يجب عدم تجاوز الحدود الترددية بين 1 و 10 GHz.

وتعطى في التوصية ITU-R P.527 القيم النمطية للسماحية النسبية والإيصالية لأنواع مختلفة من الأرضيات، كتابع للتردد في المدى من 0,01 MHz حتى 100 GHz.

ويقل ظل الخسارة لجميع المواد العازلة في الجدول 4 عن 0,5 على امتداد المديات الترددية المحددة. ويمكن بالتالي استخدام القيم التقريبية لحد العازل في معدل التوهين الوارد في المعادلتين (24) و(27) من أجل تقدير توهين الموجات الكهرومغناطيسية عبر المواد:

$$(89) \quad A_{dielectric} = 1636 \frac{\sigma}{\epsilon_r} \text{ dB/m}$$

حيث تعطى ϵ_r' و σ بالمعادلتين (86) و(87).

4 قياسات الخسارة في مبنى

1.4 خسارة الدخول إلى مبنى

1.1.4 قياسات خسارة الدخول إلى مبنى (أوروبا)

أجريت قياسات في ألمانيا والمملكة المتحدة لتحديد قيم خسارة الدخول إلى مبنى وغيرها من المعلومات لاستخدامها في التخطيط لاستقبال الخدمات الإذاعية داخل المباني.

وأجريت القياسات الألمانية على ترددات في نطاق الموجات المتريّة (VHF) يُستخدمان للإذاعة السمعية الرقمية وترددات في نطاق الموجات الديسيمتريّة (UHF). وبلغت القيم المتوسطة لخسارة الدخول إلى مبنى لكل القياسات التي أجريت في مبان نمطية في ألمانيا 9,1 dB عند تردد 220 MHz، و 8,5 dB عند تردد 223 MHz، و 7,0 dB عند تردد 588 MHz و 8,5 dB عند تردد 756 MHz. وبلغ متوسط قيم خسارة الاختراق من أمام المبنى (الجانب ذو مستوى الإشارة الأعلى) إلى غرفة في الجانب المقابل 14,8 dB عند تردد 220 MHz، و 13,3 dB عند تردد 223 MHz، و 17,8 dB عند تردد 588 MHz و 16 dB عند تردد 756 MHz. وفي كل القياسات، بلغ متوسط قيم الانحرافات المعيارية في تغير الموقع 3,5 dB لإشارتي 220 و 223 MHz بعرض نطاق 1,5 MHz، و 5,5 dB لإشارتي 588 و 756 MHz بعرض نطاق 120 kHz.

وأجريت قياسات المملكة المتحدة في عدد من الترددات في نطاق الموجات الديسيمتريّة (UHF).

وتبين أن متوسط خسارة الدخول إلى مبنى في نطاق الموجات الديسيمتريّة يبلغ 8,1 dB مع انحراف معياري قدره 4,7 dB. بيد أن القيمة للغرف على جانب المبنى الأبعد عن جهاز الإرسال بلغت 10,3 dB، في حين بلغت القيمة المقابلة لغرف على جانب المبنى الأقرب إلى جهاز الإرسال 5,4 dB بفارق يناهز 5 dB.

وقيست قيمة وسطية قدرها 13,5 dB لكسب في الخلاء على ارتفاع يتراوح بين 1,5 و 10 m. وكانت مواقع القياسات في الضواحي.

وتبين أن متوسط قيمة الفرق في شدة المجال بين غرف الطابق الأرضي والطابق الأول بلغ 5,4 dB.

وبلغ الانحراف المعياري لاختلاف شدة المجال داخل الغرف حوالي 3 dB.

وبلغ الانحراف المعياري لاختلاف شدة المجال المقيسة في أرضية منزل حوالي 4 dB.

وعلى الرغم من اختلاف الترددات وعروض نطاق القياسات، هناك توافق جيد جداً بين القياسات الألمانية والبريطانية.

2.1.4 قياسات خسارة الدخول إلى مبنى (اليابان)

أجريت قياسات خسارة الدخول في اليابان في 12 من مباني المكاتب على مسافات من جهاز الإرسال تصل إلى 1 km.

وقيست خسارة المسير الإضافي داخل مبنى بالنسبة إلى حقل في الخلاء وحُسب متوسطها على طول المسير حول المبنى على ارتفاع 1,5 m؛ علماً بأن استخدام مرجع الارتفاع الثابت يختلف عن تعريف خسارة الدخول إلى مبنى الوارد في الفقرة 2.1، وسيؤدي إلى قيم سلبية لخسارة الدخول في الطوابق العليا من المبنى.

واحتويت البيانات من هذه القياسات بواسطة الصيغة التالية لخسارة المسير الزائد بالنسبة إلى قيمة 1,5 m الوسطية:

$$\Delta Loss(dB) = 0.41 \cdot d - 0.5 \cdot h - 2.1 \cdot \log(f) - 0.8 \cdot LoS + 11.5 \quad (90)$$

حيث:

d : من 0 إلى 20 m؛ المسافة من النافذة (m)

h : من 1,5 إلى 30 m؛ الارتفاع عن الأرض (m)

f : من 0,8 إلى 8 GHz؛ التردد (GHz)

LoS : 1 لخط البصر، 0 لغير خط البصر.

3.1.4 خسارة الدخول إلى مبنى - قياسات مسير مائل

1.3.1.4 قياسات إشارة ساتل في نطاق الموجات الديسيمترية (860 MHz-2,6 GHz)

يلخّص في الجدول 5 ما يُرصد من توهين ذي صفة تمثيلية لإشارة ساتل في نطاق الموجات الديسيمترية داخل غرف تقع بالقرب من الجدار الخارجي في منازل خاصة ذات هياكل خشبية. ويجب أن يضاف 0,6 dB إلى القيم المجدولة في الغرف الداخلية. وفي المباني ذات الهياكل الخشبية، يظهر اختلاف بسيط في التوهين مع اختلاف الطقس أو زاوية ارتفاع المسير ولكن، كما يوضح الجدول، هناك اختلاف منهجي مع اختلاف التردد والاستقطاب ومواد البناء والعزل والموضع داخل الهيكل. وتساهم بعض المواد العازلة ومواد البناء المغلفة بالألومنيوم بما يصل إلى 20 dB من الخسارة.

الجدول 5

توهين (dB) إشارة في نطاق الموجات الديسيمترية عبر المباني ذات الهياكل الخشبية*

التردد (MHz) والاستقطاب (أفقي: H، رأسي: V)				حالة البناء	
V 2 569	V 1 550	V 860	H 860	العزل (نوع غير معدني)	من الخارج
5,8	5,0	2,9	4,7	السقف فقط	كسوة خشبية
7,4	6,6	4,5	6,3	السقف والجدار	
7,0	6,2	4,1	5,9	السقف فقط	كسوة قرميدية
8,6	7,8	5,7	7,5	السقف والجدار	طوب

* الجدول هو للغرف التي تقع بالقرب من الجدار الخارجي. وتنبغي إضافة 0,6 dB للغرف الداخلية.

2.3.1.4 قياسات المسير المائل من الأبراج أو المباني الشاهقة

أجريت قياسات لخسارة دخول المبنى باستخدام أبراج بطول 18 إلى 20 متراً لحاكاة جهاز إرسال ساتلي في النطاقين من 700 MHz إلى 1,8 GHz ومن 500 MHz إلى 3 GHz لتحديد متوسط الخسارة والتغير المكاني في مجموعة متنوعة من المباني. ولا تتوفر بيانات كافية لإعطاء أساليب تنبؤ دقيقة، ولكن البيانات في الجدولين 6 و 7 ذات دلالة.

الجدول 6

توزعات الإشارة في الموضع المتوسط والموضع الأفضل
داخل المباني (عبر المدى الترددي من 700 إلى 1 800 MHz)

رقم المبنى	البناء	زاوية الارتفاع	الموضع المتوسط		الموضع الأفضل	
			متوسط الخسارة (dB)	الانحراف المعياري (dB)	متوسط الخسارة (dB)	الانحراف المعياري (dB)
1	مكتب في زاوية المبنى، نوافذ واسعة، مبنى من طابق واحد. كتلة خرسانية، ألواح جصية، زجاج نوافذ مزدوج. سقف خرساني على دعائم فولاذية	27,5° (خط البصر عبر النافذة، زاوية السميت بين الجدار وخط البصر تساوي 50°)	7,9	5,5	4,2	4,2
2	غرفة صغيرة بنوافذ تشكل 5/8 جدار خارجي	18° (خط البصر عبر النافذة، زاوية السميت بين الجدار وخط البصر تساوي 50°)	9,1	4,4	5,4	3,7
3	مبنى في الزاوية، باب زجاجي كبير عاكس في منتصف أحد الجدارين الخارجيين. جدران خارجية خرسانية، جدران داخلية من الألواح الجصية على أطر معدنية	16° (خط البصر عبر النافذة، زاوية السميت بين أحد الجدارين وخط البصر تساوي 45°، وكلا الجدارين الخارجيين مضاء بجهاز الإرسال)	15,4	8,4	9,7	6,7
4	كوخ من الصفائح المعدنية مكسو بخشب رقائقي من الداخل. نافذة واحدة صغيرة دون منخل على كل من الجانبين، باب بغطاء معدني	25° (زاوية السميت بين الجدار وخط البصر تساوي 60°)	9,7	6,3	5,2	4,9
5	منزل من طابقين بكسوة خارجية خشبية، العزل بالصوف الصخري (الجدران والعلية)؛ ألواح جصية، طبقة عزل حراري غير معدنية. بدون منخل معدني على النوافذ. السطح مكسو بألواح تسقيف خشبية	25° (زاوية السميت بين الجدار وخط البصر تساوي 45°)	9,0	4,5	5,4	3,7
6	منزل على مقطورة متحركة من الصفائح المعدنية الفارغة، ونوافذ ذات أطر معدنية مزودة بمنخل معدني	25° (زاوية السميت بين الجدار وخط البصر تساوي 45°)	24,9	3,8	19,8	3,4

الجدول 7

متوسط الخسارة في الموضع المتوسط والموضع الأفضل داخل المباني كتابع للتردد
(تفاصيل البناء وزاوية الارتفاع كما في الجدول 9)

الموضع الأفضل	الموضع المتوسط	رقم المبنى
MHz 1 750-750	MHz 1 750-750	(كما في الجدول 6)
dB 6-2	dB 11-5	1
dB 5-2	dB 14-5	2
dB 13-12	dB 18-17	3
dB 6-5	dB 11-9	4
dB 5-3	dB 11-5	5
dB 22-16	20 إلى < 24 dB	6

الجدول 8

توزعات الإشارة في الموضع المتوسط داخل المباني
(عبر المدى الترددي من 500 إلى 3 000 MHz)

الموضع المتوسط	زاوية الارتفاع (بالدرجات)	البناء	رقم المبنى
الانحراف المعياري (dB)	متوسط الخسارة (dB)		
10	13	18	1 ردهة الدخول في بناء من طابق واحد - جدار من قوالب الخرسانة، السقف مكسو بالقار العازل
7	9	38	2 مكتب في بناء من طابق واحد - كتل الطوب، السقف مكسو بالقار العازل
4	5	33	3 منزل في مزرعة من طابقين ذو هيكل خشبي، السقف معدني، بدون عازل حراري من الألومنيوم
12	19,5	41	4 المدخل وغرفة المعيشة في منزل من طابقين ذو هيكل خشبي، السقف معدني، عازل حراري من الألومنيوم
6	13	37	5 غرفة نزل في مبنى من طابقين من الطوب ذي سقف مركب
5	12	26	6 بجو مبنى من طابقين، زجاج وخرسانة، السقف مكسو بالقار العازل

في أول مجموعة من القياسات (الجدولان 6 و 7)، كانت زوايا ارتفاع المباني الثلاثة الأولى بحيث إن الغرفة كانت مضاعة من خلال نافذة على خط بصر مباشر مع جهاز الإرسال. كانت زوايا الارتفاع أقل من 30° للسماح بإضاءة المباني جانبياً.

وفي حالة المبنى رقم 3 في هذه الجدول، كانت الخسائر من خلال الباب الزجاجي العاكس أكبر بحوالي 15 dB مما كانت عليه عندما كان الباب مفتوحاً.

وجاءت نتائج دراسة أخرى متشابهة، فتراوحت مستويات متوسط التهوين (في المدى الترددي من 500 إلى 3 000 MHz) بين 5 dB في منزل ذي هيكل خشبي وسقف معدني بدون عازل ألومنيوم واق من الحرارة، و 20 dB في منزل مماثل مع عازل ألومنيوم واق من الحرارة. ويبين الجدول 11 ملخصاً لقيم متوسط التهوين المقيسة.

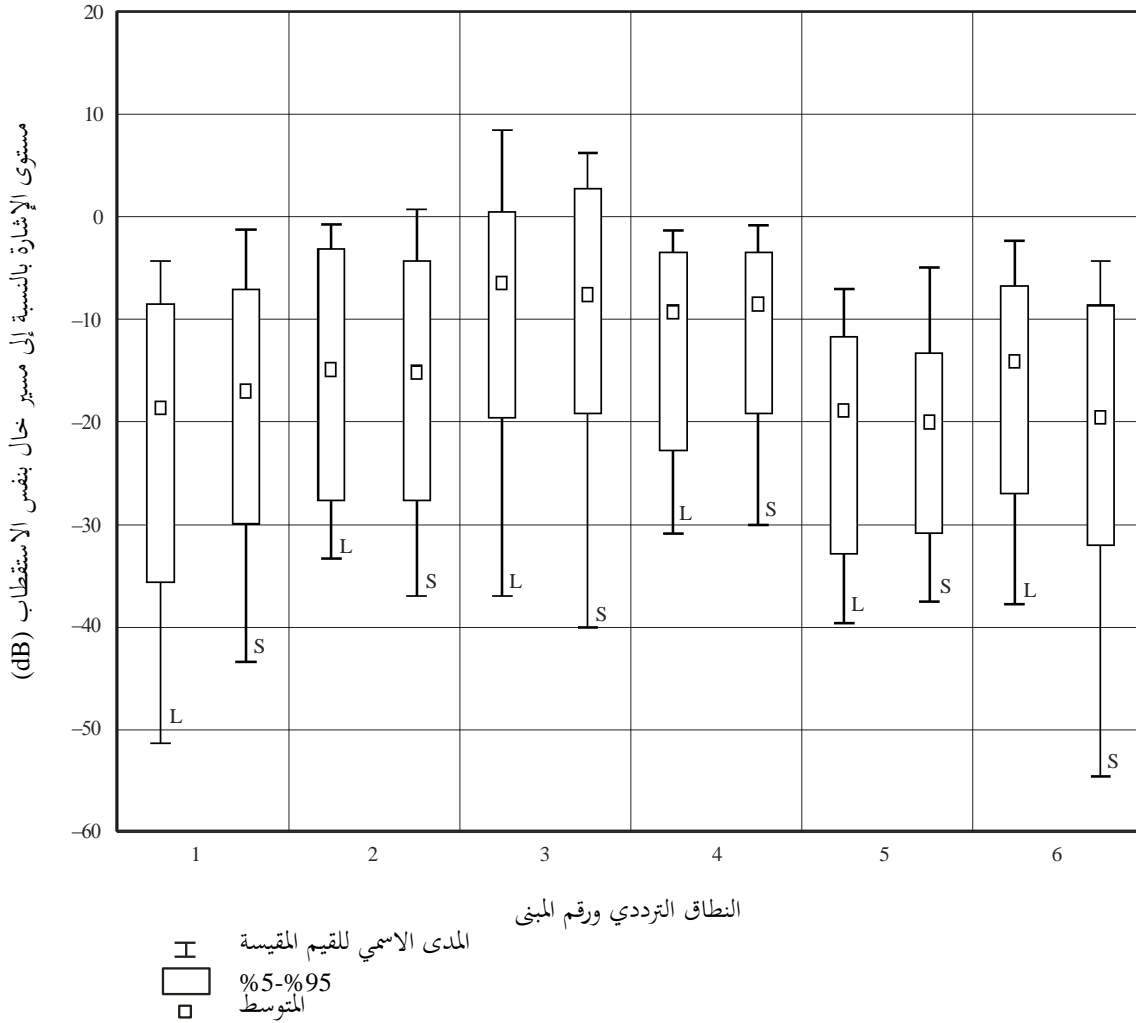
ويلاحظ أن بعض القياسات والقيم التي تم الحصول عليها بالقرب من نافذة أو باب مفتوح، مدرجة في المتوسط. وفي المنزل (المبنى 6)، تراوح التهوين عندما اخترق المسير المباشر جداراً من الطوب بين 15 إلى 30 dB دون قيمة خط البصر. وتفاوتت المستويات داخل المبنى 4 بين 25 و 45 dB دون قيمة خط البصر، وذلك بسبب السقف المعدني وعازل الألومنيوم الواقي من الحرارة.

وبلاحظ أيضاً أن القياسات كانت على مسيرات ساكنة. وهناك أدلة تشير إلى أن مؤثرات تكثف المسيرات المتعددة تؤدي إلى تقلبات في مستوى استقبال الإشارة إذا تحرك المرسل أو المستقبل. وتظهر آثار ذلك بوجه خاص في أنظمة المدار الأرضي المنخفض (LEO) حيث يتحرك المرسل بسرعة بالنسبة إلى المستقبل.

وتشير القياسات إلى أن التوهين يزداد بزيادة التردد من حوالي 1 إلى 3 GHz/dB في المباني 1 و 2 و 4 و 6، وبواقع 6 GHz/dB في المبنى الأقل توهيناً (المبنى 3)، ولا يكاد يبدي أي تغيير مع التردد في المبنى 5 ذي الجدران الزجاجية. وبما أن متوسط القيم المذكورة أعلاه محسوب في المدى الترددي من 500 MHz إلى 3 GHz، يُتوقع أن تكون متفائلة قليلاً في المدى الترددي من 1 إلى 3 GHz.

وفي المباني الستة المحددة في الجدول 8، أجريت قياسات بالترددين 1,6 GHz و 2,5 GHz وجرى تحليلها لتحديد متوسط مستويات 5% و 95% من خسارة الإشارة النسبية عندما حُركت الهوائيات أفقياً على فواصل متعددة طول كل منها 80 cm. وأضيفت المباني من الجانب، واستقبلت الإشارات داخل الجدار الخارجي (الدخول عبر جدار واحد). واستُخدمت سمياً هوائيات شاملة الاتجاهات لاستقبال الإشارات المرسل. وتتلخص إحصاءات مستمدة من هذه القياسات في الشكل 24. وتشير هذه البيانات إلى مطالات وتغيرات الخبو الممكنة لدى إرسال إشارة عبر جدران مبنى؛ علماً بأن ظروف تعدد المسيرات تنتج أحياناً مستويات إشارة نسبية تزيد عن 0 dB.

الشكل 24



المتوسط ومستوى 5% و 95% لخسارة القدرة جراء دخول مبنى بالنسبة إلى خط بصر لا تعترضه عوائق في التردد 1,6 GHz و 2,5 GHz للمباني الستة المحددة في الجدول 5 (المعنية بالأرقام من 1 إلى 6 في الشكل). ولكل مبنى تظهر إحصاءات 1,6 GHz (L) و 2,5 GHz (S) بشكل منفصل.

لا توفر أي من القياسات المتاحة في النطاقات الترددية أقل من 3 GHz معلومات عن زوايا الارتفاع فوق 41°. غير أن الخسائر الكبيرة عبر الهياكل المعدنية (المبنى 6 في الجدولين 6 و 7؛ والمبنى 4 في الجدول 8) تشير إلى أن التوهين في مسير مباشر عبر سقف معدني سيكون في حدود 20 dB. أما الخسائر من 15 إلى 30 dB عبر جدار من الطوب في المبنى 4 من الجدول 8 فهي ذات صلة بزوايا ارتفاع أعلى كذلك.

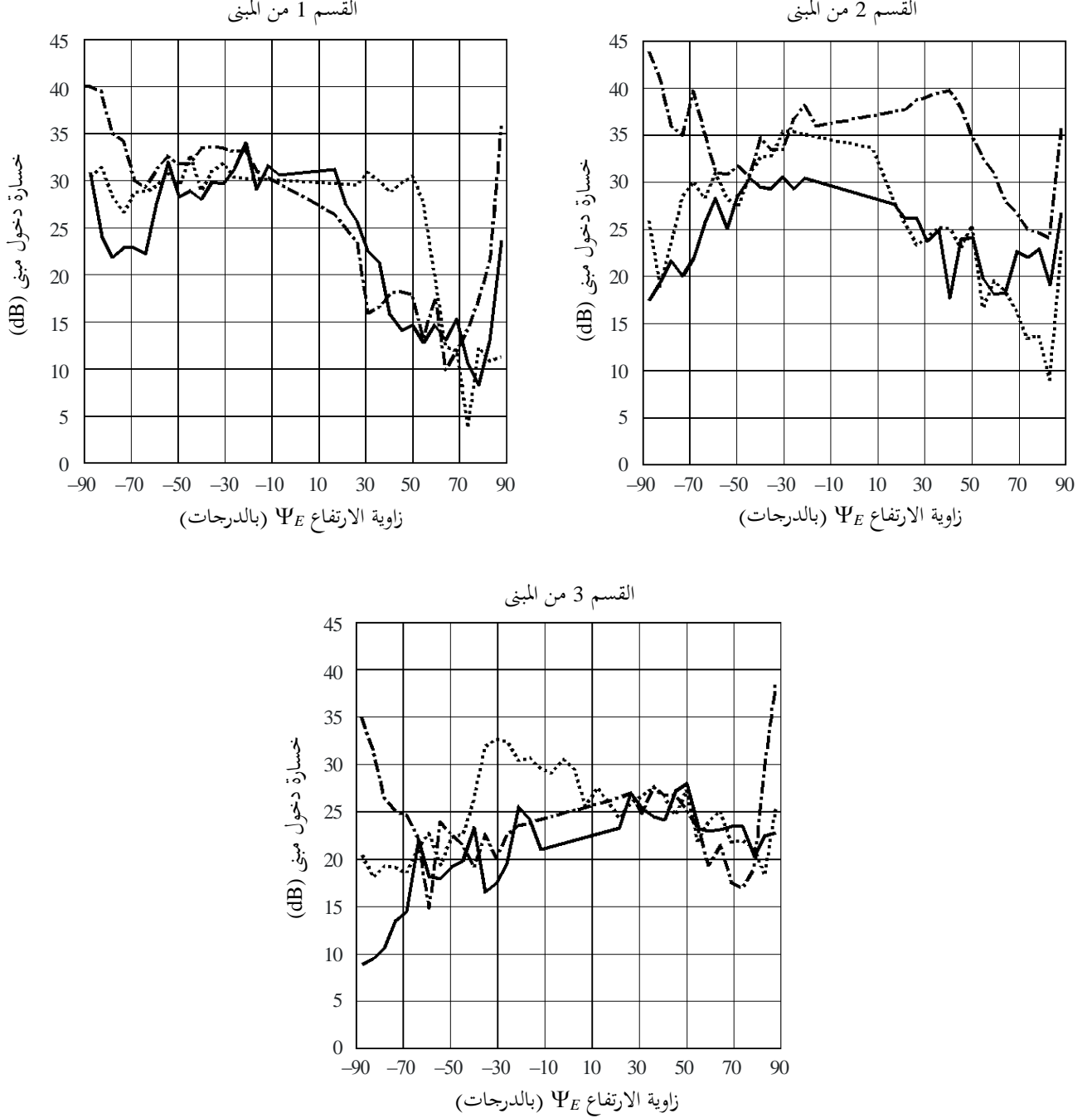
وقيس اعتماد خسارة دخول مبنى على زاوية الارتفاع ضمن النطاق 5 GHz في زاويتي ارتفاع مختلفتين باستخدام المباني الشاهقة لمحاكاة استقبال إشارات ساتلية. وفي غرفة مكتب نمطية، بلغت المتوسطات المقاسة للخسارة الزائدة جراء دخول المبنى 20 dB و 35 dB لزاويتي ارتفاع 15° و 55°، على التوالي.

3.3.1.4 القياسات من طائرة مروحية إلى مبنى مكاتب

قيست أوجه اعتماد خسارة دخول مبنى على زاوية الارتفاع والسمت حول التردد 5 GHz في مواقع مختلفة داخل مبنى من ثمانية طوابق على ثلاثة طوابق مختلفة. واستُخدمت طائرة مروحية لمحاكاة جهاز إرسال ساتلي. وسُجلت الإشارة المستقبلية بشكل مستمر، فضلاً عن موضع المروحية عن طريق مستقبل تفاضلي لنظام تحديد المواقع العالمي (GPS). وتتلخص الظروف التجريبية ومتوسط نتائج القياس في الجدول 9. ويظهر في الشكل 25 سلوك خسارة دخول مبنى فيما يتعلق بزاوية ارتفاع المسير، وفي الشكل 26 السلوك فيما يتعلق بالسمت لزاويتي الارتفاع 15° و 30°.

الشكل 25

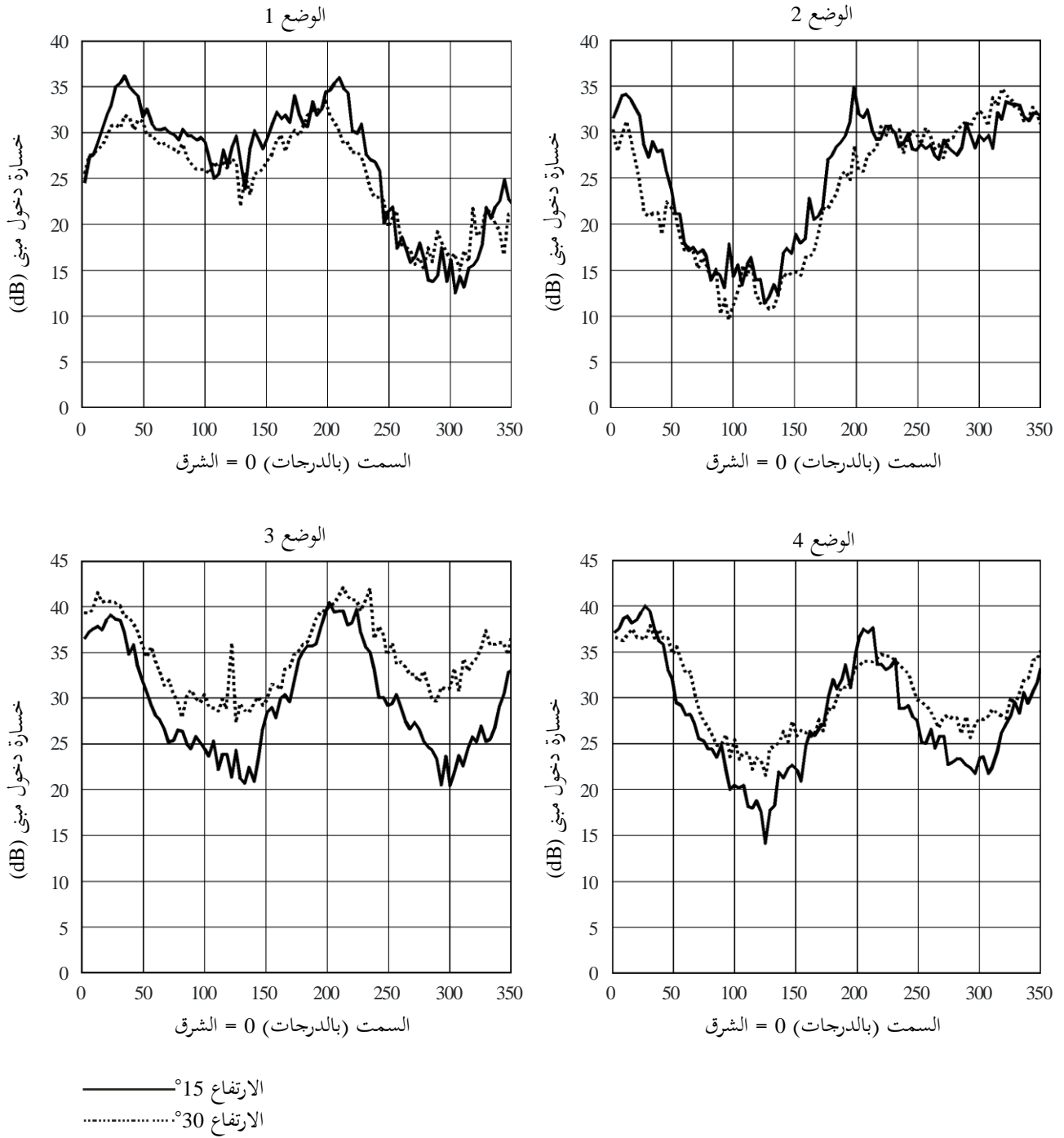
خسارة دخول مبنى عند التردد 5,1 GHz في الأقسام 1 و 2 و 3 للطوابق 2 و 5 و 6.
تعرف الزاوية Ψ_E موجبة عند النظر إلى الشمال وسالبة عند النظر إلى الجنوب
حيث $|\Psi_E| = 90^\circ - \varepsilon$ ε هي زاوية الارتفاع



القسم 1 من المبنى: غرف بنوافذ تواجه مرسل الطائرة المروحية.
القسم 2 من المبنى: مركز الممر.
القسم 3 من المبنى: غرف بنوافذ لا تواجه مرسل الطائرة المروحية.

الشكل 26

خسارة دخول مبنى عند التردد 5,1 GHz لارتفاع 15° و 30° في مواضع الهوائي الأربعة المختلفة داخل المبنى.
يقع الرقمان 1 و 2 قرب الجدار الخارجي، في حين يقع الرقمان 3 و 4 في الممر



الجدول 9

متوسط خسارة دخول مبنى والمدى المرصود لهذه الخسارة المقيسة
عند التردد 5,1 GHz في مواقع مختلفة ضمن مبنى مكاتب

المدى المرصود متوسط خسارة دخول مبنى (dB)	متوسط خسارة دخول مبنى لمواقع استقبال مختلفة في المبنى (dB)	نوع القياسات (مسار طائرة مروحية)
45-5 ~	19,1	قياسات زاوية الارتفاع (خطية، متعامدة مع الجانب الطويل من المبنى)
42-10 ~	22,3	قياسات زاوية السم (دائرية في زاويتي الارتفاع 15° و 30°)

وأجريت قياسات في التردد 2,57 GHz و 5,2 GHz باستخدام نسق طيران على شكل قبة جليدية دخولاً إلى ثلاثة مبان مختلفة، واحد منها في منطقة غراتس/النمسا، والاثنان الآخران في منطقة فيينا/النمسا، وغطت القياسات مختلف أنواع المباني. وحمل جهاز الإرسال على متن طائرة مروحية نُصب عليها هوائي حلزوني قابل للتوجيه. وأجريت القياسات بجهاز سبر قنوات عالي الاستبانة وقائم على تتابع شبه عشوائي بمعدل شرائح طور قدره 100 Mcps وبعرض نطاق 200 MHz. وكان استقطاب هوائي الإرسال دائرياً أيمن (RHCP)، في حين تألف هوائي الاستقبال، في حالة جهاز سبر القنوات، من مجموعة من الهوائيات الرقعية باستقطابين خطيين متعامدين وهي تغطي سطحاً يقارب نصف كرة.

ويعطي الجدول 10 لمحة عامة عن مواقع المباني داخل منطقة التغطية.

الجدول 10

لمحة عامة عن المباني المقيسة

المبنى	الموقع	عدد مواقع المستقبلات	مادة واجهة/سطح المبنى
ناطحة سحاب Millennium Tower	الطابق الثاني والعشرون الطابق الرابع والأربعون	2 2	شبكة معدنية وألواح زجاجية، زجاج مغلف بطبقة واقية من الشمس/خرسانة مسلحة
مطار غراتس	منطقة البوابة قاعة مؤتمرات	4 1	فولاذ، عناصر إنشاءات معدنية، زجاج مغلف بطبقة واقية من الشمس/فولاذ، صفائح معدنية، طبقة من الحصى
مبنى مكاتب FFG	مبنى مكاتب وسط المدينة، الطابق الأعلى	2	خرسانة مسلحة/نوافذ مغلفة

حُسبت خسارة دخول مبنى المبنية في الجدول 11 بطرح متوسط البيانات الوصفية لتأخر القدرة جراء القياس المرجعي في الخلاء من قياس متوسط البيانات الوصفية لتأخر القدرة داخل المباني. وترد في الجدول 12 خسارة دخول المبنى على مسافات مختلفة من النافذة الموجهة نحو جهاز الإرسال عند التردد 5,2 GHz.

الجدول 11

خسارة الدخول (dB) لمختلف زوايا الارتفاع والسمت النسبية في التردد 2,57 و 5,2 GHz

GHz 5,2				GHz 2,57				السمت النسبي إلى الخط المتعامد مع الواجهة	المبنى
الارتفاع				الارتفاع					
60	45	30	15	60	45	30	15		
29,77	32,09	27,65	30,40	23,95	21,53	24,42	22,86	0	Millennium Tower الطابق الرابع والأربعون
33,31	32,43	30,42	28,34	24,59	25,21	22,17	22,13	30–	
34,97	33,57	31,31	29,00	24,60	25,91	23,71	24,44	60–	
38,21	37,24	34,23	32,65	26,77	27,21	29,24	25,40	90–	
39,45	35,38	37,55	36,53	28,28	28,13	28,31	28,04	0	Millennium Tower الطابق الثاني والعشرون
35,34	37,51	36,57	31,84	27,59	29,60	29,60	28,70	30–	
39,65	35,90	37,12	35,19	35,38	33,66	33,17	32,26	60–	
46,52	47,02	43,80	43,20	–	37,80	42,22	35,30	90–	
35,28	34,13	31,13	26,52	31,40	26,18	29,23	21,69	0	مبنى مكاتب
34,08	36,51	33,49	33,12	33,00	31,10	34,90	26,49	30	
35,73	36,30	34,16	34,29	36,13	35,90	–	27,43	60	
–	–	–	–	–	–	38,09	–	90	
37,97	–	35,76	28,36	23,00	23,68	–	18,18	0	المطار – منطقة البوابة
37,98	–	–	–	27,10	19,11	21,12	15,09	30–	
–	–	37,76	27,67	25,42	21,96	26,13	18,25	60–	
–	–	–	34,31	24,61	23,69	27,71	–	90–	
19,09	19,37	19,68	15,19	10,84	–	12,62	11,81	0	المطار – قاعة مؤتمرات
–	20,03	19,37	17,73	13,63	15,05	–	11,69	30–	
22,38	24,70	–	22,79	16,35	17,66	17,87	16,65	60–	
–	23,43	24,32	25,17	–	17,43	20,10	18,52	90–	

الجدول 12

خسارة الدخول (dB) في التردد 5,2 GHz لمختلف زوايا الارتفاع بالنسبة إلى المسافة من النافذة الموجهة نحو جهاز الإرسال الواقع في زاوية 0 درجة بالنسبة إلى زاوية السمت مع الخط العمودي على الواجهة

الارتفاع				المسافة النافذة (m)	المبنى
60	45	30	15		
27,80	31,41	25,30	—	1,4	Millennium Tower الطابق الرابع والأربعون
27,81	31,16	27,34	—	2,4	
30,58	31,64	29,72	—	3,4	
28,88	32,19	25,6	—	4,4	
30,34	33,43	29,08	30,40	5,4	
38,72	—	35,07	30,63	0,5	المطار - منطقة البوابة
37,09	—	35,01	30,28	2,5	
38,03	—	35,96	29,97	4,5	
—	—	36,85	16,40	6,5	

4.3.1.4 قياسات من منطاد إلى المباني المحلية (1-6 GHz)

أجريت قياسات في المملكة المتحدة لخسارة دخول مبنى داخل عدد من المباني المحلية ذات البناء التقليدي. وأجريت هذه القياسات في الترددات 1,4 GHz و 2,4 GHz و 5,8 GHz، واستُخدم منطاد مربوط لاستكشاف مجموعة واسعة من زوايا الارتفاع. وترد تفاصيل عن مواقع القياس في الجدول 13.

الجدول 13

المبنى	التاريخ	مواقع القياس
المكاتب/الشقق الصغيرة (3 طوابق)	1985	القياسات في مكثبين (الطابق الأول)
بيت مستقل (3 طوابق)	1905	المطبخ (الأرضي) وغرفة النوم (الطابق الأول)
منزل ذو مصطبة (طابقان وعلية)	1880	غرفة معيشة (الأرضي) وغرفة النوم (الطابق الأول) وغرفة مكتب (الطابق الثاني)
منزل ذو مصطبة (طابقان)	1965	غرفة الطعام وغرفة المعيشة (الأرضي)، مدخل (الطابق الأول)

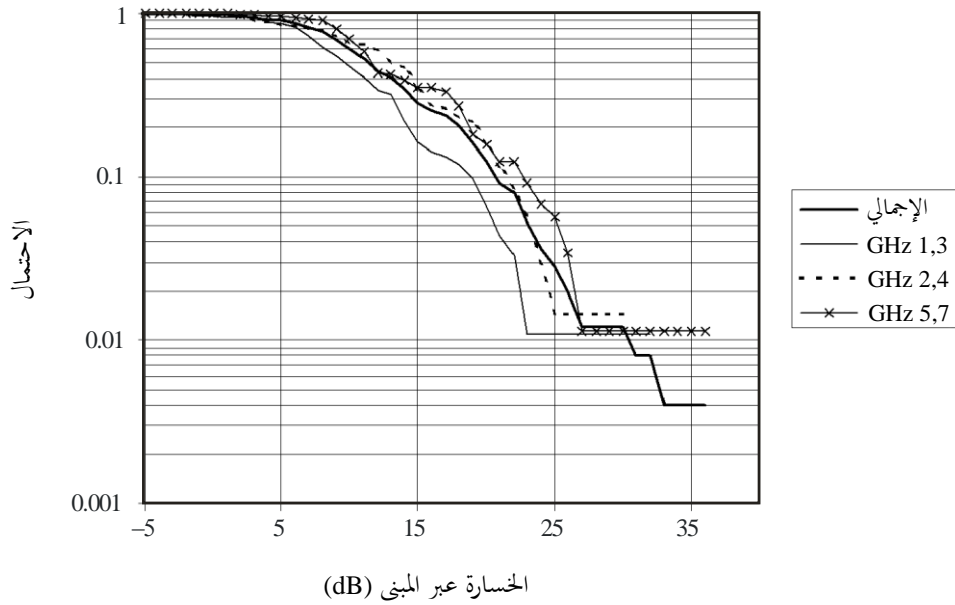
أجريت القياسات باستخدام أجهزة إرسال موجة مستمرة معلقة من منطاد هيليوم مربوط، مما سمح باستكشاف زوايا ارتفاع تصل إلى حوالي 70°. وتقلب جهاز الاستقبال بين هوائي قياس داخلي وهوائي مرجعي خارجي. وحُرِّك هوائي القياس على امتداد سكة طولها متر بتحكم حاسوبي، للسماح بحساب المتوسط المكاني للقياسات.

واستُخدمت هوائيات شاملة الاتجاهات في كل من المرسل والمستقبل، وطُبقت تصحيحات لمخططات الإشعاع العمودي للهوائي، ولفرق الخسارة في الفضاء الطلق بين الهوائي المرجعي وهوائي القياس.

وبعد التصحيحات المذكورة أعلاه، تم الحصول على مجموعة من البيانات تعطي متوسط خسارة الاختراق لكل موقع اختبار. وتظهر في الشكل 27 دالة التوزيع التراكمية لهذه النتائج، وهي تمثل إحصاءات متوسط الخسارة المحلية فيما يتعلق بجميع مواقع الاستقبال الأحد عشر، في جميع زوايا الارتفاع. وقد اختيرت مواقع الاستقبال عشوائياً وكانت كلها تقريباً خارج خط البصر إلى المنطاد.

الشكل 27

الإحصاءات الكلية لخسارة اختراق مبنى



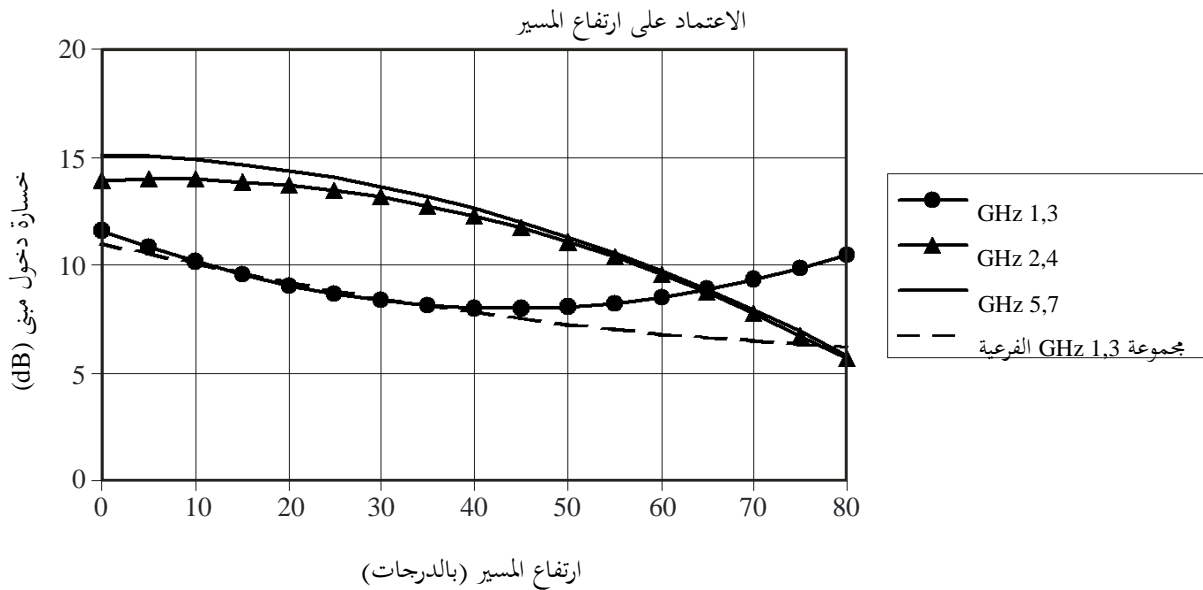
P.2040-27

القيمة المتوسطة لخسارة اختراق مبنى، في جميع الترددات، هي 11,2 dB. وتبين النتائج الموضحة في الشكل 27 اعتماداً طفيفاً على التردد في النتائج. والقيم المتوسطة لخسارة الاختراق هي 9,2 dB في التردد 1,3 GHz، و 11,2 dB في التردد 2,4 GHz و 12,7 dB في التردد 5,7 GHz.

ويبين الشكل 28 اعتماد القياسات (منحنيات كثيرات الحدود المحتوية لنقاط القياس) على الارتفاع.

الشكل 28

مقارنة متوسطات القيم لكل تردد



P.2040-28

وتظهر النتائج في التردد 1,3 GHz زيادة شادة في خسارة الاختراق عندما تعلو زوايا الارتفاع. ويظهر فحص بيانات القياس أن هذا المؤثر يرجع إلى مجموعة واحدة من القياسات، ويبين في المنحنى المنقط مؤثر استبعاد هذه البيانات.

وباستثناء أدنى تردد، يمكن أن يُرى انخفاض طفيف في خسارة الاختراق عندما تعلو زوايا الارتفاع. وهذا الانخفاض في الخسارة عبر المبنى بعلو الارتفاع يتعارض مع الافتراضات القائمة في بعض النماذج السابقة. ولعل هذا السلوك يميز المباني المحلية، حيث تشيّد الأرضيات والأسقف عادة من بناء خشبي خفيف.

ويتضح اعتماد متوسط النتائج بعض الشيء على الطابق في المبنى، حيث تُظهر نتائج الطابق الأرضي والطابق الأول خسارة أكبر عموماً بنحو 5-8 dB من الخسارة في الطابق الثاني. ولكن ينبغي أن يؤخذ في الاعتبار أن مجموعة واحدة من القياسات فقط قد أجريت على الطابق الثاني، وأن ذلك الموقع كان سطحاً سُقف فيما بعد ليُستخدم كمكتب منزلي.

2.4 الخسائر ضمن المباني

تشير دراسات الانتشار الأرضي داخل المباني إلى أن الخسارة (dB) عبر الطوابق في مبنى للمكاتب عند التردد 2 GHz تعطى بالمعادلة $15 + 4(n - 1)$ حيث n هو عدد الطوابق المخترقة. وفي مبنى سكني، تبلغ الخسارة عادةً 4 dB لكل طابق، ويمكن ذلك من تقدير الخسارة الإضافية لإشارة ساتلية تدخل من زاوية ارتفاع عالية وتمر هبوطاً من خلال المبنى.

3.4 قياسات خسارة الخروج من مبنى

1.3.4 تشكيل القياس

يبين الشكل 29 صورة للمنزل المستخدم في القياس. وهو منزل نمطي ذو هيكل خشبي ثنائي المستويات في اليابان. وتبلغ أبعاد الموقع حوالي 11 متراً × 12 متراً. وتوجد في الجدران الخارجية نافذتان أو ثلاث على كل جانب. وتغطي الجزء الخارجي من الجدران الخارجية ألواح خشبية مدهونة فيما يغطي الجزء الداخلي من الجدران بألواح جصية. وبملاء عازل من الألياف الزجاجية الفراغ داخل الجدران. ويُنصب هوائي الإرسال بالقرب من مركز الطابق السفلي. ويبلغ ارتفاع الهوائي فوق مستوى الأرض 1,5 متر. وتُرسل موجة مستمرة ترددها 5,2 GHz من هوائي ثنائي الأقطاب مُستقطب رأسياً. ويوضع جهاز استقبال موصول بهوائي ثنائي الأقطاب على عربة تدفع باليد ويحرك في أنحاء المنزل. ويُضبط ارتفاع هوائي الاستقبال بطول 2,2 متر من مستوى سطح الأرض لجعله متساوياً في الارتفاع مع هوائي الإرسال. وقبل إجراء القياسات الخارجية، يقاس المستوى المستقبلي في عدة نقاط داخل المنزل.

2.3.4 النتيجة المقاسة

يعرض الشكل 30 خارطة كفاية للمستوى المستقبلي. ويعبّر عن المستويات العالية بالألوان الداكنة فيما يعبر عن المستويات المنخفضة بالألوان الفاتحة. وتظهر الخريطة أن الموجات الراديوية المكثفة تنبعث من خلال النوافذ وتنتشر لمسافات بعيدة نسبياً. وفي هذا الشكل، يشير الجزء الأبيض في الزاوية اليمنى العليا إلى الموقع الذي تعذر فيه أخذ قياسات بسبب وجود حظيرة. أما الجزء الأبيض الآخر في الجانب الأيسر العلوي فيرجع إلى وجود سياج.

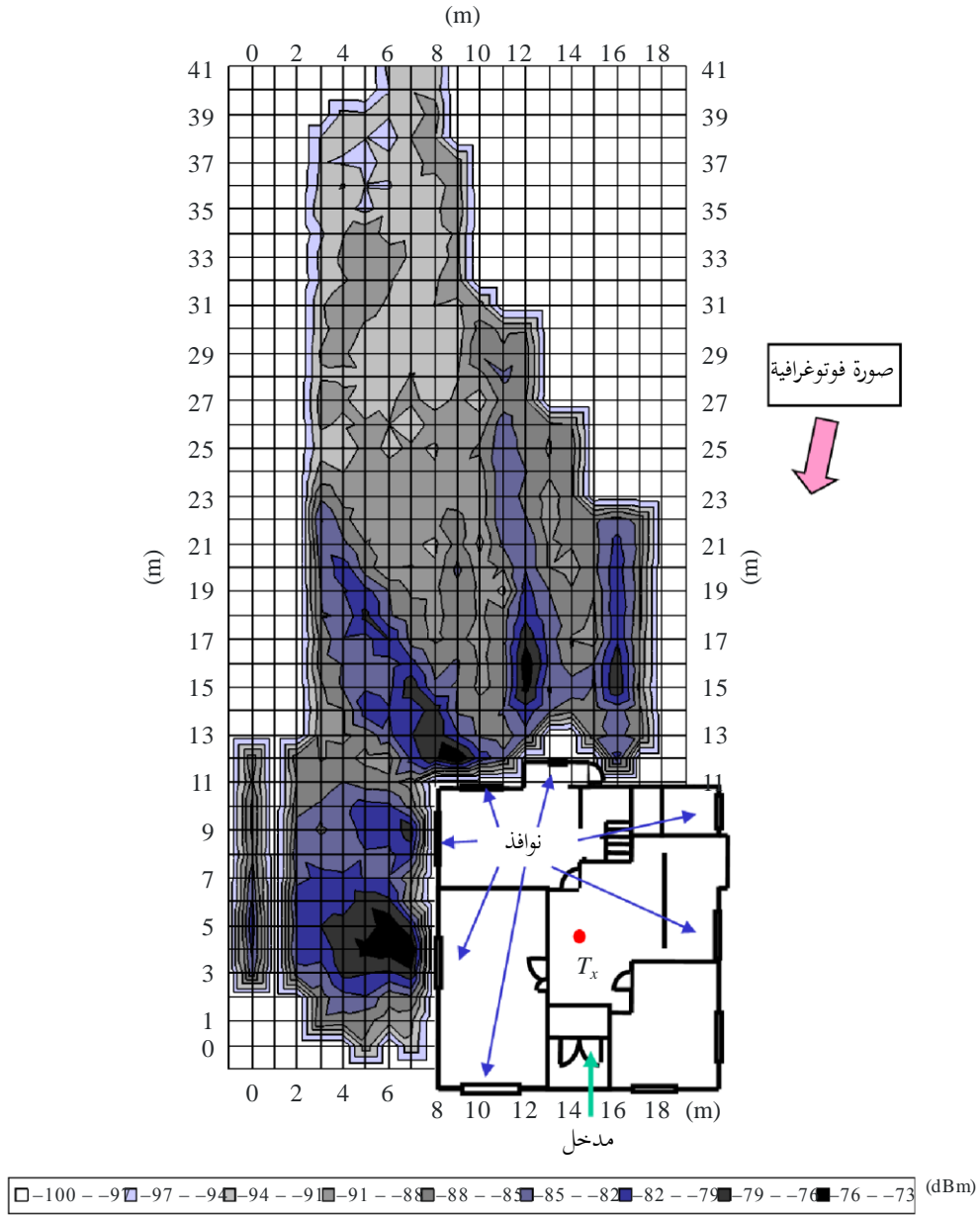
الشكل 29

صورة المنزل



الشكل 30

خارطة كفاية للمستوى المستقبَل



P.2040-30

يبين الشكل 31 اعتماد خسارة المسير على المسافة. والإحداثيات الأفقية هي مقياس خطي. وتمثل الدوائر الزرقاء البيانات في الخلاء فيما تمثل المثلثات الحمراء البيانات داخل المباني. وتقرب خسارة المسير من خلال المعادلة التالية.

$$(91) \quad L(\text{dB}) = 20 \log(f(\text{MHz})) + N \log(d(\text{m})) - 27.55 + L_f(\text{dB})$$

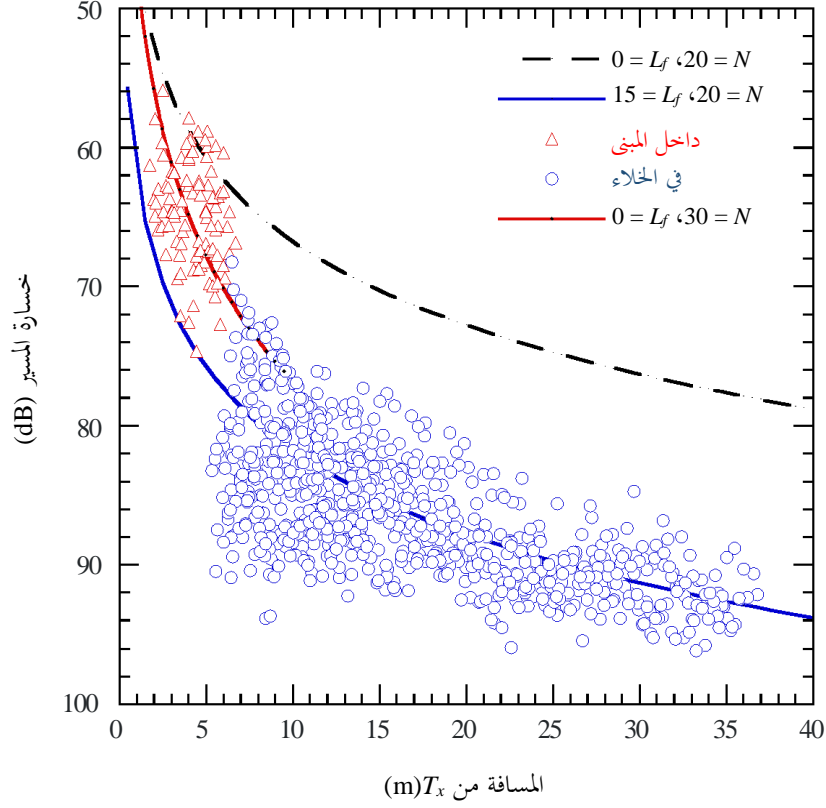
حيث N هو معامل التوهين للمسافة و L_f هو التوهين الإضافي الناتج عن اختراق جدار على سبيل المثال. وعند إسناد قيمتي 20 و 0 إلى N و L_f ، على التوالي، تعبر هذه المعادلة عن خسارة المسير في الفضاء الطلق.

وتظهر ثلاثة خطوط محسوبة في الشكل 31. والخط المتقطع الأسود هو خسارة المسير في الفضاء الطلق عند التردد 5.2 GHz. ويقرب الخط الأحمر المتواصل مجموعة بيانات الخلاء. وفيها L_f يساوي الصفر ولكن N يساوي 30 مما يدل على انخفاض كبير مقارنة بما كان عليه في الفضاء الطلق. وفي الخط الأزرق المتواصل، $N = 20$ و $L_f = 15$. يوازي المنحنى منحني في الفضاء الطلق

ولكن بعبء قدره 15 dB. وتشير هذه النتيجة إلى أن خسارة المسير تزيد بـ N داخل المنزل وتصبح الزيادة تدريجية بعد الخروج من المنزل. وتلاحظ هذه السمة بوضوح في الشكل 31.

الشكل 31

أوجه اعتماد خسارة المسير على المسافة (مقياس خطي)

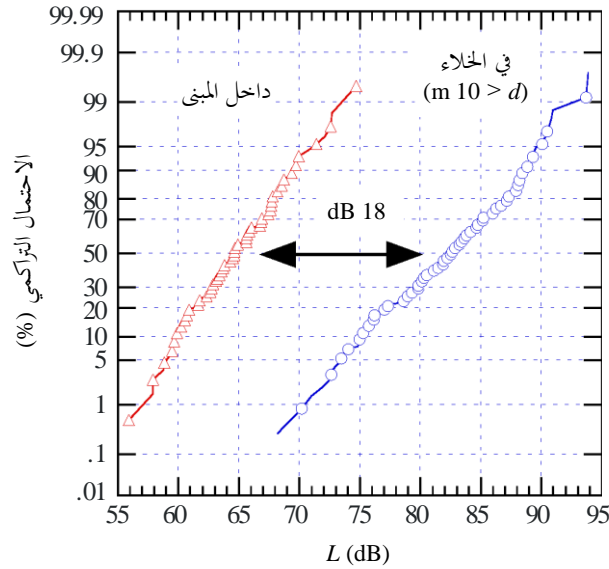


P.2040-31

وبناءً على هذه البيانات، تُشتق الاحتمالات التراكمية لخسارة المسير في الشكل 32. ويبلغ الفرق بين هذين الاحتمالين نحو 18 dB. وهذا يدل على أن الموجة الراديوية تخرج من المنزل بتوهين يناهز 18 dB وتنتشر بنفس معامل التوهين عبر المسافة كما في الفضاء الطلق.

الشكل 32

الاحتمالات التراكمية لبيانات خسارة المسير المقيسة



P.2040-32

4.4 قياسات خسارة تظليل مبنى

أجريت قياسات في أستراليا لتحديد قيم خسارة تظليل مبنى كي تُستخدم في التخطيط للتشارك في الترددات بين الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة.

وتعرّف خسارة تظليل مبنى كخسارة الإرسال عبر المبنى.

التردد هو 11 GHz. والاستقطاب رأسي وأفقي.

ويبين الجدول 14 متوسط نتائج القياسات في التردد 11 GHz عبر أنواع مختلفة من المباني.

الجدول 14

متوسط الخسارة وانحرافها المعياري حسب الاستقطاب ونوع المبنى

موقع الاختبار	متوسط الخسارة (استقطاب رأسي)	الانحراف المعياري	متوسط الخسارة (استقطاب أفقي)	الانحراف المعياري
1 مبنى خشبي (على امتداد طوله)	dB 26,4	7,1	-	-
1A مبنى خشبي (على امتداد عرضه)	dB 10,0	7,0	dB 8,3	5,0
2 مبنى خرساني/من الطوب	dB 30,1	5,0	dB 28,6	5,5
3 كشك معدني	dB 36,4	4,1	dB 35,0	3,2

تشير القياسات إلى اعتماد كبير على مواد البناء في تحديد ما يلي:

- الأسلوب الأساسي للانتشار؛
- مقدار التوهين الناجم عن عائق.

تسببت مواد البناء الخشبية بأدنى متوسط توهين يتراوح بين 10,0 و 25,0 dB، وبين 25,0 و 35,0 dB لتلك المصنوعة من الطوب والخرسانة، وبين 35,0 و 40,0 dB لتلك المصنوعة من المعادن. وكان الإرسال هو الأسلوب الأساسي للانتشار عبر هياكل خشبية وخرسانية، في حين كان الانعراج هو الأسلوب السائد للانتشار عبر هياكل معدنية.

وخلال الانتشار بالانعراج، كان هناك اعتماد كبير على زاوية الانعراج. وبازدياد زاوية الانعراج من الزوايا (أي نحو مركز ظل المبنى) زاد كم التوهين بسبب زيادة الانعراج (بحدود 5 إلى 10 dB).

وعلى الرغم من الاعتماد على الاستقطاب عند كل نقطة قياس، كان الاعتماد على الاستقطاب أو طول المسير من منظور متوسط البيانات قليلاً أو معدوماً. وكان متوسط اختلاف التوهين بين الاستقطاب الأفقي والرأسي أقل من 1,5 dB.

التنزيل 1

(الفقرة 2.2.2.2)

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 (54) إلى (58) الواردة في الفقرة 2.2.2.2، 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 2.2.2.2.

$$(92a) \quad R_N = \frac{B/Z_N - CZ_N}{2A + B/Z_N + CZ_N}$$

$$(92b) \quad R_P = -\frac{B/Z_P - CZ_P}{2A + B/Z_P + CZ_P}$$

$$(92c) \quad T_N = \frac{2}{2A + B/Z_N + CZ_N}$$

$$(92d) \quad T_P = \frac{2}{2A + B/Z_P + CZ_P}$$

والعناصر A و B و C هذه هي عناصر المصفوفة ABCD التالية:

$$(93a) \quad \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_N & B_N \\ C_N & D_N \end{bmatrix}$$

حيث:

$$(93b) \quad A_m = \cos(\beta_m d_m)$$

$$(93c) \quad B_m = jZ_m \sin(\beta_m d_m)$$

$$(93d) \quad C_m = \frac{j \sin(\beta_m d_m)}{Z_m}$$

$$(93e) \quad D_m = A_m$$

$$(93f) \quad \beta_m = k_m \cos(\theta_m) = k_m \left[1 - \left(\frac{\eta_0}{\eta_m} \sin \theta_0 \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$(93g) \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$(93h) \quad k_m = k_0 \sqrt{n_m}$$

وتمثل λ ، في المعادلات من (93b) إلى (93h) طول الموجة في الفضاء الطلق، و k_0 عدد الموجات في الفضاء الطلق، و η_m و k_m السماحية المركبة وعدد الموجات للوحة ذات الرتبة m ، وتمثل β_m ثابت الانتشار المتعامد مع مستوى اللوحة و d_m عرض اللوحة من الرتبة m .

وتحسب معاوقة الموجة لكل من Z_P و Z_N في المجال الكهربائي المتعامد مع مستوى الانعكاس والموازي له بواسطة:

$$(94a) \quad Z_N = \chi_m / \cos \theta_m$$

و

$$(94b) \quad Z_P = \chi_m \cos \theta_m$$

حيث تمثل χ_m المعاوقة الأصلية للوحة ذات الرتبة m وتُعطى بالمعادلة:

$$(94c) \quad \chi_m = \frac{120\pi}{\sqrt{\eta_m}}$$

وحيث:

$$(94d) \quad \eta_0 = \eta_{N+1} = 1$$

$$(94e) \quad \theta_0 = \theta_{N+1} = \theta$$

$$(94f) \quad Z_0 = Z_{N+1}$$