التوصيـــة ITU-R P.684-4

التنبؤ بشدة المجال عند الترددات تحت 150 kHz تقريباً

(المسألة ITU-R 225/3)

(2005-2003-2001-1994-1990)

إن جمعية الاتصالات الراديوية التابعة للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أنه من الضروري إعطاء تعليمات للمهندسين لتصميم خدمات الاتصالات الراديوية في نطاق الترددات 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 و000 1 kHz تقريباً؛

– طريقة "أسلوب الدليل الموجي" للترددات تحت 60 kHz القائمة على نموذج نظري للأرض والأيونوسفير والتي تستعمل معلمات نماذج أيونوسفيرية مستنتجة من معطيات انتشار؛

– طريقة لأغراض نطاق الترددات المنحصرة بين 150 و700 1 kHz يرد وصفها في التوصية ITU-R P.1147،

توصي

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

1 مقدمة

هناك طريقتان للقيام بحساب نظري لشدة مجال الإشارات في الموجات ELF وVLF وLF.

ويلاحظ أن معطيات هذه التوصية تضم قيماً $f \cos i$ تتجاوز 150 kHz. 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 الكهرمغنطيسية بين مرسل ومستقبل معينين، كما هو الحال بالنسبة للموجات الديكامترية (HF).

يجب أن تُستعمل هذه الطريقة للموجات الكيلومترية (LF)، وبالنسبة للمسافات تحت 1000 km للموجات الميريامترية (VLF). وتعتبر الطريقة أن الإرسال الراديوي يتم حسب مسيرات معينة محددة بواسطة انعكاس أيونوسفيري واحد أو أكثر، وقفاً 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 والمغنطيسية الأرضية لمسيرات الإرسال، والساعة والفصل وفترة الدورة الشمسية. ومن الضروري كذلك معرفة الخصائص الكهربائية (الإيصالية 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 عند المسافات الأكبر من km 1 000. وفي هذه الطريقة، يحلل الانتشار على أنه مجموع الموجات المقابلة لكل من الأنماط المختلفة من الانتشار في الدليل الموجي أرض-أيونوسفير، بالتماثل مع أسلوب محدد للأدلة الموجية في الموجات الصغرية. ويتوقف اختيار الطريقة التي يجب استعمالها لحساب المجال على اعتبارات عملية لحسابات رقمية.

3.1 في حالة الموجات الميريامترية (VLF)، في مسافات أقل من km 1000 وبالنسبة للموجات الكيلومترية على العموم تتقارب سلسلة الأساليب ببطء وعندئذ تستوجب الحسابات القيام بإضافة متجهية لعدد كبير من المكونات. من جانت 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 والهكتومترية في المسافات البعيدة.

أما بالنسبة للموجات الميريامترية عند المسافات الأكبر من km 1 000، 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. لذلك فإن نظرية الأساليب أكثر ملاءمة لحالة الانتشار هذه. ويمكن وصف انتشار الموجات الطويلة جداً ايضاً 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.

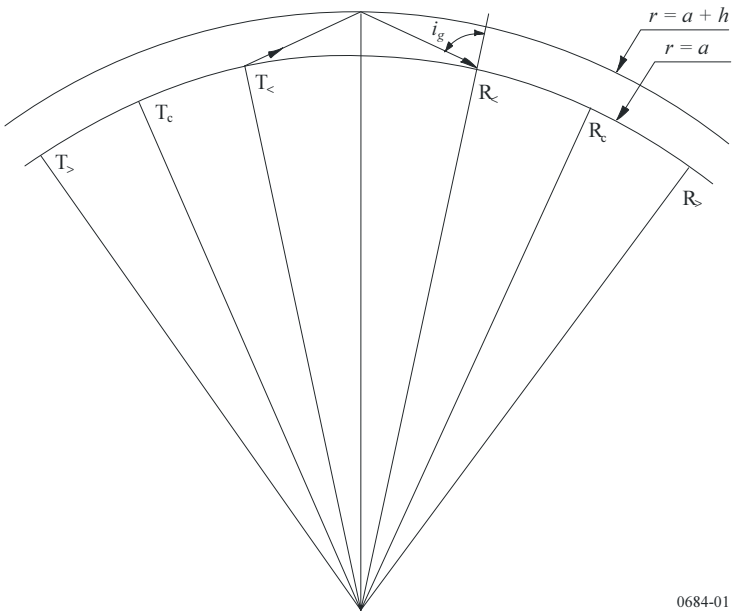
يتم حساب مجال الموجة الأيونوسفيرية بتطبيق نظرية الأشعة في المناطق التي تطبق فيها طرائق البصريات الهندسية وبإدماج آثار الانعراج أو بتطبيق نظرية المجال الكامل في المناطق حيث البصريات لم تعد صالحة.

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 $R_<$ مضاءً بالموجة الأيونوسفيرية التي خضعت لانعكاس من هوائي الإرسال الواقع عند $T_<$ حيث i_g أصغر من $\pi/2$. وفي الحالة الثانية، يقع الهوائيان عند النقطتين الحرجتين T_c وR_c حيث $i_g = \pi/2$. أما في الحالة الثالثة فيقع الهوائيان عند $T_>$ و$R_>$، 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)



2.2 حساب شدة المجال حسب طريقة مسير الأشعة

يمكن التعبير عن شدة المجال الكهربائي التي يشعها ثنائي أقطاب كهربائي قصير بواسطة:

$$V_u = 300 \sqrt{p_t} \quad \text{V} \tag{1}$$

حيث p_t تدل على القدرة المشعة (kW).

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

$$E_t = \frac{V_u}{L} \cos\psi \, {}_{\|}R_{\|} \, D \, F_t \quad \text{mV/m} \tag{2}$$

حيث:

L: طول مسير الموجة الأيونوسفيرية (km)

${}_{\|}R_{\|}$: معامل الانعكاس الأيونوسفيري الذي يعطي نسبة مكونات المجال الكهربائي الموازية إلى مستوي الورود

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 عروي صغير في المستوي يقع على سطح الأرض، فإن شدة المجال الفعالة للموجة الأيونوسفيرية تُعطى بواسطة:

$$E_s = \frac{2V_u}{L} \cos\psi \, {}_{\|}R_{\|} \, D \, F_t \, F_r \quad \text{mV/m} \tag{3}$$

للاستقبال على هوائي عمودي قصير، تتحول المعادلة 3 إلى:

$$E_s = \frac{2V_u}{L} (\cos \psi)^2 \, {}_{||}R_{||} \, D \, F_t \, F_r \qquad \text{mV/m} \tag{4}$$

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 قفزتين، يمكن لشدة المجال المستقبلة بواسطة هوائي عروي للاستقبال أن تُمثل ببساطة كالتالي:

$$E_s = \frac{2V_u}{L} \cos \psi \, {}_{||}R_{1||} \, {}_{||}R_{2||} \, D^2 \, D_G \, {}_{||}R_{g||} \, F_t \, F_r \qquad \text{mV/m} \tag{5}$$

حيث:

D_G: عامل التباعد الناتج عن الأرض الكروية، يساوي تقريباً D^{-1}

${}_{||}R_{g|}$: معامل الانعكاس الفعال لأرض موصلة محدودة

L: الانتشار الإجمالي على مسير الشعاع ذي القفزتين

${}_{||}R_{1||}$ و${}_{||}R_{2||}$: معاملا الانعكاس الأيونوسفيري للانعكاسين الأول والثاني.

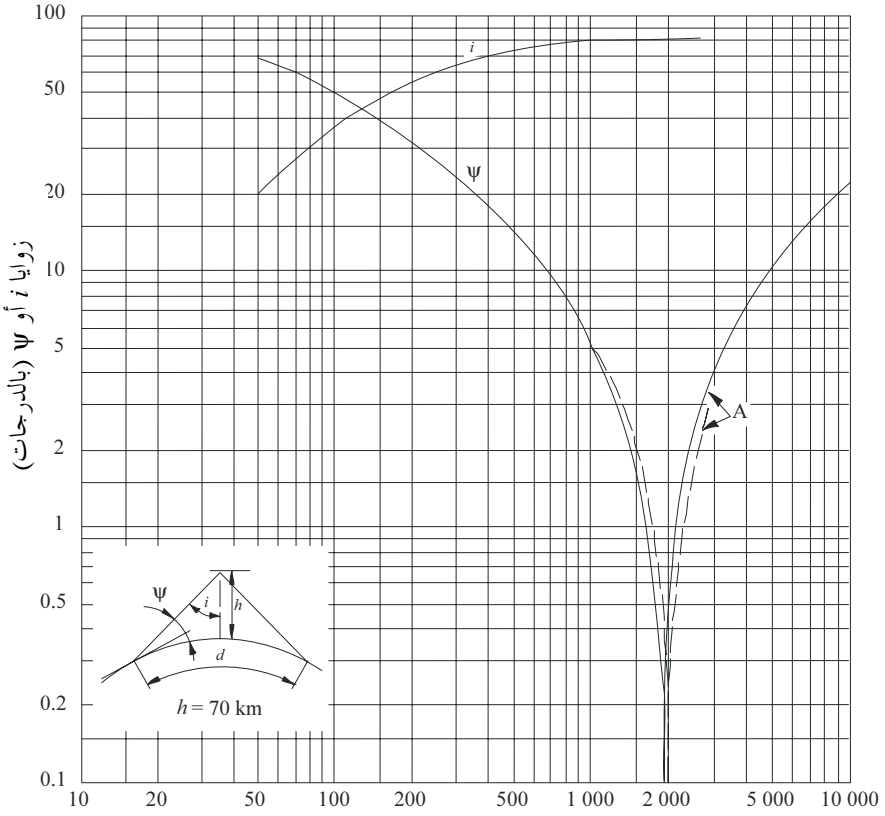
على العموم، لا تكون معاملات الانعكاس الأيونوسفيري متساوية، لأن درجة استقطاب الموجات الواردة تختلف. ومع ذلك، فإن الطريقة البسيطة المقترحة هنا لحساب شدات المجال تسمح بالحصول على ما يكافئ قيمتي الانتشار ${}_{||}R_{1|}$ و${}_{||}R_2$ كتقدير أولي لزوايا ورود جد مائلة.

1.2.2 زوايا الارتفاع والورود الأيونوسفيري

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

الشكل 2

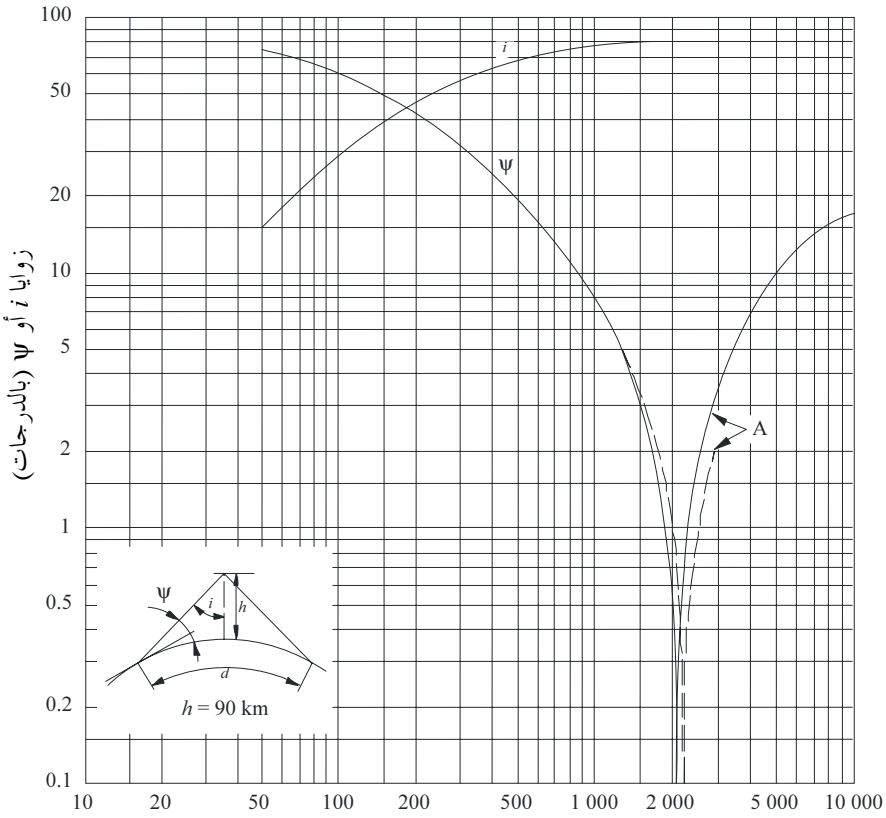
زاويتا المغادرة والوصول، ψ، وزوايا الورود الأيونوسفيري، *i*،
في ظروف نهارية نمطية (*h* = 70 km) يراعي المنحني المتقطع آثار الانكسار الجوي



A: ψ سالبة

الشكل 3

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

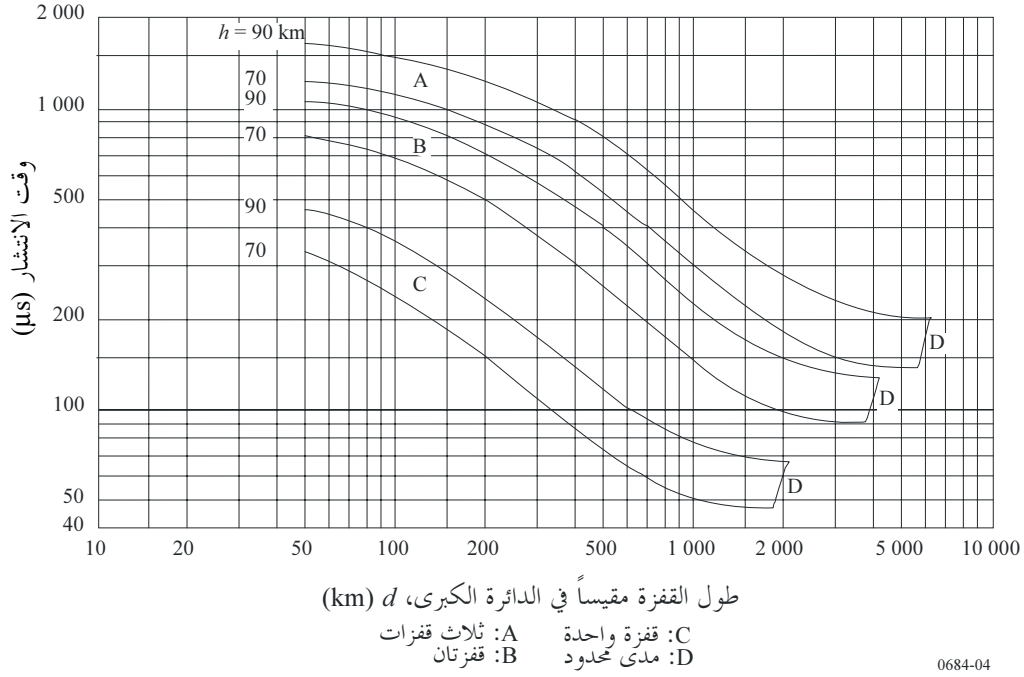


2.2.2 طول المسير ووقت الانتشار التفاضلي

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 لـــ 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 4

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



3.2.2 عامل التبئير

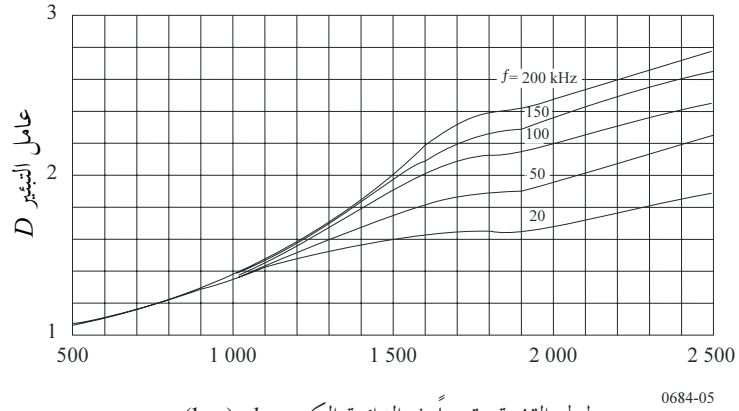
يمثل الشكلان 5 و6، وهما على التوالي للنهار والليل، عامل التبئير الأيونوسفيري، D، في حالة أرض وأيونوسفير كرويين.

4.2.2 عوامل الهوائيات

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

الشكل 5

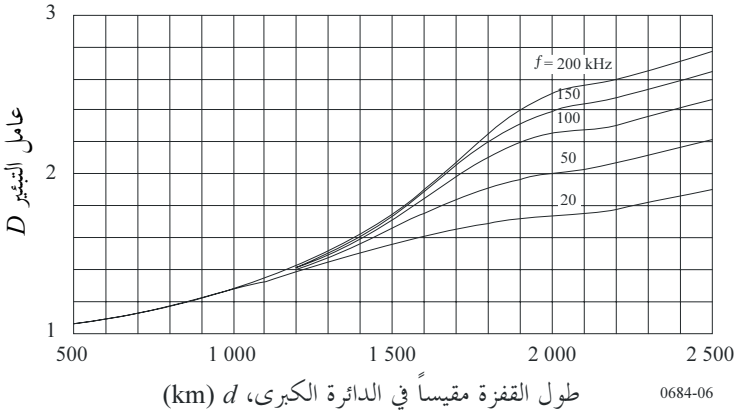
عامل التبئير الأيونوسفيري – النهار



طول القفزة مقيساً في الدائرة الكبرى، d (km)

الشكل 6

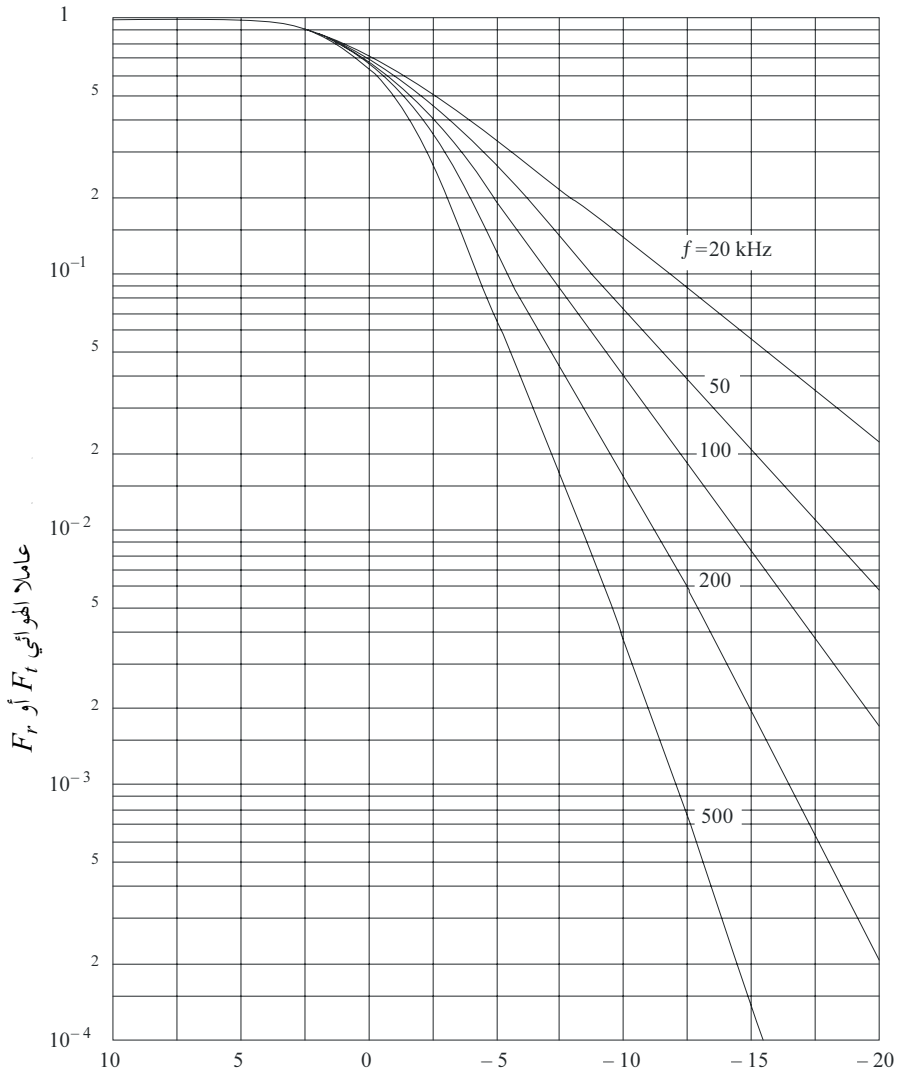
عامل التبئير الأيونوسفيري – الليل



طول القفزة مقيساً في الدائرة الكبرى، d (km)

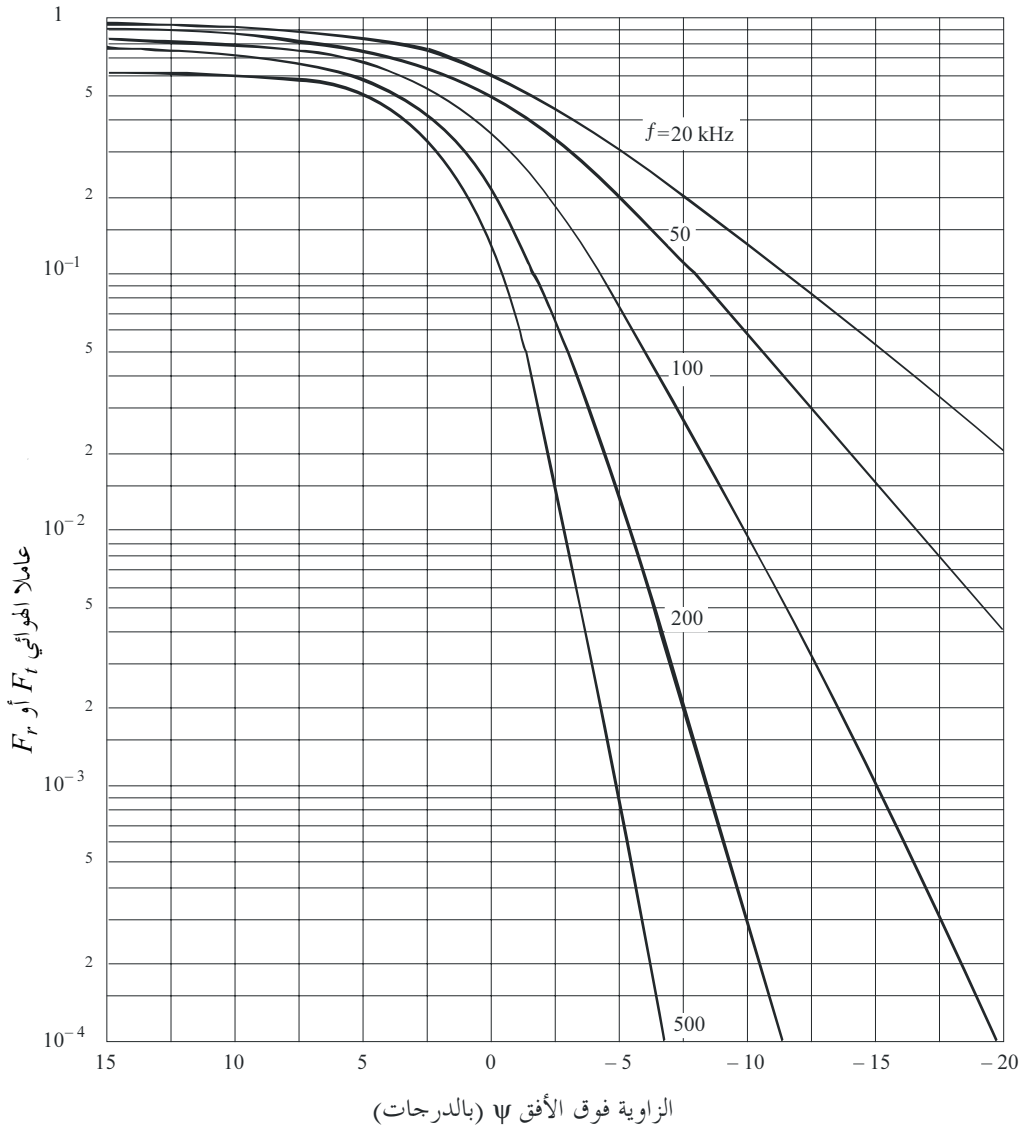
الشكل 7

عامل الهوائي – ماء البحر



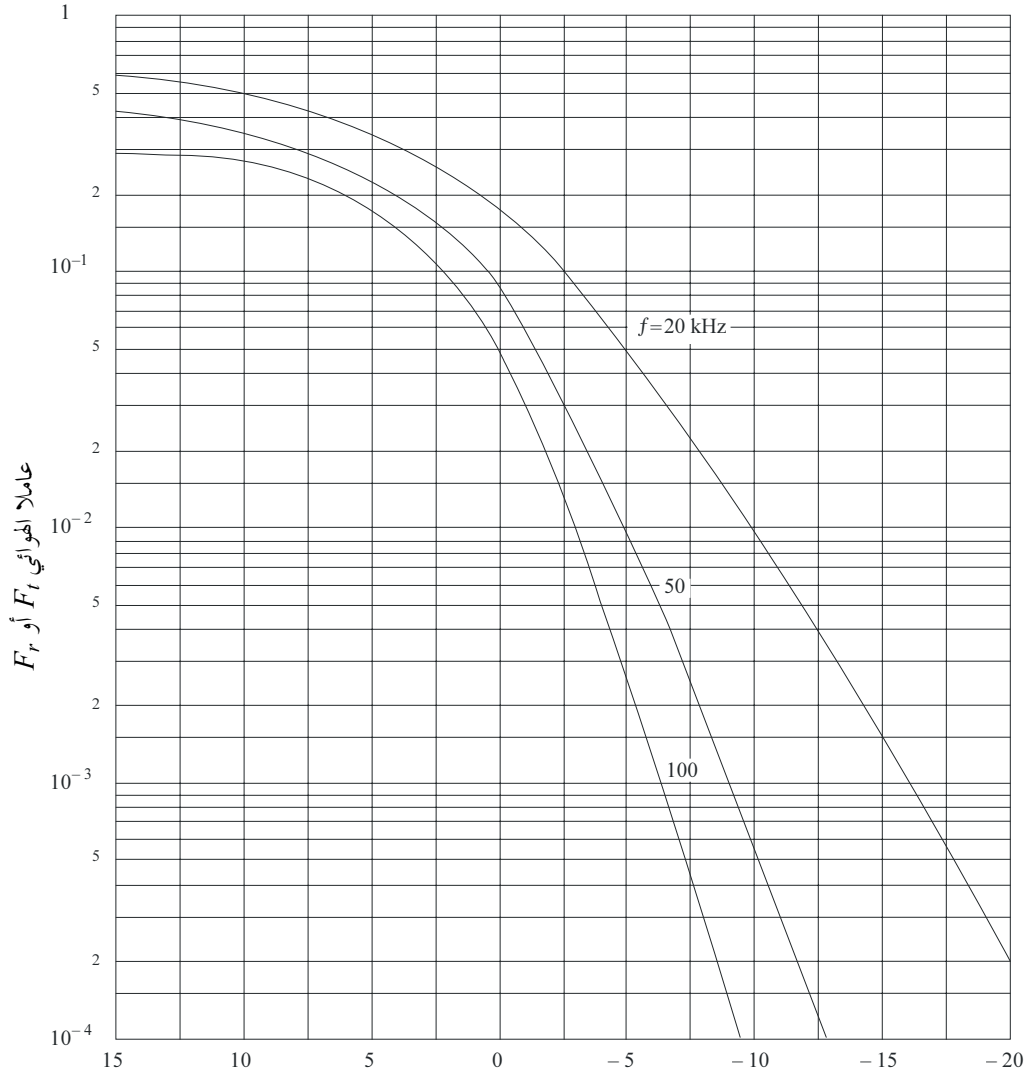
الشكل 8

عامل الهوائي – الأرض



الشكل 9

عامل الهوائي – الجليد عند –4° C



الجدول 1

	الإيصالية، σ (S/m)	السماحية، ε
ماء البحر	5	$80\ \varepsilon_0$
الأرض	2×10^{-3}	$15\ \varepsilon_0$
الجليد القطبي	2.5×10^{-5}	$3\ \varepsilon_0$

ε_0: السماحية في الفضاء الحر

رسمت هذه المنحنيات بافتراض أن نصف قطر الأرض يبلغ 480 8 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 لـــ 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 وi زاوية الورود الأيونوسفيري. وتُعطى المنحنيات للظروف الليلية في كل الفصول وللظروف النهارية شتاءً وصيفاً. وتستند القيم المقيسة لزوايا الورود العمودي وزوايا الورود المائل إلى النتائج الواردة في عدة تقارير.

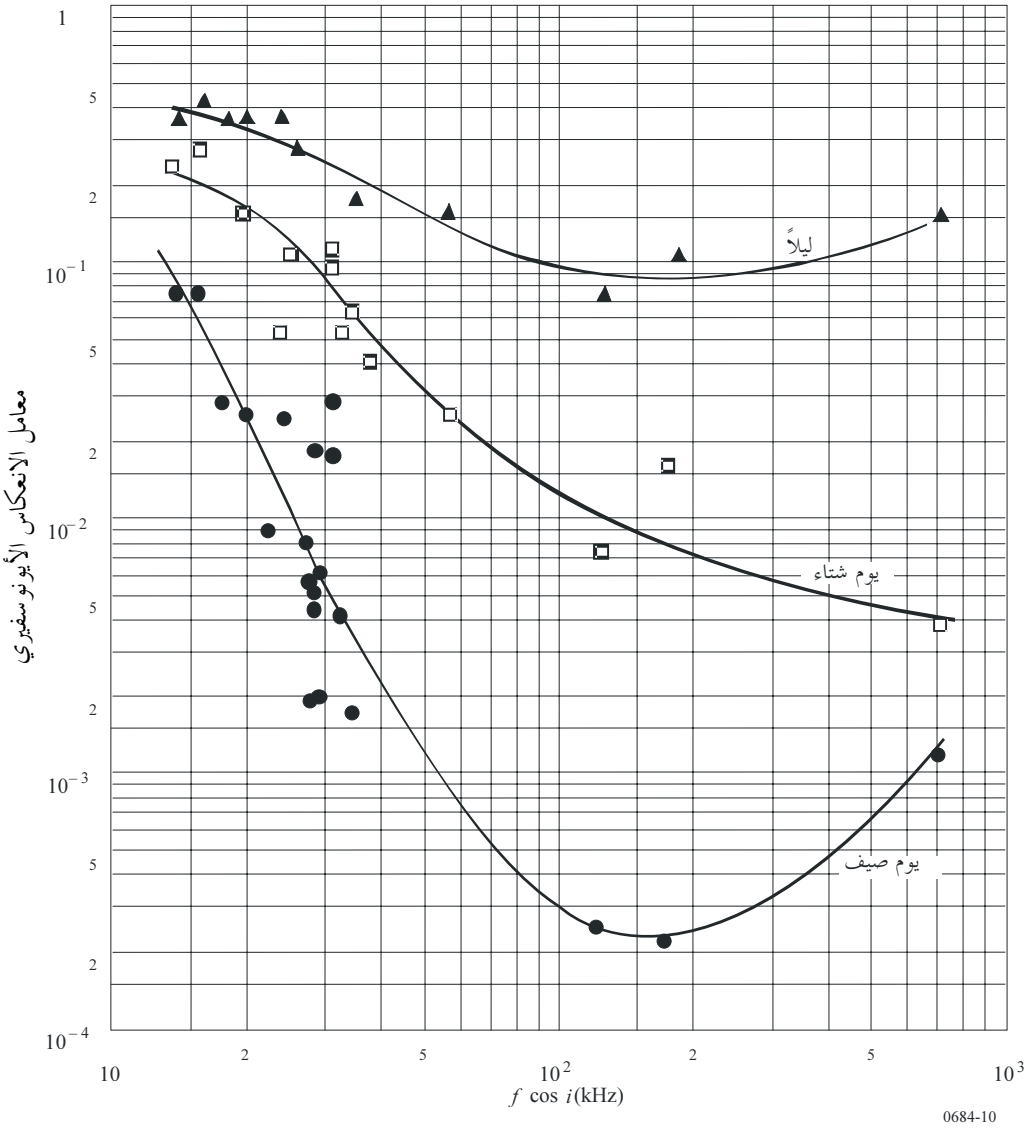
في جميع الحالات تم تغيير معطيات معامل الانعكاس الأيونوسفيري الواردة في مختلف المراجع المذكورة حسب الاقتضاء، وذلك لمراعاة التبئير الأيونوسفيري وعوامل الهوائي وغيرها حتى تكون نتائج القياسات متطابقة مع تقنية التحليل المستعملة هنا.

غير أنه لا يمكن دائماً الاعتماد على مفهوم التردد الفعال $f \cos i$ مع معاملات انعكاس ثابتة. وقد نتجت المنحنيات الواردة في الشكل 10 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.

إذا كانت معطيات عديدة تظهر على منحنيات الشكل 10 مما يمثل تغيرات معامل الانعكاس الأيونوسفيري بدلالة الساعة واليوم (عند منتصف الليل ومنتصف النهار) والفصل، فإن هناك حاجة إلى أعمال كثيرة لتفسير الآلية الدقيقة لهذه التغيرات خلال دورة النشاط الشمسي. ومن الواضح أن هناك تغيراً في الدورة الشمسية (انظر الشكل 11) إذ 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 الإلكترونيات 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 الواضح أن الانتقال بين معاملات الانعكاس الكبرى والصغرى يُتوقع بأن يكون بدلالة التردد وساعة اليوم والفصل وفترة الدورة الشمسية. إضافة إلى ذلك، يمكن توقع تقطع في منحنى معاملات الانعكاس بدلالة التردد، لتردد وساعة معينين. ويظهر تغير واضح في قيم الترددات الفعالة المنحصرة بين 35 و45 kHz في المعطيات المتعلقة بسنوات أقصى كلف شمسي في الصيف، لكن ذلك لا يرد في المعطيات المقدمة في هذه التوصية.

الشكل 10

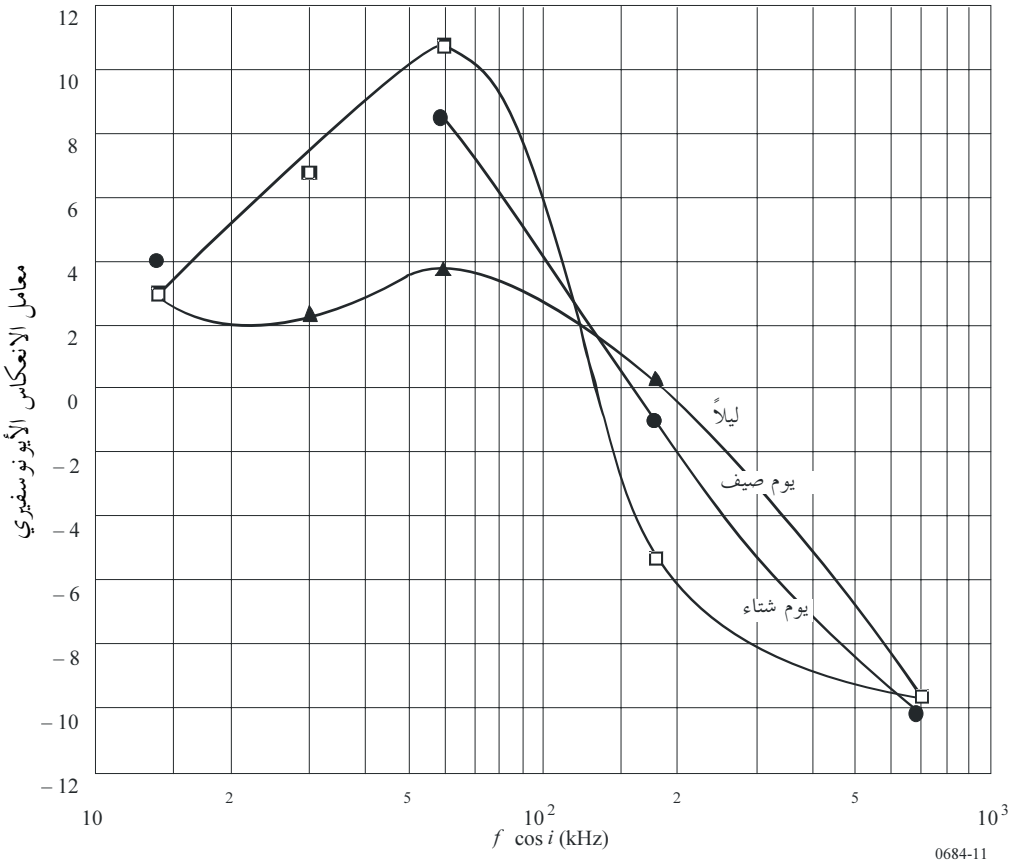
معاملات الانعكاس الأيونوسفيري – ظروف النشاط الشمسي الدنيا



تجدر الإشارة إلى أن مدى ترددات نطاق الإذاعة الراديوية بالموجات الهكتومترية للانتشار المائل يقع في مدى الترددات الفعالة 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 فعالة ذات 278 kHz؛ بينما يساوي التردد الفعال في التردد 500 kHz مقدار 86 kHz. ويعطي الملحق 1 مثالاً للحساب بطريقة مسير الشعاع.

الشكل 11

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



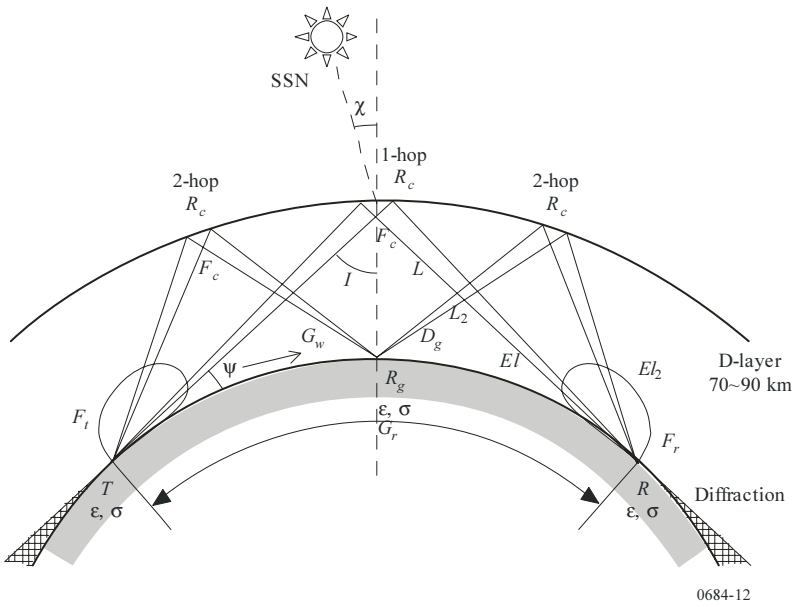
3.2 الطريقة الرقمية لحساب شدة المجال الناتجة وطوره

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 استناداً إلى المعادلة التالية:

$$\cos(a) = \sin(lat_t)\sin(lat_r) + \cos(lat_t)\cos(lat_r)\cos(dif_l) \quad (6)$$

حيث:

a: الزاوية المركزية للأرض

lat_t: خط عرض المرسل

lat_r: خط عرض المستقبل

dif_l: الفرق بين خط طول المرسل (lont) وخط طول المستقبل (lonr).

وتحسب المسافة الفاصلة عن الأرض على أنها $gr = a \cdot 360\ 6$ km.

ويحسب خطا العرض والطول (lat_m) و(lon_m) لنقطة واقعة على منتصف المسير استناداً إلى المعادلتين التاليتين وذلك لزاوية سمت معينة (azt2r) لمسير الشعاع الذاهب من المرسل إلى المستقبل:

$$lat_m = \pi/2 - \arccos\left(\cos(a/2)\sin(lat_t) + \sin(a/2)\cos(lat_t)\cos(\text{azt2r})\right) \quad (7)$$

$$lon_m = lon_t - \arccos\left((\cos(a/2) - \sin(lat_m)\sin(lat_t))/(\cos(lat_m)\cos(lat_t))\right) \quad (8)$$

حيث:

$$\cos(\text{azt2r}) = (\sin(lat_r) - \sin(lat_t)\cos(a))/(\cos(lat_t)\sin(a)) \quad (9)$$

ويحسب أسلوبا القفزة الواحدة والقفزتين في مسافة انتشار تصل إلى 2 000 km مع مراعاة التوهين وتغيير الطور للموجة المنعكسة على سطح الأرض والاستقطاب العمودي لأسلوب القفزتين. ولا يحسب سوى أسلوب القفزتين بالنسبة إلى مسافة تصل إلى 4 000 km.

ويحسب جيب التمام لزاوية سمت الشمس في نقطة معينة (lat_m، lon_m) ولخطة معينة على النحو التالي:

$$\cos\chi = \sin(lat_m)\sin(\text{sol}) + \cos(lat_m)\cos(\text{sol})\cos(Sy\text{-}lon_m) \quad (10)$$

حيث:

χ: زاوية سمت الشمس

lat_m: خط عرض نقطة في منتصف المسير

lon_m: خط طول نقطة في منتصف المسير

sol: زاوية ميل الشمس في اليوم الخامس عشر من الشهر

Sy: خط طول نقطة واقعة على الخط العمودي للشمس (= 1stm + 15tg – 180)

Tg: الساعة حسب التوقيت المحلي

1stm: خط طول مستوي الزوال حسب التوقيت المحلي.

وتحسب زاوية الارتفاع Ψ استناداً إلى المعادلة التالية:

$$\Psi = \arctan\left(\cot(d/(2R_e)) - R_e \operatorname{cosec}(d/(2R_e))/(R_e + h_r)\right) \quad (11)$$

حيث:

d: طول القفزة

R_e: نصف قطر الأرض الفعال (500 8 km)

h_r: ارتفاع الانعكاس

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

$$P = 2\, R_e \sin(d/(2Re)) \sec(\Psi + d/(2Re)) \quad (12)$$

وتحسب زاوية الورود I في الأيونوسفير استناداً إلى المعادلة التالية:

$$I = \arcsin\left(R_e \cos(\Psi)/(R_e + h_r)\right) \quad (13)$$

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

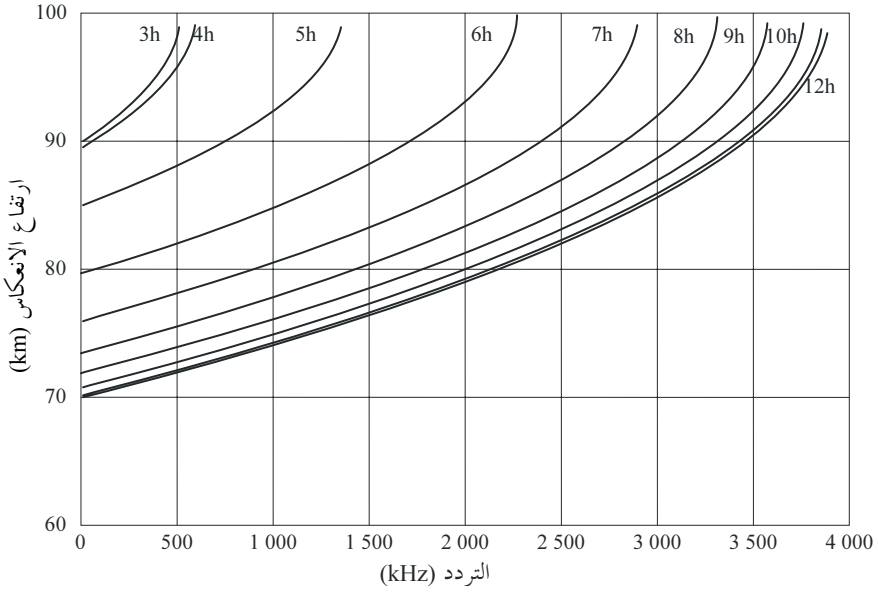
$$\text{Delay time} = (P - d)/(3 \times 10^5) \quad \text{s} \quad (14)$$

2.3.2 نموذج ارتفاع الانعكاس

يستعمل لحساب ارتفاع الانعكاس خلال 24 ساعة التوزيعات المكافئية 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 التغيب 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 و10 km و30 km و100 km على التوالي. مما يعني أن ارتفاع الانعكاس في الليل يبلغ 90 km ($y_{min} - h_{max}$) بينما يكون أقل ارتفاع انعكاس 70 km ($y_{max} - h_{max}$). وتتحدد أقصى نصف السماكة y_{max} باعتبارها متغير في برنامج حاسوبي يستعمل لمعرفة أثر الاضطرابات الأيونوسفيرية الطارئة (SID) على انتشار الموجات الكيلومترية (LF).

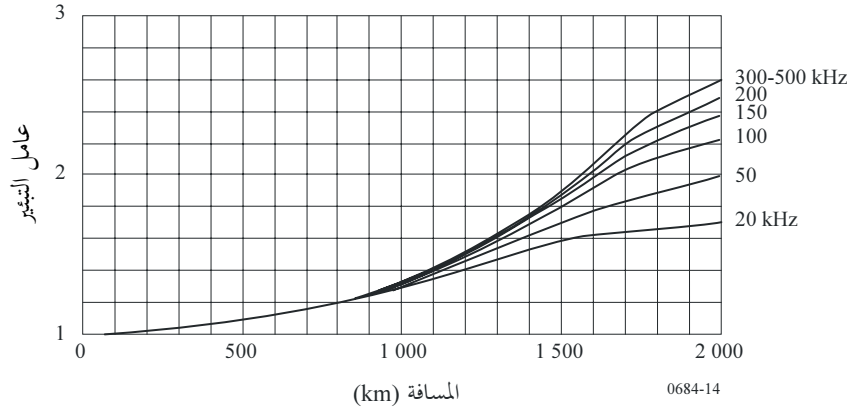
الشكل 13

المنحنيات f-h في طبقة الانعكاس



الشكل 14

عامل التبئير



ويحسب ارتفاع الانعكاس R_h كالتالي:

$$R_h = h_{max} - ym\sqrt{1 - (f - f_b)/(\text{foE})} \quad (15)$$

حيث:

$$ym = ymm - (ymm - y_{min})(f_{max} - \text{foE})/(f_{max} - f_{min}) \quad (16)$$

$$ymm = y_{max} - (y_{max} - y_{min})(\text{fk0} - f_{max})/(\text{fk0} - f_{min}) \quad (17)$$

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

3.3.2 عامل التبئير

يبين الشكل 13 عامل التبئير الذي يطبق في حسابات مدة 24 ساعة باعتباره متوسط منحنيات النهار (الشكل 5) والليل (الشكل 6).

4.3.2 عامل الهوائي

يحسب عاملي هوائيي الإرسال والاستقبال استناداً إلى منحنيات الاستكمال الداخلي نسبة إلى زاوية الارتفاع وإلى التردد في ثلاث حالات مختلفة فيما يتعلق بخصائص الأرض:

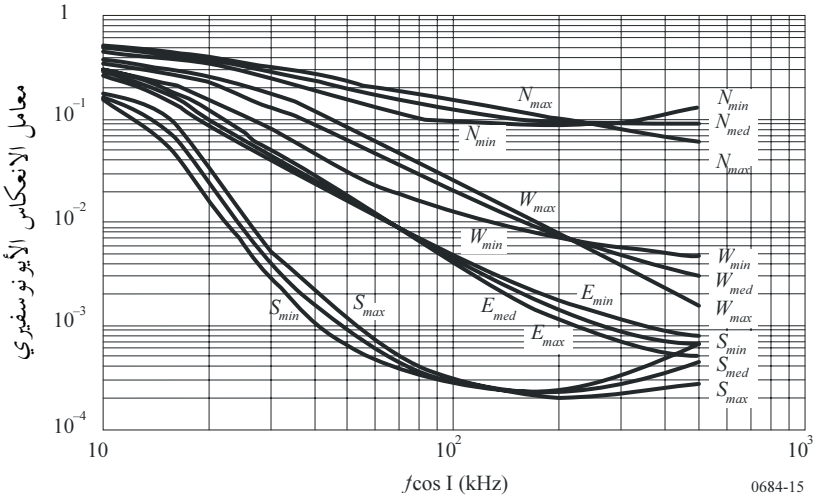
خصائص الأرض	ثابت العزل الكهربائي (ε)	الإيصالية النوعية (σ in S/m)
ماء البحر	80	5
البر	15	0,002
تربة جافة	15	0,0005

5.3.2 معامل الانعكاس الإيونوسفيري

يتم تحويل معاملات الانعكاس الأيونوسفيري المذكورة في الفقرة 2.2 إلى معاملات تقابل ثلاث فترات للنشاط الشمسي: أكبر عدد لنقاط الكلف الشمسي (من 75 إلى 150) العدد الوسطي لنقاط الكلف الشمسي (من 25 إلى 75) وأقل عدد لنقاط الكلف الشمسي (من 0 إلى 25). ويشار إلى هذه المعاملات بدلالة fcosi (دالة جيب التمام) بالنسبة إلى الشتاء والاعتدال والصيف (انظر الشكل 15). ثم أن قيم جيب تمام زاوية السمت للشمس (cosχ) ليلاً (N في الشكل) وظهراً في الشتاء (W) وفي الاعتدال (E) وفي الصيف (S) مثبتة في كندا على القيم التالية -0,21 و0,375 و0,707 و0,93 على التوالي. وتنتج معاملات الانعكاس الأيونوسفيري في ظرف معين عن طريق الاستكمال الداخلي لقيمة R_c نسبة إلى قيمة fcosi و$\chi \cos$.

الشكل 15

معامل الانعكاس الأيونوسفيري



6.3.2 الخسارة الناجمة عن انعكاس الموجة على الأرض

يحسب معامل الانعكاس على الأرض R_v للاستقطاب الرأسي بدلالة التردد f مقدراً بالوحدات kHz لزاوية الارتفاع β لثابت العزل الكهربائي ε والإيصالية النوعية σ.

$$R_v = (n^2\sin(\beta) - (n^2 - (\cos(\beta))^2)^{1/2})/(n^2\sin(\beta) + (n^2 - (\cos(\beta))^2)^{1/2}) \quad (18)$$

حيث:

$$n^2 = \varepsilon - j18\sigma 10^6/f \quad (19)$$

ويحسب تغيّر زاوية طور موجة استقطاب رأسي عند انعكاسها بالنسبة إلى قيم تردد وزاوية ارتفاع ومعلمات تربة معينة.

7.3.2 شدة مجال الموجة الأيونوسفيرية

إذا تم الاستقبال في هوائي ذي إطار صغير موضوع على سطح الأرض فإن شدة المجال الفعال للموجة الأيونوسفيرية E_s تنتج كالتالي:

$$E_s = 600\sqrt{Pt}\cos\Psi R_c F_c F_t F_r/L \quad \text{mV/m} \quad (20)$$

حيث:

Pt: القدرة المشعة مقدرة بالوحدات (kW)

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

R_c: معامل الانعكاس الأيونوسفيري

F_c: عامل التبئير الأيونوسفيري

F_t وF_r: عاملا هوائيي الإرسال والاستقبال على التوالي

L: طول مسير الموجة الأيونوسفيرية.

وفي حالة الموجة الأيونوسفيرية بقفزتين تتمثل شدة المجال E_{s2} التي يستقبلها هوائي الإطار على النحو التالي:

$$E_{s2} = 600\sqrt{Pt}\cos\Psi R_{c1}R_{c2}(F_c)^2 D_g R_g F_t F_r/L_2 \quad \text{mV/m} \quad (21)$$

حيث:

R_{c1} وR_{c2}: معاملا الانعكاس الأيونوسفيري للانعكاسين الأول والثاني

D_g: عامل التباعد الناجم عن الأرض الكروية ويساوي Fc^{-1} تقريباً

R_g: معامل الانعكاس الفعال للأرض إيصاليتها محدودة

L_2: انتشار كامل على مسير شعاع ذي قفزتين

ونظراً إلى أن $R_{c1} = R_{c2} = R_c$ وأن $1/F_c = D_g$ مع تقريب من المرتبة الأولى، فإن E_{s2} تعطى في الصيغة التالية:

$$E_{s2} = 600\sqrt{Pt}\cos\Psi R_c^2 F_c R_g F_t F_r/L_2 \quad \text{mV/m} \quad (22)$$

8.3.2 الموجة الأرضية

منحنيات انتشار الموجة الأرضية مستمدة من التوصية ITU-R P.368 للحالات الثلاث: ماء البحر (ε:70، σ: 5 S/m)، والأرض (ε:22، σ: 0,003 S/m) والتربة الجافة (ε:7، σ: 0,0003 S/m) ولتسعة ترددات هي: 40 و50 و75 و100 و150 و200 و300 و400 و500 kHz. وتحسب عندئذ شدة مجال الموجة الأرضية بالاستكمال الداخلي نسبة إلى المسافة والتردد.

9.3.2 شدة المجال الناتجة والطور

تحسب شدة المجال الناتجة للموجة الأيونوسفيرية بقفزة واحدة والموجة الأيونوسفيرية بقفزتين، R_s، استناداً إلى المعادلة التالية:

$$R_s^2 = E_{s1}^2 + E_{s2}^2 + 2\,E_{s1}\,E_{s2}\cos\varphi \quad (23)$$

حيث:

$\varphi = 2\pi$ (فرق طول مسير الشعاع بين الموجة الأيونوسفيرية بقفزة واحدة والموجة الأيونوسفيرية بقفزتين)/λ

وتحسب شدة المجال المستقبلة R الناتجة عن الموجتين الأيونوسفيريتين والموجة الأرضية استناداً إلى المعادلة التالية:

$$R^2 = R_s^2 + G^2 + 2R_sG\cos\theta \quad (24)$$

حيث:

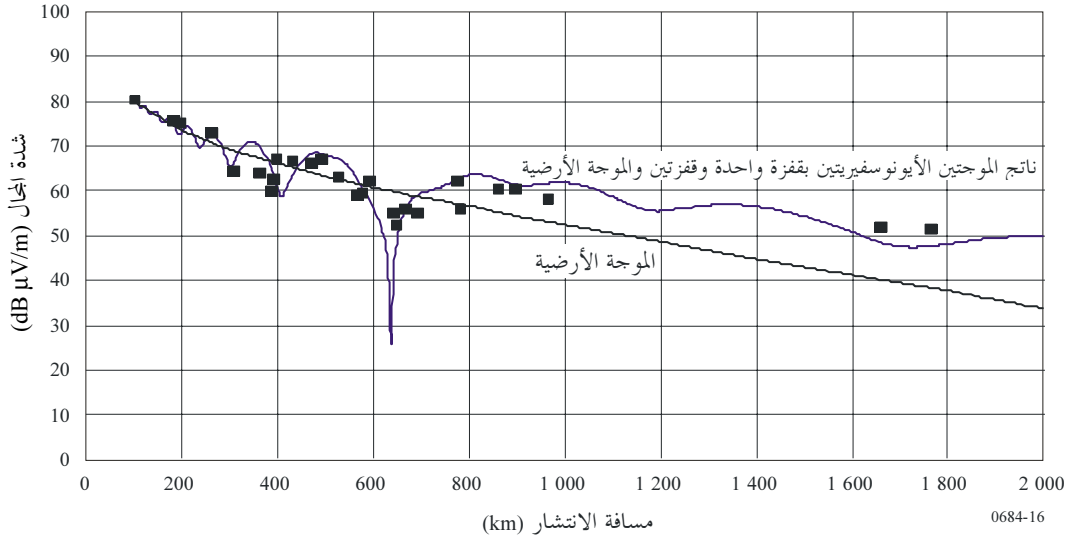
θ: زاوية تأخر طور R_s نسبة إلى الموجة الأرضية.

10.3.2 تغيرات إشارات خدمة الترددات المعيارية وإشارات الوقت بمعدل 40 و60 kHz بدلالة المسافة

يبين الشكلان 16 و17 منحنيات الانتشار المفترضة لشدة المجال الناتجة للموجتين الأيونوسفيريتين بقفزة وقفزتين وللموجة الأرضية بالتردد 40 kHz نهاراً وليلاً على التوالي مع العلم بأن المعطيات المتمثلة على شكل نقاط تم قياسها في شهر فبراير عام 2004.

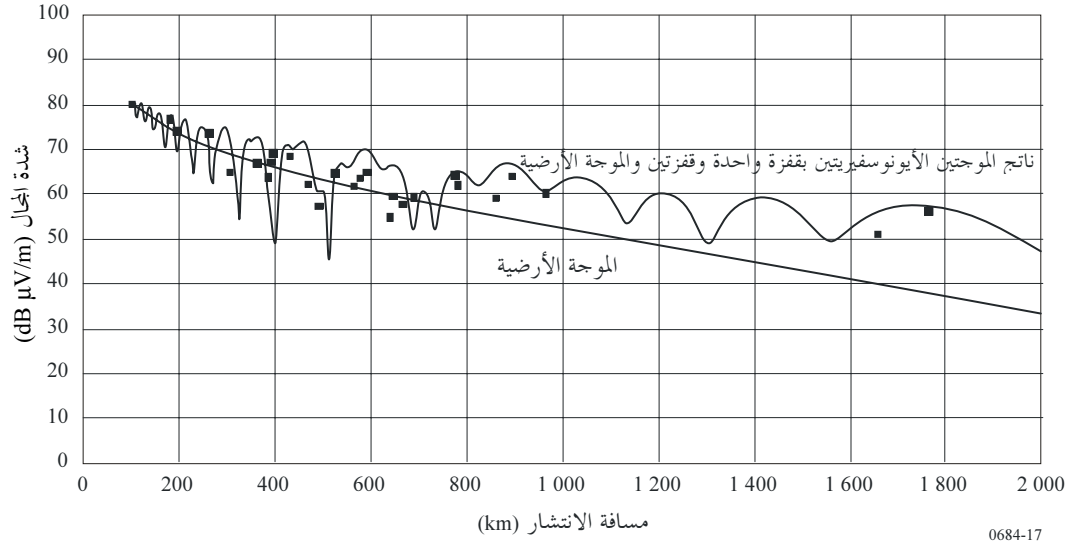
الشكل 16

قيم شدة المجال للموجة JJY بالتردد 40 kHz المستقبلة نهاراً مقيسة في شهر فبراير 2004



الشكل 17

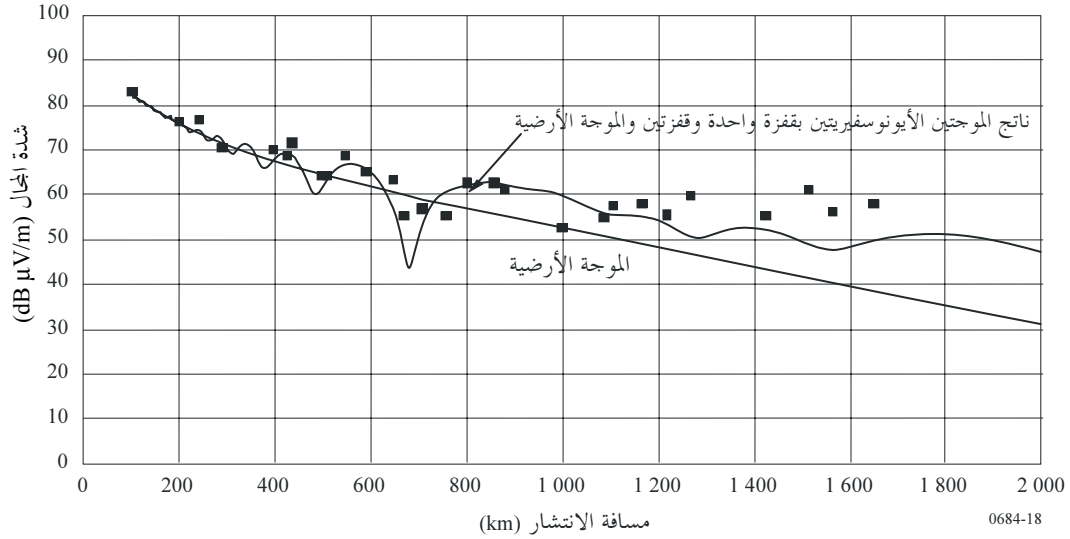
قيم شدة المجال للموجة JJY بالتردد 40 kHz المستقبلة ليلاً مقيسة في شهر فبراير 2004



يبين الشكلان 18 و19 منحنيات الانتشار المفترضة لشدة المجال الناتجة للموجات الأيونوسفيرية بقفزة وقفزتين والموجة الأرضية عند التردد 60 kHz نهاراً وليلاً على التوالي، مع العلم بأن المعطيات المتمثلة على شكل نقاط تم قياسها في شهر فبراير عام 2004.

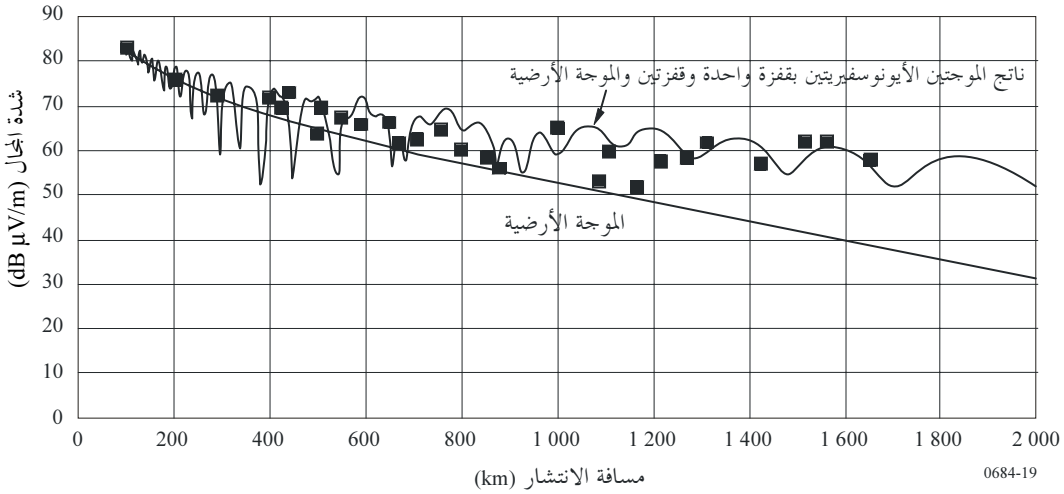
الشكل 18

قيم شدة المجال للموجة JJY بالتردد 60 kHz المستقبلة نهاراً مقيسة في شهر فبراير 2004



الشكل 19

قيم شدة المجال للموجة JJY بالتردد 60 kHz المستقبلة ليلاً مقيسة في شهر فبراير 2004



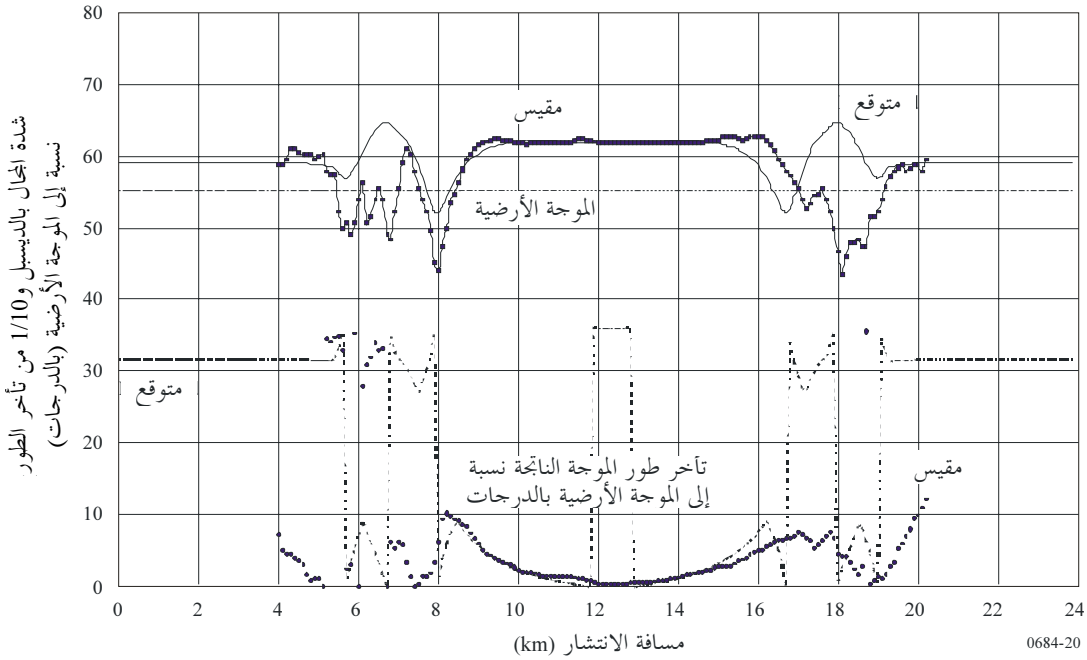
ويلاحظ أن ثمة توافقاً جيداً بين المنحنيات المفترضة والقيم المقيسة وهناك تغيرات واضحة قرب المسافة 600 و700 km تليها سوية شدة مجال أعلى بمقدار 10 dB تقريباً.

11.3.2 تغيرات شدة المجال والطور لإشارات خدمة الترددات المعيارية وإشارات الوقت بالتردد 60 kHz بدلالة الوقت

يقابل تأخر طور الإشارة المستقبلة تأخر الموجات الأيونوسفيرية الناتجة والموجة الأرضية نسبة إلى الموجة الأرضية. وقد رصد هذا التأخر وشدة المجال المسجلة بتاريخ 28 فبراير 2004 حسب التوقيت المحلي في المنحنيين المبين في الشكل 20 وكذلك تغير شدة المجال وتأخر الطور خلال اليوم نسبة لقيمتهما المتوقعة. ومن البديهي القول بأن طريقة التنبؤ مفيدة لتقديم استقرار إشارة خدمة الترددات المعيارية وإشارات الوقت.

الشكل 20

التغير خلال اليوم لشدة المجال والطور لموجة JJY بالتردد 60 kHz المستقبلة في كوغاني بتاريخ 28 فبراير 2004



3 حساب شدة المجال بأساليب الأدلة الموجية: حل للموجة الكاملة

في حالة انتشار الموجات الراديوية الأرضية ELF وVLF وLF 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 الإلكترونيات والأيونات وتردد الاصطدام بدلالة الارتفاع،
- حد أدنى مكون من أرض متجانسة ومتنظمة 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 و2.3 اللتين تسمحان بحل المعادلة الحاسمة (المعادلة الشكلية):

$$F(\theta) = \left| R_d(\theta)\, \overline{R}_d(\theta) - 1 \right| = 0 \tag{25}$$

حيث:

$$R_d(\theta) = \begin{bmatrix} {}_{\parallel}R_{\parallel d}(\theta) & {}_{\perp}R_{\parallel d}(\theta) \\ {}_{\parallel}R_{\perp d}(\theta) & {}_{\perp}R_{\perp d}(\theta) \end{bmatrix} \tag{26}$$

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

$$\overline{R}_d(\theta) = \begin{bmatrix} {}_{\parallel}\overline{R}_{\parallel d}(\theta) & 0 \\ 0 & {}_{\perp}\overline{R}_{\perp d}(\theta) \end{bmatrix} \quad (27)$$

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

يشير الترميز $\parallel$ لـــ R و$\overline{R}$ إلى الاستقطاب العمودي بينما يشير الترميز $\perp$ إلى الاستقطاب الأفقي. ويتعلق المؤشر الأول لـــ R باستقطاب موجة الورود، بينما ينطبق الثاني على استقطاب الموجة المنعكسة.

تتمثل حدود المعادلتين (26) و(27) فيما يلي:

$R_{\parallel}$: نسبة المجال المنعكس في مستوي الورود إلى المجال الوارد في نفس المستوي

$R_{\perp}$: نسبة المجال المنعكس المتعامد إلى مستوي الورود والمجال الوارد المتعامد إلى مستوي الورود

$R_{\perp\parallel}$: نسبة المجال المنعكس المتعامد إلى مستوي الورود والمجال الوارد في مستوي الورود

$R_{\parallel\perp}$: نسبة المجال المنعكس في مستوي الورود والمجال الوارد المتعامد إلى مستوي الورود.

يتم الحصول على مصفوفة الانعكاس الأيونوسفيري R_d، (المعادلة (26))، 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 لـــ R، تُعتبر على أنها قيمة R المقابلة لأيونوسفير أكفة واضحة، فوق المظاهر الجانبية المحددة لكثافة الإلكترونيات وتردد الاصطدام. يُحسب الحد R_d وفقاً لحلول معادلة ستوكس واشتقاقاتها.

تحل المعادلة الشكلية (المعادلة (25) 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 إيصالية نوعية للتربة مرتبطة بمختلف الحدود أرض–بحر والجليد القطبي. والإيصالية 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.

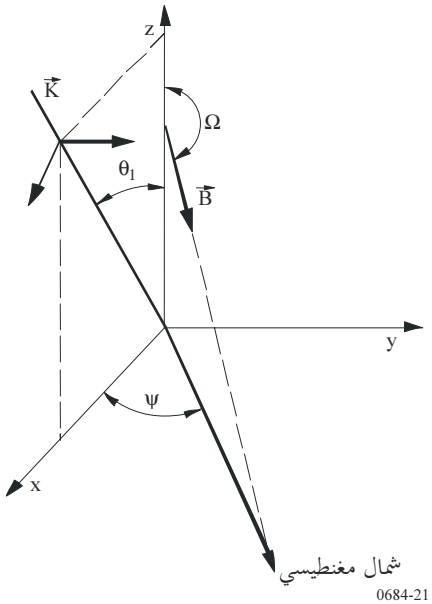
إن نظام الإحداثيات المختارة بحيث أن اتجاه z يُعتبر على أنه موجب عند الدخول في الأيونوسفير. وx الموجبة هي اتجاه الانتشار وy متعامدة مع مستوي الانتشار.

تُمثل الهندسة في الشكل 21 حيث تُبين موجة مستوية واردة على الأيونوسفير من أسفل مع متجه الموجة $\vec{K}$ في المستوي x-z (مستوي الورود) عند مستوي 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 ($90° < \Omega \geq 180°$ لنصف الكرة الشمالي)، وψ، 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 لـــ R هي تلك التي تقابل أيونوسفيراً متجانساً واضح الحدود، يتميز بمعلمات عند ذرى الجوانب الخلفية المعينة لكثافة الإلكترونيات 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 بالنـــزول من ارتفاع أولي إلى ارتفاع d، مع تعرف هوية d، بواسطة المعادلة (25). 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 21

هندسة انتشار الموجات



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

إن مصفوفة الانعكاس على الأرض $\bar{R}_d$ المعطاة بواسطة المعادلة (27)، تُحدد بواسطة حلول مستقلة h_1 وh_2 بالنسبة لمعادلة ستوكس:

$$\frac{\mathrm{d}^2 h_{1,2}}{\mathrm{d}z^2} + z h_{1,2} = 0 \tag{28}$$

حيث الدالتان h_1 وh_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 (25) للزوايا الذاتية θ_n. لتحقيق ذلك، تُستعمل طريقة تُعرف باسم "MODESRCH".

إن طريقة "MODESRCH" التي تم تطويرها أساساً لانتشار الموجات VLF وLF الدنيا (10 kHz إلى حوالي 60 kHz) في الدليل الموجي أرض-أيونوسفير، تجد 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 (25)، 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 $F(\theta) = 0$ 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 $F(\theta) = 0$. يمكن تسجيل أحد حلول $F(\theta) = 0$ بواسطة θ_0 أي أن θ_0 صفر لـــ $F(\theta) = 0$.

ليكن:

$$F(\theta) = F_R(\theta_r\ \theta_i) + \mathrm{j}\ F_I(\theta_r\ \theta_i) = \mathrm{Re}\,(F) + \mathrm{j}\ \mathrm{Im}\,(F) \tag{29}$$

حيث:

$$\theta = \theta_r + \mathrm{j}\ \theta_i \tag{30}$$

وكذلك:

$$F(\theta) = \left[(F_R(\theta_r\ \theta_i)^2 + F_I(\theta_r\ \theta_i)^2\right]^{1/2} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta} \tag{31}$$

حيث:

$$\varphi = \mathrm{tg}^{-1}\left[\frac{F_I(\theta_r\ \theta_i)}{F_R(\theta_r\ \theta_i)}\right] \tag{32}$$

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 (32)، إذا كان:

$$\varphi = 0° \text{ (or } 180°) \quad \text{وهذا يعني أن } F_I(\theta_r, \theta_i) = 0$$

وكذلك إذا كان:

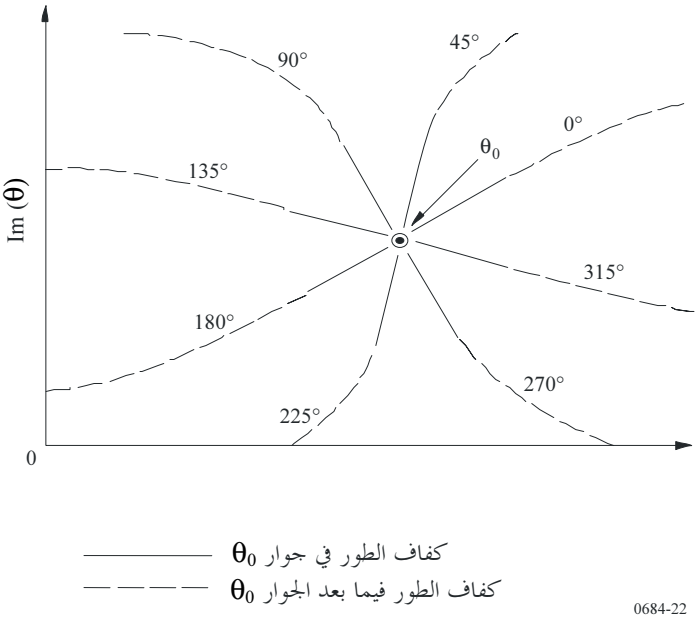
$$\varphi = 90° \text{ (or } 270°) \quad \text{وهذا يعني أن } F_R(\theta_r, \theta_i) = 0$$

هكذا نحصل على مخطط الطور للشكل 22. يتم نصف قطرياً (الخطوط المتواصلة) الحصول على مجموعة من منحنيات الطور الثابت، المسماة أكفة الطور، تتراوح بين 0 و2π (rad)، انطلاقاً من صفر بسيط. تصف الخطوط المتقطعة التصرف الممكن لكفاف طور في إقليم يقع ما وراء جوار دالة تساوي صفر لـــ $F(\theta)$ ومن المفيد نظرياً تحديد دالة تساوي صفراً لـــ $F(\theta)$ كمجموعة من أكفة الطور.

يوضح الشكل 23 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، $\varphi = \varphi$) 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 نجري بحثاً عن الحدود لأكفة الطور عند 0° و180° في الاتجاه المعاكس لعقارب الساعة. وكل كفاف طور يكون مناسباً؛ غير أنه تم اختيار كفافي الطور 0° و180° لأنهما إذا وُجدا عندما يكون $\text{Im } 0 = (F)$، 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 وD وG). 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 وE) أو الوصول حد مستطيل البحث (كما يتم ذلك لكفاف الطور المنحصر بين G وH)؛ 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 22) حتى الوصول مرة أخرى حد مستطيل البحث (النقطتان C وF). 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.

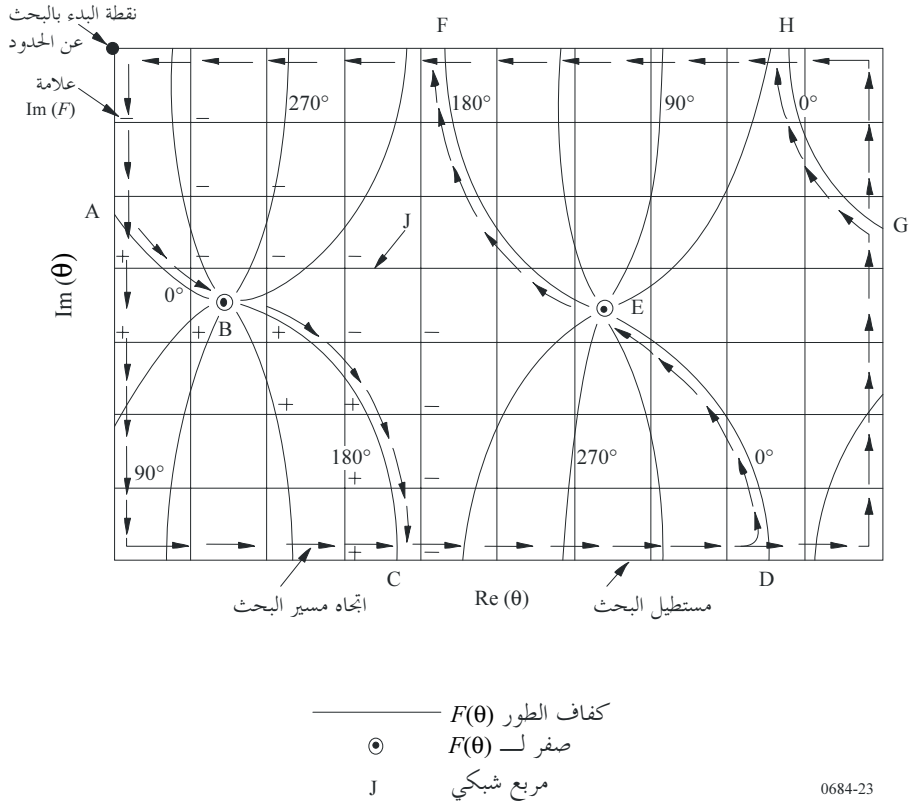
الشكل 22

سلوك كفاف الطور بجوار صفر $F(\theta)$



الشكل 23

طريقة البحث عن أساليب الدالة $F(\theta)$



يحدد موقع صفر ما بواسطة تقاطع أكفة الطور (انظر الشكل 22). 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 للبساطة، لأن هذه الأكفة تُعرف بسهولة، لأنها تحدث عندما يكون $\mathrm{Re}\,(F) = 0$. وأثناء رسم كفاف الطور 0° أو 180° فإن $\mathrm{Re}\,(F)$ يُفحص عند أركان كل مربع شبكي لتحديد تغيير في إشارة $\mathrm{Re}\,(F)$ 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 شبكياً 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 شبكية "MODESRCH" كحل أولي θ_0 للمعادلة (25) حيث $F(\theta) = 0$. بعد ذلك تحسب الدالة من جديد من أجل $\theta_0 + \delta\,\theta$ ونحصل على التصحيح إلى θ_0 انطلاقاً من المعادلة:

$$\Delta\theta = \frac{F(\theta_0)\,\delta\,\theta}{F(\theta_0 + \delta\,\theta) - F(\theta_0)} \tag{33}$$

عندئذ يتم تقييم التصحيح المحدد بواسطة المعادلة (33) وتكرار العملية حتى تُخفض الكميتان $|\Delta\theta_r|$ و$|\Delta\theta_i|$ وفقاً للتفاوت المسموح به المخصص مسبقاً. يدل المؤشران r وi على التوالي على الجزء الحقيقي والجزء الخيالي.

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 $$V = \frac{c}{K(\sin\theta_n)_r} \quad (34)$$

ثابت التوهين على الأرض (dB/Mm): $$\Gamma = -8{,}6859\, k\, K\, (\sin\theta_n)_I \quad (35)$$

حيث:

سرعة الضوء في الفراغ: $c = 2{,}997928 \times 10^5$ km/s

$$K = \left(1 + \frac{\alpha h}{2}\right) \quad (36)$$

$$\alpha = 2/a = 3.14 \times 10^{-4}/\text{km} \quad (37)$$

إذا استعملنا هندسة الشكل 21، 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 وy 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 وθ 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_z وE_y وE_x وتنطبق عناوين السطور على الإثارة بثنائي أقطاب عمودي (λ_V) وثنائي أقطاب أفقي بإشعاع طولي (λ_E) وثنائي أقطاب أفقي بإشعاع عرضي (λ_B).

الجدول 2

عوامل الإثارة

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

يمثل الحدان R و$\overline{R}$ على التوالي عناصر مصفوفة الانعكاس الموجهة نحو الأيونوسفير ونحو الأرض، انطلاقاً من نفس السوية d داخل الدليل. وتُعطى القيمتان B_1 وB_2 بواسطة:

$$B_1 = \frac{S^{5/2}}{\left.\frac{\partial F}{\partial \theta}\right|_{\theta = \theta_n}} \qquad B_2 = -\frac{B_1}{S} \tag{38}$$

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

يجب أن تُكمل 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–أرض التي تستعمل فيها قناة دليل موجي غير متجانسة في المستوي الأفقي. يبين الشكل 24 اتجاه ثنائي الأقطاب بالنسبة لهندسة الانتشار التي يكون فيها المحور z دائماً متعامداً مع سطح محور الأرض. تقيس الزاويتان γ وφ اتجاه المرسل بالنسبة لنظام الإحداثيات x وy وz.

حسب الشكل 24 تمثل $\gamma = 0°$ إثارة ثنائي أقطاب عمودي، بينما تدل $\gamma = 90°$ على إثارة ثنائي أقطاب أفقي. علاوة على ذلك فإن φ هي زاوية بين اتجاه ثنائي الأقطاب الأفقي واتجاه الانتشار. بطريقة صريحة، تمثل $\varphi = 0$ الإشعاع الطولي و$\varphi = 90°$ 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.

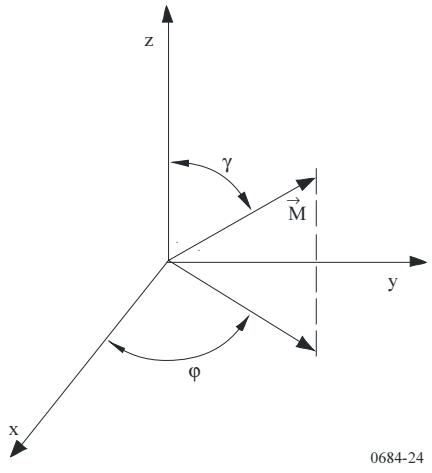
إذا أمكن اعتبار أن مسير الانتشار متجانس أفقياً على طولها كاملاً، فإن المعادلة تصبح أبسط بكثير:

$$\left(\lambda\frac{T}{V} = \lambda\frac{R}{V}\right),\ \left(\lambda\frac{T}{B} = \lambda\frac{R}{B}\right) \text{and} \left(\lambda\frac{T}{E} = \lambda\frac{R}{E}\right). \qquad \text{Also} \left(\overline{S}\frac{T}{n} = \overline{S}\frac{R}{n}\right) \tag{39}$$

ويمكن أن تُستعمل الصيغة لحساب مجالات الانتشار متعددة الأساليب عند الموجات VLF وLF. 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.

الشكل 24

اتجاه ثنائي الأقطاب M في الدليل الموجي،
مع كون γ الميل وφ الاتجاه السمتي



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 عشوئياً 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.هـ. ريشتر، ص. 40-62، 1990) على نموذج الطبقات الممثل في الشكل 25. 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:

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

(40)

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

حيث:

i = $(-1)^{1/2}$

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 (40)، من المهم تقييم التكامل:

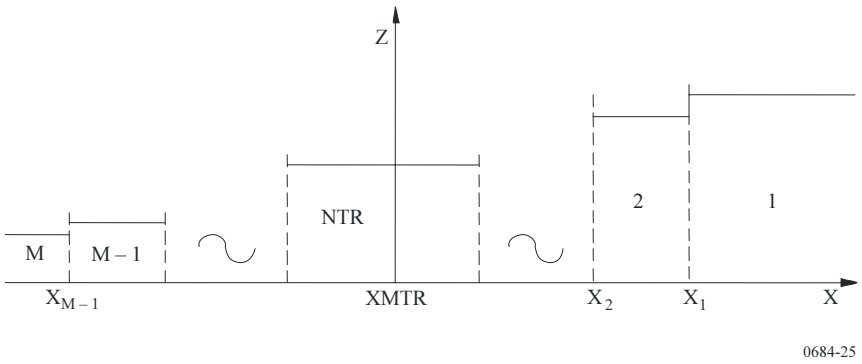
$$I_{j,k}^{m,p} = \int_{-\infty}^{\infty} A_j^{mt} \cdot G_k^p \, \mathrm{d}z \tag{41}$$

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

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

الشكل 25

نموذج تحويل الأسلوب



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 والمعلمات المغنطيسية الأرضية غير متغيرة على المسير). ويُعبر عن الاتساع بالوحدة dB فوق 1m/Vμ 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 وVLF وLF تُمثل بواسطة المنحنيات التالية، وهي تتوقف على ارتفاع الأيونوسفير Z: منحنى الكثافة الإلكترونية ومنحنى كثافة الأيونات (الموجبة والسالبة) ومنحنى تردد الاصطدامات بين الجزئيات (الإلكترونات–الجزئيات المحايدة) ومنحنى تردد الاصطدام بين الأيونات (الموجبة والسالبة) والجزئيات المحايدة).

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

$$\omega_r(Z) = \frac{\omega_p^2(Z)}{\nu(Z)} = \frac{q^2}{\varepsilon_0}\left[\frac{N_e(Z)}{m_e\,\nu_e(Z)} + \frac{N_+(Z)}{m_+\,\nu_+(Z)} + \frac{N_-(Z)}{m_-\,\nu_-(Z)}\right] \quad (42)$$

حيث:

$\omega_p(Z)$: تردد البلازما

q: الحمولة الإلكترونية

ε_0: سماحية الفضاء الحر

ν_e: تردد الاصطدامات بين الإلكترونات والجزيئات المحايدة (s^{-1})

ν_+: تردد الاصطدامات بين الأيونات الموجبة والجزيئات المحايدة (s^{-1})

ν_-: تردد الاصطدامات بين الأيونات السالبة والجزيئات المحايدة (s^{-1})

N_e: كثافة الإلكترونات (cm^{-3})

N_+: كثافة الأيونات الموجبة (cm^{-3})

N_-: كثافة الأيونات السالبة (cm^{-3})

m_e: كتلة الإلكترون

m_+: كتلة الأيونات الموجبة

m_-: كتلة الأيونات السالبة.

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:

$$\omega_r(Z) = \omega_0 \exp\left[\beta\,(Z - H')\right] \quad (43)$$

حيث:

β: معلمة التدرج بالوحدات المعاكسة للارتفاع

H': الارتفاع المرجعي.

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}) وH' (km).

تُحسب قيمة كثافة الإلكترونات $N(Z)$ (el/cm^3) بدلالة الارتفاع Z (km) بواسطة المعادلة:

$$N(Z) = \{1.43 \times 10^7 \times \exp(-0.15\,H')\}\ \{\exp(\beta - 0.15)(Z - H')\} \quad el/cm^3 \tag{44}$$

لأغراض الحسابات، يُعطى منحنى تردد الاصطدامات بواسطة:

$$\nu(Z) = \nu_0 \exp(-\alpha Z) \tag{45}$$

حيث:

Z: الارتفاع (km)

ν_0: $1,82 \times 10^{11}$ الاصطدامات/ثانية

α: 0,15 km^{-1}.

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

$$\omega_r(Z) = 2.5 \times 10^5 \exp[\beta (Z - H')] \tag{46}$$

تتبع فائدة هذا النموذج الأيونوسفيري البسيط من سهولة تطبيقه ومن كونه يسمح فعلاً بإنشاء نماذج معطيات مقيسة تجريبياً. يتم تحديد قيم المعلمتين β وH' 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 أيونوسفيرياً 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 الأسي 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 المقيسة المتيسرة المعلمات الأيونوسفيرية التالية للتنبؤات بانتشار الموجات الميريامترية (VLF) والكيلومترية (LF). بالنسبة للنهار، يستعمل β = 0,3 وH' = 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

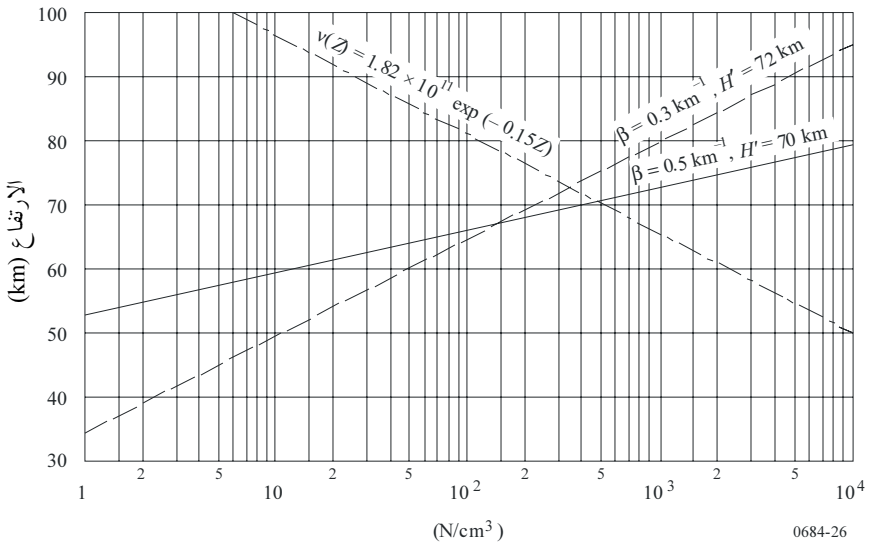
الزاوية السمتية للشمس، χ	β	H' (km)	الميل المغنطيسي، D
$\chi < 90,0$	0,3	74,0	$D < 70$
$90,0 < \chi < 91,8$	0,33	76,2	$D < 72$ < 70
$91,8 < \chi < 93,6$	0,37	78,3	$D < 74$ < 72
$93,6 < \chi < 95,4$	0,40	80,5	$D < 90$ (Pole) < 74
$95,4 < \chi < 97,2$	0,43	82,7	$D < 74$ < 72
$97,2 < \chi < 99,0$	0,47	84,4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

تتوضح العلاقة المميزة بدلالة الارتفاع لعدد معين من المنحنيات الأسية للنهار في الشكل 26 ولليل في الشكل 27. وفيما يخص انتشار الموجات (ELF)، تُمثل منحنيات كثافة الإلكترونات والأيونات في الشكل 28.

ترد كذلك في الجدولين 4 و5 دلالات عن منحنيات الاصطدامات بين الإلكترونيات والأيونات.

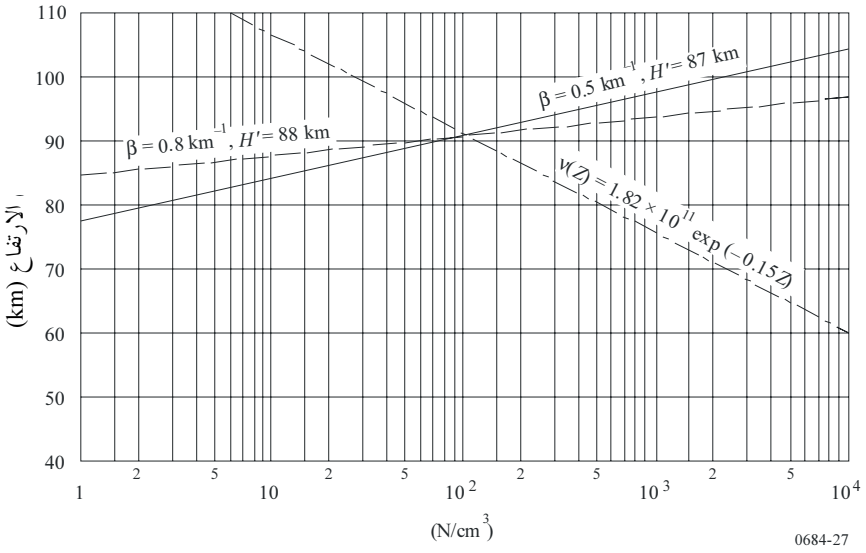
الشكل 26

منحنيات الكثافة الإلكترونية وتردد الاصطدامات خلال النهار



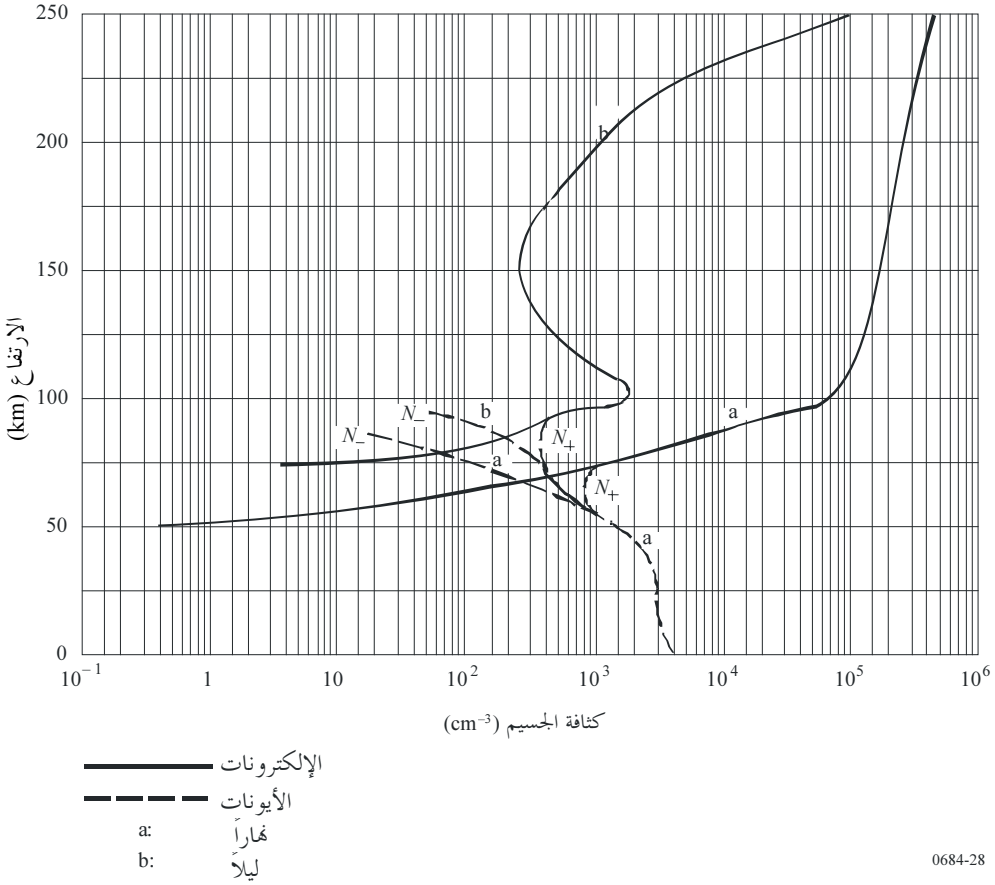
الشكل 27

منحنيات الكثافة الإلكترونية وتردد الاصطدامات خلال الليل



الشكل 28

منحنيات مكونات الأيونوسفير (نهاراً وليلاً)



الجدول 4

ترددات الاصطدامات الملاحظة خلال النهار في الأيونوسفير
بين الإلكترونات والأيونات (s^{-1}) بدلالة الارتفاع

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

الجدول 5

ترددات الاصطدامات الملاحظة خلال الليل في الأيونوسفير
بين الإلكترونات والأيونات (s^{-1}) بدلالة الارتفاع

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

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 وتُدمج هذه التغيرات في الصيغة WKB أو في صيغ تحويل الأسلوب.

تُعطى السماحية النسبية المعقدة للأرض، N_g، بواسطة:

$$N_g = \varepsilon/\varepsilon_0 - i\frac{\sigma}{\omega\,\varepsilon_0} \tag{47}$$

حيث:

σ : الإيصالية النوعية للتربة

$\varepsilon/\varepsilon_0$: 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 تتيسر طرائق أفضل للتنبؤ بشدات المجال للنطاقات الأقل من 150 kHz تقريباً. وبينما يمكن استعمال برنامج الانتشار حسب اسلوب 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:

طول المسير $d = 1\,911$ km

التردد $f = 80$ kHz

موقع الإرسال في البر $\begin{cases}\sigma = 2\times10^{-3}\ \text{S/m}\\ \varepsilon = 15\,\varepsilon_0\end{cases}$

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

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

تتمثل المراحل المتتالية للحساب فيما يلي:

المرحلة	*المعلمة*	*الشكل*	*الحدود المحسوبة*	*القيمة*
1	$p_t = 0{,}4$ kW		$V_u = 300\sqrt{0{,}4}$	= 190 V
2	$d = 1\,911$ km	2	ψ i	$\approx -0{,}36°$ $= 81°$
3	$\psi = -0{,}36°$	8	F_t	= 0,36
4	$\psi = -0{,}36°$	7	F_r	= 0,67
5	$d = 1\,911$ km $c = 3\times10^5$ km/s	4	$L - d$ $L = 1\,911 + (46\times10^{-6}\times3\times10^5)$	= 46 µs = 1 925 km
6	$d = 1\,911$ km	5	D	= 2,16
7	$f = 80$ kHz $i = 81°$		$f\cos i = 80\cos 81°$	= 12,5 kHz
8	$f\cos i = 12{,}5$ kHz الدورة الشمسية الدنيا، النهار (الصيف)	10	$\|\|R\|\|$	= 0,11
9			E_s	$= 11{,}4\times10^{-3}$ mV/m
10	$h = 70$ km (النهار) $h = 90$ km (الليل) $d = 1\,911$ km (قفزة واحدة)	4	التأخر	= 67 – 47 = 20 µs = 1,6 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 و2 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) والهكتومترية (MF) لترددات تقع ما بين 60 و150 kHz تقريباً.

عندما تُستعمل هذه الطريقة، يجب مراعاة انتشار الموجة الأرضية (التوصية ITU-R P.368) ومراعاة عامل الهوائي في السوية العمودية، وذلك باستعمال المعلومات الواردة في هذه التوصية وفي دليل القطاع ITU-R الخاص بالأيونوسفير وتأثيره على انتشار الموجات الراديوية.

ويمكن استعمال طريقة الدليل الموجي للتنبؤ بشدات المجال حتى حوالي 60 kHz، بإعطاء المعلمتين الأيونوسفيريتين β وH' القيمتين 0,3 و74 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، فإن خريطة عالمية للإيصالية (مثلاً التوصية ITU-R P.832) يجب أن تكون جزءاً من برنامج موجه لتطبيق عالمي. وخريطة الإيصالية النوعية للتربة شائعة الاستخدام في برنامج الانتشار الموجه المستعمل في الولايات المتحدة الأمريكية وكندا تقوم أساساً على الخصائص الجيولوجية.

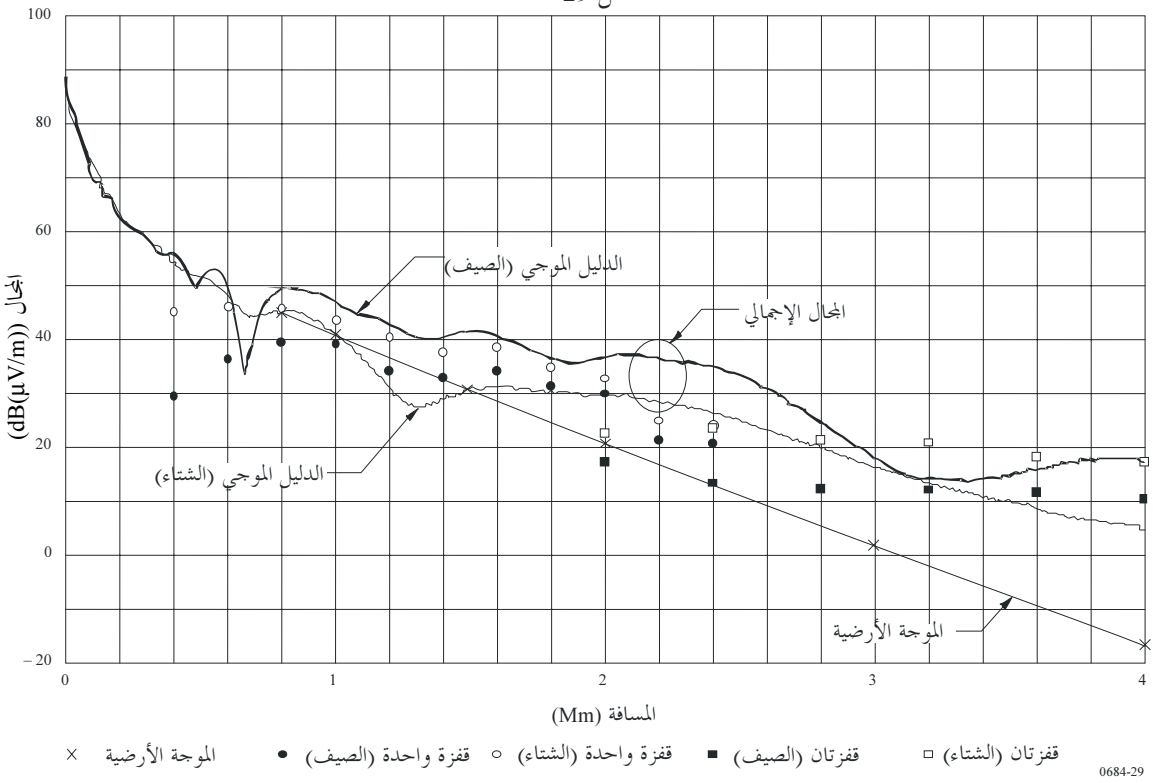
ويضم الدليل الصادر عن قطاع الاتصالات الراديوية الخاص بالأيونوسفير وآثاره على انتشار الموجة الراديوية طرائق أخرى لحساب شدة المجال ليلاً للموجات الكيلومترية LF وما فوقها حتى 705 1 kHz. ويتعين مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها بالطريقة المقترحة في هذه التوصية (طريقة القفزات) مع تلك الناتجة بالطرائق الأخرى.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

وتكون 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. وظهراً 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. ولمزيد من التفاصيل يرجى مراجعة الدليل السابق ذكره.

يمكن أن تُستعمل طريقة القفزات للتنبؤ بشدة مجال الموجات الهكتومترية (MF) والكيلومترية (LF) حتى تردد حوالي 60 kHz. ويمكن أن تُستعمل طريقة أسلوب الدليل الموجي للتنبؤ بشدات مجال الموجات VLF وLF، حتى تردد حوالي 60 kHz. ويبين الشكل 29 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 المعلمات في الشكل 26 للصيف ($H' = 70$ km وβ=0,5 km^{-1}) وللشتاء ($H' = 72$ km وβ=0,3 km^{-1}). وتمثل الدوائر المفتوحة والمغلقة على التوالي شدات المجال الصيفية والشتوية المحسوبة بطريقة القفزات. ولم تكن هناك أي محاولة لتمليس المعطيات في الفاصل الذي تتراكب فيه المسافات حيث تُحجب الموجة الأيونوسفيرية ذات قفزة واحدة وتهيمن الموجة الأيونوسفيرية ذات قفزتين. وتظهر الموجة الأرضية على حدة.

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 رغبنا 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.

الشكل 29


100
80
60
40
20
0
– 20
0
1
2
3
4
المجال (dB(μV/m))
المسافة (Mm)
الدليل الموجي (الصيف)
المجال الإجمالي
الدليل الموجي (الشتاء)
الموجة الأرضية
الموجة الأرضية
قفزة واحدة (الصيف)
قفزة واحدة (الشتاء)
قفزتان (الصيف)
قفزتان (الشتاء)
0684-29

إن الفرق بين شدات المجال النهارية، المقيسة للصيف والشتاء حسب طريقة القفزات، يتناقص عندما يتناقص التردد الفعال ($f\cos i$). وكان برنامج التنبؤ بالانتشار بأسلوب الدليل الموجي المستعمل لهذه المقارنة يتنبأ بتغير فصلي معاكس. وكان هذا البرنامج يستعمل المعلمتين (β وH') الواردتين في الشكل 26. مما يفسر الحذر المذكور أعلاه. ولا يمكن التنبؤ بالتغير الفصلي ويوصى باستعمال القيمتين 0,3 و74 على التوالي للمعلمتين β وH' 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 30 تغطية نصف الكرة الشمالي لمرسل افتراضي للموجات الميريامترية (VLF) الواقعة في وسط كندا. وتُجرى الحسابات (المجال بالوحدة (dB(μV/m))) لقدرة 1 kW مشعة عند تردد 24 kHz. ويُلاحظ 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 لغرينلاند. ونلاحظ أيضاً زيادة شدات المجال الناتجة عن الإيصالية الجيدة لماء البحر في خليج هودسون، بالمقارنة مع الإيصالية السيئة للأراضي القطبية الشمالية المحيطة به.

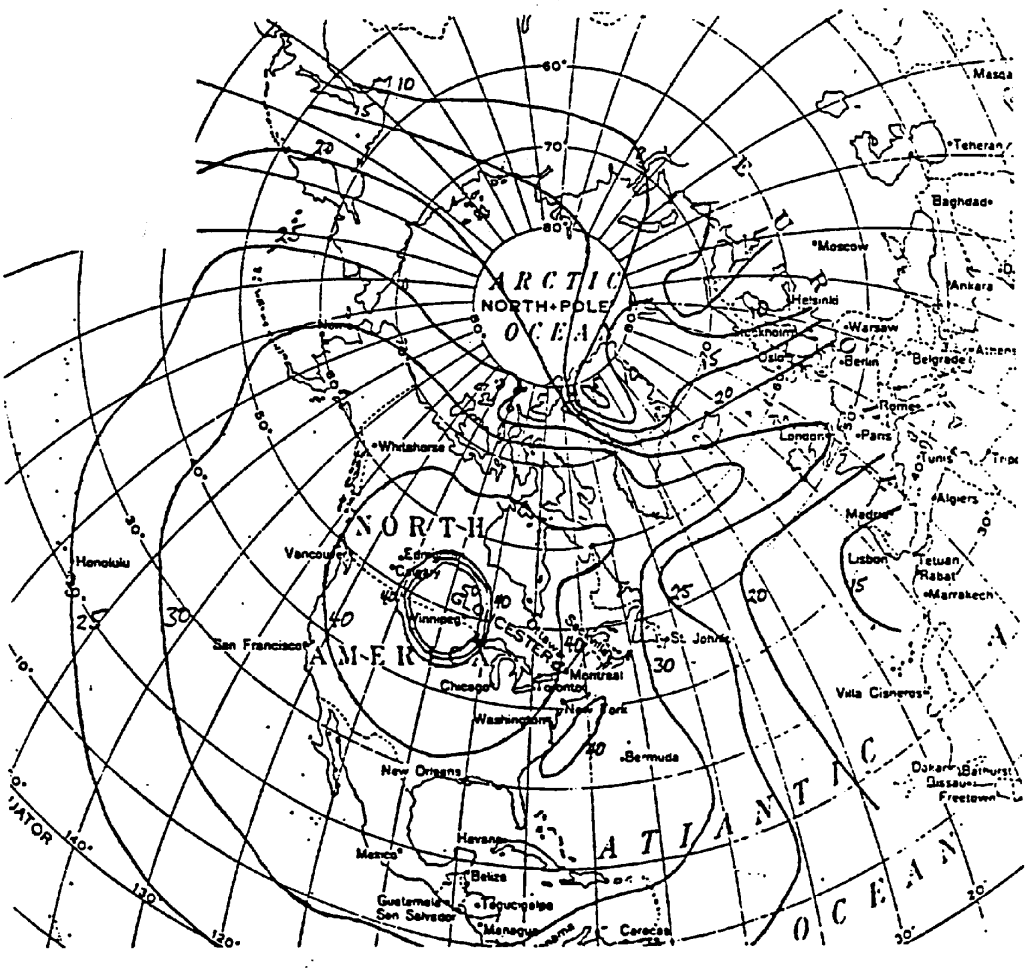
يبين مثال آخر أن الإيصالية النوعية للتربة على طول مجموع مسير الانتشار مهمة. أما بالنسبة لطريقة القفزات فتكون التربة الواقعة في جوار هوائيي الإرسال والاستقبال وحدها مهمة. ويقدم الشكلان 32 و33 تنبؤاً مفصلاً للمجال بدلالة المسافة، لثلاثة ترددات (15 و25 و35 kHz) لمسير افتراضي من هاليفاكس عبر أراضي لورانتان شيلد وشبه جزيرة أونغافا ذات الإيصالية السيئة (المسير مبين على الشكل 31). 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 نهاري على هذا المسير (الشكل 32). وتكون الاختلافات حسب الترددات أقل أهمية في الليل (الشكل 33).

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

الشكل 30

أكفة قيم شدة المجال (dB(μV/m)) لقوة مشعة ذات 1 kW
مع كون المرسل الافتراضي يقع في وسط كندا

(التردد: 24 kHz، ليوم صيف)

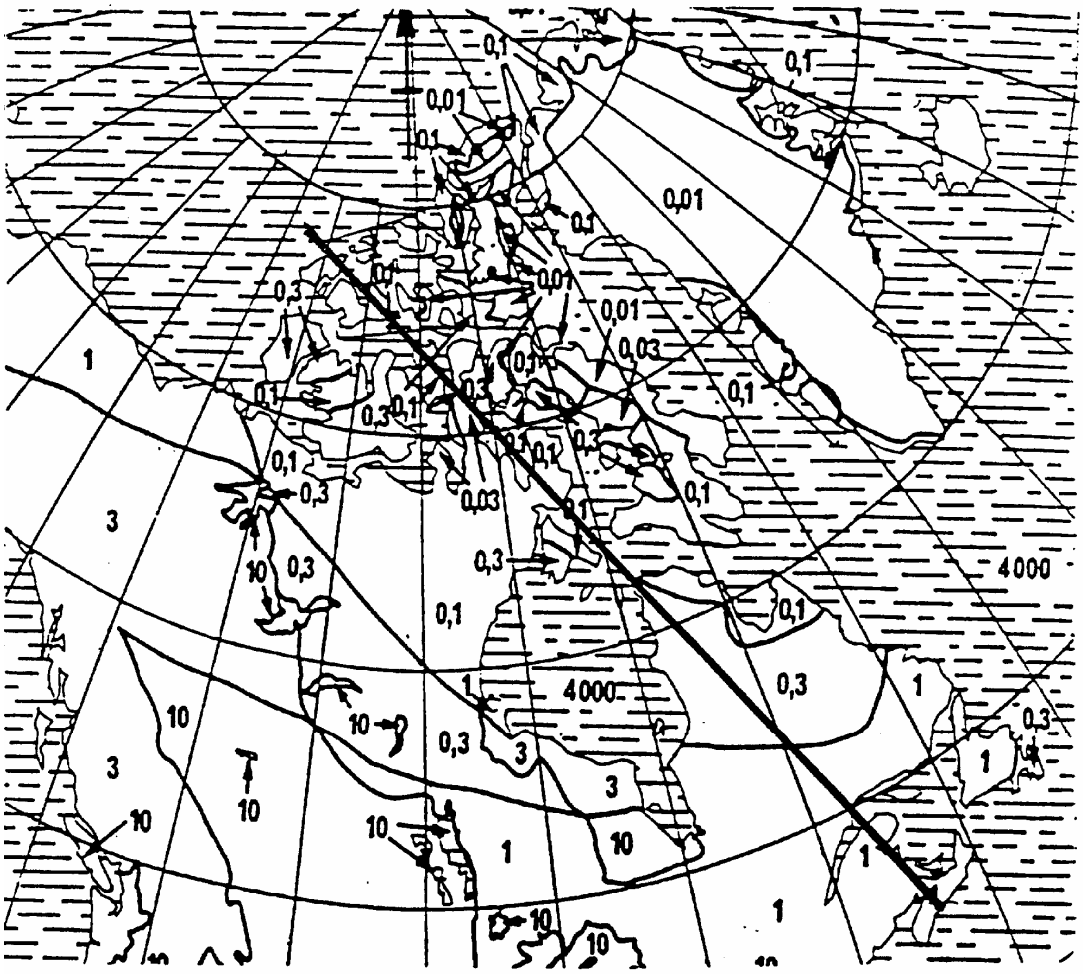


0684-30

الشكل 31

خريطة الإيصالية النوعية للتربة (mS/m)

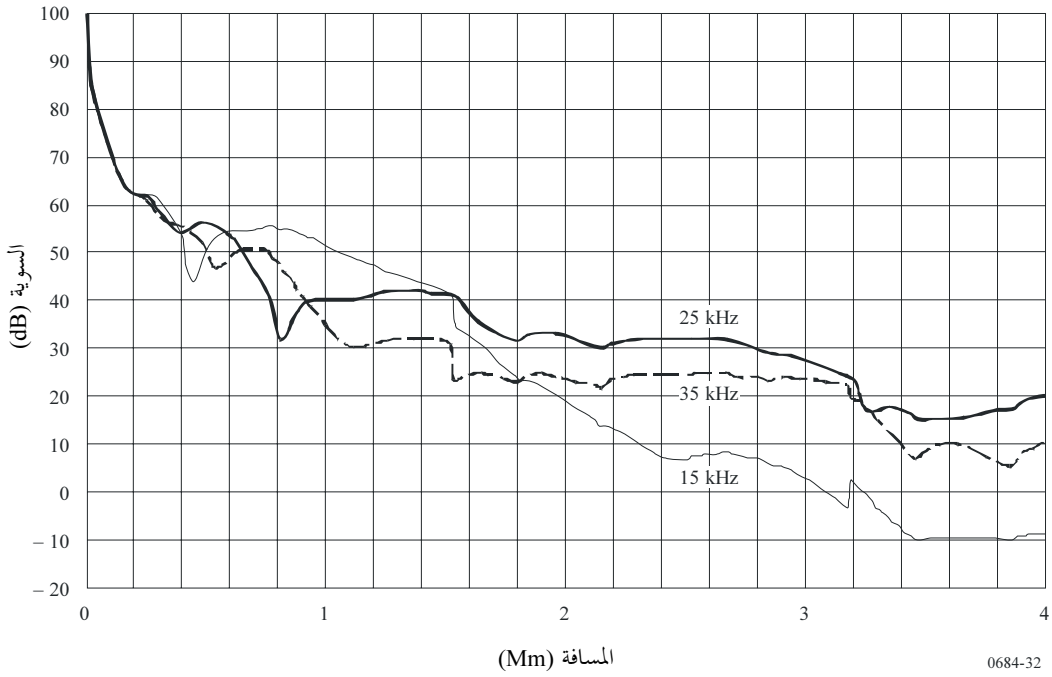
للموجات الميريامترية (VLF)، لكندا والقطب الشمالي



0684-31

الشكل 32

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 31



الشكل 33

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 31