

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية **ITU-R P.2146-0**
(2022/08)

الانتشار بمحطتين عند سطح البحر

السلسلة **P**
انتشار الموجات الراديوية

تمهيد

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

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

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

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني <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 الاستدلال الراديوي 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، 2023

التوصية ITU-R P.2146-0

الانتشار بمحطتين عند سطح البحر

(المسألة ITU-R 208-6/3)

(2022)

مجال التطبيق

تقدم هذه التوصية طريقة للتنبؤ بمعامل الانتشار بمحطتين ومعامل الانعكاس المتناسك عند سطح البحر. ويمكن تطبيق هذا النموذج عند أي زاوية ارتفاع، باستثناء الورد التماسي، وينطبق على ترددات تصل إلى 100 GHz وعلى سرعات رياح تتراوح بين 0,5 m/s و 25 m/s.

مصطلحات أساسية

معامل الانتشار بمحطتين، الانتشار المتناسك، الانتشار المشتت، سرعة الرياح، قيم المتوسط التربيعي للميل عكس اتجاه الرياح وفي الاتجاه المتعامد مع اتجاه الرياح، موجة ثقالية، موجة شعرية، اضطراب كبير، اضطراب صغير

المختصرات/الأسماء المختصرة

ECMWF المركز الأوروبي للتنبؤات الجوية متوسطة المدى (European Centre for Medium-Range Weather Forecast)

ERA5 الجيل الخامس من عمليات إعادة التحليل الجوية التي أجراها المركز الأوروبي للتنبؤات الجوية متوسطة المدى (ECMWF Reanalysis version 5)

توصيات وكتيبات قطاع الاتصالات الراديوية ذات الصلة

التوصية ITU-R P.372

التوصية ITU-R P.452

التوصية ITU-R P.527

التوصية ITU-R P.528

التوصية ITU-R P.676

التوصية ITU-R P.680

التوصية ITU-R P.1144

التوصية ITU-R P.2148

ملاحظة - في كل حالة، ينبغي استخدام أحدث مراجعة/طبعة من التوصية سارية النفاذ.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

(أ) أن التخطيط الصحيح لأنظمة رصد سطح الأرض والأنظمة الفضائية الموجهة إلى الأسفل يتطلب نماذج مناسبة للتنبؤ بمعامل الانتشار بمحطتين عند سطح البحر؛

- (ب) أن معامل الانتثار بمحطتين قد يتضمن أحد المكونين التاليين أو كليهما: مكون معامل الانتثار المتناسك بمحطتين ومكون معامل الانتثار المشتت (غير المتناسك) بمحطتين؛
- (ج) أن الانتثار المشتت بمحطتين قد ينتج عن اضطراب كبير تحركه موجة ثقالية طويلة وعن اضطراب صغير تحركه موجة شعيرية قصيرة؛
- (د) أن الرياح تحرك كل من الموجة الثقالية الطويلة والموجة الشعيرية القصيرة على السواء؛
- (هـ) أنه قد تم تطوير نموذج يسمح بالتنبؤ بمعاملات الانتثار بمحطتين عند سطح البحر اللازمة لتقييم العديد من معلمات الانتثار من قبيل عمق الخبو، والضوضاء الجوية الناجمة عن الانبعاثات من سطح البحر، وقدرة التداخل الناجمة عن الانتثار عند سطح البحر،
- توصي

باستخدام الطريقة المبينة في الملحق للتنبؤ بمعامل الانتثار بمحطتين عند سطح البحر.

الملحق

جدول المحتويات

الصفحة

ii	.....	سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)
2	.....	الملحق
4	.....	1 مقدمة
7	.....	2 الخطوة 0: معلمات الدخل
7	.....	1.2 معلمات الدخل المتعلقة بالانتثار
7	.....	2.2 معلمات الدخل المتعلقة بسطح البحر
9	.....	3 الخطوة 1: تحديد السماحية النسبية المركبة لمياه البحر
9	.....	4 الخطوة 2: تحديد المعلمات المتعلقة باضطراب سطح البحر
9	.....	1.4 الكثافة الطيفية للارتفاع الصغير لسطح البحر (الموجة الشعيرية) وتغاير ارتفاع البحر
9	.....	2.4 كثافة الاحتمال الخاصة بكثافة الاحتمال لقيم ميل السطح الكبيرة (الموجة الثقالية)
11	.....	5 الخطوة 3: تحديد معامل الانتثار بمحطتين المتناسك
11	.....	6 الخطوة 4: تحديد الانتثار بمحطتين المشتت الناتج عن اضطراب كبير
12	.....	7 الخطوة 5: تحديد الانتثار بمحطتين المشتت الناتج عن اضطراب صغير
16	.....	8 جمع مكونات معامل الانتثار بمحطتين عند سطح البحر
16	.....	1.8 معاملات الانتثار الخلفي (backscattering) عند سطح البحر
18	.....	2.8 معاملات الانتثار بمحطتين عند سطح البحر في الاتجاه الأمامي

22	المرفق A بالملحق - حساب معاملات الانتثار بين موجة مستقطبة دائرياً وموجة مستقطبة خطياً.....
22	1.A قدرة موجة واردة مستقطبة دائرياً إلى قدرة موجة منتشرة مستقطبة خطياً.....
23	2.A قدرة موجة واردة مستقطبة خطياً إلى قدرة موجة منتشرة مستقطبة دائرياً.....
23	المرفق B بالملحق - حساب معاملات الانتثار بين موجتين مستقطبتين دائرياً.....
24	المرفق C بالملحق - تقريبات بسيطة.....
25	المرفق D بالملحق - نموذج أطيايف ارتفاع سطح البحر.....
27	المرفق E بالملحق - قدرة تداخل إشارة منعكسة من سطح البحر نحو مستقبل.....
27	1.E مقدمة.....
27	2.E القدرة المستقبلية المتماسكة.....
28	3.E القدرة المستقبلية المشتتة.....

1 مقدمة

تقدم هذه التوصية طريقة للتنبؤ بمعامل الانتثار بمحطتين عند سطح البحر بدلالة الملوحة ودرجة الحرارة وسرعة الرياح والاتجاه النسبي للرياح ومقلوب عمر الموجة عند سطح البحر. وإذا لم تتوفر البيانات المحلية بشأن هذه المعلومات، ينبغي عندئذٍ استخدام القيم الافتراضية لهذه المعلومات على النحو المبين في الجدول 1. وتنطبق طريقة التنبؤ هذه على أي زاوية ارتفاع، باستثناء الورد التماسي، وعلى أي ترددات حتى 100 GHz، وعلى سرعات رياح تتراوح بين 0,5 m/s و 25 m/s.

ويتضمن معامل الانتثار بمحطتين مكونين، هما: (1) مكون متشتت (غير متماسك)، وهو جزء القدرة الواردة من اتجاه وارد منتشر مع اتجاه استقبال عشوائي، (2) مكون متماسك، وهو جزء القدرة الواردة المنتشرة خلفياً إلى الاتجاه الوارد (أي المرآوي).

وتفترض طريقة التنبؤ المبينة في الفقرات من 1 إلى 8 أن استقطابي المصدر والمستقبل خطيان. وإذا كان استقطاب المصدر و/أو المستقبل دائرياً، فيمكن حساب معاملات الانتثار بمحطتين المناسبة من خلال معاملات الانتثار بمحطتين الخطية باستخدام الطرائق الواردة في المرفقات A أو B أو C بهذا الملحق.

ويمكن استخدام طرائق التنبؤ هذه للتنبؤ بقدرة التداخل المنعكسة من سطح البحر بين مصدر (مثلاً، مرسل وصلة هابطة) ومستقبل يستقبل التداخل الضار (مثلاً، مستقبل ساتلي لرصد الأرض) باستخدام الطريقة الواردة في المرفق E.

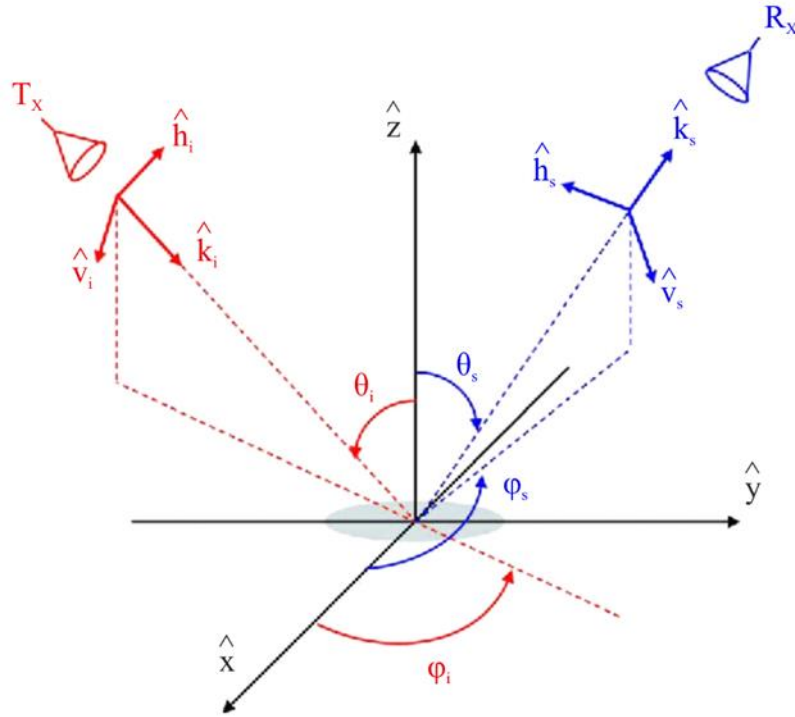
وعلى العموم، سطح البحر هو سطح مضطرب عشوائياً، وهذا الاضطراب ناجم عن الرياح. ومعامل الانتثار بمحطتين، $\gamma_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ ، هو جزء القدرة المنتشرة على طول الاتجاه \hat{k}_s مع الاستقطاب p_s الناتج عن الموجة الواردة المضطربة للسطح على طول الاتجاه \hat{k}_i مع الاستقطاب q_i (انظر الشكل 1). ويُحسب جزء القدرة لكل وحدة من وحدات الزوايا المجسمة ولكل وحدة من وحدات المساحة. ونظراً للطبيعة المعقدة لاضطراب السطح، يُفترض أن معامل الانتثار بمحطتين يتضمن مكونين: مكون متماسك $\gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ ، ومكون مشتت (غير متماسك) $\gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$. ويُجمع هذان المكونان معاً للحصول على المعادلة التالية:

$$(1) \quad \gamma_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$$

المكون المتماسك موجود فقط على طول الاتجاه المرآوي للسطح ($\varphi_s = \varphi_i$ ، $\theta_s = \theta_i$).

الشكل 1

التشكيل الهندسي للانتشار بمحطتين على سطح البحر



P.2146-01

يوضح الشكل 1 الهندسة المأخوذة في الاعتبار في نموذج الانتثار. المستوي xy هو سطح البحر الأفقي، واتجاه السمت هو المحور الموجب z. والمحور الموجب x هو الاتجاه عكس اتجاه الرياح¹، والمحور الموجب y هو الاتجاه المتعامد مع اتجاه الرياح، حيث تقاس زاوية سمّت الورود، θ_i ، وزاوية سمّت الانتثار، θ_s ، انطلاقاً من المحور الموجب z. وتقاس زاوية ميقاتية الورود، φ_i ، وزاوية ميقاتية الانتثار، φ_s ، في المستوي xy في الاتجاه المعاكس لاتجاه عقارب الساعة بالنسبة إلى الاتجاه عكس اتجاه الرياح.

ويتم التعامل مع سطح البحر على أنه سطح بمقياسين من الاضطراب، اضطراب كبير واضطراب صغير، فوق الاضطراب الطويل. ويرتبط الاضطراب الطويل بالموجة الثقالية الطويلة، في حين يرتبط الاضطراب الصغير بالموجة الشعرية القصيرة. وبناء على ذلك، فإن المكون المشتت (غير المتماسك) لمعامل الانتثار بمحطتين، $\gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ ، هو مجموع مكونين على النحو المبين في المعادلة (2):

$$(2) \quad \gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \gamma_{pq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$$

يُنسب الحد الأول في المعادلة (2) إلى الاضطراب الطويل لسطح البحر، ويُنسب الحد الثاني إلى الاضطراب الصغير.

ويمكن بناء نموذج التنبؤ بالمكونين المتماسك والمشتت (غير المتماسك) لمعامل الانتثار بمحطتين عند سطح البحر استناداً إلى المخطط الانسيابي المبين في الشكل 2.

¹ الاتجاه عكس اتجاه هو الاتجاه المضاد لاتجاه الرياح.

الشكل 2

مخطط انسيابي لنموذج التنبؤ بالانتشار بمحطتين عند سطح البحر

الخطوة 0

تحديد معالم الدخل (القسم 2)

الخطوة 1

تحديد السماحية النسبية المركبة (القسم 3)

الخطوة 2

تحديد معالم اضطراب السطح (القسم 4)

الخطوة 3

تحديد معامل الانتثار بمحطتين المتماسك (القسم 5)

الخطوة 4

تحديد مكون معامل الانتثار بمحطتين المشتت الناتج عن اضطراب كبير (القسم 6)

الخطوة 5

تحديد مكون معامل الانتثار بمحطتين المشتت الناتج عن اضطراب قصير (القسم 7)

الخطوة 5

تحديد مكون معامل الانتثار بمحطتين المشتت الناتج عن اضطراب قصير (القسم 7)

الخطوة 6

جمع مكوني معامل الانتثار بمحطتين (القسم 8)

P.2146-02

يتعلق معامل الانتثار بمحطتين عند سطح البحر المنمذج هنا بالموجات الواردة المستقطبة خطياً والموجات المنتشرة المستقطبة خطياً. وترد التحولات من أساس الاستقطاب الخطي إلى توليفات أخرى للاستقطاب الوارد والاستقطاب المنتشر في المرفق A والمرفق B:

- يتعلق المرفق A بالموجات الواردة المستقطبة دائرياً والموجات المنتشرة المستقطبة خطياً.
- يتعلق المرفق B بالموجات الواردة المستقطبة دائرياً والموجات المنتشرة المستقطبة دائرياً.
- يقدم المرفق C تقريبات بسيطة لمعاملات الانتثار بمحطتين الواردة في المرفق A والمرفق B.

وعلاوة على ذلك،

- يقدم المرفق D نموذجاً لأطياف ارتفاع سطح البحر.
- يقدم المرفق E منهجية لتحديد قدرة التداخل من إشارة منعكسة/منتشرة من سطح البحر نحو مستقبل.

2 الخطوة 0: معلمات الدخل

- للتنبؤ بقيم المكونين المتناسك والمشتت (غير المتناسك) لمعامل الانتثار بمحطتين عند سطح البحر، يلزم نوعان من معلمات الدخل، هما:
- معلمات الدخل المتعلقة بالانتشار،
 - معلمات الدخل المتعلقة بسطح البحر.

1.2 معلمات الدخل المتعلقة بالانتشار

معلمات الدخل المتعلقة بالانتشار هي كالتالي:

- زاوية الارتفاع ϵ_i وزاوية السمات φ_i للموجة الواردة المضيفة لسطح البحر. وتحدد هاتان الزاويتان اتجاه الانتشار الوارد \hat{k}_i .
- متجه الاستقطاب \hat{q}_i للموجة المضيفة لسطح البحر.
- زاوية الارتفاع ϵ_s وزاوية السمات φ_s لاتجاه الانتشار \hat{k}_s الذي يُحسب على طول معامل الانتشار بمحطتين.
- متجهات الاستقطاب \hat{p}_s للمجال المنتشر.
- التردد f الذي يُحسب عنده معامل الانتشار بمحطتين. ويُعطى التردد بوحدات GHz. ويحدد التردد العدد الموجي RF، $k(k = 2\pi f/0.299792458 \text{ rad/m})$.
- ونظراً إلى أن الاستقطابات الخطية فقط هي التي أُخذت في الاعتبار في هذا الملحق، فإن $\hat{q}_i = \hat{p}_i$ أو $\hat{h}_i = \hat{p}_i$ أو $\hat{v}_s = \hat{p}_s$ أو $\hat{h}_s = \hat{p}_s$ حيث v تعني الاستقطاب الرأسي (الموازي)، و h تعني الاستقطاب الأفقي (المتعامد). وفي كامل هذه التوصية، استُعيض عن زوايا الارتفاع $\epsilon_{i,s}$ بزوايا السمات المقابلة $\theta_{i,s}$.

$$(3) \quad \theta_{i,s} = \frac{\pi}{2} - \epsilon_{i,s}$$

2.2 معلمات الدخل المتعلقة بسطح البحر

ترد معلمات الدخل المتعلقة بسطح البحر اللازمة للتنبؤ بالانتشار بمحطتين عند سطح البحر في الجدول 1 حيث يمكن استخدام القيم الافتراضية إذا كانت المعلمات المحلية غير معروفة.

الجدول 1

معلمات الدخل المتعلقة بسطح البحر

المعلمة	الوصف	القيمة الافتراضية
ملوحة سطح البحر	تلزم لحساب السماحية النسبية المركبة لسطح البحر	35 ppt ²
درجة حرارة سطح البحر	تلزم لحساب السماحية النسبية المركبة لسطح البحر	0، 15، 30°
سرعة الرياح U_{10} (m/s)	سرعة الرياح عند ارتفاع 10 أمتار فوق سطح البحر	انظر النص أدناه
مقلوب عمر الموجة Ω	يكون البحر كامل النمو عندما تكون قيمة Ω قريبة من 0,85، وناضجاً عندما تكون قيمة Ω قريبة من 1، وناشئاً عندما تكون قيمة Ω أكبر من 2	0,85
العدد الموجي عند الارتفاع القاطع للاضطراب k_d	العدد الموجي للارتفاع الذي يقسم طيف ارتفاع سطح البحر إلى طيف الموجات الثقالية الطويلة وطيف الموجات الشعرية القصيرة	0,5 k حيث يشير k إلى العدد الموجي (1/m)

سرعة الرياح ونظام الإحداثيات

ينبغي استخدام القيم المحلية للمعلومات الواردة في الجدول 1 إذا كانت متوفرة. وتعتمد سرعة الرياح عند ارتفاع 10 أمتار فوق سطح البحر على الموقع الجغرافي والموسم وتغير بمرور الوقت. وإذا كانت البيانات المحلية المتعلقة بسرعة الرياح عند سطح البحر (الشدة والاتجاه والترابط المكاني والزمني) والمنطبقة على الموقع الجغرافي المحدد المعني متوفرة، فينبغي عندئذٍ استخدامها. وإذا لم يكن الترابط المكاني أو الزمني مطلوباً، يمكن استخدام الخرائط العالمية الواردة في التوصية ITU-R P.2148.

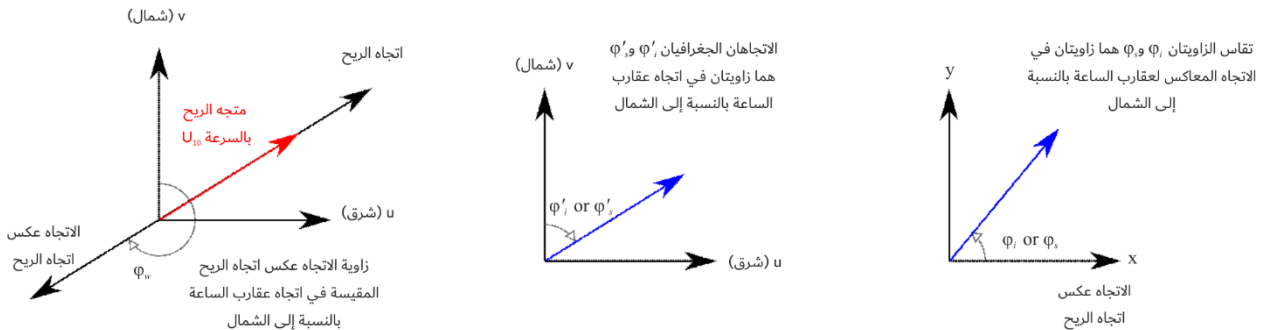
وإذا لم تتوفر بيانات محلية بشأن سرعة الرياح عند سطح البحر، يمكن عندئذٍ اشتقاق متجه الرياح الزمني المحلي من مصادر متعددة للبيانات العالمية؛ فعلى سبيل المثال، المكونان في اتجاهي الشرق والشمال لسرعة الرياح في الساعة عند ارتفاع 10 أمتار فوق سطح الأرض لعام 1979 متوفران في مخزن البيانات المناخية Copernicus التابع للمركز الأوروبي للتنبؤات الجوية متوسطة المدى (ECMWF).

وتوفر بعض مجموعات البيانات (مثل بيانات ERA5 للمركز الأوروبي ECMWF) المكون الشمالي (اتجاه الرياح نحو الشمال) لسرعة الرياح، v ، والمكون الشرقي (اتجاه الرياح نحو الشرق) لسرعة الرياح، u . وبالنسبة لقيمة معينة للمكونين u و v ، فإن مقدار سرعة الرياح عند ارتفاع 10 أمتار فوق سطح الأرض، U_{10} ، يساوي $\sqrt{u^2 + v^2}$. وكما هو مبين في الشكل 3، فإن الاتجاه عكس اتجاه الرياح هو الاتجاه المضاد لاتجاه الرياح؛ والزوايا في اتجاه عقارب الساعة من الشمال إلى الاتجاه عكس اتجاه الرياح، هي $270^\circ - \text{atan2}(v, u)$. ومن ثم، المحور x الموجب الذي يقابل الاتجاه عكس اتجاه الرياح، في الشكل 3، هو زاوية في اتجاه عقارب الساعة، $270^\circ - \text{atan2}(v, u)$ ، بالنسبة إلى الشمال؛ أو، في المقابل، الشمال هو زاوية في الاتجاه المعاكس لاتجاه عقارب الساعة، $270^\circ - \text{atan2}(v, u)$ ، بالنسبة إلى الاتجاه عكس اتجاه الرياح.

وإذا كانت ϕ'_s و ϕ'_i الزاويتين الواردة والمنشرة في اتجاه عقارب الساعة بالنسبة إلى الشمال، فإن ϕ_s و ϕ_i الزاويتين الواردة والمنشرة لاتجاه عقارب الساعة المقابلتين لهما والمبينتين في الشكل 3 تساويان: $\phi_i = \phi_w - \phi'_i$ و $\phi_s = \phi_w - \phi'_s$.

الشكل 3

سرعة الرياح وأنظمة الإحداثيات



P.2146-03

تُحسب المعلومات الوسيطة التالية من خلال معلومات الدخل أعلاه كجزء من الطريقة:

- السماحية النسبية المركبة لسطح البحر ϵ_r ،
- دالة الكثافة الطيفية لارتفاع سطح البحر $W_s(\kappa, \psi)$ ،
- تباير ارتفاع سطح البحر σ^2 ،
- متوسط تربيع قيم ميل سطح البحر في الاتجاه عكس اتجاه الرياح والاتجاه المتعاقد مع اتجاه الرياح، m_{ii}^2 و m_{cc}^2 .

3 تعرّف الدالة $\text{atan2}(y, x)$ بأنها الزاوية بين المحور الموجب x والمتجه من نقطة الأصل إلى النقطة (x, y) .

3 الخطوة 1: تحديد السماحية النسبية المركبة لمياه البحر

يستخدم نموذج السماحية النسبية المركبة الوارد وصفه في المعادلات من (14) إلى (27) من التوصية ITU-R P.527-6 في هذه التوصية للحصول على السماحية النسبية المركبة لمياه البحر. ويصوغ هذا النموذج السماحية النسبية لمياه البحر، ϵ_r ، بدلالة ملوحة سطح البحر ودرجة حرارة سطح البحر والتردد RF. والقيم الافتراضية للملوحة سطح البحر ودرجة حرارته مبينة في الجدول 1.

4 الخطوة 2: تحديد المعلمات المتعلقة باضطراب سطح البحر

يوصف اضطراب سطح البحر من خلال المعلمات التالية:

- الكثافة الطيفية للارتفاع الصغير لسطح البحر، وهي مطلوبة لحساب المكون المشتت لمعامل الانتثار بمحطتين الناجم عن الاضطراب الصغير (الفقرة 6).
- قيمة جذر متوسط التربيع للارتفاع الإجمالي لسطح البحر، وهي مطلوبة لحساب انعكاسية المكون المتناسك (الفقرة 5).
- كثافة الاحتمال لقيم ميل السطح الكبيرة، وهي مطلوبة لحساب المكون المشتت لمعامل الانتثار بمحطتين الناجم عن الاضطراب الكبير (الفقرة 7).

1.4 الكثافة الطيفية للارتفاع الصغير لسطح البحر (الموجة الشعيرية) وتغاير ارتفاع البحر

يرتبط الطيف الصغير بالطيف الاتجاهي لسطح البحر، $W(\kappa, \psi)$ ، على النحو التالي:

$$(4) \quad W_s(\kappa, \psi) = \begin{cases} 0 & \text{if } \kappa < \kappa_d \\ W(\kappa, \psi) & \text{otherwise} \end{cases}$$

حيث تشير κ_d إلى العدد الموجي للارتفاع القاطع بمقياسين، وتشير (κ, ψ) إلى الإحداثيات القطبية للأعداد الموجية المكانية في الاتجاهين عكس اتجاه الرياح والمتعامد مع اتجاه الرياح المرتبطين بالإحداثيات الديكارتية لقيم ميل السطح. وترد الصيغة الصريحة للطيف $W(\kappa, \psi)$ في المرفق D.

وترتبط قيمة جذر متوسط التربيع للارتفاع الإجمالي لسطح البحر، σ ، المطلوبة لحساب انعكاسية المكون المتناسك، بسرعة الرياح، U_{10} ، على النحو التالي:

$$(5) \quad \sigma^2 = \begin{cases} \sigma_0 + \sigma_1 U_{10} + \sigma_2 U_{10}^2 + \sigma_3 U_{10}^3 + \sigma_4 U_{10}^4 + \sigma_5 U_{10}^5 & \text{if } U_{10} \geq 1 \text{ m/s} \\ 0.001515 U_{10} & \text{if } U_{10} < 1 \text{ m/s} \end{cases}$$

حيث σ^2 (تغاير ارتفاع السطح) بالأمتار المربعة، و U_{10} (سرعة الرياح على ارتفاع 10 أمتار فوق سطح البحر) بوحدات m/s، و:

$$\sigma_0 = -0.002913931483264$$

$$\sigma_1 = 0.006483314256661$$

$$\sigma_2 = -0.002390537892927$$

$$\sigma_3 = 0.000309146709141$$

$$\sigma_4 = 0.000026373965831$$

$$\sigma_5 = 0.000000350137099$$

2.4 كثافة الاحتمال الخاصة بكثافة الاحتمال لقيم ميل السطح الكبيرة (الموجة الثقالية)

تمثل كثافة الاحتمال لقيم ميل السطح الكبيرة بتوزيع غوسي بمتغيرين ومتوسط صفري:

$$(6) \quad P(S_u, S_c) = \frac{1}{2\pi m_u m_c} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{S_u^2}{m_u^2} + \frac{S_c^2}{m_c^2} \right) \right\}$$

حيث S_c و S_u هما قيمتا الميل على طول الاتجاهين عكس اتجاه الريح والمتعامد مع اتجاه الريح في أجزاء السطح حيث تُحسب معاملات الانتثار المحلي بمحطتين. وعلاوةً على ذلك، تشير m_c^2 و m_u^2 إلى المتوسطين التربيعيين للميل في الاتجاهين عكس اتجاه الريح والمتعامد مع اتجاه الريح.

$$(7) \quad m_u^2 = \sum_{t=0}^7 a_t U_{10}^t$$

$$(8) \quad m_c^2 = \sum_{t=0}^7 b_t U_{10}^t$$

حيث معاملات الانحدار a_t ($t = 0, \dots, 7$) و b_t ($t = 0, \dots, 7$) في المعادلتين (7) و (8) يعتمدان على التردد f بوحدة GHz على النحو التالي:

$$(9) \quad a_t = d_{t,0} + d_{t,1} \log_{ef} + d_{t,2} (\log_{ef})^2 + d_{t,3} (\log_{ef})^3 + d_{t,4} (\log_{ef})^4 \quad t = 0, \dots, 7$$

$$(10) \quad b_t = z_{t,0} + z_{t,1} \log_{ef} + z_{t,2} (\log_{ef})^2 + z_{t,3} (\log_{ef})^3 + z_{t,4} (\log_{ef})^4 \quad t = 0, \dots, 7$$

والمعاملان $d_{t,m}$ و $z_{t,m}$ مبينان في الجدولين 2 و 3 على التوالي. والمعادلتان (7) و (8) صالحتان لقيم U_{10} بين 0,5 m/s و 25 m/s والترددات بين 1 و 100 GHz.

الجدول 2

قيم معاملات الانحدار $d_{t,m}$ في المعادلة (9)

$d_{t,4}$	$d_{t,3}$	$d_{t,2}$	$d_{t,1}$	$d_{t,0}$	a_t
2,722 372 719 5e-05-	0,000 163 583 254	0,000 178 465 995	0,000 766 377 24-	0,001 316 803 829-	a_0
5,638 297 081 0e-05	0,000 556 018 050-	0,001 055 843 558	0,003 262 226 696	0,003 381 740 504	a_1
2,969 409 304 3e-05-	0,000 321 034 03	0,000 849 564 4-	0,000 788 099 04-	8,387 091 908e-06-	a_2
5,252 298 53e-06	6,039 065 778e-05-	0,000 180 310 43	9,130 847 487e-05	7,172 344 345 1e-05-	a_3
4,820 426 74e-07-	5,756 933 90e-06	1,831 052 853e-05-	5,515 385 070e-06-	9,781 960 983 7e-06	a_4
2,384 386 09e-08	2,928 018 73e-07-	9,693 536 66e-07	1,831 590 630e-07	5,824 151 735 3e-07-	a_5
6,063 116 61e-10-	7,608 802 794e-09	2,590 444 81e-08-	3,121 665 19e-09-	1,662 701 734 3e-08	a_6
6,223 677 47e-12	7,94818760e-11-	2,762 769 59e-10	2,084 451 182e-11	1,853 308 18e-10-	a_7

الجدول 3

قيم معاملات الانحدار $z_{t,m}$ في المعادلة (10)

$z_{t,4}$	$z_{t,3}$	$z_{t,2}$	$z_{t,1}$	$z_{t,0}$	b_t
2,564 879 98e-05-	0,000 195 168 030 1	0,000 187 663 9-	0,000 566 882 739-	0,000 388 356 64-	b_0
5,158 545 58e-05	0,000 564 251 194-	0,001 582 455 599	0,001 274 333 859	0,000 711 554 432 3	b_1
2,608 628 437e-05-	0,000 304 430 724	0,000 999 944 82-	7,665 602 489e-05	0,000 467 115 768	b_2
4,619 116 82e-06	5,704 760 441e-05-	0,000 204 604 176	7,062 890 94e-05-	0,000 113 274 18-	b_3
4,184 881 982e-07-	5,376 554 489e-06	2,031 787 86e-05-	9,917 914 997 6e-06	1,144 869 515e-05	b_4
2,052 809 6e-08	2,717 537 12e-07-	1,063 995 76e-06	6,127 030 44e-07-	5,954 866 288 2e-07-	b_5
5,186 932 2e-10-	7,033 322 599e-09	2,826 461 77e-08-	1,794 015 885e-08	1,566 749 978 4e-08	b_6
5,294 665 17e-12	7,323 652 942e-11-	3,003 151 95e-10	2,032 492 61e-10-	1,651 144 028 4e-10-	b_7

5 الخطوة 3: تحديد معامل الانتثار بمحطتين المتماسك

المكون المتماسك لمعامل الانتثار بمحطتين يشبه المكون المستقطب (vv أو hh) ويوجد فقط على طول اتجاه الانعكاس المرآوي:

$$(11) \quad \gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \begin{cases} 4\pi |r_{pp}(\theta_i)|^2 \exp\{-(2k\sigma\cos\theta_i)^2\} & \text{if } \theta_s = \theta_i, \varphi_s = \varphi_i, \text{ and } p = q \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

في المعادلة أعلاه، يشير $r_{pp}(\theta_i)$ إلى معامل انعكاس فرينيل (Fresnel) للاستقطاب p ($p = v, h$):

$$(12) \quad r_{hh}(\theta_i) = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}}$$

$$(13) \quad r_{vv}(\theta_i) = \frac{\varepsilon_r \cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}}{\varepsilon_r \cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}}$$

6 الخطوة 4: تحديد الانتثار بمحطتين المشتت الناتج عن اضطراب كبير

للحصول على معامل الانتثار بمحطتين الناتج عن اضطراب كبير (الموجة الثقالية)، استخدم زاويتي الورد (θ_i, φ_i) وزاويتي الانتثار (θ_s, φ_s) المتاحة في الفقرة 1.2 لحساب الكميات التالية.

$$(14) \quad q_x = \sin\theta_s \cos\varphi_s - \sin\theta_i \cos\varphi_i$$

$$(15) \quad q_y = \sin\theta_s \sin\varphi_s - \sin\theta_i \sin\varphi_i$$

$$(16) \quad q_z = \cos\theta_s + \cos\theta_i$$

$$(17) \quad q^2 = q_x^2 + q_y^2 + q_z^2$$

$$(18) \quad (\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i) = -\sin\theta_s \cos\theta_i \cos(\varphi_s - \varphi_i) - \sin\theta_i \cos\theta_s$$

$$(19) \quad (\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i) = \sin\theta_s \sin(\varphi_s - \varphi_i)$$

$$(20) \quad (\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s) = \sin\theta_i \cos\theta_s \cos(\varphi_s - \varphi_i) + \sin\theta_s \cos\theta_i$$

$$(21) \quad (\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s) = -\sin\theta_i \sin(\varphi_s - \varphi_i)$$

$$(22) \quad D_0^2 = (\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)^2 + (\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)^2$$

أدخل المعادلتين (16) و (17) في المعادلة (23) للحصول على زاوية الورد المحلية θ'_i عند نقطة السطح التي تساهم في معامل الانتثار بمحطتين:

$$(23) \quad \cos\theta'_i = q |q_z| / (2q_z)$$

أدخل المعادلة (23) في المعادلتين (12) و (13) باستخدام القيمة المناسبة للسماحية النسبية المركبة للحصول على انعكاس فرينيل المحلي r'_{vv} و r'_{hh} . وأدخل بعد ذلك معاملي فرينيل المحليين r'_{vv} و r'_{hh} إلى جانب النواتج المتدرجة للمتجهات في المعادلات من (18) إلى (21) في المعادلات من (24) إلى (27) للحصول على عوامل الاستقطاب $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$:

في حالة $D_0^2 \neq 0$:

$$(24) \quad U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{(\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{vv}\} / D_0^2$$

$$(25) \quad U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{-(\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)r'_{vv}\} / D_0^2$$

$$(26) \quad U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{-(\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{vv}\} / D_0^2$$

$$(27) \quad U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{(\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)r'_{vv}\} / D_0^2$$

في حالة $D_0^2 = 0$:

$$(28) \quad U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = r'_{hh}$$

$$(29) \quad U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = 0$$

$$(30) \quad U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = 0$$

$$(31) \quad U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = r'_{vv}$$

أدخل المعادلات من (14) إلى (17) ومن (24) إلى (27) في المعادلة (32) للحصول على المكون المشتت لمعامل الانتثار بمحطتين عند سطح البحر $\gamma_{pq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ الناتج عن الموجة الثقالية الطويلة:

$$(32) \quad \gamma_{pq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2m_u m_c} \left| \frac{q}{q_z} \right|^4 |U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)|^2 \exp \left\{ \frac{-1}{2q_z^2} \left(\left\{ \frac{q_x}{m_u} \right\}^2 + \left\{ \frac{q_y}{m_c} \right\}^2 \right) \right\}$$

حيث يشير m_c و m_u إلى المتوسطين التربيعيين لقيمتي ميل السطح في الاتجاه عكس اتجاه الرياح والاتجاه المتعامد مع اتجاه الرياح، المبينتين في المعادلتين (7) و(8) كدالة لسرعة الرياح U_{10} والتردد f .

7 الخطوة 5: تحديد الانتثار بمحطتين المشتت الناتج عن اضطراب صغير

يُستهل النهج المتبع للحصول على الانتثار بمحطتين المشتت الناتج عن اضطراب صغير بتحديد القيم القصوى والقيم الدنيا لقيمتي الميل S_u و S_c .

$$S_{u,max} = 6 m_u$$

$$S_{u,min} = -\min(6 m_u, \cot \theta_i)$$

$$S_{c,max} = 6 m_c$$

$$S_{c,min} = -6 m_c$$

وتقسّم منطقة الميل المقابلة للقيم القصوى والقيم الدنيا إلى نقاط مساحتها 64×64 باستخدام عُقد التريبع الغوسي. وفي عقدة عشوائية (t, m) ، يمكن صياغة قيم الميل على النحو التالي:

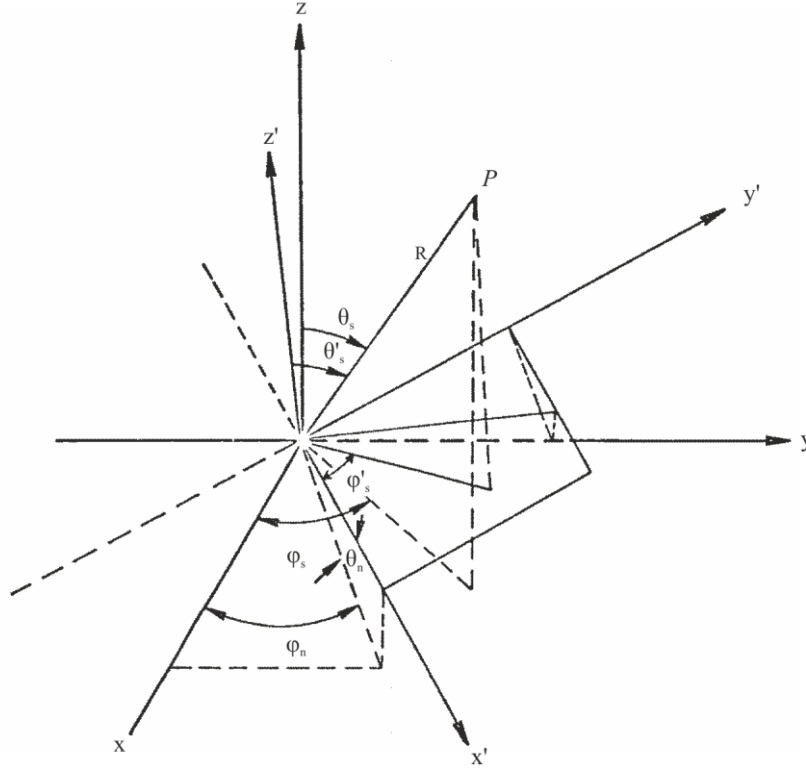
$$(33) \quad S_{u,t} = \frac{1}{2} \{ (S_{u,max} - S_{u,min}) \chi(t) + (S_{u,max} + S_{u,min}) \}$$

$$(34) \quad S_{c,m} = \frac{1}{2} \{ (S_{c,max} - S_{c,min}) \varsigma(m) + (S_{c,max} + S_{c,min}) \}$$

وفي المعادلتين (33) و(34)، تشير $\chi(t)$ و $\varsigma(m)$ إلى عُقد التريبع الغوسي $(t, m = 1, \dots, 64)$ المقابلة للعُقد X_i المشار إليها في القسم 3 من ملحق التوصية ITU-R P.1144-11، أي $\chi(t), \varsigma(m) \rightarrow X_i$ وكذلك $S_{u,t} \rightarrow Z'_i$ و $S_{c,m} \rightarrow Z'_i$.

الشكل 4

زاويتا الانتشار المحليتان (θ'_s, φ'_s) وزاويتا ميل السطح العمودي (زاوية السم θ_n وزاوية الاتجاه φ_n)



P.2146-04

في العقدة الغوسية أعلاه، تُجرى الخطوات التالية:

- حساب زاوية السم θ_n وزاوية الاتجاه φ_n اللتين تحددان ميل عمودي السطح الكبير على سطح البحر \hat{n} (انظر الشكل 4) من خلال إدخال المعادلتين (32) و (33) في المعادلات من (35) إلى (37):

$$(35) \quad \varphi_n = \tan^{-1}\{S_{c,m}/S_{u,t}\}$$

$$(36) \quad \cos \theta_n = \frac{1}{\sqrt{S_{u,t}^2 + S_{c,m}^2 + 1}}$$

$$(37) \quad \sin \theta_n = \cos \theta_n \{S_{u,t} \cos \varphi_n + S_{c,m} \sin \varphi_n\}$$

- حساب زاويتي الانتشار المحليتين وزاويتي الورد المحليتين θ'_s و φ'_s ، و θ'_i و φ'_i في نقطة العقدة هذه:

$$(38) \quad \varphi'_s = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin \theta_s \sin(\varphi_s - \varphi_n)}{\sin \theta_s \cos \theta_n \cos(\varphi_s - \varphi_n) + \cos \theta_s \sin \theta_n} \right\}$$

$$(39) \quad \cos \theta'_s = \frac{\{-\sin \theta_s (S_{u,t} \cos \varphi_s + S_{c,m} \sin \varphi_s) + \cos \theta_s\}}{\sqrt{S_{u,t}^2 + S_{c,m}^2 + 1}}$$

$$(40) \quad \sin \theta'_s = \{\sin \theta_s \cos \theta_n \cos(\varphi_s - \varphi_n) + \cos \theta_s \sin \theta_n\} \cos \varphi'_s + \{\sin \theta_s \sin(\varphi_s - \varphi_n)\} \sin \varphi'_s$$

و

$$(41) \quad \varphi'_i = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin \theta_i \sin(\varphi_i - \varphi_n)}{\sin \theta_i \cos \theta_n \cos(\varphi_i - \varphi_n) - \cos \theta_i \sin \theta_n} \right\}$$

$$(42) \quad \cos \theta'_i = \frac{\{\sin \theta_i (S_{u,t} \cos \varphi_i + S_{c,m} \sin \varphi_i) + \cos \theta_i\}}{\sqrt{S_{u,t}^2 + S_{c,m}^2 + 1}}$$

$$(43) \quad \sin \theta'_i = \{\sin \theta_i \cos \theta_n \cos(\varphi_i - \varphi_n) - \cos \theta_i \sin \theta_n\} \cos \varphi'_i + \{\sin \theta_i \sin(\varphi_i - \varphi_n)\} \sin \varphi'_i$$

- يمكن حساب زاويتي الورد ووزاويتي الانتثار المحلية من الحصول على مكونات الاستقطاب الأفقي الوارد والاستقطاب الأفقي المنتثر:

$$(44) \quad h_{xi} = \sin \theta_i \sin \varphi_i - \cos \theta_i S_{c,m}$$

$$(45) \quad h_{yi} = \cos \theta_i S_{u,t} - \sin \theta_i \cos \varphi_i$$

$$(46) \quad h_{zi} = \sin \theta_i (S_{u,t} \sin \varphi_i - S_{c,m} \cos \varphi_i)$$

$$(47) \quad D_i = \sqrt{h_{xi}^2 + h_{yi}^2 + h_{zi}^2}$$

و

$$(48) \quad h_{xs} = \sin \theta_s \sin \varphi_s + \cos \theta_s S_{c,m}$$

$$(49) \quad h_{ys} = -\{\cos \theta_s S_{u,t} + \sin \theta_s \cos \varphi_s\}$$

$$(50) \quad h_{zs} = \sin \theta_s (S_{u,t} \sin \varphi_s - S_{c,m} \cos \varphi_s)$$

$$(51) \quad D_s = \sqrt{h_{xs}^2 + h_{ys}^2 + h_{zs}^2}$$

- حساب النواتج المتدرجة التالية للمتجهات في اتجاه الورد:

$$(52) \quad (\vartheta'_i \cdot \vartheta_i) = \cos \theta_n \{-\cos \theta_i (S_{u,t} \cos \varphi_i + S_{c,m} \sin \varphi_i) + \sin \theta_i\} / D_i$$

$$(53) \quad (\vartheta'_i \cdot \hat{h}_i) = \cos \theta_n \{-S_{u,t} \sin \varphi_i + S_{c,m} \cos \varphi_i\} / D_i$$

$$(54) \quad (\hat{h}'_i \cdot \vartheta_i) = \frac{-1}{D_i} \{\cos \theta_i (h_{xi} \cos \varphi_i + h_{yi} \sin \varphi_i) + h_{zi} \sin \theta_i\}$$

$$(55) \quad (\hat{h}'_i \cdot \hat{h}_i) = \frac{1}{D_i} \{h_{yi} \cos \varphi_i - h_{xi} \sin \varphi_i\}$$

والنواتج المتدرجة التالية للمتجهات في اتجاه الانتثار:

$$(56) \quad (\vartheta_s \cdot \vartheta'_s) = \cos \theta_n \{\cos \theta_s (S_{u,t} \cos \varphi_s + S_{c,m} \sin \varphi_s) + \sin \theta_s\} / D_s$$

$$(57) \quad (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s) = \frac{1}{D_s} \{\cos \theta_s (h_{xs} \cos \varphi_s + h_{ys} \sin \varphi_s) - h_{zs} \sin \theta_s\}$$

$$(58) \quad (\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s) = \cos \theta_n \{-S_{u,t} \sin \varphi_s + S_{c,m} \cos \varphi_s\} / D_s$$

$$(59) \quad (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s) = \frac{1}{D_s} \{h_{ys} \cos \varphi_s - h_{xs} \sin \varphi_s\}$$

- حساب عوامل الاستقطاب في الإطار المحلي g'_{pq} من خلال إدخال المعادلتين (38) و(41) إلى جانب القيمة المناسبة للسماحية النسبية المركبة في المعادلات من (60) إلى (63):

$$(60) \quad g'_{hh} = \frac{(\varepsilon_r - 1)}{\left(\cos \theta'_s + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_s} \right) \left(\cos \theta'_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_i} \right)} \cos(\varphi'_s - \varphi'_i)$$

$$(61) \quad g'_{vh} = \frac{-(\epsilon_r - 1) \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta'_s}}{(\epsilon_r \cos \theta'_s + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta'_s}) (\cos \theta'_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta'_i})} \sin(\varphi'_s - \varphi'_i)$$

$$(62) \quad g'_{hv} = \frac{(\epsilon_r - 1) \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta'_i}}{(\cos \theta'_s + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta'_s}) (\epsilon_r \cos \theta'_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta'_i})} \sin(\varphi'_s - \varphi'_i)$$

$$(63) \quad g'_{vv} = \frac{(\epsilon_r - 1) \left(\epsilon_r \sin \theta'_i \sin \theta'_s - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta'_s} \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta'_i} \cos(\varphi'_s - \varphi'_i) \right)}{(\epsilon_r \cos \theta'_s + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta'_s}) (\epsilon_r \cos \theta'_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta'_i})}$$

- حساب عوامل الاستقطاب G_{pq} من خلال إدخال المعادلات من (60) إلى (63) والمعادلات من (52) إلى (59) في المعادلات من (64) إلى (67):

$$(64) \quad G_{vv} = \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \vartheta_i) + \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \vartheta_i)$$

$$(65) \quad G_{vh} = \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \hat{h}_i) + \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \hat{h}_i)$$

$$(66) \quad G_{hv} = \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \vartheta_i) + \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \vartheta_i)$$

$$(67) \quad G_{hh} = \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \hat{h}_i) + \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \hat{h}_i)$$

تضمن الدالة \mathcal{U} أن العقدة الغوسية (t, m) ترى الاتجاه الوارد والاتجاه المنتشر في آن واحد:

$$(68) \quad \mathcal{U}(S_{u,t}, \theta_i) = \begin{cases} \max((1 + S_{u,t} \tan \theta_i), 0) & \text{if } 0 \leq \theta'_i \leq \frac{\pi}{2} \text{ and } 0 \leq \theta'_s \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ومن الضروري تكرار الإجراءات أعلاه لتغطية جميع عقد الميل.

ولحساب معامل الانتثار المشتت بمحطتين عند سطح البحر الناتج عن الموجات القصيرة، تُستعمل الصيغ أعلاه لحساب المعادلتين (69) و(70) في جميع العقد:

$$(69) \quad P(S_{u,t}, S_{c,m}) = \frac{1}{2\pi m_u m_c} \exp \left\{ \frac{-1}{2} \left(\frac{S_{u,t}^2}{m_u^2} + \frac{S_{c,m}^2}{m_c^2} \right) \right\}$$

$$(70) \quad \gamma_{pq}^{cap}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = 16\pi(k^2 \cos \theta'_s \cos \theta'_i)^2 |G_{pq}|^2 W_s(\kappa, \varphi_i)$$

يتم الحصول على المعادلة (69) من المعادلة (6). إضافة إلى ذلك، تشير الدالة $W_s(\kappa, \varphi_i)$ في المعادلة (70) إلى دالة الكثافة الطيفية للموجة القصيرة، المبينة في المرفق D والمحسوبة عند $\psi = \varphi_i$ ، ويُحسب العدد الموجي للارتفاع، κ ، من خلال المعادلة التالية:

$$(71) \quad \kappa = k \sqrt{\sin^2 \theta'_s + \sin^2 \theta'_i - 2 \sin \theta'_s \sin \theta'_i \cos(\varphi'_s - \varphi'_i)}$$

ثم تدخل المعادلات من (68) إلى (71) في المعادلة (72) لحساب معامل الانتثار المشتت بمحطتين عند سطح البحر الناتج عن الاضطراب الصغير (موجة شعرية قصيرة):

$$(72) \quad \gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = C \sum_{m=1}^{64} \sum_{t=1}^{64} \gamma_{pq}^{cap}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \mathcal{U}(S_{u,t}, \theta_i) P(S_{u,t}, S_{c,m}) w_{u,t} w_{c,m}$$

في المعادلة (72)، يشير $w_{c,m}$ و $w_{u,t}$ إلى وزني التوزيع الغوسي المبينين في القسم 3 من ملحق التوصية ITU-R P.1144-11. والعامل C هو مقدار ثابت يتم حسابه من خلال المعادلة التالية:

$$(73) \quad C = \frac{1}{4} \{ (S_{u,max} - S_{u,min}) (S_{c,max} - S_{c,min}) \}$$

8 جمع مكونات معامل الانتثار بمحطتين عند سطح البحر

يتم جمع المكون المتناسك (11) والمكونين المشتتين (32) و(72) لمعاملات الانتثار بمحطتين عند سطح البحر واستعمال هذه المكونات لاستكشاف خصائص هذه المعاملات في اتجاه الانتثار الخلفي والاتجاه الأمامي (المراوي).

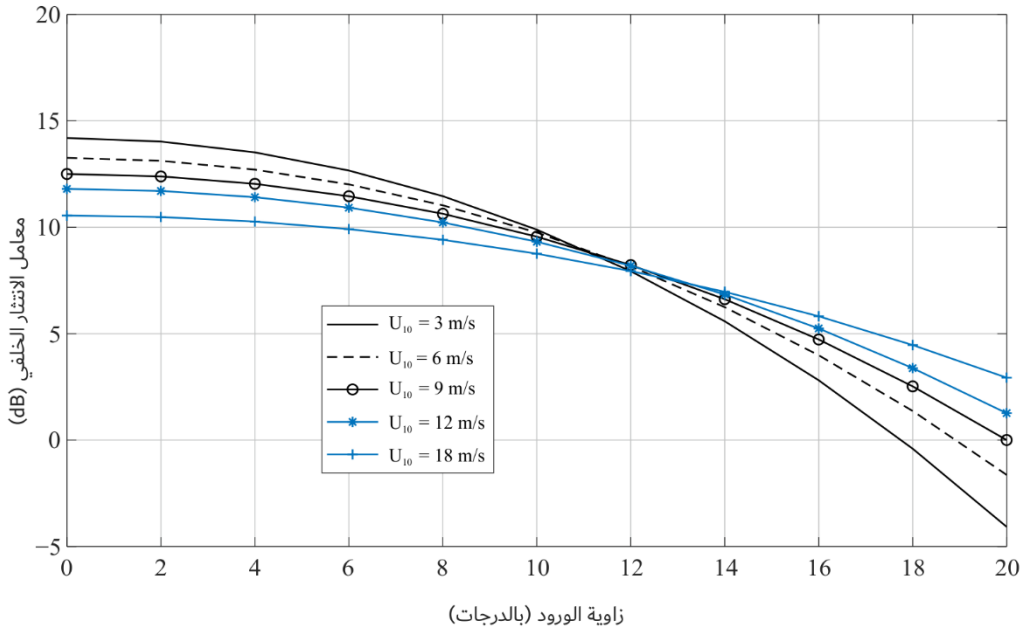
$$(74) \quad \gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \gamma_{pq}^p(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$$

1.8 معاملات الانتثار الخلفي (backscattering) عند سطح البحر

معاملات الانتثار الخلفي عند سطح البحر مهمة، خاصة لمجتمعات الاستشعار النشط عن بُعد. ولا تحتوي هذه المعاملات على أي مكون متناسك، ويمكن حسابها بجمع المعادلتين (32) و(72) من خلال وضع $\hat{k}_s = -\hat{k}_i$ (أي $\theta_s = \theta_i$ و $\varphi_s = \pi + \varphi_i$). وتوضح الأشكال من 5 إلى 8 اعتماد معاملات الانتثار الخلفي عند سطح البحر على زاوية الورود والاستقطاب وسرعة الرياح واتجاهها.

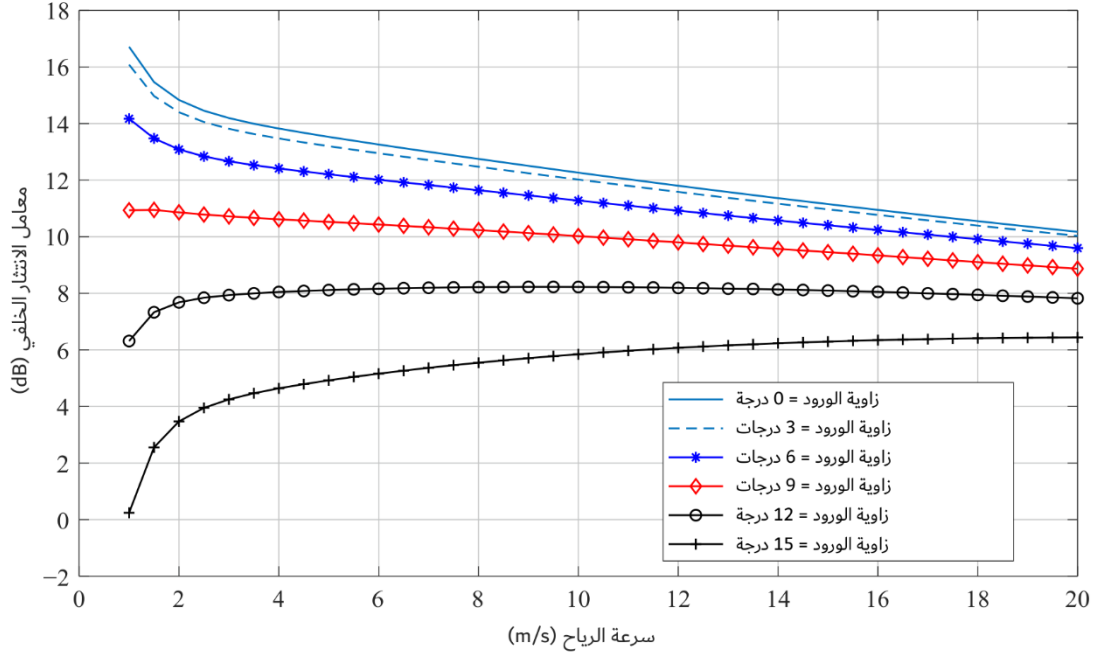
الشكل 5

معاملات الانتثار الخلفي على طول الاتجاه عكس اتجاه الرياح كدالة في زاوية الورود عند قيم مختلفة لسرعة الرياح (التردد = 13,6 GHz، $\Omega = 0,84$ ، درجة الحرارة = 30 درجة مئوية، الملوحة = 35 ppt)



الشكل 6

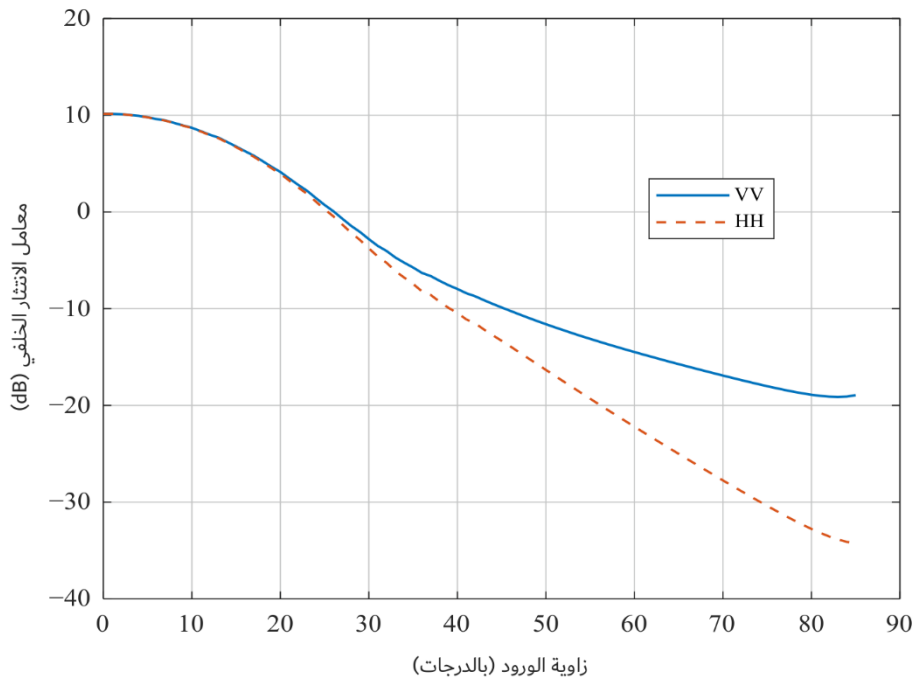
معاملات الانتشار الخلفي كدالة في سرعة الرياح عند قيم مختلفة لزاوية الورود
(التردد = 13,6 GHz، $\Omega = 0,84$ ، درجة الحرارة = 30 درجة مئوية، الملوحة = 35 ppt)



P.2146-06

الشكل 7

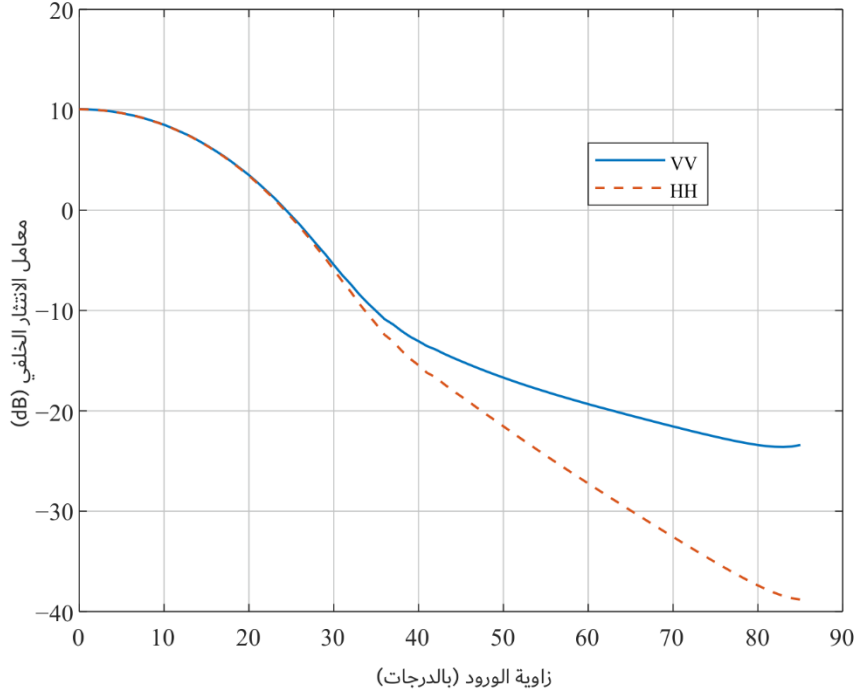
معاملات الانتشار الخلفي في الاتجاه عكس اتجاه الريح كدالة في زاوية الورود
(التردد = 18,6 GHz، $\Omega = 0,84$ ، درجة الحرارة = 30 درجة مئوية، $U_{10} = 18$ m/s، الملوحة = 35 ppt)



P.2146-07

الشكل 8

معاملات الانتثار الخلفي في الاتجاه المتعامد مع اتجاه الرياح كدالة في زاوية الورد
(التردد = 18,6 GHz، $\Omega = 0,84$ ، درجة الحرارة = 30 درجة مئوية، $U_{10} = 18$ m/s، الملوحة = 35 ppt)



P.2146-08

2.8 معاملات الانتثار بمحطتين عند سطح البحر في الاتجاه الأمامي

يمكن استخدام معاملات الانتثار بمحطتين عند سطح البحر في الاتجاه الأمامي من أجل تقييم قدرة التداخل التي يستقبلها أي هوائي استقبال. ويمكن أيضاً استخدام معاملات الانتثار بمحطتين عند سطح البحر هذه لحساب عمق الخبو الناتج عن انعكاسات سطح البحر في التوصية ITU-R P.680-3. ويمكن حسابها من خلال جمع المكون المتماسك (11) والمكونين المشتتين. والمكون المتماسك موجود فقط على طول اتجاه الانعكاس المرآوي ($\theta_s = \theta_i$, $\varphi_s = \varphi_i$). ويحدد المكون المشتت في المعادلتين (32) و(72) بوضع $\theta_s = \theta_i \wedge \varphi_s = \varphi_i$.

وتتضمن الأشكال من 9 إلى 14 أمثلة لمعاملات الانتثار بمحطتين في الاتجاه الأمامي. ويحتوي الشكلان 9 و10 على قيمة ثابتة لزاوية الانتثار (زاوية رصد الاستقبال) وقيماً متغيرة لزاوية الورد (اتجاه الإشارات المسببة للتداخل). وأجريت حسابات الشكل 9 عند التردد 1,2276 GHz (التردد L2 للنظام العالمي لتحديد الموقع (GPS))، وحسابات الشكل 10 عند التردد 18,6 GHz. وفي كل شكل، تُحسب معاملات الانتثار بمحطتين عند سرعتين مختلفتين للرياح: $U_{10} = 2$ m/s و $U_{10} = 25$ m/s.

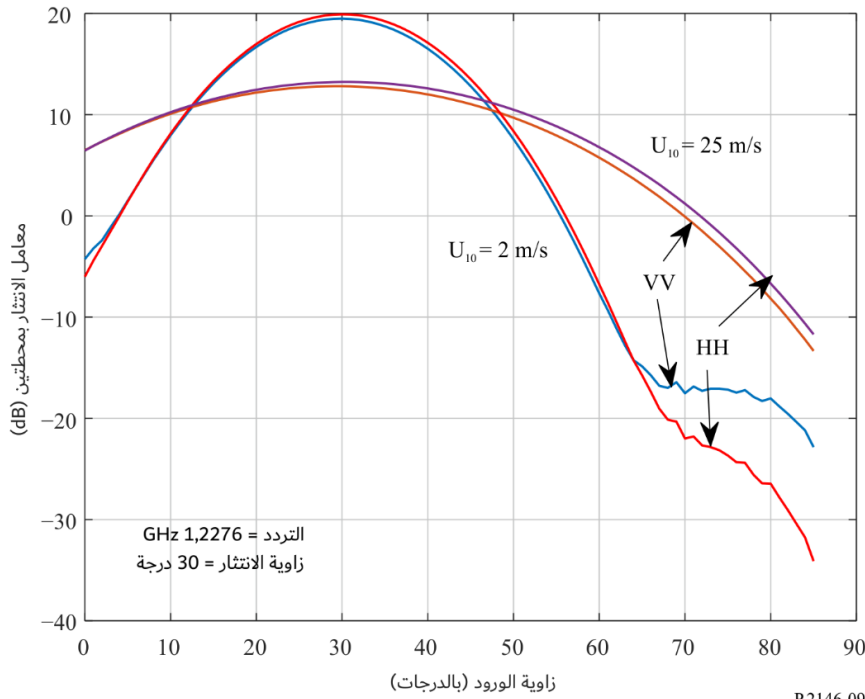
وتحتوي الأشكال من 11 إلى 14 على قيمة ثابتة لزاوية الورد (زاوية مصدر التداخل) وقيماً متغيرة لزاوية الانتثار. وأجريت حسابات الشكلين 11 و13 عند التردد 1,2276 GHz، وحسابات الشكلين 12 و14 عند التردد 18,6 GHz. وأجريت حسابات الشكلين 11 و12 عند درجة حرارة لسطح البحر تساوي 30 درجة مئوية. وأجريت حسابات الشكلين 13 و14 عند درجة حرارة لسطح البحر تساوي 5 درجات مئوية. وعلاوة على ذلك، تُحسب معاملات الانتثار بمحطتين، في كل شكل من الأشكال من 11 إلى 14، عند سرعتين مختلفتين للرياح: $U_{10} = 2$ m/s و $U_{10} = 25$ m/s.

ونظراً للتبادلية، يؤدي تثبيت زاوية الورد أو زاوية الانتثار إلى نتائج مماثلة. وبناء على ذلك، تختلف القيمة الثابتة لزاوية الانتثار في الشكلين 8 و9 عن القيمة الثابتة لزاوية الورد في الأشكال من 11 إلى 14.

ويتبين من مقارنة الشكل 11 مع الشكل 13 ومقارنة الشكل 12 مع الشكل 14 أن درجة الحرارة لا تؤثر بشكل ملحوظ على معامل الانتثار بمحطتين، فيما يتعلق بدرجات الحرارة أعلى من درجة التجمد.

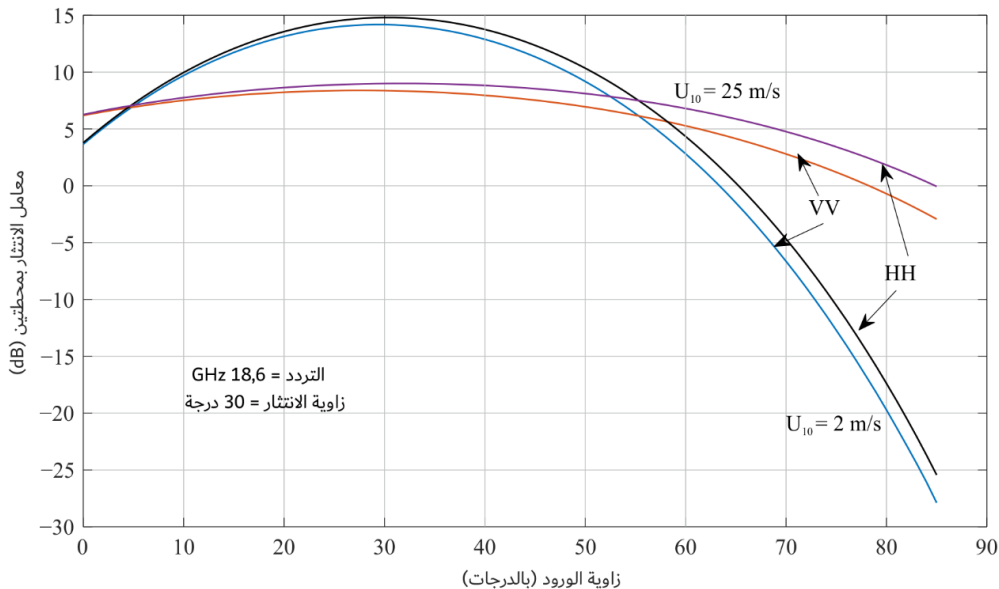
الشكل 9

معاملات الانتثار الأمامي بمحطتين كدالة في زاوية الورود عند قيم مختلفة لسرعة الرياح
($\theta_s = 30$ درجة، التردد = 1,2276 GHz، $\Omega = 0,84$ ، درجة الحرارة = 30 درجة مئوية، الملوحة = 35 ppt)



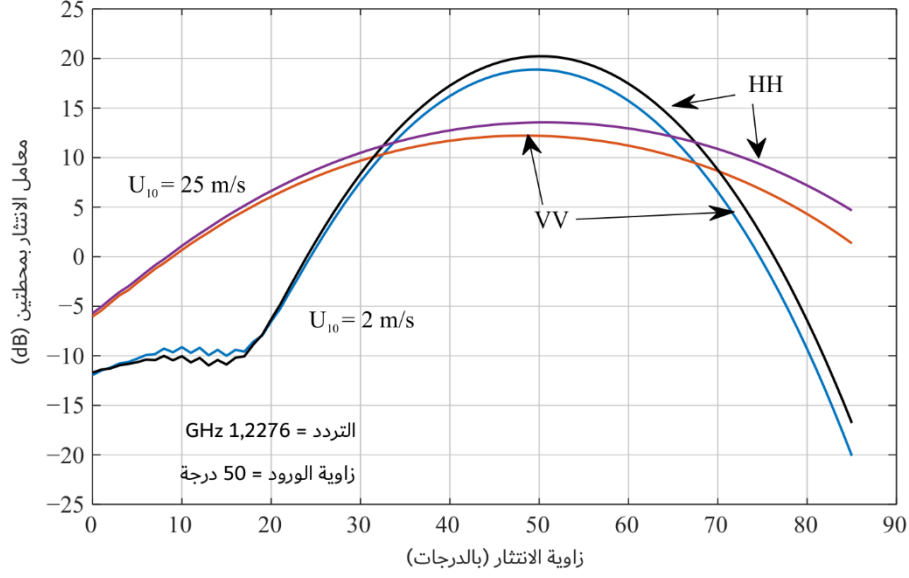
الشكل 10

معاملات الانتثار الأمامي بمحطتين كدالة في زاوية الورود عند قيم مختلفة لسرعة الرياح
($\theta_s = 30$ درجة، التردد = 18,6 GHz، $\Omega = 0,84$ ، درجة الحرارة = 30 درجة مئوية، الملوحة = 35 ppt)



الشكل 11

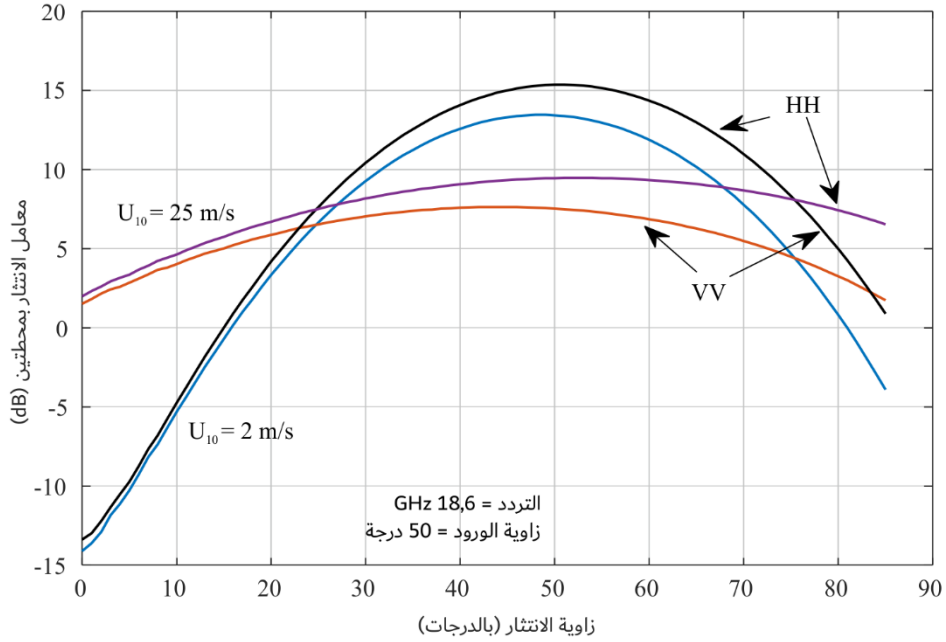
معاملات الانتثار الأمامي بمحطتين كدالة في زاوية الانتثار عند قيم مختلفة لسرعة الرياح
($\theta_i = 50$ درجة، التردد = 1,2276 GHz، $\Omega = 0,84$ ، درجة الحرارة = 30 درجة مئوية، الملوحة = 35 ppt)



P.2146-11

الشكل 12

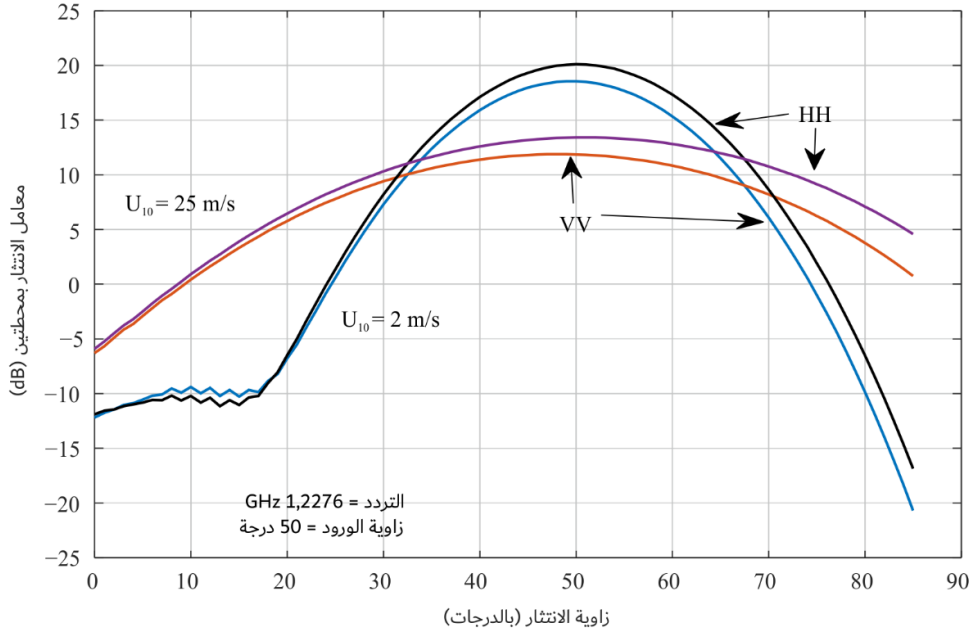
معاملات الانتثار الأمامي بمحطتين كدالة في زاوية الانتثار عند قيم مختلفة لسرعة الرياح
($\theta_i = 50$ درجة، التردد = 18,6 GHz، $\Omega = 0,84$ ، درجة الحرارة = 30 درجة مئوية، الملوحة = 35 ppt)



P.2146-12

الشكل 13

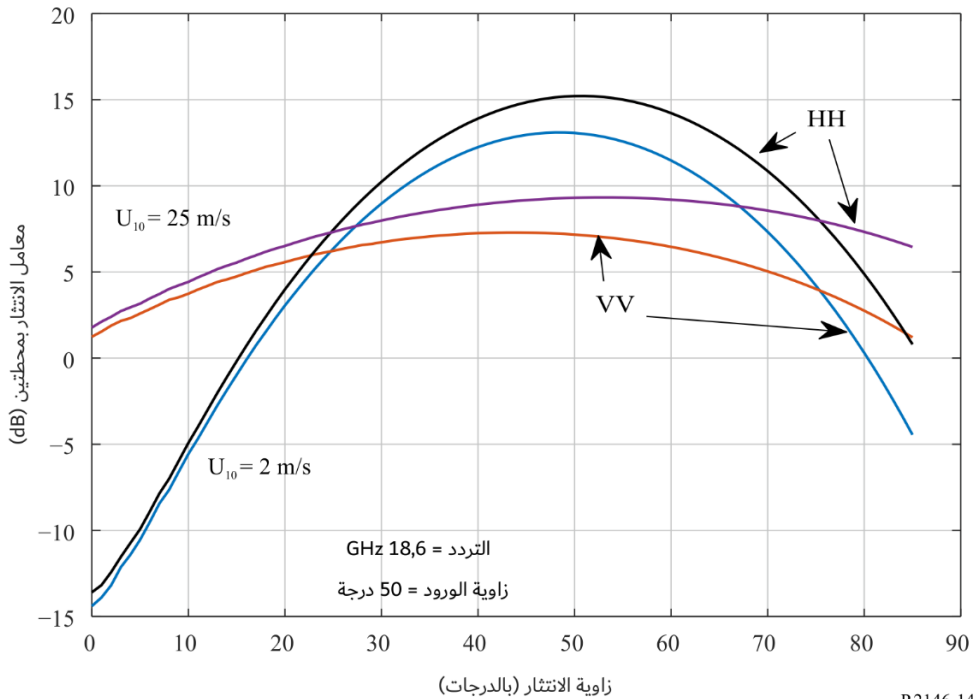
معاملات الانتثار الأمامي بمحطتين كدالة في زاوية الانتثار عند قيم مختلفة لسرعة الرياح
($\theta_i = 50$ درجة، التردد = 1,2276 GHz، $\Omega = 0,84$ ، درجة الحرارة = 5 درجات مئوية، الملوحة = 35 ppt)



P.2146-13

الشكل 14

معاملات الانتثار الأمامي بمحطتين كدالة في زاوية الانتثار عند قيم مختلفة لسرعة الرياح
($\theta_i = 50$ درجة، التردد = 18,6 GHz، $\Omega = 0,84$ ، درجة الحرارة = 5 درجات مئوية، الملوحة = 35 ppt)



P.2146-14

المرفق A بالملاحق

حساب معاملات الانتثار بين موجة مستقطبة دائرياً وموجة مستقطبة خطياً

يوفر هذا المرفق حسابات معاملات الانتثار بمحطتين بين أ) موجة واردة مستقطبة دائرياً وموجة منتشرة مستقطبة خطياً (أي γ_{qc})، حيث تشير c إما إلى الاستقطاب الدائري الميامن، R ، أو الاستقطاب الدائري المياسر، L ، وتشير q إما إلى الاستقطاب الرأسي، v ، أو الاستقطاب الأفقي، h)، ب) موجة واردة مستقطبة خطياً وموجة منتشرة مستقطبة دائرياً (أي γ_{cq})، حيث تشير q إما إلى الاستقطاب الرأسي، v ، أو الاستقطاب الأفقي، h ، وتشير c إما إلى الاستقطاب الدائري الميامن، R ، أو الاستقطاب الدائري المياسر، L).

1.A قدرة موجة واردة مستقطبة دائرياً إلى قدرة موجة منتشرة مستقطبة خطياً

في هذه الحالة، يمكن الحصول على المكونات المتماثلة لمعامل الانتثار بمحطتين $\gamma_{pc}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ الناتجة عن سطح البحر من المعادلة (11) من خلال إحلال $r_{pc}(\theta_i)$ محل $r_{pp}(\theta_i)$ ، مع

$$(a.1) \quad r_{vR}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i)$$

$$(a.2) \quad r_{hR}(\theta_i) = \frac{-j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i)$$

$$(a.3) \quad r_{vL}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i)$$

$$(a.4) \quad r_{hL}(\theta_i) = \frac{j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i)$$

$$j = \sqrt{-1}$$

ويمكن الحصول على معامل الانتثار بمحطتين $\gamma_{pc}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ الناتج عن الموجة الثقالية الطويلة من المعادلة (32) من خلال إحلال عوامل الاستقطاب $U_{pc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ محل عوامل الاستقطاب $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ ، مع:

$$(a.5) \quad U_{vR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

$$(a.6) \quad U_{hR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

$$(a.7) \quad U_{vL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

$$(a.8) \quad U_{hL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

ويمكن الحصول على معامل الانتثار بمحطتين $\gamma_{pc}^{sh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ الناتج عن الموجة الشعيرية القصيرة من المعادلة (72) من خلال إحلال عوامل الاستقطاب $G_{pc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ محل عوامل الاستقطاب $G_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ في المعادلة (70)، مع:

$$(a.9) \quad G_{vR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

$$(a.10) \quad G_{hR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

$$(a.11) \quad G_{vL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

$$(a.12) \quad G_{hL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

2.A قدرة موجة واردة مستقطبة خطياً إلى قدرة موجة منتشرة مستقطبة دائرياً

في هذه الحالة، يمكن الحصول على المكونات المتماسكة لمعامل الانتثار بمحطتين $\gamma_{cq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ الناتجة عن سطح البحر من المعادلة (11) من خلال إحلال $r_{cq}(\theta_i)$ محل $r_{pp}(\theta_i)$ ، مع:

$$(a.13) \quad r_{Rv}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i)$$

$$(a.14) \quad r_{Lv}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i)$$

$$(a.15) \quad r_{Rh}(\theta_i) = \frac{j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i)$$

$$(a.16) \quad r_{Lh}(\theta_i) = \frac{-j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i)$$

ويمكن الحصول على معامل الانتثار بمحطتين $\gamma_{cq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ الناتج عن الموجة الثقالية الطويلة من المعادلة (32) من خلال إحلال $U_{cq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ محل $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ ، مع:

$$(a.17) \quad U_{Rv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

$$(a.18) \quad U_{Lv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

$$(a.19) \quad U_{Rh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

$$(a.20) \quad U_{Lh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

ويمكن الحصول على معامل الانتثار بمحطتين $\gamma_{cq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ الناتج عن الموجة الشعرية القصيرة من المعادلة (72) من خلال إحلال $G_{cq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ محل $G_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ في المعادلة (70)، مع:

$$(a.21) \quad G_{Rv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

$$(a.22) \quad G_{Lv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

$$(a.23) \quad G_{Rh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

$$(a.24) \quad G_{Lh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\}$$

المرفق B

بالملاحق

حساب معاملات الانتثار بين موجتين مستقطبتين دائرياً

يوفر هذا المرفق حسابات معاملات الانتثار بمحطتين بين موجة واردة مستقطبة دائرياً وموجة منتشرة مستقطبة دائرياً (أي γ_{pq})، حيث تشير P إما إلى الاستقطاب الدائري الميامن، R ، أو الاستقطاب الدائري المياسر، L ، وتشير Q إما إلى الاستقطاب الدائري الميامن، R ، أو الاستقطاب الدائري المياسر، L .

ويمكن الحصول على المكونات المتماسكة لمعامل الانتثار بمحطتين $\gamma_{cc}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ الناتجة عن سطح البحر من المعادلة (11) من خلال إحلال $r_{pq}(\theta_i)$ محل $r_{pp}(\theta_i)$ ، مع:

$$(b.1) \quad r_{RR}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{ r_{vv}(\theta_i) + r_{hh}(\theta_i) \}$$

$$(b.2) \quad r_{RL}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{ r_{vv}(\theta_i) - r_{hh}(\theta_i) \}$$

$$(b.3) \quad r_{LR}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{ r_{vv}(\theta_i) - r_{hh}(\theta_i) \}$$

$$(b.4) \quad r_{LL}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{ r_{vv}(\theta_i) + r_{hh}(\theta_i) \}$$

ويمكن الحصول على معامل الانتثار بمحطتين $\gamma_{PQ}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ الناتج عن الموجة الثقالية الطويلة من المعادلة (32) من خلال إحلال $U_{cc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ محل $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ ، مع:

$$(b.5) \quad U_{RR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{ U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j (U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)) \}$$

$$(b.6) \quad U_{RL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{ U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j (U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)) \}$$

$$(b.7) \quad U_{LR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{ U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j (U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)) \}$$

$$(b.8) \quad U_{LL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{ U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j (U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)) \}$$

ويمكن الحصول على معامل الانتثار بمحطتين $\gamma_{PQ}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ الناتج عن الموجة الشعرية القصيرة من المعادلة (72) من خلال إحلال $G_{cc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ محل $G_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ في المعادلة (70)، مع:

$$(b.9) \quad G_{RR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j (G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)) \}$$

$$(b.10) \quad G_{RL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j (G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)) \}$$

$$(b.11) \quad G_{LR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j (G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)) \}$$

$$(b.12) \quad G_{LL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j (G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)) \}$$

المرفق C بالملاحق

تقريبات بسيطة

بالنسبة لزوايا الورد θ_i وزوايا الانتثار θ_s أقل من 60 درجة، وبالنسبة لزوايا السمات للانتثار φ_s ضمن مدى ± 5 درجات من مستوي الانتثار الأمامي ($\varphi_s = \varphi_i = 0^\circ$)، يمكن إهمال الحدود ذات الاستقطاب المتقاطع في المعادلات من (a.5) إلى (a.24) ما يؤدي إلى التبسيطات المذكورة أدناه. وينتج عن القيام بذلك خطأ أقل من 5%. ويكون الخطأ مهملاً داخل مستوي الانتثار الأمامي ($\varphi_s = \varphi_i = 0^\circ$)، بالنسبة لزوايا الورد وزوايا الانتثار المشار إليها أعلاه.

$\gamma_{vR} = \frac{1}{2} \gamma_{vv}$	قدرة الموجة الواردة ذات الاستقطاب الدائري الميامن وقدرة الموجة المنتشرة ذات الاستقطاب الرأسي
$\gamma_{hR} = \frac{1}{2} \gamma_{hh}$	قدرة الموجة الواردة ذات الاستقطاب الدائري الميامن وقدرة الموجة المنتشرة ذات الاستقطاب الأفقي

$\gamma_{vL} = \frac{1}{2}\gamma_{vv}$	قدرة الموجة الواردة ذات الاستقطاب الدائري المياسر وقدرة الموجة المنتشرة ذات الاستقطاب الرأسى
$\gamma_{hL} = \frac{1}{2}\gamma_{hh}$	قدرة الموجة الواردة ذات الاستقطاب الدائري المياسر وقدرة الموجة المنتشرة ذات الاستقطاب الأفقى
$\gamma_{Rv} = \frac{1}{2}\gamma_{vv}$	قدرة الموجة الواردة ذات الاستقطاب الرأسى وقدرة الموجة المنتشرة ذات الاستقطاب الدائري الميامن
$\gamma_{Rh} = \frac{1}{2}\gamma_{hh}$	قدرة الموجة الواردة ذات الاستقطاب الأفقى وقدرة الموجة المنتشرة ذات الاستقطاب الدائري الميامن
$\gamma_{Lv} = \frac{1}{2}\gamma_{vv}$	قدرة الموجة الواردة ذات الاستقطاب الرأسى وقدرة الموجة المنتشرة ذات الاستقطاب الدائري المياسر
$\gamma_{Lh} = \frac{1}{2}\gamma_{hh}$	قدرة الموجة الواردة ذات الاستقطاب الأفقى وقدرة الموجة المنتشرة ذات الاستقطاب الدائري المياسر

المرفق D بالملاحق

نموذج أطياف ارتفاع سطح البحر

ينقسم طيف ارتفاع سطح البحر إلى طيفين: طيف واسع (ثقالي) وطيف صغير (شعري)، ويشار إليهما بالرمزين $W_l(\kappa, \psi)$ و $W_s(\kappa, \psi)$ ، على التوالي. ويشار إلى الطيف الواسع لأغراض مرجعية، ولكن ليست هناك حاجة مباشرة إليه. ويرتبط الطيف الصغير بالطيف الاتجاهى لسطح البحر، $W(\kappa, \psi)$ ، على النحو التالي:

$$(d.1) \quad W_s(\kappa, \psi) = \begin{cases} 0 & \text{if } \kappa < \kappa_d \\ W(\kappa, \psi) & \text{otherwise} \end{cases}$$

حيث يشير κ_d إلى العدد الموجي للارتفاع القاطع بمقياسين، وتشير (κ, ψ) إلى الإحداثيات القطبية للأعداد الموجية للارتفاع في الاتجاهين عكس اتجاه الرياح والمتعامد مع اتجاه الرياح المرتبطين بالإحداثيات الديكارتية لقيمتي ميل السطح (S_u, S_c) . ويصاغ الطيف الاتجاهى $W(\kappa, \psi)$ على النحو التالي:

$$(d.2) \quad W(\kappa, \psi) = \kappa^{-1} S(\kappa) \varphi(\kappa, \psi)$$

حيث تشير $S(\kappa)$ إلى دالة الطيف المتناحي (شامل الاتجاهات)، وتشير $\varphi(\kappa, \psi)$ إلى دالة الانشار الزاوي. ويُحسب الطيف المتناحي، $S(\kappa)$ ، من خلال المعادلة التالية:

$$(d.3) \quad S(\kappa) = \left(\frac{B_l + B_h}{\kappa^3} \right) G^{\gamma} \exp \left\{ -1.25 \left(\frac{\kappa_p}{\kappa} \right)^2 \right\}$$

ويشير B_l إلى طيف الموجة بالنسبة للموجات الثقالية الطويلة:

$$(d.4) \quad B_l = 0.003 \Omega^{0.5} \frac{U_{10}}{\Omega C(\kappa)} \exp \left\{ \frac{-\Omega}{\sqrt{10}} (\sqrt{\kappa/\kappa_p} - 1) \right\}$$

$$(d.5) \quad G = \begin{cases} 1.7 & \text{if } \Omega < 1 \\ 1.7 + 6.0 \log_e(\Omega) & \text{if } 1 \leq \Omega < 5 \\ 2.7\Omega^{0.57} & \text{if } \Omega \geq 5 \end{cases}$$

$$(d.6) \quad \gamma = \exp \left\{ -(\sqrt{\kappa/\kappa_p} - 1)^2 / 2 \xi^2 \right\}$$

$$(d.7) \quad \xi = \begin{cases} 0.08(1 + 4\Omega^{-3}) & \text{if } \Omega < 5 \\ 0.16 & \text{if } \Omega \geq 5 \end{cases}$$

$$(d.8) \quad C(\kappa) = \sqrt{g \{1 + (\kappa/\kappa_m)^2\}} / \kappa$$

$$(d.9) \quad \kappa_p = g \left\{ \frac{\Omega}{U_{10}} \right\}^2, \quad g = 9.81, \quad \kappa_m = 364.52$$

ويشير B_h إلى طيف الموجة بالنسبة للموجات الشعيرية القصيرة:

$$(d.10) \quad B_h = 0.5\alpha_m \left(\frac{0.232}{C(\kappa)} \right) \exp \left\{ -0.25 \left(\frac{\kappa}{\kappa_m} - 1 \right)^2 \right\}$$

$$(d.11) \quad \alpha_m = 0.014(u/0.232)$$

$$(d.12) \quad u = U_{10} \sqrt{0.001(0.81 + 0.065U_{10})}$$

ويشير Ω إلى مقلوب عمر الموجة. ويعتبر البحر:

- كامل النمو إذا كانت قيم Ω قريبة من 0,84
- ناضجاً إذا كانت قيم Ω قريبة من 1
- ناشئاً إذا كانت قيم Ω أكبر من 2.

وتشير U_{10} إلى سرعة الرياح (عادة بين 3 m/s و 33 m/s) على ارتفاع 10 أمتار فوق سطح البحر، وتشير u إلى سرعة الاحتكاك (أي سرعة الرياح عند سطح البحر). وتشير γ في المعادلة (d.3) إلى توتر سطح الماء، وتشير g في المعادلة (d.5) إلى تسارع الماء نتيجة الجاذبية بوحدات m/s^2 .

وتبين دالة الانتشار الزاوي $\varphi(\kappa, \psi)$ في المعادلة (d.2) اعتماد الطيف الاتجاهي $W(\kappa, \psi)$ على السمات على النحو التالي:

$$(d.13) \quad \varphi(\kappa, \psi) = \frac{1}{2\pi} \{1 + \Delta(\kappa) \cos(2\psi)\}$$

حيث تقابل ψ الاتجاه عكس اتجاه الرياح، وتشير $\Delta(\kappa)$ إلى تغير الاتساع بتغير الزاوية:

$$(d.14) \quad \Delta(\kappa) = \tanh \left\{ \frac{\log_e(2)}{4} + 4 \left(\frac{\Omega C(\kappa)}{U_{10}} \right)^{2.5} + \frac{0.13u}{0.232} \left(\frac{0.232}{C(\kappa)} \right)^{2.5} \right\}$$

ويلاحظ أن $C(\kappa)$ في المعادلة (d.4) تتؤول إلى ما لا نهاية (∞) عندما تتؤول κ إلى الصفر. ومع ذلك، عندما تتؤول κ إلى الصفر، تتؤول $S(\kappa)$ أيضاً إلى الصفر. ونتيجة لذلك، في حالة $\kappa = 0$ ، تُضبط $S(\kappa) = 0$ دون إجراء مزيد من الحسابات.

المرفق E بالملاحق

قدرة تداخل إشارة منعكسة من سطح البحر نحو مستقبل

1.E مقدمة

القدرة المنتشرة بمحطتين P_{rp} من سطح البحر التي يستقبلها هوائي استقبال باستقطاب خطي p هي مجموع مكونين: مكون متماسك P_{cp} ، ومكون مشتت (غير متماسك) P_{dp} .

$$(e.1) \quad P_{rp} = P_{cp} + P_{dp}$$

وتوفر الأقسام التالية حسابات القدرة المستقبلية فيما يتعلق بما يلي: (أ) الحالة العامة، (ب) التقريبات في الحالة المحددة المتمثلة في مرسل في مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض (GEO) ومستقبل في مدار أرضي منخفض (LEO).

2.E القدرة المستقبلية المتناسكة

بالنسبة للاستقطابات الخطية للمرسل (الواردة) والمستقبل (المنتشرة) المتماثلة، p ، فإن القدرة المتناسكة المستقبلية، P_{cp} (W)، هي:

$$(e.2) \quad P_{cp} = \frac{P_{tp} G_{tp} L_{tp}}{4\pi(R_t + R_r)^2} \frac{\lambda^2 G_{rp} L_{rp} L_d}{4\pi} \gamma_{pp}^c \quad (W)$$

حيث:

P_{tp} : القدرة المرسل بالاستقطاب P_{cp} (W)

G_{tp} : كسب هوائي الإرسال في اتجاه نقطة الانعكاس على سطح الأرض (خطي)

R_t : المدى بين المرسل ونقطة الانعكاس المرآوي على سطح الأرض (m)

R_r : المدى بين نقطة الانعكاس المرآوي على سطح الأرض وهوائي الاستقبال (m)

G_{rp} : كسب هوائي الاستقبال في اتجاه نقطة الانعكاس المرآوي على سطح الأرض (خطي)

L_{tp} : الخسارة الجوية (مثل التوهين الغازي) على طول المسير من مصدر التداخل إلى نقطة الانعكاس المرآوي. ويمكن

حساب التوهين الغازي، A_{gas} (dB)، باستخدام الملحق 1 أو الملحق 2 للتوصية ITU-R P.676-12، حيث $L_{tp} = 10^{-A_{gas}/10}$

L_{rp} : الخسارة الجوية (مثل التوهين الغازي) على طول المسير من نقطة الانعكاس المرآوي إلى هوائي الاستقبال. ويمكن

حساب التوهين الغازي، A_{gas} (dB)، باستخدام الملحق 1 أو الملحق 2 للتوصية ITU-R P.676-12، حيث $L_{rp} = 10^{-A_{gas}/10}$

λ : طول الموجة (m)

L_d : خسارة التباعد الناجمة عن انحناء الأرض، وتُحسب من خلال المعادلة التالية:

$$(e.3) \quad L_d = \frac{1}{\left[\left(1 + \frac{2R_e}{a \cos \theta} \right) \left(1 + \frac{2R_e \cos \theta}{a} \right) \right]}$$

حيث:

a : نصف القطر المتوسط للأرض (6 371 000 m)

R_e : المدى الفعلي $R_e = \frac{R_t R_r}{R_t + R_r}$ (m)

θ : زاوية السمات الواردة.

1.2.E مرسل في مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض (GEO) ومستقبل في مدار أرضي منخفض (LEO): المكون المتناسك

بالنسبة للمكون المنعكس المرآوي، $R_t + R_r$ هو المدى الإجمالي، و $4\pi(R_t + R_r)^2$ هي خسارة الانتشار. و $P_{tp}G_{tp}$ هي القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.). وبالنسبة لمرسل في مدار GEO ومستقبل في مدار LEO، يُدخل التقريب $R_t + R_r \cong R_t$ خطأً بنسبة ضئيلة في الحد المتناسك. وفي هذه الحالة، تصبح المعادلة (e.2) كالتالي:

$$(e.4) \quad P_{cp} = \frac{P_{tp}G_{tp}L_{tp}}{(4\pi R_t)^2} \lambda^2 G_{rp} L_{rp} L_d \gamma_{pp}^c (W)$$

γ_{pp}^c هو معامل الانتثار بمحطتين المتناسك المحسوب من خلال المعادلة (11) فيما يتعلق بالموجات الواردة المستقطبة خطياً والموجات المنتشرة المستقطبة خطياً. ويمكن استخدام تحويلات الاستقطاب المقابلة الواردة في المرفقات A و B و C في أزواج الاستقطاب الواردة والمنتشرة الأخرى.

3.E القدرة المستقبلية المشتتة

يمكن حساب القدرة المستقبلية المشتتة، $P_{dp}(W)$ ، باستخدام المعادلة التقليدية لرادار بمحطتين (مثل المعادلة (73) في التوصية ITU-R P.452-16). والقدرة المنتشرة المشتتة التي يستقبلها هوائي باستقطاب p واستقطاب المرسل q هي:

$$(e.5) \quad P_{dp} = P_{tq} \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \iint \frac{G_{rp}(\hat{k}_i)G_{tq}(\hat{k}_s)}{r_t^2 r_r^2} L_{tq}(\hat{k}_i) \gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \cos \theta_s L_{rp}(\hat{k}_s) dA (W)$$

حيث:

P_{tq} : قدرة الإرسال بالاستقطاب q (W)

\hat{k}_i : الاتجاه الوارد في منطقة الانتثار التفاضلية

\hat{k}_s : الاتجاه المنتشر في منطقة الانتثار التفاضلية

$G_{rp}(\hat{k}_i)$: كسب هوائي الإرسال في الاتجاه الوارد \hat{k}_i (خطي)

$G_{tq}(\hat{k}_s)$: كسب هوائي الاستقبال في اتجاه الاستقبال \hat{k}_s (خطي)

dA : منطقة الانتثار التفاضلية داخل السطح (m^2)

r_t : المدى بين المرسل ومنطقة الانتثار التفاضلية على سطح الأرض (m)

r_r : المدى بين منطقة الانتثار التفاضلية على سطح الأرض والمستقبل (m)

1.3.E مرسل في مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض (GEO) ومستقبل في مدار أرضي منخفض (LEO): المكون المشتت

يُفترض في التقريب التالي أن كسب هوائي الإرسال ثابت فوق المنطقة التي يغطيها هوائي الاستقبال (افتراض معقول بالنسبة لمرسل في مدار GEO ذي هوائي متوسط الكسب، ومستقبل في مدار LEO ذي هوائي عالي الكسب)، وأن المسافات من هوائي الإرسال إلى سطح الأرض ومن سطح الأرض إلى هوائي الاستقبال لا تتغير بشكل كبير فوق المنطقة التي يغطيها هوائي الاستقبال. وبالتالي، يمكن تقريب المعادلة (e.5) من خلال المعادلة التالية:

$$(e.6) \quad P_{dp} \cong \frac{P_{tq}G_{tq}\lambda^2 L_{tq}(\hat{k}_i)L_{rp}(\hat{k}_s)}{(4\pi R_t)^2} \gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_{s0}, \hat{k}_{i0})$$

حيث:

\hat{k}_{i0} : الاتجاه الوارد عند منطقة الانتثار التفاضلية على طول الحزمة الرئيسية لهوائي الإرسال

\hat{k}_{s0} : الاتجاه المنتشر عند منطقة الانتثار التفاضلية على طول الحزمة الرئيسية لهوائي الاستقبال

R_t : المدى بين المرسل ومركز المنطقة المغطاة، على سطح الأرض، المضاءة بهوائي الإرسال (m).

ويمكن استخدام تحويلات الاستقطاب الواردة في المرفقات A و B و C لحساب $\gamma_{pq}^{dif}(\vec{r}_{t0}, \vec{r}_{r0})$ بالنسبة للاستقطابات الواردة والاستقطابات المنتشرة الأخرى غير الاستقطابات الخطية-الخطية أو الدائرية-الدائرية.