

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R P.684-8
(2022/08)

**التنبؤ بشدة المجال عند
ترددات تحت 150 kHz تقريباً**

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)

يُرد 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

© ITU 2023

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

التوصية ITU-R P.684-8

التنبؤ بشدة المجال عند ترددات تحت 150 kHz تقريباً

(المسألة ITU-R 225/3)

(1990-1994-2001-2003-2005-2009-2012-2016-2022)

مجال التطبيق

تقدم هذه التوصية طريقتي الدليل الموجي والقفزات الموجية للتنبؤ بشدة المجال عند ترددات تحت 150 kHz تقريباً.

مصطلحات أساسية

الانتشار عبر طبقة الأيونوسفير، الموجات ذات التردد المنخفض للغاية، الموجات الميريامترية، الموجات الكيلومترية، مسير الشعاع، موجة أيونوسفيرية.

المختصرات/الأسماء المختصرة

زاوية الميل المقيسة بالنسبة للمستوي الأفقي (<i>the dip angle measured from the horizontal</i>)	co-dip
تردد منخفض للغاية (<i>extremely low frequency</i>)	ELF
تدفق شمسي على 10,5 cm (<i>the 10.5 cm solar flux</i>)	F10.5
تردد عال (موجات ديكامترية) (<i>high frequency</i>)	HF
تردد منخفض (موجات كيلومترية) (<i>low frequency</i>)	LF
تردد متوسط (موجات هكتومترية) (<i>medium frequency</i>)	MF
تردد منخفض جداً (موجات ميريامترية) (<i>very low frequency</i>)	VLF
أسلوب WKB (<i>Wentzel-Kramers-Brillouin</i>)	WKB

توصيات قطاع الاتصالات الراديوية ذات الصلة

التوصية ITU-R [P.368](#)التوصية ITU-R [P.832](#)التوصية ITU-R [P.1147](#)التوصية ITU-R [P.1239](#)

ملاحظة - ينبغي استخدام أحدث نسخة مراجعة/طبعة من التوصية/الكتيب.

إن جمعية الاتصالات الراديوية التابعة للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

(أ) أن من الضروري إعطاء توجيهات للمهندسين لتصميم خدمات الاتصالات الراديوية في نطاق التردد تحت 150 kHz تقريباً؛

- (ب) أن الطرائق التالية تم تطويرها:
- معالجة طريقة "القفزات" للترددات فوق حوالي 60 kHz القائمة على تحليل إحصائي لقياسات شدة المجال في نطاق الترددات المنحصرة بين 16 kHz و 1 000 kHz تقريباً؛
 - طريقة "أسلوب الدليل الموجي" للترددات تحت 60 kHz القائمة على نموذج نظري للأرض والأيونوسفير والتي تستعمل معلمات نماذج أيونوسفيرية مستنتجة من بيانات الانتشار؛
 - طريقة من أجل نطاق التردد 150-1 700 kHz يرد وصفها في التوصية [ITU-R P.1147](#)،

توصي

باستعمال الطرائق التالية مع إعطاء أهمية خاصة لحدود الدقة عند تطبيقها في بعض المناطق كما يرد في الملحق 2.

جدول المحتويات

الصفحة

1	مقدمة	3
2	نظرية الانتشار بالقفزات	3
1.2	وصف عام	3
2.2	حساب شدة المجال حسب طريقة مسير الأشعة	4
3.2	الطريقة الرقمية لحساب شدة المجال الناتجة وطوره	15
4.2	التنبؤ بمسيرات الانتشار التي تتجاوز 4 000 km	23
3	حساب شدة المجال بأساليب الأدلة الموجية: حل للموجة الكاملة	24
1.3	مصفوفة الانعكاس الأيونوسفيري $R(\theta)$	25
2.3	مصفوفة الانعكاس على الأرض، $\bar{R}(\theta)$	26
3.3	طريقة البحث عن الأساليب ("MODESRCH")	26
4	حساب شدة المجال	30
1.4	المعلومات الضرورية	30
2.4	مجموع الأسلوب WKB والمتجانس أفقياً	32
3.4	مجموع الأساليب التي تستعمل تحويل الأسلوب	33
4.4	معلومات الأيونوسفير	34
5.4	المعلومات المغنطيسية الأرضية والفيزيائية الأرضية	39
5	مناقشة	39
الملحق 1	- مثال عن حساب كامل للمجال (الاتساع والطور) بتطبيق طريقة الانتشار بالقفزات الواردة في الفقرة 2 ...	40
الملحق 2	- دقة الطرائق	41
الملحق 3	- أمثلة حسابات تستعمل طريقة أساليب الدليل الموجي	43

1 مقدمة

هناك طريقتان للقيام بحساب نظري لشدة مجال الإشارات في الموجات ELF و VLF و LF. ويلاحظ أن معطيات هذه التوصية تضم قيماً $f \cos i$ تتجاوز 150 Hz. ولا يوصى باستعمال هذه المعطيات لأغراض الترددات التي تزيد عن 150 kHz؛ فالتوصية ITU-R [P.1147](#) تتناول هذه الترددات بالدراسة.

1.1 طريقة "القفزات" وهي تلك التي يُستعمل فيها تمثيل هندسي لمسيرات الطاقة الكهرومغناطيسية بين مرسل ومستقبل معينين، كما هو الحال بالنسبة للموجات الديكامترية (HF).

يجب أن تُستعمل هذه الطريقة للموجات الكيلومترية (LF)، وبالنسبة للمسافات تحت 1 000 km للموجات الميريامترية (VLF). وتعتبر الطريقة أن الإرسال الراديوي يتم حسب مسيرات معينة محددة بواسطة انعكاس أيونوسفيري واحد أو أكثر، وفقاً على كون المسألة المعنية تنطوي على قفزة واحدة أو أكثر وكذلك على موجة أرضية. عندئذ يكون المجال الإجمالي هو الناتج المتجهي للمجالات الناتجة عن كل مسير. ونظراً لمدى أطوال الموجات موضوع الدراسة، يجب، على عكس حالة الموجات الديكامترية، أن يُؤخذ في الاعتبار انعراج الموجات على سطح الأرض. ويمكن أن تُبرر طريقة القفزات بكون أبعاد قسم الارتفاع الذي يتم فيه الانتشار مع زاوية ورود مائلة تساوي بعض أطوال الموجات أو أكبر منها.

من الضروري معرفة قيم المعاملات انعكاس الموجة الواردة إلى الأيونوسفير باستعمال هذه الطريقة. لكن هذه القيم تتغير كثيراً حسب التردد والطول والإحداثيات الجغرافية والمغناطيسية الأرضية لمسيرات الإرسال، والساعة والفصل وفترة الدورة الشمسية. ومن الضروري كذلك معرفة الخصائص الكهربائية (الإبصالية والسماحية) للأرض عند مواقع الإرسال والاستقبال، إذ إن سماحية الأرض تؤثر على التوزيع العمودي لإشعاعات هوائيات المطاريف.

2.1 يجب أن تُستعمل طريقة "أساليب الأدلة الموجية" في الموجات الميريامترية (VLF) عند المسافات الأكبر من 1 000 km. وفي هذه الطريقة، يحلل الانتشار على أنه مجموع الموجات المقابلة لكل من الأنماط المختلفة من الانتشار في الدليل الموجي أرض-أيونوسفير، بالتمثال مع أسلوب محدد للأدلة الموجية في الموجات الصغيرة. ويتوقف اختيار الطريقة التي يجب استعمالها لحساب المجال على اعتبارات عملية لحسابات رقمية.

3.1 في حالة الموجات الميريامترية (VLF)، في مسافات أقل من 1 000 km وبالنسبة للموجات الكيلومترية على العموم تتقارب سلسلة أساليب الأدلة الموجية ببطء وعندئذ تستوجب الحسابات القيام بإضافة متجهية لعدد كبير من المكونات. من جانب آخر، فإن طريقة القفزات لا تتطلب سوى عدد محدود من المسيرات، بما في ذلك الموجة الأرضية، ويتعين استعمالها مع مراعاة الانعراج إن أمكن ذلك وخاصة لانتشار الموجات الكيلومترية والهكومتريية في المسافات البعيدة.

أما بالنسبة للموجات الميريامترية عند المسافات الأكبر من 1 000 km، فإن نظرية القفزات تتطلب القيام بإضافة متجهية للمجالات الناتجة عن عدد كبير من المسيرات، وعلى عكس ذلك، وبما أن سلاسل الأساليب التي تكون تقاربية بسرعة، يمكن الحصول على دقة كافية بإضافة بعض الأساليب فقط. غير أنه في كثير من الحالات، يمكن لإجراء الحسابات بدقة كافية استعمال نموذج القفزات على المسافات الطويلة للترددات الأدنى من 10 kHz، ويمكن خفض عدد المسيرات التي يتعين أخذها في الاعتبار إلى ثلاثة مسيرات أو في حالات نادرة إلى أربعة مسيرات. ويمكن أيضاً وصف الانتشار عند الترددات المنخفضة للغاية وفقاً لأسلوب دليل موجي وحيد.

2 نظرية الانتشار بالقفزات

1.2 وصف عام

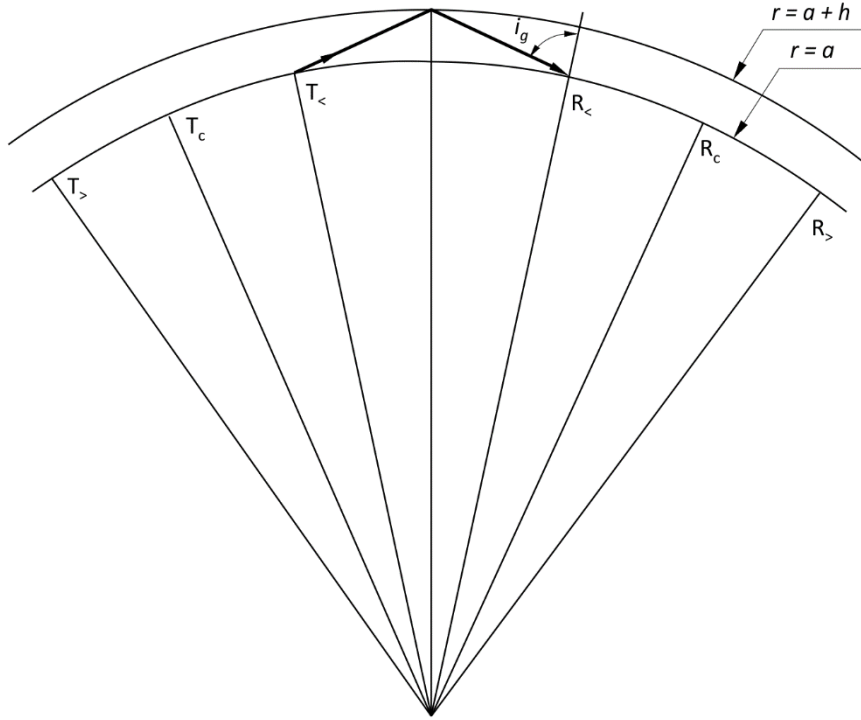
يُعتبر مجال الموجة الأيونوسفيرية عند نقطة ما (الشدة والطور) في هذه النظرية أنه ناتج المجالات المنبثقة عن مختلف الموجات التي انتشرت مباشرة من المرسل، بقفزة واحدة أو أكثر. عندئذ يكون المجال الإجمالي عند هذه النقطة ناتج المجال الناجم عن الموجة المنعرجة على سطح الأرض والمجال الناجم عن الموجة الأيونوسفيرية.

يتم حساب مجال الموجة الأيونوسفيرية بتطبيق نظرية الأشعة في المناطق التي تطبق فيها طرائق البصريات الهندسية وبإدماج آثار الانعراج أو بتطبيق نظرية المجال الكامل في المناطق حيث البصريات لم تعد صالحة. يمثل الشكل 1 هندسة مسير يتضمن قفزة وحيدة.

يحدد سطح الأرض بواسطة $a = r$ وطبقة عاكسة أيونوسفيرية منتظمة تقع عند $h + a = r$. ومن السهل التمييز بين ثلاث حالات. في الحالة الأولى، يكون هوائي الاستقبال الواقع عند R_c مضاءً بالموجة الأيونوسفيرية التي خضعت لانعكاس من هوائي الإرسال الواقع عند T_c حيث i_g أصغر من 90 درجة. وفي الحالة الثانية، يقع الهوائيان عند النقطتين الحرجتين T_c و R_c حيث $i_g = 90^\circ$. أما في الحالة الثالثة، فيقع الهوائيان عند T_c و R_c ، ما وراء النقطتين الحرجتين، بحيث أن مجال الموجة الأيونوسفيرية الأولى ينتشر في منطقة الانعراج (في منطقة الظل).

الشكل 1

هندسة مسير الشعاع في نظرية الانتشار الراديوية بالقفزات (القفزة الأولى للموجة الأيونوسفيرية)



P.0684-01

2.2 حساب شدة المجال حسب طريقة مسير الأشعة

يمكن التعبير عن شدة¹ القوة المحركة الموجية المرجعية التي يشعها ثنائي أقطاب كهربائي قصير بواسطة:

$$(1) \quad V_u = 300 \sqrt{p_t} \quad V$$

حيث p_t تدل على القدرة المشعة (kW).

تُعطى شدة مجال الموجة الأيونوسفيرية الهابطة، قبل الانعكاس على الأرض بجوار هوائي الاستقبال، بواسطة:

$$(2) \quad E_t = \frac{V_u}{L} \cos \psi \|R\| DF_t \quad \text{mV/m}$$

¹ القوة المحركة الموجية البالغة 300 V هي التي يمكن أن تعطي بمشعاع عمودي قصير، فوق أرض موصلة تماماً، باتجاه إشعاع أقصى قدره 1 kW.

حيث:

L: طول مسير الموجة الأيونوسفيرية (km)

||R||: معامل الانعكاس الأيونوسفيري الذي يعطي نسبة مكونات المجال الكهربائي الموازية إلى مستوي الورد

D: عامل التبئير الأيونوسفيري

F_t: عامل هوائي الإرسال

ψ: زاوية انطلاق ووصول الموجة الأيونوسفيرية على سطح الأرض بالنسبة للمستوي الأفقي

إذا كان الاستقبال بواسطة هوائي عروفي صغير في المستوي يقع على سطح الأرض، فإن شدة المجال الفعالة للموجة الأيونوسفيرية تُعطى بواسطة:

$$(3) \quad E_s = \frac{2V_u}{L} \cos \psi ||R|| D F_t F_r \quad \text{mV/m}$$

للاستقبال على هوائي عمودي قصير، تتحول المعادلة (3) إلى:

$$(4) \quad E_s = \frac{2V_u}{L} (\cos \psi)^2 ||R|| D F_t F_r \quad \text{mV/m}$$

حيث F_r هي عامل هوائي الاستقبال.

بالنسبة للانتشار على مسافات كبيرة، يمكن لطريقة القفزات أن تُوسع لتشمل الموجات الأيونوسفيرية المعكوسة عدة مرات على الأيونوسفير. فعلى سبيل المثال، بالنسبة لموجة أيونوسفيرية ذات قفزين، يمكن لشدة المجال المستقبلية بواسطة هوائي عروفي للاستقبال أن تُمثل ببساطة كالتالي:

$$(5) \quad E_s = \frac{2V_u}{L} \cos \psi ||R_1|| ||R_2|| D^2 D_G ||R_g|| F_t F_r \quad \text{mV/m}$$

حيث:

D_G: عامل التباعد الناتج عن الأرض الكروية، يساوي تقريباً D⁻¹||R_g||: معامل الانعكاس الفعّال لأرض موصلة محدودة

L: الانتشار الإجمالي على مسير الشعاع ذي القفزين

||R₁|| و ||R₂||: معامل الانعكاس الأيونوسفيري للانعكاسين الأول والثاني.

على العموم، لا تكون معاملات الانعكاس الأيونوسفيري متساوية، لأن درجة استقطاب الموجات الواردة تختلف. ومع ذلك، فإن الطريقة البسيطة المقترحة هنا لحساب شدة المجال تسمح بالحصول على ما يكافئ قيمتي الانتشار ||R₁|| و ||R₂|| كتقدير أولي لزوايا ورود جد مائلة.

1.2.2 زوايا الارتفاع والورد الأيونوسفيري

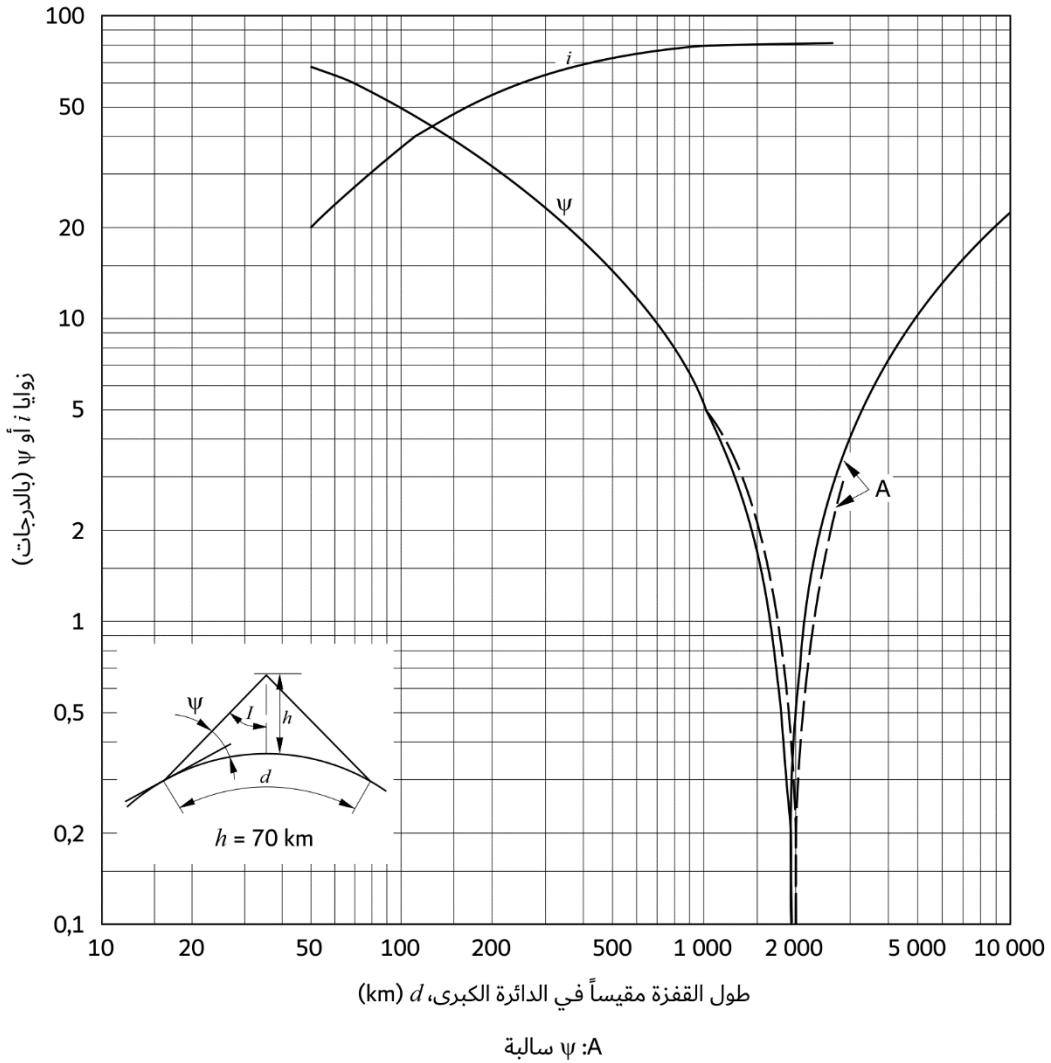
يمثل الشكلان 2 و3 هندسة مسير الشعاع لتحديد زاويتي مغادرة ووصول الموجة الأيونوسفيرية الأرضية (ψ) والزوايا الأيونوسفيرية للورد (i). يقابل الشكل 2 حالة ارتفاع فعّال للانعكاس يبلغ 70 km، مما يمثل الظروف النمطية نهاراً؛ ويقابل الشكل 3 حالة ارتفاع فعّال للانعكاس يبلغ 90 km، مما يمثل الظروف النمطية ليلاً. وإن آثار الانكسار الجوي على زاويتي المغادرة والوصول مدرجة ومثلة بواسطة المنحنى المتقطع؛ وهي قد لا تكون صالحة للترددات تحت 50 kHz تقريباً.

2.2.2 طول المسير ووقت الانتشار التفاضلي

يسمح الشكل 4 بحساب طول مسير الموجة الأيونوسفيرية L وتقدير التغيرات النهارية للطور. فهو يبين وقت الانتشار التفاضلي بين الموجة السطحية والموجة الأيونوسفيرية التي خضعت لـ 1 أو 2 أو 3 انعكاسات على الأيونوسفير، عند ارتفاعات 70 km (ظروف النهار) أو 90 km (ظروف الليل). ويُفترض أن سرعة الانتشار تساوي 3×10^5 km/s.

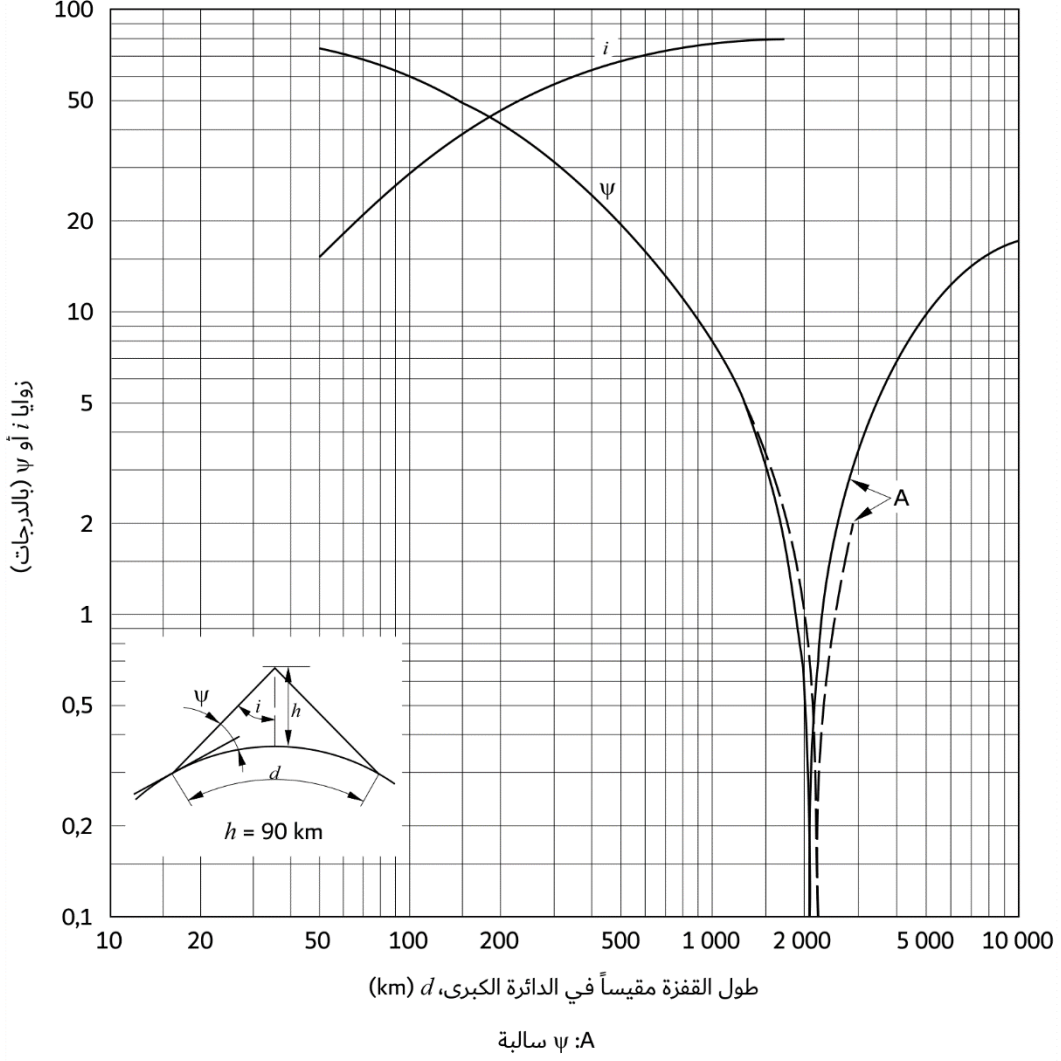
الشكل 2

زاويتا المغادرة والوصول، ψ ، وزوايا الورود الأيونوسفيري، i ، في ظروف نهارية نمطية ($h = 70$ km) يراعي المنحني المتقطع آثار الانكسار الجوي



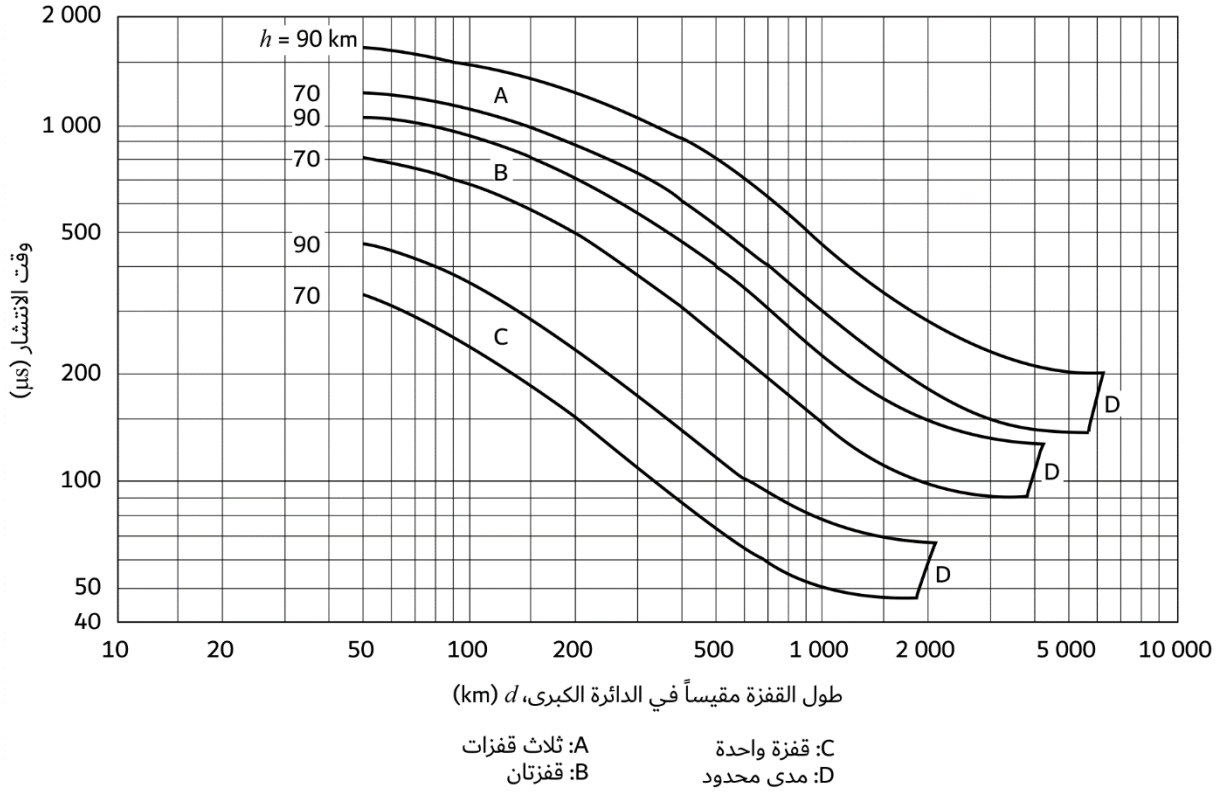
الشكل 3

زاويتا المغادرة والوصول، ψ ، وزوايا الورود الأيونوسفيري، i ، في ظروف ليلية نمطية ($h = 90$ km) يراعي المنحنى المتقطع آثار الانكسار الجوي



الشكل 4

وقت الانتشار التفاضلي بين موجة سطحية وموجات أيونوسفيرية بقفزة وقفزتين وثلاث قفزات



P.0684-04

3.2.2 عامل التنبير الأيونوسفيري

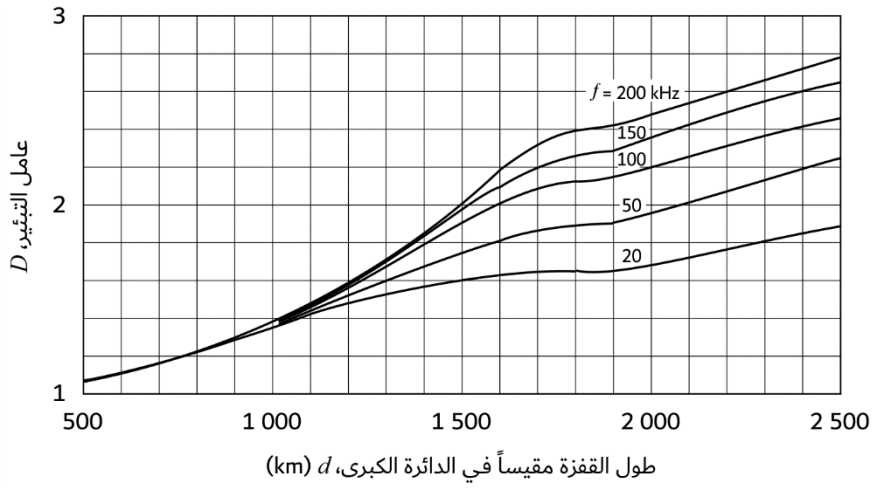
يمثل الشكلان 5 و6، وهما على التوالي للنهار والليل، عامل التنبير الأيونوسفيري، D ، في حالة أرض وأيونوسفير كرويين.

4.2.2 عوامل الهوائيات

يمثل الشكلان 7 و9 عاملي الهوائي F_r و F_t اللذين يأخذان في الاعتبار أثر أرض كروية ذات إيصالية محدودة على مخطط الإشعاع العمودي لهوائي الإرسال والاستقبال. تم حساب هذين العاملين لحالات الأرض والبحر والجليد المعروفة بواسطة خصائصها الكهربائية (الإيصالية والسماحية) كما يبين ذلك الجدول 1.

الشكل 5

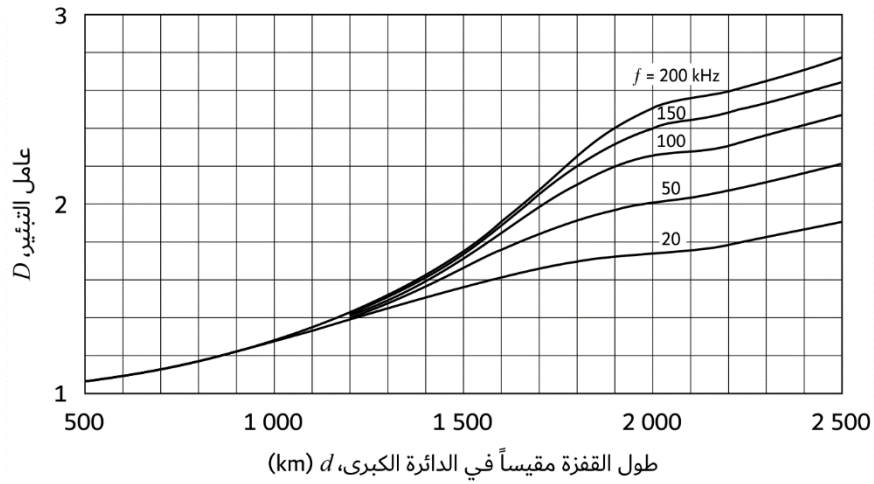
عامل التبئير الأيونوسفيري - النهار



P.0684-05

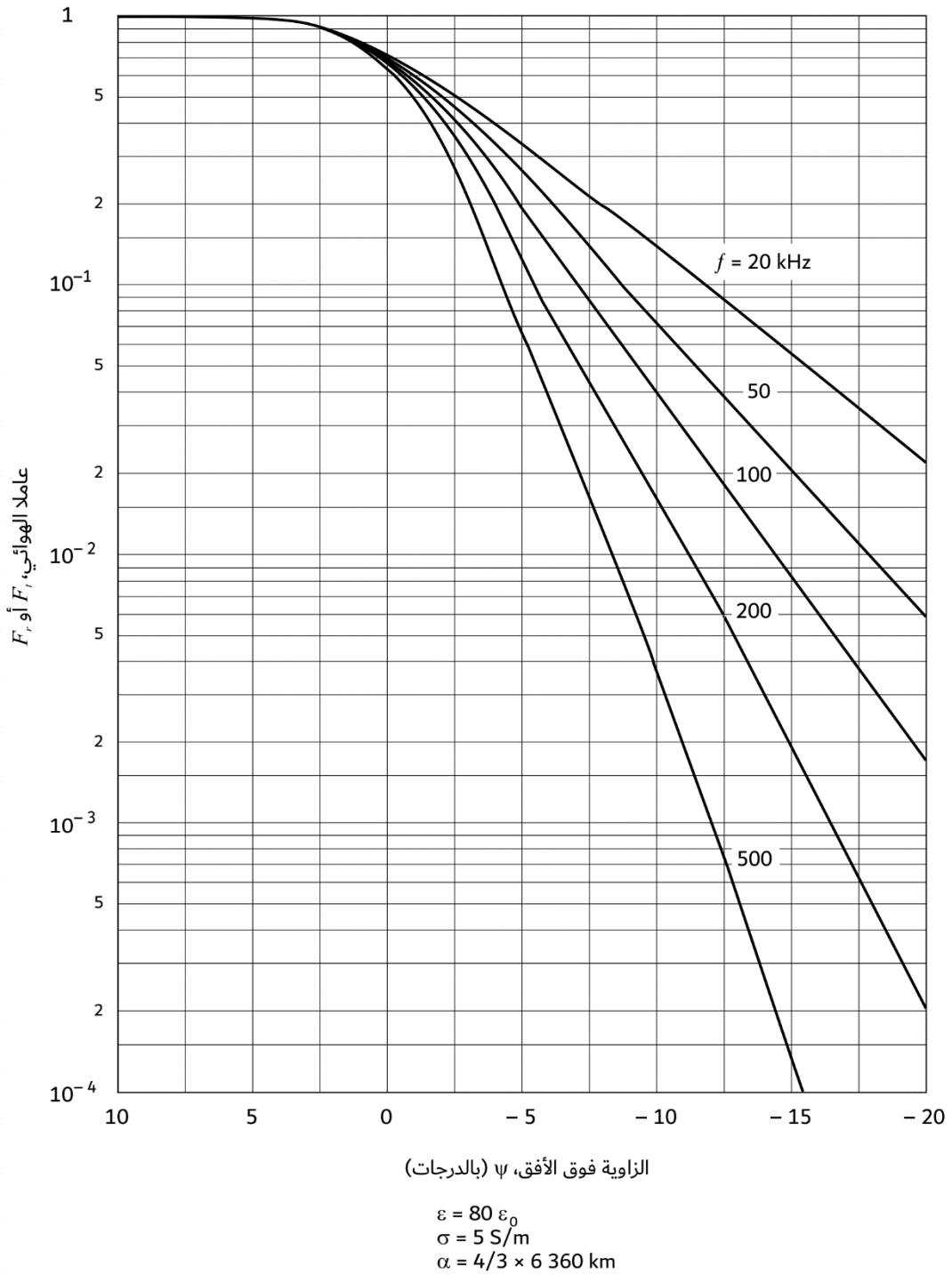
الشكل 6

عامل التبئير الأيونوسفيري - الليل

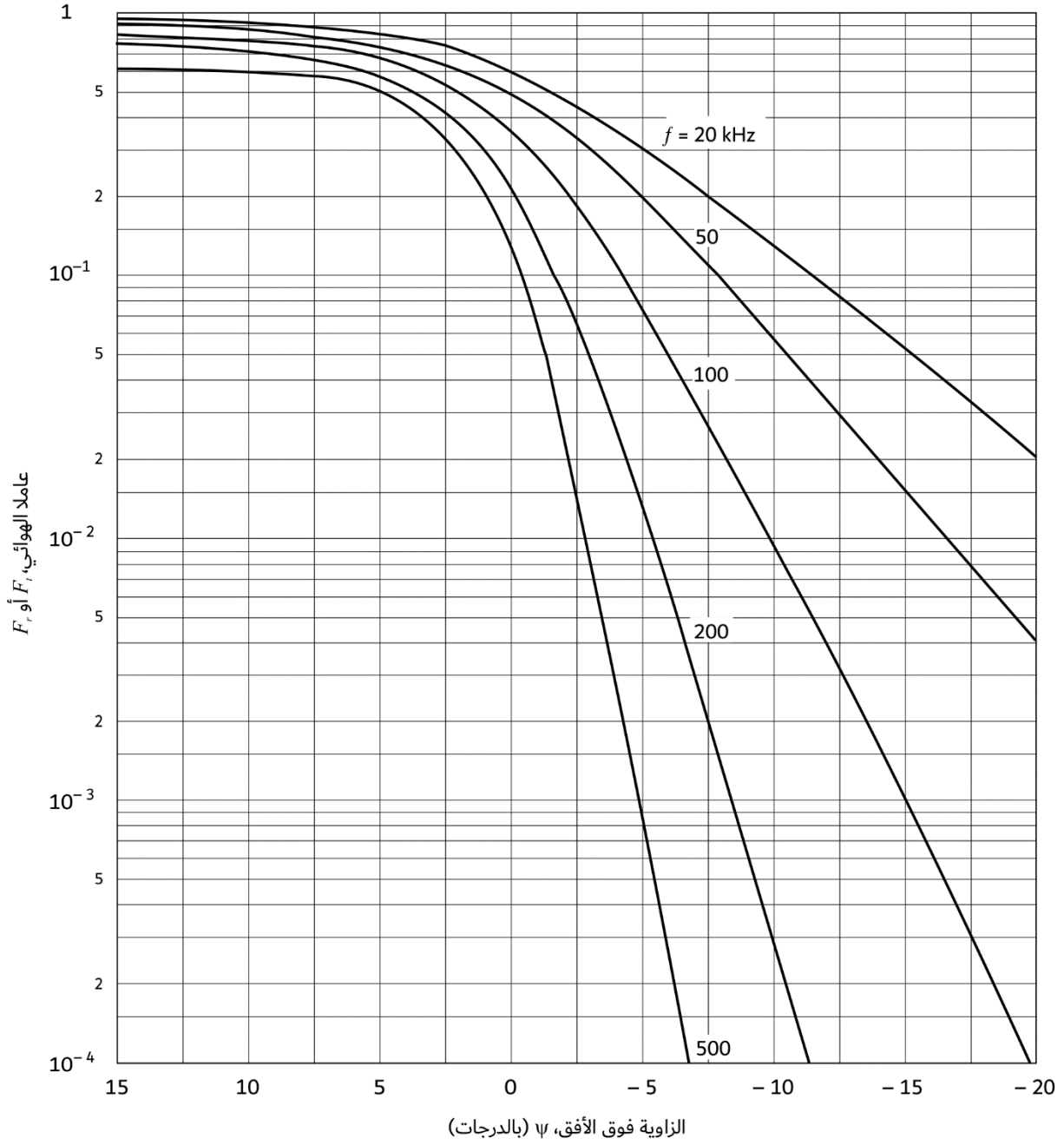


P.0684-06

الشكل 7
عامل الهوائي - ماء البحر



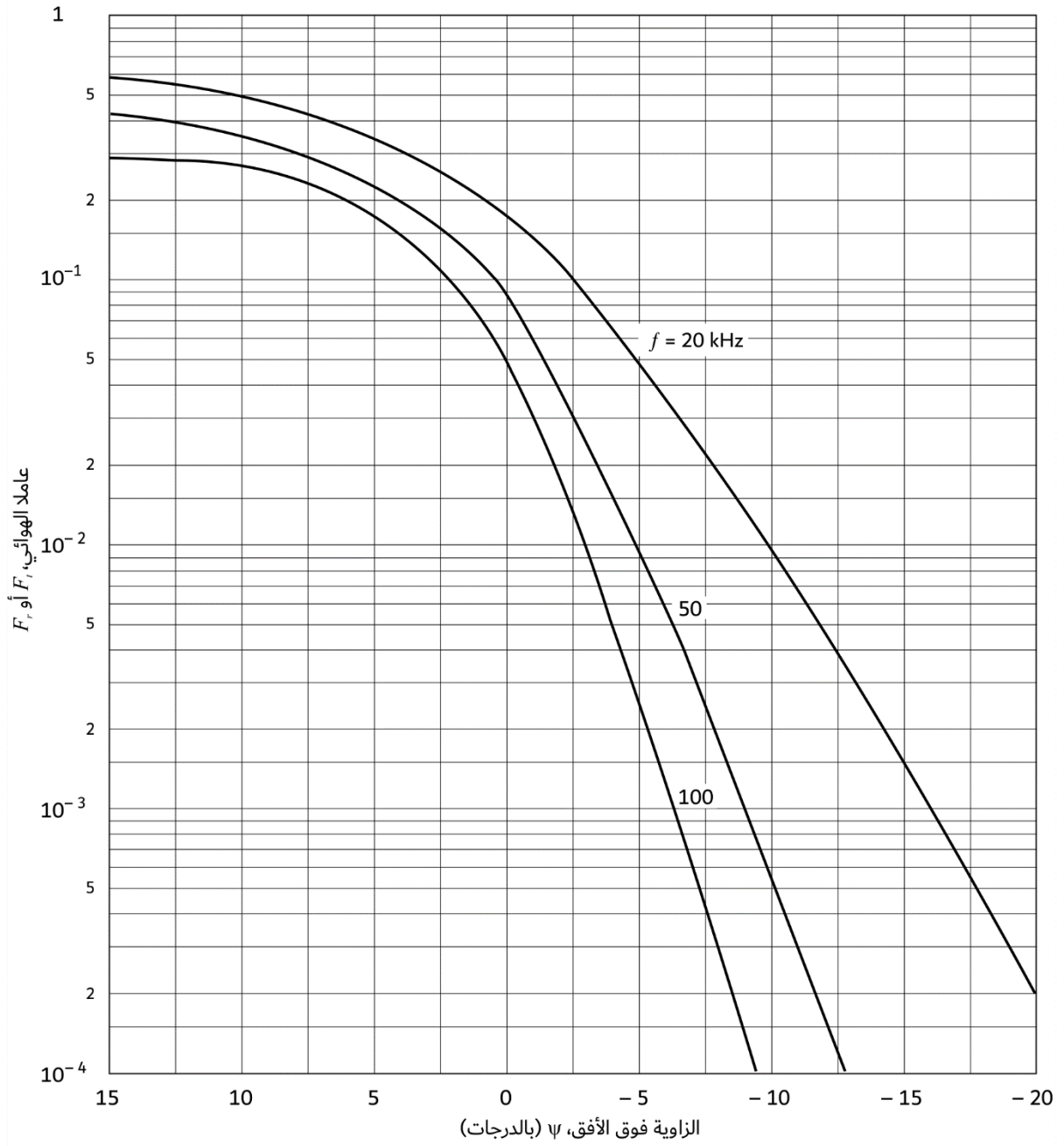
الشكل 8
عامل الهوائي - الأرض



$$\begin{aligned} \epsilon &= 15 \epsilon_0 \\ \sigma &= 2 \times 10^{-3} \text{ S/m} \\ \alpha &= 4/3 \times 6360 \text{ km} \end{aligned}$$

الشكل 9

عامل الهوائي - الجليد عند 4°C



$$\begin{aligned} \epsilon &= 3 \epsilon_0 \\ \sigma &= 0,025 \times 10^{-3} \text{ S/m} \\ \alpha &= 4/3 \times 6 \text{ 360 km} \end{aligned}$$

الجدول 1

الإيصالية، σ (S/m)	السماحية، ϵ	
5	$80 \epsilon_0$	ماء البحر
2×10^{-3}	$15 \epsilon_0$	الأرض
2.5×10^{-5}	$3 \epsilon_0$	الجليد القطبي

ϵ_0 : السماحية في الفضاء الحر

رسمت هذه المنحنيات بافتراض أن نصف قطر الأرض يبلغ 8 480 km مما يساوي 4/3 قيمته الحقيقية، وذلك لمراعاة آثار الانكسار الجوي. تمثل العوامل F نسبة شدة المجال الفعلي إلى المجال التي كانت ستقاس لو كانت الأرض موصلاً مثالياً. وتحيل القيم السالبة لـ ψ إلى الانتشار ما وراء مدى الحد البصري الهندسي للموجة الأيونوسفيرية ذات قفزة واحدة (انظر الأشكال 1 إلى 3).

5.2.2 معاملات الانعكاس الأيونوسفيري R_{\parallel}

يمثل الشكل 10 قيم R_{\parallel} لأدنى قيمة للنشاط الشمسي. لكي تُؤخذ في الاعتبار التغيرات حسب التردد والمسافة، تُعطى قيم R_{\parallel} بدلالة $f \cos i$ ، حيث f هو التردد المرسل و i زاوية الورود الأيونوسفيري. وتُعطى المنحنيات للظروف الليلية في كل الفصول وللظروف النهارية شتاءً وصيفاً. وتستند القيم المقاسة لزوايا الورود العمودي وزوايا الورود المائل إلى النتائج الواردة في عدة تقارير.

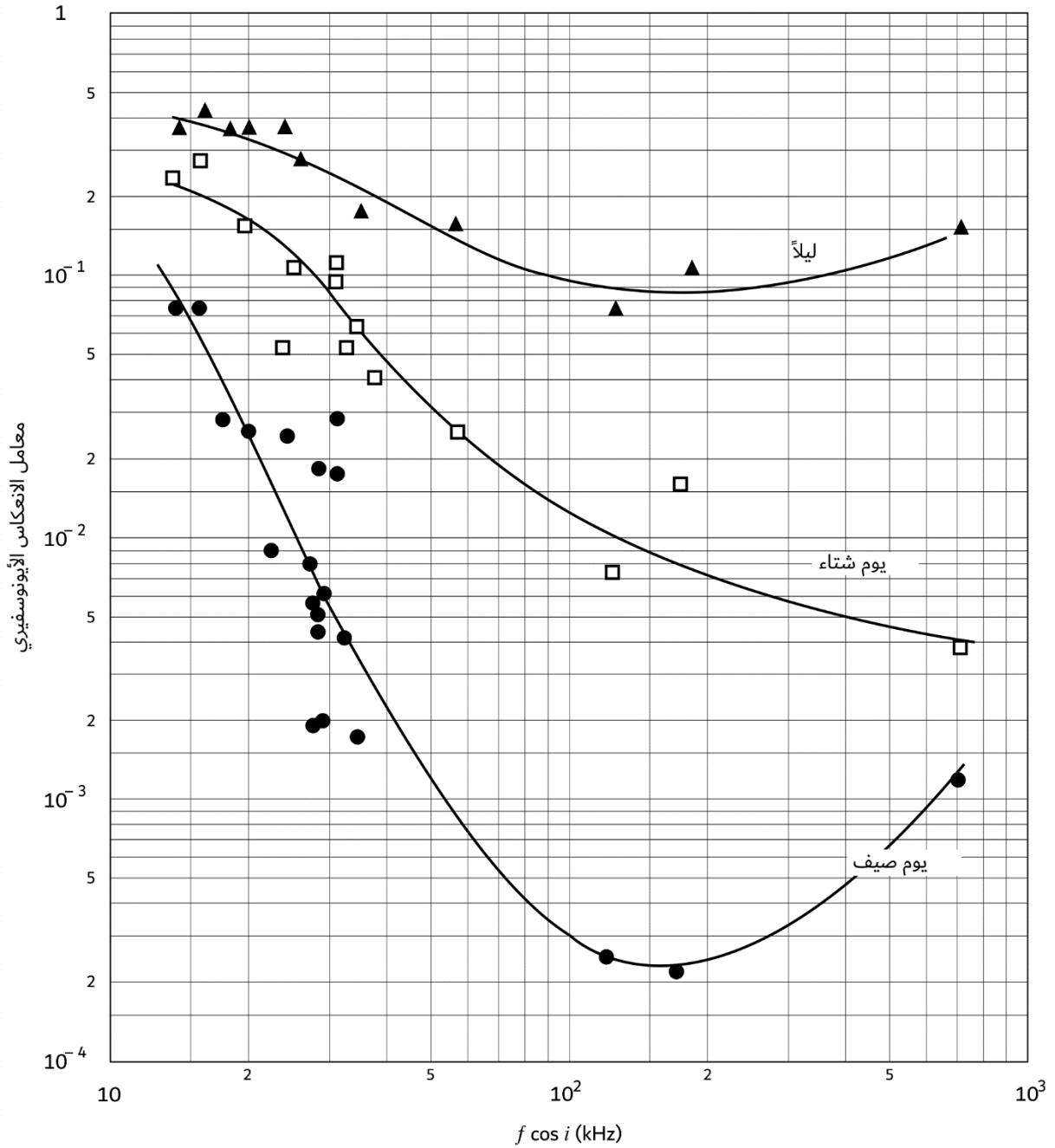
في جميع الحالات تم تغيير معطيات معامل الانعكاس الأيونوسفيري الواردة في مختلف المراجع المذكورة حسب الاقتضاء، وذلك لمراعاة التبئير الأيونوسفيري وعوامل الهوائي وغيرها حتى تكون نتائج القياسات متطابقة مع تقنية التحليل المستعملة هنا.

غير أنه لا يمكن دائماً الاعتماد على مفهوم التردد الفعال $f \cos i$ مع معاملات انعكاس ثابتة. وقد نتجت المنحنيات جزئياً انطلاقاً من معطيات تم الحصول عليها عند ورود شبه عادي ($d > 200$ km) وعند ورود أكثر ميلاً ($d < 500$ km) ومن المحتمل أن يكون مفهوم $f \cos i$ صحيحاً على وجه التقريب لهذه المسافات. لكن عند المسافات الوسيطة من المرجح أن يؤدي مفهوم التردد الفعال إلى أخطاء ملحوظة في معامل الانعكاس لأن معامل الانعكاس والاستقطاب للموجة في هذه الظروف يتغير بسرعة مع تغير المسافة.

هناك تغير في الدورة الشمسية حيث إن معاملات الانعكاس أكبر في سنوات الكلف الشمسي الأقصى عند الترددات المنخفضة جداً، بينما هي أصغر عند الترددات المتوسطة. والتفسير الفيزيائي لذلك هو التالي: خلال سنوات أقصى كلف شمسي، تكون قاعدة الأيونوسفير أدنى وميل تدرج كثافة الإلكترونات أكبر مما هو عليه خلال سنوات أدنى كلف شمسي. هكذا فإن الموجات VLF المنعكسة من هذه الطبقة الدنيا تكون منعكسة بقوة أكبر في سنوات أقصى كلف شمسي، بينما الموجات MF المنعكسة فوق هذه الطبقة الدنيا يتم امتصاصها أكثر. ومن المتوقع أن يكون الانتقال بين معاملات الانعكاس الكبرى والصغرى بدلالة التردد وساعة اليوم والفصل وفترة الدورة الشمسية؛ إضافة إلى ذلك، يمكن توقع تقطع في منحنى معاملات الانعكاس بدلالة التردد، لتردد وساعة معينين.

الشكل 10

معاملات الانعكاس الأيونوسفيري - ظروف النشاط الشمسي الدنيا

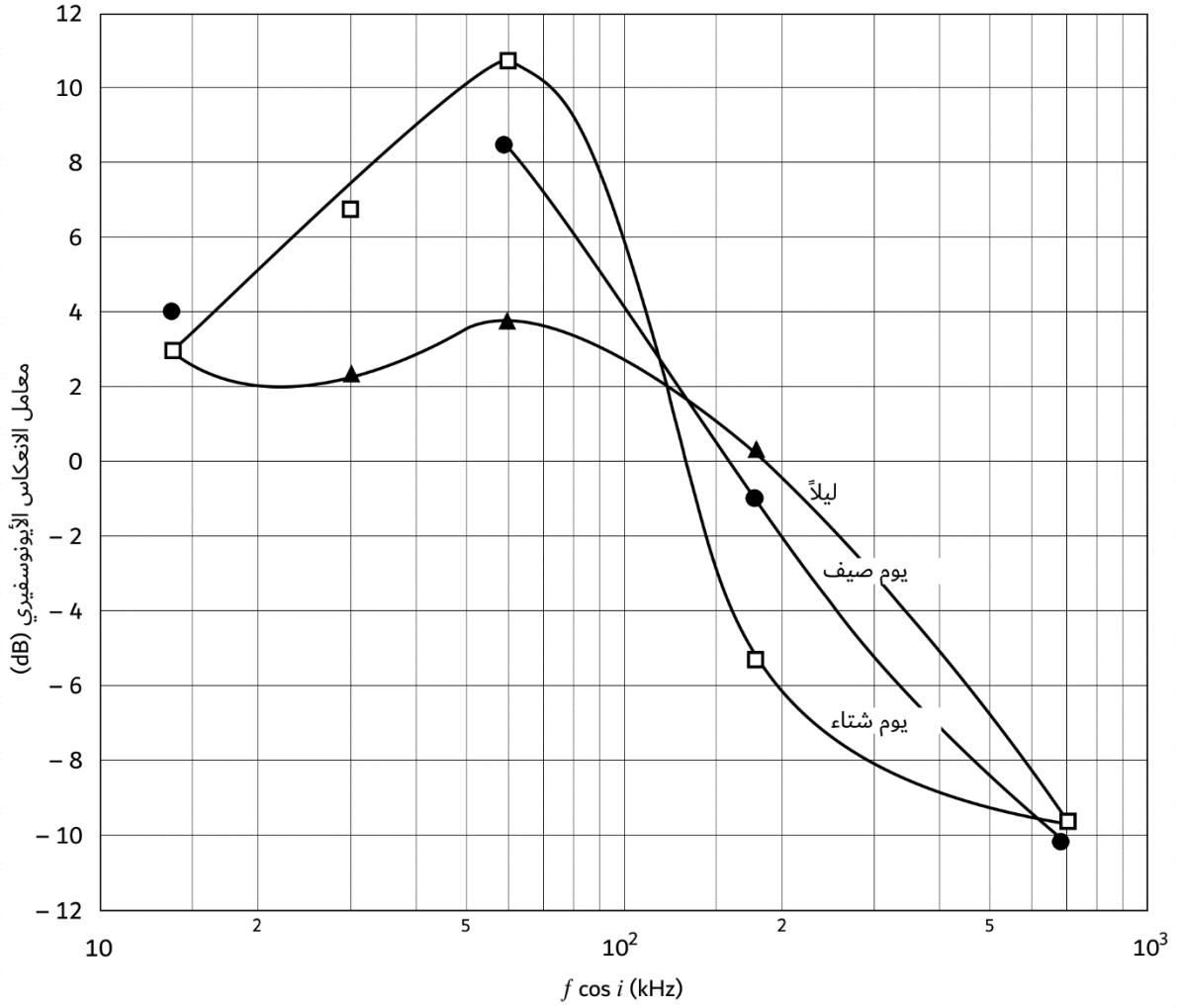


P.0684-10

تجدر الإشارة إلى أن مدى ترددات نطاق الإذاعة الراديوية بالموجات الهكثومترية للانتشار المائل يقع في مدى الترددات الفعّالة التي تتغير الانعكاسية الأيونوسفيرية بالنسبة لها في الاتجاه المعاكس للدورة الشمسية؛ بعبارة أخرى فإن انتشار موجة تردد 1 600 kHz على مسير 1 500 km يقابل انتشار موجة ترددات فعّالة ذات 278 kHz؛ بينما يساوي التردد الفعّال في التردد 500 kHz مقدار 86 kHz. ويعطي الملحق 1 مثلاً للحساب بطريقة مسير الشعاع.

الشكل 11

تغيرات معامل الانعكاس (dB) من سنوات أدنى
إلى سنوات أقصى كلف شمسي بدلالة التردد الفعال والوقت



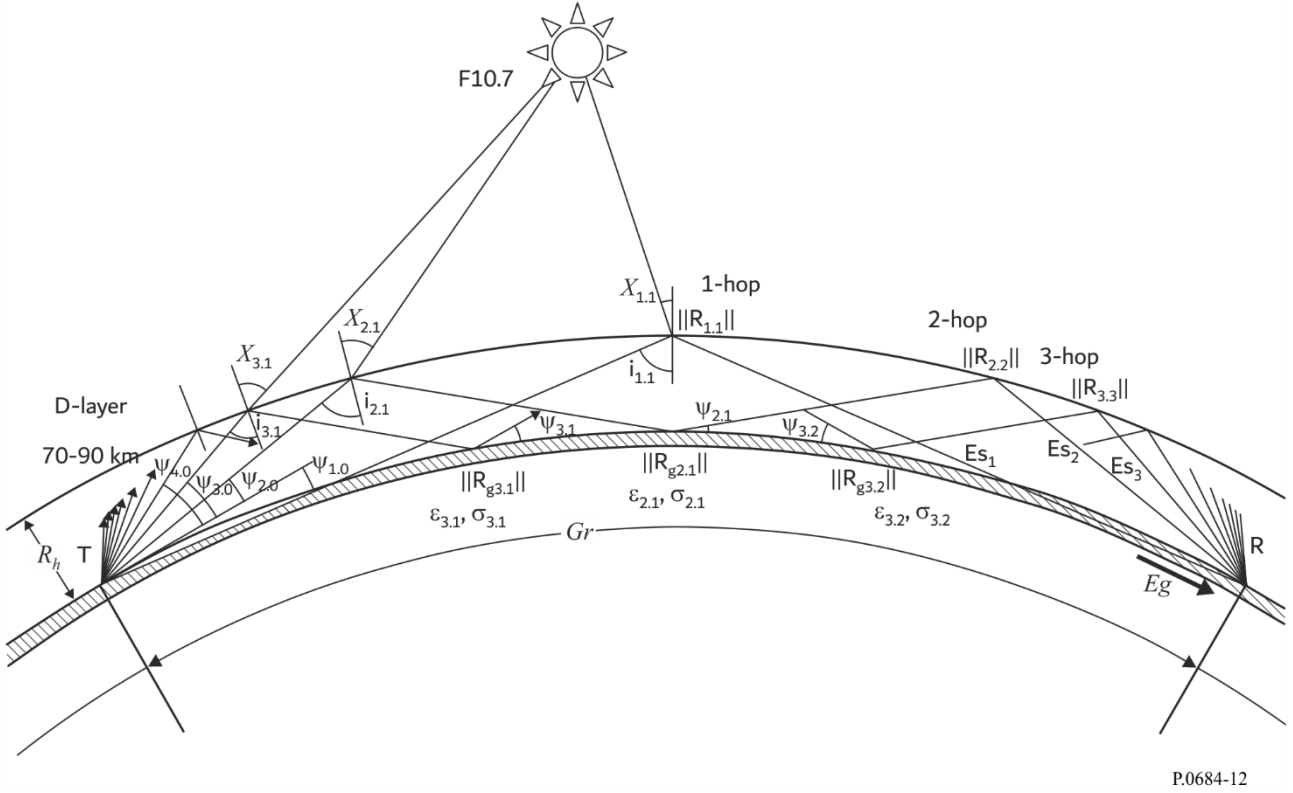
P.0684-11

3.2 الطريقة الرقمية لحساب شدة المجال الناتجة وطوره

1.3.2 هندسة المسير والعوامل الواجب دراستها

يبين الشكل 12 هندسة المسير والعوامل التي ينبغي مراعاتها في الحساب.

الشكل 12
عوامل الانتشار وهندسة المسير



وتحسب المسافة الفاصلة عن سطح الأرض، Gr (km) كالتالي:

$$(6) \quad Gr = \alpha \cdot Re$$

حيث:

a : الزاوية المركزية للأرض بين المرسل والمستقبل (بالتقدير الدائري)

Re : نصف القطر الفعلي للأرض (km).

ويحسب جيب عام زاوية السمات الشمسي χ عند أي نقطة (lon_m و lat_m) في وقت معين كالتالي:

$$(7) \quad \cos \chi = \sin(lat_m) \sin \delta + \cos(lat_m) \cos \delta \cos t$$

حيث:

δ : الميل الشمسي ويتحصل عليها بالمعادلة:

$$(8) \quad \delta = \beta_1 - \beta_2 \cos B + \beta_3 \sin B - \beta_4 \cos 2B + \beta_5 \sin 2B - \beta_6 \cos 3B + \beta_7 \sin 3B$$

$$\beta_1=0,006918, \beta_2=0,399912, \beta_3=0,070257, \beta_4=0,006758,$$

$$\beta_5=0,000907, \beta_6=0,002697, \beta_7=0,001480$$

$$(9) \quad B = \frac{2\pi J}{365}$$

J : اليوم حسب التقويم اليوليوسي

t : زاوية الساعة الشمسية ويتحصل عليها بالمعادلة:

$$(10) \quad t = 15 \frac{\pi}{180} (TST - 12)$$

TST : الوقت الفعلي ويتحصل عليه بالمعادلة:

$$(11) \quad TST = MST + ET$$

MST : الوقت المتوسط ويتحصل عليه بالمعادلة:

$$(12) \quad MST = GMT + \frac{lon_m}{15}$$

ET : معادلة الزمن وهي كالتالي:

$$(13) \quad ET = \frac{12}{\pi} (\alpha_1 + \alpha_2 \cos B - \alpha_3 \sin B - \alpha_4 \cos 2B - \alpha_5 \sin 2B)$$

$$\alpha_1=0,000075, \alpha_2=0,001868, \alpha_3=0,032077, \alpha_4=0,014615,$$

$$\alpha_5=0,040849$$

وتحسب زاوية الارتفاع Ψ استناداً إلى المعادلة التالية:

$$(14) \quad \Psi = \arctan \left(\cot \left(\frac{d}{2R_e} \right) - R_e \frac{\operatorname{cosec} \left(\frac{d}{2R_e} \right)}{R_e + h_r} \right)$$

حيث:

d : طول القفرة (km)

h_r : ارتفاع الانعكاس (km).

ويحسب طول المسير الراديوي P (km) استناداً إلى المعادلة التالية:

$$(15) \quad P = 2R_e \operatorname{sen} \left(\frac{d}{2R_e} \right) \sec \left(\Psi + \frac{d}{2R_e} \right)$$

وتحسب زاوية الورود، i ، في الأيونوسفير استناداً إلى المعادلة التالية:

$$(16) \quad i = \operatorname{arcsen} \left(\frac{R_e \cos \Psi}{R_e + h_r} \right)$$

ويحسب وقت انتشار الموجة الأيونوسفيرية نسبة إلى الموجة الأرضية استناداً إلى المعادلة التالية:

$$(17) \quad \text{(s) Delay time} = \frac{P - d}{3 \times 10^5}$$

2.3.2 نموذج ارتفاع الانعكاس

يستعمل لحساب ارتفاع الانعكاس خلال 24 ساعة التوزيعات المكافئة للطبقة D/E التي يحسب أعلى تردد لها استناداً إلى القيمة foE (التوصية ITU-R P.1239). ويبين الشكل 13 المنحنيات h-f (الساعة-التردد) لطبقة الانعكاس ما بين 0 ساعة (من 0 إلى 3 متماثل) إلى 12 ساعة. وتعتبر قيم التغييب في الحساب للتردد الأساسي للمكافئ، f_b ، ولأصغر نصف سماكة الطبقة، y_{min} ، ولأكبر نصف سماكة للطبقة، y_{max} ، ولأقصى طول للطبقة E، h_{max} مساوية للقيم التالية 10 kHz و 10 km و 30 km و 100 km على التوالي. مما يعني أن ارتفاع الانعكاس في الليل يبلغ 90 km ($y_{min} - h_{max}$) بينما يكون أقل ارتفاع انعكاس 70 km ($y_{max} - h_{max}$) وقت المساء المحلي.

ويحسب ارتفاع الانعكاس R_h كالتالي:

$$(18) \quad R_h = h_{\max} - y_m \sqrt{1 - \frac{f - f_b}{foE}}$$

حيث:

$$(19) \quad y_m = y_{mm} - \frac{(y_{mm} - y_{min})(f_{\max} - foE)}{f_{\max} - f_{min}}$$

$$(20) \quad y_{mm} = y_{\max} - \frac{(y_{\max} - y_{min})(fk0 - f_{\max})}{f_{\max} - f_{min}}$$

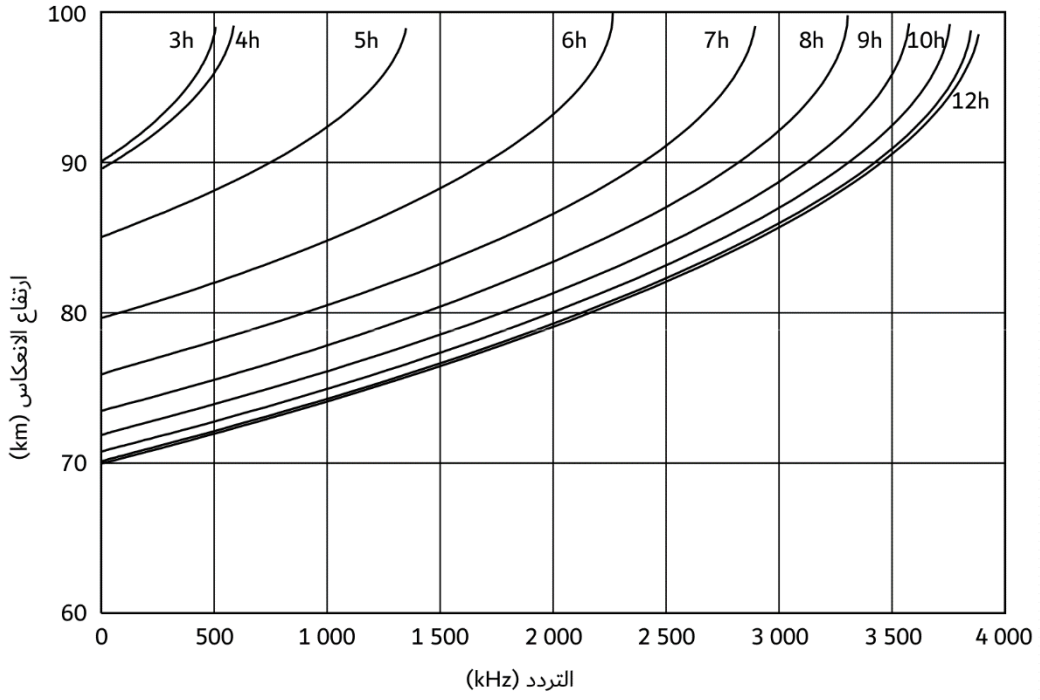
وتحسب القيم $fk0$ (foE لجيب التمام $\chi = 0$) و f_{\max} (أكبر قيمة foE في المكان موضوع القياس) و foE (في ساعة معينة حسب التوقيت المحلي) وفقاً للفصل 4. وتحدد القيمة foE على النحو الوارد في التوصية ITU-R P.1239.

3.3.2 عامل التبئير الأيونوسفيري

كما جاء في الفقرة 3.2.2، يبين الشكل 14 عامل التبئير الذي يطبق في حسابات مدة 24 ساعة باعتباره متوسط منحنيات النهار (الشكل 5) والليل (الشكل 6).

الشكل 13

مثال التغيرات في ارتفاع طبقة الانعكاس بتغير الزمن المحلي

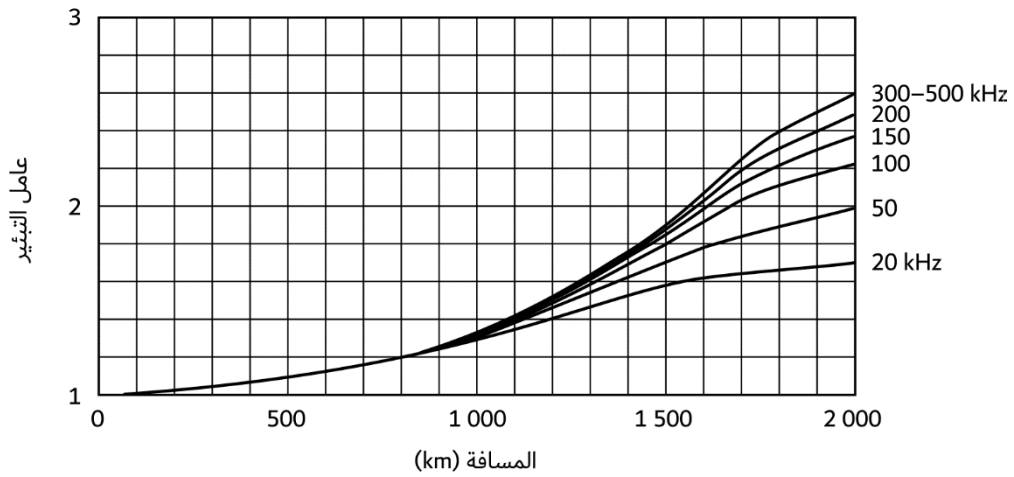


ssn: 100 June 23 N 0 E
 fbase: 10 kHz ymin: 10 km
 ymax: 30 km hmax: 100 km

P.0684-13

الشكل 14

عامل التبئير الأيونوسفيري



P.0684-14

4.3.2 عامل الهوائي

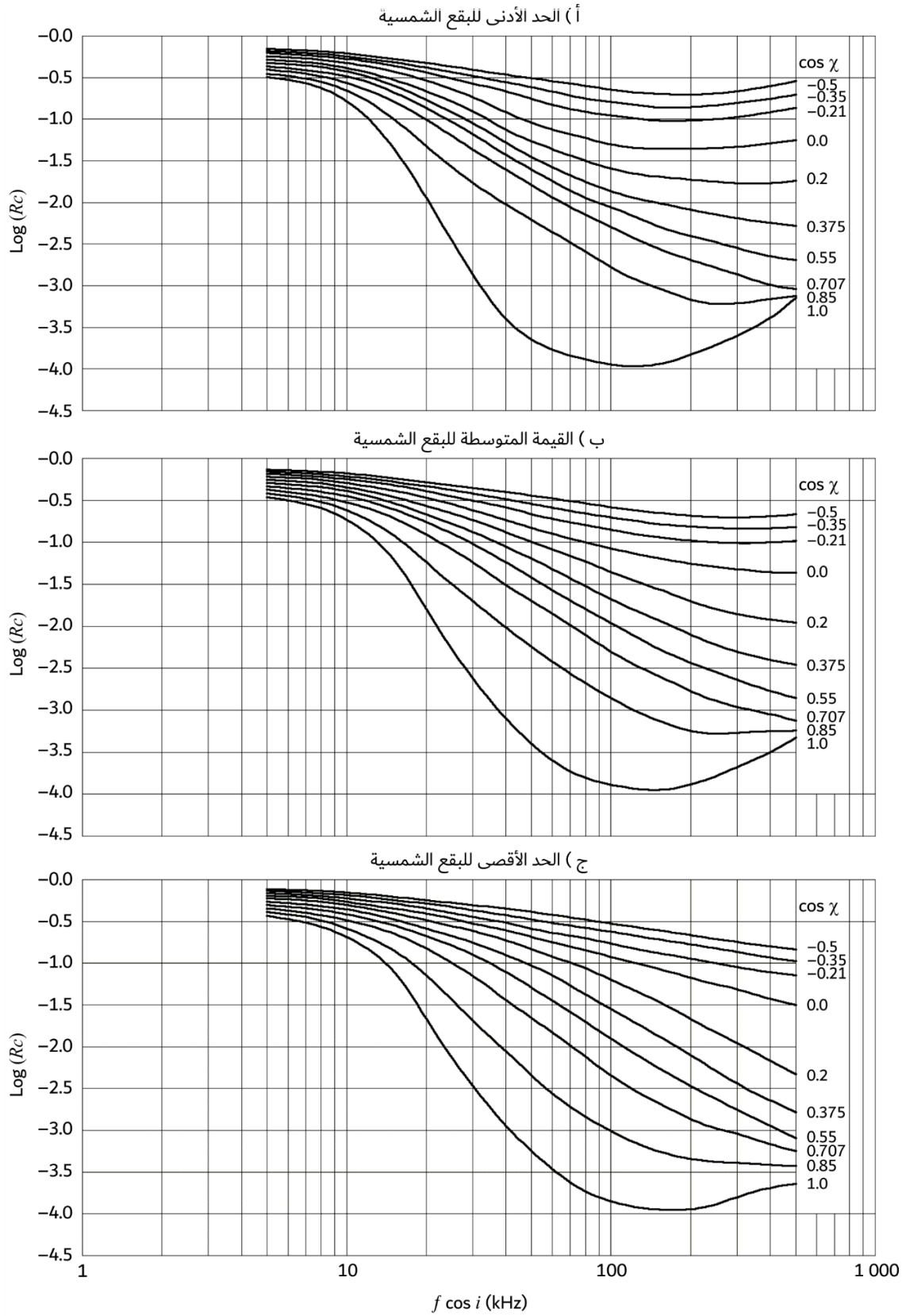
يحسب عاملي هوائي الإرسال والاستقبال من منحنيات الاستكمال الداخلي نسبة إلى زاوية الارتفاع وإلى التردد في ثلاث حالات مختلفة فيما يتعلق بخصائص الأرض، والتي ترد في الجدول 1.

5.3.2 معامل الانعكاس الأيونوسفيري

يتم تحويل معاملات الانعكاس الأيونوسفيري المذكورة في الفقرة 2.2 إلى معاملات تقابل ثلاث فترات للنشاط الشمسي: أكبر عدد لنقاط الكلف الشمسي ($120 < F_{10,7}$) العدد الوسطي لنقاط الكلف الشمسي ($65 < F_{10,7} \leq 120$) وأقل عدد لنقاط الكلف الشمسي ($65 \geq F_{10,7}$) للدليل $F_{10,7}$. ويشار إلى هذه المعاملات بدلالة $f \cos i$ و $\cos \chi$ بالنسبة إلى الأنشطة القصوى والمتوسطة والدنيا كما هو مبين في الشكل 15. وتنتج معاملات الانعكاس الأيونوسفيري في ظرف معين عن طريق الاستكمال الداخلي لقيمة $\|R\|$ نسبة إلى قيمة $f \cos i$ و $\cos \chi$.

الشكل 15

معامل الانعكاس الأيونوسفيري



6.3.2 الخسارة الناجمة عن انعكاس الموجة على الأرض

يحسب معامل الانعكاس على الأرض $\|Rg\|$ للاستقطاب الرأسي بدلالة التردد، f مقدراً بالوحدات (kHz)، لزاوية الارتفاع Ψ لثابت العزل الكهربائي ϵ والإيصالية النوعية σ ، لزاوية ارتفاع موجبة.

$$(21) \quad \|Rg\|(\Psi > 0) = \frac{n^2 \sin \Psi - \sqrt{n^2 - \cos^2 \Psi}}{n^2 \sin \Psi + \sqrt{n^2 - \cos^2 \Psi}}$$

حيث:

$$(22) \quad n^2 = \epsilon - j \frac{18\sigma \times 10^6}{f}$$

ويحسب تغير زاوية طور موجة استقطاب رأسي عند انعكاسها بالنسبة إلى قيم تردد وزاوية ارتفاع ومعلمات تربة معينة. لنوايا الارتفاع السالبة، تراعى خسارة الانعراج. ومعامل الانعكاس على الأرض عبارة عن نسبة شدة المجال المنعرج المحسوبة باستخدام برمجية "LFMF-SmoothEarth"، الوارد ذكرها في التوصية ITU-R [P.368](#) إلى شدة المجال في الفضاء الحر.

$$(23) \quad \|Rg\|(\Psi \leq 0) = \frac{E(\text{Diffracted})}{E(\text{Free space})}$$

7.3.2 شدة مجال الموجة الأيونوسفيرية

إذا تم الاستقبال في هوائي ذي إطار صغير موضوع على سطح الأرض فإن شدة المجال الفعّال للموجة الأيونوسفيرية بأسلوب القفزات ذات العدد M ، E_{SM} ، تنتج كالتالي:

$$(24) \quad E_{SM} = \frac{600\sqrt{Pt} \cos(\Psi_M) \prod_{N=1}^M \|R_{M,N}\| \prod_{N=1}^{M-1} \|Rg_{M,N}\|}{L_M} D_M F_t F_r \exp(-jkL_M) \text{ (mV/m)}$$

حيث:

Pt : القدرة المشعة مقدرة بالوحدات (kW)

Ψ_M : زاوية انطلاق الموجة الأيونوسفيرية من الأرض وزاوية وصولها إليها نسبةً إلى المستوي الأفقي

$\|R_{M,N}\|$: معامل الانعكاس الأيونوسفيري عند نقطة الانعكاس رقم N .

$\|Rg_{M,N}\|$: معامل الانعكاس عن الأرض عند نقطة الانعكاس رقم N .

D_M : معامل التبعثر الأيونوسفيري

F_c : عامل التبعثر الأيونوسفيري

F_{rM} و F_{tM} : عاملا هوائيين الإرسال والاستقبال على التوالي

L_M : طول مسير الموجة الأيونوسفيرية.

$$(25) \quad L_M = \sum_{N=1}^M P_{M,N}$$

8.3.2 الموجة الأرضية

تُحسب شدة المجال للموجة الأرضية، $|Eg|$ باستخدام برمجية "LFMF-SmoothEarth"، المذكورة في التوصية ITU-R P.368-10.

$$(26) \quad Eg = |Eg| \exp(-jkGr)$$

وتنتقى منحنيات انتشار الموجة الأرضية أيضاً من التوصية ITU-R P.368 للحالات الثلاث الواردة في الجدول 1 وتُحسب عندئذ شدة مجال الموجة الأرضية بالاستكمال الداخلي نسبة إلى المسافة والتردد.

وترد حالات الأرض في الشكل 43 "خارطة الإيصالية MF المؤقتة للمناطق البرية" في التوصية ITU-R P.832-2.

9.3.2 شدة المجال الناتجة والطور

يُحسب المجال الكهربائي الناتج بالجمع المتجهي للموجة الأرضية والموجات الأيونوسفيرية كالتالي:

$$(27) \quad E = Eg + \sum_{M=1}^{10} Es_M$$

يتحصل على الدقة المناسبة بأخذ رقم القفزة (M) المساوي للقيمة 10.

وتكون شدة المجال والطور عند نقطة الاستقبال $|E|$ و $\arg(E)$ ، على التوالي.

4.2 التنبؤ بمسيرات الانتشار التي تتجاوز 4 000 km

لحساب المجال الكهربائي حتى 16 000 km، تطبق المعادلات التالية. والقيمة المتوسطة للمجال الكهربائي للمكون Es_K بوحدات mV/m لموجة سماوية عند القفزة K هي كالتالي:

$$(28) \quad Es_K = \frac{600 \sqrt{p_t} \cos \Psi_K \left(\prod_{L=1}^K R_{C,K,L} \right) F_{C,K} R_g^{K-1} F_{t,K} F_{r,K}}{\sum_{L=1}^K P_{L,K,L}} \exp \left(-jk \sum_{L=1}^K P_{L,K,L} \right)$$

حيث:

K : رقم القفزة، من 1 إلى 10

L : رقم الأوج، من 1 إلى K

K : رقم الموجة

p_t : القدرة المشعة (kW)

Ψ_K : زاويتا الإقلاع والسقوط لشعاع القفزة K

$R_{C,K,L}$: معاملات الانعكاس الأيونوسفيري للفترات الدنيا والمتوسطة والعظمى للبقعة الشمسية كما هو مبين في الأشكال 15أ) و 15ب) و 15ج) على التوالي.

$F_{C,K}$: عامل التركيز المشتق من الشكل 14.

$R_{g,K}$: معامل انعكاس الأرض للموجات المستقطبة رأسياً والمشتق من المعادلتين (21) و (22)

F_{rK} و F_{tK} : عاملا هوائي الإرسال والاستقبال على التوالي والمشتقان من الأشكال 7 و 8 و 9

$Pl_{K,L}$: طول الانتشار للانعكاس L لشعاع القفزة K .

والمجال الناتج، Es ، عبارة عن جمع متجهي للموجات السماوية العشر والموجة الأرضية ويتحصل عليه على النحو التالي:

$$(29) \quad Es = |Eg| \exp(-jkd) + \sum_{K=1}^{10} Es_K$$

حيث:

$|Eg|$: شدة مجال الموجة الأرضية المتحصل عليه من التوصية ITU-R P.368 (راجع الفقرة 8.3.2)

d : مسافة الدائرة العظمى بين محطتي الإرسال والاستقبال بوحدة km.

وشدة المجال المستقبلية بهوائي يتحصل عليها باعتبارها $|Es|$.

3 حساب شدة المجال بأساليب الأدلة الموجية: حل للموجة الكاملة

في حالة انتشار الموجات الراديوية الأرضية ELF و VLF و LF إلى مسافات كبيرة، تُحصر هذه الموجات في الفضاء بين الأرض والأيونوسفير. ويلعب هذا الفضاء دور دليل موجي ويُستعمل "مفهوم الدليل الموجي" لتمييز المجالات المنتشرة بدلالة المسافة.

تسمح طريقة "أسلوب الدليل الموجي" بالحصول على حل للمجال الكامل المتعلق بدليل موجي خصائصه هي التالية:

- توزيع عشوائي لكثافة الإلكترونات والأيونات وتردد الاصطدام بدلالة الارتفاع،
- حد أدنى مكون من أرض متجانسة ومنتظمة مميزة بإيصالية سطحية وثابت عزل كهربائي قابلين للضبط. وتأخذ هذه الطريقة في الاعتبار انحناء الأرض وتجانس الأيونوسفير وتباين المناحي (الناتج عن المجال المغنطيسي الأرضي).

تُعتبر الطاقة داخل الدليل الموجي موزعة إلى سلسلة من الأساليب. يمثل كل أسلوب حالة طنين، أي أنه، لمجموعة متميزة من زوايا ورود الموجات على الأيونوسفير، يحدث طنين وتنتشر الطاقة مبتعدة عن المصدر. إن الزوايا المعقدة (θ) التي تحدث تلك الحالة بالنسبة لها تُسمى زوايا ذاتية (أو "أساليب"). ويمكن الحصول عليها باستعمال طرائق "الموجة الكاملة" الموصوفة في الفقرتين 1.3 و 2.3 اللتين تسمحان بحل المعادلة الحاسمة (المعادلة الشكلية):

$$(30) \quad F(\theta) = |R_d(\theta) \bar{R}_d(\theta) - 1| = 0$$

حيث:

$$(31) \quad R_d(\theta) = \begin{bmatrix} ||R_{||d}(\theta) & \perp R_{||d}(\theta) \\ ||R_{\perp d}(\theta) & \perp R_{\perp d}(\theta) \end{bmatrix}$$

هي مصفوفة معامل الانعكاس الأيونوسفيري في الاتجاه التصاعدي حتى الأيونوسفير انطلاقاً من الارتفاع d وحيث:

$$(32) \quad \bar{R}_d(\theta) = \begin{bmatrix} ||\bar{R}_{||d}(\theta) & 0 \\ 0 & \perp \bar{R}_{\perp d}(\theta) \end{bmatrix}$$

هي مصفوفة الانعكاس المعقدة في الاتجاه الهابط من الارتفاع d باتجاه سطح الأرض.

يشير الترميز $||$ و \perp إلى الاستقطاب العمودي بينما يشير الترميز \perp إلى الاستقطاب الأفقي. ويتعلق المؤشر الأول لـ R باستقطاب موجة الورد، بينما ينطبق الثاني على استقطاب الموجة المنعكسة.

تتمثل حدود المعادلتين (31) و(32) فيما يلي:

$R_{||}$: نسبة المجال المنعكس في مستوى الورد إلى المجال الوارد في نفس المستوي

R_{\perp} : نسبة المجال المنعكس المتعامد إلى مستوى الورد والمجال الوارد المتعامد إلى مستوى الورد

R_{\perp} : نسبة المجال المنعكس المتعامد إلى مستوى الورد والمجال الوارد في مستوى الورد

$R_{||}$: نسبة المجال المنعكس في مستوى الورد والمجال الوارد المتعامد إلى مستوى الورد.

يتم الحصول على مصفوفة الانعكاس الأيونوسفيري R_d ، (المعادلة (31))، عند ارتفاع d بالتكامل الرقمي للمعادلات التفاضلية التي صاغها بودن ("نظرية الدليل الموجي لانتشار الموجات")، لوغوس بريس، لندن 1961. يتم تكامل المعادلات التفاضلية بطريقة رونغ-كوطا، انطلاقاً من ارتفاع معين يُفترض فوقه أن الانعكاس قابل للإهمال. والحالة الأولية للتكامل، أي القيمة الأصلية لـ R ، تُعتبر على أنها قيمة R المقابلة لأيونوسفير أكفة واضحة، فوق المظاهر الجانبية المحددة لكثافة الإلكترونات وتردد الاصطدام. يُحسب الحد R_d وفقاً لحل معادلة ستوكس واشتقاقاتها.

تحل المعادلة الشكلية، المعادلة (30) لأي عدد من الأساليب (الزوايا الذاتية، θ_n) نرغب فيه. وانطلاقاً من مجموعة القيم θ التي يتم الحصول عليها على هذا النحو يمكن حساب معلمات الانتشار التالية: معدل التوهين وسرعة الطور واتساع وطور عامل الإثارة. بعد ذلك تُستعمل هذه المعلمات في جمع شكلي لحساب المجال الإجمالي والاتساع والطور، عند نقطة بعيدة.

يمكن في حالات عديدة اعتبار أن الدليل الموجي أرض-أيونوسفير يملك خصائص انتشار ثابتة على طول مسير الإرسال. يُشار إلى حسابات الجمع الشكلي التي تتم في هذه الحالات على أنها متجانسة أفقياً. لكن بالنسبة للانتشار إلى مسافات بعيدة، يكون من غير الواقعي افتراض أن معلمات الدليل الموجي سوف تبقى ثابتة على طول المسير. على سبيل المثال، إن اتجاه وشدة المجال المغنطيسي الأرضي يتغيران ويمكن أن تكون هناك تقاطعات في الجدار الأدنى من الدليل الموجي على إثر تغيرات في إحصائية نوعية للتربة مرتبطة بمختلف الحدود أرض-بحر والجليد القطبي. والإحصائية الأيونوسفيرية تتغير كذلك حسب الساعة والفصل ووجود خط طلوع أو غروب الشمس على طول مسير الانتشار.

إن أنماط التقطعات هذه هي تلك التي تسبب تغيرات متميزة في الدليل الموجي. ويتعين في هذه الحالات أن تُؤخذ في الاعتبار آثار تحويل الأساليب عند التقطع. ويعني تحويل الأساليب أن أسلوباً وحيداً ينتشر في إقليم دليل موجي ما سوف ينتج أسلوبين أو أكثر في القسم الآخر من الدليل، ينتشران بعد ذلك إلى المستقبل.

1.3 مصفوفة الانعكاس الأيونوسفيري $R(\theta)$

إن مرحلة حاسمة في تحديد ثوابت الأساليب التي تناولتها الفقرة السابقة تتمثل في تقييم مصفوفة الانعكاس R لأيونوسفير متباين المناحي غير متجانس عمودياً. ويتم ذلك بتكامل رقمي للمعادلات التفاضلية التي صاغها بودن.

إن نظام الإحداثيات المختارة بحيث أن اتجاه z يُعتبر على أنه موجب عند الدخول في الأيونوسفير. و x الموجبة هي اتجاه الانتشار و y متعامدة مع مستوى الانتشار.

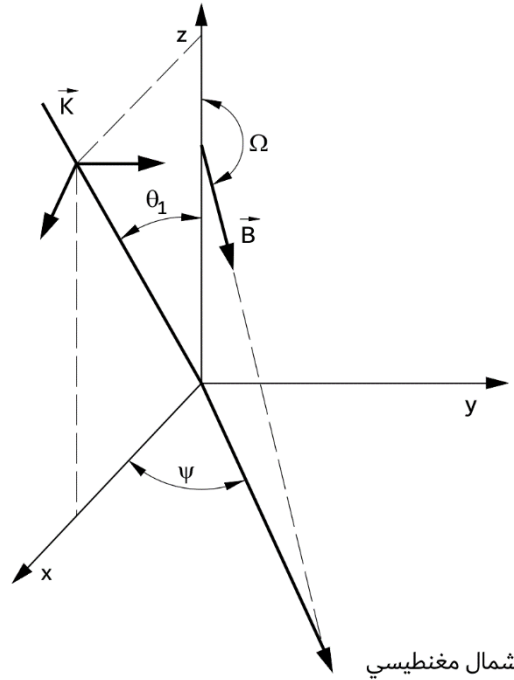
تُمثل الهندسة في الشكل 16 حيث تُبين موجة مستوية واردة على الأيونوسفير من أسفل مع متجه الموجة \vec{K} في المستوي $x-z$ (مستوي الورد) عند مستوى ورود θ_1 بالنسبة للمستوي العمودي (المحور z). والمتغيرات الأخرى المعرفة على هذا الشكل هي Ω زاوية المجال المغنطيسي الأرضي المقيس انطلاقاً من المستوي العمودي ($90^\circ > \Omega \geq 180^\circ$ لنصف الكرة الشمالي)، و ψ ، سمت الانتشار (عند شرق الشمال المغنطيسي). والمتجهة \vec{B} هي كثافة التدفق المغنطيسي من الأرض.

يتم تكامل المعادلات التفاضلية بطريقة رونغ-كوطا، انطلاقاً من ارتفاع معين يُفترض فوقه أن الانعكاس قابل للإهمال. والقيمة الأولية لـ R هي تلك التي تقابل أيونوسفيراً متجانساً واضح الحدود، يتميز بمعلمات عند ذرى الجوانب الخلفية المعينة لكثافة الإلكترونات والأيونات وترددات الاصطدام. وتُضمن الحماية من الأخطاء بمقارنة كل خطوة زيادة لعناصر R المحسوبة باستعمال طريقة رونغ-كوطا من الرتبة الرابعة مع تلك المحسوبة باستعمال مرحلة تكامل من الرتبة الثانية. ويتم التكامل بالنزول من ارتفاع

أولي إلى ارتفاع d ، مع تعرف هوية d ، بواسطة المعادلة (30). يكفي اختيار d منخفضة بما يكفي في الأيونوسفير لتكون الآثار الأيونوسفيرية ضعيفة بالنسبة لآثار الانحناء الأرضي. وفوق السوية d ، فإن الأثر الوحيد الذي يدخل في الاعتبار هو أثر الانحناء الأرضي، الذي يُؤخذ في الحسبان بإدخال سماحية معدلة تتغير خطياً بدلالة الارتفاع.

الشكل 16

هندسة انتشار الموجات



P.0684-16

2.3 مصفوفة الانعكاس على الأرض، $\bar{R}_d(\theta)$

إن مصفوفة الانعكاس على الأرض \bar{R}_d المعطاة بواسطة المعادلة (32)، تُحدد بواسطة حلول مستقلة h_1 و h_2 بالنسبة لمعادلة ستوكس:

$$(33) \quad \frac{d^2 h_{1,2}}{dz^2} + z h_{1,2} = 0$$

حيث الدالتان h_1 و h_2 هما دالتان لهنكل معدلتان من رتبة 1/3 (لهما علاقة خطية بدالات Airy).

3.3 طريقة البحث عن الأساليب ("MODESRCH")

إن نظرية الدليل الموجي تعتبر أن المجال مكون من واحدة أو أكثر من أسر (أساليب) مستوي الموجات المحصورة في الدليل الموجي أرض-أيونوسفير. والهدف الرئيسي هو إيجاد حلول للمعادلة (30) للزوايا الذاتية θ_n . لتتحقيق ذلك، تُستعمل طريقة تُعرف باسم "MODESRCH".

إن طريقة "MODESRCH" التي تم تطويرها أساساً لانتشار الموجات VLF و LF الدنيا (10 kHz إلى حوالي 60 kHz) في الدليل الموجي أرض-أيونوسفير، تجر كل الأساليب في أي منطقة مادية مستطيلة كبيرة في الفضاء المعقد للزاوية الذاتية θ_n . وتسمح هذه الطريقة كذلك بإيجاد الأسلوب الوحيد الضروري لانتشار الموجات الطويلة جداً. يقوم الإجراء على نظرية متغيرة معقدة. والمعادلة الشكلية، المعادلة (30)، تُحل لكل الزوايا الذاتية θ_n المهمة، وللمجموعة المعطاة من المعلمات أرض-أيونوسفير وتردد الانتشار. يقوم البحث عن الزوايا الذاتية على كون منحنيات الطور الثابتة لوظيفة معقدة معينة $F(\theta)$ لا يمكن أن تكون متقطعة إلا عند النقاط

التي تكون عندها $0 = F(\theta)$ أو تلك التي يكون لدينا بالنسبة لها $F(\theta) \leftarrow \infty$. لتبسيط مشكل البحث عن قيم θ_n ، تُعدل الدالة $F(\theta)$ بحيث لا تشتمل على أقطاب ولا تؤخذ في الاعتبار سوى $0 = F(\theta)$. يمكن تسجيل أحد حلول $0 = F(\theta)$ بواسطة θ_0 أي أن $0 = F(\theta)$ صفر لـ $0 = F(\theta)$.

ليكن:

$$(34) \quad F(\theta) = F_R(\theta_r, \theta_i) + j F_I(\theta_r, \theta_i) = \text{Re}(F) + j \text{Im}(F)$$

حيث:

$$(35) \quad \theta = \theta_r + j \theta_i$$

وكذلك:

$$(36) \quad F(\theta) = \left[(F_R(\theta_r, \theta_i))^2 + (F_I(\theta_r, \theta_i))^2 \right]^{1/2} e^{j\theta}$$

حيث:

$$(37) \quad \varphi = \text{tg}^{-1} \left[\frac{F_I(\theta_r, \theta_i)}{F_R(\theta_r, \theta_i)} \right]$$

و:

$F_R(\theta)$: الجزء الحقيقي من الدالة المعقدة $F(\theta)$

$F_I(\theta)$: الجزء الخيالي من الدالة المعقدة $F(\theta)$

θ_r : الجزء الحقيقي من الزاوية المعقدة θ

θ_i : الجزء الخيالي من الزاوية المعقدة θ .

انطلاقاً من المعادلة (37)، إذا كان:

$\varphi = 0^\circ$ (or 180°) وهذا يعني أن

$$F_I(\theta_r, \theta_i) = 0$$

وكذلك إذا كان:

$\varphi = 90^\circ$ (or 270°) وهذا يعني أن

$$F_R(\theta_r, \theta_i) = 0$$

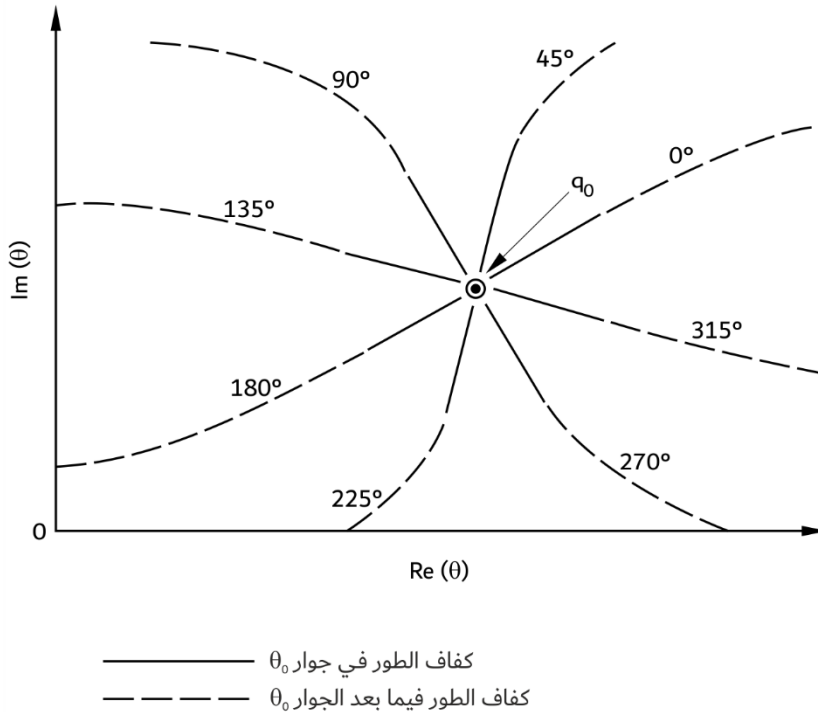
هكذا نحصل على مخطط الطور للشكل 17. يتم نصف فُطرياً (الخطوط المتواصلة) الحصول على مجموعة من منحنيات الطور الثابت، المسماة أكفة الطور، تتراوح بين 0 و 2π (rad)، انطلاقاً من صفر بسيط. تصف الخطوط المتقطعة التصرف الممكن لكفاف طور في إقليم يقع ما وراء جوار دالة تساوي صفر لـ $F(\theta)$ ومن المفيد نظرياً تحديد دالة تساوي صفر لـ $F(\theta)$ كمجموعة من أكفة الطور.

يوضح الشكل 18 بعض العناصر الأساسية للطريقة التي تسمح بإيجاد أصفار الدالة $F(\theta)$. يوضع مستطيل للبحث في منطقة ما من المستوي المعقد. يُقسم مستطيل البحث إلى مربعات شبكية تُدعى أركانها نقاط الشبكة. يكون قد المربع الشبكي اختيارياً ويُنتقى في الغالب وفقاً لمباعدة الأصفار المتوقعة. إذا كانت $F(\theta)$ دون أقطاب، فإن ذلك يعني أن خط أي قيمة طور ثابتة معينة $\varphi_c = \varphi$ ، مشعة من صفر $F(\theta)$ ، يجب أن يقطع كفافاً مغلقاً يشتمل على ذلك الصفر مرة واحدة على الأقل. علاوة على ذلك، لا يمكن لأي صفر $F(\theta)$ أن يكون على خط الطور هذا. كذلك، إن خطوط الطور الثابت حول $F(\theta) = 0$ لا تتقدم إلا في الاتجاه المعاكس

لعقارب الساعة. وإن خط طور ثابت (مثلاً، $\varphi_c = \varphi$) يقطع الكفاف يمكن أن يُتبع نحو الداخل إلى أن يؤدي إلى صفر أو يبلغ الكفاف من جديد. إذا بدأنا بالزاوية العليا اليسرى لمستطيل البحث، فإننا نجرى بحثاً عن الحدود لأكفة الطور عند 0° و 180° في الاتجاه المعاكس لعقارب الساعة. وكل كفاف طور يكون مناسباً؛ غير أنه تم اختيار كفايي الطور 0° و 180° لأنهما إذا وُجدا عندما يكون $\text{Im}(F) = 0$ ، يكون من السهل تحديد موقعهما رياضياً. ويُجرى البحث بتقييم عند النقاط الشبكية على طول حدود مستطيل البحث. وعندما يتغير الرمز $\text{Im}(F)$ فإن ذلك يدل على أننا مررنا بكفاف طور عند 0° أو 180° (النقاط A و D و G). بعد تحديد موقع أي من أكفة الطور هذه، يتم التوقف مؤقتاً عن البحث عن الحدود، بينما يتم ترسيم كفاف الطور 0° أو 180° داخل مستطيل البحث بتفتيش $\text{Im} F(\theta)$ عند زوايا المربعات الشبكية (تفتيش في الاتجاه المعاكس لعقارب الساعة بدءاً بالزاوية العليا اليسرى لكل مربع شبكي). يُتبع كفاف الطور حتى اكتشاف صفر $F(\theta)$ (النقطتان B و E) أو الوصول حد مستطيل البحث (كما يتم ذلك لكفاف الطور المنحصر بين G و H)؛ تظهر دائماً إحدى هاتين الحالتين، شريطة ألا تكون هناك أقطاب داخل مستطيل البحث. عند تحديد موقع صفر، يتم احتجاز موقعه. عندئذ يتم، انطلاقاً من الجانب المواجه للصفر، رسم كفاف الطور الذي خضع لتغير طور 180° (انظر الشكل 17) حتى الوصول مرة أخرى حد مستطيل البحث (النقطتان C و F). عندما يكون كفاف الطور موجوداً داخل حدود البحث، مثلاً عن النقطة C أو F أو H يوقف ترسيم كفاف الطور ويُستأنف البحث عن الحد عن النقطة التي تم عندها العثور عن آخر خط طور عند 0° أو 180° (مثلاً النقطة A أو D أو G). وعندما نكون قد قمنا بتفتيش كل حد مستطيل البحث، نكون قد وجدنا كل أصفار الدالة $F(\theta)$ الواقعة في داخل مستطيل البحث.

الشكل 17

سلوك كفاف الطور بجوار صفر $F(q)$



P.0684-17

يحدد موقع صفر ما بواسطة تقاطع أكفة الطور (انظر الشكل 17). إذاً فتقاطع كفاف الطور عند 0° أو 180° مع كفاف طور آخر يسمح بتحديد موقع صفر للدالة $F(\theta)$. وكفاف الطور الآخر المختار لهذا الغرض هو كفاف الطور 90° أو 270° ، الذي يتم اختبارها مرة أخرى للرباطة، لأن هذه الأكفة تُعرف بسهولة، لأنها تحدث عندما يكون $\text{Re}(F) = 0$. وأثناء رسم كفاف الطور 0° أو 180° فإن $\text{Re}(F)$ يُفحص عند أركان كل مربع شبكي لتحديد تغيير في إشارة $\text{Re}(F)$ يدل على أن كفاف طور عند 90° أو 270° دخل في المربع الشبكي. يدل هذا الحدث على أن احتمال وجود صفر داخل المربع الشبكي هذا أو ربما في مربع شبكي مجاور.

عندما نعرف أن مربعاً شبيكياً يحتوي على صفر، فإننا نحصل على تحديد أكثر دقة لموقع الصفر بواسطة رسم استقرائي يستعمل في الوقت نفسه اتساع وطور الدالة $F(\theta)$. بعد ذلك يدل تكرار نيوتن-رافسون على موقع الصفر.

تتمثل طريقة نيوتن-رافسون في استعمال كل من حلول الزوايا الذاتية θ_n الناتجة استناداً إلى شبيكية "MODESRCH" كحل أولي θ_0 للمعادلة (30) حيث $0 = F(\theta)$. بعد ذلك تحسب الدالة من جديد من أجل $\theta_0 + \delta\theta$ ونحصل على التصحيح إلى θ_0 انطلاقاً من المعادلة:

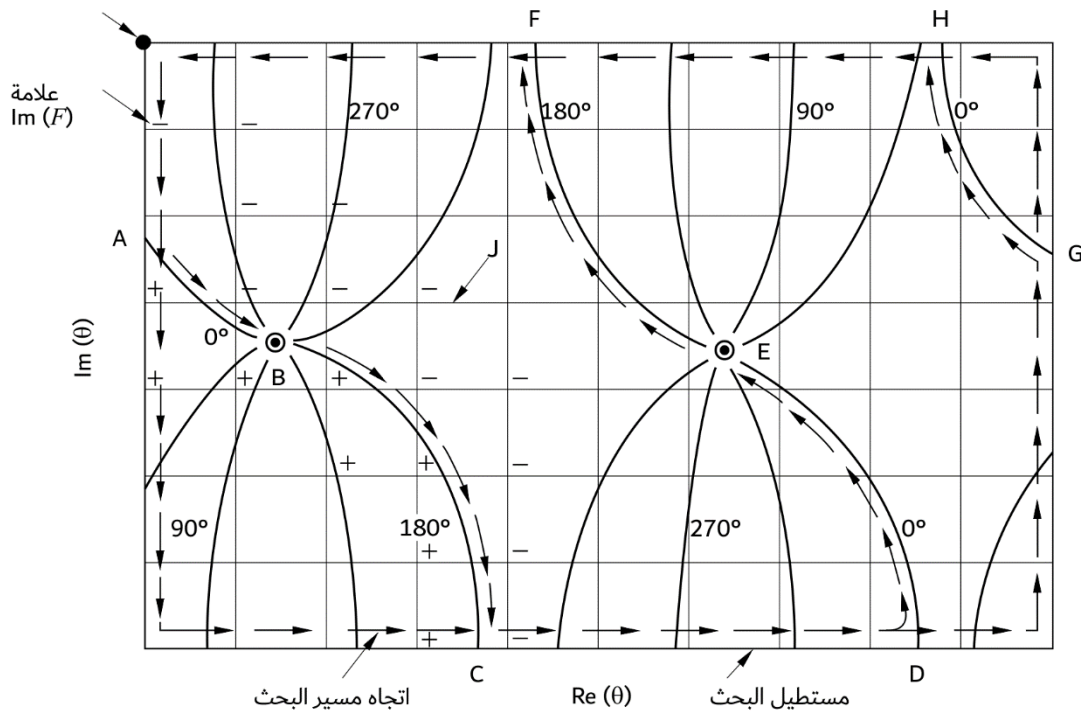
$$(38) \quad \Delta\theta = \frac{F(\theta_0) \delta\theta}{F(\theta_0 + \delta\theta) - F(\theta_0)}$$

عندئذٍ يتم تقييم التصحيح المحدد بواسطة المعادلة (38) وتكرار العملية حتى تُخفَض الكميّتان $|\Delta\theta_r|$ و $|\Delta\theta_i|$ وفقاً للتفاوت المسموح به المخصص مسبقاً. يدل المؤشران r و i على التوالي على الجزء الحقيقي والجزء الخيالي.

الشكل 18

طريقة البحث عن أساليب الدالة $F(q)$

نقطة البدء بالبحث عن الحدود



- كفاف الطور $F(\theta)$
- ⊙ صفر ل $F(\theta)$
- J مربع شبيكي

4 حساب شدة المجال

1.4 المعلمات الضرورية

عند معرفة الزوايا الذاتية θ_n ، فإن القيم التالية ذات الأهمية الفيزيائية تكون سهلة الحساب:
سرعة الطور على الأرض:

$$(39) \quad V = \frac{c}{K(\sin \theta_n)_r}$$

$$(40) \quad \Gamma = -8,6859 k (\sin \theta_n)_I \quad : \text{ ثابت التوهين على الأرض (dB/Mm)}$$

حيث:

سرعة الضوء في الفراغ:

$$c = 2,997928 \times 10^5 \text{ km/s}$$

$$(41) \quad K = \left(1 + \frac{\alpha h}{2} \right)$$

$$(42) \quad \alpha = 2/a = 3,14 \times 10^{-4} / \text{km}$$

إذا استعملنا هندسة الشكل 16، فإن اتجاه التنضد هو الاتجاه z واتجاه الانتشار يقع في المستوي $x-z$. ويُعتبر اتجاه دخول z في الأيونوسفير موجباً ويكون اتجاه الانتشار x موجباً و y متعامداً مع مستوي الانتشار. هكذا فإن المجالات لا تمثل أي تبعية تجاه y ، لكنها تمثل تجاه x تبعية من شكل $\exp(-ik \sin \theta_x)$ ، حيث k هي اتساع متوجه الانتشار في الفضاء الحر و θ الزاوية بين اتجاه متوجه الانتشار واتجاه z عند نقطة وسطية منضدة حيث ورود الانكسار المعدل يساوي الوحدة. يفترض أن كل قيم المجال تتغير بدلالة $\exp(i\omega t)$ حيث ω هي التردد الزاوي.

إن العامل الشكلي للإثارة والدوال الشكلية لكسب الارتفاع معلمتان ضروريتان لحساب المجالات الكهربائية. وصيغ عامل الإثارة ملخصة في الجدول 2. لا تنطبق عناوين الأعمدة إلا على إثارة مكونات المجال الكهربائي E_x و E_y و E_z وتنطبق عناوين السطور على الإثارة بنثائي أقطاب عمودي (λ_V) وثنائي أقطاب أفقي بإشعاع طولي (λ_E) وثنائي أقطاب أفقي بإشعاع عرضي (λ_B).

الجدول 2

عوامل الإثارة

E_x	E_y	E_z	مكونة المجال
$\frac{B_1}{S} \frac{(1 + \bar{R}_{ })^2 (1 - \bar{R}_{\perp} R_{\perp})}{ \bar{R}_{ } D_{11}}$	$\frac{-B_1}{S} \frac{ \bar{R}_{\perp} (1 + \bar{R}_{ }) (1 + \bar{R}_{\perp})}{D_{12}}$	$B_1 \frac{(1 + \bar{R}_{ })^2 (1 - \bar{R}_{\perp} R_{\perp})}{ \bar{R}_{ } D_{11}}$	المثير λ_V
$\frac{B_2}{S} \frac{(1 + \bar{R}_{ })^2 (1 - \bar{R}_{\perp} R_{\perp})}{ \bar{R}_{ } D_{11}}$	$\frac{-B_2}{S} \frac{ \bar{R}_{\perp} (1 + \bar{R}_{ }) (1 + \bar{R}_{\perp})}{D_{12}}$	$B_2 \frac{(1 + \bar{R}_{ })^2 (1 - \bar{R}_{\perp} R_{\perp})}{ \bar{R}_{ } D_{11}}$	λ_E
$\frac{B_2}{S} \frac{\bar{R}_{ } (1 + \bar{R}_{\perp}) (1 + \bar{R}_{ })}{D_{12}}$	$\frac{-B_2}{S} \frac{(1 + \bar{R}_{\perp})^2 (1 - \bar{R}_{ } \bar{R}_{ })}{\bar{R}_{\perp} D_{22}}$	$B_2 \frac{\bar{R}_{ } (1 + \bar{R}_{\perp}) (1 + \bar{R}_{ })}{D_{12}}$	λ_B

يمثل الحدان R و \bar{R} على التوالي عناصر مصفوفة الانعكاس الموجهة نحو الأيونوسفير ونحو الأرض، انطلاقاً من نفس السوية d داخل الدليل. وتُعطى القيمتان B_1 و B_2 بواسطة:

$$(43) \quad B_1 = \frac{S^{5/2}}{\left. \frac{\partial F}{\partial \theta} \right|_{\theta = \theta_n}} \quad B_2 = -\frac{B_1}{S}$$

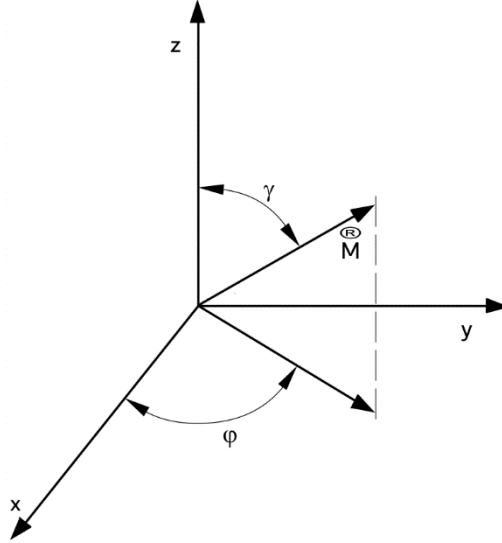
حيث S هي جيب تمام الزاوية الذاتية وحيث المخرج هو مشتقة المعادلة الشكلية في الزاوية الذاتية θ_n .

يجب أن تُكتمل عوامل الإثارة بواسطة تعاريف كسب الارتفاع.

يمكن إجراء حسابات المجال لمثيرات هوائيات ثنائيات الأقطاب الكهربائية ذات التوجيه العشوائي الواقعة عند أي ارتفاع داخل الدليل. وهكذا يكون من الممكن معالجة مشاكل انتشار الموجات الميريامترية/الكيلومترية فضاء-فضاء أو أرض-فضاء أو فضاء-فضاء التي تستعمل فيها قناة دليل موجي غير متجانسة في المستوى الأفقي. يبين الشكل 19 اتجاه ثنائي الأقطاب بالنسبة لهندسة الانتشار التي يكون فيها المحور z دائماً متعامداً مع سطح محور الأرض. تقيس الزاويتان γ و φ اتجاه المرسل بالنسبة لنظام الإحداثيات x و y و z .

الشكل 19

اتجاه ثنائي الأقطاب \vec{M} في الدليل الموجي،
مع كون γ الميل و ϕ الاتجاه السمتي



P.0684-19

حسب الشكل 19 تمثل $\gamma = 0^\circ$ إثارة ثنائي أقطاب عمودي، بينما تدل $\gamma = 90^\circ$ على إثارة ثنائي أقطاب أفقي. علاوة على ذلك فإن ϕ هي زاوية بين اتجاه ثنائي الأقطاب الأفقي واتجاه الانتشار. بطريقة صريحة، تمثل $\phi = 0$ الإشعاع الطولي و $\phi = 90^\circ$ الإشعاع العرضي.

2.4 مجموع الأسلوب WKB والمتجانس أفقياً

إضافة إلى عدم التجانس العمودي للأيونوسفير، قد يمثل الدليل عدم تجانس أفقي. ويمكن خصوصاً لتغيرية ثوابت الانتشار على طول الدائرة العظمى أن تنتج عن التغيرية الأفقية للأيونوسفير وتغيرية إيصالية نوعية للتربة و/أو سماحية الأرض، وكذلك عن تغيرات المجال المغنطيسي الأرضي أو عن الاتجاه. وفي الحالات التي لا يمكن فيها اعتبار الدليل الموجي أرض-أيونوسفير على أنه متجانس أفقياً على طول مسير الانتشار، فإننا نستعمل الشكل WKB لجمع الأسلوب. هذا النموذج دقيق عندما تكون تغيرات المعلمات الشكلية تدريجية بما يكفي على طول المسير.

ومن حيث عوامل الإثارة وكسب الارتفاع، يمكن التعبير عن معادلات جمع الأسلوب WKB بدلالة مسافة الانتشار.

إذا أمكن اعتبار أن مسير الانتشار متجانس أفقياً على طولها كاملاً، فإن المعادلة تصبح أبسط بكثير:

$$(44) \quad \left(\lambda \frac{T}{V} = \lambda \frac{R}{V} \right), \left(\lambda \frac{T}{B} = \lambda \frac{R}{B} \right) \text{ and } \left(\lambda \frac{T}{E} = \lambda \frac{R}{E} \right). \quad \text{Also } \left(\bar{S} \frac{T}{n} = \bar{S} \frac{R}{n} \right)$$

ويمكن أن تُستعمل الصيغة لحساب مجالات الانتشار متعددة الأساليب عند الموجات VLF و LF. كما يمكن أن تُستعمل هذه المعادلة لنطاق الموجات الطويلة جداً، لكن، نظراً لمعدلات التوهين المخفض التي تميز الجزء السفلي من هذا النطاق، فإن تداخلات كبيرة يمكن أن تنتج بين إشارات المسيرات الطويلة والقصيرة.

3.4 مجموع الأساليب التي تستعمل تحويل الأسلوب

بالنسبة لحالات الانتشار التي لا يمكن فيها اعتبار خصائص الدليل الموجي أرض-أيونوسفير على أنه يتغير ببطء، يجب استعمال تقنيات لتحويل الأسلوب. والأمثلة التي تكون فيها إجراءات تحول الأسلوب ضرورية لحساب المجالات تنطبق على الإرسالات عبر خط الفاصل بين النهار والليل، أو عندما تحدث على مسير الانتشار تغييرات كبيرة في الإيصالية النوعية للتربة، مثلاً عند المرور من الأرض إلى البحر. ويسمح نموذج تحويل الأسلوب بعدد من الأساليب المرتبة عشوائياً على كل جانب من نقطة تقطع الدليل الموجي. كما يسمح هذا النظام بحساب المكونات الأفقية والعمودية للمجال الكهربائي عند ارتفاع عشوائي للدليل الموجي.

ويقوم برنامج تحويل الأسلوب (انظر المراجع الواردة في AGARDograph رقم 326، طبعة ج.ه. ريشتر، ص. 40-62، 1990) على نموذج الطبقات الممثل في الشكل 20. ويُفترض غياب التغير في الاتجاه y ولا يؤخذ في الاعتبار الانعكاس الذي يسببه عدم التجانس الأفقي. وإذا أخذنا هذه الفرضيات وكذلك فرضية موجة اتساع تقابل الوحدة في الأسلوب k الواردة في منطقة المرسل (الطبقة NTR)، فإن معامل تحويل الأسلوب المعمم a_k^p للطبقة من الرتبة p المصاحبة لتحويل الأسلوب k على الأسلوب j يمكن أن يعبر عنه على النحو التالي وفقاً للمعاملات المقابلة للطبقة من الرتبة $(p + 1)$ السابقة:

$$p = NTR - 1 \quad \text{for} \quad \sum_{j=1}^j a_{ik}^p I_{n,j}^{p,p} = I_{n,k}^{p,p+1}$$

(45)

$$1 \leq p < NTR - 1 \quad \text{for} \quad = \sum_{j=1}^j a_{jk}^{p+1} \left[-i k S_j^{p+1} (x_p - x_{p+1}) \right] I_{n,k}^{p,p+1}$$

حيث:

$$\frac{1}{2}(1-i) = i$$

: k رقم الموجة في الفضاء الحر: S_j جيب تمام الزاوية الذاتية للطبقة p : j العدد الإجمالي للأساليب المفترض أنها مهمة في تحديدات المجال الكلي.

ومن أجل حل نظام المعادلة (45)، من المهم تقييم التكامل:

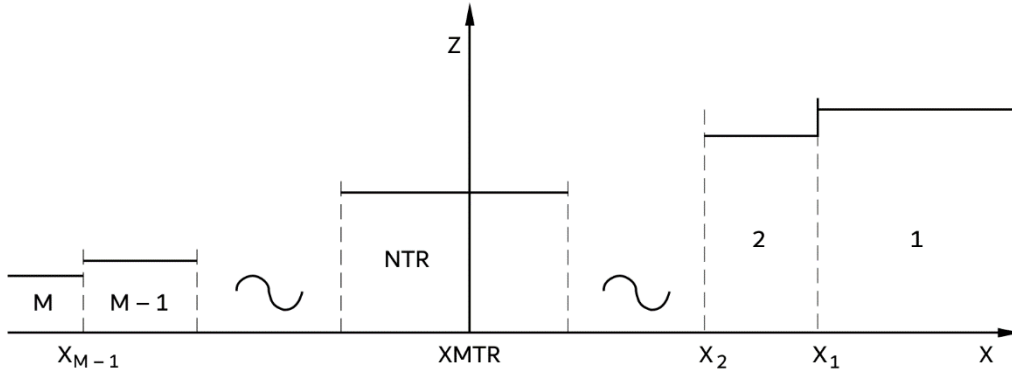
$$(46) \quad I_{j,k}^{m,p} = \int_{-\infty}^{\infty} A_j^{mt} \cdot G_k^p dz$$

حيث t تدل على العامل المساعد و G^p مصفوفة عمود ذات عناصر أربعة لكسب الارتفاع للمكونتين y و z للمجالات الكهربائية والمغناطيسية للأسلوب k في الطبقة p .

إن الحد A_j^m مصفوفة عمود ذات عناصر أربعة لكسب الارتفاع لدليل موجي مساعد مناسب.

الشكل 20

نموذج تحويل الأسلوب



P.0684-20

مرة أخرى وكما هو الحال في إجراء جمع الأسلوب WKB يمكن إجراء حساب المجال لمثيرات ثنائي الأقطاب الكهربائي ذات اتجاه عشوائي تقع عند ارتفاع ما في الدليل. هكذا يكون من الممكن معالجة مشاكل الانتشار فضاء-فضاء أو أرض-فضاء أو فضاء-أرض عند الموجات الميريامترية (VLF) والكيلومترية (LF) في قناة دليل موجي أفقي غير متجانس.

وهناك خياران متميزان في إجراء تحويل الأسلوب. يتعلق الخيار الأول بحسابات المجال (الاتساع والطور) بدلالة المدى لموقع ثابت لعدم التجانس الأفقي. ويسمح الخيار الثاني بحسابات المجال عند نقطة استقبال محددة على مسير قوس الدائرة العظمى بدلالة موقع عدم التجانس الأفقي (لا يكون هذا الخيار مفيداً إلا إذا كانت الإيصالية النوعية للتربة والمعلومات المغنطيسية الأرضية غير متغيرة على المسير). ويُعبر عن الاتساع بالوحدة dB فوق $1\text{m/V}\mu$ لمشعاع 1 kW ، مع الدلالة على الطور بالدرجات بالنسبة للفضاء الحر.

4.4 معلمات الأيونوسفير

إن معلمات الأيونوسفير الضرورية لحساب قيم المجال في نطاقات ترددات الموجات ELF/VLF/LF تُمثل بواسطة المنحنيات التالية، وهي تتوقف على ارتفاع الأيونوسفير Z : منحني الكثافة الإلكترونية ومنحني كثافة الأيونات (الموجبة والسالبة) ومنحني تردد الاصطدامات بين الجزيئات (الإلكترونات-الجزيئات المحايدة) ومنحني تردد الاصطدام بين الأيونات (الموجبة والسالبة) والجزيئات المحايدة).

إن الإيصالية الأيونوسفيرية ω_r معلمة سهلة، قائمة على المنحنيات المذكورة أعلاه وهي تتوقف على الارتفاع Z . وتُعطي هذه المعلمة بواسطة:

$$(47) \quad \omega_r(Z) = \frac{\omega_p^2(Z)}{v(Z)} = \frac{q^2}{\epsilon_0} \left[\frac{N_e(Z)}{m_e v_e(Z)} + \frac{N_+(Z)}{m_+ v_+(Z)} + \frac{N_-(Z)}{m_- v_-(Z)} \right]$$

حيث:

$\omega_p(Z)$: تردد البلازما

q : الحمولة الإلكترونية

ϵ_0 : سماحية الفضاء الحر

v_e : تردد الاصطدامات بين الإلكترونات والجزيئات المحايدة ($1-s$)

v_+ : تردد الاصطدامات بين الأيونات الموجبة والجزيئات المحايدة ($1-s$)

v_- : تردد الاصطدامات بين الأيونات السالبة والجزيئات المحايدة ($1-s$)

N_e : كثافة الإلكترونات (3-cm)

$$\begin{aligned}
N_+ &: \text{كثافة الأيونات الموجبة (cm}^{-3}\text{)} \\
N_- &: \text{كثافة الأيونات السالبة (cm}^{-3}\text{)} \\
m_e &: \text{كتلة الإلكترون} \\
m_+ &: \text{كتلة الأيونات الموجبة} \\
m_- &: \text{كتلة الأيونات السالبة.}
\end{aligned}$$

في معظم حالات انتشار الموجات الميريامترية (VLF) والكيلومترية (LF)، تكفي مراعاة منحنيات الكثافة الإلكترونية ومنحنى تردد الاصطدامات بين الإلكترونات والجزيئات المحايدة. وفي هذه الحالة، يمكن أن تُعتبر المعلمة $\omega_r(Z)$ للإيصالية على أن لها شكلاً أسياً:

$$(48) \quad \omega_r(Z) = \omega_0 \exp [\beta (Z - H')]$$

حيث:

$$\begin{aligned}
\beta &: \text{معلمة التدرج بالوحدات المعاكسة للارتفاع} \\
H' &: \text{الارتفاع المرجعي.}
\end{aligned}$$

إن المعلمات الأيونوسفيرية الضرورية كمعطيات دخول في برامج حساب الانتشار متعدد الأساليب بالحاسوب هي منحنى الكثافة الإلكترونية ومنحنى التردد الحقيقي للاصطدامات بين الإلكترونات والجزيئات المحايدة. ويمكن أن نعطي هذه الحدود علاقات أسية مع الارتفاع والدلالة عليها بواسطة β (km⁻¹) و H' (km).

تُحسب قيمة كثافة الإلكترونات $N(Z)$ (el/cm³) بدلالة الارتفاع Z (km) بواسطة المعادلة:

$$(49) \quad N(Z) = 1.43 \times 10^7 \exp \left\{ -\beta (Z - H') \right\} \exp \left\{ -\beta (Z - H') \right\} \text{ (el/cm}^3\text{)}$$

لأغراض الحسابات، يُعطي منحنى تردد الاصطدامات بواسطة:

$$(50) \quad \nu(Z) = \nu_0 \exp (-\alpha Z)$$

حيث:

$$\begin{aligned}
Z &: \text{الارتفاع (km)} \\
\nu_0 &: 1.82 \times 10^{11} \text{ اصطدام/ثانية} \\
\alpha &: 0.15 \text{ km}^{-1}.
\end{aligned}$$

تعطي هذه التركيبة من الكثافة الإلكترونية وتردد الاصطدامات منحنى الإيصالية الأيونوسفيرية الذي تعطيه المعادلة:

$$(51) \quad \omega_r(Z) = 2.5 \times 10^5 \exp [\beta (Z - H')]$$

تتبع فائدة هذا النموذج الأيونوسفيري البسيط من سهولة تطبيقه ومن كونه يسمح فعلاً بإنشاء نماذج معطيات مقيسة تجريبياً. يتم تحديد قيم المعلمتين β و H' بمقارنة المعطيات المقيسة ونتائج الحسابات النظرية بضبط معلمات هذه الأخيرة حتى الحصول على توافق جيد. يُحصل على طريقة المقارنة الأكثر مباشرة عندما تُجمع المعطيات المقيسة في عدد كبير من النقاط على مسير انتشار قوس الدائرة العظمى الذي يتضمن المرسل. وتُجمع المعطيات بسهولة أكبر من على متن طائرة.

يجب عموماً اعتبار أن النماذج الأيونوسفيرية المحددة بواسطة الإجراء سابق الذكر تمثل أيونوسفيراً متوسطاً، لأن النمذجة تقوم على افتراض أن الأيونوسفير كان ساكناً خلال أي فترة تحليق للطائرة. ويهدف إجراء تكييف المعطيات إلى اكتشاف مخطط محسوب للاتساع بدلالة المسافة يتوافق مع المخطط واسع النطاق للمعطيات المقيسة. ويراعى في هذه الظروف عدد كبير من تغيرات الاتساع المنخفضة في قيمة متوسطة. ومن الممكن أن يتبين أن منحنيات أشكال أكثر تعقيداً من الشكل الأسّي تتكيف أكثر مع المعطيات المقيسة في بعض الأحيان، لكن ربما أن مسيرات الانتشار موضوع الدراسة طويلة جداً، فإن أي منحنى مصمم للتكيف أكثر مع المعطيات يكون في الحقيقة منحنى متوسطاً لمجموع المسير.

يقترح تحليل المعطيات المقاسة المتيسرة المعلنات الأيونوسفيرية التالية للتنبؤات بانتشار الموجات الميريامترية (VLF) والكيلومترية (LF). بالنسبة للنهار، يستعمل $\beta = 0,3$ و $H' = 74$ لكل خطوط العرض وكل الفصول. والأيونوسفير الليلي أكثر تعقيداً لأن القيمة β تتغير خطياً مع التردد، من 0,3-10 kHz إلى 0,8-60 kHz. ويتميز الأيونوسفير الليلي عند خطوط العرض المنخفضة والمتوسطة بقيمة H' تساوي 87 km بينما تساوي H' 80 km بالنسبة للأيونوسفير القطبي. ويقدم الجدول 3 قيم معلمات الإرسال هذه للتردد 30 kHz. ويوضح هذا الجدول الانتقالات كما تُحدد على طول مسير افتراضي يعبر القطب من النهار إلى الليل.

الجدول 3

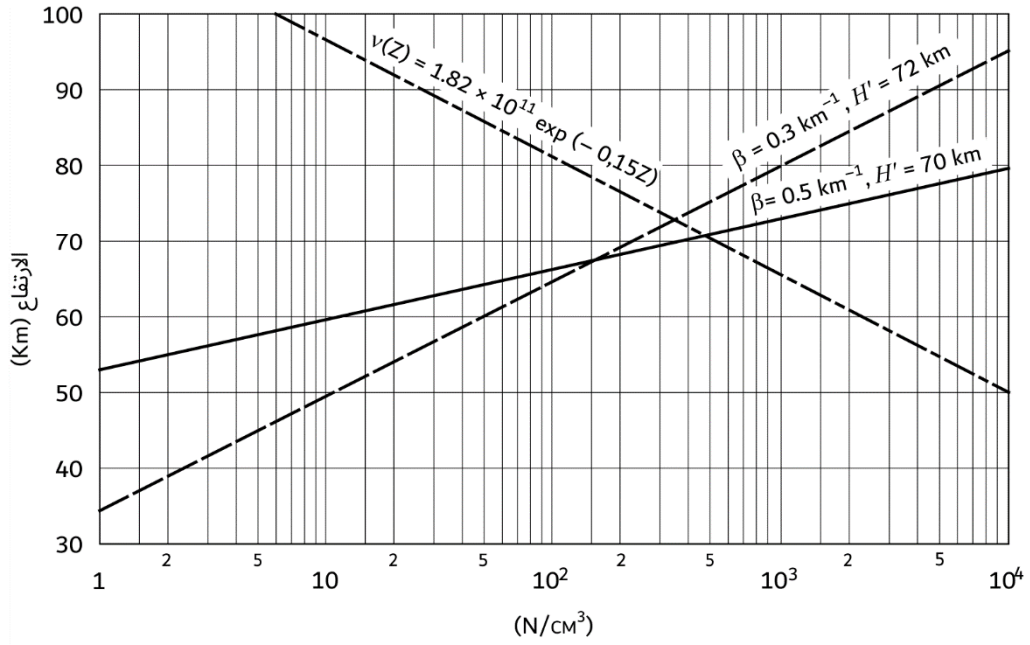
معلمات انتقال المظهر الجانبي للأيونوسفير عند 30 kHz

الميل المغنطيسي، D	H' (km)	β	الزاوية السمتية للشمس، χ
$D < 70$	74,0	0,3	$\chi < 90,0$
$70 < D < 72$	76,2	0,33	$90,0 < \chi < 91,8$
$72 < D < 74$	78,3	0,37	$91,8 < \chi < 93,6$
$74 < D < 90$ (Pole)	80,5	0,40	$93,6 < \chi < 95,4$
$72 < D < 74$	82,7	0,43	$95,4 < \chi < 97,2$
$70 < D < 72$	84,4	0,47	$97,2 < \chi < 99,0$
$D < 70$	87,0	0,50	(ليلاً) $99,0 < \chi$

تتوضح العلاقة المميزة بدلالة الارتفاع لعدد معين من المنحنيات الأسيية للنهار في الشكل 21 ولليل في الشكل 22. وفيما يخص انتشار الموجات (ELF)، تُمثل منحنيات كثافة الإلكترونات والأيونات في الشكل 23. ترد كذلك في الجدولين 4 و 5 دلالات عن منحنيات الاصطدامات بين الإلكترونات والأيونات.

الشكل 21

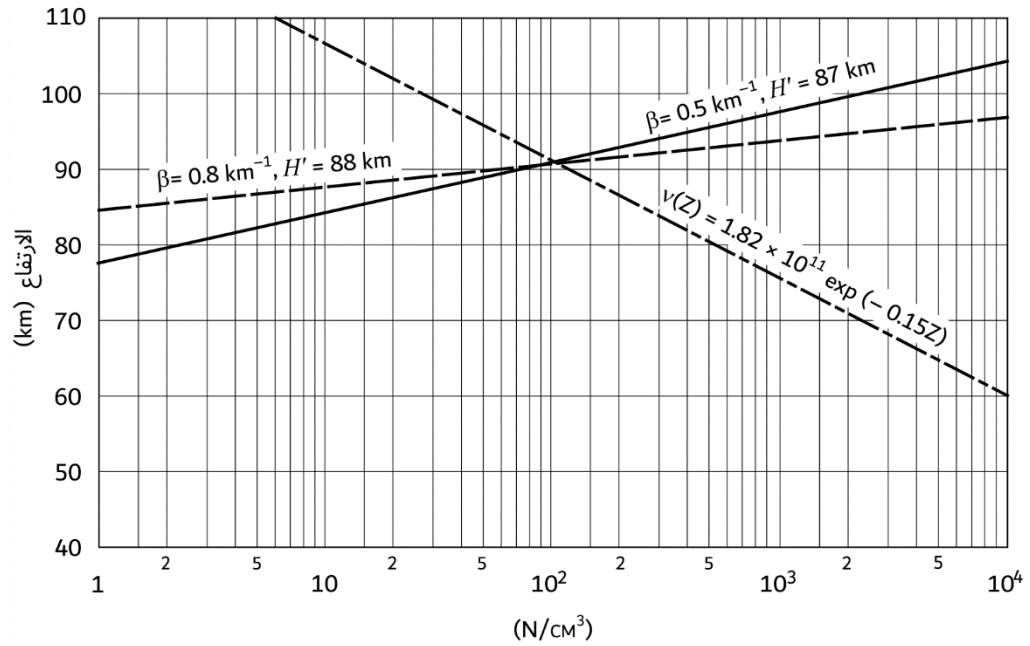
منحنيات الكثافة الإلكترونية وتردد الاصطدامات خلال النهار



P.0684-21

الشكل 22

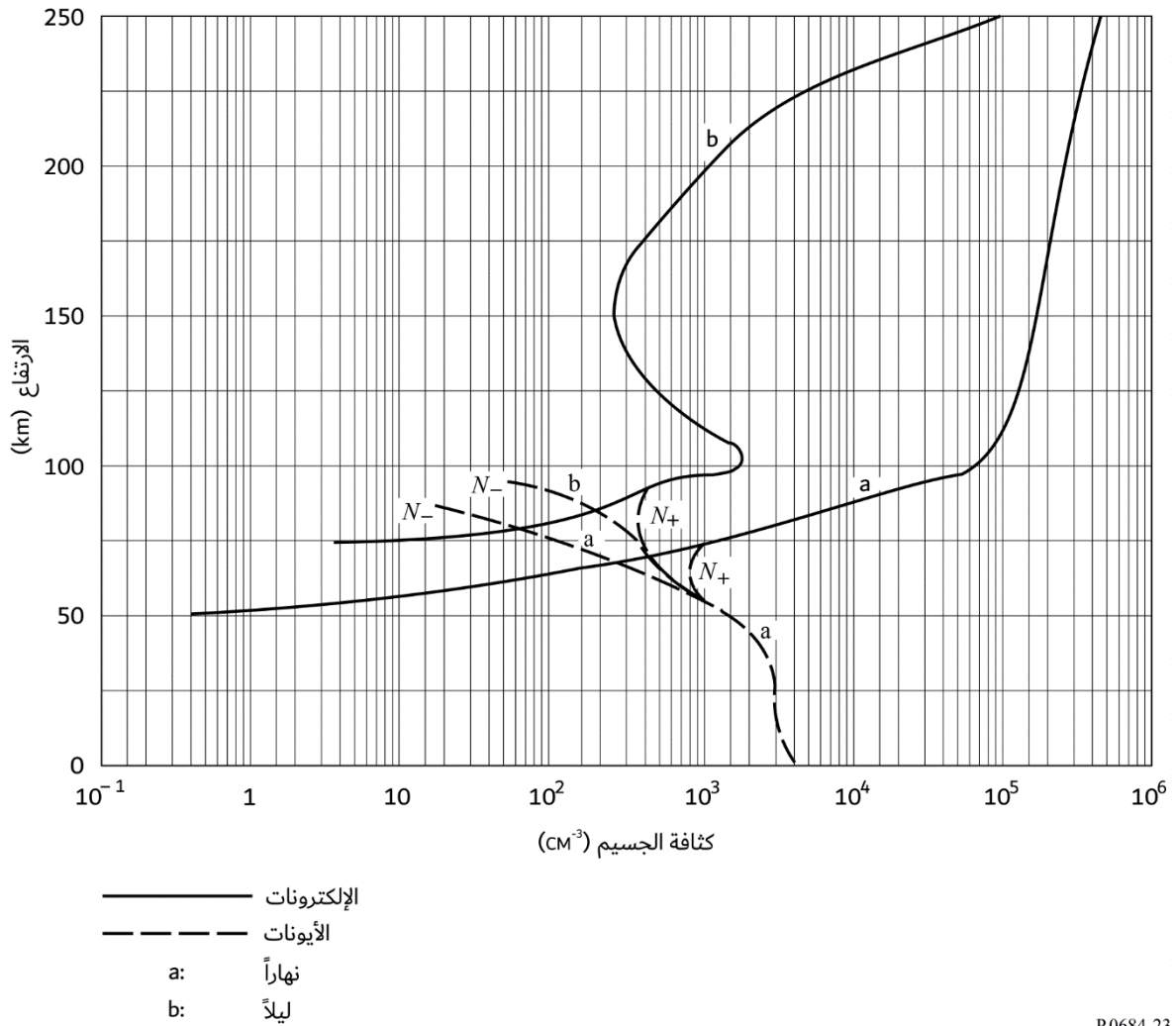
منحنيات الكثافة الإلكترونية وتردد الاصطدامات خلال الليل



P.0684-22

الشكل 23

منحنيات مكونات الأيونوسفير (نهاراً وليلاً)



الجدول 4

ترددات الاصطدامات الملاحظة خلال النهار في الأيونوسفير بين الإلكترونات والأيونات (s⁻¹) بدلالة الارتفاع

الأيونات السالبة	الأيونات الموجبة	الإلكترونات	الارتفاع (km)
1,02	1,02	$6,6 \times 10^2$	260
2,00	2,00	$5,3 \times 10^2$	230
3,10	3,10	$4,8 \times 10^2$	210
4,00	4,00	$5,0 \times 10^2$	200
$1,30 \times 10$	$1,30 \times 10$	$6,0 \times 10^2$	180
$2,40 \times 10$	$2,40 \times 10$	$8,0 \times 10^2$	170
$9,00 \times 10$	$9,00 \times 10$	$1,6 \times 10^3$	150
$6,00 \times 10^2$	$6,00 \times 10^2$	$1,0 \times 10^4$	120
$1,60 \times 10^4$	$1,60 \times 10^4$	$3,9 \times 10^4$	100
$2,14 \times 10^{10}$	$2,14 \times 10^{10}$	$4,3 \times 10^{11}$	0

الجدول 5

ترددات الاضطرابات الملاحظة خلال الليل في الأيونوسفير بين الإلكترونات والأيونات (f^oF_2) بدلالة الارتفاع

الأيونات السالبة	الأيونات الموجبة	الإلكترونات	الارتفاع (km)
$4,50 \times 10$	$4,50 \times 10$	$1,05 \times 10^2$	250
$9,00 \times 10$	$9,00 \times 10$	$3,50 \times 10$	225
1,00	1,00	$3,00 \times 10$	220
1,30	1,30	$3,30 \times 10$	210
2,00	2,00	$4,50 \times 10$	200
$4,50 \times 10$	$4,50 \times 10$	$1,60 \times 10^3$	150
$3,00 \times 10^2$	$3,00 \times 10^2$	$1,00 \times 10^4$	120
$8,00 \times 10^3$	$8,00 \times 10^3$	$3,90 \times 10^4$	100
$1,07 \times 10^{10}$	$1,07 \times 10^{10}$	$4,30 \times 10^{11}$	0

5.4 المعلمات المغنطيسية الأرضية والفيزيائية الأرضية

هناك حاجة إلى معلمات أخرى لحساب سوية الإشارات في نطاقات الموجات الكيلومترية (LF) والميريامترية (VLF) والموجات الأطول (ELF): تلك التي تصف اتجاه وشدة المجال المغنطيسي الأرضي على طول مسير الانتشار وكذلك تلك التي تعطي قيمة ثابت العزل الكهربائي المعقد للأرض بدلالة التردد المستعمل للانتشار.

تتمثل المعلمات التي تصف المجال المغنطيسي الأرضي في اتساع المجال المغنطيسي الأرضي والسمت المغنطيسي (بالدرجات شرق الشمال) لاتجاه الانتشار وزاوية الميل المقيسة بالنسبة للمستوي الأفقي لمتجه المجال المغنطيسي. تتغير هذه المعلمات على طول مسير الانتشار وتُدْمَج هذه التغيرات في الصيغة WKB أو في صيغ تحويل الأسلوب.

تُعْطَى السماحية النسبية المعقدة للأرض، N_g ، بواسطة:

$$(52) \quad N_g = \epsilon / \epsilon_0 - i \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$$

حيث:

σ : الإيصالية النوعية للتربة

ϵ / ϵ_0 : السماحية النسبية للأرض

ϵ_0 : سماحية الفضاء الحر

ω : التردد الزاوي للانتشار.

يعطي الجدول 1 القيم الموصى بها لهذه المعلمات.

5 مناقشة

يجب أن تُستعمل طريقتا أسلوب "القفزات" والأدلة الموجية موضوعا الدراسة التفصيلية في هذه التوصية إلى أن تيسر طرائق أفضل للتنبؤ بشدات المجال للنطاقات الأقل من 150 kHz تقريباً. وبينما يمكن استعمال برنامج الانتشار حسب أسلوب الأدلة الموجية الموصوفة في هذه التوصية للتنبؤ بمجال الموجات الأطول (ELF) (50-3 000 Hz)، فإنه قد تم تطوير طرائق أبسط للجزء الأدنى من هذا النطاق.

وترد في الملحق 2 مناقشة مقتضبة لدقة الطرائق. ويعطي الملحق 3 بعض النتائج المهمة التي تم الحصول عليها باستعمال برنامج التنبؤ بالانتشار بأسلوب الأدلة الموجية، وذلك بهدف توضيح فائدة هذا البرنامج.

الملحق 1

مثال عن حساب كامل للمجال (الاتساع والطور) بتطبيق طريقة الانتشار
بالقفزات الواردة في الفقرة 2

من المطلوب حساب المجال المتوقع نهاراً في الصيف خلال الدورة الشمسية الدنيا في الظروف التالية باستعمال ثنائيات الأقطاب العمودية القصيرة وهوائيات الاستقبال:

$$d = 1911 \text{ km} \quad \text{طول المسير}$$

$$f = 80 \text{ kHz} \quad \text{التردد}$$

$$\begin{cases} \sigma = 2 \times 10^{-3} \text{ S/m} \\ \varepsilon = 15 \varepsilon_0 \end{cases} \quad \text{موقع الإرسال في البر}$$

$$\begin{cases} \sigma = 5 \text{ S/m} \\ \varepsilon = 80 \varepsilon_0 \end{cases} \quad \text{موقع الاستقبال في البحر}$$

$$p_t = 0,4 \text{ kW} \quad \text{القدرة المشعة}$$

تتمثل المراحل المتتالية للحساب فيما يلي:

المرحلة	المعلومة	الشكل	الحدود المحسوبة	القيمة
1	$p_t = 0,4 \text{ kW}$		$V_u = 300\sqrt{0,4}$	$= 190 \text{ V}$
2	$d = 1911 \text{ km}$	ψ		$\approx -0,36^\circ$
3	$\psi = -0,36^\circ$	i		$= 81^\circ$
4	$\psi = -0,36^\circ$	F_t		$= 0,36$
5	$d = 1911 \text{ km}$	F_r		$= 0,67$
6	$d = 1911 \text{ km}$	$L - d$		$= 46 \mu\text{s}$
7	$c = 3 \times 10^5 \text{ km/s}$		$L = 1911 + (46 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^5)$	$= 1925 \text{ km}$
8	$d = 1911 \text{ km}$	D		$= 2,16$
9	$f = 80 \text{ kHz}$		$f \cos i = 80 \cos 81^\circ$	$= 12,5 \text{ kHz}$
10	$i = 81^\circ$	$\ R\ $		$= 0,11$
	الدورة الشمسية الدنيا، النهار (الصيف)			
9		E_s		$= 11,4 \times 10^{-3} \text{ mV/m}$
10	$h = 70 \text{ km}$ (النهار)	التأخر		$= 67 - 47$
	$h = 90 \text{ km}$ (الليل)			$= 20 \mu\text{s}$
	$d = 1911 \text{ km}$ (قفزة واحدة)			$= 1,6 \text{ cycle}$
				(i.e. 576°)
				at 80 kHz

الملحق 2

دقة الطرائق

ما زال من الضروري التحقق على الصعيد العالمي من طريقة القفزات لأنها قامت أساساً على ملاحظات عند خطوط عرض متوسطة في الإقليمين 1 و 2 للاتحاد الدولي للاتصالات. غير أن الطريقة سمحت بالتنبؤ بدقة جيدة بقيم وسطية لشدات المجال عند خطوط عرض مرتفعة في الإقليم 2. ويمكن أن تُستعمل طريقة القفزات للموجات الكيلومترية (LF) والهكثومترية (MF) لترددات تقع ما بين 60 و 150 kHz تقريباً.

مراعاة عامل الهوائي في السوية العمودية، وذلك باستعمال المعلومات الواردة في هذه التوصية. عندما تُستعمل هذه الطريقة، يجب مراعاة انتشار الموجة الأرضية (التوصية ITU-R P.368).

ويمكن استعمال طريقة الدليل الموجي للتنبؤ بشدات المجال حتى حوالي 60 kHz، بإعطاء المعلمتين الأيونوسفيريتين β و H' القيمتين 0,3 و 74 على التوالي للمسيرات النهارية، بانتظار الحصول على نتائج إضافية تأخذ في الاعتبار التغيرات حسب الفصل والنشاط الشمسي والتردد. ويرد في هذه التوصية وصف أكثر تفصيلاً لنموذج ليلي بدلالة التردد وخط العرض.

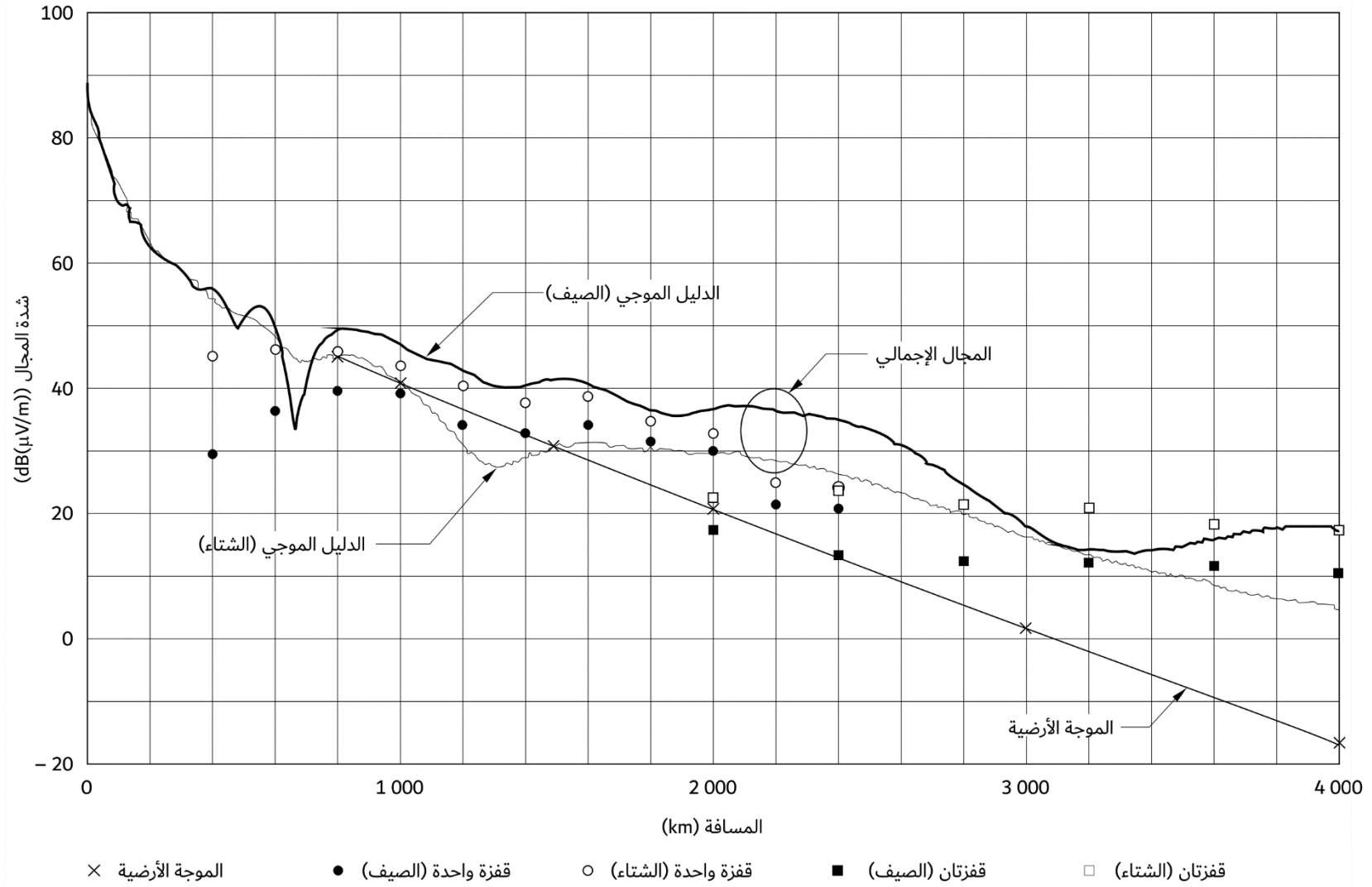
وبما أن الحدود الدنيا للدليل الموجي هي الأرض، يجب مراعاة إيصالية الأرض. وترد خرائط الإيصالية التي تستند بصورة كبيرة إلى الخصائص الجيولوجية في التوصية ITU R P.832. والشكل 43 عبارة عن خريطة عالمية للإيصالية عند الموجات الهكثومترية (MF) (يمكن تكملتها بالخرائط القطرية الفردية) وهو أنسب للاستعمال مع طريقة القفزة الموجية. والأشكال من 1 إلى 6 عبارة عن خرائط قارية عند الموجات الميريامترية (VLF)، مناسبة للاستخدام مع طريقة الدليل الموجي عند الترددات الأدنى.

ويضم الدليل الصادر عن قطاع الاتصالات الراديوية الخاص بالأيونوسفير وآثاره على انتشار الموجة الراديوية طرائق أخرى لحساب شدة المجال ليلاً للموجات الكيلومترية LF وما فوقها حتى 1 705 kHz. ويتعين مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها بالطريقة المقترحة في هذه التوصية (طريقة القفزات) مع تلك الناتجة بالطرائق الأخرى. ولا بد أن شدات المجال المتنبأ بها بالطرائق البديلة تكون متوافقة عندما تكون الترددات والمسافات متشابهة.

ويمكن أن تكون القيم النهارية للموجات الأيونوسفيرية الكيلومترية التي تنتشر في الشتاء أعلى بمقدار 20 dB على الأقل من مقابلتها التي تنتشر في الصيف ولا تقل إلا بمقدار 10 dB عن القيم الليلية. وقيم الموجات الأيونوسفيرية الكيلومترية في الليل أكثر ارتفاعاً في الصيف والشتاء وأكثر انخفاضاً في الربيع والخريف. وظهرت قد تبلغ شدة مجال الموجات الأيونوسفيرية الكيلومترية ارتفاعاً مدهشاً خاصة خلال أشهر الشتاء. أما شدة المجال الوسطي السنوي النهاري أقل عموماً بمقدار 20 dB من نظيره الليلي.

يمكن أن تُستعمل طريقة القفزات للتنبؤ بشدة مجال الموجات الهكثومترية (MF) والكيلومترية (LF) حتى تردد حوالي 60 kHz. ويمكن أن تُستعمل طريقة أسلوب الدليل الموجي للتنبؤ بشدات مجال الموجات VLF و LF، حتى تردد حوالي 60 kHz. ويبين الشكل 24 شدة المجال نهاراً المتنبأ بها بالطريقتين لتردد 60 kHz (لسوء الحظ ليس هناك أي معطيات مقيسة للمقارنة معها). وتُحسب المنحنيات المتصلة المسماة صيف وشتاء بواسطة برنامج التنبؤ بأسلوب الدليل الموجي واستعمال المعلومات في الشكل 21 للصيف ($H' = 70 \text{ km}$ و $\beta = 0,5 \text{ km}^{-1}$) وللشتاء ($H' = 72 \text{ km}$ و $\beta = 0,3 \text{ km}^{-1}$). وتمثل الدوائر المفتوحة والمغلقة على التوالي شدات المجال الصيفية والشتوية المحسوبة بطريقة القفزات. ولم تكن هناك أي محاولة لتلميس المعطيات في الفاصل الذي تتراكب فيه المسافات حيث تُحجب الموجة الأيونوسفيرية ذات قفزة واحدة وتهيمن الموجة الأيونوسفيرية ذات قفرتين. وتظهر الموجة الأرضية على حدة.

الشكل 24



تسمح طريقة الدليل الموجي بحساب المجال الكلي والموجة الأرضية والموجة الأيونوسفيرية. وتسمح طريقة القفزات بتقييم اتساع الموجة الأيونوسفيرية فقط. لذا يجب أن تُدرج الموجة الأرضية في طريقة القفزات إذا رغبتنا في إجراء مقارنات. وقد استعملت طريقة الدليل الموجي للتنبؤ بالمجال بدلالة المسافة لمسير حقيقي انطلاقاً من مرسل افتراضي في فانكوفر يعبر كندا والولايات المتحدة الأمريكية من الشرق إلى الغرب. والإيصالية النوعية للتربة متغيرة على طول هذا المسير. وتُفترض طريقة القفزات أرضاً متوسطة، بإيصالية 3 mS/m على طول المسير.

إن الفرق بين شدات المجال النهارية، المقيسة للصيف والشتاء حسب طريقة القفزات، يتناقص عندما يتناقص التردد الفعال ($f_{\text{cos } i}$). وكان برنامج التنبؤ بالانتشار بأسلوب الدليل الموجي المستعمل لهذه المقارنة يتنبأ بتغير فصلي معاكس. وكان هذا البرنامج يستعمل المعلمتين (β و H') الواردتين في الشكل 21. مما يفسر الحذر المذكور أعلاه. ولا يمكن التنبؤ بالتغير الفصلي ويوصى باستعمال القيمتين 0,3 و 74 على التوالي للمعلمتين β و H' لكل الفصول.

الملحق 3

أمثلة حسابات تستعمل طريقة أساليب الدليل الموجي

يتضمن هذا الملحق بعض الحسابات لتوضيح أن برنامج الانتشار حسب أساليب الدليل الموجي (انظر الفقرة 3.4) يتنبأ بشدات مجال متوافقة مع الافتراضات المتعلقة بخصائص مسير (إيصالية أرضية) واتجاه المسير بالنسبة للمجال المغنطيسي.

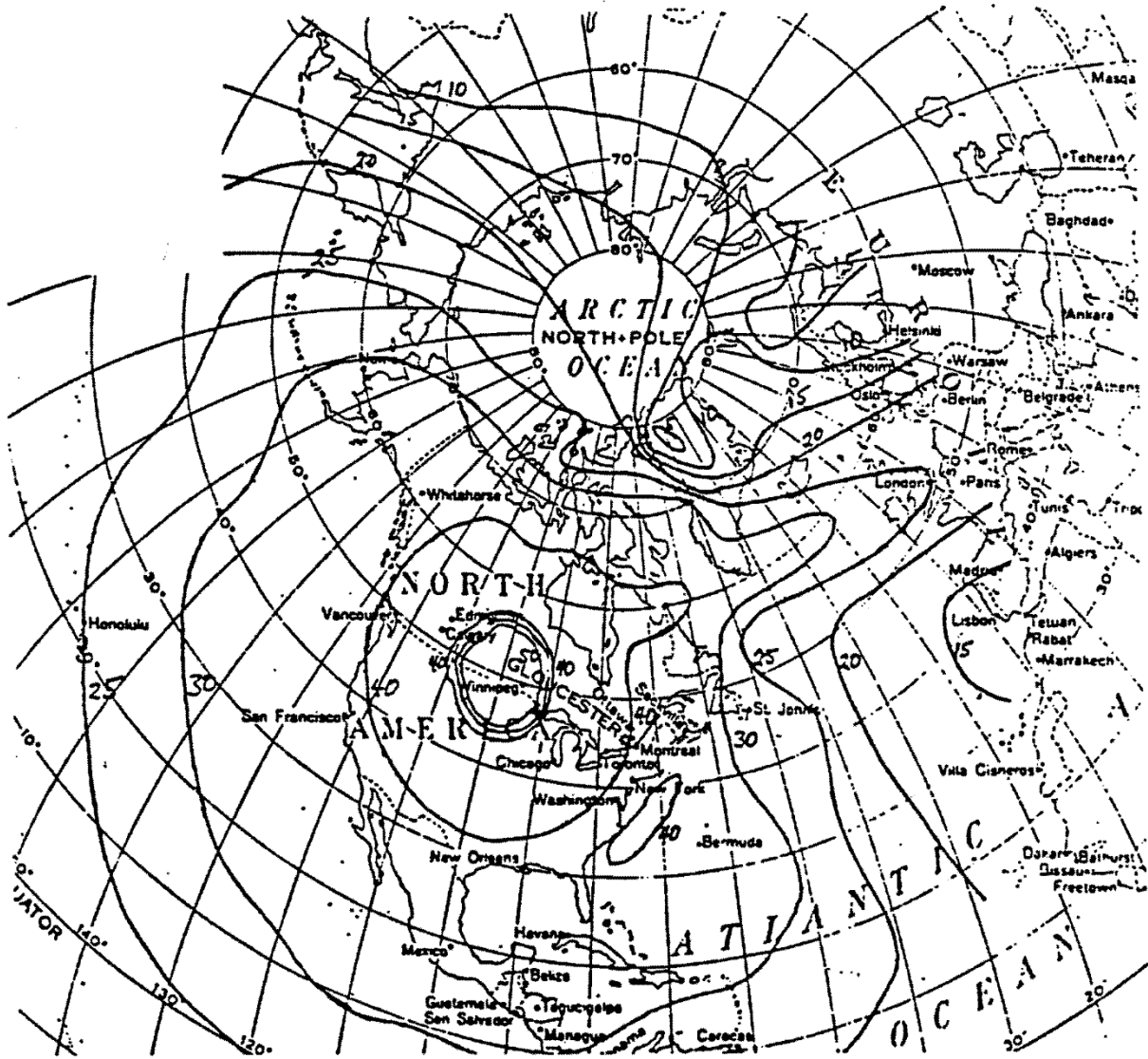
يمثل الشكل 25 تغطية نصف الكرة الشمالي لمرسل افتراضي للموجات الميريامترية (VLF) الواقعة في وسط كندا. وتُجرى الحسابات (المجال بالوحدة $(\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m}))$) لقدرة 1 kW مشعة عند تردد 24 kHz. ويلاحظ أن الخصائص على العموم متوافقة مع ما كان متوقعاً. والانتشار من الشرق إلى الغرب أحسن منه من الغرب إلى الشرق. ونلاحظ كذلك الشذوذ المهم في أكفة شدة المجال التي تنتج عن الإيصالية المنخفضة جداً لغرينلاندا. ونلاحظ أيضاً زيادة شدات المجال الناتجة عن الإيصالية الجيدة لماء البحر في خليج هودسون، بالمقارنة مع الإيصالية السيئة للأراضي القطبية الشمالية المحيطة به.

يبين مثال آخر أن الإيصالية النوعية للتربة على طول مجموع مسير الانتشار مهمة. أما بالنسبة لطريقة القفزات فتكون التربة الواقعة في جوار هوائي الإرسال والاستقبال وحدها مهمة. ويقدم الشكلان 27 و 28 تنبؤاً مفصلاً للمجال بدلالة المسافة، لثلاثة ترددات (15 و 25 و 35 kHz) لمسير افتراضي من هاليفاكس عبر أراضي لورانتان شيلد وشبه جزيرة أونغافا ذات الإيصالية السيئة (المسير مبين على الشكل 26). والإيصالية النوعية للتربة السيئة على هذا المسير الذي يعبر لورانتان شيلد في كندا تؤثر في الترددات بطريقة مختلفة. ويظهر أن تردد إرسال يبلغ 25 kHz هو الأحسن لانتشار نهارى على هذا المسير (الشكل 27). وتكون الاختلافات حسب الترددات أقل أهمية في الليل (الشكل 28).

من الواضح أن التفاصيل المقدمة في هذه الأشكال لم تكن ليُتنبأ بها لولا توفر برنامج للتنبؤ بالانتشار.

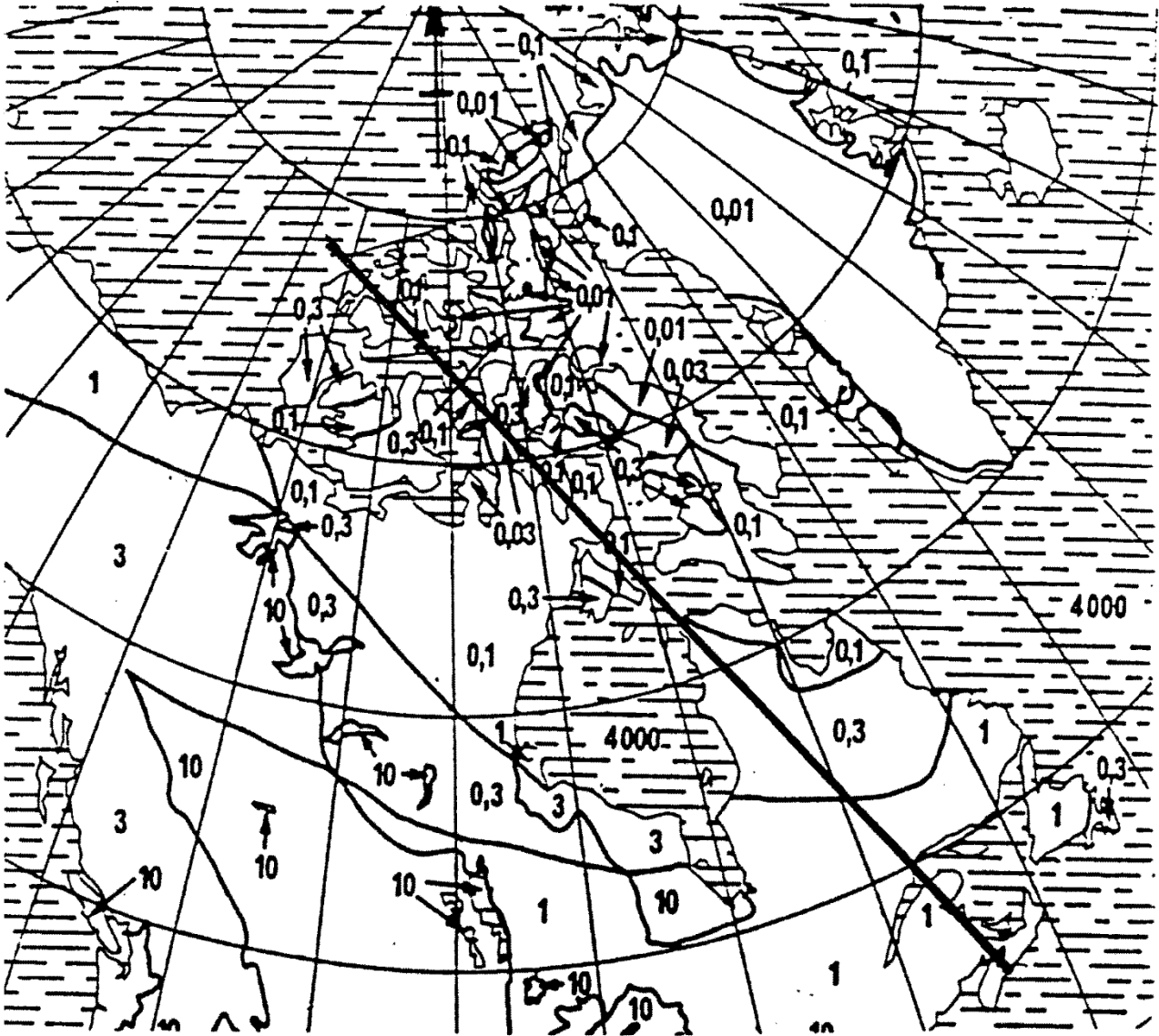
الشكل 25

أكفة قيم شدة المجال لقوة مشعة ذات 1 kW
 مع كون المرسل الافتراضي يقع في وسط كندا
 (التردد: 24 kHz، ليوم صيف)



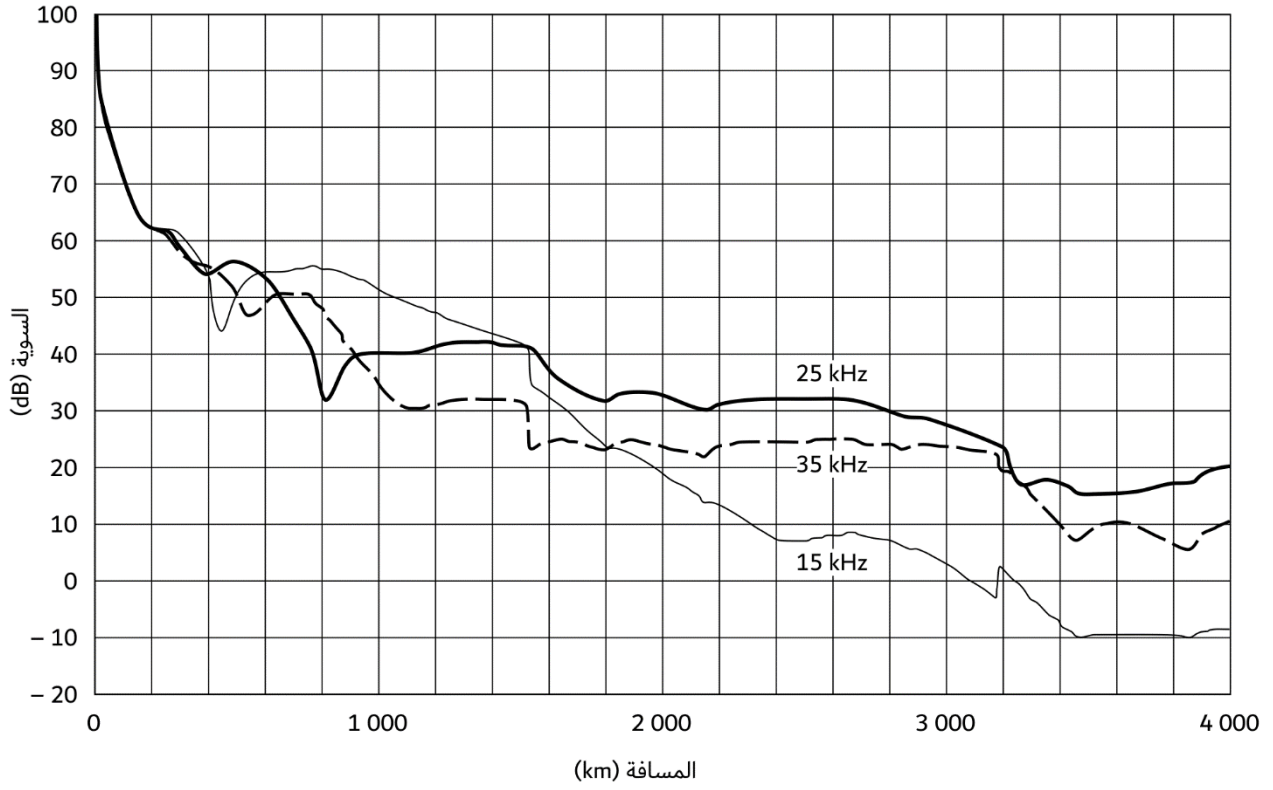
الشكل 26

خريطة الإيصالية النوعية للتربة (mS/m)
للموجات الميريامترية (VLF)، لكندا والقطب الشمالي



الشكل 27

شدة المجال بدلالة المسافة في اتجاه N 340° لقدرة 1 kW مشعة بمرسل افتراضي يقع في هاليفاكس،
لثلاثة ترددات، ليوم صيف. يُمثل مسير الإرسال في الشكل 26



الشكل 28

شدة المجال بدلالة المسافة في اتجاه N °340 لقدرة 1 kW مشعة بمرسل افتراضي يقع في هاليفاكس،
لثلاثة ترددات، لليلة صيف. يُمثل مسير الإرسال في الشكل 26

