

التوصية ITU-R P.2040-3

(2023/08)

السلسلة P: انتشار الموجات الراديوية

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

تمهيد

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

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

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

سلسلة توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

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

العنوان

السلسلة

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

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

النشر الإلكتروني

جنيف، 2024

© ITU 2024

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

التوصية ITU-R P.2040-3

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

(المسألة ITU-R 211/3)

(2023-2021-2015-2013)

مجال التطبيق

تقدم هذه التوصية توجيهات بشأن آثار خواص مواد البناء وهياكل المباني على انتشار الموجات الراديوية فوق 100 MHz.

مصطلحان رئيسيان

السماحية، الإيصالية

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.526 تقدم التوجيه بشأن مؤثرات الانعراج، بما فيها تلك الناجمة عن مواد البناء وهياكل المباني؛
- (ب) أن التوصية ITU-R P.527 تقدم معلومات عن الخصائص الكهربائية لسطح الأرض؛
- (ج) أن التوصية ITU-R P.679 تقدم التوجيه بشأن تخطيط الأنظمة الإذاعية الساتلية؛
- (د) 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؛

(هـ) أن التوصية ITU-R P.1406 تقدم معلومات عن جوانب متنوعة من الانتشار المتعلقة بالخدمة المتنقلة البرية للأرض والخدمة الإذاعية في نطاقات الموجات المترية (VHF) والديسيمترية (UHF)؛

(و) أن التوصية ITU-R P.1407 تقدم معلومات عن الجوانب المتنوعة للانتشار متعدد المسيرات؛

(ز) 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؛

(ح) أن التوصية ITU-R P.1812 تقدم أسلوباً للتنبؤ بالانتشار للخدمات الأرضية من نقطة إلى منطقة في المدى الترددي من 30 MHz إلى 6 GHz،

توصي

باستخدام المعلومات والأساليب الواردة في الملحق 1 كدليل لتقييم آثار خواص مواد البناء والهياكل على خسارة انتشار الموجات الراديوية، وفي إعداد نماذج حتمية للانتشار تنطوي على بيئة عمرانية. ويصف الملحق 1 المبادئ الأساسية، ويقدم صيغاً لتقييم الانعكاس عن مواد وهياكل البناء والإرسال عبرها. ويتضمن أيضاً نموذجاً للخصائص الكهربائية بدلالة التردد، وجدولاً لمعلمات المواد ذات الصلة. وترد أمثلة على قياسات خسارة دخول مبنى في التقرير ITU-R P.2346.

الملحق 1

جدول المحتويات

الصفحة	
ii	سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)
2	الملحق 1
3	1 مقدمة
3	2 المبادئ الأساسية والنظرية
3	1.2 نظرية الخواص الكهربائية للمواد
3	1.1.2 مقدمة
3	2.1.2 الأسلوب
7	3.1.2 اعتماد خواص المواد على التردد
7	4.1.2 نماذج اعتماد خواص المواد على التردد
8	2.2 مؤثرات الهيكل المادي على انتشار الموجات الراديوية
8	1.2.2 انعكاس الموجة المستوية والإرسال في سطح يبني مستوي واحد
12	2.2.2 انعكاس وإرسال الموجة المستوية في ألواح ذات طبقة واحدة وألواح متعددة الطبقات
16	3.2.2 انتشار الدليل الموجي في المباني
19	3.2 نظرية ونتائج مواد السطح الانتقائي ترددياً
19	1.3.2 السطوح الانتقائية ترددياً
20	2.3.2 نظرية انتشار الموجات حول سطح صفيح تحديات مستديرة
21	3.3.2 نتائج الحساب
22	4.3.2 القياس
23	3 مجموعات الخواص الكهربائية للمواد
24	المرفق 1 بالملحق 1 طريقة جديدة لحساب معاملي الانعكاس والإرسال بالنسبة إلى مواد البناء المكونة من عدد N من اللوحات العازلة الكهربائية، بالاستناد إلى مصفوفة ABCD

1 مقدمة

يقدم هذا الملحق توجيهات بشأن آثار خواص مواد البناء وهياكل المباني على انتشار الموجات الراديوية. ويصف القسم 2 المبادئ الأساسية بشأن تفاعل الموجات الراديوية مع مواد البناء، وتعرف مختلف المعلمات المستخدمة لهذه الأغراض، وتعطي الصيغ الأساسية للانعكاس عن، والإرسال عبر، السطوح البينية لمادة واحدة وألواح بطبقة واحدة وطبقات متعددة، المعتادة في المباني. ويعرف القسم 3 نموذجاً للخصائص الكهربائية، وجدولاً لمعلمات مختلف مواد البناء.

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

يصف هذا القسم إعداد صيغ بسيطة تعتمد على التردد لسماحية وإيصالية مواد البناء الشائعة. وتقوم الصيغ على الاحتواء في منحنى لعدد من نتائج القياس المنشورة، في المدى الترددي 1-100 GHz بشكل رئيسي. والهدف هو العثور على تحديد بسيط للمعلمات 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

تتعامل هذه المعالجة مع المواد غير المتأينة غير المغنطيسية فقط، وبالتالي تُصفر كثافة الشحنات الحرة، ρ_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/m^2)

ϵ : سماحية العازل (F/m)

μ_0 : نفاذية الفضاء الطلق $= 4\pi \times 10^{-7} \text{ (N/A}^2\text{)}$ 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}) $= 2\pi f$ حيث f هو التردد بوحدة s^{-1}

\vec{r} : (متجه) المسافة المكانية (m).

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 جيبية 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:

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

ويُكتب ϵ تقليدياً بدلالة السماحية النسبية وسماحية الفضاء الطلق على النحو التالي:

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

حيث:

η : السماحية النسبية لعازل الوسط المعني

ϵ_0 : سماحية عازل الفضاء الطلق $= 8,854 \times 10^{-12} \text{ (F/m)}$.

وهكذا تمكن كتابة السرعة الموجهة للانتشار في وسط السماحية النسبية η على النحو التالي:

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

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

4.2.1.2 العازل الموصل

في حال $\sigma \neq 0$ ، تتوهن الموجة عند انتشارها. ومن المناسب في هذه الحالة تعريف السماحية النسبية المركبة التي يمكن اشتقاقها على النحو التالي. وتمكن إعادة ترتيب المعادلة (5) بالتبديل $c^2 = 1/(\epsilon_0\mu_0)$ ، لتعطي ما يلي:

$$\frac{c^2}{v^2} = \eta - j \frac{\sigma}{\epsilon_0\omega} \quad (9a)$$

وبما أن المعادلة (8) تعطي $\frac{c^2}{v^2} = \eta$ ، يمكن تفسير ذلك على أن السماحية النسبية المركبة تعطي بما يلي:

$$\eta = \eta' - j \frac{\sigma}{\epsilon_0\omega} \quad (9b)$$

ويُظهر ذلك أن السماحية النسبية، المعرّفة لعازل نقي، تصبح الجزء الحقيقي η' من السماحية النسبية المركبة الأعم η المعرّفة لعازل موصل.

ولا توجد رموز مقبولة من الجميع لهذه الحدود. وفي هذه التوصية، تُكتب السماحية النسبية على الشكل التالي:

$$\eta = \eta' - j\eta'' \quad (10)$$

حيث η' و η'' هما الجزآن الحقيقي والتخيلي من المعادلة (9b)، ويعطى الجزء التخيلي بما يلي:

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

لاحظ أن علامة الجزء التخيلي η عشوائية، وهي تعبر عن اصطلاح العلامة في المعادلة (4). وبالوحدات العملية، تعطي المعادلة (11) التحويل من η'' إلى σ :

$$\sigma = 0,05563\eta''f\text{GHz} \quad (12)$$

وهناك صياغة أخرى للجزء التخيلي للسماحية η بدلالة ظل الخسارة المعرّف كما يلي:

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

وهكذا:

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

ومن المعادلة (10)، يعطي ذلك:

$$\eta = \eta'(1 - j \tan \delta) \quad (15)$$

وبالوحدات العملية:

$$(16) \quad \sigma = 0,05563 \eta' \tan \delta f_{\text{GHz}}$$

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

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

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 المعرّف على أنه $\sqrt{\eta}$. ويكتب n بدلالة جزئيه الحقيقي والتخيلي كما يلي:

$$(19) \quad n = n' - jn'' = \sqrt{\eta}$$

وتعطي η' و η'' و σ من المعادلتين (10) و (12) كما يلي:

$$(20) \quad \begin{aligned} \eta' &= (n')^2 - (n'')^2 \\ \eta'' &= 2n'n'' \\ \sigma &= 0.1113n'n'' f_{\text{GHz}} \end{aligned}$$

5.2.1.2 معدل التوهين

سيوهن العازل الموصل الموجات الكهرومغناطيسية عند انتشارها. ولحساب ذلك كميّاً، تبدّل المعادلة (5) في المعادلة (4) وتبسّط باستخدام المعادلة (14):

$$(21) \quad \vec{E} = \vec{E}_0 \exp \left\{ j(\omega t - \sqrt{\eta'(1 - j \tan \delta)} k_0 \cdot \vec{r}) \right\}$$

حيث:

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

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

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

وبحساب عملي يستخدم متغيرات مركبة، يمكن تقييم مسافة التوهين، Δ ، التي يهبط فيها اتساع المجال بنسبة $1/e$ كما يلي:

$$(23a) \quad \Delta = \frac{-1}{\text{Im}(k_0 \sqrt{\eta})}$$

حيث تعيد الدالة "Im" الجزء التخيلي من متغيرها. وتحليلياً، يمكن بيان ما يلي:

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

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

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

و:

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

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:

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

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:

$$(27a) \quad A_{dielectric} = 1636 \frac{\sigma}{\sqrt{\eta'}}$$

$$(27b) \quad A_{conductor} = 545,8 \sqrt{\sigma f_{GHz}}$$

3.1.2 اعتماد خواص المواد على التردد

في الأدبيات العلمية، يعطى دوماً الجزء الحقيقي لثابت العزل، η' ، ولكن دون تحديد التردد في كثير من الأحيان. وفي الممارسة العملية بالنسبة للعديد من المواد، تبقى قيمة η' 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، محددًا 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 الخدار 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 (η') والجزء التخيلي (η'') من السماحية النسبية، وظل الخسارة ($\tan \delta$) والإيصالية (σ). وتسمح الصيغ الواردة في الفقرة 4.2.1.2 بتحويلات بين هذه الكميات.

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

$$(28) \quad \sigma = c f_{\text{GHz}}^d$$

حيث c و d هما ثابتان يميزان المادة. 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:

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

حيث a و b هما ثابتان يميزان المادة. 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 3.

2.2 مؤثرات الهيكل المادي على انتشار الموجات الراديوية

1.2.2 انعكاس الموجة المستوية والإرسال في سطح بيني مستوي واحد

ينظر هذا القسم في موجة مستوية واردة إلى سطح بيني مستوي بين وسطين متجانسين متناحيين تختلف فيهما الخصائص الكهربائية. ويمتد الوسطان بعيداً بما يكفي عن السطح البيني بحيث يُهمل تأثير أي سطح بيني آخر. وقد لا يكون الحال كذلك بهندسات بناء نموذجية. فعلى سبيل المثال، قد تتأثر خسائر الانتشار الناجمة عن جدار بانعكاسات داخلية متعددة. وترد في الفقرة 2.2.2 أساليب حساب معاملات الانعكاس والإرسال للألواح بطبقة واحدة ومتعددة الطبقات.

ويستفاد من موجة مستوية لأغراض التحليل، ولكن المفهوم نظري إلى حد كبير. وفي الممارسة العملية، يمكن أن تقارب الموجة الاستواء لكنها لن تستوي تماماً. وهذه نقطة مهمة هنا لأن الموجة المستوية حقاً لا تتعرض لخسارة (امتداد) في الفضاء الطلق. والأساليب التالية لا تأخذ في الاعتبار الخسائر في الفضاء الطلق، بل مجرد تأثير السطح البيني للوسطين.

1.1.2.2 الورد المائل إلى سطح بيني مستوي لوسطين

يوضح الشكل 1 الورد المائل لموجة مستوية جيئية إلى سطح بيني مستوي يفصل وسطين عازلين منتظمين غير مغنطيسيين لهما سماحيتان نسبيتان η_1 و η_2 . ويمكن حساب قيم η من الجزء الحقيقي للسماحية، η' ، والإيصالية، σ ، باستخدام المعادلتين (10) و (11). ويقدم الجدول 3 معلومات يمكن أن تُحسب منها هذه القيم بدلالة التردد.

وهناك ثلاث نظريات هامة لهذه الحالة تُستخلص من الاعتبارات الهندسية.

(1) تقع أرقام موجة المتجه من موجات منعكسة ومرسلة (منكسرة) في مستوي الورد، أي المستوي المحدد بالرقم k_i الموجي للموجة الواردة وبالخط المتعامد مع السطح البيني. ويؤخذ ذلك باعتباره المستوي $x-z$ في الشكل 1.

(2) تتساوى زاويتا الورد والانعكاس (كلتاها θ_1 في الشكل 1).

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

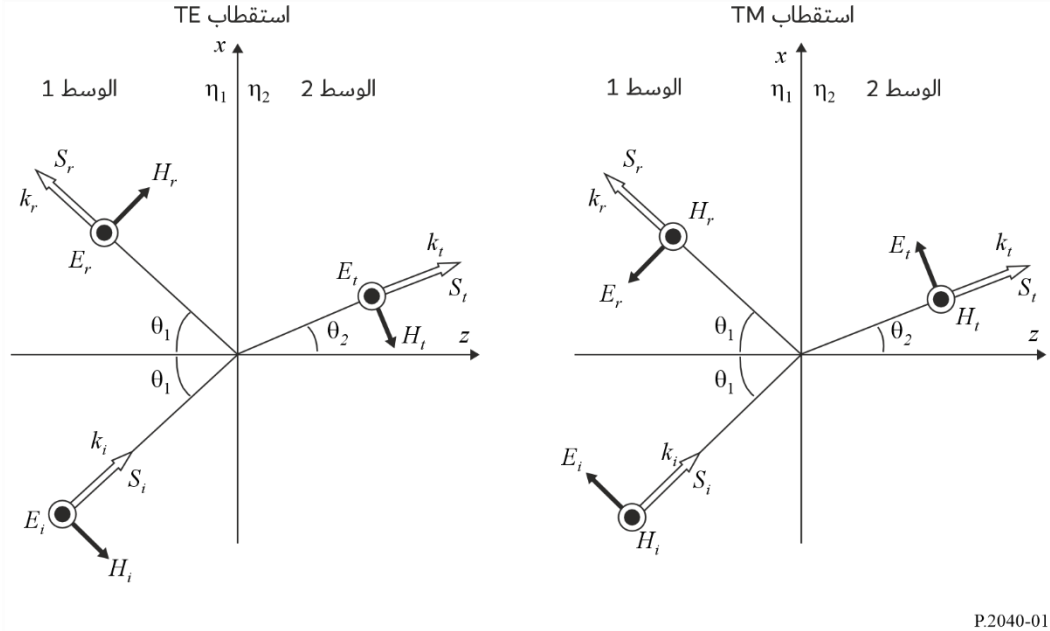
$$(30) \quad \frac{1}{c_1} \sin \theta_1 = \frac{1}{c_2} \sin \theta_2$$

حيث $c_1 = c/\sqrt{\eta_1}$ و $c_2 = c/\sqrt{\eta_2}$ هما سرعتا الموجة في الوسطين على التوالي، وتمثل η_1 و η_2 السماحيتين النسبيتين المركبتين 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 1

انعكاس وانكسار الموجات المستوية في سطح بيني مستو



P.2040-01

يظهر في الشكل 1 استقطابان للموجة الواردة.

- (أ) على الجانب الأيسر، يتعامد المجال الكهربائي، E_i ، مع مستوي الورد. ويُعرف ذلك بالاستقطاب الكهربائي العرضي (TE). والحدود الأخرى هي الاستقطاب العمودي واستقطاب s واستقطاب σ .
- (ب) على الجانب الأيمن، يوازي المجال الكهربائي، E_i ، مستوي الورد. ويُعرف ذلك بالاستقطاب المغنطيسي العرضي (TM). والحدود الأخرى هي الاستقطاب الموازي واستقطاب p واستقطاب π .
- وفي الوصف التالي، سيعيّن الاستقطاب كاستقطاب TE أو استقطاب TM.

ويمكن تفكيك موجة مستقطبة عشوائياً أو دائرياً إلى مكونات TE و TM لأغراض الحساب، ثم تمكن إعادة تجميعها.

وتعرّف معاملات انعكاس وإرسال المجال الكهربائي (E) كنسب المتجهات المنعكسة والمرسلة (المنكسرة) على التوالي إلى المتجه الوارد المقابل أثناء وجودها في السطح البيني. وهذه المعاملات مركّبة بشكل عام. ولا تأخذ الصيغ التالية في الاعتبار الخسائر في الفضاء الطلق أو خسائر أخرى سابقة أو لاحقة لتفاعل الموجة مع السطح البيني.

ويؤدي المتطلب القاضي باستمرارية المتجهات الكهربائية والمغنطيسية في مستوي السطح البيني الصيغ التالية لمعاملات المجال الكهربائي. ويُرمز إلى معاملي الانعكاس والإرسال بحرفي R و T على التوالي. وتبين اللاحقات السفلية المتجهات المعنية، وما إذا كان الاستقطاب هو TE أو TM. وتقع كل من المعادلات من (31a) إلى (32b) في جزأين، وفقاً لما إذا كان الانعكاس الكلي الداخلي يحدث. ولا يمكن حدوث الانعكاس الكلي الداخلي إلا عند ورود موجة إلى وسط ذي معامل انكسار أخفض.

معامل انعكاس المجال الكهربائي (E) بالاستقطاب الكهربائي العرضي (TE):

$$(31a) \quad R_{eTE} = \frac{E_r}{E_i} = \begin{cases} \frac{\sqrt{\eta_1} \cos \theta_1 - \sqrt{\eta_2} \cos \theta_2}{\sqrt{\eta_1} \cos \theta_1 + \sqrt{\eta_2} \cos \theta_2} & \sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}} \sin \theta_1 < 1 \\ 1 & \sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}} \sin \theta_1 \geq 1 \end{cases}$$

معامل انعكاس المجال الكهربائي (E) بالاستقطاب المغنطيسي العرضي (TM):

$$(31b) \quad R_{eTM} = \frac{E_r}{E_i} = \begin{cases} \frac{\sqrt{\eta_2} \cos \theta_1 - \sqrt{\eta_1} \cos \theta_2}{\sqrt{\eta_2} \cos \theta_1 + \sqrt{\eta_1} \cos \theta_2} & \sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}} \sin \theta_1 < 1 \\ 1 & \sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}} \sin \theta_1 \geq 1 \end{cases}$$

معامل إرسال المجال الكهربائي (E) بالاستقطاب الكهربائي العرضي (TE):

$$(32a) \quad T_{eTE} = \frac{E_t}{E_i} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{\eta_1} \cos \theta_1}{\sqrt{\eta_1} \cos \theta_1 + \sqrt{\eta_2} \cos \theta_2} & \sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}} \sin \theta_1 < 1 \\ 0 & \sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}} \sin \theta_1 \geq 1 \end{cases}$$

معامل إرسال المجال الكهربائي (E) بالاستقطاب المغنطيسي العرضي (TM):

$$(32b) \quad T_{eTM} = \frac{E_t}{E_i} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{\eta_1} \cos \theta_1}{\sqrt{\eta_2} \cos \theta_1 + \sqrt{\eta_1} \cos \theta_2} & \sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}} \sin \theta_1 < 1 \\ 0 & \sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}} \sin \theta_1 \geq 1 \end{cases}$$

حيث η_1 و η_2 هما السماحيات النسبيتان المركبتان للوسط 1 و 2 على التوالي. ويمكن تقييمهما باستخدام المعادلة (9b) مع قيم η' و σ المحصلة من الفقرة 3 والجدول 3.

ويمكن تقييم حدود $\cos \theta_2$ في المعادلات من (31a) إلى (32b) بدلالة θ_1 باستخدام المعادلة (30) على النحو التالي:

$$(33) \quad \cos \theta_2 = \sqrt{1 - \frac{\eta_1}{\eta_2} \sin^2 \theta_1}$$

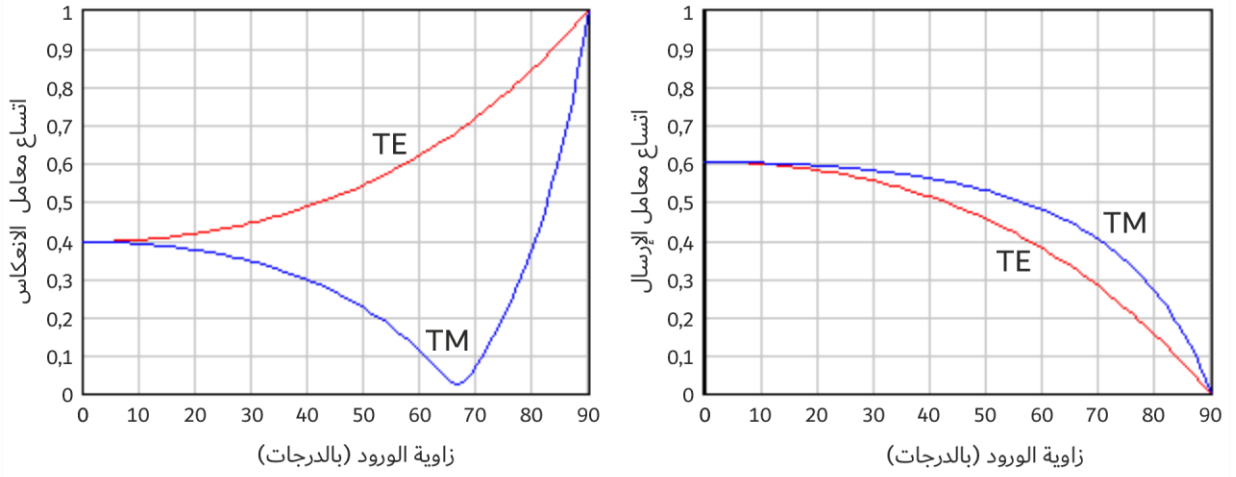
وعند الزاوية $\theta_1 = 0$ ، لا يكون تعريف مستوي الورد فريداً. ففي هذه الحالة، تتعامد كل اتجاهات الانتشار مع السطح البيني، وتتماثل اتساعات المعامل من صيغة كل استقطاب. وفي حالة الانعكاس، يحدث تغيير واضح في العلامة الجبرية. وينشأ ذلك عن محض كيفية تعريف الاستقطابات؛ ولا يقطع الاستمرارية فيزيائياً.

2.1.2.2 أمثلة حسابية

يورد الشكل 2 أمثلة عن اتساعات مُعامل الانعكاس والإرسال لموجة في الهواء ترد إلى الخرسانة بتردد 1 GHz وتُحسب على مدى زوايا الورد لكلا الاستقطابين باستخدام المعادلات من (31a) إلى (32b)، مع أخذ خواص الخرسانة من الجدول 3.

الشكل 2

مُعاملات الانعكاس والإرسال لسطح بيني هوائي/خرساني على التردد 1 GHz



P.2040-02

3.1.2.2 التبديلات المتاحة في قيم المُعامل

لعل من المفيد أن يؤخذ علم بالتبديلات التالية لمعاملات المتجه الكهربائي (E)، حيث تبين اللاهجات السفلية الوسط، 1 أو 2، الذي ترد الموجة فيه إلى السطح البيني:

$$(أ) \quad \text{بأي من الاستقطابين، } R_1 = -R_2 \text{، وبالتالي } R_1^2 = R_2^2.$$

$$(ب) \quad \text{بأي من الاستقطابين، } T_1 T_2 = 1 - R^2 \text{، حيث يمكن أن يكون } R \text{ إما } R_1 \text{ أو } R_2 \text{ حسب الفقرة أ.}$$

4.1.2.2 معاملات كثافة تدفق القدرة

يمكن الحصول على معاملات كثافة تدفق القدرة من معاملات المتجه الكهربائي (E):

$$(34a) \quad R_{sTE} = \frac{S_r}{S_i} = R_{eTE}^2$$

$$(34b) \quad R_{sTM} = \frac{S_r}{S_i} = R_{eTM}^2$$

$$(35a) \quad T_{sTE} = \frac{S_t}{S_i} = T_{eTE}^2 \sqrt{\frac{\eta_2}{\eta_1}}$$

$$(35b) \quad T_{sTM} = \frac{S_t}{S_i} = T_{eTM}^2 \sqrt{\frac{\eta_2}{\eta_1}}$$

وهكذا يعطى التغير في مستوى الإشارة بوحدة ديسيبل جراء انعكاس أو إرسال من خلال $10 \log(|R_s|)$ أو $10 \log(|T_s|)$ حيث R_s و T_s يمثلان مُعامل متجه S إما للانعكاس أو للإرسال في المعادلات من (34a) إلى (35b).

ويتطلب الحفاظ على الطاقة في السطح البيني لوسطين، في مساحة معينة لصدر موجة واردة، أن يكون مجموع تدفق القدرة المنعكسة والمرسلة مساوياً لتدفق القدرة الواردة. ولتوضيح ذلك، يجب احتساب التغير في عرض صدر الموجة بعد الانكسار. فبأي من الاستقطابين:

$$(36) \quad R_s + T_s \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} = 1$$

حيث تعدّل $\frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1}$ حسب التغير في عرض صدر الموجة.

5.1.2.2 الصيغ المبسّطة للموجة الواردة في الهواء

عندما يكون الوسط 1 هواءً، يمكن تبسيط المعادلات من (31a) إلى (32b) لتصبح:

$$R_{eTE} = \frac{\cos\theta - \sqrt{\eta - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\eta - \sin^2\theta}} \quad (37a)$$

$$R_{eTM} = \frac{\eta\cos\theta - \sqrt{\eta - \sin^2\theta}}{\eta\cos\theta + \sqrt{\eta - \sin^2\theta}} \quad (37b)$$

$$T_{eTE} = \frac{2\cos\theta}{\cos\theta + \sqrt{\eta - \sin^2\theta}} \quad (38a)$$

$$T_{eTM} = \frac{2\sqrt{\eta}\cos\theta}{\eta\cos\theta + \sqrt{\eta - \sin^2\theta}} \quad (38b)$$

حيث θ هي زاوية ورود η هي السماحية النسبية للوسط الذي ترد الموجة إليه.

ويتعذر الانعكاس الكلي الداخلي ضمن السطح البيني في المعادلات من (37a) إلى (38b)، نظراً لإمكانية افتراض أن الموجة ترد إلى وسط ذي مؤشر انكسار أعلى من الهواء.

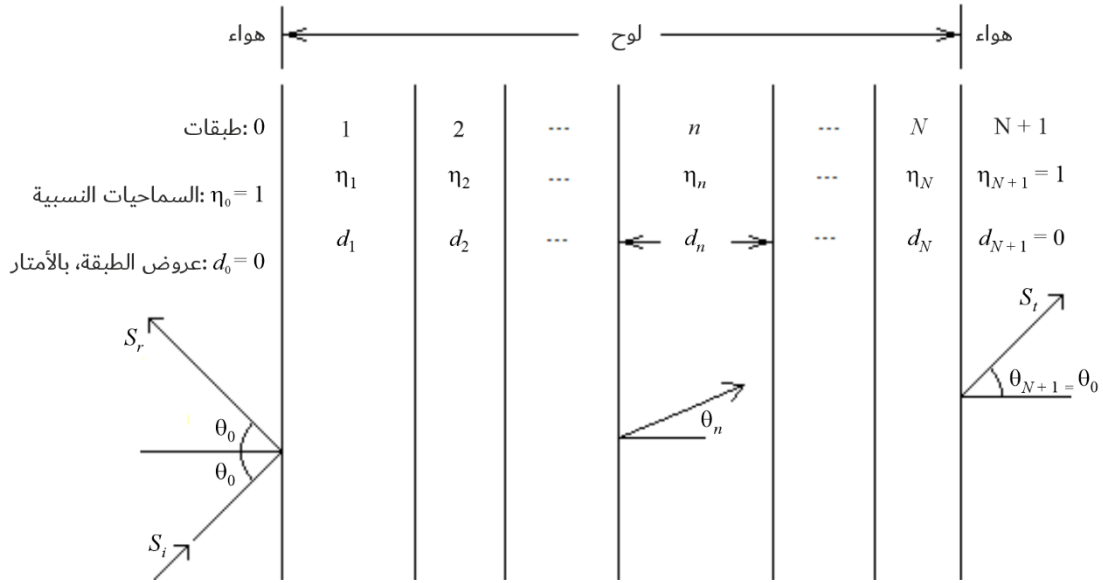
2.2.2 انعكاس وإرسال الموجة المستوية في ألواح ذات طبقة واحدة وألواح متعددة الطبقات

1.2.2.2 الأسلوب العام لألواح متعددة الطبقات

يوضح الشكل 3 موجة مستوية واردة إلى لوح يتكون من طبقات عددها N ، لكل منها سطحان أملسان مستويان متوازيان، حيث يمكن أن يكون N ، 1 أو أكثر. والسماحية النسبية للطبقة n هي η_n ، وعرضها d_n بالأمتار. ويُفترض أن اللوح في الهواء، وأنه معيّن، لأغراض الحساب، كطبقات 0 و $N+1$ ، بسماحية نسبية قيمتها 1 وعرض قيمته 0.

الشكل 3

الموجة المستوية الواردة إلى ألواح ذات طبقة واحدة وألواح متعددة الطبقات



P.2040-03

زوايا ورود الانعكاس هي θ_0 ، وستنبثق الموجة من الطبقة N بزوايا $\theta_{N+1} = \theta_0$. واتجاه الانتشار في الطبقة n هو θ_n . ولا يظهر مسير شعاع كامل عبر طبقات في الشكل 3. وفي شعاع وارد، S_i ، واحد، يتوزع الشعاعان المغادران S_r و S_t مكانياً بسبب انعكاسات داخلية متعددة في الطبقات.

ويمكن حساب معامل الانعكاس للوح بتطبيق المعادلة (39) التي تمثل معامل الانعكاس في السطح البيني الفاصل بين الطبقة ذات الترتيب n والطبقة ذات الترتيب $(n+1)$ من أجل $n = N, N-1, N-2, \dots, 0$ وبضبط $R_p(N+1) = 0$.

$$(39) \quad R_p(n) = \frac{r_p(n) + R_p(n+1) \exp(-2j\gamma_{n+1}d_{n+1})}{1 + r_p(n)R_p(n+1) \exp(-2j\gamma_{n+1}d_{n+1})}, \quad p = TE \text{ أو } TM$$

وفي المعادلة (39)، $r_{TE}(n)$ و $r_{TM}(n)$ هما معاملان انعكاس فرينل في السطح البيني ذو الترتيب n .

$$(40a) \quad r_{TE}(n) = \frac{\sqrt{\eta_n} \cos \theta_n - \sqrt{\eta_{n+1}} \cos \theta_{n+1}}{\sqrt{\eta_n} \cos \theta_n + \sqrt{\eta_{n+1}} \cos \theta_{n+1}}$$

$$(40b) \quad r_{TM}(n) = \frac{\sqrt{\eta_n} \cos \theta_{n+1} - \sqrt{\eta_{n+1}} \cos \theta_n}{\sqrt{\eta_n} \cos \theta_{n+1} + \sqrt{\eta_{n+1}} \cos \theta_n}$$

حيث:

$$(41a) \quad \gamma_n = k_n \cos \theta_n = k_0 \sqrt{\eta_n} \cos \theta_n = k_0 \sqrt{\eta_n - \sin^2 \theta_0}$$

$$(41b) \quad \sin \theta_n = \frac{\sin \theta_0}{\sqrt{\eta_n}}$$

$$(41c) \quad k_n = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\eta_n}$$

و λ هو طول الموجة في الفضاء الطلق بالأمتار.

وبعد تقييم المعادلة (39) بالتعويض من $n = 0$ إلى $n = N$ بالترتيب، يعطى مُعامل الانعكاس R_p ومُعامل الإرسال T_p كما يلي:

$$(42a) \quad R_p = R_p(0), \quad p = TE, TM$$

$$(42b) \quad T_p = \prod_{n=0}^{n=N} \left\{ \frac{\exp\{-j\gamma_n d_n\} \{1+r_p(n)\}}{\{1+r_p(n) R_p(n+1)\} \exp\{-2j\gamma_{n+1} d_{n+1}\}} \right\}, \quad p = TE, TM$$

حيث تبين اللاحقتان السفليتان TE و TM الاستقطاب الكهربائي العرضي والاستقطاب المغنطيسي العرضي على التوالي. ويقدم المرفق 1 بهذا الملحق صيغة بديلة لأسلوب الألواح متعددة الطبقات.

2.2.2.2 أسلوب مبسط للألواح ذات الطبقة الواحدة

في لوح يتألف من طبقة واحدة، أي ما يقابل $N=1$ ، ويمكن تبسيط الأسلوب السالف الذكر ليصبح:

$$(43a) \quad R = \frac{R'(1 - \exp(-j2q))}{1 - R'^2 \exp(-j2q)} \quad (\text{معامل الانعكاس})$$

$$(43b) \quad T = \frac{(1 - R'^2) \exp(-jq)}{1 - R'^2 \exp(-j2q)} \quad (\text{معامل الإرسال})$$

حيث:

$$(44) \quad q = \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\eta - \sin^2 \theta}$$

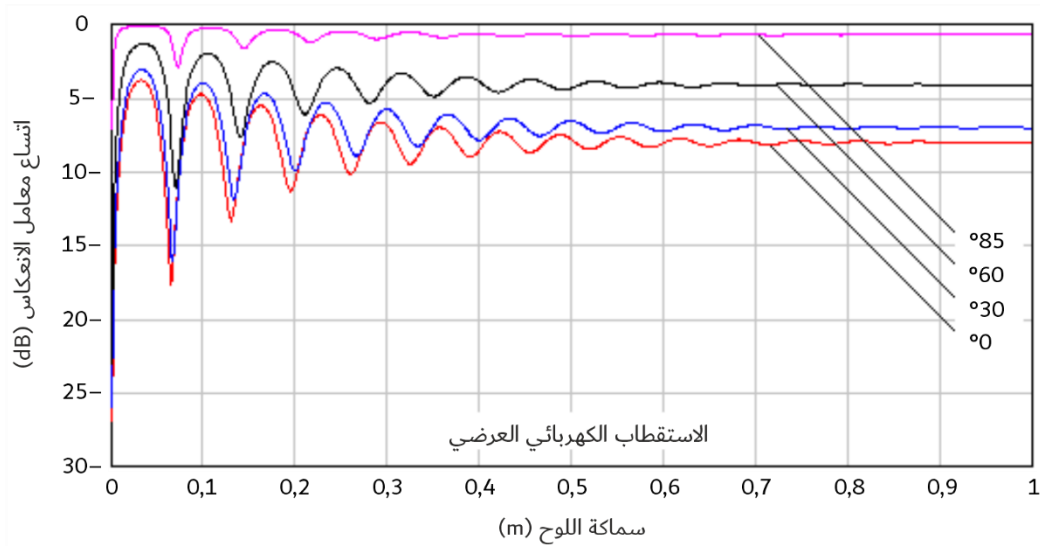
d هو سمك مادة البناء، فيما η هي السماحية النسبية المعقدة، و R' يمثل R_{eTE} أو R_{eTM} على النحو الذي تورده المعادلة (37a) أو (37b) على التوالي، حسب استقطاب المجال الكهربائي (E).

3.2.2.2 أمثلة حسابية

وتبين الأشكال من 4 إلى 7 النتائج المستقاة من المعادلة (42a) للوح خرساني واحد على التردد 1 GHz بأربع زوايا ورود. ويمكن الحصول على نفس النتائج من المعادلتين (43a) و (43b). وتؤخذ الخصائص الكهربائية للخرسانة من الجدول 3.

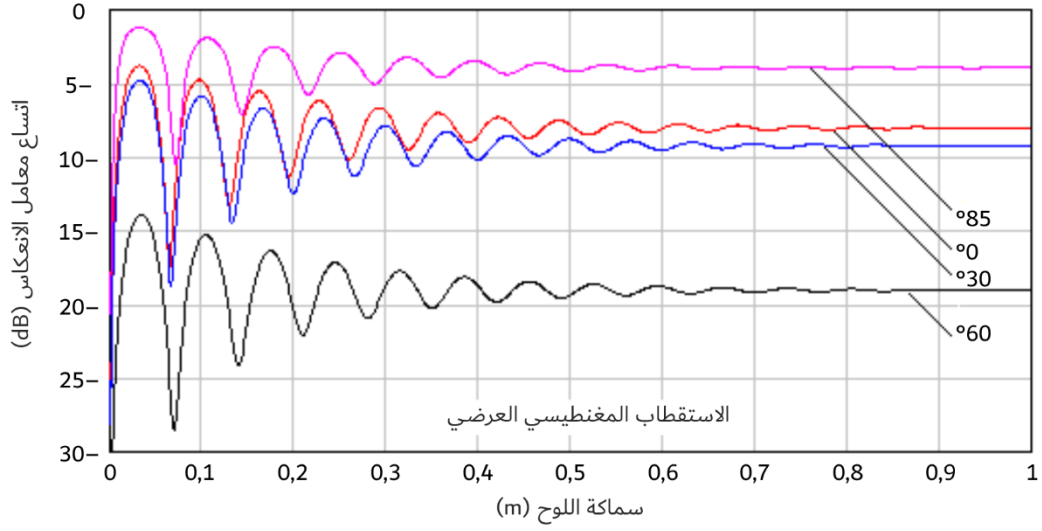
الشكل 4

معامل الانعكاس للوح خرساني على التردد 1 GHz بالاستقطاب الكهربائي العرضي (TE)



الشكل 5

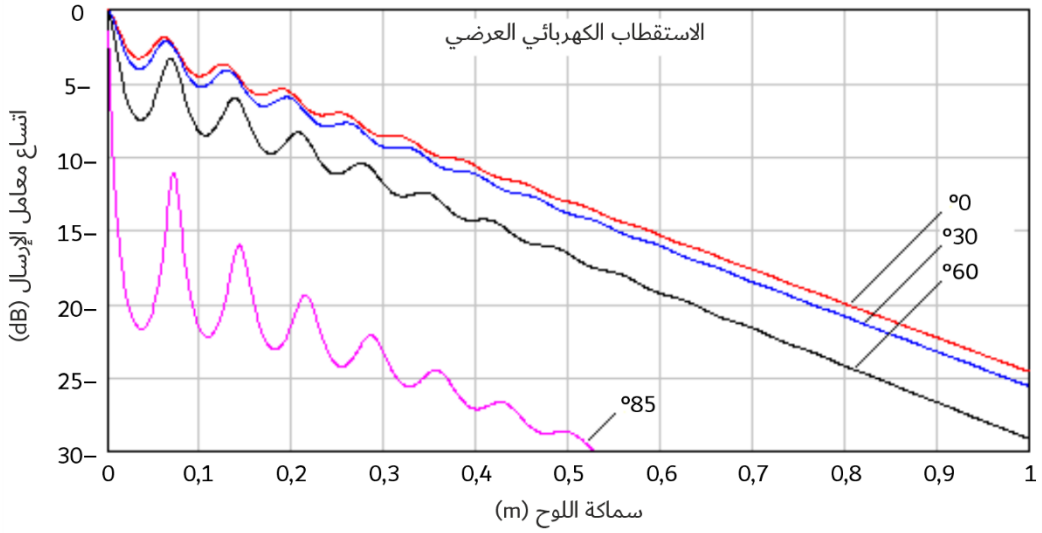
معامل الانعكاس للوح خرساني على التردد 1 GHz بالاستقطاب المغنطيسي العرضي (TM)



P.2040-05

الشكل 6

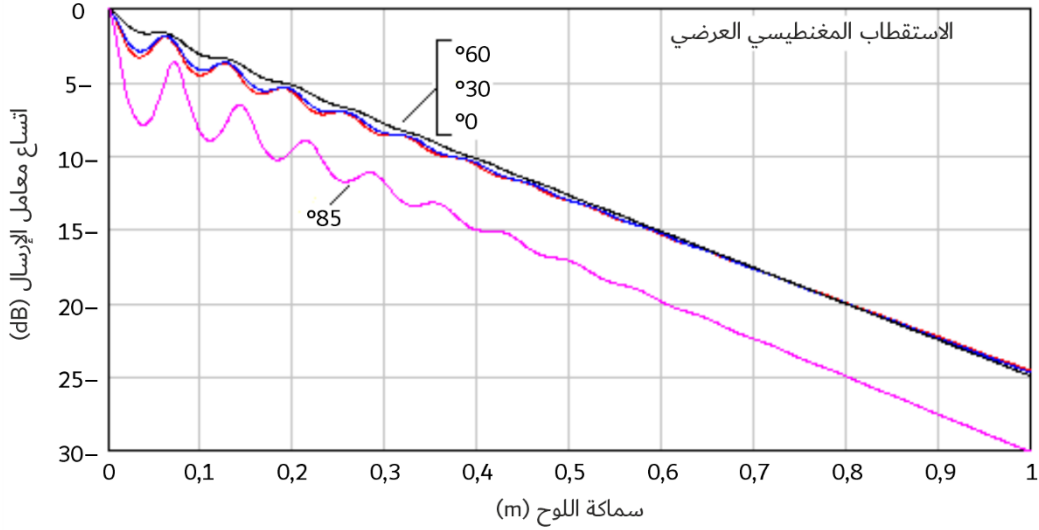
معامل الإرسال للوح خرساني على التردد 1 GHz بالاستقطاب الكهربائي العرضي (TE)



P.2040-06

الشكل 7

معامل الإرسال للوح خرساني على التردد 1 GHz بالاستقطاب المغنطيسي العرضي (TM)



P.2040-07

ويلاحظ في الشكلين 5 و 7 أن معاملات الاستقطاب المغنطيسي العرضي (TM) لورود زاويته 85 درجة لها قيم شاذة مقارنة مع ترتيب الزوايا الثلاث الأخرى. وذلك هو تأثير معامل الانعكاس الأدنى المرئي في الشكل 2 بالاستقطاب المغنطيسي العرضي، ويُعرف بزواوية بروستر (Brewster) الزائفة.

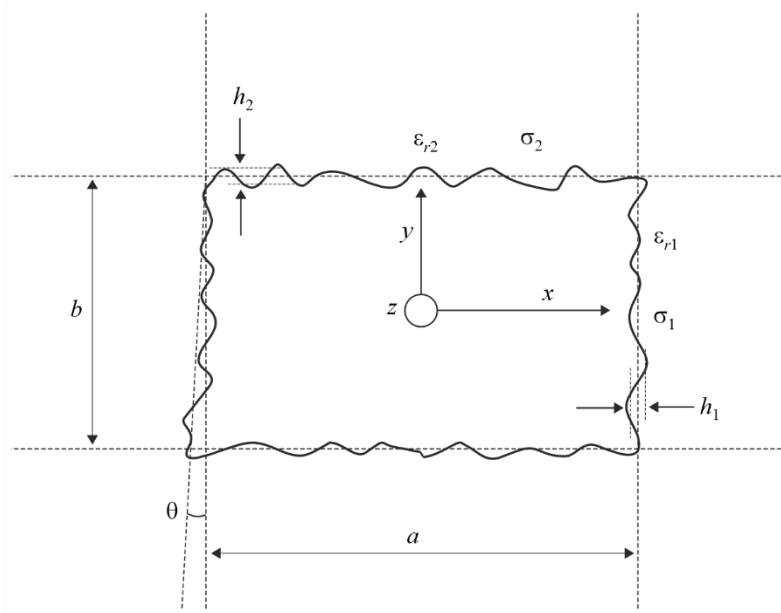
3.2.2 انتشار الدليل الموجي في المباني

1.3.2.2 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 مبني، يمكن اعتبار ممر أو مركز تسوق تحت الأرض أو نفق دليلاً موجياً. وتتوهن 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 8. وفي هذه الحالة، تختلف الثوابت الذاتية للمادة العازلة الموهنة في الجدران الجانبية عنها في السقف والأرضية.

الشكل 8

مقطع عرضي لدليل موجي وثوابت المواد



P.2040-08

في الشكل 8، a هو عرض الدليل الموجي و b هو ارتفاعه (m)، h_2 و h_1 هما خشونة جذر متوسط تربيع التوزيع الغاوسي لمستوى السطح، و θ هو ميل جذر متوسط التربيع (rad). و تُحسب قيم السماحية المركبة للمواد، ϵ_{ri}^* ، على النحو التالي.

$$(45) \quad \epsilon_{ri}^* = \epsilon_{ri} - j \left(\epsilon_{ri}'' + \frac{\sigma_i}{\omega \epsilon_0} \right), \quad i = 1, 2$$

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

و يصاغ ثابت التوهين الأساسي على النحو التالي.

$$(46) \quad L_{basic,h} = K_h \lambda^2 \left[\text{Re} \left(\frac{\epsilon_{r1}^*}{a^3 \sqrt{\epsilon_{r1}^* - 1}} + \frac{1}{b^3 \sqrt{\epsilon_{r2}^* - 1}} \right) - \frac{\lambda}{2\pi} \text{Im} \left(\frac{|\epsilon_{r1}^*|^2}{a^4 (\epsilon_{r1}^* - 1)} + \frac{1}{b^4 (\epsilon_{r2}^* - 1)} \right) \right] \text{ (dB/m)}$$

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

K_h و K_v هما قيمتان ثابتتان تعتمدان على شكل المقطع، وتردان في الجدول 1.

الجدول 1

القيمتان الثابتتان 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 (47) التي تمثل الشرط المقيد.

$$(47) \quad \lambda \ll \frac{\pi a \sqrt{\epsilon_{r1} - 1}}{\epsilon_{r1}} \quad (m)$$

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

الخصائص الفريدة في حالة الشكل المربع

إن ثابت التوهين بسبب الخشونة، التي تعتبر بمثابة الاختلافات المحلية في مستوى السطح نسبةً إلى متوسط مستوى سطح الجدار، يعطى كما يلي:

$$(48) \quad L_{roughness,h} = K_h \pi^2 \lambda \left[\left(\frac{h_1}{a} \right)^2 + \left(\frac{h_2}{b} \right)^2 \right] \quad (dB/m)$$

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

ويعطى ثابت التوهين بسبب ميل الجدار كما يلي:

$$(49) \quad L_{tilt,h} = K_h \frac{\pi^2 \theta^2}{\lambda} \quad (dB/m)$$

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

وبالتالي فإن ثابت التوهين الكلي في حالة الشكل المربع هو مجموع الخسائر المذكورة أعلاه:

$$(50) \quad L_h = L_{basic,h} + L_{roughness,h} + L_{tilt,h} \quad (dB/m)$$

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

2.3.2.2 صلاحية تطبيق نظرية الدليل الموجي

تظهر نظرية الدليل الموجي اتفاقاً جيداً مع خصائص الانتشار المقیسة 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 9 مقارنة بين قيم ثابت التوهين النظرية والمقیسة خلال النهار (عند وجود حركة مشاة)، وأثناء الليل (عند خلو الممر). وتُحسب القيم النظرية على أساس المعلومات الواردة في الجدول 2.

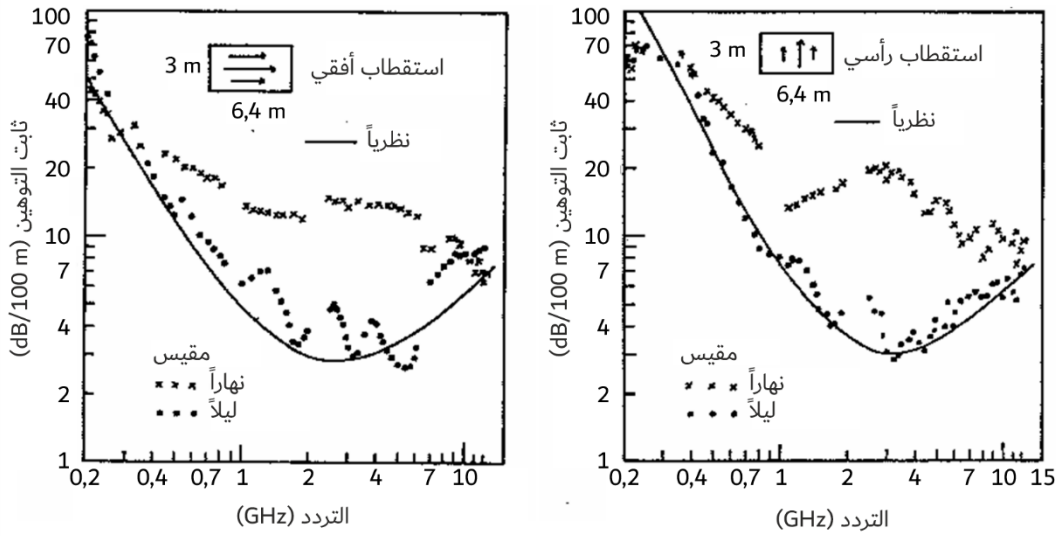
الجدول 2

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 9

مقارنة ثابت التوهين بين النهار والليل



P.2040-09

يبين الشكل 9 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 بمجرد 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 السطوح الانتقائية ترددياً

تتفاوت قدرة الموجات المنتشرة وفق خشونة السطوح. وفي هذه الفقرة، يرد وصف نظرية لحساب مجالات منتشرة عن سطح ذي صفيق من التحدبات المستديرة. فأولاً، لوضع معلمات خشونة السطح، يعرّف السطح الخشن باستخدام صفيق تحدبات مستديرة مشكّل بتحديد مواقع أسطوانات دائرية دورياً.

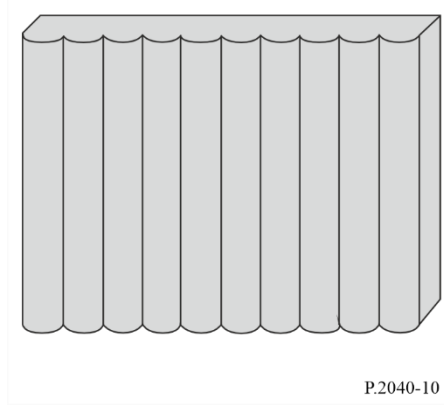
وثانياً يعرّف معامل انعكاس المجالات المنتشرة باستخدام الجاميع الشبكية التي تتميز الترتيب الدوري لمسببات الانتشار والمصفوفة T لصفيق الأسطوانات الدائرية. وثالثاً، تظهر النتيجة العددية التي تبين الخاصية المعتمدة على التردد للانعكاس عن سطح التحدب المستدير. وأخيراً، تظهر نتيجة القياس لبيان تغير قدرة الموجات المنتشرة مع تردد الموجة الواردة في حال وجود صفيق تحدبات مستديرة على سطح مبني.

2.3.2 نظرية انتشار الموجات حول سطح صفيق تحديات مستديرة

إذا جُعل صفيق تحديات مستديرة دورياً على سطح مبنى على النحو المبين في الشكل 10، 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 صفيق تحديات السطح.

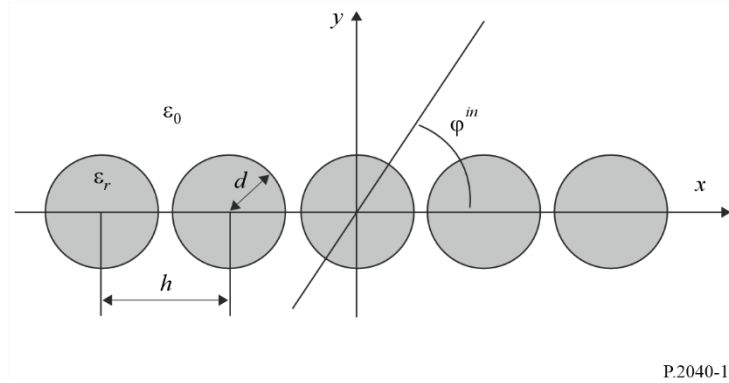
الشكل 10

سطح صفيق التحديات المستديرة



الشكل 11

هندسة صفيق دوري لأسطوانات دائرية



عندما تقع أسطوانات دائرية متطابقة بشكل دوري على المحور x على النحو المبين في الشكل 11، يعطى معامل انعكاس القدرة R_v لأسلوب الانتشار من المرتبة v عند تحقق الشرط $k_v > 0$ ، على النحو التالي:

$$(51) \quad R_v = \frac{k_v}{k_0 \sin \varphi^{in}} |\mathbf{p}_v^T \cdot \mathbf{a}_0^{sc}|^2$$

حيث $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ ، و λ_0 هو الطول الموجي للموجات الواردة في زاوية φ^{in} . وفي المعادلة (51)، يتم الحصول على \mathbf{p}_v^T و \mathbf{a}_0^{sc} على النحو التالي:

$$(52) \quad \mathbf{p}_v = \begin{cases} \frac{2(j)^m (k_{xv} + jk_v)^m}{hk_v k_0^m} & (m \geq 0) \\ \frac{2(-j)^{|m|} (k_{xv} - jk_v)^{|m|}}{hk_v k_0^{|m|}} & (m < 0) \end{cases}$$

$$(53) \quad \mathbf{a}_0^{sc} = (\bar{\mathbf{I}} - \bar{\mathbf{T}} \cdot \bar{\mathbf{L}})^{-1} \cdot \bar{\mathbf{T}} \cdot \mathbf{a}^{in}$$

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

$$(54) \quad L_{mn} = \sum_{l=0}^{\infty} H_{m-n}^{(1)}(k_0 l h) e^{jk_0 l h \varphi^{in}} + (-1)^{m-n} \sum_{l=0}^{\infty} H_{m-n}^{(1)}(k_0 l h) e^{-jk_0 l h \varphi^{in}}$$

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

$$(55a) \quad T_{mn}^E = -\frac{\sqrt{\varepsilon_r} J'_m(kd) J_m(k_0 d) - J_m(kd) J'_m(k_0 d)}{\sqrt{\varepsilon_r} J'_m(kd) H_m^{(1)}(k_0 d) - J_m(kd) H_m^{(1)}(k_0 d)} \delta_{mn}$$

$$(55b) \quad T_{mn}^H = -\frac{J'_m(kd) J_m(k_0 d) - \sqrt{\varepsilon_r} J_m(kd) J'_m(k_0 d)}{J'_m(kd) H_m^{(1)}(k_0 d) - \sqrt{\varepsilon_r} J_m(kd) H_m^{(1)}(k_0 d)} \delta_{mn}$$

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 كرونينكر (Kronecker). ويشير \mathbf{a}^{in} إلى متجه العمود الذي تمثل عناصره الاتساعات المجهولة للمجال الوارد.

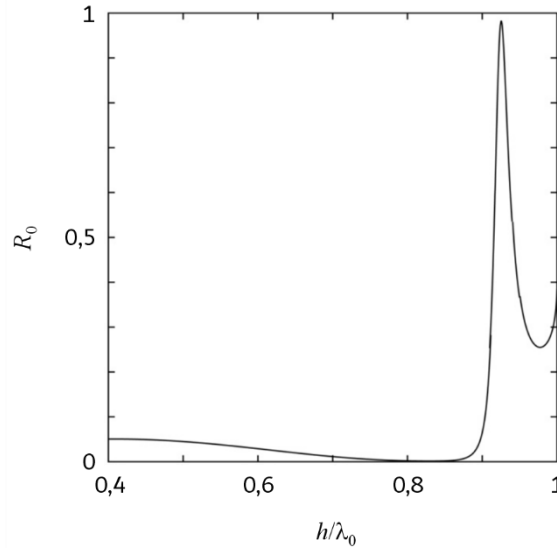
$$(56) \quad \mathbf{a}^{in} = [(j)^n e^{-jn\varphi^{in}}]$$

3.3.2 نتائج الحساب

تظهر نتيجة الحساب لمعامل قدرة الانعكاس في الشكل 12. وتُحسب النتيجة باستخدام المعادلة (51) إذا كان المجال الكهربائي E_z^{in} مرسلًا بزاوية $\varphi^{in} = 90^\circ$ إلى التحديدات المستديرة العازلة التي يبلغ قطرها وسماحتها $h = 0,3$ و $\varepsilon_r = 2,0$ ، على التوالي. وفي النتيجة، هناك النطاق الترددي الذي تعكسه الموجة الواردة عن السطح بالكامل تقريباً حتى لو كانت مادته عازلة لا خسارة فيها.

الشكل 12

معامل انعكاس القدرة R_0 بدلالة الطول الموجي المقيس h/λ_0 في مجال كهربائي وارد متعامد مع السطح E_z^{in}

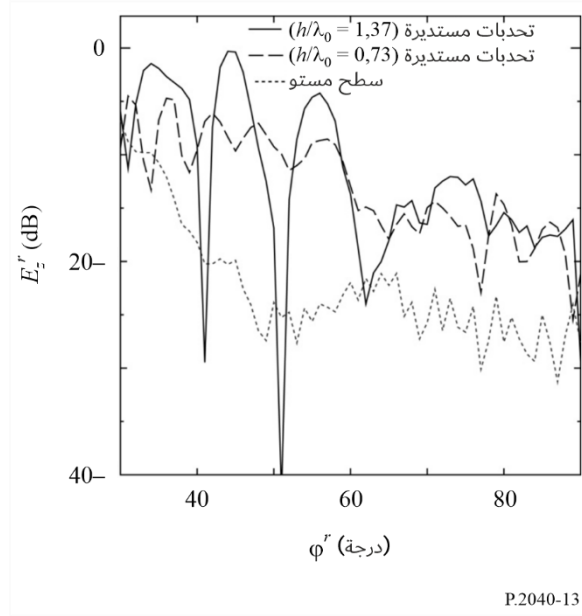


4.3.2 القياس

أجريت قياسات للموجات المنتشرة من مبنى له صفيح تحذبات مستديرة. ويبين الشكل 13 مقارنة الموجات المنتشرة من المبنى بين سطح مستو وسطح 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 الورد وزاوية الانعكاس على النحو المبين في الشكل 14.

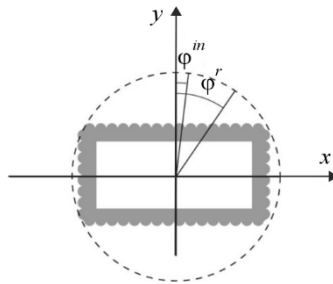
الشكل 13

هندسة صفيح دوري من أسطوانات دائرية



الشكل 14

شكل مسطح للمخطط التركيبي للقياسات



P.2040-14

تبين نتائج القياس أن قدرة المجال المنتشر من سطح له صفيح تحذبات مستديرة تزداد عنها من سطح مستو، ويمكن التحكم فيها بالدور البيئي 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 تعطي 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 المنحنى 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 وفُرزت ضمن فئات المواد.

واشتُقت لكل فئة صيغتان بسيطتان للقيم المعتمدة على السماحية النسبية، η' ، والإيصالية، σ ، على التردد، وهما كما يلي:

$$(57) \quad \eta' = a f^b$$

و:

$$(58) \quad \sigma = c f^d$$

حيث f هو التردد بوحدة GHz و σ هي بوحدة S/m (ولا أبعاد للسماحية النسبية η'). وترد قيم a و b و c و d في الجدول 3. وحيثما تبلغ قيمة b أو d صفراً، تبلغ قيمة η' أو σ المقابلة a أو c على التوالي، وعلى نحو مستقل عن تردد.

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

$$(59) \quad \eta'' = 17.98 \sigma / f$$

وترد في الجدول 3 معاملات للهواء والمعدن وثلاثة ظروف على الأرض توخياً لاكتمال المعلومات.

الجدول 3

خواص المواد

مدى الترددات	الإيصالية S/m		الجزء الحقيقي من السماحية النسبية		صنف المادة الخام
	d	c	b	a	
GHz					
100-0,001	0	0	0	1	الخواء (≈ الهواء)
100-1	0,7822	0,0462	0	5,24	خرسانة
40-1	0,16	0,0238	0	3,91	طوب قرميد
100-1	0,9395	0,0085	0	2,73	لوحات بلاستيكية
100-0,001	1,0718	0,0047	0	1,99	خشب
100-0,1	1,3394	0,0036	0	6,31	زجاج
450-220	1,658	0,0004	0	5,79	زجاج
100-1	1,0750	0,0011	0	1,48	سقف
450-220	1,029	0,0029	0	1,52	سقف
100-1	0,7800	0,0217	0	2,58	كرتون
40-1	0	0,33	0	2,71	خشب رقائق
60-1	0,9262	0,0055	0	7,074	رخام
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

مديات الترددات الواردة في الجدول 3 ليست حدوداً نهائية ولكنها ذات دلالة بالنسبة للقياسات 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 3 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 توهُن الموجات الكهرومغناطيسية عبر المواد.

المرفق 1

بالملاحق 1

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

فيما يلي صيغة بديلة للطريقة الواردة في الفقرة 1.2.2.2، وتسمح بحساب معاملي الانعكاس (R) والإرسال (T) في حالة مواد البناء المكونة من عدد N من اللوحات العازلة الكهربائية بالاستناد إلى مصفوفة ABCD، على النحو الموضح في الشكل 5. ونفترض أن المنطقتين على جانبي مادة البناء فضاء حر. والنتائج التي يمكن الحصول عليها بواسطة هذه الطريقة تماثل تماماً النتائج التي يمكن الحصول عليها بواسطة المعادلات الواردة في الفقرة 1.2.2.2.

$$(60a) \quad R = \frac{B/Z_0 - CZ_0}{2A + B/Z_0 + CZ_0}$$

$$(60b) \quad T = \frac{2}{2A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0}$$

حيث العناصر A و B و C هذه هي عناصر المصفوفة ABCD وتعطى باستخدام ضرب المصفوفات كما يلي:

$$(61a) \quad \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_N & B_N \\ C_N & D_N \end{bmatrix}$$

حيث:

$$(61b) \quad A_m = \cos(\beta_m d_m)$$

$$(61c) \quad B_m = jZ_m \sin(\beta_m d_m)$$

$$(61d) \quad C_m = \frac{j \sin(\beta_m d_m)}{Z_m}$$

$$(61e) \quad D_m = A_m$$

$$(61f) \quad \beta_m = k_m \cos(\theta_m) = k_m \left[1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{\eta_m} \right]^{1/2}$$

$$(61g) \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$(61h) \quad k_m = k_0 \sqrt{\eta_m}$$

وتمثل λ طول الموجة في الفضاء الطلق، و k_0 عدد الموجات في الفضاء الطلق، و η_m و k_m السماحية النسبية المركبة وعدد الموجات في اللوحة ذات الرتبة m ، وتمثل β_m ثابت الانتشار المتعامد مع مستوى اللوحة و d_m عرض اللوحة ذات الرتبة m .

وتحسب معاوقة الموجة Z وفق استقطاب الورد كما يلي:

$$(62a) \quad \text{استقطاب TE} \quad Z_m = \frac{120\pi}{\sqrt{\eta_m} \cos \theta_m}$$

و

$$(62b) \quad \text{استقطاب TM} \quad Z_m = \frac{120\pi \cos \theta_m}{\sqrt{\eta_m}}$$

وحيث:

$$(63a) \quad \eta_0 = \eta_{N+1} = 1$$

$$(63b) \quad \theta_0 = \theta_{N+1} = \theta$$

$$(63c) \quad Z_0 = Z_{N+1}$$

ومعاوقة الموجة Z_0 في المعادلة (63c) هي معاوقة الفضاء الحر، ويمكن الحصول عليها من المعادلتين (62a) و (62b) عن طريق ضبط $\eta_m = 1$.